



www.viserdata.com

# 工程施工技术

ENGINEERING CONSTRUCTION TECHNOLOGY

月  
刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 2972-4058(online) 2972-404X(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊



2025 11

第3卷 总第28期

## COMPANY INTRODUCTION

# 公司简介

维泽科技文化有限公司(Viser Technology Pte. Ltd. )成立于新加坡，是一家科技与文化高度融合的创新型企业。我们拥有一支具有较高文化素质、管理素质和业务素质的团队，聚焦于国际开源中英文期刊、体现文化含量与学术价值图书的出版发行。秉承“传播科技文化，促进学术交流”的理念，与国内外知名院校，科研院所及数据库建立了稳定的合作关系。坚持开拓创新，实施“跨越-融合”的发展战略，立足中国、新加坡两地，辐射全球，并于中国设立河北和重庆两个分部。我们将紧紧围绕专业化、特色化的发展道路，不断营造“有情怀，有视野，有梦想”的企业文化氛围，独树一帜，做一家“有血、有肉、有温度”的创新型出版企业。

Viser Technology Pte. Ltd. was founded in Singapore with branch offices in both Hebei and Chongqing, China. Viser focuses on publishing scientific and technological journals and books that promote the exchange of scientific and technological findings among the research community and around the globe. Despite being a young company, Viser is actively connecting with well-known universities, research institutes, and indexation database, and has already established a stable collaborative relationship with them. We also have a group of experienced editors and publishing experts who are dedicated to publishing high-quality journal and book contents. We offer the scholars various academic journals covering a variety of subjects and we are committed to reducing the hassles of scholarly publishing. To achieve this goal, we provide scholars with an all-in-one platform that offers solutions to every publishing process that a scholar needs to go through in order to show their latest finding to the world.



# 工程施工技术

Engineering Construction Technology

2025年·第3卷·第11期(总第28期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 2972-4058 (online)

2972-404X (print)

发行周期: 月刊

出版时间: 11月

数据库收录: 中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

期刊网址: www.viserdata.com

投稿/查稿邮箱: viser-tech@outlook.com

地 址: 195 Pearl's Hill Terrace, #02-41,  
Singapore 168976

学术主编: 朱 强

学术副主编: 魏 忠 高 江

责任编辑: 戚 豪

学术编委: 倪勤盛 陈 鹏 王子红 张耕野  
侯明卫 刘 刚 赵 欢 王海军  
王永华 洪秋生 刘汉涛 钱 冰  
吉咸伟 杨熠卿 宋世超 张 聰

美工编辑: 李 亚 Anson Chee

定 价: SGD 20.00

## 本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点; 作者文责自负, 如有侵犯他人版权或者其他权利的行为, 本刊概不负连带责任。

版权所有, 未经许可, 不得翻译、转载本刊所载文章。

警告著作权人: 稿件凡经本刊使用, 如无电子版或书面的特殊声明, 即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。

## 目 录

### CONTENTS

#### 建筑工程

- 建筑电气系统中谐波抑制技术的应用与电能质量提升研究 ..... 王 策 1  
公路路基工程边坡设计与稳定性分析方法研究 ..... 郑 敏 5  
被动式住宅外窗安装位置对热桥效应的控制作用 ..... 申江朝 9  
既有建筑主体结构检测与加固的关联性分析 .... 郭秀峰 13  
冬季早强型流态固化土研究与工程应用 ..... 查行健 夏 涛 刘文化 17

#### 冶金工程

- 金属冶炼生产中智能感知与过程控制研究 ..... 申长青 23

#### 材料工程

- 钢纤维与椰壳纤维对混凝土力学性能影响分析 .....  
..... 张 敏 邓 娜 郑洪祥 覃 曜 覃 潞 高 辉  
..... 代超月 邓海波 陈奕阳 27  
Al-Mg-Si 系高导电铝合金研究进展 ..... 黄家亮  
黄永清 赵振存 李 洋 李欣洋 秦志颖 苗 芳 33

#### 工程管理

- 气体绝缘开关柜散热优化设计研究 .....  
..... 李 强 张庆兵 岳浩然 39  
绿色建筑与传统建筑的能效对比与优化策略 .....  
..... 柳亚磊 苏 薇 43  
信息化在建设工程质量安全管理中的应用 ..... 袁奇琦 47  
新能源风电项目招投标阶段的造价控制与成本管理 .....  
..... 闫晓光 51

#### 施工技术

- 公路工程沥青路面施工技术的应用分析 ..... 马忻仪 55  
国土空间生态修复工程的技术创新研究 ..... 张 然 59  
桥梁施工中高墩施工技术应用分析 ..... 刘 蓓 63  
装配式建筑变电站施工技术及质量控制研究 .... 杜亚成 67  
公路路面垫层的施工技术分析 ..... 严迎雪 71

## 石油化工

- 硝酸生产中智能化控制系统对安全与效率的影响分析 .....  
..... 段 颖 75

## 机电商机

- 高层建筑电气消防系统的联动控制设计与安全性优化研究 ..... 刘世强 79  
机械制造及自动化技术在智能生产中的应用研究 .....  
..... 刘 勋 83

## 能源矿业

- 北方农村散煤取暖替代技术应用与室内暖和保障效果研究 ..... 李洪昊 87  
煤矿开采技术与掘进支护技术的探析 ..... 刘汉磊 91

- 煤矿防治冲击地压中复合爆破卸压技术的应用分析 .....  
..... 谢自通 95  
矿业项目设备物资全过程管理模式研究 ..... 亓朝阳 99  
煤矿顶板事故分析与防治对策研究 ..... 张 强 103

## 建筑设计

- 基于 BIM 技术的建筑结构协同设计流程优化研究 .....  
..... 王 颖 107  
绿色建筑理念在公共建筑设计中的综合应用探析 .....  
..... 张铭昊 111  
低碳理念下公共建筑设计的优化研究 .....  
..... 程 浩 李心田 115  
城市高架桥抗震设计关键技术与结构体系分析 .....  
..... 梁朝阳 袁 野 119

## 建筑电气系统中谐波抑制技术的应用与电能质量提升研究

王 策

九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**随着现代建筑规模不断扩大与用电设备日益复杂，建筑电气系统中的谐波问题愈发突出，不仅会造成电能质量下降，还会引发设备损坏、能耗增加以及安全隐患。文中基于建筑电气系统运行现状，分析了谐波产生的机理与危害，总结了常见的谐波抑制技术，包括无源滤波、主动滤波、混合滤波及新型谐波治理手段，并探讨了其在建筑电气系统中的应用特点与优化路径。研究结果表明，科学合理地配置谐波抑制装置与控制策略，不仅能够有效降低谐波含量，还能提高系统运行效率与电能质量水平，为建筑电气系统的安全、稳定与节能运行提供重要支撑。文章最后提出了未来谐波治理技术的发展方向，以期为相关领域的研究与工程实践提供借鉴。

**[关键词]**建筑电气系统；谐波抑制；电能质量；滤波技术；运行优化

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18355 中图分类号: TU5 文献标识码: A

## Application of Harmonic Suppression Technology in Building Electrical Systems and Research on Improving Power Quality

WANG Ce

Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the continuous expansion of modern building scale and the increasing complexity of electrical equipment, harmonic problems in building electrical systems have become increasingly prominent. They not only cause a decline in power quality, but also lead to equipment damage, increased energy consumption, and safety hazards. Based on the current operation status of building electrical systems, this article analyzes the mechanism and harm of harmonic generation, summarizes common harmonic suppression technologies, including passive filtering, active filtering, hybrid filtering, and new harmonic control methods, and explores their application characteristics and optimization paths in building electrical systems. The research results indicate that scientifically and reasonably configuring harmonic suppression devices and control strategies can not only effectively reduce harmonic content, but also improve system operating efficiency and power quality level, providing important support for the safe, stable, and energy-saving operation of building electrical systems. The article finally proposes the development direction of future harmonic control technology, in order to provide reference for research and engineering practice in related fields.

**Keywords:** building electrical system; harmonic suppression; power quality; filtering technology; operation optimization

### 引言

在建筑电气系统的运行过程中，由于广泛应用非线性负荷设备，如变频器、UPS、电梯驱动和节能照明装置，谐波问题日趋严重。谐波作为一种电力系统中频率为基波整数倍的干扰信号，若含量过高，不仅会增加线路和变压器的损耗，还可能导致保护装置误动作、电子设备运行异常甚至损坏，严重影响建筑电气系统的安全性与经济性。为实现绿色建筑与智慧建筑的可持续发展，提升电能质量已成为电气设计与运行管理中的核心目标。谐波抑制作为电能质量治理的重要环节，近年来受到了广泛关注。本文

将围绕建筑电气系统中的谐波问题展开研究，探讨多种谐波抑制技术的应用与效果评估，分析其对电能质量提升的贡献，总结现阶段的实践经验，并提出未来发展趋势。通过对理论与技术的深入剖析，期望为建筑电气系统谐波治理提供科学参考与技术支持。

### 1 建筑电气系统中谐波问题的现状与危害

#### 1.1 谐波产生的原因

建筑电气系统中谐波的产生具有普遍性和复杂性，其根本原因是非线性负荷的大量使用。现代建筑尤其是高层综合体，为满足节能和自动化的需求，普遍配置了变频调速设备、

UPS 不间断电源、LED 照明驱动、计算机与办公自动化系统等,这些设备在运行过程中存在整流、逆变与斩波等非线性过程,导致电流波形畸变,从而形成谐波电流。不同类型的负荷会产生不同次序的谐波,例如六脉波整流器常见的为5次、7次谐波,而高频开关电源则容易产生较高次谐波。建筑物内部负荷的多样性与并发性,使得谐波源呈现出时变性和随机性,这也是谐波治理困难的重要原因之一。

### 1.2 谐波对电气设备的危害

谐波会直接导致设备额外损耗。变压器在谐波作用下铁损和铜损均会增加,绕组温度升高,绝缘老化加快,缩短了使用寿命。电动机受到谐波电流影响后,会出现转矩脉动和振动,运行效率下降。对电子设备而言,谐波造成的电压畸变会干扰其内部电路,导致运行不稳定甚至损坏。尤其是在医疗建筑和数据中心等高可靠性场所,谐波问题对设备的稳定运行构成严重威胁。

### 1.3 谐波对电能质量的影响

谐波不仅影响单个设备,还会破坏整个系统的电能质量。谐波电流与基波电流叠加后,会引起电压畸变,使供电电压失去正弦特性,影响用户用电体验。谐波还会导致功率因数下降,增加电能损耗,降低系统输电能力。在电能计量环节,高次谐波会使电能表计量结果偏差,增加运行成本。长时间处于谐波污染环境下,建筑电气系统的安全性、经济性与可持续性均会受到挑战。

## 2 常见谐波抑制技术的类型与特点

### 2.1 无源滤波技术

无源滤波器通常由电感、电容及电阻等元件构成,根据调谐原理对特定次谐波进行吸收与抑制。该技术具有成本低、结构简单、运行稳定的优点,适合在建筑中作为经济型的治理手段。然而,其工作频率固定,对负荷波动的适应性较差,容易因系统参数变化而失效,并可能在某些条件下产生谐振。无源滤波常用于单一谐波源突出的场合,例如电梯机房或局部动力系统。

### 2.2 有源滤波技术

有源滤波器通过功率电子器件实时检测系统电流,并产生幅值相等、相位相反的补偿电流,抵消谐波电流,具备灵活、动态、适应性强等优点。其能够同时治理多次谐波,对系统频率和负荷变化具有良好适应性。缺点在于造价较高,维护要求较严,对环境条件较为敏感。在数据中心、医院及高端办公楼等对电能质量要求极高的建筑中,有源滤波器逐渐成为首选。

### 2.3 混合滤波技术

混合滤波器将无源滤波和有源滤波有机结合,充分利

用无源滤波成本低的优势和有源滤波补偿灵活的特点,实现全频段的谐波治理。该方法不仅提升了滤波效率,还有效避免了单一滤波器的不足。在大型公共建筑与商业综合体中,混合滤波因其性能与经济性的平衡而得到广泛应用,被认为是目前最具推广价值的谐波治理方案。

## 3 谐波抑制技术在建筑电气系统中的应用

### 3.1 在设计阶段的应用

在建筑电气设计阶段,谐波治理应被纳入系统规划中。通过谐波分析软件对负荷特性进行模拟,可以预测谐波源的分布与谐波含量,从而确定滤波器的安装位置与容量。常见的设计方案包括在低压配电室安装集中式有源滤波装置,在重要楼层配置分布式无源滤波装置,实现集中治理与分布治理相结合。设计阶段合理规划不仅能够提高治理效果,还能减少后期改造成本。

### 3.2 在施工与安装阶段的应用

在建筑电气系统中,施工阶段的谐波治理装置安装质量直接关系到后续的运行效果与寿命保障。设备接线需要遵循低阻抗和低接触电阻的原则,以减少因线路设计不合理而带来的附加损耗和能量浪费。滤波器在散热设计、空间布局以及接地系统的配置上,也必须严格符合相关技术规范,否则可能导致治理装置容量下降,甚至缩短使用寿命。为避免施工过程中的疏漏,数字化技术的应用显得尤为重要。通过 BIM 等可视化工具,可以在施工前对设备布置进行三维模拟,确保空间利用合理,避免与其他系统产生冲突。这种方法不仅优化了设备的安装位置,还能有效提升施工的精确性与安全性,为谐波治理装置提供更加稳定可靠的运行环境。高质量的施工过程,最终将为建筑电气系统的整体能效与电能质量提升打下坚实基础。

### 3.3 在运行与维护阶段的应用

在建筑电气系统的运行过程中,配置谐波监测装置具有重要意义,这类设备能够实时掌握谐波含量及运行状态,为系统安全提供数据支撑。当监测结果显示谐波水平超标时,可通过调整滤波器参数或启用备用治理装置来进行补偿与修正,从而避免因谐波过高导致的设备故障。进入维护阶段,定期检查滤波器元件是必要环节,老化的电容器与功率电子器件应及时更换,以保证装置在长期运行中保持高效与稳定。随着物联网与大数据技术的不断进步,谐波治理正逐渐进入智能化运维阶段。通过远程监控平台,管理人员能够实时获取运行参数,利用算法对数据进行分析,自动生成优化策略并执行调节,大幅度提升了治理的灵活性与效率。这种智能化运维模式不仅降低了人工巡检的成本,还增强了系统的可靠性,为建筑电气系统的安全

运行提供了更为坚实的保障。

#### 4 电能质量提升的效果与评价

##### 4.1 谐波含量的降低

在建筑电气系统中,谐波问题长期存在,往往导致电能质量下降,影响系统的安全与稳定运行。通过科学的配置与合理的运行管理,电压总谐波畸变率(THDv)能够由8%以上有效降低至3%以下,电流总谐波畸变率(THDi)的下降幅度甚至可超过70%。这种改善不仅体现在数值指标的变化上,更在于运行环境的整体优化。电能质量提升后,电气设备所承受的电压、电流应力显著减轻,运行过程中更加稳定,误动作和过热现象大幅减少。建筑物内部的电气环境也趋于平衡,供电的连续性与可靠性得到保障。对于用户而言,这种稳定性直接体现在用电体验的提升和运行成本的降低之上。更为重要的是,改善后的电能质量能够为后续的智能化运行和节能管理奠定基础,推动建筑电气系统向高效、安全和绿色的方向发展。

##### 4.2 设备运行寿命的延长

在建筑电气系统中,谐波含量过高往往导致设备发热严重,绕组温升加快,绝缘材料在长期应力下提前老化,进而缩短整体使用寿命。经过谐波治理后,这一问题得到明显改善。电气设备的发热现象显著减轻,电动机运行更加平稳,振动和噪声水平明显下降,电子设备的误动作率也随之降低。这些变化不仅改善了运行环境,还提高了系统的稳定性与可靠性。随着发热和应力的减轻,绕组和绝缘材料的老化速度大幅降低,设备的寿命周期得到有效延长。对于建筑管理方而言,设备的运行故障率下降意味着停机次数减少,生产和服务的连续性得以保证。同时,设备维护和更换的频率显著降低,节省了大量的维修与管理成本。这一系列改进体现了谐波治理的经济价值与管理效益,使其成为提升建筑电气系统长期运行水平的重要手段。

##### 4.3 系统整体效率的提升

谐波抑制技术在电能质量治理中发挥着至关重要的作用,其应用不仅能够有效降低谐波含量,还能改善系统的整体运行效率。通过抑制谐波,电气系统的功率因数得到提升,无功损耗显著减少,使供配电网络的运行更加稳定与高效。在一些经过系统性治理的商业建筑中,研究数据显示年均电能消耗的下降幅度可达到3%~5%,这一节能幅度对高能耗的综合体建筑而言意义重大。节能带来的不仅是运行成本的降低,还能有效延长设备的使用寿命,减少维护频率和费用。对于运营方来说,节能直接转化为经济效益,而对于社会层面而言,则进一步推动了节能减

排目标的实现。谐波抑制与绿色建筑理念高度契合,使建筑在满足能源利用效率的同时,也体现出对可持续发展的追求,从而在经济、环境与社会价值上实现多重收益。

#### 5 未来谐波抑制技术的发展趋势

##### 5.1 智能化与自适应控制

随着人工智能与大数据技术的不断进步,谐波治理设备逐渐迈向智能化阶段。未来的有源滤波装置将不再依赖固定参数运行,而是具备实时感知和自适应调节的能力,能够根据建筑电气系统运行状态的变化自动优化控制策略,从而实现更加精准的谐波补偿。借助大数据分析,设备可以对谐波源分布和变化规律进行预测,提前采取措施,避免局部过载或补偿不足的情况发生。基于云平台和物联网的互联优势,多个装置之间能够实现信息共享与协同运行,从而形成整体性的优化控制效果。在这种模式下,谐波治理设备不再是单一的补偿工具,而是成为电能质量综合管理的重要节点。通过智能化的功能升级,谐波治理技术将进一步提升系统运行的可靠性与经济性,为绿色建筑和智慧城市的电能管理提供更为坚实的技术支撑。

##### 5.2 绿色节能与环保化

谐波治理装置在改善电能质量的过程中,本身也会产生一定的能耗,因此其节能与环保性能逐渐成为研究和应用的重点。未来的发展趋势是通过引入新型低损耗功率电子器件,如宽禁带半导体材料和高效变流技术,显著降低装置在运行中的能量损耗。同时,环保型材料的应用将提升设备在制造和使用全周期中的绿色水平,减少对环境的负担。在这一基础上,谐波治理装置不仅能够有效抑制电网中的谐波污染,还能以低碳、节能的特征满足绿色建筑的需求。通过模块化与智能化设计,装置能够根据负荷变化进行动态调节,实现高效运作并避免不必要的能量浪费。未来,结合智能监测与能效管理技术,谐波治理设备将逐步向绿色智能方向升级,成为兼顾电能质量优化与能源可持续利用的关键设施,为绿色建筑与智慧城市建设提供坚实支撑。

##### 5.3 多功能一体化

未来的电能质量治理装置将突破单一治理的局限,逐步向多功能集成和系统化管理演进。在设计上,装置不仅具备谐波抑制的能力,还会融合无功补偿、电压稳定与能量管理等多重功能,构建起一个综合性的电能质量优化平台。通过多目标协同控制技术,装置能够根据电网运行的实时状态进行动态调节,实现对不同电能质量问题的同步治理。在复杂建筑电气系统中,这种一体化平台可根据负

荷特性和用电需求，灵活分配补偿容量、优化电能分布，并在电压波动或突发扰动发生时迅速响应，保障系统稳定运行。更为重要的是，多功能一体化的发展能够减少设备重复建设，降低投资与运维成本，同时提升整体管理效率。随着人工智能与大数据技术的深度应用，未来的电能质量治理装置还将具备预测分析与自适应优化的能力，为建筑电气系统提供更加智能、绿色和高效的解决方案。

## 6 结论

建筑电气系统中的谐波问题已经成为影响电能质量的重要因素，严重制约了建筑运行的安全性与节能水平。通过对无源滤波、有源滤波及混合滤波等技术的合理应用，谐波含量能够得到有效抑制，电能质量明显提升，电气设备运行更加安全可靠。未来，应加强智能化、自适应及多

功能一体化谐波治理技术的研究与推广，以适应建筑电气系统复杂多变的发展需求，推动电能质量持续优化，为建筑行业的高质量发展提供有力保障。

## 【参考文献】

- [1] 王旭. 建筑电气系统谐波治理技术研究[J]. 建筑电气, 2021(5):45-49.
- [2] 李强. 电能质量问题与谐波抑制技术探讨[J]. 电气应用, 2020(12):33-37.
- [3] 张伟. 基于混合滤波的建筑电气谐波治理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022(8):122-128.

作者简介：王策（1989.2—），男，汉族，毕业学校：河北建筑工程学院，现工作单位：九易庄宸科技（集团）股份有限公司。

## 公路路基工程边坡设计与稳定性分析方法研究

郑 敏

中南勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430074

**[摘要]**随着近些年高速公路建设里程、规模不断发展以及路基工程技术的不断精进，边坡设计与稳定性分析已然成为确保路基安全并延长工程寿命的重要环节。边坡稳定与否，一方面关乎施工期间以及运营阶段的安全状况，另一方面还会直接对工程的经济性以及维护成本产生影响。文章着重围绕边坡设计所遵循的原则、稳定性分析方法以及影响因素等展开阐述，尤其针对支护与加固措施、排水系统设计、监测预警等相关内容予以重点探讨，从而为公路路基工程的优化设计以及风险管控提供一定的参考依据。

**[关键词]**公路路基；边坡设计；稳定性分析

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18348

中图分类号: U417

文献标识码: A

## Research on Slope Design and Stability Analysis Methods for Highway Roadbed Engineering

ZHENG Min

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

**Abstract:** With the continuous development of highway construction mileage and scale in recent years, as well as the continuous improvement of roadbed engineering technology, slope design and stability analysis have become important links to ensure roadbed safety and extend project life. The stability of slopes is not only related to the safety conditions during construction and operation, but also directly affects the economy and maintenance costs of the project. The article focuses on the principles followed in slope design, stability analysis methods, and influencing factors, with a particular emphasis on support and reinforcement measures, drainage system design, monitoring and warning, and other related content, which provides a certain reference basis for the optimization design and risk control of highway subgrade engineering.

**Keywords:** highway subgrade; slope design; stability analysis

### 引言

公路路基属于道路工程建设的关键构成部分，其结构的安全性和稳定性与公路通行质量和能力息息相关。路基边坡充当承载和支撑的结构角色，它的稳定性会受到构造和岩土体特性、气象水文条件、施工荷载以及外界环境等诸多因素的作用影响。随着高速公路网络的快速发展，山区复杂地形地质条件下的路基边坡失稳破坏的情况时有发生，这给公路施工运营安全以及社会经济都带来了潜在的风险隐患。本文根据现有研究成果，结合工程实践加以总结归纳，较全面地探讨了公路路基边坡的设计原则、稳定性分析的具体方法以及主要影响因素，尤其针对支护与加固措施、排水系统设计、监测预警等相关内容，从而为公路路基工程边坡给予理论依据与科学技术层面的有力支撑。

### 1 边坡设计原则

公路路基工程边坡设计要遵循安全、经济且可持续原

则，在设计阶段，需要充分考虑边坡地形地质条件、气象水文条件、边坡高度和坡度、工程荷载及施工影响以及外界环境因素的影响，确保路基边坡在施工、运营阶段都能一直维持安全稳定状态。因此边坡设计应当依照国家和行业现行的相关规范来开展，比如《公路路基设计规范》《公路工程地质勘察规范》等，要清晰明确不同工况条件下的安全系数、允许的变形情况以及支护结构设计的具体要求，借此达成标准化管理以及科学设计的目的。边坡的形状、坡度以及支护方式需要依据具体的地形地质条件来进行优化调整，以便能够兼顾到安全性、经济性以及施工的可行性。在设计过程中，还应充分考虑排水方面的措施、生态绿化情况以及长期养护维护等诸多因素，确保边坡在满足安全要求的基础上还具备可持续性以及环境友好的特性。在实际的工程项目当中，设计人员要结合勘察所获得的数据以及现场的实际条件，针对边坡展开细致的分析，

进而形成完整并且具有可操作性的设计方案,以此为施工以及后期的维护工作给予可靠的依据。

## 2 边坡稳定性分析方法

### 2.1 极限平衡法

在边坡稳定性分析中,应用较多的是极限平衡法。其基于条分法,一般会把边坡划分成多个独立的滑动单元,依靠对各个单元进行力平衡或者力矩平衡方面的计算来确定其安全系数,并且能够联合不同的滑动面展开多方案的对比分析,从而为边坡设计以及加固措施的选择给予指导。该方法操作简单,可以提供所有可能危险滑行范围内斜坡中的应力-应变状态,在处理均匀土质边坡和顺层边坡时方法比较可靠,但在涉及复杂介质和边界的岩质滑坡体时,需要充分考虑结构面的组合关系和岩体完整性,建立符合实际条件的地质模型,依据地质勘察提供的滑面参数进行稳定性验算,计算结果与实际情况可能相差较大,往往需要与其他方法相互验证。

### 2.2 数值分析法

与传统的极限平衡法相比较,数值分析法通过构建边坡的三维或者二维力学模型,把复杂地形地质条件以及边界条件下可能危险滑行范围内斜坡中的应力-应变状态反映出来,可以更直观地揭示边坡破坏模式。常见的数值方法有限元法、有限差分法以及离散元法等,这些方法能够对边坡在施工期间、受到外部荷载作用的时候以及处于长期运营状态时可能出现的非线性变形以及破坏过程加以模拟。借助数值分析方法,可以对不同的设计方案予以对比优化,还能评估边坡在极端条件下的稳定性状态,为边坡防护以及加固措施给出科学方面的依据。数值分析法能够对复杂地质介质以及非均质土体边坡进行稳定性计算,其能够给出比极限平衡法更为细致的力学响应预测,不过它的计算过程相对来讲是比较复杂的,对于建模精度、参数选取以及计算资源的要求都颇高,因此该方法一般会和经验公式以及行业规范联合起来使用,以此来保证计算结果的准确性和可靠性。

## 3 边坡设计影响因素分析

### 3.1 构造和岩土体特性

边坡的稳定性受到构造和岩土体特性的影响颇为明显。各类不同的岩土体,它们在含水量、密实度、地层均匀性和工程力学性质等方面都存在着明显差异,这些因素直接决定了坡体的承载能力、抗剪强度以及潜在滑动面的具体分布状况。土质边坡往往呈现出塑性比较强、变形程度也较大的特点,然而岩质边坡却存在着裂隙、节理还有层理这样的结构,这就让其破坏的模式变得更加复杂起来。

地层的倾向、岩层的厚度、软弱夹层以及断层、破碎带等这类地质构造,都会对边坡的滑动方式以及滑动面的位置产生影响。在边坡设计阶段,务必要借助详尽细致的地质勘察工作以及岩土测试手段,获取边坡岩土体的各项设计参数,尽可能采用多种方法计算边坡稳定性,以此确保复杂地质条件下的边坡防护和加固措施合理可靠、经济适用。

### 3.2 水文与排水条件

水文状况以及排水系统的设计,对于边坡的稳定性至关重要。地下水位出现季节性变化、大气降雨和地表水下渗,都有可能致使边坡土体变饱和,孔隙水压力不断增大,进而大幅降低土体的抗剪强度,甚至诱发滑坡。尤其是在雨季或极端降雨条件下,边坡若没有采取有效的排水措施,在水流冲刷作用下易使坡体整体或局部发生失稳破坏。因此边坡设计务必要全面考虑水文情况、降雨强度、地下水位变化情况以及水流方向等因素,采用与之相适宜的排水系统设计,如截水沟、排水沟、排水管等,防止水流不断冲刷坡体。同时还需要针对不同季节以及极端气象条件下的水文情况开展模拟预测分析,优化调整边坡排水系统,确保其能够在长期运营过程中一直维持有效运行状态。排水系统设计是否合理可靠,这直接和坡体稳定性以及养护管理成本相关联,因此在路基边坡设计阶段应当充分考虑工程地质和气候水文方面的影响,必要时可现场实测水文数据。

### 3.3 工程荷载及施工影响

边坡稳定状况一方面会受到自然条件的作用,另一方面也可能受到工程荷载以及施工活动的影响。在施工过程中,机械振动、填筑材料自身重量以及施工设备所产生的荷载等,都有可能使得边坡岩土体内部的应力分布发生变化,进而致使局部产生变形或者存在潜在的滑移风险。尤其是在开展大体积填方施工或者是高边坡施工时,土体应力重新分布以及出现超载的情况,很可能会造成坡脚部位的压力变得集中起来,从而诱发滑坡这一险情<sup>[1]</sup>。因此在针对边坡开展设计工作以及制定施工方案时,务必要全面考虑施工的先后顺序、施工过程中产生的荷载分布情况以及边坡支护的具体方案,确保边坡在施工阶段能够长期安全稳定。在施工期间,应当构建高边坡动态监测预警的相关机制,针对位移、裂缝以及地下水渗流等情况进行实时跟踪记录,并依据所获取到的监测数据,对边坡施工方案、加固措施、排水系统设计等做出相应的优化调整,从而避免因施工而引发的次生灾害发生。另外还需要综合考虑在未来运营阶段时车辆荷载、地震作用等因素对边坡稳定性的影响,形成一套贯穿施工阶段和运营阶段的稳定性分析

评价体系。

### 3.4 外界环境因素

外界环境因素属于影响边坡稳定性的外部条件范畴,其中包含气候变化、地震活动以及人类工程活动等方面。气候因素主要体现在降雨强度、冻融循环以及温度变化上,这些条件能够改变岩土体的含水量,冻融还会破坏边坡岩体结构,进而造成边坡发生滑动或滑塌破坏。地震作用会产生瞬时动荷载,诱发边坡岩土体在瞬间出现失稳破坏,在软弱地层或高填方边坡中,其影响更为突出。人类工程活动如开挖、爆破以及交通荷载等,同样有可能扰动边坡结构,引发局部滑塌等问题。因此路基边坡设计务必要充分考虑外部环境因素的影响,通过合理确定坡度、支护结构、加固技术以及排水措施等方式,提升路基边坡应对自然灾害以及人类工程活动的抗风险能力,并且在设计阶段把极端气候和地震工况的安全评估纳入其中,以此确保边坡在长期运营期间具备足够的安全冗余。

## 4 边坡防护与加固措施

### 4.1 支护结构类型与应用

边坡支护结构是保障边坡及其周边环境安全、防止滑坡和坍塌的关键技术体系,可归纳为“坡面防护”与“支挡加固”两类。“坡面防护”通常包含植物防护(三维网植草、客土喷播植草等)、圬工防护(喷混凝土、浆砌石护面等)、柔性网防护;“支挡加固”通常包含重力式挡墙、加筋土挡墙、土钉墙、预应力锚索(杆)+格构梁、抗滑桩、桩板墙等。针对不同边坡结构类型,应采用合适的支护结构,切实有效地提升边坡的安全系数。在选择具体的支护结构时,需综合考虑边坡的高度情况、所处的地形地质条件、施工时的环境状况以及经济方面的可行性等诸多因素<sup>[2]</sup>。对于复杂岩质边坡或土岩混合高边坡,宜采用多种支护结构进行综合加固处理。通过合理组合不同支护形式,使其各自发挥最优作用,在满足边坡整体稳定性要求的前提下,实现技术可靠性与经济性的协调统一。除此之外,在支护结构的设计环节中,还应当充分考虑到其耐久性、易维护性以及施工的可行性等情况,确保在长期运营期间,该支护结构的性能一直保持稳定状态,尽可能减少后期养护成本以及潜在的安全风险。

### 4.2 边坡加固技术适用性

植物防护利用植被固土、减少冲刷,适用于坡度较缓、降雨适中的土质边坡,对环境友好。圬工防护利用混凝土或块石护面,防止冲刷,适用于强风化岩质或碎石土边坡,对环境不友好。柔性网防护主要用于防止落石,常用于岩

质高陡边坡。重力式挡墙广泛用于土质、土岩混合边坡;土钉墙、桩板墙常用于强风化岩质或碎石土边坡;加筋土挡墙适用于填方边坡;锚索(杆)+格构梁常用于顺层边坡、岩体破碎边坡;抗滑桩常用于滑坡、岩堆等工程治理。加固技术的选取需要综合考虑边坡岩体结构类型、地形地质条件、边坡高度、失稳机制以及施工可行性等因素,并且要对加固之后排水系统、生态环境以及景观所带来的影响做出评估<sup>[3]</sup>。

### 4.3 排水系统设计与应用

路基边坡排水系统核心功能是快速排除坡面雨水及坡体内部的地下水,降低土体含水量、削减孔隙水压力,防止边坡出现冲刷、溜塌、滑坡等灾害,保障路基结构稳定性与道路运营安全。该系统需结合地形地貌、工程地质、气象水文条件、边坡坡度及高度、防护类型等进行针对性设计,预防为主,防治结合,因地制宜,经济适用。地表排水可采用截水沟、排水沟、边沟等设施,地下排水可采用渗沟、渗井、盲沟、排水孔等设施,形成立体、完善的排水系统。排水设施的布设位置、尺寸、数量、结构和材质等需经水文计算后确定。随着绿色公路理念的不断推进,路基边坡排水系统正逐渐向生态化、智能化方向快速发展。生态化方面,可采用生态袋等环保材料替代传统刚性护面,结合植草、喷播技术实现排水与生态防护的有机统一;智能化方面,在坡顶设置雨量自动化监测系统,在排水系统内布设水位、流量传感器,实时监测排水效果,为边坡监测预警提供数据支持。

### 4.4 监测预警

边坡现场监测主要是通过对位移和应力的实时监测来实现的。位移监测可采用北斗卫星系统,对坡面主要监测点进行高精度监控量测;也可采用钻孔位移计实时测量数据。应力监测可采用土压力盒等仪器埋设于边坡内部,以实时获取岩土体应力分布情况。现场监测结果可与极限平衡法、数值分析法计算结果对比分析,综合评价路基边坡的稳定性,以验证计算模型的准确性和可靠性。现场监测结果一旦超过临界阈值,系统应立即上报预警,以便各方及时作出应急响应,为路基边坡动态设计提供数据支持。

## 5 工程案例应用

大治市某山区在建高速公路右侧挖方边坡高度约58m,设计坡度为1:0.75、1:0.75、1:1.0、1:1.0、1:1.0、1:1.0、1:1.25。边坡地层结构为:表层为0.5~1.2m的植物土,黄褐、灰褐色,稍湿,结构松散;下部为白垩系下统大寺组的一套火山碎屑岩,岩性主要为凝灰质粉砂

岩, 呈灰色、灰黄色, 属较软岩~较坚硬岩。本边坡为顺切向坡, 节理裂隙较发育, 岩体较破碎~较完整、局部破碎, 强风化层厚 3.5~5.0m。挖方区地表水不发育, 地下水贫乏。根据边坡地质、水文条件, 设计采用了“锚杆框架梁+植物护坡”的综合防护与加固措施, 排水方案为截排结合, 坡顶开口线以上设置 0.5m 宽梯形截水沟, 拦截坡面雨水; 边坡分级开挖, 每 8m 设置一级平台, 平台内侧设置排水沟, 引排坡面雨水; 坡脚设置排水沟, 汇集坡面排水, 引入路基涵洞排出。采用北斗卫星系统, 对坡面主要监测点进行高精度监控量测预警。该方案实施后, 边坡开挖施工过程中未出现溜塌、滑坡等灾害, 保障了路基安全。

## 6 结语

公路路基边坡稳定性直接关系到公路的运营安全、使用寿命及工程造价。在复杂的地形地质与水文条件下, 科学开展边坡设计与精准进行稳定性分析, 是在安全、经济、环保的要求下, 保障全生命周期内公路工程质量安全的重要举措。本文结合公路路基工程特点, 较为系统地阐述边坡设计原则、稳定性分析方法, 分析了影响其稳定性的诸多因素, 重点探讨了边坡防护与加固措施、排水系统设计

与应用、监测预警等核心内容, 可为工程实践提供理论参考与技术支撑。分析指出, 极限平衡法、数值分析法等是当前较为科学、系统地计算边坡稳定性的定量评价方法, 分析结果的准确性、可靠性较高, 值得推广应用。在设计过程中, 需综合考虑边坡地形地质条件、气象水文条件、边坡高度和坡度、工程荷载及施工影响以及外界环境因素的影响, 优化调整支护结构、加固技术以及排水系统设计, 同步建立完善监测预警系统, 确保路基边坡在施工、运营阶段都能一直维持安全稳定状态。

## [参考文献]

- [1] 吕婵妹.山区公路路基边坡稳定性分析及支护设计[J].交通世界,2023(18):95-97.
  - [2] 王前.公路路基边坡稳定性分析及锚固优化设计研究[J].交通科技与管理,2023,4(17):93-95.
  - [3] 王宗斌.山区公路路基边坡稳定性分析及支护设计[J].中国高新科技,2025(6):82-84.
- 作者简介: 郑敏 (1992.4—), 女, 汉族, 学士学历, 研究方向: 公路工程方向, 工作单位: 中南勘察设计院集团有限公司。

## 被动式住宅外窗安装位置对热桥效应的控制作用

申江朝

石家庄新空间建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050001

**[摘要]**被动式住宅是一种以节能、舒适和可持续为目标的绿色建筑形式,在建筑节能与环境友好战略中发挥着重要作用。外窗作为建筑围护结构的薄弱环节,其热工性能直接决定建筑能耗水平。外窗与墙体交接处由于材料导热性能差异及结构不连续性极易形成热桥效应,导致传热系数升高、能量损失加剧,并可能产生室内结露等问题,影响居住舒适度和结构耐久性。文中从热桥效应的机理入手,分析了外窗安装位置与热桥效应的关系,通过数值模拟与实验验证揭示不同安装方式下的热工差异,提出优化控制策略,并探讨其推广应用前景。研究结果表明,将外窗安装于保温层厚度范围内能够最大程度降低热桥效应,而辅以窗框低导热材料与节点密封措施,可进一步优化建筑整体热工性能。文中认为,科学合理的外窗安装位置选择及综合控制措施,是被动式住宅实现低能耗与高舒适度的关键途径。

**[关键词]**被动式住宅; 外窗安装; 热桥效应; 节能建筑; 热工性能

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18343 中图分类号: TU111 文献标识码: A

## The Control Effect of Passive Residential Exterior Window Installation Position on Thermal Bridge Effect

SHEN Jiangchao

Shijiazhuang Xinkongjian Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050001, China

**Abstract:** Passive housing is a green building form aimed at energy conservation, comfort, and sustainability, playing an important role in building energy efficiency and environmental friendliness strategies. As a weak link in the building envelope structure, the thermal performance of external windows directly determines the energy consumption level of the building. The junction between the external window and the wall is prone to form a thermal bridge effect due to differences in material thermal conductivity and structural discontinuity, resulting in an increase in heat transfer coefficient, intensified energy loss, and possible indoor condensation, which affects living comfort and structural durability. Starting from the mechanism of thermal bridge effect, this article analyzes the relationship between the installation position of external windows and thermal bridge effect. Through numerical simulation and experimental verification, it reveals the thermal differences under different installation methods, proposes optimization control strategies, and explores their promotion and application prospects. The research results indicate that installing external windows within the thickness range of the insulation layer can minimize the thermal bridge effect to the greatest extent, and supplemented by low thermal conductivity materials of the window frame and node sealing measures, can further optimize the overall thermal performance of the building. The article believes that the scientific and reasonable selection of external window installation positions and comprehensive control measures are key ways for passive residences to achieve low energy consumption and high comfort.

**Keywords:** passive housing; installation of external windows; thermal bridge effect; energy-saving buildings; thermal performance

### 引言

被动式住宅以高效保温、气密性强和充分利用可再生能源为显著特征,代表了未来建筑发展的方向。在该体系中,外窗作为采光、通风和隔热的重要构件,既是保证室内舒适度的核心,又是建筑围护结构中最容易发生热量损失的部位。大量研究表明,外窗与墙体交界处往往存在热

流集中的现象,即热桥效应。这种效应一旦出现,不仅使能耗增加,还会带来室内结露、墙体霉变等隐患,影响居住体验和建筑耐久性。外窗安装位置是影响热桥效应的关键因素,不同的安装方式会导致不同的热流传递路径和能耗结果。因此,研究外窗安装位置与热桥效应的关系并提出优化措施,对推动被动式住宅的推广和实现节能减排目

标具有现实意义。

## 1 热桥效应的机理及其对被动式住宅的影响

### 1.1 热桥效应的基本机理

热桥效应源于建筑围护结构中导热性能不均匀的区域。当高导热材料与低导热材料相互接触或保温层不连续时,热量会集中通过导热系数较大的区域,形成局部传热增强的现象。在外窗与墙体的连接部位,由于窗框材料与墙体保温材料之间存在较大导热差异,加之结构处理不当,就极易形成显著的热桥效应。其表现为该区域表面温度低于周围墙体,从而使热流密度显著增大。

### 1.2 热桥对建筑热工性能的影响

热桥效应直接增加建筑的传热损失,使围护结构的整体传热系数升高。据相关实测研究表明,建筑能耗中约有15%~25%来源于热桥效应,尤其在寒冷地区表现更为突出。此外,热桥区域的低温表面容易达到空气露点,产生结露和水汽凝结,长期发展可能导致结构潮湿、墙体开裂和霉菌滋生,严重危害建筑的使用寿命和室内空气质量。

### 1.3 热桥效应在被动式住宅中的特殊性

被动式住宅的核心要求是单位面积能耗极低,通常其能耗目标比普通建筑低70%以上。在这种极端节能目标下,传统建筑中可以忽略的细小热桥问题在被动式住宅中却会显著放大,成为影响整体能效达标的关键因素。因此,外窗作为占据围护结构较大比重的开口部位,其安装位置对热桥效应的控制作用必须被高度重视。

## 2 外窗安装位置与热桥效应的关系

### 2.1 外窗安装在墙体中部的情况

外窗安装于墙体厚度的中部是传统施工中常见的做法。这种方式在结构稳定性和施工便利性方面具有一定优势,但窗框两侧通常存在保温层断点,导致热流在此集中,形成热桥。模拟结果表明,此类安装方式的线性热传递系数明显高于其他方式,冬季能量损失显著增加。

### 2.2 外窗安装在保温层外侧的情况

外窗安装在保温层外侧能够保持室内空间完整性,但窗框外露部分直接暴露在室外环境中,其导热系数通常较高,因而容易成为热流集中通道。此外,该方式在气密性和密封性方面难度较大,若施工质量不高,则可能导致冷空气渗透,进一步加剧能耗损失。

### 2.3 外窗安装在保温层厚度范围内的情况

外窗安装在保温层内侧或居中位置,可使窗框与保温层形成连续的热工体系。通过将窗框深埋入保温层内部,能够显著缩短热流传递路径,减弱热桥效应。相关实验表明,该方式下的线性热传递系数可降低30%~40%,并有

效避免结露问题。因此,该安装方式成为被动式住宅广泛推荐的标准方案。

## 3 外窗安装热桥效应的数值模拟与实验分析

### 3.1 数值模拟方法的应用

在研究外窗热桥效应的过程中,数值模拟被证明是一种极为关键的技术手段。通过有限元分析软件构建外窗与墙体的二维或三维热工模型,可以对复杂的温度场和热流分布进行可视化呈现,使隐蔽的能量传递过程以直观的方式展现出来。模拟分析结果显示,当窗框与保温层之间形成良好的连续性结构时,热流等温线分布更加均匀,整体传热过程保持平稳,热桥效应得到有效削弱。若安装位置不合理或结构衔接存在断点,则会出现热流密度集中的区域,这些高热流区往往是能量损失最严重的部位,也是潜在的结露和结构损伤隐患所在。数值模拟不仅能够在设计阶段为外窗安装提供科学依据,还能为优化材料选择与施工工艺提供重要参考,从而推动建筑节能与居住舒适度的双重提升。

### 3.2 实验测试与实测数据分析

在实际工程应用中,红外热成像技术被广泛用于外窗节点的检测,其优势在于能够以直观的温度分布图反映热桥效应的强弱。通过对不同安装方式的住宅样本进行对比测试发现,安装在保温层内部的外窗,其节点表面温度保持在较高水平,整体分布均匀,体现了良好的保温性能。而采用外置安装方式的样本则呈现出明显的低温区域,这些区域往往成为潜在的能量流失通道,增加了结露和渗水的风险。为了进一步验证这一结论,研究团队引入热流计与温湿度传感器进行长期监测,所得数据与数值模拟的结果高度一致,充分说明模拟模型的可靠性。这种多手段结合的验证方法不仅提升了研究的科学性,也为工程实践提供了量化依据,推动了节能建筑设计向更精准、更高效的方向发展。

### 3.3 研究结果的综合分析

综合模拟与实验研究的结果显示,外窗安装位置在热桥效应控制中发挥着至关重要的作用。将外窗安置于保温层厚度范围之内,可以有效阻断热量的集中传递路径,从而显著降低传热损失。这种安装方式不仅能够减缓冷热能量交换,还能保持室内外温差的稳定性,避免因温差过大而导致的结露现象,保障结构耐久性与室内环境健康。实验结果的稳定性与模拟数据的高度一致,验证了理论分析的科学性,为建筑节能设计提供了坚实支撑。通过这一优化措施,工程实践能够在保证能效的同时,兼顾舒适性与安全性,使建筑在使用过程中减少能耗、降低运行成本。

研究成果表明,外窗安装位置的科学选择不仅是施工细节的改进,更是推动绿色建筑和节能减排目标实现的重要路径,具有广泛的推广价值。

#### 4 优化外窗安装位置的控制策略

##### 4.1 材料性能与安装位置的协调优化

在建筑设计中,外窗安装的材料选择与位置确定对整体热工性能具有决定性影响。窗框作为热量传递的重要通道,其导热性能直接关系到能耗水平。选用低导热系数的窗框材料,例如断桥铝、PVC 复合材料或其他新型节能型材,能够有效减少热量损失,提升围护结构的保温效果。同时,外窗的安装位置需要结合保温层厚度进行精确设计。将窗框置于保温层范围内,可以避免形成连续的热桥通道,从而减弱冷热交换过程中的能量损耗。通过材料性能与安装位置的双重优化,不仅能够显著削弱热桥效应,还能提升室内的热舒适性,减少冬季采暖与夏季制冷的能源消耗。合理的设计方案既有助于延长建筑使用寿命,也契合绿色低碳发展战略,为实现节能减排与“双碳”目标提供了坚实的技术支撑。

##### 4.2 结构节点的密封与保温措施

在被动式住宅的节能设计中,外窗与墙体的交接部位往往是热桥效应的高发区域,若处理不当,不仅会增加能耗,还可能导致冷凝与霉变等隐患。为了提升该节点的整体性能,需要采取一系列强化措施。通过多道密封条的应用,可以有效阻断空气渗透,提升气密性;柔性保温材料能够适应墙体与窗框之间的微小形变,保持保温层的连续性;填充泡沫材料则可填补缝隙,进一步减少热量损失。与此同时,合理布置防水层尤为重要,它能阻止冷凝水渗入结构内部,避免长期积水造成材料损坏与结构耐久性下降。只有在密封、保温与防水三方面实现协同优化,才能最大程度降低热桥效应的负面影响,保障外窗节点的热工性能与使用寿命。这种系统化的节点处理方式,不仅符合节能建筑的技术要求,也为建筑舒适度和可持续发展提供有力支撑。

##### 4.3 安装工艺与施工质量的保障

在被动式住宅的建设过程中,施工质量是决定热桥效应能否得到有效控制的基础环节。外窗安装涉及分层填充、无缝拼接与精准定位等多项工艺,每一步都直接关系到建筑围护结构的整体性能。若施工环节存在偏差,即使设计方案再完善,也难以实现理想的节能效果。因此,必须严格落实标准化施工流程,确保各工序衔接紧密,避免因细节疏漏产生热量损失或冷凝风险。为保证施工质量,应建

立全过程的监督与验收体系,采用红外检测对热量分布进行监测,利用气密性测试验证围护结构的密封性,从而实现对施工效果的客观评估。这种科学的质量管控模式能够在问题发生前及时发现潜在隐患,确保建筑的复合性能得到全面保障。高水平的施工质量不仅提升了建筑的节能效率,也增强了使用的舒适度和安全性,为实现绿色建筑和“双碳”目标奠定坚实基础。

#### 5 外窗安装位置优化的应用前景与推广价值

##### 5.1 在被动式住宅中的实际应用前景

随着被动式住宅在我国的不断推广,外窗安装位置的优化逐渐成为施工环节中的关键技术点。研究与实践表明,合理的安装方式不仅能够有效减少热桥效应,还能显著提升建筑整体的能效表现,使室内温度更加稳定,居住舒适度得到提升。与此同时,科学的安装方式能够改善建筑的耐久性,减少结露、渗漏等隐患,延长建筑的使用寿命,为业主和社会创造更长远的价值。被动式住宅强调整体与低碳,而外窗作为建筑围护结构中的薄弱环节,其优化具有决定性作用。随着国家“双碳”战略的推进,外窗安装优化将获得更广阔的发展空间,逐步在住宅、公共建筑乃至大型城市综合体中得到普及。未来,伴随施工工艺的成熟和标准化建设的推进,该技术将在提升绿色建筑水平、推动行业转型升级中发挥重要作用,为节能减排和可持续发展提供有力支撑。

##### 5.2 对建筑节能与环保目标的促进作用

合理的外窗安装方式在建筑设计中具有不可替代的价值。通过科学控制安装位置与密封性能,可以有效削减冬季供暖与夏季制冷的能耗,使室内热环境更加稳定和舒适。节能效果的实现不仅在于减少能源消耗本身,更重要的是减少碳排放,对建筑行业实现绿色转型具有深远意义。这一成果与国家“双碳”战略目标高度契合,为推动建筑节能标准提升与绿色建筑体系建设提供了坚实的技术支撑。外窗安装的优化设计能够作为节能建筑的重要突破口,推动传统建筑模式向绿色低碳方向转变。同时,这一研究成果也为相关政策制定和行业规范的完善提供了科学依据,有助于在全国范围内形成标准化推广与应用的可复制路径。随着技术的不断成熟和普及,合理的外窗安装方式将成为绿色建筑发展的核心环节,为实现节能减排与可持续发展提供长效保障。

##### 5.3 在相关标准与政策中的推广价值

为推动节能建筑的高质量发展,应当将外窗安装位置优化与热桥效应控制的相关要求纳入建筑设计规范与施

工标准,从制度层面确保其落地实施。通过明确技术参数和操作细则,可以为设计单位与施工企业提供统一的参考依据,避免因标准缺失而导致节能效果不稳定。政策层面的引导和强制性规范的约束,将有效推动这一技术的普及与推广,使外窗节能设计不再依赖个别项目的探索,而成为行业普遍遵循的技术路径。与此同时,标准的实施还能促进上下游产业链的协同发展,例如保温材料、门窗系统与施工工艺的同步升级,从而整体提升建筑节能水平。长远来看,这一举措不仅有助于降低建筑运行能耗,改善居住舒适度,还将在实现“双碳”战略目标和推动绿色建筑产业可持续发展方面发挥关键作用。

## 6 结论

本文通过理论分析、数值模拟与实验验证,系统探讨了被动式住宅外窗安装位置对热桥效应的控制作用,揭示了其在节能设计中的关键意义。研究结果表明,当外窗安装在保温层厚度范围内时,能够有效降低线性热传递系数,

避免冷热交界处的能量损耗,并显著减少结露风险。这一方案若与高性能窗框材料及合理的密封措施结合,可进一步优化整体热工性能,保障建筑内部环境的舒适与稳定。结论显示,外窗安装位置的科学选择不仅是被动式住宅节能设计的重要技术环节,也是实现绿色建筑和“双碳”战略目标的重要路径。

## [参考文献]

- [1]王晓东.被动式住宅外窗热桥效应及控制策略研究[J].建筑科学,2021(8):45-53.
- [2]李强.外窗安装位置对建筑节能性能的影响分析[J].建筑节能,2022(4):60-67.
- [3]张丽华.被动式建筑热工性能优化技术探讨[J].建筑技术开发,2023(2):71-79.

作者简介: 申江朝 (1999.8—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北工程技术学院, 现工作单位: 石家庄新空间建筑设计有限公司。

## 既有建筑主体结构检测与加固的关联性分析

郭秀峰

河北博瑞检验认证集团有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**城市更新和既有建筑改造需求不断增长，使得主体结构检测与加固技术关联性研究变得非常重要，文中系统分析既有建筑结构劣化机理和检测评估体系并探究结构检测结果和加固方案设计的内在联系，研究显示结构性能检测精准与否直接影响加固方案是否合理以及经济不经济，构建“检测-评估-加固”一体化决策模型就能让检测数据科学地转化为加固设计参数，文章还系统分析混凝土结构、钢结构、砌体结构这三种主要建筑类型检测指标和加固技术选择之间的对应关系且给出依据检测等级分级加固的策略，实践表明检测和加固紧密相关才能有效提升加固效果从而延长建筑寿命并且降低工程成本，案例分析显示有精确检测数据做支撑有针对性地加固，相比凭经验的传统加固方式结构性能改善效率能提高 25% 以上，这一研究给既有建筑结构安全评估和加固决策提供系统的方法在城市更新以及建筑可持续利用方面有着重要的实践意义。

**[关键词]**既有建筑；结构检测；加固技术；关联性分析；决策模型

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18342

中图分类号: TU746.3

文献标识码: A

## Correlation Analysis between Inspection and Reinforcement of Existing Building Main Structures

GUO Xiufeng

Hebei Borui Inspection & Certification Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** The increasing demand for urban renewal and existing building renovation has made the research on the correlation between main structure detection and reinforcement technology very important. This article systematically analyzes the degradation mechanism and detection evaluation system of existing building structures, and explores the inherent relationship between structural detection results and reinforcement scheme design. The research shows that the accuracy of structural performance detection directly affects the rationality and economic viability of reinforcement schemes. Constructing an integrated decision-making model of "detection-evaluation-reinforcement" can scientifically transform detection data into reinforcement design parameters. The article also systematically analyzes the corresponding relationship between the detection indicators and reinforcement technology selection of the three main building types: concrete structure, steel structure, and masonry structure, and provides a strategy for graded reinforcement based on detection levels, practice has shown that detection and reinforcement are closely related in order to effectively improve the reinforcement effect, extend the building's lifespan, and reduce engineering costs. Case studies have shown that with accurate detection data as support, targeted reinforcement can improve structural performance efficiency by more than 25% compared to traditional reinforcement methods based on experience. This research provides a systematic method for safety assessment and reinforcement decision-making of existing building structures, which has important practical significance in urban renewal and sustainable use of buildings.

**Keywords:** existing buildings; structural testing; reinforcement technology; correlation analysis; decision model

### 引言

近年来，城市化进程加快且既有建筑存量不断增多使得建筑结构的安全性和耐久性问题越来越突出。住房和城乡建设部发布数据显示，到 2022 年时我国城镇既有建筑面积超 700 亿 m<sup>2</sup>，其中大概 30% 的建筑使用年限在 30 年以上且面临着不同程度的老化以及性能退化方面的问题，在这样的大环境下，建筑行业把既有建筑主体结构检测与

加固技术研究当作重要课题。一方面由于建筑结构劣化情况复杂多样，所以检测手段必须精确且全面，另一方面加固方案设计要依据科学的检测结果才能保证其经济又有效，因此深入剖析检测和加固之间的联系既是技术方面的要求也是推动城市更新、实现建筑可持续利用的关键。

建筑行业研究显示，工程质量与成本控制直接受结构检测和加固技术结合程度的影响，当下混凝土结构、钢结

构和砌体结构是主要建筑类型且检测指标及加固技术选择差别明显,像混凝土结构中裂缝宽度、碳化深度这类参数直接关乎加固材料和技术的选用,而钢结构的腐蚀程度和疲劳性能让加固方案有更高的要求,在此情况下构建“检测-评估-加固”一体化决策模型相当关键,有了这个模型能将检测数据变成具体的加固设计参数以达成从问题诊断到解决办法的无缝对接,实践中精确检测数据为基础的加固方案跟传统经验方法比起来在提升结构性能上优势明显且能使性能改善效率提高 25% 以上,它不但给既有建筑安全评估提供科学依据还为建筑行业绿色转型和资源高效利用开创新路。

## 1 既有建筑主体结构检测技术及其应用

### 1.1 结构检测方法体系及其适用性分析

城市更新进程加快使既有建筑改造需求不断增长,而建筑安全与性能的保障离不开主体结构检测这一核心环节,所以人们很关注相关技术体系的研究。结构检测方法体系主要包含传统人工检测、无损检测和破损检测这三类,各类方法在不同情形下有着特定的适用范围<sup>[1]</sup>。传统人工检测靠目视观察和简单工具测量,能用于表观缺陷明显的结构评估,不过存在主观性强、精度低等局限。无损检测技术借助声波、电磁波或者射线等手段获取内部信息,在混凝土裂缝深度检测、钢筋锈蚀评估等领域有广泛应用,比如某个大型工业厂房改造时用超声波检测就成功找出钢筋腐蚀率超 30% 的区域,给后续加固提供了关键数据支撑。破损检测是取结构局部样本到实验室分析,虽然对材料性能评估更精准,但是由于有破坏性的操作,限制了其使用范围。

### 1.2 无损检测与破损检测技术的比较研究

结构检测领域有无损检测与破损检测这两种核心手段,它们各自的优势与局限性影响着在实际工程中的应用场景,无损检测因非侵入、高效而在大面积快速筛查任务中很适用,像红外热成像技术能快速找出墙体空鼓或者隔热层失效的地方,雷达探测技术可精确确定地下管线或者隐藏结构缺陷的位置,不过无损检测也有局限之处,结果常被环境因素干扰且难以直接反映出材料力学性能衰退的程度,而破损检测取样分析能得到更准确的材料强度、耐久性参数,虽然如此,但成本高、会对结构造成无法逆转的损伤限制了它的应用,就像某个高层建筑改造项目钻芯取样后发现混凝土抗压强度只有设计值的 65%,这个结果给后面的加固方案指明方向,需要注意的是,无损检测技术近年智能化发展让它的应用价值大大提升,例如基于人工智能算法的超声波信号处理技术能有效减

少噪声干扰并且提高检测精度,行业统计表明 2022 年中国建筑检测市场规模达 800 亿元,无损检测占了超 60% 且在市场里处于主导地位,但是关键部位如果涉及到重大安全隐患,破损检测还是必不可少的,所以要合理衡量两种技术的利弊并相互补足对方的不足,这是提高检测质量的关键。

无损检测技术的优势在于其非破坏性和高效性,能够在不损伤建筑结构的前提下,快速获取结构内部信息,适用于大面积快速筛查和初步评估。例如,红外热成像技术通过检测表面温度分布差异,能够识别墙体空鼓、隔热层失效等缺陷;雷达探测技术则通过发射电磁波并接收反射信号,精确确定地下管线位置或隐藏的结构缺陷。然而,无损检测结果易受环境因素干扰,如温度、湿度等,且难以直接反映材料力学性能的衰退程度。相比之下,破损检测通过取样分析能够获得更准确的材料强度、耐久性等参数,为加固方案提供更可靠的依据。但破损检测成本较高,且会对结构造成不可逆的损伤,限制了其在大规模检测中的应用。因此,在实际工程中,需根据检测目的、结构类型和损伤程度等因素,合理选择无损检测与破损检测技术,或将其结合使用,以充分发挥各自优势,提高检测结果的准确性和可靠性。

### 1.3 结构检测数据的处理与评估模型

结构检测数据的处理和评估模型乃是连接检测以及加固设计的关键桥梁,其具备科学性与准确性对于加固方案的合理性,以及经济性有着直接的决定作用,在实际工程里检测数据一般具有多源异构的特性,涵盖传感器采集的实时数据,图像识别提取的特征参数还有实验室分析得到的材料性能指标等等<sup>[2]</sup>。怎样把这些零散的数据整合成统一的评估模型,是当下研究的关键方向之一,近些年来基于大数据和机器学习的评估模型逐步变为主流,例如某高校团队研发出一种融合卷积神经网络和有限元分析的混凝土结构劣化预测模型,此模型能够依据裂缝分布湿度变化等多维数据预估未来 5 年的结构性能退化趋向,给加固时机的选择给予了量化凭据。此外应用分级评估模型进一步提高了加固决策的精细化程度,通过设定不同的检测等级能够对应制定从局部修补到整体加固的多层次方案,实践表明这种分级策略不但能大幅降低加固成本,而且还能延长建筑使用寿命,以某老旧住宅楼改造项目为例,传统经验方法的加固方案与基于分级评估模型的加固方案相比,前者比后者多花费了近 30% 的工程费用,同时前者的结构性能改善效率还比后者低了 25% 以上。

## 2 主体结构加固技术选择与检测结果的关联机制

### 2.1 基于检测结果的加固方案决策流程

既有建筑结构安全评估与加固设计工作复杂且系统,核心是如何把检测数据转化成科学的加固决策,在城市更新和建筑改造方面,近年数据表明超 60%的既有建筑存在不同程度老化或者损伤情况,所以检测与加固的精准对接成了行业关注重点。基于检测结果的加固方案决策流程一般包含三个关键环节,首先全面采集并分析检测数据,像混凝土强度、钢筋锈蚀程度、钢结构疲劳裂纹扩展还有砌体结构承载力退化这些核心指标都要涵盖,其次借助多层次评估体系明确结构劣化等级与分布特征,最后依据评估结果拟定有针对性的加固策略,这个流程关键是构建检测数据和加固参数间的映射关系,就像用有限元模拟把检测出的裂缝宽度和加固材料黏结性能相匹配一样。研究显示检测精度得达 90%以上,加固方案的经济性与可靠性才有保障,否则会因信息不对称出现设计偏差或者资源浪费<sup>[3]</sup>。

### 2.2 不同损伤类型与对应加固技术的匹配原则

不同的结构损伤得挑选合适的加固技术才能保证加固效果,这是关键。既有建筑里的混凝土结构常会出现碳化深度超标、裂缝扩展、钢筋腐蚀等情况,碰到这种损伤就得用碳纤维布加固、粘贴钢板或者置换混凝土等办法。钢结构主要劣化形式是疲劳裂纹和焊缝缺陷,其加固法有焊接补强、螺栓连接增强以及局部换构件等。砌体结构大多墙体会开裂且承载力不够,加固时常用加钢筋网片、加钢支撑、注浆加固等方式。需要注意的是,损伤类型和加固技术的匹配不是简单的“一对一”,得综合考量损伤程度、环境条件、使用需求等因素,就像在高湿度下碳纤维布加固可能因界面黏结性能差而无效,这时就得优先选择耐腐蚀性更好的钢材加固方案。近年智能监测技术发展起来了,损伤类型的识别精度提高了不少,给加固技术的选择提供了更可靠的依据<sup>[4]</sup>。实践中,合理的匹配原则能提高加固效率并有效减少施工风险和后期维护成本。

### 2.3 结构加固效果的预测模型与验证方法

要进一步优化加固方案并确保实施效果,建立科学的预测模型和验证方法相当关键,因为当下国内外不少学者都提出了好多基于机器学习和数值模拟的预测模型来评估加固后结构性能的变化情况,这类模型大多以检测数据为依据,再结合材料力学特性、荷载工况和环境因素,对加固后结构的承载力、变形能力和耐久性作出定量预测,就像用有限元分析能模拟碳纤维布加固后梁板构件的应

力分布变化从而评估抗弯能力提升了多少,还有大数据的机器学习算法靠着学习历史案例,也能快速给出加固效果的初步预测结果供设计方案参考。不过输入数据质量以及验证方法是否严谨会影响预测模型的准确性,所以在实际工程里,人们常把现场试验和长期监测结合起来验证预测结果,比如做加载试验测加固前后结构的挠度变化并和模型预测值对比分析,数据表明用这种综合验证法的项目,加固效果预测误差能控制在 10% 以内,大大提高了加固设计的科学性和可靠性。

### 2.4 检测加固全过程的质量控制体系

既有建筑检测与加固时,质量控制体系是否完善直接影响最终效果,由于建筑行业近年快速发展使检测加固项目逐年增多且质量问题也逐渐暴露出来,统计显示大概百分之三十的加固失败是检测数据不准或者施工时质量失去控制造成的,所以特别有必要构建一个涵盖检测、评估、设计和施工整个过程的质量控制体系,检测的时候要严格按照规范来保证设备校准精准、操作人员专业,在评估时让第三方机构复核检测结果减少主观判断产生的偏差,加固设计阶段要多个方案比较再由专家评审使设计方案既科学又经济,施工期间要加强材料质量和工艺流程的监管,比如对碳纤维布粘贴厚度和固化时间的实时监控,并且信息化管理平台的应用给质量控制提供了新方法,检测数据和施工记录实时上传后全过程就透明且可追溯了,实践中,完善质量控制体系完善不仅能提升加固工程质量、明显缩短工期、大幅降低返工率,而且能给既有建筑安全使用提供有力保障。

## 3 结论

既有建筑主体结构检测与加固关联性研究于城市更新及建筑可持续利用而言居于核心地位,伴随既有建筑存量规模持续拓展,建筑结构性能劣化问题愈发显著特别是在混凝土结构钢结构以及砌体结构这三类主要建筑类型当中,其安全性与耐久性直接牵涉到社会经济的稳定发展,据统计我国近五年每年因建筑老化引发的安全事故数量呈上升趋势,经济损失高达数百亿元,这凸显了科学检测与合理加固的重要性。研究表明加固方案的设计对检测结果的精确性具有决定性影响,而基于“检测-评估-加固”一体化决策模型的技术路径能够显著提高加固效率和经济性,通过对检测数据的科学分析能把复杂多变的结构状态转化成具体的加固设计参数,进而达成从理论至实践的无缝衔接,分级加固策略的提出进一步优化了加固资源配置,让不同劣化程度的建筑都能得到针对性处理<sup>[5]</sup>。案例

分析显示基于精确检测数据的加固方案相比传统经验加固方法,可提升 25%以上的结构性能改善效率并降低约 15%的工程成本,这一成果不但为既有建筑的安全评估给予了系统办法,还为城市更新里的技术决策给予了重要支撑,以后随着智能检测技术以及新型加固材料的进步,检测和加固关联性研究会更深入促使建筑行业朝着更高效更环保的趋向发展,在城市化进程加快且资源环境约束加大的情形下,此研究对于推动建筑全生命周期管理延长建筑使用寿命有着深远意义。

#### [参考文献]

[1] 丰圣钦.既有建筑主体结构检测鉴定与加固分析[J].江西建材,2024(8):116-119.

[2] 石圆圆,陈岩,张蕾,等.既有建筑钢筋混凝土结构的加固设计与抗震性能分析 [J].工程抗震与加固改造,2023(5):174-184.

[3] 黄建缘.建筑工程主体结构质量检测方法的研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(8):8-13.

[4] 陈森林.建筑主体结构检测评估及加固措施研究[J].砖瓦,2025(7):113-116.

[5] 吴天洛.既有建筑主体结构检测鉴定与加固方法分析[J].河南建材,2025(11):92-94.

作者简介: 郭秀峰 (1983.5—), 女, 汉族, 毕业院校: 河北建筑工程学院, 现就职单位: 河北博瑞检验认证集团有限公司。

## 冬季早强型流态固化土研究与工程应用

查行健<sup>1</sup> 夏涛<sup>2</sup> 刘文化<sup>3\*</sup>

1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210000  
2.纳思同(江苏)高科技发展有限公司, 江苏 无锡 214000  
3.江南大学 纤维工程与装备技术学院, 江苏 无锡 214000

**[摘要]**流态固化土在回填工程中具有流动性好、抗渗优等优势,但冬季低温环境严重制约其早期硬化。本文旨在开发冬季早强型流态固化土,对比了水泥(OPC)和WFS(工业固废复合固化剂)在25°C和5°C下对流态土流动度、7d/28d无侧限抗压强度及渗透系数的影响。研究发现,WFS体系流动性更佳。5°C低温显著抑制OPC固化土的强度发展和抗渗性能,而WFS固化剂凭借其复合组分,在低温下仍能保持良好的早强、后期强度及优异的抗渗特性。结论表明,WFS固化剂是实现冬季早强型流态固化土的关键,为冬季流态土施工提供了有效解决方案。

**[关键词]**冬季施工;流态固化土;流动度;无侧限抗压强度;渗透系数

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18339 中图分类号: TU528 文献标识码: A

## Research and Engineering Application of Winter Early-strength Flowable Solidified Soil

ZHA Xingjian<sup>1</sup>, XIA Tao<sup>2</sup>, LIU Wenhua<sup>3\*</sup>

1. School of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 210000, China

2. Leistung (Jiangsu) High-tech Development Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214000, China

3. School of Fiber Engineering and Equipment Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214000, China

**Abstract:** Flowable solidified soil offers advantages such as excellent flowability and superior impermeability in backfill engineering, but its early hardening is severely constrained by low winter temperatures. This study aims to develop a winter-early-strength flowable solidified soil system. It compares the effects of ordinary Portland cement (OPC) and WFS (industrial solid waste composite solidifier) on the flowability, 7-day/28-day unconfined compressive strength, and permeability coefficient of fluidized soil at 25°C and 5°C. The study reveals that the WFS system exhibits superior fluidity. At 5°C, low temperatures significantly inhibit the strength development and impermeability of OPC-stabilized soil. In contrast, the WFS stabilizer, leveraging its composite components, maintains excellent early strength, late strength, and outstanding impermeability even under low-temperature conditions. The conclusions indicate that the WFS stabilizer is key to achieving winter-grade early-strength fluid-stabilized soil, providing an effective solution for winter fluid soil construction.

**Keywords:** winter construction; flowable stabilized soil; flowability; unconfined compressive strength; permeability coefficient

### 引言

流态固化土(以下简称“流态土”)是近年来在回填工程领域得到广泛关注的一类新型材料,该材料以工程渣土、弃土、淤泥或工程泥浆为主材,配以适量水和固化剂,经搅拌制备成具有一定流动性的浆体<sup>[1]</sup>。与传统回填材料相比,流态土具有施工流动性好、抗渗性能高、匀质性较佳、整体施工成本较低等突出优势,能够有效提升回填质量与施工效率,因而在市政工程、地下工程及管线回填等领域的应用前景十分广阔<sup>[1-2]</sup>。

现有关于流态土的研究主要集中在两个方面:其一是流态土浇筑阶段的流动性及固化后的力学性能。根据不同工程

工况,对材料拌合物的流动性能和硬化后强度提出了不同要求,如何在流动性与强度之间实现合理平衡,是该类材料设计与应用的关键问题之一<sup>[3]</sup>;其二是流态固化剂体系的优化与创新。传统水泥基固化体系存在环境负担较重、在高含水率条件下强度发展受限等问题<sup>[4]</sup>,促使学界和工程界积极探索多源固废基固化剂在流态土中的应用路径。已有研究表明<sup>[5]</sup>,以粒化高炉矿渣粉、脱硫粉煤灰、脱硫石膏等工业固废为主要原料,并掺入一定比例水泥所制备的固化剂,可用于制备满足一般回填工程强度要求的流态固化黄土;也有学者对不同赤泥和钢渣粉掺量下流态固化土的工作性能、抗压强度、电化学阻抗谱和微观结构进行了系统研究<sup>[6]</sup>;此外,研

究还表明,合理掺加减水剂不仅有助于降低水灰比、改善施工和易性,还能显著提高流态土的强度与抗渗等服役性能指标,从而进一步拓展其工程适用性<sup>[7-8]</sup>。

然而,在实际工程条件下,流态土在冬季施工过程中面临与混凝土类似的问题<sup>[9]</sup>:低温环境显著减缓其硬化速度和强度增长速率,且一旦在早期受冻,往往会对材料的耐久性产生不利影响。这不仅制约了冬季施工进度,也对工程质量控制提出了严峻挑战。迄今为止,有关流态土在低温条件下强度发展规律的系统研究仍然相对匮乏,特别是针对冬季工况下早期快速增强调控的研究尚不完善。

基于此,本文以冬季早强型流态固化土为研究对象,围绕其材料设计、早期强度发展特性及工程应用效果展开系统研究,旨在揭示低温条件下流态土早期强度发展的影响机理与控制规律,为解决行业冬季流态土施工中存在的强度发展缓慢、易受冻害等难点痛点问题提供理论依据与工程技术支撑。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

(1) 土样:试验土样取自无锡某工地,属于高液限黏土,土样初始含水率( $w$ )、塑限( $w_p$ )、液限( $w_L$ )、塑性指数( $I_p$ )等土工参数见表1,土样粒径分布曲线见图1。XRD图谱见图2,由图2可知,土样主要矿物成分为石英、蛭石、白云母、微斜长石和钠长石等。

(2) 固化材料:选用市售天山P·O 42.5水泥(简称:OPC)和冬季流态土固化剂(简称:WFS)开展固化试验,其中WFS是以具有活性硅铝组分的工业废渣为主要原材料(包括钢渣、赤泥、粉煤灰、矿粉等),复配一定量的硫铝酸盐水泥、活性激发剂以及复合早强防冻组分,两种固化材料的化学组成如表2所示。

表1 土样基本参数

土性	$w$ /%	$w_p$ /%	$w_L$ /%	$I_p$
高液限黏土	46.5	23.4	52.9	29.5

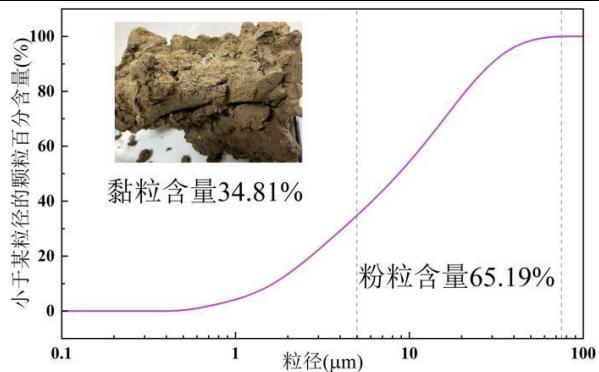


图1 工地黏土粒径分布

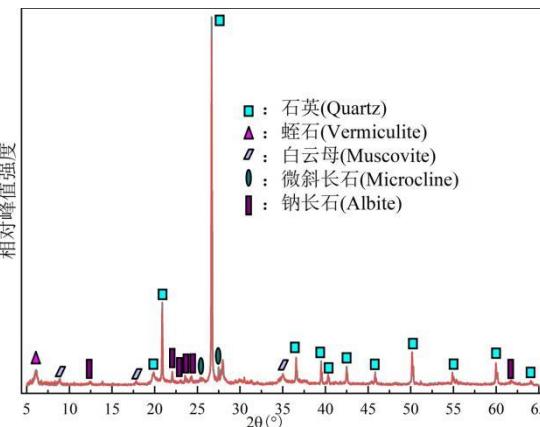


图2 工地黏土 XRD 图

表2 固化材料的氧化物组成(单位: %)

材料	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	LOI
OPC	63.8	21.1	4.1	2.3	3.2	2.1	2.9
WFS	42.8	19.9	16.4	3.4	0.8	14.5	2.2

### 1.2 试验方案

为了探究OPC和WFS在不同工况下对工地黏土的流态固化效果,设置了3种固化剂掺量,3种含水率,2种养护温度,试验配合比如表3所示,试样命名方式为“固化材料-掺量”,例如“OPC-10”表示在泥浆中掺入10%的OPC。

表3 试验配合比

固化材料	固化剂掺量/%	泥浆含水率/%	养护温度
OPC	10、12、15	100、120、150	5°C、25°C
WFS			

试验方法:将原状土加定量水搅拌调成三种含水率(100%、120%、150%)的泥浆后,分别按泥浆质量的10%、12%、15%加入OPC和WFS,在搅拌机中搅拌均匀后立即参照现行行业标准JG/T 266—2011《泡沫混凝土》中规定采用Ø80mm×80mm圆柱桶进行流态土的流动度测试。将拌合好的流态土倒入70.7mm×70.7mm×70.7mm的三联试模中,轻微振捣排出气泡后表面覆上PVC膜放入温度可调的养护柜中。参考规范JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》进行无侧限抗压强度(UCS)测试,参照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》进行渗透试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流动性

图3为OPC组和WFS组在不同含水率及掺量条件下流态土的流动度试验结果。由图3可见,流态土的流动度随含水率的增加呈显著上升趋势,这主要是由于水分增加使混合料体系黏度降低、内摩阻力减小,从而提

升了拌合物的流动性能。当含水率由 100% 提高至 150% 时, 各组试样的流动度均明显增大, 增长幅度约为 80~150mm。

从固化剂种类来看, WFS 组的流动度整体高于同掺量下的 OPC 组。这主要是因为 WFS 固化剂的吸水作用较弱, 使得体系中可自由流动的水分更多, 从而提高了流动度。相比之下, OPC 在拌合初期易发生水化反应并吸附部分自由水, 导致流动度略有降低。就固化剂掺量而言, 随掺量从 10% 增加至 15%, 两种固化体系的流动度均呈下降趋势。原因在于固化剂掺量增加使浆体中固体颗粒比例上升、浆体黏度增大, 限制了拌合物流动性。综合来看, 含水率对流态土流动度的影响最为显著, 其次为固化剂掺量; 固化剂类型也存在一定差异。WFS 固化剂在相同条件下表现出更好的流动性能, 说明其拌合体系更适用于对流动性要求较高的冬季施工场景。

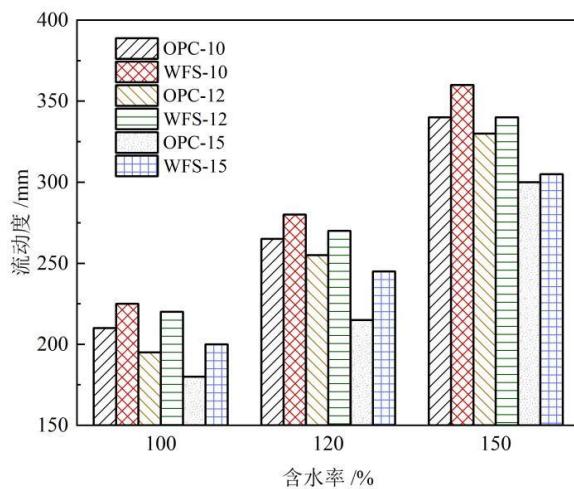


图 3 OPC 组和 WFS 组在不同掺量和不同含水率下的流动度

## 2.2 无侧限抗压强度

图 4 为在 25°C 和 5°C 条件下 OPC 组和 WFS 组的 7dUCS 随含水率和固化剂掺量变化的结果。总体而言, 无论固化剂类型、掺量如何, 流态土的 7dUCS 均随含水率的增加而显著下降。这主要是由于高含水率使得固化土内部形成更多的孔隙, 固化剂颗粒和土颗粒之间的距离增大, 导致胶结作用的连续性和密实性降低, 从而削弱了固化土的整体承载能力。

温度对流态土的 7dUCS 具有显著影响。就 OPC 组而言, 5°C 下的强度远低于 25°C 下的强度, 且在 5°C 下掺量增加对强度的提升作用有限。例如, 在含水率 100% 时, OPC-10 在 25°C 下强度可达 0.75 MPa, 但在 5°C 下仅为 0.2MPa 左右; 当掺量增至 15% 时, 25°C 下 OPC-15 强度可达 1.1MPa, 而 5°C 下仅为 0.25MPa。这主要是因为低温

环境会显著抑制水泥水化反应的速率和程度, 导致胶凝物质生成缓慢, 从而严重影响 OPC 固化土的早期强度发展。相反, 对于 WFS 组, 5°C 下的强度与 25°C 下的强度差异相对较小。例如, 在含水率 100%、掺量 15% 时, WFS-15 在 25°C 下的强度约为 1.25MPa, 而在 5°C 下也能达到 1.15MPa。这表明 WFS 固化剂在低温环境下仍能保证反应的持续进行, 其固化机制对温度的敏感性较低, 使其在低温条件下仍能有效发挥固化作用。

综上所述, 含水率是影响流态固化土 7dUCS 的首要因素, 应在满足流动性要求的前提下, 尽量控制较低的含水率以保证强度。其次, 固化剂类型对强度具有决定性影响, WFS 固化剂在低温环境下表现出更优秀的早强性能。固化剂掺量的优化对于 WFS 体系而言是有效的强度提升手段, 但对于 OPC 体系则受限于温度影响。

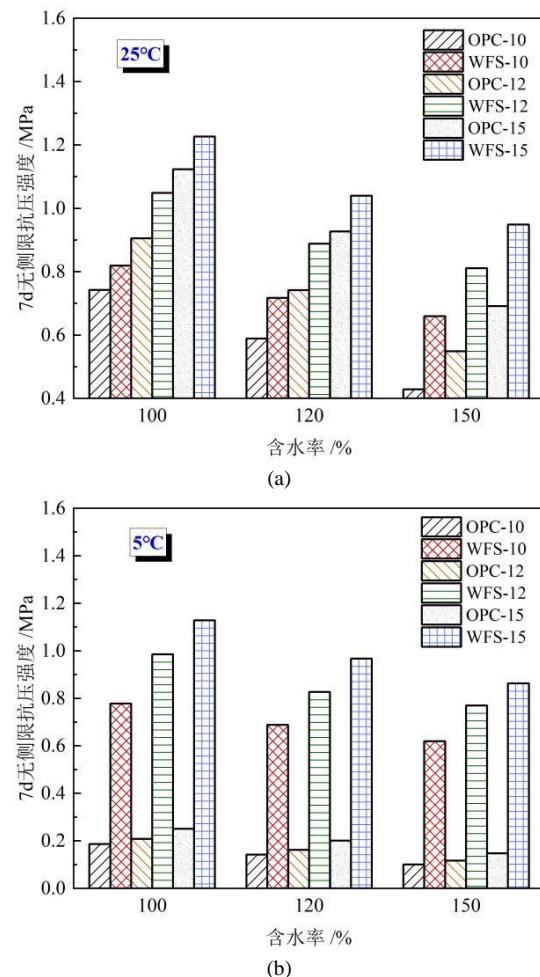
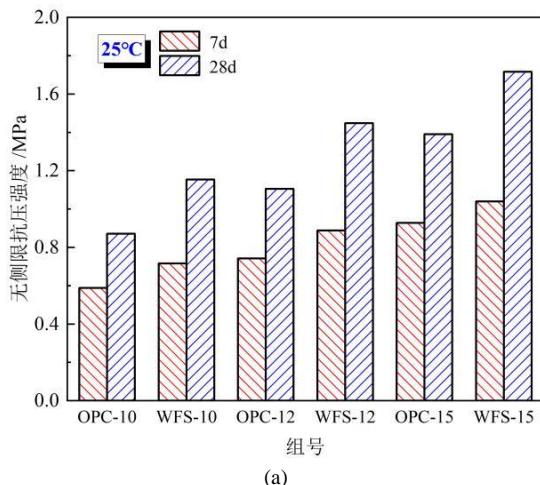


图 4 (a)25°C 和 (b)5°C 条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 无侧限抗压强度

图 5 为当泥浆含水率 120% 时, OPC 组和 WFS 组在 25°C 和 5°C 环境中的 7d 和 28dUCS 试验结果。从图 5 可以看出, 无论是 25°C 还是 5°C 环境, 所有试样的 28dUCS

均高于 7dUCS，表明流态固化土的强度随龄期延长持续发展，这符合胶凝材料的普遍特性，即水化反应或火山灰反应在早期快速进行，并随着龄期延长而持续，生成更多的胶凝产物，形成更致密的结构，从而不断提高固化体的强度。

温度对流态固化土的强度发展具有决定性影响，尤其体现在不同固化剂体系的早期强度(7d)和后期强度(28d)上。5°C低温对 OPC 组的强度发展具有极强的抑制作用。在 5°C 下，OPC-10 的 7d 强度仅为 0.15MPa，28d 强度也仅为 0.23MPa。即使掺量增至 15%，7d 和 28d 强度也分别仅为 0.2MPa 和 0.3MPa 左右。与 25°C 下的相应强度相比，5°C 下的 OPC 组强度显著降低。这主要是因为普通硅酸盐水泥的水化反应速率对温度高度敏感，低温显著减缓了硅酸钙的水化过程，导致早期胶凝产物形成缓慢且数量不足，从而严重影响了其早期及后期强度的形成。相比之下，WFS 组在 5°C 低温下的强度表现出优异的性能，其 7d 和 28d 强度均远高于同等条件下的 OPC 组。例如，在 5°C 下，WFS-10 的 7d 强度可达 0.68 MPa，28d 强度达到 1.1MPa；WFS-15 的 7d 强度更是高达 0.98MPa，28d 强度接近 1.5MPa。尽管 5°C 下的 WFS 组强度略低于 25°C，但这种差异远小于 OPC 组。WFS 固化剂以活性硅铝组分的工业固废为主要原材料，并复配了硫铝酸盐水泥、活性激发剂以及复合早强防冻组分。这些成分的协同作用，尤其是硫铝酸盐水泥的快硬早强特性、活性激发剂对工业固废火山灰活性的激发，以及早强防冻组分在低温下的促凝和抗冻能力，使得 WFS 固化剂在低温环境下仍能有效地进行胶凝反应，保障了流态固化土的早期和后期强度发展，展现出明显的冬季早强特性。在 5°C 低温下，WFS 固化剂的强度优势更为显著，其复合组分有效克服了单一 OPC 在低温下水化受阻的难题。



(a)

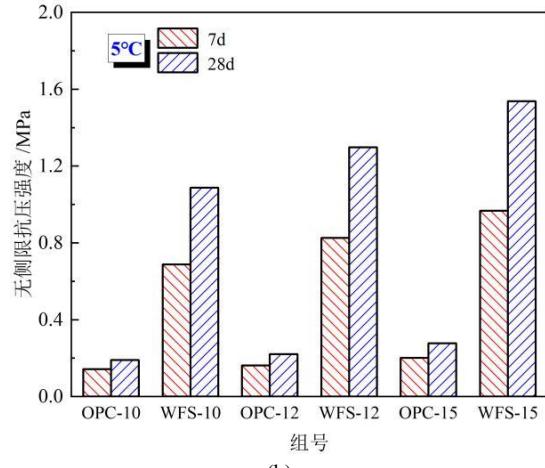


图 5 (a)25°C 和(b)5°C 条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 和 28d 无侧限抗压强度

### 2.3 渗透系数

渗透系数是评价固化土水力特性的重要指标，反映了其抵抗水渗透的能力，与固化体的孔隙结构、密实度及胶凝程度密切相关。图 6 为在泥浆含水率 120% 条件下，OPC 组和 WFS 组在 25°C 和 5°C 环境中 7d 和 28d 的渗透系数试验结果。整体而言，所有试样的 28d 渗透系数均低于其 7d 渗透系数。这表明随着固化龄期的延长，固化土内部的胶凝反应持续进行，生成更多的水化产物和凝胶体，这些产物填充了土颗粒间的孔隙，形成连续的胶结网络，从而降低了孔隙率、减少了连通孔隙的数量和尺寸，使得固化土的密实度增加，有效阻止了水的渗透，渗透系数随之降低。

温度对流态固化土的渗透系数具有显著影响，尤其是在不同固化剂体系中表现出巨大差异。5°C 低温对 OPC 固化土的渗透系数产生了严重的负面影响。在 5°C 下，OPC-10 的 7d 渗透系数高达  $4.9 \times 10^{-6}$  cm/s，28d 渗透系数为  $3.0 \times 10^{-6}$  cm/s。即使掺量增至 15%，7d 和 28d 渗透系数也分别达到了  $2.8 \times 10^{-6}$  cm/s 和  $2.0 \times 10^{-6}$  cm/s。与 25°C 常温下 OPC 体系  $0.7 \sim 0.8 \times 10^{-6}$  cm/s 的渗透系数相比，5°C 环境下的渗透系数高出近一个数量级。这主要是由于低温严重抑制了普通硅酸盐水泥 (OPC) 的水化反应，导致早期胶凝产物生成不足，孔隙填充不充分，固化结构疏松，从而大大增加了水流通道，使得渗透系数急剧升高。相比之下，WFS 固化体系在 5°C 低温下的渗透系数表现出显著的优势。在 5°C 下，WFS-10 的 7d 渗透系数为  $0.98 \times 10^{-6}$  cm/s，28d 渗透系数为  $0.6 \times 10^{-6}$  cm/s；WFS-15 的 7d 渗透系数仅为  $0.65 \times 10^{-6}$  cm/s，28d 渗透系数为  $0.45 \times 10^{-6}$  cm/s。这些数值与 25°C 常温下的 WFS 组渗透系数 ( $0.5 \sim 0.8 \times 10^{-6}$  cm/s)

处于同一量级，并且远低于低温下的 OPC 体系。WFS 固化剂中硫铝酸盐水泥的快硬特性和复合早强防冻组分在低温下的促凝、抗冻作用，能够有效抵御低温对水化和胶凝反应的抑制。同时，工业固废的火山灰活性在激发剂作用下，能够持续填充和胶结土颗粒间的孔隙，形成更为致密、连续的固化结构，从而有效地降低了低温环境下的渗透系数。

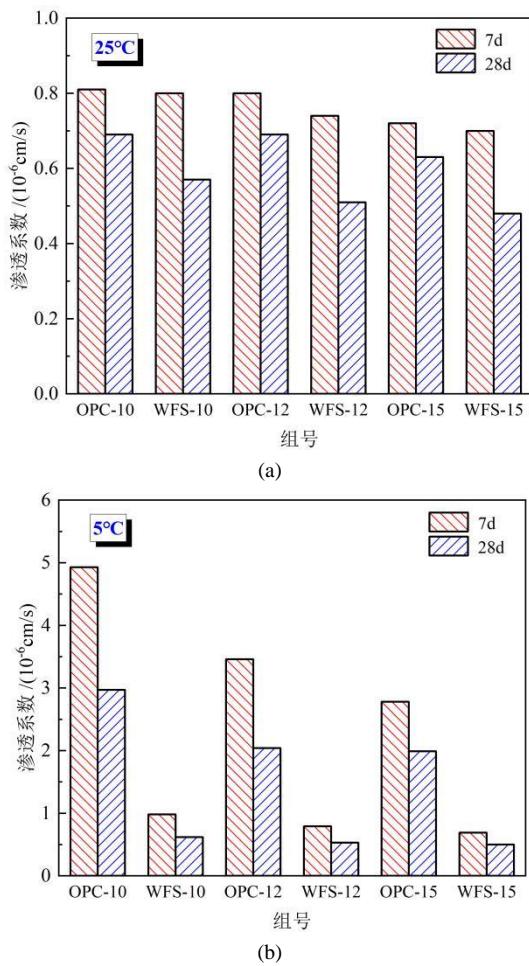


图 6 (a)25°C和(b)5°C条件下 OPC 组和 WFS 组的 7d 和 28d 渗透系数

### 3 工程应用

依托无锡市某管廊回填项目，深度 2m，宽度 1~2m，采用传统灰土回填难以压实，故选用流态土回填工艺，项目要求流态土 28d 无侧限抗压强度达到 1MPa 以上。根据以上试验结果，项目采用 12% 摊量 WFS 固化剂进行流态土制备。将成品流态土用水泥罐车运输至现场，直接浇筑。流态土由于具有高流动性可以实现自流平、自密实，施工便捷。浇筑完成后表面覆一层塑料膜防止失水开裂。项目处于冬季施工，温度为 5~10°C，在浇筑完 1d 后表面硬化，达到可以上人强度，现场情况如图

7 所示。

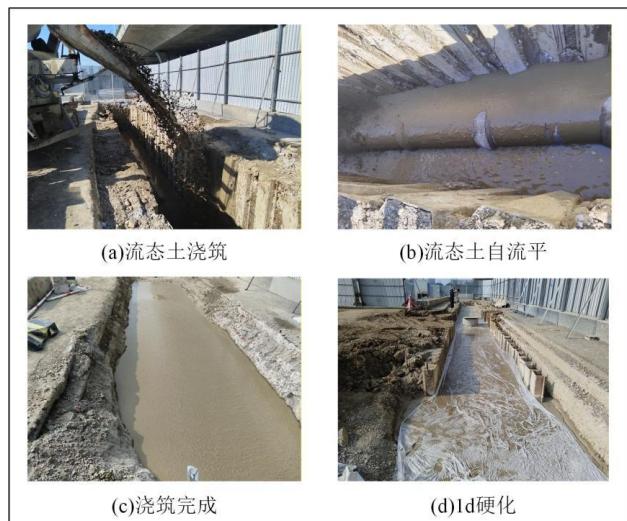


图 7 项目现场图

项目现场进行泥浆含水率测试，流态土流动度测试，成型伴随件现场养护，测试 7d 和 28d 无侧限抗压强度 (UCS)，试验结果见表 4。现场含水率为 126%，275mm 流动度保证流态土能够长距离流动且自流平。现场伴随件强度略低于实验室试验结果，这主要是由于现场施工时难以保证泥浆和固化剂充分搅拌均匀。该项目在冬季施工使用 WFS 固化剂的固化效果达到项目设计指标。

表 4 项目现场试验结果

试验项目	含水率 /%	流动度 /mm	7dUCS/MPa	28dUCS/MPa	28d 渗透系数 /( $10^{-6}$ cm/s)
试验结果	126	275	0.81	1.23	0.59

### 4 结语

(1) 流动度特性：流态土的流动度随含水率增加而显著提升，随固化剂掺量增加而降低。WFS 固化剂体系的流动度整体优于 OPC 体系，这对于冬季施工中保持良好的可泵送性和自流平性具有重要意义。

(2) 强度发展规律：固化土强度随龄期延长持续发展，并随含水率增加而显著下降。温度对强度的影响巨大，OPC 固化土在 5°C 下的 7d 和 28d 强度均受到严重抑制，远低于 25°C 强度。相比之下，WFS 固化剂在 5°C 下仍能保持良好的强度发展，其强度值与 25°C 强度相近，且远高于同等条件下的 OPC 体系，充分展现了其优异的冬季早强特性。WFS 固化剂掺量的增加能有效提升强度，而 OPC 掺量增加在低温下对强度提升作用有限。

(3) 渗透特性：固化土渗透系数随龄期延长而降低，并受温度影响显著。5°C 导致 OPC 固化土的渗透系数急剧

升高,结构疏松。而WFS固化剂在5°C下仍能维持较低的渗透系数,其抗渗性能远优于OPC体系,表明WFS在低温环境下能形成更致密的固化结构。WFS掺量的增加有助于进一步降低渗透系数。

#### 【参考文献】

- [1]周永祥,霍孟浩,侯莉,等.低强度流态填筑材料的研究现状及展望[J].材料导报,2024,38(15):130-138.
- [2]吴文庆.肥槽回填施工中流态固化土技术的应用研究[J].新城建科技,2025,34(9):166-168.
- [3]胡秋辉,罗强,张良,等.基于水膜厚度理论的流态固化土流动性能试验分析[J].浙江大学学报(工学版),2025,59(7):1344-1352.
- [4]苏悦,闫楠,白晓宇,等.预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J].材料导报,2024,38(9):66-72.
- [5]肖杰,刘静,向家骏,等.流态多源固废固化黄土固化剂配比优化及强度形成机理[J].中国公路学报,2025,38(3):250-263.
- [6]王聪聪,刘茂青,宋红旗,等.赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(7):2488-2496.
- [7]王明,刘振忠,薛泽,等.流态固化土基本物理力学性能试验与应用研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(4):941-948.
- [8]赫明胜,秦庆金,高慧,等.减水剂对镁渣-粉煤灰基流态固化土流变性及强度的影响[J].硅酸盐通报,2025,44(7):2710-2719.
- [9]张占宇,李岩,陆云涛.低温施工对混凝土性质影响综述[J].科技创新与应用,2022,12(30):165-168.

作者简介:查行健(2005—),男,汉族,江苏扬州人,本科,研究方向:固化土材料与施工技术;\*通讯作者:刘文化(1987—),男,汉族,江西吉安人,博士,副教授,研究方向:固废资源化利用。

# 金属冶炼生产中智能感知与过程控制研究

申长青

安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司, 河南 安阳 455133

**[摘要]**金属冶炼生产智能感知与过程控制研究借助构建多源信息感知体系, 并且以整合关键参数检测与传感技术作为根基, 达成了对冶炼过程多源异构数据的融合以及特征提取这一目的。随后结合过程机理和数据驱动建模, 开发出了智能优化控制算法以及自适应预测控制技术。最后从系统架构与硬件部署、软件平台与算法实现以及系统可靠性安全性这些方面给出了完整的实施方案, 从而为行业的智能化转型打下了稳固的理论根基与实践方面的指导原则。

**[关键词]**智能感知; 过程控制; 数据融合; 冶炼生产; 优化算法

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18338 中图分类号: TP274 文献标识码: A

## Research on Intelligent Perception and Process Control in Metal Smelting Production

SHEN Changqing

Angang Group Yongtong Ductile Cast Iron Pipe Co., Ltd, Anyang, He'nan, 455133, China

**Abstract:** The research on intelligent perception and process control in metal smelting production utilizes the construction of a multi-source information perception system and integrates key parameter detection and sensing technology as the foundation to achieve the goal of integrating multi-source heterogeneous data and feature extraction in the smelting process. Subsequently, by combining process mechanisms and data-driven modeling, intelligent optimization control algorithms and adaptive predictive control technology were developed. Finally, a complete implementation plan was provided from the aspects of system architecture and hardware deployment, software platform and algorithm implementation, and system reliability and security, laying a solid theoretical foundation and practical guidance principles for the intelligent transformation of the industry.

**Keywords:** intelligent perception; process control; data fusion; smelting production; optimization algorithm

近年来, 我国金属冶炼行业在国民经济中的地位愈加重要了, 但其高温、高压、化学反应复杂等特性, 使其安全生产问题日益突出。为此, 国家出台了一系列相关政策文件, 例如《安全生产法》《工业企业安全生产标准化基本规范》, 要求企业强化安全管理, 提升事故预防和应急处置能力。同时, 《“十四五”工业绿色发展规划》也明确提出要推动工业智能化改造, 提升生产效率和安全水平。传统的安全管理模式往往依赖人工操作和经验判断, 难以适应日益复杂的生产环境和不断提高的安全要求。随着智能化技术的深入发展, 自动化、物联网、大数据和人工智能等技术已逐步在冶炼行业得到了广泛应用, 为安全管理提供了更为精细化和智能化的解决方案。

### 1 智能感知技术在金属冶炼中的应用基础

#### 1.1 多源信息感知体系构成

多源信息感知体系的构成需整合多种类型的信息采集设备, 像温度传感器、压力传感器、流量计、成分分析

仪以及视觉传感器等等。这些设备借助有线或者无线的方式连接到中央处理单元, 进而形成一个分布式的感知网络。在金属冶炼的过程中, 感知体系得涵盖原料预处理、熔炼、精炼、浇铸等诸多环节, 以此来保证数据采集具备全面性与连续性。比如, 在高温熔炼阶段会采用耐高温热电偶还有辐射测温仪来监测炉内温度分布情况, 在气体排放环节则使用气体色谱仪检测有害气体浓度。多源信息感知体系的构建不但要考虑硬件部署方面的问题, 而且还要涉及到数据通信协议与接口的标准化事宜, 从而达成不同设备之间的互联互通状态。

#### 1.2 关键参数检测与传感技术

关键参数检测以及传感技术乃是智能感知当中的极为重要核心部分, 其发展所达到的水平会直接对冶炼过程监控的精度还有实时性产生影响。就温度检测技术来讲, 把非接触式的红外测温方式同嵌入式的热电偶相互结合起来, 便能够达成从表面一直到内部的温度梯度测量目的。

压力检测方面,会采用压电传感器以及应变片这两种方式,以此来满足在高压以及真空环境下能够稳定开展工作的需求。流量检测主要依靠电磁流量计和超声波流量计,这二者适用于对金属熔体以及气体进行计量。成分检测技术涵盖了X射线荧光光谱、原子吸收光谱等等,它们的作用在于对金属成分以及杂质含量展开在线分析。这些传感技术之所以能够取得进步,这离不开材料科学以及微电子技术的发展,也正是如此才让传感器具备了更强的耐高温能力、抗腐蚀性能以及更快的响应速度。在实际的应用进程当中,传感技术的校准以及维护同样有着不容忽视的重要意义,通过定期开展校验工作以及进行故障诊断,从而能够确保数据的准确性。关键参数检测与传感技术不断地进行优化并且持续提升,这就为冶炼过程的智能感知给予了十分可靠的技术支持。

## 2 冶炼过程数据融合与特征提取

### 2.1 多源异构数据融合方法

多源异构数据融合方法主要涵盖数据级融合、特征级融合以及决策级融合这三个不同的层次。其中,数据级融合是直接针对原始数据展开操作,具体而言就是对其进行对齐处理以及整合工作,就好比通过实现时间上的同步以及空间方面的配准,进而把温度数据和压力数据合并到一起。特征级融合的操作流程则是先从各个数据源当中提取出相应的特征,然后再把这些所提取出来的特征向量加以融合,举例来讲,可以运用主成分分析或者独立成分分析这类手段来达成降维的目的。至于决策级融合,它是依据各个数据源所给出的初步决策结果来进行综合性的判断,像是采用加权投票的方式或者是借助贝叶斯推理等方法<sup>[1]</sup>。在金属冶炼这一实际应用场景当中,数据融合往往会碰到诸如传感器存在误差、通信出现延迟等一系列问题,此时常常会采取卡尔曼滤波、神经网络等相应的方法,以此来促使融合精度得以提升。多源异构数据融合方法的实际应用,能够在很大程度上提升数据所具有的可靠性以及可用性,从而为后续开展特征提取相关工作筑牢坚实的基础。

### 2.2 过程关键特征识别

过程关键特征识别是从海量的数据当中去筛选出那些对冶炼过程有着显著影响的变量,而这些变量通常和产品质量、能耗、效率等目标存在着直接的关联。其识别方法包含了依据机理模型展开的分析、凭借数据驱动所进行的统计学习,还有将这两种方式相结合的办法。机理模型依照物理化学原理来确定关键参数,像反应温度、压力、浓度等等这类参数。数据驱动方法会运用聚类、分类、回

归等各类算法从历史数据里挖掘出潜在的特征,比如说借助关联分析来找出温度波动和产品缺陷之间的关系,或者通过时间序列分析来预测炉况变化的趋势。过程关键特征识别的准确性在很大程度上取决于领域知识与数据质量的相互结合,并且得经过多次的验证与优化。识别出来的关键特征会被用来构建控制模型,以此达成对过程状态的实时评估与预测,从而为智能控制给出直接的依据。

### 2.3 实时数据处理与传输

实时数据处理以及传输方面,需要在数据完成采集之后可快速地予以处理,并且要将其迅速传送到控制单元,如此才能契合冶炼过程对于快速响应所提出的相应需求。数据处理通常涵盖滤波、平滑以及异常检测等一系列预处理的步骤,其主要目的在于将噪声还有异常值都给去除掉。而传输环节,就涉及到网络协议的选择、带宽的合理分配以及延迟的有效控制等相关技术了。在金属冶炼这样的特定环境当中,往往把有线以太网和无线Zigbee、LoRa等不同的通信方式相互结合起来运用,从而确保数据可以实现可靠的传输。实时数据处理与传输系统必须要具备较高的吞吐量以及较低的延迟特性,比如说可以通过采用边缘计算的方式,在数据产生的源头就开始着手进行初步的处理工作,以此来减轻中央服务器所承受的负担。实时性得以保障之后,控制决策便能够依据最新的数据来及时地对操作参数做出相应的调整,进而避免冶炼过程中偏差不断地积累起来。实时数据处理与传输技术要是能够加以优化的话,那么这将会成为智能感知系统能够高效地运行的一个极为关键的环节,事实上,该技术环节究竟完善到何种程度,这可是对整个系统响应速度起着决定性作用的一个重要因素。

## 3 冶炼过程智能建模与控制策略

### 3.1 过程机理与数据驱动建模

过程机理建模是依据冶金反应动力学以及热力学等相关原理来开展工作的,在此过程中会建立起微分方程或者代数方程,以此来对相关过程加以描述,就好比高炉炼铁环节当中的物料平衡模型还有能量平衡模型便属于此类情况。而数据驱动建模则是借助神经网络、支持向量机这类机器学习算法,从海量的数据当中去学习并掌握输入输出之间的关联关系。把这两者相互结合起来,便能够很好地弥补单纯依靠机理模型所存在的复杂程度过高的弊端,同时也能够克服仅靠数据驱动模型所具有的泛化能力较为薄弱的缺陷,比如说可以让机理模型来给出结构方面的约束条件,而由数据驱动模型去对残差进行拟合处理。在金属冶炼这一领域当中,开展建模工作的时候务必要充

分考虑到其中存在着的多变量耦合、呈现出的非线性特点以及出现的时变等种种特性,进而凭借参数辨识以及模型验证等一系列的操作手段,从而促使整个建模的准确性得以切实提高。过程机理建模和数据驱动建模相融合之后,能够为控制策略的设计给予一个较为可靠的模型基础,进而让过程模拟以及后续的优化工作都能够更加紧密地贴近实际情况。

### 3.2 智能优化控制算法

智能优化控制算法其主要目的在于搜寻可让目标函数达成最优状态的操作参数,而目标函数往往涵盖能耗尽可能小、产量尽可能大、质量尽可能好等方面内容。常见的算法包含遗传算法、粒子群优化、模拟退火这类进化计算方式,还有深度学习、强化学习等人工智能方面的办法。这些算法具备处理存在多个目标以及多种约束条件的优化问题的能力。在冶炼过程中加以应用的时候,得考虑到算法所具有的实时性以及计算复杂度方面的情况,比如说依据神经网络构建的优化控制器会在线对燃料投入量以及风量分配情况进行调整,从而实现稳定炉温和减少能耗的目的。智能优化控制算法是否有效,这取决于模型的精度以及算法参数的调优状况,是需要凭借仿真以及实验来加以验证的<sup>[2]</sup>。针对智能优化控制算法展开更为细致的研究,给冶炼过程实现高效且稳定地运行给予了强有力的算法支撑,朝着这个方向持续发展下去将会不断促使过程控制技术迈向更高的层次。

### 3.3 自适应与预测控制技术

自适应控制技术可依据过程变化自动调节控制器参数,以此来应对模型存在的不确定性或者环境出现的扰动情况。预测控制技术是凭借模型来预测未来过程的行为走向,并且会优化控制序列,从而实现对设定值的跟踪。在金属冶炼这一领域当中,自适应控制主要用于处理因原料成分产生波动或者设备出现老化等情况所带来的种种影响,就好比自整定 PID 控制器便是如此。而预测控制则是用来处理存在大滞后以及多变量的过程,比如模型预测控制 MPC 能够对温度与压力控制加以协调。将自适应控制技术和预测控制技术相互结合起来,能够让系统的鲁棒性以及控制性能得以提升,进而确保冶炼过程即便处于多变的条件之下也能够维持稳定的状态。这些技术在实施的时候,需要做到在线模型的更新以及优化计算工作,这便对硬件以及软件都提出了较高的要求。自适应控制技术与预测控制技术不断向前发展,这无疑使得冶炼过程控制的智能化程度得到了很大程度的增强,简单来说,这些技术

让整个控制系统变得更为聪明、更加灵活。

### 3.4 控制系统的集成与协同

控制系统集成协同牵涉诸多控制子系统协调运作,达成全流程整体优化,在金属冶炼里,原料处理、熔炼、精炼、浇铸等单元均有自身控制系统,集成这些系统需统一数据接口与通信协议。协同控制借助上层优化指令分配各单元设定值,防止局部优化致使全局次优。比如依据多智能体系统的分布式控制,各单元智能体相互间通信协商,一同达成生产目标<sup>[3]</sup>。控制系统集成协同还要顾及人机交互与决策支持,给操作员提供直观的监控界面与及时的报警功能。集成协同实现,大幅提升了生产系统整体效率与灵活性,是构建智能冶炼工厂重要特点。

## 4 智能感知与控制系统的实施

### 4.1 系统架构与硬件部署

系统架构一般会采用分层的设计方式,其中包含了感知层、网络层、处理层以及控制层这几个层次。在感知层当中会去部署传感器还有执行器,而网络层的主要职责在于负责数据的传输工作,处理层则要开展数据融合方面的操作以及模型计算相关事宜,控制层则是用来发出控制指令的地方。在进行硬件部署的时候,需要依据冶炼车间的实际环境状况来挑选那些能够耐得住高温、具备防爆功能并且还能抗腐蚀的设备,并且要合理地做好布线方面的工作,以此来促使信号干扰得以降低。就好比说,在存在高温情况的区域当中,可以选用光纤传感器并采用无线传输的方式,通过这样的做法就能够让电缆的损耗有所减少。系统架构以及硬件部署方面的规划务必要和生产工艺流程紧密结合起来,从而保证能够将所有的关键监测点以及控制点都涵盖进去。架构采取模块化的那种设计形式,这样在后期进行升级以及维护的时候就会比较方便,而硬件方面留有冗余,那么就能够使系统的容错能力得到提升。系统架构以及硬件部署是否合理,这可是智能感知与控制系统能够顺利实施的一个基础条件。

### 4.2 软件平台与算法实现

软件平台把数据采集、存储、处理以及控制等诸多功能都集成到了一起,像 SCADA、DCS 这类工业控制软件是比较常用的选择,当然还有自定义开发的平台。算法实现会把数据融合、特征提取、建模以及控制等相关算法编写成可以执行的程序,然后让它在工业计算机或者云服务器上运行起来。软件平台得能支持实时操作系统以及多任务调度,这样才能保证算法能够按时执行。算法实现的时候,得充分考虑计算效率以及数值稳定性,比如说用 C++

或者 Python 来编程并且对代码加以优化。在金属冶炼的应用场景当中，软件平台会提供人机界面，通过它来展示过程的状态以及报警信息，而算法实现能够在线对控制参数做出调整<sup>[4]</sup>。软件平台和算法实现的开发工作需要跨学科团队携手合作，把冶金知识和计算机技术很好地融合到一起。软件平台的可靠性以及算法实现的准确性，这两者会对整个系统的性能表现产生直接的影响，持续在这上面付出努力，将会有力地推动智能化技术走向实用化的过程。

#### 4.3 系统可靠性及安全性

系统可靠性意味着在长时间运转过程中能够维持功能正常的那种能力，这里面涉及到像硬件故障率、软件鲁棒性以及数据备份等诸多方面。而安全性包含物理安全和网络安全这两部分，其主要目的在于防止设备出现损坏或者数据发生泄露等情况。在冶炼这样的环境当中，可靠性是依靠冗余设计、定期开展维护工作以及故障诊断等方式来予以保障的，比如说针对关键传感器会设置双备份，并且还会配备自动切换的相关机制。至于安全性方面的措施，则涵盖了部署防火墙、采用加密通信方式以及实施访问控制等一系列举措，以此来抵御那些潜在存在的网络攻击。物理安全方面就需要去考量防爆、防火等相关设计了。对于系统可靠性以及安全性进行管理的时候，需要制定出详尽的应急预案以及操作规程，并且要对相关人员展开培训，从而能够有效应对可能出现的异常情况。具备较高的可靠性以及安全性是智能感知与控制系统能够在工业领域实现应用的一个必备条件，同时也是确保生产能够连续进行

以及保障人员安全的一项极为重要的保障措施。

#### 5 结束语

构建智能感知网络，融合多源数据，建立混合模型并且实施先进的控制手段，能够切实有效地提升冶炼过程的整体性能。不过就目前的情况来看，依然存在着集成复杂度颇高、所需成本投入颇为巨大以及相关标准还有待进一步完善的诸多挑战。在未来的相关研究当中，应当将关注点聚焦在算法的优化、成本的降低、标准的制定以及跨领域的协同等方面。智能感知与控制技术得到更为深入的应用之后，必定会为金属冶炼工业朝着绿色、高效且智能化的方向实现转型给予源源不断的有力驱动。

#### [参考文献]

- [1]杨帅.金属冶炼转炉终点碳温预测与控制模型优化研究分析[J].世界有色金属,2025,10(15):13-15.
- [2]丁少忠.矿山金属冶炼中非标自动化机械设备的设计[J].模具制造,2025,25(8):213-215.
- [3]杨帅.金属冶炼转炉终点碳温预测与控制模型优化研究分析[J].世界有色金属,2025,11(15):13-15.
- [4]杨静雅,鄢峰,潘岩,等.基于优化模糊控制的有色金属冶炼配料仓监测防堵系统 [J].冶金自动化,2025,49(1):100-107.

作者简介：申长青（1984.7—），毕业院校：国家开放大学，所学专业：计算机信息管理，当前就职单位：安钢集团永通球墨铸铁管有限责任公司，职务：科长，职称级别：初级。

## 钢纤维与椰壳纤维对混凝土力学性能影响分析

张敏 邓娜 郑洪祥 覃曦 覃潞 高辉 代超月 邓海波 陈奕阳  
成都工业学院土木工程系, 四川 成都 611730

**[摘要]**为对比钢纤维与椰壳纤维对混凝土力学性能影响的差异,明晰其作用规律、最优掺量及适用范围,为工程纤维选型与配合比优化提供支撑,开展9组力学试验。运用变量控制法,设计钢纤维体积掺量(0%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%)与椰壳纤维体积掺量(0%、0.3%、0.5%、0.75%、1.0%),每组制备3个平行试块;通过150mm×150mm×150mm立方体试块测定抗压、劈裂抗拉强度,采用100mm×100mm×400mm试块测定三点弯抗折强度,试块按照GB/T50081—2019标准养护28d后进行测试。结果表明:钢纤维最优掺量1.0%~1.5%,此时,抗压、劈裂抗拉、抗折强度相较基准组分别提高14.3%~16.3%、14.2%~19.2%、31%~61.9%;椰壳纤维最优掺量为0.3%,对应强度分别提升7.6%、8.6%、14.3%,超过此体积掺量,性能出现下降;钢纤维在抗拉、抗折增强方面的效果分别是椰壳纤维的2.6倍、4倍。钢纤维适用于高强度高韧性构件,椰壳纤维适用于低成本环保场景,两类纤维均存在最佳掺量阈值。

**[关键词]**混凝土; 钢纤维; 椰壳纤维; 力学性能

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18345 中图分类号: TU528 文献标识码: A

## Analysis of the Influence of Steel Fiber and Coconut Shell Fiber on the Mechanical Properties of Concrete

ZHANG Min, DENG Na, ZHENG Hongxiang, QIN Xi, QIN Lu, GAO Hui, DAI Chaoyue, DENG Haibo, CHEN Yiyang  
Department of Civil Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan, 611730, China

**Abstract:** In order to compare the differences in the effects of steel fiber and coconut shell fiber on the mechanical properties of concrete, clarify their laws of action, optimal dosage, and scope of application, and provide support for the selection of engineering fibers and the optimization of mix proportions, 9 sets of mechanical tests were conducted. Using variable control method, design steel fiber volume ratios (%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%) and coconut shell fiber volume ratios (%、0.3%、0.5%、0.75%、1.0%), and prepare three parallel test blocks for each group; The compressive and splitting tensile strengths were measured using 150mm x 150mm x 150mm cube specimens, and the three-point bending strength was measured using 100mm x 100mm x 400mm specimens. The specimens were cured for 28 days according to the GB/T50081—2019 standard before testing. The results showed that the optimal dosage of steel fiber was 1.0%~1.5%. At this time, the compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength increased by 14.3%~16.3%, 14.2%~19.2%, and 31%~61.9% respectively compared to the benchmark group; The optimal dosage of coconut shell fiber is 0.3%, which increases the corresponding strength by 7.6%, 8.6%, and 14.3%, respectively. Beyond this volume dosage, the performance decreases; The effect of steel fiber in tensile and flexural reinforcement is 2.6 times and 4 times that of coconut shell fiber, respectively. Steel fiber is suitable for high-strength and high toughness components, while coconut shell fiber is suitable for low-cost and environmentally friendly scenarios. Both types of fibers have an optimal dosage threshold.

**Keywords:** concrete; steel fiber; coconut shell fiber; mechanical properties

### 引言

混凝土作为建筑工程用量最大的结构材料,虽具备抗压强度高、施工便捷等优势,但其抗拉强度低,仅为抗压强度的1/8~1/12,脆性指数高的固有缺陷,易导致结构在服役期因裂缝扩展引发耐久性失效。纤维增强<sup>[1]</sup>技术因

能通过“裂纹桥接效应”抑制裂缝发展、改善材料韧性,已成为解决该问题的核心路径。研究表明:钢纤维可显著提升混凝土强度与韧性<sup>[2-6]</sup>。不少学者对钢纤维长度、掺量及类型对混凝土力学性能的影响开展了大量研究,Abbas等<sup>[7]</sup>认为钢纤维长径比对UHPC抗压强度影响不明

显, 相同掺量下长钢纤维 UHPC 的弯曲性能比短钢纤维的差。牛龙龙等<sup>[8]</sup>和李悦等<sup>[9]</sup>均认为钢纤维掺量对混凝土抗压强度影响不显著, 剥裂强度、弯曲韧性和抗冲击性有明显提高。陈从春等<sup>[10]</sup>认为 UHPC 钢纤维体积掺量为 1.0%, 2.5% 时, 抗折强度增长最快; 掺量为 1.0%, 1.5% 时, 剥裂抗拉强度增长最快。Wu 等<sup>[11]</sup>认为同等掺量下端勾型钢纤维较直型和波纹型, 在提升超高性能混凝土 (Ultra-High Performance Concrete, UHPC) 土抗压强度和抗弯强度方面效率显著。李新星等<sup>[12]</sup>研究表明平直微丝型钢纤维能使活性粉末混凝土 (RPC) 抗拉强度提升 123.4%, 端勾型钢纤维可让高强钢纤维混凝土 (SFRC) 抗压强度提高 10.7%, 抗拉强度提高 59.1%, 抗弯强度提高 38.4%。彭佳琳等<sup>[13]</sup>研究表明, 平直型钢纤维体积掺量增至 3.0% 时, 超高性能混凝土 (UHPC) 28d 抗压强度较基准组提升 88.25%, 且端钩型钢纤维对力学性能的增强效果优于平直型与波纹型; 但钢纤维成本高, 且生产过程碳排放较高, 限制了其在低成本工程中的应用。

椰壳纤维作为天然环保材料, 兼具来源广、可降解、低成本等优势, 为绿色建材发展提供新方向。许多学者在椰壳纤维改善混凝土力学性能方面也进行了大量研究, 王继升<sup>[14]</sup>研究表明 0.5% 掺量时混凝土抗压强度提升 23%~36%, 3.0% 掺量时剥裂抗拉强度提高 16%~29%, 且对抗拉性能的增强效果优于抗压。徐伟杰等<sup>[15]</sup>发现, 椰壳纤维体积掺量 1.5% 时, UHPC 抗弯强度及延性性能较基准组显著提升, 且其对 UHPC 抗弯性能的增强效果优于黄麻、亚麻等植物纤维。黄锋等<sup>[16]</sup>认为混凝土内部孔洞数量和大小, 随着椰壳纤维掺量增加先减后增; 掺量 0.16% 时, 试块抗压强度为 37.82MPa, 比素混凝土提高 20.60%, 达到峰值。

然而, 现有研究多单一聚焦钢纤维或椰壳纤维的作用效果, 均未系统对比两类纤维对混凝土抗压、剥裂抗拉、抗折性能的影响规律差异, 也缺乏不同工程需求下的纤维选型与掺量优化依据, 难以直接指导实际应用。

基于此, 本研究设计钢纤维 (体积掺量 0%~1.5%) 与椰壳纤维 (体积掺量 0%~1.0%) 9 组对比试验, 以基准素混凝土为对照, 通过标准立方体抗压、剥裂抗拉试验

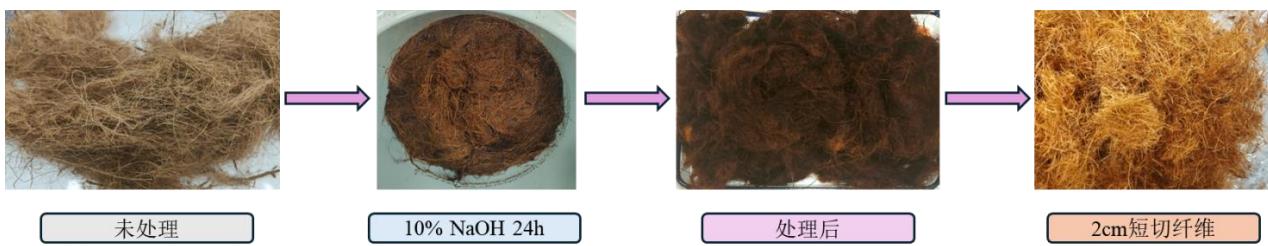


图 2 椰壳纤维碱处理流程图

及 100mm×100mm×400mm 试块三点弯抗折试验, 探究对比分析两类纤维不同体积掺量对混凝土力学性能的影响规律, 明确其最优掺量。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验材料

试验中选用的材料: 水泥、河砂、碎石、钢纤维/椰壳纤维和减水剂等。其中水泥为胶凝材料, 选用宜宾本地水泥厂生产的 P.O42.5 级水泥, 3d/28d 抗压强度为 17.0MPa/42.5MPa; 河砂为细骨料, 采用中砂, 细度模数为 2.7; 碎石为粗骨料, 选用粒径为 5~20mm 连续级配碎石; 水采用自来水; 减水剂采用聚羧酸高性能减水剂, 四川东润百盛新材料有限公司生产, 减水率 27%。所用钢纤维长度为 35mm、直径为 0.75mm、长径比为 47 的端勾型纤维。外形特征如图 1 所示。



图 1 端勾型钢纤维

椰壳纤维选用产自海南文昌地区的椰壳纤维, 为去除椰壳纤维表层的杂质, 采用碱化处理。将椰壳纤维浸泡在 10% 的 NaOH 溶液中 24h, 之后捞出冲洗至中性, 在 60°C 烘箱中烘干 12h 后, 人工剪切成 2cm 长的短纤维。椰壳纤维处理流程如图 2 所示。

### 1.2 试验设计

本次共设计 9 组不同纤维掺量混凝土试验, 对比分析研究钢纤维和椰壳纤维不同体积掺量对混凝土力学性能影响规律。其中 C-0 组为无纤维添加对照组, 试件编号 F 表示椰壳纤维类型; S 表示钢纤维。每组设计 9 个试块, 其中 3 个抗压试块、3 个抗拉试块和 3 个抗弯试块, 共计 81 个试块。减水剂为水泥掺量的质量百分比, 混凝土配合比及试验参数设计见表 1。

表 1 配合比设计

编号	水泥 kg/m <sup>3</sup>	河砂 kg/m <sup>3</sup>	碎石 kg/m <sup>3</sup>	水 kg/m <sup>3</sup>	减水剂	纤维掺量
C-0	360	760	1158	166	1.5%	0
CF1	360	760	1158	166	1.5%	0.30%
CF2	360	760	1158	166	1.5%	0.50%
CF3	360	760	1158	166	1.5%	0.75%
CF4	360	760	1158	166	1.5%	1.00%
CS1	360	760	1158	166	1.5%	0.50%
CS2	360	760	1158	166	1.5%	0.75%
CS3	360	760	1158	166	1.5%	1.00%
CS4	360	760	1158	166	1.5%	1.50%

### 1.3 试件制作及养护

试件制作采用先干拌制的方法,首先在 60L 强制式单卧轴搅拌机中,依次倒入碎石和 40% 河砂,启动搅拌机干搅 30s,使其混合;其次分两次均匀撒入称量好的纤维,每次搅拌 30s;然后,依次加入水泥和剩余 60% 河砂干拌 60s,充分均匀混合干拌料;最后加入水和减水剂搅拌 120s,拌合物出现流动黏稠状。将拌好的混凝土分别浇筑到 100mm×100mm×400mm 长方体试模和 150mm×150mm×150mm 立方体试模中,高频振动台上振动 1~2min,振动密实完成后,在室温覆膜放置 24h,拆模放入标准养护箱中养护 28d,开始试验。

### 1.4 测试方法

对表 1 中不同纤维掺量混凝土试块,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)<sup>[17]</sup>进行试验。试验时,按荷载控制进行均匀连续加载,抗压强度试验采用 200T 电液伺服压力试验机,加载速度为 0.5MPa/s,如图 3 所示。采用 100T 微机控制电液伺服万能试验机完成劈裂抗拉强度和抗折强度试验,加载速度为 0.05MPa/s。加载设备如图 4 和图 5 所示。



图 3 抗压强度试验



图 4 劈裂抗拉试验



图 5 三点弯试验

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同纤维混凝土抗压强度影响分析

表 2 中系统记录了不同纤维掺量对应的混凝土立方体 28d 抗压强度数据;为进一步明晰纤维掺量对混凝土立方体抗压强度的作用趋势,将二者的影响关系绘制成曲线,见图 6。

表 2 不同纤维掺量混凝土立方体抗压强度

编号	纤维掺量 (%)	抗压强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升%
C-0	0	43.5	0.5	
CF1	0.30%	46.8	0.9	7.6%
CF2	0.50%	42.8	1	-1.6%
CF3	0.75%	42.9	1.1	-1.4%
CF4	1.00%	40.5	0.6	-6.9%
CS1	0.50%	48.3	0.8	11.0%
CS2	0.75%	49.4	0.7	13.6%
CS3	1.00%	49.7	0.7	14.3%
CS4	1.50%	50.6	0.6	16.3%

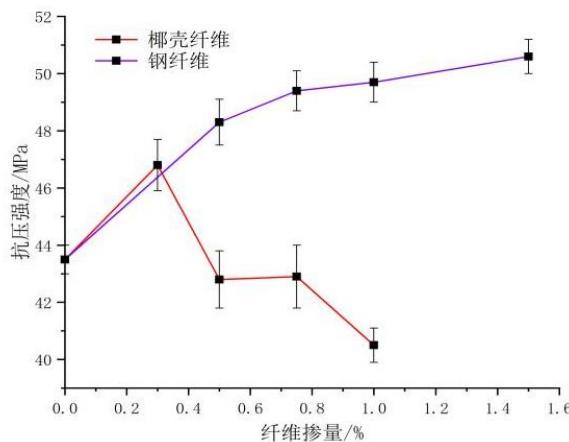


图 6 不同纤维掺量条件下混凝土立方体抗压强度试验曲线

对比表 2 中不同钢纤维掺量对应的混凝土立方体 28d 抗压强度数据,结合图 6 所示的影响趋势曲线可见,钢纤维对混凝土力学性能的增强效应显著,且该效应随钢纤维掺量的增加而逐步凸显,具体体现为混凝土立方体抗压强度随掺量提升而持续增长。当掺量为 1.5% 时,试件的抗压强度达到 50.6MPa,比未添加纤维的混凝土提高了 16.3%。钢纤维通过“桥接作用”有效抑制了混凝土内部微裂缝的扩展,减少了受压时的裂缝贯通,从而提升了强度。

椰壳纤维掺量增加过程中,混凝土抗压强度的变化并非单一趋势,其初始阶段随掺量提升而逐渐上升,随后稳步下降,其强度提升效果远不及钢纤维。在椰壳纤维掺量为 0%~0.3% 时,混凝土的抗压强度上升,并在 0.3% 掺量下达到最高值 46.8MPa,较未添加纤维的混凝土提升了 7.6%;超过 0.3% 后,抗压强度逐渐降低,1% 掺量时降至最低值 40.5MPa,对比未掺纤维混凝土,其抗压强度下降 6.9%。这说明合理的纤维掺量能对试件产生正向约束力,进而对提升抗压强度发挥积极效应,椰壳纤维在混凝土中的应用存在最优体积掺量为 0.3%。

相同掺量下,钢纤维对混凝土抗压性能的增强效果是椰壳纤维的 1.4~2.1 倍。不过,钢纤维的成本相对较高(当钢纤维混凝土增强效果达 2.1 倍时,钢纤维费用是椰壳纤维的 9 倍),且在施工过程中对工艺要求更为严格,需根据工程需求选择合适的纤维类型及掺量以实现最佳性能。

## 2.2 不同纤维混凝土劈裂抗拉强度影响分析

不同纤维掺量混凝土 28d 劈裂抗拉强度见表 3,不同纤维掺量对混凝土劈裂抗拉强度影响关系曲线如图 7 所示。

结合表 3 与图 7 所示分析可得:钢纤维掺量增加过程中,混凝土劈裂抗拉强度整体呈线性递增态势,但不同掺量区间的增长特征存在差异。具体而言,当钢纤维掺量≤

0.5% 时,混凝土劈裂抗拉强度增长速率较为缓慢,纤维对劈裂抗拉性能的增强效应尚未充分显现;而当掺量突破 0.5% 后,继续增加钢纤维掺量,混凝土劈裂抗拉强度的提升幅度明显加大,纤维的桥接阻裂作用得到更充分发挥,增强效果显著优于低掺量阶段。当钢纤维掺量达到 1.5% 时,劈裂抗拉强度可达最大 3.60MPa,较未添加纤维的混凝土提高了 19.2%,充分展示了钢纤维在增强混凝土抗拉性能方面的卓越效果。

表 3 不同纤维掺量混凝土劈裂抗拉强度

编号	纤维掺量 (%)	抗拉强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升 %
C-0	0	3.02	0.03	
CF1	0.30%	3.28	0.09	8.6%
CF2	0.50%	3.20	0.10	6.0%
CF3	0.75%	3.18	0.08	5.3%
CF4	1.00%	2.86	0.08	-5.3%
CS1	0.50%	3.25	0.14	7.6%
CS2	0.75%	3.44	0.13	13.9%
CS3	1.00%	3.45	0.08	14.2%
CS4	1.50%	3.60	0.14	19.2%

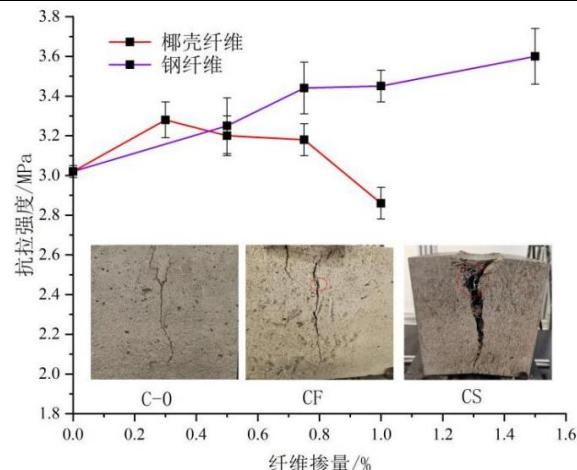


图 7 不同纤维掺量条件下混凝土的劈裂抗拉强度试验曲线

相比之下,椰壳纤维对混凝土劈裂抗拉强度的提升效果低于钢纤维。在椰壳纤维掺量为 0%~0.75% 时,混凝土的劈裂抗拉强度得以提升,但随着纤维掺量增加而增强效果降低,并在 0.3% 掺量下达到最大 3.28MPa,较未添加纤维的混凝土提升了 8.6%。然而,随着掺量继续增加至 1.0%,劈裂抗拉强度降至 2.86MPa,较未添加纤维的混凝土降低了 5.3%,这主要是由于椰壳纤维的弹性模量较低,且高掺量时易出现团聚现象,导致界面黏结失效,进而影响其抗拉强度。

相同掺量下,钢纤维对混凝土抗拉性能的增强效果高

达椰壳纤维的3.6倍。尽管椰壳纤维的提升幅度不及钢纤维,但在0.3%掺量时仍能显著改善混凝土的“抗拉脆性”,且具有成本低、环保等优点,适用于对抗拉要求中等且追求绿色建材的应用场景。虽然钢纤维增强效果明显,但成本较高(当钢纤维混凝土增强效果达3.6倍时,钢纤维费用是椰壳纤维的11倍),且对施工工艺要求更为严格。因此,在实际工程应用中,需根据具体需求选择合适的纤维类型及掺量,以实现混凝土抗拉力学性能和经济性的最佳平衡。

### 2.3 不同纤维混凝土抗折(抗弯)强度影响分析

不同纤维掺量混凝土28d抗折强度见表4,为直观呈现纤维掺量对混凝土抗折强度的影响规律,二者之间的关系以曲线形式呈现,具体如图8所示。

表4 不同纤维掺量的混凝土抗折强度

编号	纤维掺量 (%)	抗折强度 Mpa	标准差 Mpa	较基准组提升%
C-0	0	4.2	0.1	
CF1	0.30%	4.8	0.5	14.3%
CF2	0.50%	4.3	0.1	2.4%
CF3	0.75%	4.5	0.5	7.1%
CF4	1.00%	4.6	0.4	9.5%
CS1	0.50%	4.6	0.1	9.5%
CS2	0.75%	4.9	0.4	16.7%
CS3	1.00%	5.5	0.4	31.0%
CS4	1.50%	6.8	0.4	61.9%

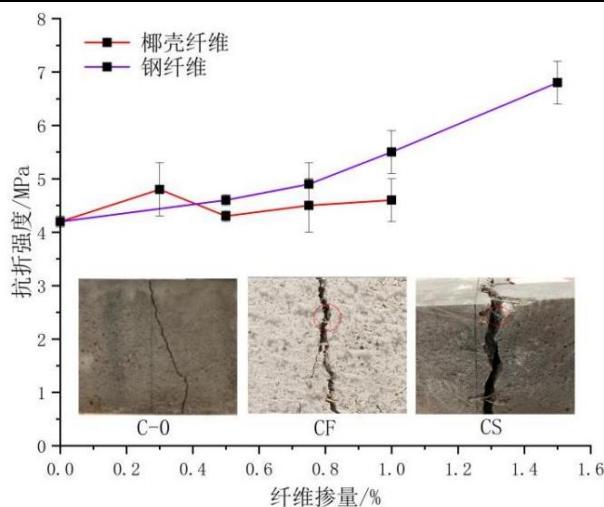


图8 不同纤维掺量条件下混凝土的抗折强度试验曲线

结合表4与图8分析可知,随着钢纤维掺量的增加,混凝土弯曲抗折强度整体呈线性递增态势。当钢纤维体积掺量分别为0.5%、0.75%、1.0%与1.5%时,混凝土抗折强度依次达到4.6MPa、4.9MPa、5.5MPa和6.8MPa;

相较于未掺钢纤维的素混凝土试件,强度提升幅度分别为9.5%、16.7%、31%与61.9%。与抗压、劈裂抗拉性能的增强特征相同,钢纤维对弯曲抗折强度的提升作用显著。

相比之下,椰壳纤维对混凝土抗折强度的提升效果低于钢纤维。随着椰壳纤维的掺入,混凝土抗折强度均有不同程度的提高,增长幅度呈现出先增大后减小的趋势。在掺量为0%~0.3%时,抗折强度呈线性增加,在0.3%掺量下抗折强度达到4.8MPa,相较于未添加纤维的混凝土提升了14.3%。当纤维掺量处于0.3%~1%时,抗折强度增强效果有所降低,试件破坏表现出一定的延性特征,破坏时主裂缝走向更为曲折,且周围伴有多条微裂缝。

综上所述,与抗拉性能一致,钢纤维的增强效果显著(最大提升61.9%),最优掺量为1.5%;椰壳纤维的提升效果有限(最大提升14.3%),最优掺量为0.3%。两种纤维均能改善混凝土的脆性,且钢纤维的韧性提升效果远优于椰壳纤维。受弯构件需同时满足“抗折强度”与“韧性”要求,可优先选用1.0%~1.5%钢纤维混凝土;若为临时设施或低成本构件,可选用0.3%椰壳纤维混凝土。

### 3 结语

本文通过9组力学试验,系统剖析钢纤维与椰壳纤维不同体积掺量对混凝土力学性能的影响机制。明确钢纤维对混凝土力学性能的增强存在显著最优体积掺量区间,掺量1.0%~1.5%时,增强效果显著;椰壳纤维最优体积掺量为0.3%,此时混凝土抗压、抗拉和抗折性能均得到明显改善;相同掺量下,钢纤维对混凝土力学性能的增强效应全面优于椰壳纤维,钢纤维显著提升混凝土抗压性能,劈裂抗拉强度提升效果是椰壳纤维的2.6倍,抗折强度改善效果是椰壳纤维的4倍。本研究为解决实际工程中纤维选型及掺量适配问题,提供试验支撑。

基金项目:2024年教学成果培育项目(202403020C);成都工业学院人才项目博士基金(2024RC010);工业学院实验室开放基金(2024LOF016);教学改革与质量提升工程项目(2025SJJX012);成都工业学院2025年第二批创新性实验项目“纤维性材料改性混凝土力学性能研究”

### 参考文献

- [1]唐都都.纤维对混凝土力学性能影响研究进展[J].福建建材,2024,11(7):123-126.
- [2]王若冰,刘洋洋.钢纤维混凝土材料的力学性能研究[J].江苏建材,2025,12(2):44-46.
- [3]白敏,牛荻涛,姜磊,等.钢纤维改善混凝土力学性能和微

- 观结构的研究[J].硅酸盐通报,2013,32(10):2084-2089.
- [4]常晨,罗云蓉,付磊.钢纤维混凝土力学性能研究综述[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2022,35(3):84-92.
- [5]梁兴文,胡翱翔,于婧,等.钢纤维对超高性能混凝土抗弯力学性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(3):722-731.
- [6]李新星,周泉,李水生.钢纤维对活性粉末混凝土性能影响研究[J].施工技术,2020,49(14):81-85.
- [7] ABBAS S, SOLIMAN A M, NEHDI M L, et al. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete in incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75(30):429-441.
- [8]牛龙龙,张士萍,韦有信.钢纤维掺量对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2019,11(3):51-54.
- [9]李悦,王兴雷,丁庆军.钢纤维长度与掺量对混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2017,12(7):62-65.
- [10]陈从春,冯毅,陈晓冬.钢纤维体积掺量对超高性能混凝土力学性能的影响[J].新型建筑材料,2016,43(5):54-56.
- [11] WU Z, SHI C, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape[J]. Composites, 2019, 174(1):107021.
- [12]李新星,周泉,李水生.钢纤维类型和掺量对高性能混凝土力学性能的影响[J].混凝土,2024(12):145-152.
- [13]彭佳琳,黄智德,姚帅,等.钢纤维的形状和掺量对超高性能混凝土性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2025,11(7):48-53.
- [14]王继升.椰壳纤维增强混凝土力学性能[J].交通世界,2023(29):43-45.
- [15]徐伟杰,秦培成,单波,等.椰壳纤维超高性能混凝土基本力学性能研究[D].海南:海南大学学报(自然科学版),2025.
- [16]黄锋,肖丽丽,贺建莹.椰壳纤维掺量对混凝土抗压强度和热湿性能的影响[J].建筑结构,2025,55(7):97-104.
- [17]混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T50081-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18]章焱.超高性能混凝土性能及其应用研究综述[J].居舍,2025,11(2):38-40.
- 作者简介: 张敏 (1986.6—), 西南交通大学, 岩土工程, 成都工业学院, 专任教师, 副教授。

## Al-Mg-Si 系高导电铝合金研究进展

黄家亮<sup>1</sup> 黄永清<sup>1</sup> 赵振存<sup>1</sup> 李洋<sup>2</sup> 李欣洋<sup>2</sup> 秦志颖<sup>2</sup> 苗芳<sup>2</sup>

1.运城康道合金科技有限公司, 山西 河津 043300

2.中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051

**[摘要]**随着新能源电力系统和电气装备向轻量化、低成本方向发展, 开发高强度和高导电性的 Al-Mg-Si 系铝合金材料已成为实现“以铝代铜”的重要研究方向。然而, 合金元素固溶、析出强化及形变缺陷对电子输运的不利影响, 使强度与导电性能之间长期存在协同优化难题。近年来, 围绕合金化设计与形变热处理协同调控的研究不断深入, 通过对合金成分、析出相特征及缺陷结构的精细调控, 在一定程度上缓解了强度与电导率之间的制约关系。本文综述了 Al-Mg-Si 系导电铝合金在合金化设计与形变热处理方面的研究进展, 重点总结其对微观组织演化及力学-导电性能协同调控的作用机制。此外, 本文也对该类导电铝合金的未来发展方向进行展望, 为新一代高性能导电铝合金的设计与工程应用提供理论参考。

**[关键词]**Al-Mg-Si 合金; 导电铝合金; 合金化设计; 形变热处理

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18346 中图分类号: TG146.2 文献标识码: A

## Research Progress on High-conductivity Al-Mg-Si Aluminum Alloys

HUANG Jialiang<sup>1</sup>, HUANG Yongqing<sup>1</sup>, ZHAO Zhencun<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, LI Xinyang<sup>2</sup>, QIN Zhiying<sup>2</sup>, MIAO Fang<sup>2</sup>

1. Yuncheng Kangdao Alloy Technology Co., Ltd., Hejin, Shanxi, 043300, China

2. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi, 030051, China

**Abstract:** With the development of lightweight and low-cost requirements in new energy power systems and electrical equipment, the development of high-strength and high-conductivity Al-Mg-Si aluminum alloys has become a key research topic for realizing the substitution of aluminum for copper. However, the effects of alloying element solid solution, precipitation strengthening, and deformation-induced defects on electron transport have led to a challenge in achieving the optimization of mechanical strength and electrical conductivity. In recent years, increasing research efforts have focused on the synergistic regulation of alloying design and thermo-mechanical treatment. Through the precise control of alloy composition, precipitate characteristics, and defect structures, the trade-off between strength and electrical conductivity has been partially alleviated. This paper systematically reviews the recent progress in alloying design and thermo-mechanical treatment of Al-Mg-Si conductive aluminum alloys, summarizes their effects on microstructural evolution and the synergistic regulation mechanisms of mechanical and electrical properties, and further discusses future research. Furthermore, future research directions are discussed to provide theoretical guidance for the design and engineering application of next-generation high-performance conductive aluminum alloys.

**Keywords:** Al-Mg-Si alloys; conductive aluminum alloys; alloying design; thermo-mechanical treatment

### 引言

随着新能源汽车产业以及电力系统不断发展, 对导电材料的应用需求不断增加。铜合金作为传统导电材料, 虽具有优异的导电性能, 但其在资源储备, 成本控制等方面面临巨大挑战。在此背景下, 发展低成本的导电材料成为重要的发展方向。铝合金导电性仅次于铜合金, 且具有密度低、资源丰富和成本优势显著等特点, 在电力传输、新能源发电及电气装备等领域展现出广阔的应用前景。近年来, 随着合金设计、制备工艺等技术的不断进步, 铝合金

的导电性能得到显著提升, “以铝代铜”逐渐成为行业关注的热点, 具有良好的市场应用潜力<sup>[1,2]</sup>。

在众多导电铝合金体系中, Al-Mg-Si 系合金(如 6101、6001 等)因兼具较高导电性、良好的成形加工性能, 被认为是实现“以铝代铜”的重要候选材料。该类合金属于典型的可热处理析出强化型铝合金, 其力学性能和导电性能与合金成分设计及析出相演化行为密切相关。Al-Mg-Si 系合金典型析出相为  $Mg_2Si$ , 其析出强化在提升合金强度的同时, 往往加剧电子散射效应, 使力学性能与导电性能

难以同步提升,因此,突破强度与导电性能之间的制约关系,实现二者的协同优化,已成为当前Al-Mg-Si系导电铝合金研究中的关键科学问题和技术难点。相关研究表明,通过合理的合金化设计、形变热处理工艺优化,可调控析出相的类型、尺寸及分布,在一定程度上缓解强度与电导率之间的倒置关系,为提升Al-Mg-Si系导电铝合金的综合性能提供了有效途径<sup>[3,4]</sup>。基于此,本文将综述Al-Mg-Si系导电铝合金在合金化设计与形变热处理工艺方面的研究进展,归纳其对力学性能与导电性能的影响规律及作用机制,并对该类导电铝合金的未来发展方向进行展望。

## 1 铝合金强化方式对强度和导电性能的影响

铝合金的强化机制主要包括固溶强化、析出强化、晶界强化(细晶强化)和位错强化(加工强化)等。不同强化方式通过改变合金中溶质原子分布、第二相形态及晶体缺陷来提高力学性能,但同时也会以不同程度影响电子传输过程,对导电性能产生影响。Hou等<sup>[5]</sup>总结了制备高强度高导电铝合金的三大原则,为平衡铝合金强度和电导率之间的关系提供了有效指导,具体如图1所示。

相关研究表明,晶体中由溶质原子、析出相、位错及晶界等微观结构因素引起的原子周期性破坏,是影响金属导电性能的根本原因,铝合金的总电阻率可表示为各类散射贡献之和,如公式(1)所示。

$$\rho_{\text{total}} = \rho + \rho_{\text{ss}} + \rho_p + \rho_d + \rho_{\text{gd}} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{\text{total}}$  为材料的总电阻率;  $\rho$  为铝基体本征晶格电阻率;  $\rho_{\text{ss}}$  为溶质原子散射所引起的电阻率增量;  $\rho_p$  为第二相对电子散射所贡献的电阻率;  $\rho_d$  为位错缺陷引起的电阻率;  $\rho_{\text{gd}}$  为晶界散射导致的电阻率。

根据公式(1)可知,不同强化机制实质上对应于电阻率中不同散射项的变化:固溶强化主要增加  $\rho_{\text{ss}}$ , 位错强化和加工变形主要影响  $\rho_d$ , 晶粒细化主要影响  $\rho_{\text{gd}}$ , 而析出强化则通过降低  $\rho_{\text{ss}}$  并适度引入  $\rho_p$ , 在一定程度上实

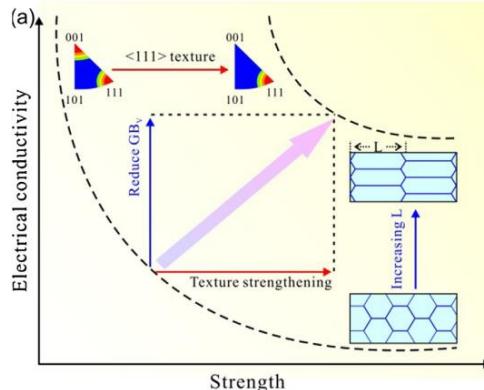


图1 高强度高导电金属材料设计原理<sup>[5]</sup>: (a) 拉长晶粒和组织导致强度和导电性同时提高;

现强度与导电性能的协调优化。因此,针对高强高导铝合金的设计,应以降低溶质原子和位错散射、合理调控析出相,实现多种强化机制的协同调控。

## 2 合金化设计对Al-Mg-Si系合金强度和导电性能的影响

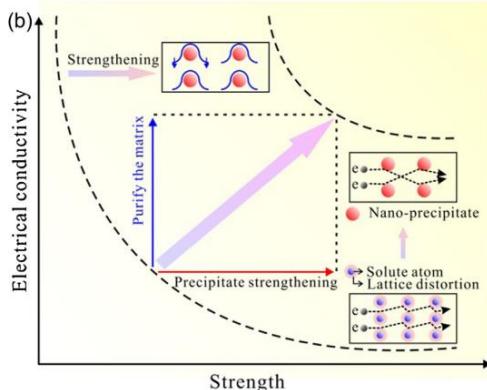
合金化及微合金化技术是改善铝合金综合性能、开发新型高强高导铝合金的重要手段之一。然而,铝合金导体材料的电导率对化学成分极为敏感,不同合金元素在铝基体中的存在形式、固溶行为及第二相特征差异显著,其对电子散射和力学性能的影响程度存在明显不同。因此,在实现强度提升的同时尽量降低对导电性能的不利影响,合理选择合金元素并优化其含量,是Al-Mg-Si系高强高导铝合金设计的核心问题。

### 2.1 Mg 和 Si 元素

Mg/Si比是影响Al-Mg-Si系合金导电性与强度的一个重要参数。研究表明,合理的Mg/Si比有利于形成弥散、均匀分布的 $\beta''$ 强化相,实现强度与导电性的优化匹配。Dong<sup>[6]</sup>等研究发现,当Mg/Si比为1.02时,合金在硬度与导电性之间达到最佳平衡,过量Si虽可促进时效析出、提高强度,但会因晶格畸变而降低导电性。Han<sup>[7]</sup>等指出,当Mg/Si比为1.48时,合金中 $\beta''$ 相分布最为致密且均匀,合金综合性能最优。因此,优化Mg/Si比率可促进强化相的充分沉淀,最大限度地减少基体中的残留合金元素,这对于实现强度和电导率之间的平衡至关重要。

### 2.2 Fe 元素

Fe元素是Al-Mg-Si合金中常见的杂质元素,具有极低的固溶度,容易与Al、Si形成多元金属间化合物,如 $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi相<sup>[8]</sup>,当Fe含量超过0.5 wt.%,会产生过量的Al<sub>5</sub>FeSi,降低合金的拉伸强度和伸长率。然而,在合理控制Fe含量的条件下,Fe的存在也会消耗过量的Si,形成的Al<sub>5</sub>FeSi可以减少电子散射,增加电导率<sup>[9]</sup>。



### 2.3 Mn 元素

Mn 元素的添加可有效调控含 Fe 相的形貌特征, 比如 Mn 可以抑制有害  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi 相的形成, 促进  $\alpha$ -Al(Fe,Mn)Si 等球形相的形成, 从而改善合金力学性能。但是 Mn 的引入会使合金的导电性与力学性能演化更为复杂, 若添加量不合理, 反而可能导致综合性能的下降。如 Zheng<sup>[10]</sup>等报道, 在 Al-Mg-Si 合金中单独引入 Mn 会使延伸率降低约 40%, 电导率降低约 22%。He<sup>[11]</sup>等研究了 Mn 对 Al-Mg-Si 合金拉伸性能和电导率的影响机制, 发现 Mn 含量为 0.18 wt.% 时, 经热挤压处理的合金仍表现出较优的综合性能, 其抗拉强度、伸长率和电导率分别为 176 MPa、24% 和 48.07%IACS。因此, 在合理 Mn 含量范围内, 并与其他合金成分设计及加工工艺相协同, 才能实现力学性能与导电性能的综合优化。

### 2.4 Cu 元素

Cu 是 Al-Mg-Si 系合金中常用的强化元素之一, Cu 的添加能够增加析出相 Mg<sub>2</sub>Si 的结合能, 时效过程中形成的含 Cu 的  $\beta''$  相, 该类析出相具有更高的热稳定性和抗溶解能力, 从而更有利于提高合金时效强化效果。王峰<sup>[12]</sup>等研究了 Cu 含量对导电性的影响, 结果表明添加 0.03wt.%Cu 可细化 Mg<sub>2</sub>Si 析出相并缩短时效时间, 使电导率提升至 60.18%IACS, 而 Cu 含量超过 0.06wt.% 时因 Cu 固溶于铝基体中, 导致晶格畸变, 加剧电子在传导过程中的散射效应, 进而导致材料电导率下降。Elgallad<sup>[13]</sup>

研究发现添加 0.4 wt.%Cu 的 Al-Mg-Si 系合金经过形变—热处理后合金的抗拉强度提高约 37%, 而电导率仅降低约 4.5%, 最终实现了 500MPa 的超高抗拉强度和 49%IACS 的较高电导率。

### 2.5 稀土元素

稀土元素 (如 Sc、Y、Ce、La 等) 添加到 Al-Mg-Si 系合金, 可有效提升其综合性能。研究表明, 稀土元素作用主要体现在三个方面: (1) 稀土具有变质效果, 稀土可以细化枝晶组织并抑制含 Fe 有害相形成; (2) 稀土具有合金化效应, 稀土可以与 Al、Si 等元素形成稀土化合物, 起到析出强化效果; (3) 稀土可以净化熔体, 稀土与熔体中的 O、S 等杂质反应生成稳定化合物, 降低夹杂物含量, 提高熔体纯净度。正是由于稀土的协同作用使 Al-Mg-Si 系合金在提升力学性能的同时, 也使其具备了良好的导电性。目前, 研究者对稀土作用开展了一系列研究, 如 Li<sup>[14]</sup>等研究了 La/Ce 和 La/Er 复合添加对 Al-Mg-Si 系合金强度和电导率的影响, 结果表明掺杂 La/Ce 可以形成共沉淀析出相, 使 Al-Mg-Si 合金的抗拉强度达到 223MPa, 添加 La/Er 可捕获 Si 溶质原子, 形成 ErFeSi 相沿合金晶界析出, 其电导率可达到 52.35%IACS。陈保安<sup>[15]</sup>等在 Al-Mg-Si 系合金中分别引入稀土 Ce 和 Sc, 发现稀土元素的添加显著改善了微米级 AlFeSi 粗大相的形貌与尺寸分布特征。其中, 添加 Ce 后合金电导率最高, 可达约 56.2%IACS; 而添加 Sc 后合金抗拉强度最高, 达到约 350 MPa。

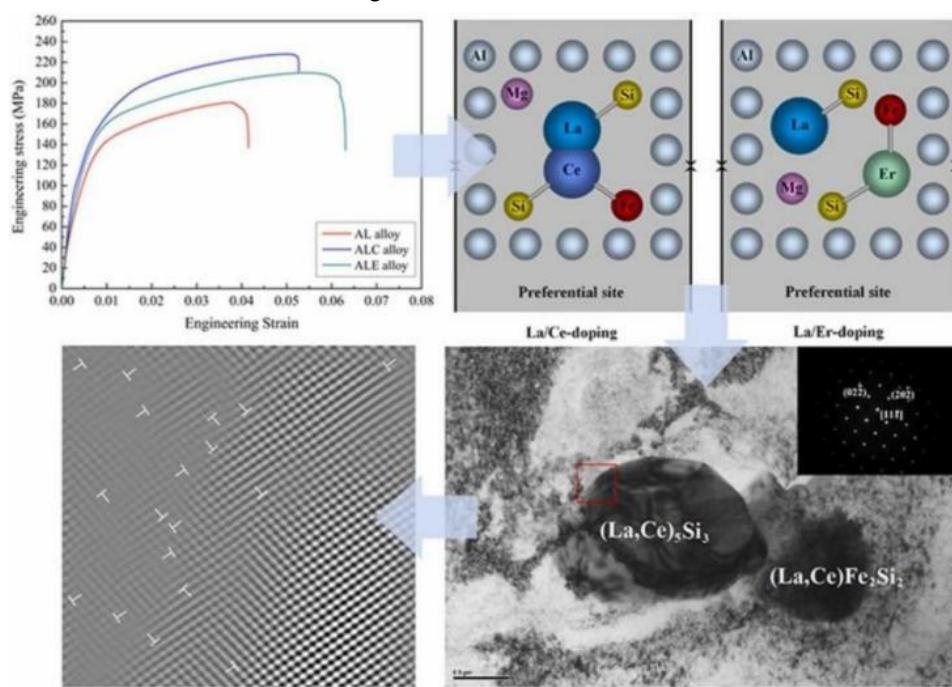


图 2 La/Ce 和 La/Er 共掺杂诱导沉淀强化高强度 Al-Mg-Si 导电合金<sup>[14]</sup>

### 3 形变热处理工艺对 Al-Mg-Si 系合金强度和导电性能的影响

形变热处理通过将冷（或温）塑性变形与随后的时效热处理过程有机结合，实现对 Al-Mg-Si 系合金微观组织的有效调控。塑性变形过程中引入的大量位错、亚晶界及细化晶粒，为 Mg-Si 原子团簇及亚稳析出相（如  $\beta''$  相等）的形核提供了优先位点。在随后的时效过程中，通过合理调控时效温度与时间，可促使细小且弥散分布的  $\beta''$  相析出，使得 Al-Mg-Si 合金具有良好的力学强度和导电性。

目前，研究者已开发出多种形变热处理工艺路径。不同形变方式在变形温度、应变量水平及缺陷引入机制方面存在显著差异，其对合金再结晶行为、析出动力学过程以及溶质原子分布状态的影响不同，进而导致力学性能与导电性能的差异。例如，热挤压、轧制等常规塑性变形方式通常引入中等密度的位错，并伴随动态回复与动态再结晶过程，可获得一定程度的晶粒细化和织构强化，从而在改善强度的同时保持较高的电导率。比如 Lin<sup>[17]</sup> 等采用预时效（180°C × 2h）+ 冷轧变形（70% 变形量）+ 二次时效（180°C × 6h）的形变热处理工艺，在 Al-Mg-Si 合金中引入高密度位错并促进细小析出相的均匀弥散分布，使极限抗拉强度和电导率分别达到 301MPa 和 58.9%IACS。Chen<sup>[18]</sup> 等通过多道次轧制+时效处理，使 Al-Mg-Si 合金形成明显的<111>择优取向，晶粒细化至约 23.5μm， $\beta''$  析出相尺寸减小至约 1.2nm，在晶粒细化与析出强化协同作用下，合金的屈服强度提升至 282.17MPa，同时电导率提高至 57.54%IACS。Majchrowicz<sup>[19]</sup> 等对 Al-Mg-Si(6101)

合金进行了挤压—时效形变热处理，通过高累积应变和热处理调控，获得 300~400nm 的超细晶以及弥散分布的针状  $\beta''$  相的微观组织，使合金抗拉强度达到 330MPa，电导率最高达 58%IACS。除传统变形方式外，大塑性变形结合时效处理的工艺路线也受到广泛关注。研究表明，等通道转角挤压（ECAP）、累积叠轧等大塑性变形技术可引入极高密度的位错并显著细化晶粒尺寸，加速析出相的形核与演化过程，从而使合金强度获得大幅提升。Zhao<sup>[20]</sup> 等研究了等通道转角挤压（ECAP）和多级时效工艺对 Al-Mg-Si 系 6063 合金抗拉强度和电导率的影响，结果表明，ECAP 变形可以诱导形成含纳米级析出相的超细晶组织，四道次 ECAP 后再经过两次时效处理，合金抗拉强度达到 376MPa，电导率为 49.5%IACS。尽管大塑性变形在晶粒细化和强度提升方面具有显著优势，但当累计变形量过大时，过高的缺陷密度和显著增加的晶界面积会增强电子散射效应，从而在一定程度上制约合金导电性能的进一步提升。Chrominski<sup>[21]</sup> 等通过累积轧制和时效工艺相结合的方法，使得析出相更加弥散分布，提高了 Al-Mg-Si 系合金硬度，如图 3 所示。因此，合理控制大塑性变形的累计变形量并与适宜的时效制度相匹配，是实现性能平衡的关键。总体而言，形变热处理已成为调控 Al-Mg-Si 系导电铝合金微观组织和综合性能的有效手段，相关研究在工艺路径设计、析出行为调控及性能优化方面取得了显著进展。未来研究应进一步围绕形变缺陷与析出相演化的耦合机制，精细调控变形程度与多级时效制度，同时结合先进表征技术和组织性能关联模型，进而开发出高强度、高导电性的 Al-Mg-Si 系合金。

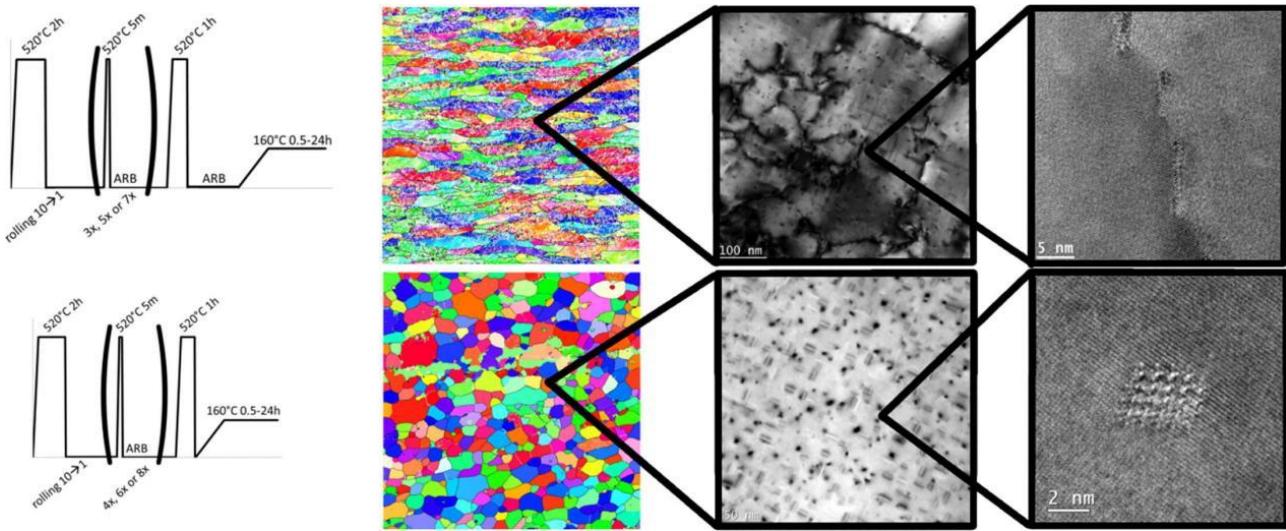


图 3 多次累积轧制结合时效热处理 Al-Mg-Si 合金的沉淀强化<sup>[21]</sup>

#### 4 结语

Al-Mg-Si 系导电铝合金兼具较高导电性、良好力学性能及成形加工性能,是实现“以铝代铜”的重要候选材料,具有广阔的工程应用前景。本文系统总结了当前导电铝合金的应用现状及研究进展,主要结论与展望如下:

(1) 通过合金化调控,尤其是引入稀土及微量合金化设计,一方面要抑制有害杂质相;另一方面应使得添加的合金化元素,在室温下以弥散相形式析出,降低基体固溶元素含量,在提高合金强度的同时,降低对电子的散射,使其兼备导电性。

(2) 导电铝合金制备过程中需高度重视熔体纯净度。通过熔体净化、区域提纯等工艺手段,有效降低杂质元素和非金属夹杂物含量,提升基体纯净度,从而显著改善合金的导电性能与综合力学性能。

(3) 合理的形变热处理工艺可通过引入高密度位错和晶粒细化,并结合多级时效调控析出相的类型、尺寸与分布特征,在一定程度上缓解强度与导电性能之间的制约关系。尤其是大塑性变形与多级时效工艺的协同应用,有望获得纳米晶结构与高度弥散的析出相,从而进一步提升导电铝合金的综合性能。

(4) 将机器学习与数据驱动方法引入导电铝合金研究,有望加速复杂合金化设计和多工艺参数的优化过程,实现成分-组织-性能之间关系的高效预测与精准调控,为新一代高强高导铝合金的设计与工程应用提供有力支撑。

基金项目: 河津市科技计划项目(202401); 浙江省博后基金(ZJ2024127)。

#### 【参考文献】

- [1] 王学印,郭广勋.制冷空调行业铝代铜现状及其发展前景[J].轻合金加工技术,2025,53(5):1-5.
- [2] 范文秀,刘欢,吴玉娜,等.Al-Mg-Si 导电铝合金的研究现状及发展趋势 [J]. 现代交通与冶金材料,2025,5(3):86-126.
- [3] 王茹,邱铨强,吴蔚,等.Ag 微合金化对 Al-Mg-Si 合金析出相结构的影响 [J]. 特种铸造及有色合金,2024,44(8):1127-1132.
- [4] 尹斌,曹富荣,王顺成,等.稀土元素对连续铸挤 Al-Mg-Si 合金组织性能的影响 [J]. 精密成形工程,2017,9(6):130-136.
- [5] Hou J P, Li R, Wang Q, et al. Three principles for preparing Al wire with high strength and high electrical conductivity[J]. Journal of Materials Science and Technology,2019,35(5):742-751.
- [6] Dong Q P, Wang R Z, Wang J H, et al. Influence of Mg/Si ratio on the mechanical strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Today Communications,2025(42):111439.
- [7] Han Y, Shao D, Chen B A, et al. Effect of Mg/Si ratio on the microstructure and hardness-conductivity relationship of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloys[J]. Journal of Materials Science,2017(52):4445-4459.
- [8] Zhao Q R, Qian Z, Cui X L, et al. Optimizing microstructures of dilute Al-Fe-Si alloys designed with enhanced electrical conductivity and tensile strength[J]. Journal of Alloys and Compounds,2015(650):768-776.
- [9] Cui X L, Li X H, Ye H, et al. Study on microstructure characterization, electrical conductivity and mechanical property improvement mechanisms of a novel Al-Si-Mg-Fe-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds,2021(885):160959.
- [10] Zheng Y, Bian L P, Ji H L, et al. Influence of Ca and Mn on microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity of as-cast and heat-treated Al-Mg-Si alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2022,51(11):4010-4020.
- [11] He J X, Wang J B, Ding J, et al. Influence of Mn in balancing the tensile and electrical conductivity properties of Al-Mg-Si alloy[J]. Metals,2025,15(8):923.
- [12] 王峰,王松伟,王帆,等.Cu 对热挤压 Al-Mg-Si 合金力学性能及导电率的影响 [J]. 沈阳工业大学学报,2015,37(5):515-519.
- [13] Elgallad E M, Khangholi S N, Javidani M, et al. Development of ultra-high-strength Al-Mg-Si conductor alloys with copper addition via scalable thermomechanical processes[J]. Scripta Materialia,2025(257):116462.
- [14] Li D Q, Cai S L, Gu J, et al. Co-doping of La/Ce and La/Er induced precipitation strengthening for designing high-strength Al-Mg-Si electrical conductive alloys[J]. Materials Today Communications,2023(36):106666.
- [15] 陈保安,李梦琳,陈瑞,等.添加稀土对 Al-Mg-Si 合金微观组织和性能的影响[J].金属热处理,2024,49(7):100-105.

- [16] Mahmoud M G, Zedan Y, Samuel A M, et al. Effect of rare earth metals (Ce and La) addition on the performance of Al-Si-Cu-Mg cast alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(3):1164-1190.
- [17] Lin G Y, Zhang Z P, Wang H Y, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of Al-Mg-Si alloy by thermo-mechanical treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016(650):210-217.
- [18] Chen L, Ou M G, Liang Y, et al. Effects of processing paths on microstructure evolution and properties of high-strength and high-conductivity Al-Mg-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025(941):148606.
- [19] Majchrowicz K, Pakiela Z, Chrominski W, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion[J]. Materials Characterization, 2018(135):104-114.
- [20] Zhao N N, Ban C Y. Developing a high-strength Al-Mg-Si alloy with improved electrical conductivity by a novel ECAP route[J]. Metals and Materials International, 2022(28):2513-2528.
- [21] Chrominski W, Lewandowska M. Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment[J]. Materials & Design, 2022(219):110813.

作者简介：黄家亮（1986.1—），男，本科学历，毕业学校：西安石油大学，所学专业：化学专业，现就职单位：运城康道合金科技有限公司。

## 气体绝缘开关柜散热优化设计研究

李强 张庆兵 岳浩然

山东电工配网科技发展有限公司, 山东 济南 250000

**[摘要]**气体绝缘开关柜是电力系统中的重要组成部分, 其性能的好坏直接关系电力系统的运行质量, 设备运行稳定性的维持、绝缘材料老化速度的减缓以及整体使用寿命的延长等问题。近年来随着电力系统容量增加, 大电流气体绝缘开关柜的温升散热问题日益突出, 文章深入剖析设备结构特点及内部热源分布规律, 依据传热学基本原理搭建起柜内热场模型, 并且制定了散热性能评价指标, 接着从结构布局优化、材料表面处理技术、强制通风与自然对流设计以及散热附件选型布置等多个角度展开优化方法的探讨, 最后在工程应用层面整合出优化设计方案, 兼顾经济性和可靠性, 并对未来的技术趋势做出预测。

**[关键词]**气体绝缘开关柜; 大电流; 散热优化; 传热模型; 温升

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18359 中图分类号: TM76 文献标识码: A

## Research on Heat Dissipation Optimization Design of Gas Insulated Switchgear

LI Qiang, ZHANG Qingbing, YUE Haoran

SDEE Distribution Net Tech Development Co., Ltd., Ji'nan, Shandong, 250000, China

**Abstract:** Gas insulated switchgear is an important component of the power system, and its performance directly affects the operation quality of the power system, the maintenance of equipment stability, the slowing down of insulation material aging rate, and the extension of overall service life. In recent years, with the increase of power system capacity, the temperature rise and heat dissipation problem of high current gas insulated switchgear has become increasingly prominent. This article deeply analyzes the structural characteristics of equipment and the distribution law of internal heat sources. Based on the basic principles of heat transfer, a thermal field model inside the cabinet is built, and heat dissipation performance evaluation indicators are formulated. Then, optimization methods are discussed from multiple perspectives such as structural layout optimization, material surface treatment technology, forced ventilation and natural convection design, and selection and layout of heat dissipation accessories. Finally, an optimized design scheme is integrated at the engineering application level, taking into account both economy and reliability, and predicting future technological trends.

**Keywords:** gas insulated switchgear; high current; heat dissipation optimization; heat transfer model; temperature rise

随着全球能源需求不断增长和环境保护意识日益增强, 电力行业正面临前所未有的挑战与机遇。作为电力系统中不可或缺的关键设备, 气体绝缘开关柜的性能优化与环保化改造已成为行业关注的焦点。设备内部因负荷电流持续起作用且元件排列密集, 热量积聚的问题日益突出。散热不畅, 会致使绝缘材料性能变差, 还可能让机械部件加速磨损, 甚至引发火灾。所以开展散热优化设计研究, 对保障电力持续供应和设备长久运行, 有迫切的实际意义。当下学术界虽对散热问题有关注, 但大多仅限于局部改进, 缺少系统整合。

### 1 气体绝缘开关柜散热问题概述

#### 1.1 设备结构特点与热源分析

气体绝缘开关柜采用 304 不锈钢焊接而成的密闭气

箱结构, 填充干燥的六氟化硫或其他绝缘气体。这种密闭的气箱结构使开关柜具有小型化、环境适应性好的优点, 可是却对热量向外部散发的路径形成了限制。其内部的热源主要是导电回路当中电阻损耗所产生的焦耳热, 还有铁磁材料在交变磁场的作用之下引发的涡流损耗热。除此之外, 在开关操作的时候, 电弧能量的转化也会瞬间产生大量的热量, 进而让局部的温升变得更加严重。设备内部的元件, 像断路器、三工位开关以及导体搭接处等, 它们的安装密度是比较高的, 这就使得热源分布呈现出一种不均匀的状态。这些热源会通过导热、对流以及辐射等方式在柜内的空间当中传递, 最终形成较为复杂的热场格局。所以, 要对主要热源的位置以及强度加以识别, 这是优化散热设计的一项基础性工作。

## 1.2 散热不良的影响与优化必要性

散热状况欠佳致使气体绝缘开关柜内部出现温升过高的情况，而这一状况又会引发一连串的连锁反应，像绝缘材料的热老化速度加快、机械部件因热应力发生变形，还有密封性能有所下降等。绝缘材料长时间处于高温环境当中，其介电强度会一点点地丧失掉，如此一来便有可能引发局部放电的情况，甚至造成绝缘击穿这类事故。与此高温还会推动柜内的绝缘气体发生分解，进而产生出有害物质，这些有害物质会对金属表面起到腐蚀的作用，并且使得设备的可靠性降低。从系统运行的角度来讲，温升过高的情况会迫使设备降容运行，这样一来就会对电网的传输能力形成制约，还会使运维成本有所增加。所以说，开展散热优化设计，这既是提升单台设备性能的需求，也是保障整个电力系统能够经济高效地运行的必要手段。只有通过系统的优化，才能够从根源上缓解散热方面的问题，并且延长设备的服役寿命。

## 2 散热理论分析与传热模型

### 2.1 传热基本方式在柜体中的应用

在气体绝缘开关柜的散热进程里面，传热学所涵盖的导热、对流还有辐射这三种基本的方式全都占据着极为关键的地位。其中，导热主要是于固体部件之间发挥作用，就好比母线排和支架相互接触的部位，以及借助柜体的金属壁面朝着外界传递热量；对流则是依靠密闭气箱内的气体介质自然对流将主回路导体的热量带离发热点，传送到气箱不锈钢外壳处，在气箱外部，可通过自然对流或强制对流将气箱不锈钢板的热量散发到环境空气中；辐射传热是在高温表面和周围的环境之间开展的，其效率会受到表面发射率较为明显的影响。在实际的应用过程当中，得要全面且细致地考量这三种方式彼此间所产生的作用，进而精准地描绘热量传递的具体过程<sup>[1]</sup>。比如说，柜内的空气因为存在温度梯度，所以形成了自然对流的循环状态，与此外部的风扇在驱动强制对流，以此来强化散热的效果，把柜体的表面涂上高辐射的涂层，能够提高辐射散热的能力，进而构建起多途径的散热格局。

### 2.2 柜内热场分布特点

气体绝缘开关柜内部的热场分布呈现出较为明显的非均匀特性，并且存在动态变化的特点。其热源集中的区域，比如断路器隔室还有电缆接头处，温度要比其他部位高出不少，进而形成了热积聚的情况。热量会借助金属构件传导以及气体对流的方式逐渐向着四周扩散，不过由于结构方面的阻挡，往往使得在角落位置出现热点。热场分布会受到柜体几何形状、内部元件布局以及外部环境温

度等多方面因素的影响，呈现出复杂的三维图案。运用计算流体动力学模拟的方法，能够将热场分布可视化，还能识别出高温区域，以此为优化设计给予依据。热场的不均匀情况，不但会让局部过热的风险加剧，而且还可能引发热应力集中，最终对结构完整性产生影响。所以理解热场分布的特点，是制定针对性散热措施的基础条件。

## 2.3 散热性能评价指标

散热性能评价需确立量化指标，以便客观衡量优化成效并指导工程实践，常用指标有最高温升、平均温升、温度均匀度系数及散热效率因子等参数。最高温升体现设备最热点温度与环境温度的差值，并且和绝缘材料耐受极限直接相关联；平均温升能表征整体散热水平，且与设备负载能力紧密联系在一起；温度均匀度系数借助统计柜内各点温度标准差来评估热场分布均匀性，防止出现局部过热情况；散热效率因子综合考量散热功耗与散热量的比值，以此体现经济性。这些指标共同组成了散热性能的评价体系，在优化设计中用来对比不同方案的优劣。依据李四在传热学应用研究中的看法，评价指标的选择要结合具体工程需求，同时注重可测量性与实用性。

## 3 散热优化设计方法与技术

### 3.1 结构布局优化

结构布局优化主要通过调节设备内部元件排列以及气流通道设计，以此来改进热量散发的路径。比如把像断路器这类高热耗散元件布置在靠近自然通风环流路径处或者散热面的位置，这样能够缩短热传递的距离。与此要合理规划母线的走向和间距，以此减少涡流损耗，还能提高空气流通的效率。在气箱内部增设导流挡板，可引导气流朝着特定方向流动，如此一来便能防止死区形成，并且提升对流散热的效果。结构布局优化还得考虑到维护的便捷性以及安全间距的要求，从而达成散热与功能之间的平衡。这种优化的方法依靠的是对热场分布的透彻理解，并且通过仿真的方式不断迭代，最终得到最佳的布局方案。气体绝缘开关柜的结构布局优化属于一个多目标优化的过程，得同时兼顾散热性能以及电气绝缘方面的要求。

### 3.2 材料与表面处理技术

材料选择以及表面处理技术，这两者对于提升散热能力有着直接的影响。要是采用导热系数比较高的铝合金亦或是铜合金来制作散热片还有柜体部件，那么就能够让热量传导的速度加快起来。而像阳极氧化或者喷涂高辐射涂层这样的表面处理方式，它能够使得表面发射率得以增强，进而让辐射散热的效率有所提升。在绝缘材料的选择上，要是选用那种既耐高温又导热性能不错的硅橡胶或者环

氧树脂，如此一来便能够减少热阻，并且还能够延缓老化的进程。这些技术在应用的时候，得综合去考量成本方面的因素以及工艺是否可行，以此来防止出现过度设计的情况。把材料以及表面处理技术相结合起来，是能够从本质上对散热路径加以改善的，并且还能降低热积聚的风险。依据王五在材料热性能方面的研究发现，对表面粗糙度进行处理，也是能够对对流散热效果做出细微调整的，不过得把控好加工的精度才行。

### 3.3 自然对流与强制通风设计

自然对流设计及强制通风，属于增强柜内气流运动进而强化对流散热的重要举措。自然对流依靠温度差所驱动的气流循环来发挥作用，其设计的关键点在于对散热包和自然通风环流路径的设计加以优化，从而形成所谓的烟囱效应。强制通风则是借助安装风扇或者风机的方式，主动地推动空气流动，并且在高温时段还能够提升散热的能力，在设计阶段需要对风量的需求以及风压的损失进行相应的计算，以此来与风扇的选型相匹配，同时还要避免出现噪声过大的情况。并且气流的组织要避免出现短路循环的现象，务必要确保冷空气能够充分地流经热源所在的区域。强制通风和自然对流是能够结合在一起使用的，以此来达成节能以及高效散热之间的平衡，就好比在低温负荷的情况下依靠自然对流，而在峰值负荷的时候则启动强制通风系统。

### 3.4 散热附件选型与布置

散热附件像散热片、热管以及冷却风扇的选型和布置得依据具体热负荷还有空间约束来展开定制化设计工作。散热片的翅片形状以及间距会对对流散热效率产生影响，所以在选型的时候要综合气流速度和温度条件来考量。热管借助相变传热原理可高效转移热点热量，不过在布置的时候得把倾角以及重力方面的影响因素都考虑进去。冷却风扇的选型需要与风量风压曲线相匹配，并且要留心安装方向，以此来促成协同气流的形成<sup>[2]</sup>。附件在布置的时候务必要避免遮挡电气间隙，同时还要确保具备维护可达性。这些附件经过集成应用之后，能够大幅提升局部散热能力，还能对结构设计存在的不足加以弥补。散热附件选型以及布置是否合理，这直接关乎到优化方案的实施效果以及可靠性如何。

## 4 散热优化设计的工程应用与前景

### 4.1 优化设计方案集成

优化设计方案的集成，要把结构布局优化、材料技术、通风设计以及附件选型等诸多方面的举措加以整合，就好

比在新型气体绝缘开关柜设计时，选用铝合金箱体，同时结合内部导流挡板和顶部风扇，以此构建起综合散热系统。在集成进程里，得借助仿真分析以及样机测试来验证方案是否可行，并且对参数做出相应调整，进而达成最佳效果。设计方案集成的时候，还得考量制造工艺的适配性，以此保证批量生产能够保持一致性。这样的集成化方式，可让各个优化方法发挥出协同效应，从而提升整体散热性能。依据赵六在工程热物理领域所阐述的观点，方案集成应当遵循从整体到局部的原则，而且要重视模块化设计，方便后续的升级操作。

### 4.2 工程应用要点

工程应用要点涵盖现场安装条件受到的限制、运维便利性的要求以及环境适应性的考量等诸多实际因素，在安装之时，务必要保证散热通道不会被遮挡，并且要合理安排外部散热附件的布置，以防对其他设备的运行产生影响。从运维角度来讲，应当设计出便于清洗的散热通道，同时预留监测接口，借此能够实时追踪温升数据。环境适应性方面的要求是，设备即便处于高温高湿或者粉尘较多的地区，依旧能够维持可靠的散热性能<sup>[3]</sup>。工程应用要点还牵涉到和电力系统中其他设备的协调配合，以此来避免出现相互间的热干扰情况。这些要点的落实，需要设计人员与现场工程师密切协作，并依据反馈信息不断加以改进。简单来说，散热优化设计不能仅仅停留在理论层面，而必须要契合工程实际，如此才能够发挥出其应有的价值。

### 4.3 经济性与可靠性平衡

经济性和可靠性之间的平衡，乃是散热优化设计在工程推广进程里不得不去面对的一项重大挑战。过高的材料成本又或者是复杂的散热系统，极有可能致使初期投资额度得以提高，同时也会让投资回报的周期变得更为漫长。所以，务必要在性能有所提升以及成本能够得到有效控制这两者之间努力探寻出一个最为理想的解决办法，比如可以考虑选用那种性价比相对较高的涂层材料，或者采取分级启动风扇这样的策略。就可靠性而言，散热系统自身出现故障的情况，像是风扇突然停止转动这类情形，绝不能够使得设备马上便失去作用，而是应当要有相应的备份举措。要想实现经济性和可靠性的平衡，那就得借助生命周期成本分析的方式，以此来对不同方案所具有的整体效益展开评估。这样的一种平衡，恰恰彰显了工程设计当中务实的价值取向，并且还推动了优化技术在实际当中的应用。经济性和可靠性平衡的最终达成，往往是要依靠经验的不断积累以及数据强有力的支持。

#### 4.4 技术发展趋势

技术发展的趋势主要指向智能化、高效化以及绿色化这三个方面。智能化具体表现为集成温度传感器和控制系统,以此来实现自适应散热调节,进而降低能耗。高效化则是借助新材料,像石墨烯导热片或者微通道冷却技术等,进一步提高散热密度。绿色化着重于采用环保绝缘介质以及可回收散热材料,从而减少对环境的污染<sup>[4]</sup>。在未来的研究当中,会更多地聚焦于多物理场耦合仿真以及人工智能优化算法,以此加快设计的进程。这些发展趋向将会促使气体绝缘开关柜的散热设计迈向更高的水平,精准把握技术发展的趋势对于开展前瞻性布局以及维持在行业的竞争力而言是很有帮助的。

#### 5 结束语

气体绝缘开关柜散热优化设计研究属于多学科交叉且结合工程实践的综合性课题范畴,本文全面梳理了散热问题在理论层面的根源所在,并且提出了一系列从结构布局方面着手到附件集成方面的优化办法,借助传热模型展开分析以及开展性能评价,从而为散热设计构建起科学依据,在工程

应用层面着重指出了方案集成和经济性可靠性平衡的重要意义,未来随着技术不断取得进展,智能化且高效的散热方案会逐步占据主流地位,期望后续相关工作能够在实验验证以及标准制定等方面进一步深化,以此推动成果顺利转化。

#### [参考文献]

- [1]井宏亮.低泄漏气体绝缘开关设备气密封结构优化研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2025.
  - [2]姚远,黄银阳,刘立,等.金属掺杂二硫化钨基传感器对空气开关柜绝缘缺陷气体 NO<sub>2</sub>的气敏特性研究[J].传感技术学报,2025,38(8):1381-1387.
  - [3]宋光华.干燥空气绝缘环网柜的技术特点与发展趋势[J].科技与创新,2021(11):100-101.
  - [4]黄印,颜湘莲,高克利,等.C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub>混合气体绝缘环网柜的接地开关关合性能模拟试验[J].高电压技术,2023,49(7):2858-2867.
- 作者简介:李强(1984.10—),山东电工配网科技发展有限公司,山东济南 250000,毕业学校和专业:西北农林科技大学,专业:农业机械化及其自动化。

## 绿色建筑与传统建筑的能效对比与优化策略

柳亚磊<sup>1</sup> 苏 薇<sup>2</sup>

1. 河北建筑设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000

2. 河北工程技术学院, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**在“双碳”目标以及可持续发展战略所引领的背景之下, 建筑能耗已然变成了能源管理还有生态建设当中的一个颇为重要的议题。绿色建筑属于一种以节能、环保、健康以及舒适当作核心理念的全新建筑模式, 正在逐渐地去取代传统的那种高能耗建筑。文中全面且细致地对绿色建筑和传统建筑在能效呈现状况、系统构成情况以及运行管理等方面所存在的差异展开比较, 以此来揭示二者在能源利用效率、对环境产生的影响以及运行模式方面的本质区别。相关研究说明, 绿色建筑在设计理念层面、材料选取方面、系统集成环节以及智能化管理领域都拥有着十分突出的优势, 能够达成建筑在整个生命周期里能耗的最小化以及环境效益的最大化。针对建筑节能过程当中存在的结构性问题, 文中给出了从设计加以优化、设备系统予以升级以及运营实现智能化这三个方面的综合性优化途径, 从而为我国建筑业达成节能降碳以及高质量发展这一目标给予理论层面的有力支撑以及实践方面的有效参考。

**[关键词]**绿色建筑; 传统建筑; 能效对比; 优化策略

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18358 中图分类号: TU74 文献标识码: A

## Comparison and Optimization Strategies of Energy Efficiency between Green Buildings and Traditional Buildings

LIU Yalei<sup>1</sup>, SU Wei<sup>2</sup>

1. Hebei Institute of Architectural Design & Research Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. Hebei Polytechnic Institute, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** Against the backdrop of the "dual carbon" goals and sustainable development strategies, building energy consumption has become a significant issue in energy management and ecological construction. Green building is a new architectural model that takes energy conservation, environmental protection, health, and comfort as its core concepts, and is gradually replacing traditional high-energy consumption buildings. The article comprehensively and meticulously compares the differences between green buildings and traditional buildings in terms of energy efficiency, system composition, and operational management, in order to reveal the fundamental differences between the two in terms of energy utilization efficiency, environmental impact, and operational modes. Related research shows that green buildings have outstanding advantages in design concepts, material selection, system integration, and intelligent management, which can achieve the minimization of energy consumption and maximization of environmental benefits throughout the entire life cycle of buildings. In response to the structural problems in the process of building energy conservation, this article provides a comprehensive optimization approach from three aspects: optimizing design, upgrading equipment systems, and achieving intelligent operation, which provides strong theoretical support and practical reference for Chinese construction industry to achieve the goals of energy conservation, carbon reduction, and high-quality development.

**Keywords:** green building; traditional architecture; energy efficiency comparison; optimization strategy

### 引言

建筑领域属于社会能源消耗以及碳排放的重要源头之一, 其能效水准和节能减排目标的达成、生态文明建设目标的实现有着直接关联。传统建筑长期以来把功能和成

本当作导向, 对能耗与环境负荷有所忽略, 致使在运行阶段出现能效低下的情况, 资源浪费颇为严重, 很难符合当下绿色转型的相关要求。与之相比, 绿色建筑把节能、生态以及可持续发展作为核心要点, 借助优化设计、运用高

性能材料、集成可再生能源以及实施智能化管理等手段，达成了建筑全生命周期中能耗得以降低以及环境影响尽可能最小化的成效。本文选取绿色建筑与传统建筑的能效差异当作研究的主要线索，从能耗现状、结构特征以及优化策略这三个不同层面来展开较为系统的分析工作。经由定性与定量方面的比较，将两类建筑在能源利用效率、环境适应性以及运行管理机制等方面存在的差距充分揭示出来，并且结合前沿技术以及典型案例，给出绿色建筑能效优化的切实可行的路径。此项研究目的在于为建筑节能政策的制定、技术方面的创新以及行业的转型给予理论层面的依据以及决策方面的参考，促使我国建筑业朝着低碳化、智慧化以及可持续的方向不断发展进步。

## 1 绿色建筑与传统建筑概述

作为我国现代建筑工程建设的主要趋势，绿色建筑强调在设计、建造、运营等阶段综合考虑节能、资源利用、环境保护、健康舒适等要素，在有效减少环境负面影响的同时，提高人居环境质量，并构建以可持续发展为目标的建筑模式。绿色建筑在建筑材料选取、能源利用效率、室内环境调节以及环境适应性等方面均有不错的表现，其可有效地降低建筑运行期间的能耗，减少碳排放量，同时还能提高居住者的舒适程度以及健康水平。与之相比，传统建筑更多地将关注点放在功能实现以及建造成本上，在节能、资源利用以及环境保护等方面考虑得较为有限，如此一来便容易出现能源浪费的情况，使得环境负荷不断增加。绿色建筑的主要特点表现在两方面。第一，关注环境保护和人民健康。项目需在施工阶段考虑建筑对周边环境的影响，提高室内空气质量，以营造健康、舒适的生活环境。绿色建筑十分看重自然采光、通风以及噪声控制等方面的情况，通过这样的方式来促使室内环境质量得以改善，并且让能源消耗能够有所降低。反观传统建筑，在这些方面所采取的措施是比较有限的，所以其室内环境的舒适性以及能效水平相对来说都处在一个比较低的状况。第二，强调可持续发展。在建筑规划、设计和运营过程中，相关人员需对建筑长期影响和社会责任加以综合考虑，将建筑经济效益、社会和环境效益的可持续性作为追求目标，以实现建筑与自然、社会的和谐共生。绿色建筑凭借资源循环利用、低碳节能设计、可再生能源系统应用以及智能化能源管理等举措，达成了建筑全生命周期的能效优化。反观传统建筑，在这些方面所采用的技术应用与管理手段往往存在欠缺，所以很难实现长期节能以及可持续发展。绿色建筑一般会结合智能监测系统，针对建筑能耗展开实时分析与调节，如此一来便能够进一步提高建筑运行效率以及

环境友好性，进而为达成节能减排以及可持续城市发展的目标给予强有力的支撑。

## 2 能效现状与对比分析

### 2.1 绿色建筑能效现状

绿色建筑把全生命周期节能理念当作核心，从设计环节开始一直到建造阶段，再到运行阶段，都是以降低能源消耗还有减轻环境负荷当作目标。近些年来，随着绿色建筑标准体系一步步变得更加完善，而且技术创新也在持续不断地推进，我国绿色建筑的能效水平有了十分突出的提高。在设计阶段的时候，绿色建筑着重关注建筑体形系数的控制以及朝向的优化，借助自然采光和通风方面的设计来减少人工照明以及空调负荷；在建造阶段，广泛运用低能耗材料以及高保温围护结构，以此来提升建筑的热稳定性和气密性；到了运行阶段，就通过智能监测系统对能耗实施动态调控，达成能量的精细化管理。实践已经证明，绿色建筑的能源利用效率相比于传统建筑能够提升百分之三十至百分之五十，其综合能耗也出现了明显的下降情况。部分高星级的绿色建筑在运行阶段的单位面积能耗甚至比同类传统建筑还要低，低得甚至不到传统建筑的三分之一。除此之外，绿色建筑在可再生能源利用这块也取得了较为显著的成效，像太阳能光伏发电、地源热泵、雨水回收系统等这类技术的应用，促使建筑逐渐实现从“能源消耗者”转变为“能源自给体”的改变。与此绿色建筑在提升室内环境品质、改善居住舒适度以及减少碳排放等方面也都发挥出了十分重要的作用。绿色建筑能效的大幅提升既依靠技术创新，还离不开全生命周期节能理念以及系统化管理模式的贯穿始终。

### 2.2 传统建筑能耗现状

传统建筑于我国建筑体系当中依旧占据着颇为可观的比例，而其能耗水平也普遍处于偏高的态势。因为在设计阶段，人们往往会着重去追求功能得以实现以及经济性方面的目标，如此一来，建筑的布局情况、所朝向的方向、围护结构以及通风系统的设置，常常是缺少节能方面的考量的，这就使得建筑在调节热环境的效率方面显得比较低，在夏季的时候需要大量依靠空调来制冷，而在冬季又得靠高强度的供暖才行，能量在此过程中会有严重的损失情况出现。有一部分传统建筑所采用的外墙、屋面还有门窗等材料，其隔热性能是比较差的，这就致使热能会通过围护结构大量地散失出去。再者说，照明系统普遍是采用高功率的光源以及较为落后的控制方式的，并且还缺乏分区控制以及自动调节的相关机制，这无疑又增加了能耗方面的负担。在运行阶段，能源的浪费情况格外突出。传统建筑

普遍是没有能耗监测系统以及能源管理平台的,其运行维护工作主要依靠的是人工的经验,没办法达成对能耗数据的实时掌握以及优化调节的目的。由于建筑设备出现了老化的状况,运行效率也比较低下,再加上用户使用行为并不合理,所以许多建筑在能耗方面存在着“高投入、低利用”这样的一种现象。据相关的统计显示,我国城市公共建筑平均每单位面积的能耗大概是绿色建筑的1.5~2倍。除此之外,传统建筑在水资源的利用、废热的回收以及可再生能源的利用等方面的技术水平是比较低的,整体的能源利用效率亟需得到提升。可以毫不夸张地说,传统建筑能耗偏高、能效偏低并且缺乏科学管理的这种现状,已然成为我国建筑节能工作所面临的诸多瓶颈当中的一个主要瓶颈了。

### 2.3 绿色建筑与传统建筑能效对比

从能效指标以及运行性能角度来讲,绿色建筑和传统建筑相比,在能源利用率、运行管理还有环境效益等方面的表现更加出色。绿色建筑借助优化设计、采用高性能材料以及智能控制系统,使得能源利用效率得以明显提高,其每单位面积的能耗能够比传统建筑降低大概30%~50%,能源利用率从传统建筑的大约40%提升到了70%以上。绿色建筑一般都会配置建筑能源管理系统(BEMS),可以达成能耗的实时监测以及自适应调控,然而传统建筑大多依靠人工操作,缺少动态优化的能力。在环境效益方面,绿色建筑凭借可再生能源利用、废热回收以及雨水循环系统的综合运用,大幅减少了对外部能源的依赖以及碳排放,其全生命周期的碳排放量相比于传统建筑能够降低大约40%。与此绿色建筑在室内空气质量、热舒适度以及照度均衡方面的表现更好,这既提升了居住的健康水平,又加强了建筑整体的能效以及生态协调性。

## 3 绿色建筑能效优化策略

### 3.1 建筑设计优化

建筑设计属于决定建筑能效水平的关键环节,其核心理念体现在系统性、前瞻性以及环境适应性等方面,借助科学规划与整体协调的方式达成能源的最优配置目标,在总体布局方面需要充分考量气候特征、地理位置以及周边环境条件等因素,合理确定建筑朝向与体形系数,最大程度地利用自然采光与通风,以此来减少对人工照明以及机械制冷的依赖程度<sup>[1]</sup>。围护结构作为影响建筑热工性能的重要因素,应当采用高效保温隔热材料以及低辐射玻璃,以此降低热能传导与损失情况。在不同的气候区域,可以根据季节特征去设计可调节的遮阳系统,进而实现冬季保

温与夏季隔热这两种效果。与此在设计阶段要重视可再生能源的集成利用,把太阳能光伏、地源热泵以及风能系统融入到建筑结构体系当中,达成能源自给与清洁利用的目的。雨水收集与中水回用系统的相关设计,对于减少建筑水能耗以及提升资源利用效率有着积极作用。在空间布局方面,要合理配置功能区,避免出现冷热区域交叉的情况,减少能量传递过程中的损耗。绿色屋顶与垂直绿化的运用,不但能够改善局部的小气候状况,而且可以有效地降低建筑外表面的温度,进一步减少制冷能耗。

### 3.2 建筑设备与系统优化

建筑设备以及能源系统在能效优化方面占据着核心地位,其性能状况会直接对建筑的整体能耗水平起到决定性作用。绿色建筑借助高效的设备并且把各个系统加以集成,进而达成能源的梯级利用以及综合平衡的目的。就暖通空调系统来讲,运用变频压缩机、余热回收还有地源热泵等相关技术,是能够实现热能循环再利用的;而在末端系统当中引入变风量也就是VAV控制方式,能够依据负荷的变化情况来做到“按需供能”<sup>[2]</sup>。照明系统应当优先选用高效LED灯具,并且要和自然光的设计以及分区自动调光相结合,以此来保证既舒适又节能。供配电系统依靠分布式能源以及储能技术来实现峰谷调节,从而提升运行的稳定性以及能源的利用率。建筑能源管理系统即BEMS能够对暖通、照明以及电力系统进行统一的监控,凭借数据分析来智能地优化运行参数,达成节能与舒适之间的平衡。给排水系统可以通过中水回用、变频泵以及冷凝水再利用等技术来降低水能耗。

### 3.3 运营管理与智能优化

建筑能效的关键在于运营阶段的管理水平。绿色建筑在运行过程中着重于智能化以及精细化管理,借助信息技术达成能耗的动态监测以及预测控制。建筑自动化系统(BAS)和能源管理系统(EMS)相互融合,使得能耗管理从单纯的被动监控转变成了主动决策。BAS能够集中控制空调、照明、电梯等各类设备,而EMS则是依靠能耗数据分析,给节能策略给予依据<sup>[3]</sup>。凭借传感器网络以及物联网平台,系统可以实时监测温度、湿度、照度以及空气质量等诸多参数,并且自动调节运行模式。比如在人员稀少的时候关闭照明和空调,或者依据天气变化来调整冷热负荷,以此减少能源的浪费。人工智能以及大数据算法的应用,让建筑拥有了能耗预测以及自学习优化的功能,通过历史数据建模来识别异常能耗并且自动生成节能方案,实现精准且高效的能源管理。在管理机制方面,绿色

建筑需要构建以生命周期为核心的能效管理体系,涵盖设计、施工、运行以及维护的整个过程。通过持续的监测与反馈,形成“设计-运行-优化”的闭环,不断提升建筑的性能。与此强化运维人员的培训以及节能意识建设,确保各项节能措施得以切实落实。智能化运营不但提升了能源管理的科学性以及响应速度,而且为建筑全生命周期的能效提升给予了坚实的保障。

#### 4 结语

绿色建筑和传统建筑相比,在能效水平、环境友好程度以及运行管理等方面,都明显地呈现出优势。借助对建筑设计加以优化、让设备性能得以提升以及引入智能化管理系统这些举措,绿色建筑完成了从单纯节能到系统节能的转变。往后,随着人工智能、物联网还有大数据技术相互融合得越来越深入,建筑能效管理会变得更为精准且高效。在政策方面,需要进一步去完善绿色建筑的标准以及激励机制,以此来引导企业以及公众积极投身到绿色转型当中。与此要强化对建筑整个过程的能耗监测以及数据共享,推动行业在技术上进行创新,并

促使管理模式得到升级。绿色建筑的推广,既是节能减排的实际需求,也是达成城市可持续发展所必经的途径。凭借持续不断地开展技术创新以及给予制度方面的保障,我国的建筑业定会一步一步地实现从高能耗状态转变为高效能状态、从资源消耗型模式转变为生态协调型模式这样的根本性转变,进而为构建节能、智慧并且宜居的城市环境筑牢稳固的基础。

#### 【参考文献】

- [1]袁月.传统民居建筑设计在现代绿色建筑设计中的应用与借鉴[J].居舍,2023(33):8-11.
- [2]林倩.绿色建筑标准下的施工现场能效优化技术[J].中华民居,2024,17(4):35-37.
- [3]张煜.新版绿色建筑评价标准及能效等级标准的应用分析[J].水泥技术,2022(4):62-65.

作者简介: 柳亚磊 (1990.9—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北工程大学, 现工作单位: 河北建筑设计研究院有限责任公司; 苏薇 (1990.8—), 女, 汉族, 毕业学校: 内蒙古科技大学, 现工作单位: 河北工程技术学院。

## 信息化在建设工程质量安全管理中的应用

袁奇琦

盐城恒信建设工程质量检测有限公司，江苏 盐城 224400

**[摘要]**在信息化技术迅猛发展的现代社会背景下，将现代信息技术融入建设工程质量安全管理，已成为保障工程施工安全、提升建筑工程质量的重要手段，也是建筑行业安全管理发展的必然趋势。在此基础上，文章围绕建设工程质量安全管理信息化管理展开研究，重点阐述了信息化管理的现实意义和当前发展现状，并进一步探讨了信息化技术在建设工程质量安全管理中的具体应用策略。

**[关键词]**信息化；工程质量；质量安全；安全管理；技术应用

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18344 中图分类号: TU714 文献标识码: A

## Application of Information Technology in Quality and Safety Management of Construction Projects

YUAN Qiqi

Yancheng Hengxin Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu, 224400, China

**Abstract:** In the context of the rapid development of information technology in modern society, integrating modern information technology into the quality and safety management of construction projects has become an important means to ensure construction safety and improve the quality of building projects. It is also an inevitable trend in the development of safety management in the construction industry. On this basis, the article focuses on the research of information management of construction project quality and safety, emphasizing the practical significance and current development status of information management, and further exploring the specific application strategies of information technology in construction project quality and safety management.

**Keywords:** informationization; engineering quality; quality and safety; safety management; technology application

### 引言

在我国经济保持持续发展的态势下，城市化进程也在持续推进，在这样的大背景之下，建设工程的规模呈现出一天比一天扩大的趋势，工程的类型以及技术形式更是处于不断的更新换代之中，如此一来，施工过程所具有的复杂性以及风险性便有了极为显著的增长，建设工程的质量安全管理也就面临着更高的要求以及更大的挑战。要知道，工程项目当中参与的主体数量众多，施工周期往往比较长，作业环境又极为复杂，这使得传统的那种主要依靠人工巡查以及事后监督来实施的管理模式在多个方面逐渐显露出明显的不足之处，比如在信息获取的及时性方面、管理过程的连续性方面以及风险预警的准确性方面等。与此信息技术的发展速度十分迅猛，特别是大数据、云计算、物联网、BIM 等技术在工程建设领域不断地得到应用，这就为质量安全管理模式的转型升级带来了全新的思路，并且还为其提供了强有力的技术支撑。要是把信息化手段融入到建设工程质量安全管理的整个过程当中，那么就能够

达成对施工现场质量与安全数据进行实时采集、动态监控以及综合分析的目的，进而有效地提升管理工作的透明程度、规范程度以及科学程度，促使质量安全管理从传统的依靠经验来驱动并且是被动地做出响应的状态，转变成为在数据强有力的支持之下主动地进行预防以及开展精细管控的状态。在这样的大背景之下，全面且细致地去研究信息化在建设工程质量安全管理当中的具体应用情况，一方面有助于提升工程质量的整体水平以及施工安全保障的能力，另一方面对于推动建设工程管理朝着数字化、信息化以及智能化的方向不断发展有着极为重要的作用，同时也能够促进建筑行业实现高质量且可持续的发展，具备十分重要的现实意义以及实践方面的价值。

### 1 建设工程质量安全管理的意义

建设工程质量安全管理属于提升工程管理水平以及保障工程建设安全与质量的关键手段，有着颇为明显的现实意义以及应用价值。建设工程的规模一直在不断拓展，其结构形式也变得日益复杂起来，在这样的情况下，

传统那种依靠人工经验并且主要靠事后控制的管理方式已经很难契合质量安全管理方面的需求了。而信息化管理通过针对工程数据展开实时采集、动态分析以及统一管理等一系列操作,可切实提高质量安全管理的科学程度以及精准程度。凭借信息化手段,能够达成对施工过程里那些关键环节以及风险点进行全过程的监控这一目的,进而能够及时察觉并发出质量安全隐患的预警,以此来削减人为出现的疏漏以及管理当中存在的盲区,最终使得事故发生概率得以降低。除此之外,信息化管理还有助于消除信息孤岛现象,推动建设单位、施工单位、监理单位以及监管部门彼此之间实现信息共享与协同配合,进而促使管理效率以及决策水平都得以提高。从长远的角度来讲,推进建设工程质量安全信息化管理,一方面有利于规范工程建设的行为,提升整个行业的管理水平;另一方面对于保障人民的生命财产安全、推动建筑行业朝着规范化、精细化以及高质量发展的方向去转型而言,同样有着极为重要的意义。

## 2 我国建设工程质量安全管理工作的现状

### 2.1 质量管理者的专业素养和一些基础设备存在的问题

在我国建设工程质量管理当中,质量管理者的专业素养以及部分基础设备方面存在着比较显著的问题。在部分工程项目里,质量安全管理人员的专业知识以及实践经验有所欠缺,对于相关的法律法规、技术标准与规范要求了解得不够完整,质量安全方面的意识也比较淡薄,很难满足当下工程规模变大以及技术复杂程度提升后的管理要求<sup>[1]</sup>。与此部分管理人员对于信息化手段的认识以及运用能力是有限的,在实际的工作过程中依然依靠传统的管理方式,这影响了质量安全管理的科学性与时效性。就基础设备而言,一些施工现场的质量检测设备以及安全监测设备的配置不够或者技术水平不高,设备更新的速度也慢,难以达成对工程关键部位以及施工过程的有效把控,使得质量隐患以及安全风险无法被及时察觉与精准掌握。

### 2.2 不完善的施工质量管理方式和施工技术

在我国建设工程质量安全管理的实际开展过程中,施工质量管理方式存在不完善之处,且施工技术方面也存在问题,这些情况是比较普遍存在的,并且给工程的质量以及安全带来了不利的影响。部分工程项目在施工期间依旧采用传统且比较粗放的那种管理模式,对于施工工序的控制、质量的检验以及过程中的监督,重视程度是不够的,还缺乏具有系统性以及连续性的管理举措,如此一来,质量管理往往只能停留在事后的检查这个层面,很难做到及

时地去发现施工当中出现的偏差以及对其进行纠正。与此同时一些施工单位自身的技术管理能力是有局限性的,对于新材料、新工艺以及新技术的应用,理解得并不够透彻,在施工技术的选择上可能会不合理,或者在执行的时候也做不到位,这就很容易出现施工质量不够稳定的情形。施工技术交底做得不够充分、技术标准在执行的时候不够严格等情况,也在一定程度上使得工程质量的隐患有所增加。

### 2.3 缺乏规范化的质量安全管理

在我国建设工程质量管理工作的实际推进进程里,缺少规范化的质量管理状况较为显著,这对管理成效的提高形成了制约作用。部分工程项目没有依照国家相关的法律法规、技术标准以及管理规范来组织施行,质量管理的制度执行强度不够,管理流程的随意性颇高,使得管理工作缺失统一的标准与明确的依据。与此有些项目在质量责任的划分、工作的程序以及资料的管理等方面不够清晰明确,相关的记录存在不完整的情况或者仅仅流于表面形式,这影响了质量管理的可追溯特性以及其严肃程度<sup>[2]</sup>。在实际的施工环节当中,因为管理行为不够规范,质量检查往往呈现出走形式的现象,隐患的排查以及整改落实工作做得不够到位,这就增加了工程出现质量问题以及发生安全事故的风险。

### 2.4 缺乏完善的信息化质量安全管理平台

由于信息化质量安全管理平台的发展时间尚短,还不能有效在建筑工程中实施全覆盖,建设企业和施工现场的质量安全管理者为了得到眼前的管理成效,依然采用传统的管理模式,导致信息化质量安全管理平台没有发挥其质量管理的优势和价值。除此之外还有一个重要的原因就是建设企业过于重视工程施工过程中的建设用资金支持,而忽视了对信息化质量安全管理平台的维护用资金支持,致使其缺乏有力的经济支持。没有完善的信息化质量安全管理平台做支撑,在施工的环节一旦出现质量安全管理的疏漏将直接影响工程施工的整体质量安全监管的效率和水平,同时,工程施工质量安全也得不到有力保障。

## 3 信息化技术在建设工程质量安全管理中的应用策略

### 3.1 制定明确的、科学的建设工程的质量目标和要求

在信息化技术于建设工程质量安全管理方面加以应用的过程当中,制定出清晰明确且具备科学性的建设工程质量目标以及相应的要求,这无疑构成了实现信息化管理有效运转并充分发挥其管理成效的基础前提。凭借依靠信息化管理平台这一依托,把国家层面的法律法规、行业领域的技术标准、设计环节的相关文件还有合同方面的具体

要求都进行系统的整合以及数字化的处理操作,如此一来便能够把宏观层面的质量安全要求转变成为具体化、可以量化的并且具有可追溯性的管理目标,进而将其层层分解并切实落实到工程建设的各个不同阶段、各项工序以及各个承担相应责任的主体当中。信息化手段的引入运用,对于实现质量目标的统一对外发布、动态的更新调整以及在整个过程当中的全程跟踪监控有着积极作用,能够让相关的管理人员以及从事施工工作的人员实时地掌握质量控制的关键要点以及安全管理的具体要求,从而减少由于信息传递出现滞后的状况或者因为理解存在偏差所导致的管理方面的漏洞问题。与此那些明确且科学的质量目标与要求,还给施工过程当中的质量检查工作、风险预警事项以及绩效考核事宜都提供了客观可依的依据,促使质量安全管理从以往的事后监督模式逐步转变为事前控制以及过程管理相结合的模式。

### 3.2 开发信息化质量安全管理的系统软件

在建设工程质量安全的管理领域当中,去开发信息化的质量安全管理系统软件,这无疑是在推动管理模式发生转变以及促使管理效能得以提升方面的一项十分重要的手段。通过搭建起一个把质量管理、安全管理、进度控制以及信息共享融合到一起的系统平台,就可以针对工程建设过程里所产生的数量众多的数据展开统一的采集工作、存储操作以及分析活动,进而达成质量安全信息能够做到实时更新并且实现集中管理这样的效果。该系统软件可以把施工现场的质量检查记录、安全隐患排查的情况、整改落实的实际状况以及与之相关的影像资料都进行数字化的处理,如此一来便可以让信息的准确性有所提高,同时也能让信息的可追溯性得以增强,从而减少因人工统计以及纸质管理而出现的误差以及滞后的状况<sup>[3]</sup>。与此信息化的系统还有助于实现各个参建单位之间信息的互联互通,借此打破传统管理当中所存在的信息孤岛这样的现象,进一步增强协同管理的能力。

### 3.3 加强政府及有关质量安全管理工作的调控工作

在信息化技术这样的大背景之下,强化政府以及相关质量安全管理等部门所开展的调控方面的工作,这无疑是对提升建设工程质量安全管理水平起到关键作用的重要保障因素。借助信息化监管平台这一有力工具,政府主管部门便能够针对建设工程质量安全相关的各类数据展开集中化的采集操作,并且实施统一有序的管理工作,进而达成对项目建设整个过程都可实现动态化监管以及实时性监测的效果,如此一来,监管工作的及时性以及精准性都

会得以切实提高。通过对工程质量状况、安全隐患情况、整改落实进展等多方面的信息加以综合性的分析研判,监管部门就能够更为完整且细致地去掌握行业实际的运行态势,能够及时地将其中存在的共性问题以及那些处于高风险状态的项目给找出来,进而让监管决策的科学性得到进一步的增强。与此信息化手段在一定程度上还有助于对监管流程以及执法行为予以规范,能够促使监督检查工作的透明度以及可追溯性都得以提升,从而有效减少人为因素的不当干预以及管理当中可能出现的盲区情况。

### 3.4 建立完善的建设工程质量安全管理制度

在信息化技术持续深入应用这样的大背景之下,去构建起一套较为完善的建设工程质量安全管理制度,这无疑为实现信息化管理能够规范且顺畅地运行,并且能长久发挥其作用打下了十分重要的基础。把质量管理制度同信息化平台相互结合起来,便能够针对工程建设在各个不同阶段所涉及的管理流程、责任具体该如何划分以及工作应当遵循的标准等方面展开系统的梳理工作,进而达成统一的规范效果,如此一来,质量安全管理便有了可以依照的章程,也有了能够查询依据的地方。依靠信息化的相关手段,对制度执行的具体情况实施全过程的记录操作,并且开展动态化的监督活动,这对于增强制度所具备的刚性约束力度是很有帮助的,能够有效防止制度仅仅停留在表面形式上而没有实际效力的情况出现。与此一套完善的管理制度还能够清楚明确地界定出各个参与建设的主体在质量安全管理方面各自所应承担的职责以及所拥有的权限,进一步强化责任的追溯以及问责相关的机制,从而推动相关单位以及相关人员能够严格地去履行质量安全管理方面的责任。

### 3.5 运用先进技术加强建设工程质量管理

在信息化这样的大背景之下,充分运用像 BIM 技术、物联网、大数据、云计算以及人工智能等先进技术来强化建设工程的质量管理工作,这无疑是一条能够推动质量安全管理朝着精细化以及智能化方面去发展的极为重要的路径。随着这些先进技术在建设工程领域所开展的应用不断走向深化,工程质量管理也渐渐地从以往那种依靠传统经验来进行判断以及仅仅依靠事后控制的方式转变成了以数据作为强有力支撑的贯穿于全过程并且具备动态化特点的管理模式<sup>[4]</sup>。借助 BIM 技术针对工程结构、施工工序以及质量标准展开数字化建模操作,如此一来便能够达成对施工过程进行可视化管理的目的,同时也能够提前对质量问题加以识别;凭借物联网技术,针对关键构件、

重要设备以及施工环境参数实施实时监测,这对于及时察觉质量方面的偏差以及潜在存在的安全隐患有着相当大的帮助作用;通过对数量众多的质量数据加以整合并深入分析,便能够归纳出质量问题出现的规律,进而为质量控制决策给予科学且合理的依据。将多种先进技术综合起来加以运用,一方面提高了建设工程质量管理在准确性以及可追溯性这两个层面上的表现,另一方面还使得质量安全风险防控在前瞻性以及主动性这两方面都得到了增强,从而为实现建设工程质量水平以及施工安全保障能力的全面提升奠定了稳固的技术基础。

#### 4 结语

信息化于建设工程质量安全管理当中的运用,给提升工程管理水平以及保障施工安全给予了强有力的支撑。把信息技术融入到质量安全管理的各个不同环节里,达成了管理信息能够实时进行采集、能够展开动态分析并且能实现高效共享的目的,切实有效地填补了传统管理方式在效率以及精度方面所存在的那些不足之处。信息化手段加以应用之后,一方面有助于强化针对质量安全风险的预防工作以及控制举措,可以让管理工作在规范性以及科学性这

两个层面上都得以提升,另一方面也给政府监管部门还有参建各方开展协同管理营造出了颇为良好的条件。伴随信息技术不停地向前发展,其应用范围也在不断地拓展延伸,信息化的质量安全管理在未来于建设工程这个领域当中将会发挥出更为重要的作用,对于推动建筑行业朝着安全、优质并且可持续发展的方向去迈进而言,有着十分深远的意义。

#### [参考文献]

- [1]王龙.信息化在建设工程质量安全管理中的应用[J].中国住宅设施,2025(2):194-196.
  - [2]张建忠.信息化在建设工程质量安全管理中的应用[J].砖瓦,2022(3):103-105.
  - [3]张晓峰.探讨信息化在建设工程质量安全管理中的应用[J].信息与电脑(理论版),2024,36(3):216-218.
  - [4]单蕾.信息化在建设工程质量安全管理中的应用[J].住宅与房地产,2020(33):131-139.
- 作者简介:袁奇琦(1989.11—),单位名称:盐城恒信建设工程质量检测有限公司,毕业学校:九州职业技术学院,专业:工程造价。

## 新能源风电项目招投标阶段的造价控制与成本管理

闫晓光

中交三公局第二工程有限公司, 天津 301800

**[摘要]**风电已成为能源转型的主流选择, 其项目的经济性在很大程度上取决于有效的造价控制。招投标阶段作为项目成本形成的源头, 对最终总投资具有决定性影响。此文系统阐述了风电项目在招投标阶段进行造价控制的核心地位, 深入剖析了工程量清单编制、招标模式与合同类型选择、投标评审等关键环节的管理要点。同时, 探讨了全过程造价咨询、全价值链成本管控等先进理念, 以及建筑信息模型 (BIM)、大数据等数字化工具在该阶段的应用与创新。最后, 从制度标准完善、专业能力提升和技术融合深化三个维度提出了未来的优化建议, 旨在构建一个系统、科学的风电项目招投标阶段造价控制框架, 以提升项目投资效益与行业管理水平。

**[关键词]**风电项目; 招投标; 造价控制; 成本管理; EPC 总承包; 全过程造价咨询

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18341 中图分类号: TM6 文献标识码: A

## Cost Control and Management in the Bidding Stage of New Energy Wind Power Projects

YAN Xiaoguang

The Second Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Highway Engineering Bureau, Tianjin, 301800, China

**Abstract:** Wind power has become the mainstream choice for energy transformation, and the economic viability of its projects largely depends on effective cost control. The bidding stage, as the source of project cost formation, has a decisive impact on the final total investment. This article systematically elaborates on the core position of cost control in the bidding stage of wind power projects, and deeply analyzes the management points of key links such as the preparation of the bill of quantities, selection of bidding modes and contract types, and bid evaluation. At the same time, advanced concepts such as whole process cost consulting and full value chain cost control were discussed, as well as the application and innovation of digital tools such as Building Information Modeling (BIM) and big data in this stage. Finally, future optimization suggestions were proposed from three dimensions: improving institutional standards, enhancing professional capabilities, and deepening technological integration. The aim is to establish a systematic and scientific cost control framework for wind power project bidding stages, in order to improve project investment efficiency and industry management level.

**Keywords:** wind power projects; bidding; cost control; cost management; EPC general contracting; whole process cost consulting

### 引言

在全球能源结构向绿色、低碳转型的背景下, 风电作为技术成熟、成本持续下降的清洁能源, 其战略地位日益凸显。然而, 风电项目, 特别是大型集中式项目, 普遍具有投资规模巨大、技术集成复杂、建设环境多变等特点, 导致其初始单位千瓦造价较高, 直接影响项目的经济竞争力和投资吸引力。因此, 实施有效的造价控制与成本管理, 是确保风电项目成功落地和可持续运营的关键。在项目全生命周期中, 招投标阶段是成本基准确定和风险分配的核心环节, 此阶段的管理决策质量, 从根本上锚定了后续建设与运营的成本边界, 是全过程成本控制的基石。本文旨

在系统分析新能源风电项目在招投标阶段影响造价控制的关键因素, 梳理核心管理策略, 探讨创新实践工具, 并提出面向未来的发展路径, 以期为行业提供一套兼具科学性与可操作性的管理框架。

### 1 招投标阶段造价控制的核心地位与战略意义

招投标阶段是衔接项目规划设计与实际施工建设的枢纽, 承担着将成本估算转化为具有法律约束力的合同价格的关键任务。这一阶段管理工作的任何疏漏, 都可能为项目带来难以挽回的成本损失。

首先, 招投标阶段是项目造价基准的锁定点。在可行性研究和初步设计完成后, 业主通过编制详尽的工程量清

单、设定科学的招标控制价（或称最高投标限价）以及拟定严谨的合同条款，将技术方案固化为经济与法律文件。当前，国家能源集团、华能集团等主要能源企业在进行造价咨询招标时，均将“招标控制价编制”和“工程量清单编制”列为核心服务要求，这充分体现了业内从源头管控成本的共识。

其次，招投标阶段是进行风险识别与合理分配的首要窗口。风电项目开发面临自然环境、设备市场价格、产业政策等多重不确定性。通过精心设计的招标文件和审慎的合同谈判，业主可以将自身不擅长管理的部分风险（如特定施工技术风险、设备性能保障风险）转移给更有控制能力的承包商。若在此阶段对风险条款约定模糊，极易在建设期引发费用争议与成本超支。

最后，招投标工作的质量直接框定了后续成本管理的上限与效能。一份高质量的招标文件及一份权责对等、价格合理的合同，是项目实施阶段进行动态成本监控、变更签证管理及竣工结算的根本依据。反之，若清单存在漏项、控制价偏离市场或合同语义歧义，将导致施工过程中变更频繁、争议迭起，使精细化成本管理难以落实，最终显著推高项目总成本。因此，招投标阶段的造价管理本质上是一种具有前瞻性的预防性控制，其管理效益远高于事后审计与纠偏。

## 2 招投标阶段造价控制的关键环节与实务要点

风电项目招投标阶段的造价控制是一项环环相扣的系统工程，涵盖多个需要精细化操作的关键环节。

### 2.1 工程量清单与招标控制价的精细化编制

工程量清单是投标人公平报价和未来结算的共同基础，其准确性与完整性至关重要。对于风电项目，除常规建筑工程外，需格外关注风机基础工程（尤其是复杂地基处理）、大吨位塔筒与机舱吊装、场内集电线路（特别是山地、丘陵、海底电缆敷设）以及升压站特殊电气设备安装等专项工程。编制工作必须基于深化后的设计图纸，并充分考虑项目场址的特定地质条件、气候特点、运输限制等边界因素。例如，在黑龙江肇东的300兆瓦风电项目中，管理团队在招标前即介入设计优化，对风机微观选址和集电线路路径进行多方案比选，从源头上规避了潜在的高成本技术路线。

招标控制价的编制则需建立在精准市场调研和科学成本分析的基础之上。它不仅是防止围标串标、抑制不合理报价的“天花板”，更是衡量投标报价经济性与合理性的核心“标尺”。华能贵州分公司在2025年度的新能源项目造价咨询招标中，明确要求咨询机构不仅需编制控制价，

还需定期提供结算数据与概算的对比分析报告，这凸显了控制价作为全过程造价对标基准的重要作用。编制时需综合考量当期主要设备材料市场价格、主流施工工艺的工效与成本、项目合理工期以及承包商的正常利润水平。

### 2.2 招标模式与合同类型的选择策略

招标模式的选择从根本上决定了造价控制的逻辑与重心。传统的施工总承包模式（DBB）将设计、采购、施工环节分离，管理界面多，协调成本高，容易产生责任推诿和费用索赔。而EPC（设计-采购-施工）总承包模式凭借其整合优势，正日益广泛地应用于技术复杂、接口繁多的大型风电项目，特别是海上风电项目。在EPC模式下，总承包商对项目的设计优化、成本控制、工期和质量承担总体责任，有助于激发其内部整合资源、节约成本的内生动力。业主的造价控制重点则从过程干预更多地转向对最终交付成果和合同总价的把控。

合同价格类型的选择同样具有战略意义。对于设计深度充分、边界条件清晰、风险可预见的项目，固定总价合同有利于将大部分风险锁定在承包商一方，便于业主控制总投资。对于设计深度不足、地质条件复杂、工程量存在较大不确定性的项目，则可采用单价合同，但必须对单价所包含的详细工作内容、计量规则以及价格调整机制做出极其严密的规定。无论采用何种合同类型，都必须清晰界定价格调整因子（如主要材料市场价格波动超过约定幅度时的调价方法）、工程变更的计价原则与程序以及索赔处理机制，这是避免结算阶段产生争议的基石。

### 2.3 基于全生命周期成本的投标评审与合同谈判

评标环节应坚决摒弃“唯价格论”，全面推行技术、商务、价格相结合的综合评估法。技术评审应重点考察风机选型的先进性、可靠性与全生命周期发电效率，评估施工组织设计的合理性、安全性以及对成本的影响。商务评审则需严格审查投标人的财务能力、类似项目业绩、履约信誉及风险管理体系。大唐宝鸡热电厂在新能源项目招标中，强调造价专业人员必须全程参与技术评标和合同谈判，并承担相应责任，其目的正是为了从技术与经济结合的角度，甄选出全生命周期成本最优的投标方案。

合同谈判是招投标过程的收官环节，也是弥补招标文件漏洞、明确双方权责的最后机会。谈判焦点应包括：澄清投标方案中的任何技术或范围模糊点；细致界定合同总价或单价所涵盖的具体工作范围，特别是业主提供材料（甲供材）与承包商提供材料（乙供材）之间的界面划分、结算与抵扣方式；优化付款进度计划，使其与关键工程里程碑紧密挂钩；设定具有约束力的履约担保条款与违约

赔偿机制。通过严谨的谈判,形成一份权利义务对等、语言无歧义的合同文件,为项目的顺利执行奠定坚实的法律基础。

### 3 现代成本管理理念与数字化工具的融合应用

随着管理科学的演进和信息技术的突破,先进的成本管理理念与数字化工具正深度融合,推动风电项目招投标阶段的造价控制向更精益、更智能的方向发展。

#### 3.1 从静态控制到动态协同:全过程与全价值链管理

行业实践已从传统的、聚焦于招投标瞬间的静态造价控制,向覆盖项目全过程的动态造价咨询演进。例如,国华投资公司招标的造价咨询服务,范围已延伸至从生产准备期的清单编制到竣工结算审核、造价数据归档的全过程;华能贵州分公司的要求更是涵盖了协助设计概算审核、建立动态造价管理台账等。这反映了业主方希望借助外部专业力量,实现从投资决策到运营维护的闭环成本管理。

更进一步,领先的装备制造与工程企业正在构建全价值链成本管控体系。东方电气集团东方风电公司上线的全价值链成本管控平台,整合了办公自动化(OA)、产品生命周期管理(PLM)、供应链管理(SCM)等多个系统,实现了从设计研发、原材料采购、生产制造到项目投标、执行交付的全链条成本数据贯通与实时分析。在招投标阶段,该平台能够基于历史项目数据库和实时市场情报,快速进行精准的投标成本测算与风险评估,使报价策略从依赖个人经验转向依托数据智能,极大提升了成本竞争力与风险预判能力。

#### 3.2 数字化与智能化技术赋能精细化管控

数字化技术正成为重塑招投标阶段造价控制范式的新引擎。建筑信息模型(BIM)技术的应用,使得在招标前进行“虚拟建造”成为可能,能提前检测不同专业间的设计冲突,优化施工工序与方案,从而导出更为精确的工程量清单,从源头上减少施工阶段的设计变更。无人机倾斜摄影与激光雷达扫描技术可用于招标前的精细化现场踏勘,快速获取高精度地形地貌数据,为土石方工程量计算、场内道路规划提供可靠依据,显著提升清单编制的准确性。

在评标分析环节,大数据分析技术可以辅助评标委员会对海量投标数据进行快速处理与多维度比对,智能识别围标、串标迹象或不平衡报价策略,提高评审的效率和科学性。人工智能(AI)技术在合同文本审查、历史索赔案例匹配与分析等方面也展现出巨大应用潜力,能够为合同风险防范提供智能支持。

## 4 面向未来的优化路径与发展建议

为持续提升风电项目招投标阶段的造价控制水平,需要行业监管部门、项目业主、承包商及咨询机构等多方主体协同努力,从制度、人才与技术三个层面共同推进。

### 4.1 完善行业标准体系与数据共享机制

国家与行业层面应加快建立和更新与风电新技术、新工艺(如超大型风机、漂浮式基础、柔性直流送出)相适应的工程造价计价依据与标准规范。大力倡导和推广过程结算模式,将竣工结算工作分解至建设过程的关键节点,实现成本动态确认与管控,及早预警超支风险。同时,应由国家或权威行业协会牵头,建立统一的风电工程造价指标数据库,鼓励企业在脱敏后共享项目造价数据,推动行业成本透明度与对标管理水平提升。

### 4.2 培育复合型专业造价人才

新形势下的造价管理人员需完成从“计量计价员”到“项目成本顾问”的角色转型。他们不仅需要精通工程造价专业知识,还必须熟悉风电工程技术、理解合同法律要点、掌握财务税务知识并具备良好的沟通协调能力。企业应建立健全培训体系,鼓励造价人员深入参与前期设计优化、招标策划、合同谈判及索赔处理等全过程,培养其成为能够为项目价值最大化贡献智慧的核心专业人才。

### 4.3 深化数字技术与成本管理的融合创新

未来应致力于推动成本管理数字化平台的深度开发与广泛应用。积极探索基于BIM的5D(三维模型+时间+成本)项目管理,实现从设计、招标、施工到结算的全维度成本信息无缝流转与动态模拟。推广集成化的项目成本管控平台,打破企业内部设计、采购、施工、成本等部门间的数据壁垒,构建覆盖全参与方、全生命周期的协同管理生态。此外,应积极探索人工智能在智能编标、自动清标、风险智能预警等场景的应用,全面提升招投标阶段造价控制的智能化与自动化水平。

## 5 结论

招投标阶段是决定新能源风电项目经济效益的战略制高点。通过精细化编制招标文件、科学选择承发包模式与合同类型、并基于全生命周期成本理念进行严谨的投标评审与合同谈判,能够从源头上确立合理的造价基准,并实现项目风险的优化配置。与此同时,积极引入全过程造价咨询、全价值链成本管控等先进管理理念,深度融合BIM、大数据、人工智能等数字化工具,是推动风电项目造价控制从粗放走向精益、从静态走向动态、从经验驱动

走向数据驱动的必然趋势。面对构建新型电力系统的时代要求与日趋激烈的市场竞争,唯有牢牢把握住招投标这一关键环节,构建并实施系统化、前瞻性的造价与成本管理体系,才能从根本上夯实风电项目的经济性基石,保障我国新能源产业实现高质量、可持续发展,为全球能源绿色转型贡献中国力量。

#### [参考文献]

- [1] 国家能源集团新能源有限责任公司.国华投资2025-2027年度新能源发电项目生产运行期造价咨询服务框架协议招标公告[J].国电投电子商务平台,2025(8):10.
- [2] 杨茹茹.新能源风电项目造价控制与成本管理的关键因素分析[J].金融文坛,2024(12):57-59.

[3] 张学亮.新能源风电项目造价控制与成本管理的关键因素分析[J].云南水力发电,2024,40(1):159-161.

[4] 马步锋.绿色能源转型背景下电力工程造价分析——以兰州地区为例[J].中国招标,2024(10):154-156.

[5] 东方电气集团首个全价值链成本管控平台正式上线[EB/OL].Chinapower,2024-11-27.

[6] 朱衡.EPC 总承包模式下的深远海上风电工程造价控制对策分析[J].中国战略新兴产业,2025(15):182-184.

作者简介: 闫晓光 (1990.2—), 男, 毕业院校: 山东交通学院, 学历: 本科, 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 中交三公局第二工程有限公司, 职务: 市场开发部经理, 所在职务的年限: 6 年, 职称级别: 中级工程师。

## 公路工程沥青路面施工技术的应用分析

马忻仪

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**在我国公路交通事业领域中，施工技术的合理选择与应用直接决定了沥青路面的最终质量，基于此，本篇文章结合公路沥青路面的特点及常见病害，对该技术的具体应用进行分析与讨论，希望可以为同类工程实践提供更多参考与借鉴。

**[关键词]**公路工程；沥青路面；施工技术

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18361

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

## Application Analysis of Asphalt Pavement Construction Technology in Highway Engineering

MA Xinyi

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** In the field of highway transportation in China, the reasonable selection and application of construction technology directly determine the final quality of asphalt pavement. Based on this, this article analyzes and discusses the specific application of this technology in combination with the characteristics and common diseases of highway asphalt pavement, hoping to provide more reference and inspiration for similar engineering practices.

**Keywords:** highway engineering; asphalt pavement; construction technology

### 引言

沥青路面在长期服役过程中，面临着车辆荷载重复作用、环境温度变化、降水侵蚀等多重因素考验，容易出现车辙、裂缝、水损害、松散等早期病害，大量工程实践与研究表明，路面早期病害的产生往往与施工阶段的技术应用不当、质量控制不严密切相关。因此，对公路工程沥青路面施工技术进行研究，对于推动公路建设技术的进步至关重要。

### 1 公路工程沥青路面的特点

沥青路面凭借其良好的综合性能，成为现代交通基础设施的主要选用类型，它最为突出的优势是高温稳定性良好，凭借优化配比提高软化点，让路面在持续高温时仍能维持结构完整，有效抑制车辙变形，保障长期平整度，在材料方面，天然岩沥青独特的含氮结构能较大提高沥青与骨料的黏结力，形成致密的复合体系，即便在极端潮湿状况下也能有效抵御水分侵蚀，大幅降低水损害。这种路面还具有出色的抗老化与耐磨耗性能，依靠添加抗氧化成分延缓材料性能衰退，并且能承受重载交通的长期作用，保持纹理深度与抗滑性。

施工便捷性是沥青路面的又一优势，它采用工厂化生产、现场摊铺的施工模式，结合快速冷却固化的特性，可

实现夜间施工、白天通车的快速作业，最大程度减少对城市交通的干扰。在环保性能方面，现代沥青技术已实现100%可回收利用，凭借热再生、冷再生等工艺将废旧路面材料重新转化为优质筑路材料，形成完整的资源循环体系，另外多孔沥青等新型材料的应用还赋予路面优异的降噪功能，其特有的孔隙结构能有效吸收轮胎振动产生的噪声，为城市居民营造更为宁静的生活环境。

### 2 公路工程沥青路面施工的常见病害

#### 2.1 裂缝病害

沥青路面经常出现的裂缝病害主要有横向、纵向以及网状这三种类型，这些裂缝破坏了路面的连续性和平整度，对行车舒适性和安全性产生严重影响，还会让水分向下渗透侵蚀基层，加快结构损坏，这使得公路使用寿命缩短，并且在长期运营过程中增加了养护与维修的综合成本。

横向裂缝属于沥青路面典型病害之一，其形成原因主要是温度突然大幅下降，使得沥青面层在较短时间内迅速收缩，产生收缩应力，当该应力不断积聚，最终超过沥青混合料自身所能承受的抗拉强度极限时，路面就会出现垂直于车辆行驶方向的规则性开裂，形成贯穿整个路幅或者部分路面的横向裂缝。

公路沥青路面施工期间，要是压实作业不符合规范要

求,或者分层填筑不够科学合理,就会致使路面整体压实度欠缺,内部结构不均匀,使路面的整体性遭到削弱,形成薄弱区域,一旦外界水分经由细微缝隙渗透进来,滞留在沥青层内部,在行车荷载不断反复作用时,极易引发沿行车方向延伸的纵向裂缝,破坏路面结构的连续性。

渗入结构层内部的大量水分还会持续软化路基以及基层,极大程度地削弱路面的整体承载能力和使用性能,同时原先存在的横向裂缝和纵向裂缝在雨水以及行车荷载作用下,其交汇处结构会遭到破坏,渐渐扩展连接成网状裂缝,若是未能及时修复,破损范围会持续扩大,材料在碾压下脱落形成坑槽,使路况急剧变差,还会增加行车颠簸甚至失控的风险,直接提高了安全事故的发生概率。

## 2.2 车辙病害

沥青路面出现车辙病害主要是高温与重载共同作用造成的,在温度方面,大规模公路建设常会跨越季节,夏季施工现场昼夜的温度差异较大,沥青材料有热敏性,其黏度和流动性对温度较为敏感,白天温度高会让沥青混合料变软、黏性降低,混合料结构的稳定性变弱,道路通车后,持续的高温会使路面层材料软化,在交通荷载反复碾压下,混合料出现侧向流动和塑性变形,逐渐形成车辙。荷载因素也是诱发车辙的另一个关键因素,尽管沥青路面设计有一定的承载能力,但是随着交通量的急剧增加,重载、超载车辆频繁通行,路面承受的实际压力远远超过设计预期,车辆行驶时,轮胎接地压力分布不均匀,加速、制动或转向时动态荷载增大,加重了对沥青面层的剪切作用,使得高温下的沥青混合料更容易发生塑性变形。在温度和荷载长期共同作用下,路面结构层产生不可恢复的压密和流动,最终形成车辙。

## 2.3 水破坏病害

沥青路面水破坏病害对行车安全构成严重威胁,还会大幅缩短道路的使用期限,在强降雨发生时,水分会经由路面裂缝或者孔隙渗透到混合料内部,破坏沥青与集料的黏结界面,集料表面会吸附水分,逐渐置换并削弱沥青膜的黏附力,致使路面整体强度降低,最终引发开裂现象,同时行车荷载的反复作用会让水破坏的进程加剧,车辆在行驶过程中,轮胎会对饱和路面施加持续的挤压与抽吸作用,在混合料空隙内形成十分突出的动水压力,持续冲刷并剥离已经失去黏结的沥青膜,使得集料裸露并逐渐流失,路面结构变得疏松、出现空洞,最终呈现为网状开裂。在降雨过后,路面积水没有及时排除,车辆高速通过时产生的动水压力会更剧烈,就如同反复的水锤效应一样,不断冲击路面薄弱区域,让裂缝扩展、材料松散,明显加快坑

槽、松散、剥落等病害的发展,导致路面功能迅速变差,养护成本大幅提高。

## 3 公路工程沥青路面施工技术的应用措施

### 3.1 施工准备

#### 3.1.1 基层验收

在公路沥青路面施工进程中,基层验收属于关键的施工工序,它的质量控制会直接对后续施工效率以及路面长期使用性能产生影响,针对新建基层的验收工作,施工人员要严格依照技术规范开展系统性检测:首先要运用激光水准仪对基层平整度进行测量,以此保证纵向和横向坡度符合设计规定,接着采用钻芯取样法检测结构层厚度,并且结合核子密度仪测定压实度,防止因压实不充分致使后期出现沉降。对于无机结合料稳定土基层,除了常规的压实度检测之外,还需要借助烘干法测定含水率,开展冻融循环试验来验证其水稳定性,同时进行无侧限抗压强度试验用以评估材料耐久性。

半刚性基层验收则要着重把控力学性能,运用压力试验机测试28d龄期试件的抗压强度与抗折强度,保证其具有设计要求的荷载扩散能力。沥青贯入式基层需依靠现场抽提试验检测沥青实际贯入深度,采用拉拔仪测试沥青与集料的黏附性等级,并且复核沥青用量是否契合配合比设计要求,所有检测数据都要形成书面记录,在监理工程师确认各项指标达标之后,才可以进行封层或面层施工,从而构建完整的质量追溯链条,为路面结构的整体稳定性奠定基础。

#### 3.1.2 原材料检查

施工人员正式开展施工之前,需要提前对施工现况展开全面细致的调查,按照既定设计方案,精准确定质量和规格等都达标的原材料使用量,所有投入使用的原材料都要配备质量合格证书、检验报告等完备文件,坚决杜绝使用低质材料,选择矿料时,可遵循就近取材原则,有效控制施工成本。但要注意,若施工单位从多个厂家采购材料,容易出现材料品种繁杂、规格参差不齐的情况,这种差异性级配会严重影响集料均匀性,最终降低沥青混凝土质量,采购时应选择规模大的厂家,进行二次筛分集料并优化配比。

#### 3.1.3 施工机械检查

公路工程沥青路面施工时,摊铺机、轮胎式压路机、铣刨机、自卸车等关键机械设备使用频率较高,要保证施工流程顺利高效,就需要对所有参与作业的机械设备设定严格性能标准,施工前要组织专业人员对每一台设备做全面检查,着重评估动力系统、液压装置、传动机构等核心

部件的运行状况，同时认真查看易损件的磨损程度。有异常振动、异响或者油液渗漏的设备，要马上停机查找原因并彻底修好，磨损严重的零部件要提前更换，对轴承、齿轮等传动部位做好润滑保养，及时补充或更换变质的液压油和润滑油，另外要建立设备运行档案，记录日常维护情形，借助预防性维护策略降低突发故障概率。

### 3.2 混合料拌和

沥青混合料拌和施工的关键之处在于依据工程实际状况以及供料条件，合理地挑选拌和设备并且科学地进行管理，在施工之前需要对生产条件展开调查，若工程规模较大且材料来源并不固定，适宜选用可逐盘精确计量、方便调整配比的间歇式拌和机，以此来保证混合料的均匀稳定。当设备投入使用之后，必须制定并执行定期检修计划，针对称量系统、加热装置、搅拌缸等关键部件进行维护保养，保证拌和设备始终处于高效且稳定的运行状态，最大程度降低故障发生的概率。

温度控制属于核心工艺环节，应当根据沥青类型设定并严格控制温度：石油沥青混合料出厂温度适宜为 120~165°C，煤沥青则是 80~120°C，保证沥青有良好的流动性，可与矿料充分结合。在拌和过程中要实时监测各个环节的温度，及时调整加热或者进料参数，实现全过程的温度控制，对于间歇式拌和机而言，总拌和时间不宜超过 50s，其中干拌时间不低于 5s，以此保证矿料预热均匀，使用连续式拌和机时，需要动态协调进料速度、滚筒参数以及沥青喷洒量，维持生产的稳定性。在整个拌和作业期间，施工人员要持续观察混合料的色泽、油膜均匀程度以及松散状态，一旦发现沥青分布不均、出现花白料、结团或者严重离析等现象，要马上停机检查，调整相关工艺参数，杜绝不合格混合料进入施工现场，从源头保障沥青路面的铺筑质量。

### 3.3 混合料运输

在运输混合料期间，若选用载重 15t 以上的自卸式汽车作为运输工具，装料之前要在车厢底部均匀涂抹防黏剂，可优先选用环保型废旧机油水或者洗衣粉水溶液，坚决禁止使用会对混合料品质造成不良影响的柴油水混合液，为保证混合料在运输过程中的质量稳定性，所有运输车辆都要配备全套防雨防潮装置，其中包括可密闭的篷布系统以及保温隔层，以此有效应对突发降雨天气并维持混合料的最佳温度区间。装料作业应采用“前-中-后”分段装填法，控制装料速度使其保持均匀，车辆移动要缓慢平稳，最大程度防止混合料出现离析现象，完成装料后应立即覆盖专

用保温篷布，全程监控混合料温度变化，运输车辆抵达施工现场时，需预先在停车区域铺设草袋等隔离材料，这样既能避免轮胎带泥污染作业面，又可创造整洁有序的施工环境。

### 3.4 混合料摊铺

为保证路面施工质量符合行业标准规定，施工的整个过程都需要严格依照规范流程来进行，着重把控关键环节的技术要点，施工人员在基层处理阶段要均匀地撒布黏层油，精准控制喷洒量以及覆盖范围，形成致密的黏结界面，阻挡水分向下渗透，提高结构耐久性，摊铺作业要维持恒定速度，防止出现接缝高差，并且实时监测混合料状态，及时调整拌和参数来保证密实度和抗变形能力。针对摊铺过程中可能出现的局部离析情况，需要及时采用人工补料的方式来处理，并且在碾压阶段加强处理，正式摊铺之前，要充分预热熨平板，通过试验段来验证松铺系数，利用高程控制动态调整厚度，保证路面纵横向平整度与构造深度契合高标准要求。

### 3.5 混合料碾压

沥青混合料摊铺完毕后，要在 30min 内严谨完成初压、复压以及终压这三道关键的碾压工序，压路机进行作业时应维持匀速直线行驶状态，绝对禁止随意转向、急刹车或者中途停留，相邻碾压段的重叠间距不能小于 10m，以此保证压实的均匀性，施工期间要实时监测混合料的温度变化情况，特别要留意已碾压区域温度高于 70°C 时，设备严禁停驻，防止造成路面变形。对于改性沥青的特性，要精准把控压实温度区间：高温阶段禁止使用胶轮压路机，低温环境下需增加碾压的遍数，温度监测人员要全程跟踪，当混合料温度降低至 100°C 以下时，可以选用 CP271 胶轮压路机进行静压 1 遍，初压阶段使用双钢轮压路机作业时，一定要保证 40cm 的重叠压实宽度进行静压 1 遍，复压工序应先让双钢轮压路机重叠 40cm 振压 2 遍，接着切换大胶轮压路机错位 1/2 轮宽静压 1 遍，终压阶段要用双钢轮压路机持续静压直至消除所有轮迹，最后需检测路面温度降至 50°C 以下才可以开放交通。

### 3.6 接缝处理技术

接缝处理技术对公路的长期使用性能以及行车安全有着直接影响，施工时应精细操作，施工人员需要先将路面接缝区域彻底清理干净，保证没有任何尘土和杂物残留，接着使用专业的开槽机或者切割机，将接缝切割、修整成宽度在 10~20mm、深度在 15~20mm 的规整槽口，提供充足的填充空间。填充时，要选用性能良好的填缝设备，

精确控制施工速度与灌注压力,将预热好的改性沥青混合料均匀、连续地注入槽内,防止材料溢出污染路面,保证接缝填充饱满而且外观平整,填充完成后要马上进行压实,让填充料和原有路面结构紧密粘结,最后要在接缝表面涂布一层专用沥青封层剂,形成连续、致密的防水密封层,有效阻挡雨水下渗。

#### 4 结语

综上所述,本文结合公路沥青路面的常见病害,对该技术的应用展开全面分析,以期为工程实践提供有益指导。

#### [参考文献]

[1]吴斌.公路工程沥青路面施工技术及质量控制[J].城市建设理论研究(电子版),2025(23):151-153.

[2]崔姗.公路工程热压式沥青路面施工技术要点[J].交通建设与管理,2025(4):86-88.

[3]朱文静.聚酯纤维改性沥青路面施工技术在公路工程中的应用研究[J].运输经理世界,2025(22):7-9.

[4]白翔.沥青路面施工技术在公路工程施工中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(12):125-128.

[5]宋绍海.公路工程土石方路基与沥青路面施工技术分析[J].运输经理世界,2025(17):49-51.

作者简介: 马忻仪(1991.4—),女,毕业院校:西南财经大学天府学院,所学专业:工程造价,当前就职单位新疆北新路桥集团股份有限公司,职务:投标专员,职称级别:给排水中级工程师。

## 国土空间生态修复工程的技术创新研究

张然

秦皇岛荣丰工程技术有限公司，河北 秦皇岛 066000

**[摘要]**随着生态文明建设的不断深入，国土空间生态修复已成为推动高质量发展和实现可持续发展的重要途径。然而，传统修复模式存在技术单一、系统性不足和生态效益不显著等问题，无法满足新时代国土空间治理的实际需求。为此，文中以技术创新为研究视角，从工程实践出发，探讨国土空间生态修复工程的技术创新路径。研究认为，基于系统性思维的修复理念、数字化与智能化技术的应用以及绿色低碳技术的推广，是推动国土空间生态修复实现高效、可持续发展的关键。通过构建多元技术协同创新体系，不仅能够提升生态修复的科学性和可操作性，还能在保障生态安全、提升环境质量和促进社会经济协调发展方面发挥积极作用。文中的研究为今后国土空间生态修复工程的理论完善与实践探索提供了重要参考。

**[关键词]**国土空间；生态修复；技术创新；绿色发展；可持续性

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18365 中图分类号: X171.4 文献标识码: A

## Research on Technological Innovation of National Land Space Ecological Restoration Project

ZHANG Ran

Qinhuangdao Rongfeng Engineering Technology Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

**Abstract:** With the continuous deepening of ecological civilization construction, ecological restoration of national territory has become an important way to promote high-quality development and achieve sustainable development. However, traditional restoration models have problems such as single technology, insufficient systematicity, and insignificant ecological benefits, which cannot meet the practical needs of land and space governance in the new era. Therefore, the article takes technological innovation as the research perspective and explores the technological innovation path of national spatial ecological restoration engineering from the perspective of engineering practice. Research suggests that the restoration concept based on systematic thinking, the application of digital and intelligent technologies, and the promotion of green and low-carbon technologies are key factors in promoting efficient and sustainable development of national spatial ecological restoration. By building a diversified technology collaborative innovation system, not only can the scientificity and operability of ecological restoration be enhanced, but it can also play a positive role in ensuring ecological security, improving environmental quality, and promoting coordinated socio-economic development. The research in the article provides important references for the theoretical improvement and practical exploration of future national spatial ecological restoration projects.

**Keywords:** national land space; ecological restoration; technological innovation; green development; sustainability

### 引言

国土空间是经济社会发展和生态文明建设的基本载体，也是人类赖以生存的根本空间。近年来，随着城市化进程的加快和工业化规模的扩大，土地退化、水土流失、生物多样性减少等生态环境问题日益突出，严重制约了区域生态安全与社会经济的可持续发展。为应对这些挑战，国家高度重视国土空间生态修复工作，将其作为实现“双碳”目标和构建人与自然和谐共生格局的重要战略举措。然而，目前的生态修复工程在实施过程中仍存在技术手段

单一、系统整合不足以及长期效益不显著等问题，亟需通过技术创新予以突破。数字化、智能化和绿色低碳等新兴技术的快速发展，为国土空间生态修复提供了新的机遇和手段。本文旨在系统探讨国土空间生态修复工程中的技术创新路径，分析其应用前景与现实挑战，以期为相关领域提供理论支持和实践指导。

### 1 国土空间生态修复的内涵与发展需求

#### 1.1 国土空间生态修复的基本内涵

国土空间生态修复是指在自然过程与人工干预的共

同作用下,通过系统性治理与生态工程措施,恢复受损生态系统的结构与功能,提升生态服务能力。其核心目标不仅在于修复表层环境,更在于重建生态系统的自我调节能力和可持续发展潜力。

### 1.2 生态修复工程的主要任务与方向

生态修复工程的主要任务包括治理土地退化、水土流失与矿山生态破坏,修复湿地与河流生态系统,改善生物多样性与生态服务功能等。当前的发展方向逐渐从单一问题治理转向区域整体系统修复,强调自然恢复与工程措施的有机结合。

### 1.3 发展需求的现实背景

我国正处于经济转型与生态文明建设的重要时期,生态修复不仅是环境保护的需要,也是落实国家战略、促进社会经济协调发展的必要选择。因此,探索更加高效、低碳和可持续的技术路径,是国土空间生态修复工程发展的必然需求。

## 2 传统生态修复模式的局限性分析

### 2.1 修复手段单一化问题

在长期的生态修复实践中,许多工程过度依赖单一技术路径,例如通过种植耐旱植物实现绿化,或仅采用土壤改良剂改善土质。这些方法在短时间内确实能够带来一定的景观改善或表层生态功能恢复,但缺乏系统性与综合性,难以应对复杂多变的生态环境需求。生态系统是由土壤、水体、植被与生物群落相互作用构成的整体,仅靠单一手段往往忽略了系统内部的循环与调节机制,导致修复结果不稳定。当外部条件发生变化,如气候波动或人为干扰时,单一修复措施很容易失效,甚至出现二次退化。长期来看,这种“头痛医头”的修复模式无法显著提升生态系统的整体健康水平。

### 2.2 系统整合与长期效益不足

在许多修复工程的实践中,往往倾向于以短期成效作为主要目标,例如通过种植草坪或栽种景观植物来迅速改善视觉效果,使项目在短时间内呈现“焕然一新”的景象。然而,这类以表层植被覆盖为核心的“表面修复”,并未触及生态系统功能恢复的深层次需求。真正的生态修复不仅包括外在景观的改善,更在于水土保持、土壤质量提升、生物多样性恢复及能量循环的优化。如果忽视这些系统性要素,生态系统在外部环境变化或人为干扰下极易再次退化,无法保证长期稳定性。短期的修复看似有效,却可能掩盖深层问题,延缓真正的生态安全建设。

### 2.3 管理与技术应用水平的不足

在生态修复的实际推进中,不少项目存在规划不科学、

实施缺乏长远视角的问题。部分工程在前期设计阶段忽视了生态系统的整体性和复杂性,导致修复目标设定笼统,措施缺乏针对性。与此同时,动态管理机制的缺失,使得修复过程无法根据生态环境的变化进行及时调整,形成“一次性设计、静态执行”的模式,难以保证长期效果。技术应用水平的不足也是制约因素之一,部分修复工程仍依赖传统手段,缺乏对大数据、物联网和人工智能等现代技术的有效利用,无法实现对生态系统状态的实时监测与动态优化。

## 3 国土空间生态修复中的技术创新路径

### 3.1 基于系统性思维的综合修复理念

技术创新的关键在于理念的革新,而理念更新的首要任务是树立系统思维。在生态修复过程中,土地、水体、植被和生物多样性并非孤立存在,而是构成了一个相互作用、彼此依赖的有机整体。只有从系统工程的高度出发,才能真正实现多要素的协同治理。通过将生态工程与综合治理相结合,可以在修复过程中兼顾土壤改良、水资源调控、植被恢复和物种多样性保护,使生态系统整体功能得以提升。这种理念不仅能够避免“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化修复模式,还能促进不同生态要素间的良性循环与动态平衡。

### 3.2 数字化与智能化技术的应用

大数据、物联网与人工智能等新一代信息技术的融合应用,正在为生态修复注入强大动力。这些技术能够实现对生态环境的实时监测与动态分析,全面掌握水体、土壤、植被及生物多样性等关键要素的变化趋势,为修复工程提供科学依据。通过智能建模与仿真,可以对不同修复路径进行虚拟实验,提前预测实施效果,减少试错成本,提升工程的可行性和可控性。数字孪生技术的引入更是让修复过程具备前瞻性,它能够在虚拟环境中模拟多种修复方案的运行情况,并对长期影响进行动态预测,从而为管理者制定科学决策提供支撑。借助人工智能的学习与优化能力,还能在修复过程中不断调整参数,实现自适应与优化运行。

### 3.3 绿色低碳技术的推广应用

在“双碳”目标的战略背景下,生态修复工程不仅要注重生态系统的恢复与提升,更应将绿色低碳理念贯穿全过程。通过引入生态基质修复技术,可以有效改善土壤结构,增强土壤的固碳与生态功能;在工程材料方面,推广节能环保型新材料,减少传统高能耗建材的使用,从源头降低碳排放;在能源利用环节,积极引入太阳能、风能等可再生能源,为修复设施提供清洁动力,减少对化石能源的依赖。与此同时,还可以通过构建低碳运维体系,推动

修复项目在实施和后期管理中保持高效节能状态。

## 4 多元技术协同创新的实践模式

### 4.1 跨学科技技术融合

生态修复工程本质上是一项复杂的系统性工程,涉及生态学、地理学、环境科学、工程学等多个学科领域。不同学科在理念、方法和技术上各有优势,通过跨学科的深度融合,可以为修复方案提供更加全面的支撑。生态学能够揭示生态系统的结构与功能规律,为修复目标的设定提供科学依据;地理学则能够在空间尺度上进行分析与规划,优化生态格局与功能布局;环境科学能够评估污染源与环境风险,提出治理对策;工程学则为各类修复措施提供具体的实施路径与技术保障。通过将这些学科成果进行有机整合,修复工程能够实现从单一问题治理向系统化、综合性治理的转变,不仅提升了修复的科学性和有效性,还推动了工程的长远可持续发展。

### 4.2 产学研协同创新机制

在国土空间生态修复的进程中,产学研结合被视为提升技术创新能力与成果转化效率的有效路径。高校与科研机构具备理论研究与技术攻关的优势,能够在基础原理、修复机制及新材料研发等方面不断突破,而企业则拥有丰富的实践经验和应用场景,能够将科研成果快速转化为实际工程技术。通过建立紧密的合作机制,三方能够形成优势互补,共同聚焦土壤修复、生态重建、智慧监测等关键技术的研发,推动创新成果在实际工程中的落地应用。在此过程中,不仅提升了修复技术的实用性与可靠性,也大大增强了其推广价值。更重要的是,这种合作模式能够促进科研人员与企业技术人员的互动交流,推动学科交叉与知识共享,为生态修复行业培养更多兼具理论素养和实践能力的复合型人才,从而形成可持续的创新动力和发展合力。

### 4.3 区域性综合试点与推广

在国土空间生态修复的推进过程中,因地制宜是实现治理成效的关键。不同地区在地形地貌、气候条件和生态问题上存在显著差异,修复措施若一刀切,往往难以取得理想效果。因此,有必要开展区域性综合试点,将典型地区作为实验场,集中探索适应当地自然条件和社会环境的修复路径。在试点过程中,通过对水土流失治理、矿山生态修复、湿地保护和植被恢复等不同领域的综合探索,积累经验并不断优化技术方案。经过反复验证与改进,逐步形成一套具有普遍指导意义和操作价值的修复模式。在此基础上,可在更大范围内推广应用,从而实现不同区域生

态系统的整体改善与功能提升。这种模式不仅能提升生态修复的科学性与针对性,还能为国家层面的生态文明建设提供坚实的实践依据与范例,推动生态系统质量的全面提升。

## 5 国土空间生态修复技术创新的前景与挑战

### 5.1 发展前景的广阔性

随着生态文明理念的不断深入,国土空间生态修复已不再是单一的环境治理工程,而是国家战略中的重要组成部分。修复工作的推进不仅关系到自然生态系统的健康运行,也关乎社会经济的可持续发展和人民群众的生活质量。在这一过程中,技术创新将成为推动修复进程的核心动力。通过引入大数据、遥感监测、人工智能和无人机巡查等先进手段,可以实现对生态系统状态的实时监控和精准评估,从而为修复方案的制定和实施提供科学依据。智能化技术的应用则使修复措施能够根据环境动态变化进行实时调整,提升工程的适应性和长期效果。同时,绿色低碳理念的融入将确保修复过程更加可持续,避免在治理中产生新的生态压力。未来,国土空间生态修复将在精准化、智能化和可持续化的方向上不断深化,为建设人与自然和谐共生的现代化国家提供坚实支撑。

### 5.2 面临的现实挑战

生态修复技术的发展虽然展现出广阔前景,但在实际应用中仍存在诸多制约因素。数据不足是突出问题,生态系统的长期监测和动态评估需要大量可靠的数据支撑,而在部分地区,数据采集不完整或精度不足,导致修复方案缺乏科学依据。技术标准不统一也是亟待解决的难题,不同地区在修复目标、操作流程和评估指标方面差异较大,缺乏统一的规范与指导,造成技术推广难度增加。投入成本偏高使得部分修复项目难以长期维持,尤其是在欠发达地区,资金不足严重制约了修复工作的深入开展。人才匮乏进一步加剧了这一困境,既懂生态学理论又掌握新技术的复合型人才数量有限,难以满足大规模推广的需求。要突破这些瓶颈,需要政府、科研机构和企业的协同努力,从数据共享、标准制定、资金保障和人才培养等方面形成合力,推动修复技术的持续创新与应用落地。

### 5.3 未来优化与提升方向

未来的生态修复工作需要在科学和技术创新的双重支撑下不断深化。加强基础研究有助于揭示生态系统演变规律和修复机理,从而为实践提供更加科学的依据。在技术层面,需持续推进数字化、智能化与绿色低碳技术的深度融合,借助遥感监测、大数据分析和人工智能等手段,实现生态修复的精准诊断与动态管理,提升整体效率

和可持续性。同时,建立和完善生态修复标准体系,将不同地区、不同生态类型的修复要求进行规范化,为行业提供统一的技术参考和操作规范。在保障层面,政策支持与资金投入不可或缺,政府应出台相关扶持措施,并通过多元化资金渠道为修复项目的研发与推广创造条件。通过科研、技术、政策与资金的协同作用,生态修复才能在保障环境安全与促进绿色发展的进程中发挥更加长远和全面的作用。

## 6 结论

国土空间生态修复是实现生态文明建设和可持续发展的重要举措,而技术创新则是提升修复工程成效的关键。本文通过对传统修复模式的局限性分析,提出了以系统性思维、数字化智能化技术和绿色低碳理念为核心的创新路径,强调了多元技术协同的重要性。研究表明,只有在理

念、技术和机制多方面协同推进的情况下,才能实现国土空间生态修复的长效性与可持续性。未来,相关研究应进一步强化跨学科融合与实践探索,为构建人与自然和谐共生的国土空间提供坚实技术支撑。

## [参考文献]

- [1] 张华.国土空间生态修复工程的技术路径与创新思考[J].生态经济,2022(6):45-52.
  - [2] 李强.数字化背景下的生态修复工程技术创新研究[J].中国生态文明,2021(9):33-39.
  - [3] 王丽.多元协同视域下的国土空间生态修复模式探析[J].环境科学与管理,2023(3):70-78.
- 作者简介: 张然 (1993.12—), 男, 汉族, 毕业学校: 中国地质大学长城学院, 现工作单位: 秦皇岛荣丰工程技术有限公司。

## 桥梁施工中高墩施工技术应用分析

刘 哲

新疆北新路桥集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**随着我国交通基础设施建设的飞速发展, 跨越深谷、江河的桥梁工程日益增多, 高墩作为关键承载结构, 其施工技术的安全性、经济性与高效性直接影响整个项目的成败。本篇文章系统分析了当前桥梁高墩施工中的主流技术, 重点阐述了液压滑模施工技术、液压爬模施工技术、翻模施工技术以及悬臂模板施工技术的基本原理、工艺流程及适用条件, 旨在促进高墩施工技术的规范化与创新发展。

**[关键词]**高墩施工技术; 桥梁工程; 翻模施工

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18352

中图分类号: U44

文献标识码: A

## Application Analysis of High Pier Construction Technology in Bridge Construction

LIU Bei

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** With the rapid development of transportation infrastructure construction in China, the number of bridge projects crossing deep valleys and rivers is increasing. As a key load-bearing structure, the safety, economy, and efficiency of the construction technology of high piers directly affect the success or failure of the entire project. This article systematically analyzes the mainstream technologies in current bridge high pier construction, focusing on the basic principles, process flow, and applicable conditions of hydraulic sliding formwork construction technology, hydraulic climbing formwork construction technology, flipping formwork construction technology, and cantilever formwork construction technology, aiming to promote the standardization and innovative development of high pier construction technology.

**Keywords:** high pier construction technology; bridge engineering; flip mold construction

### 引言

传统的满堂支架或常规模板方法已难以满足高墩施工在效率、安全与经济上的综合需求。因此, 研究并应用先进、可靠的高墩专项施工技术, 对于保障施工安全、提升工程质量、加快工程进度具有重大的现实意义。

### 1 桥梁高墩施工技术类型

#### 1.1 液压翻模技术

液压翻模技术的关键之处在于借助液压系统同步驱动模板以及作业平台逐节上升, 将钢筋绑扎、模板安装以及混凝土浇筑等工序整合成为连续且标准化的循环作业流程, 达成桥墩的分段快速施工, 此项技术特别适合用于高度处于 30~80m 之间、截面形式相对统一的薄壁空心墩或者实体墩, 其施工效率显著高于传统方法, 还可以保证墩身混凝土的外观质量良好、结构整体性强。不过这一技术也存在较大的局限性: 它对专用液压设备以及成套模板的依赖程度很高, 单套系统的购置成本比较高, 现场安

装与调试过程颇为复杂, 对施工场地以及组织管理的要求较为严格, 并且, 操作与维护要求专业人员有较高的技术水平, 这些因素在一定程度上提高了初期投入以及技术管理难度, 限制了该技术在更广泛工程项目中的推广与应用<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 滑模技术

滑模技术作为一种混凝土施工工艺, 具有高效连续的特性, 它借助液压系统, 驱动模板沿着混凝土结构面持续向上滑升, 于初凝阶段达成墩身的整体浇筑, 达成 40~100m 高墩体的一次成型, 此项技术特别适用于等截面或者缓变截面的实体墩施工, 每日的浇筑进度可达到 10m 以上, 成型后的墩身表面平整度颇高, 整体结构密实且不存在接缝。施工期间要严格把控混凝土性能参数, 坍落度需维持在 160~220mm 范围内以保障可塑性, 同时鉴于工艺特性的限制, 混凝土强度等级不宜超过 C50, 不然极易因材料收缩差异引发蜂窝麻面等质量缺陷。值得注意的是, 滑模施工有不可间断的特性, 既不能够设置施工缝, 又压

缩了养护窗口期,这些特性使其更契合工期紧张、对表观质量要求严苛的墩柱工程。

### 1.3 爬模技术

爬模技术作为一种应用于高墩分段施工的先进工艺,借助液压爬升架分阶段提升模板,同时利用脚手架搭建作业平台,以此达成墩身逐段浇筑成型,这种技术特别适用于墩高处于 20~60m、断面变化较大的异形墩结构,如斜拉桥主塔、拱桥索塔等特殊桥墩,和液压翻模技术相比,爬模施工有更高的灵活性,可依据施工进度对提升高度进行调整,减少模板使用量,提升经济性,与滑模技术相较,爬模技术更便于留置施工缝,有利于混凝土养护,成型后的外观质量较为稳定,表面平整度更易于把控。不过爬模施工也存在一定的局限之处,比如工序较为繁杂,需要频繁进行模板的拆装,施工组织难度较大,同时因作业强度高,人员需求量大,日浇筑进度相对较慢,一般控制在 1m 左右,以此保证施工质量与安全<sup>[2]</sup>。

## 2 桥梁高墩施工技术要点

### 2.1 测量定位与模板安装精度控制

在高墩施工过程中,测量放样属于控制结构几何尺寸以及垂直度的关键要点,其精度会直接对墩柱成型质量产生决定作用,施工期间,一般会采用全站仪以及经纬仪联合开展作业,经过多次闭合复核,保证墩柱中心线偏差被严格控制在 10mm 范围之内,同时把垂直度偏差控制在 1/3000,并且总偏差不超过 30mm。对于超高层段而言,可以引入激光铅直仪来进行动态跟踪校准,该仪器可实时捕捉垂直度的细微变化情况,并且依靠数据反馈系统指导现场人员及时实施微调纠偏操作,在模板体系施工阶段,优先选择厚度 6mm 以上的钢制模板,模板拼缝处理采用内侧油膏密封以及外侧硅胶嵌缝的双重防漏浆工艺。对于高大模板区段,需要重点加强加劲肋的布置工作,依靠配置型钢或者工字钢等加强构件来提升模板系统的整体刚度,模板安装验收时,要全面检查各个部位尺寸以及接缝质量,并且严格控制保护层厚度以保证钢筋定位准确<sup>[3]</sup>。

### 2.2 钢筋连接与劲性骨架稳定保障

在钢筋工程开展施工的过程中,连接工艺的选择极为关键,考虑到高墩施工所具有的特点,会优先选用滚轧直螺纹连接技术,这种工艺的接头抗拉强度可达到钢筋强度的 100% 以上,并且施工效率比较高,在施工时要严格把控接头错开率不低于 25%,以此来保证结构受力均匀。钢筋保护层的厚度按照 (45±10) mm 的标准进行精确控制,这对于结构的耐久性来说是非常关键的,对于高度超过 30m 的钢筋骨架而言,一定要设置由型钢或者圆管构

成的劲性骨架系统,如某特大桥的主墩采用工字钢焊接骨架配合可调式斜撑的方案,显著提升了骨架的稳定性,在施工的整个过程中都需要做好钢筋成品的保护工作,避免锈蚀污染对工程质量产生影响。

### 2.3 混凝土浇筑与分层养护

高墩混凝土施工质量对于保证结构的承载力以及耐久性而言十分关键,因此需要实施贯穿全过程的精细化管理,在进行配制工作时,应当选用质量优良的水泥以及级配良好的骨料,借助试配来确定最为合适的配合比,以此保证设计强度不低于 C40,施工期间优先选用泵送工艺,严格把控坍落度处于 160~220mm 之间,同时兼顾可泵性与抗离析性。浇筑进程要遵循“分层浇筑、均匀上升”的原则,每层的厚度不超过 30cm,运用高频振捣器进行分层错位振捣,间距大概为 30cm,保证密实度达到 98% 以上,必须维持对称匀速浇筑,将上升速度控制在 1m/h 以内,避免模板出现侧向变形,终凝之后应马上启动养护,采用自动喷淋的方式保持表面湿润,养护时间不少于 14d。在高温时段需要搭建遮阳棚并且增加喷淋,在低温时段应采用保温覆盖或者暖棚加热,对于采用滑模工艺施工的墩身,养护期应延长至 21 天,并且辅以养护剂来控制裂缝<sup>[4]</sup>。

### 2.4 模板拆除与施工缝隙处理

混凝土结构拆模的时机需要科学合理地把握,依照规范的相关要求,当混凝土强度达到 10MPa 以上时才可以进行模板拆除操作,在实际的操作过程中,需要采用分阶段以及分块拆除这种精细化的作业方式:首先是从支撑体系的顶部开始拆除工作,按照从上往下的顺序逐步开展。在拆模的过程中,一定要对模板实施规范化的管理,拆下来的模板应该分类整理并且整齐堆放,及时地进行清洁与保养工作,特别要注意防止阳光暴晒致使模板发生变形,以此来保证模板可周转使用,拆模工作完成之后,要立即组织质量验收工作,重点检查墩身表面是否存在蜂窝、麻面以及露筋等质量方面的缺陷,若是发现问题,应该立刻采用同配比的砂浆来进行修补。

高墩施工缝属于结构的薄弱部位,需要精心加以处理,以此防止出现渗水以及漏浆的情况,模板接缝可采用三元乙丙橡胶条来进行密封,并且要精确控制间隙,防止漏浆,在工程当中常会采用双排背贴式止水带,构建起内外两层防线,有效提高接缝在潮湿环境下的抗渗能力,施工期间需要对新旧混凝土结合面开展凿毛清理工作,将浮浆以及松动的骨料去除,在必要的时候涂抹界面剂,以此提高黏结效果。针对混凝土硬化收缩的特性,应当采取不同的养

护方式，让接缝区域保持湿润状态，延缓侧模拆除时间，以此协调新旧混凝土的变形，预防收缩裂缝，保障墩身整体的耐久性<sup>[5]</sup>。

### 3 桥梁高墩施工过程管理措施

#### 3.1 安全防护与设备维护监管

高墩施工属于危险性较大的分部分项工程，要构建全面的安全管控体系，安全管理方面，需严格落实三级安全技术交底，保证作业人员熟悉规程，所有进场人员要规范佩戴国标安全帽，高空作业人员要正确使用并系紧双钩安全带，脚手架要经过专业设计验算，立杆间距≤1.4m，操作层步距≤1.6m，还要按规范设置横向斜撑和剪刀撑，以保证稳定。外侧要全封闭设置高强度密目安全网，并且在作业层下方增设水平防护网，形成立体交叉防护，机械设备管理是重点内容，要建立完善的日常检查、定期维护以及专项保养制度，重点检查液压系统管路、密封件以及连接部位，大型起重设备作业前，地基要加固以契合承载力要求，还要设置有效的防倾覆措施。现场严格执行巡检制度，发现异常立即停机，待故障排除并验收合格后才可复工，坚决杜绝设备带病运行。

#### 3.2 质量检测与动态跟踪评估

##### 3.2.1 原材料质量控制

施工时要严格落实原材料准入制度，加大对水泥、砂石、外加剂等关键材料的抽样检测频次以及覆盖面，通过对各项技术指标进行严格质量把关，保证所有进场材料都符合设计和规范要求，杜绝不合格材料进入施工现场，为工程实体质量打下坚实基础。

##### 3.2.2 混凝土拌和与浇筑管理

在混凝土拌和这个环节当中，对于原材料的质量以及配合比参数都要进行严格的把控，特别要重点监控水灰比、坍落度、含气量等这些核心指标，要借助精确的计量以及充分的搅拌，以此来保证混凝土拌和物有良好的和易性、流动性以及均匀性，让其各项性能指标可以完全符合设计强度等级的要求。在浇筑施工时，现场需要配备专业的技术人员，全程进行旁站监督，指导工人规范地操作，同时要按照规范要求同步制作标准养护试件以及同条件养护试件，并且做好详细的标识以及记录，所有的试件都要按照规定的养护周期送交实验室进行抗压强度检测，等到检测结果达到设计强度标准之后，经过监理工程师确认才可以进行后续的施工工序。

##### 3.2.3 高墩成型质量检测

在桥梁高墩施工质量控制工作中，几何尺寸检测属于

极为关键的部分，按照规范规定，墩身成型之后要运用经纬仪、全站仪等传统测量器具开展轴线偏差检测，其允许偏差数值要严格控制在30mm范围之内，并且要保证墩体表面平整度，相邻测点的高差不能超过5mm，针对超高墩身结构而言，传统人工测量方式存在效率不高、数据采集不完整等状况。为此可考虑引入三维激光扫描技术来实施数字化检测，这项技术可在较短时间内获取墩身完整的表面点云数据，结合BIM模型开展三维空间比对分析，达成毫米级精度的偏差识别。

#### 3.3 应急响应与恶劣天气防范

高墩施工的周期比较长，一般会跨越多个季节，期间还会面临台风、暴雨等极端天气情况，应将天气风险纳入整个施工过程的管理之中，制定出科学合理的预案，对于台风灾害，项目部需要建立三级响应机制，当气象部门发布蓝色预警时，就要立即启动防风应急预案，对高空悬挂的模板、临时支撑体系以及脚手架进行全面的加固，采取钢丝绳斜拉锚固等抗风措施。若是遇到暴雨侵袭，需要重点防范雨水倒灌引发的基坑坍塌事故，提前检查排水系统的畅通情况，配备大功率抽水泵组，在承台周边开挖截水沟，恶劣天气过后，要立即开展拉网式排查，重点检查临时用电系统，受浸泡的配电箱要经过专业电工检测合格之后才可以恢复使用，同时测量班组要用全站仪复测墩身垂直度，如果发现结构偏位，应该及时通过千斤顶纠偏或者调整后续模板定位来进行修正，以保证施工质量与安全。

施工期间若出现重大设备故障，如液压翻模油缸忽然失灵致使模板无法正常升降，或者混凝土泵车输送管路严重堵塞造成浇筑中断这类突发状况，要马上停止所有作业活动，迅速启动项目应急预案，现场技术负责人需立刻组织抢修小组排查故障缘由，若是因设备故障致使混凝土供应中断时间超过初凝时限，要立即对已浇筑部位的施工缝做规范化处理：用人工凿毛将接茬面浮浆层完全清除，借助高压水枪对骨料表面进行冲洗，待界面彻底清洁后均匀涂抹水泥净浆当作粘结层。所有接茬面处理工序都需经监理工程师验收合格，并且留存影像资料后，才可恢复混凝土浇筑作业，保证新旧混凝土结合面达到设计要求的抗剪强度。

#### 3.4 环境保护与资源协调利用

在高速公路高墩施工进程中，贯彻绿色环保理念乃是企业履行社会责任、推动行业可持续发展的关键之举，要保证环保施工目标达成，需要构建全面的环境保护体系，场地布置应优先选择远离居民区的地方，严格把控夜间作

业,最大程度降低对周边居民的影响,对于桩基施工这类噪声较大的工序,采取移动式隔声屏障、减振装置等综合降噪措施,保证施工噪声符合环保标准。废弃物管理实施分类处理,泥浆、废水经沉淀过滤后循环利用或者达标排放,废旧模板等材料经处理后二次利用,同时通过建设雨水收集系统和中水回用设施,提升水资源利用效率,在设备选择方面,优先采购节能环保型机械,并做好日常维护保养工作,另外建立与政府部门和周边社区的常态化沟通机制,定期公示环保措施和施工进展,在保障工程顺利推进的同时切实维护周边环境和市政设施安全,实现经济效益与生态效益的双赢局面。

#### 4 结语

本文梳理了桥梁高墩施工技术的原理与特点,深入探讨技术选型与优化的策略,以期为类似工程的科学决策与顺利实施提供有益借鉴。

#### 〔参考文献〕

- [1]覃业思.高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用[J].中国储运,2025(11):168-169.
- [2]聂昕.公路桥梁施工中高墩施工技术要点研究[J].运输经理世界,2025(25):100-102.
- [3]曹亮.高墩施工技术在高速公路桥梁施工中的应用研究[J].汽车周刊,2025(9):226-228.
- [4]阎建良.公路桥梁施工中高墩的施工技术要点探讨[J].科技与创新,2025(8):134-137.
- [5]王维杰.公路桥梁施工中的高墩施工技术探讨[J].产品可靠性报告,2025(3):127-128.

作者简介:刘蓓(1991.11—),女,毕业院校:西安建筑科技大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:新疆北新路桥集团股份有限公司,职务:安全环保部职员,职称级别:中级工程师。

## 装配式建筑变电站施工技术及质量控制研究

杜亚成

中国能源建设集团天津电力建设有限公司, 天津 300171

**[摘要]**伴随电力系统不断发展, 变电站建设对于施工效率以及质量的要求日益提升。传统施工模式存在着诸多问题, 比如工期较长、现场作业较为复杂且质量难以实现统一等, 这些情况使得其很难满足现代的需求。装配式建筑凭借自身所具备的模块化以及标准化的特点, 在变电站施工当中得到了较为广泛的运用。就目前来看, 预制构件的生产技术、吊装安装技术, 还有BIM以及信息化管理手段都已逐步走向成熟。装配式建筑在变电站施工里所发挥的作用, 主要表现在能够提高施工效率、保障工程质量、减少现场作业的量以及降低安全方面的风险, 进而为工程的建设给予了一种高效且可靠的解决办法。

**[关键词]**装配式建筑变电站; 施工技术; 质量控制

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18347 中图分类号: TU745 文献标识码: A

## Research on Construction Technology and Quality Control of Prefabricated Building Substation

DU Yacheng

China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Construction Co., Ltd., Tianjin, 300171, China

**Abstract:** With the continuous development of the power system, the requirements for construction efficiency and quality in substation construction are increasingly increasing. The traditional construction mode has many problems, such as long construction periods, complex on-site operations, and difficulty in achieving unified quality, which make it difficult to meet modern needs. Prefabricated buildings have been widely used in substation construction due to their modular and standardized characteristics. At present, the production technology, lifting and installation technology, BIM, and information management methods of prefabricated components have gradually matured. The role of prefabricated buildings in substation construction is mainly manifested in improving construction efficiency, ensuring project quality, reducing the amount of on-site operations, and lowering safety risks, thereby providing an efficient and reliable solution for the construction of the project.

**Keywords:** prefabricated building substation; construction technology; quality control

### 引言

随着电力系统建设持续向前推进, 变电站身为电网极为重要的节点, 其建设的质量以及施工的效率, 和电力供应所具备的安全性、可靠性紧密关联。传统变电站采用的施工模式, 存在着诸多问题, 比如工期偏长、现场作业情况复杂、施工质量很难做到统一, 还有安全管理方面所面临的压力颇大等, 这些情况使得其难以契合现代电力建设对于高效、标准化以及安全施工方面的要求。装配式建筑属于一种模块化、工业化且标准化的建筑形式, 它有施工周期相对较短、质量能够把控、现场作业量较少以及对环境产生的影响较小等诸多优势, 于是便逐渐在变电站建设当中获得了应用。与此伴随着BIM技术、信息化管理系统以及现代施工技术不断发展, 装配式变电站施工在组织

管理、施工工艺以及质量控制手段等方面都得到了较为明显的优化, 其施工效率以及工程质量也都得到了提升。不过在装配式变电站施工期间, 依旧面临着预制构件的生产以及运输环节、现场吊装操作、机电设备安装事宜以及整个过程中的质量控制等一系列技术方面的挑战。鉴于此, 本文从装配式建筑变电站施工技术以及质量控制这个角度出发, 全面且细致地剖析施工组织与流程设计情况、关键施工技术要点、安全管理相关事宜以及BIM与信息化技术的应用状况, 并且针对预制构件、现场安装以及电气机电设备安装的质量控制方法展开研究, 目的是给装配式变电站施工给予科学层面的指引以及实践方面的参考, 推动变电站建设朝着高效化、标准化以及智能化的方向不断发展。

## 1 装配式建筑在变电站中的应用优势

装配式建筑在变电站中的应用通过工厂预制和现场模块化组装，实现了建设模式的革新，其优势主要体现在效率、环保、成本、质量及技术集成等方面。模块化设计将变电站划分为独立单元，通过标准化接口快速拼装，大幅缩短现场施工时间，同时故障模块更换也更加便捷，施工效率显著提升。施工过程减少现场湿作业，建筑垃圾排放明显降低，能耗减少，全生命周期对环境的影响得到有效控制。规模化生产和政策支持降低了项目成本，同时通过绿色金融工具可以进一步缓解初期投入压力。工厂预制保证构件精度和一致性，减少人为误差，标准化接口和兼容性机制提升系统稳定性，数字孪生技术实现设备状态监测和故障预警，提高维护效率。此外，模块化设计便于与智能电网及数字孪生技术融合，实现设备数据交互和优化管理，完善的标准化体系推动产业链协同发展，进一步提升了装配式变电站的建设质量和运行可靠性。

## 2 装配式建筑变电站施工技术

### 2.1 施工组织与流程设计

在装配式建筑变电站的施工进程里，施工组织以及流程设计构成了保障工程可顺利推进并且施工质量得以维系的关键基石。装配式建筑自身有着模块化、标准化还有预制化的特性，所以在施工组织方面务必要全面考量预制构件在生产环节、运输环节、现场吊装环节以及安装环节等各个方面的衔接状况与协调事宜。要依据项目的总体进度情况以及施工规模大小，去合理地编制施工组织设计方案，把施工阶段、工序顺序以及关键节点都明确界定清楚，从而保证各个施工环节能够科学且顺畅地衔接起来。接着，需要对预制构件的生产计划和现场施工计划加以统筹安排，通过优化运输路线以及吊装顺序，防止施工现场出现堆放杂乱无章的状况以及施工资源遭到浪费的情况发生<sup>[1]</sup>。与此还应当构建起完备的施工流程管理体系，针对施工流程展开标准化、可视化以及信息化的管理操作，以此达成对进度进行有效监控、对资源予以合理调配以及对风险实施妥善控制的高效目标。

### 2.2 关键施工技术

在装配式建筑变电站开展施工活动之时，关键施工技术可算得上是确保工程质量得以保障、施工效率得以提升以及结构安全得以维持的那个极为重要的核心环节所在。此项技术所涉及的范围颇为广泛，囊括了预制构件从生产阶段开始，一直到运输环节、吊装环节、安装环节乃至节点处理环节等诸多方面内容。就预制构件的生产进程来讲，务必要对钢筋加工这一工序、模板制作这一环节、混凝土

浇筑这一操作以及养护工艺这一流程加以严格的把控，从而切实保证构件的尺寸精度以及结构性能都能够契合设计方面所提出的要求。而在运输与吊装这两个环节当中，应当依据构件的具体规格情况、现场的实际条件状况以及吊装设备所具备的能力来合理地去规划运输的路线以及吊装的顺序安排，同时要采用那些较为科学的支撑方式以及固定办法，如此一来便能够有效防止构件在搬运的过程当中以及安装的过程当中出现受损的情况发生，并且还能充分保证施工期间的安全无虞。

### 2.3 施工安全与施工现场管理

在装配式建筑变电站施工期间，施工安全以及现场管理属于极为关键的环节，它们对于工程能够顺利开展以及人员与设备安全有着重要保障作用。因为装配式施工会涉及到数量众多的预制构件吊装工作、重型设备安装事宜以及多个专业的协同作业情况，所以施工现场往往存在着高空作业方面的风险、物体碰撞的风险还有电气安全方面的风险，这就需要建立起较为严格的安全管理体系并且制定出规范的操作流程。施工现场管理得从人员、设备、材料以及环境这四个方面来统筹安排，要清楚地明确各个工序的责任分工状况，合理地布置施工区域以及通道，设置像防护栏杆、安全网、警示标志以及应急通道这样的安全防护措施。与此还得强化施工人员的安全教育培训以及操作技能培训，保证他们能够熟练地掌握吊装操作的方法、设备使用的技巧以及应急处理的方式，并且要严格落实佩戴安全防护用品的相关制度。

### 2.4 BIM 与信息化技术在施工中的应用

在装配式建筑变电站施工环节当中，BIM 也就是建筑信息模型，还有信息化技术，在此方面的应用，可切实有效地提升施工管理的水平，让工程质量得以提高，施工效率也能有所提升。借助 BIM 技术，于施工正式开始之前，能够针对变电站的整体结构情况、预制构件的具体状况、机电设备的相关情况以及管线布置的实际情形展开三维可视化的模拟操作，如此一来，便能够达成对施工方案予以优化的目的，同时还能开展冲突检测工作，进而提前把设计以及施工过程中存在的潜在问题给找出来，以此减少现场出现返工的情况，避免资源出现不必要的浪费<sup>[2]</sup>。与此 BIM 技术还能够把施工进度方面、材料管理方面、设备安装方面以及质量控制方面的诸多信息综合起来加以管理，实现对施工全过程的可视化呈现以及数据化的监控操作，从而使得施工单位可以精准地去调度人力、物力以及机械设备，进一步提高施工组织的工作效率。

### 3 装配式建筑变电站施工质量控制

#### 3.1 施工质量控制体系与标准

在装配式建筑变电站开展施工活动之时,构建起较为完备的施工质量控制体系,并且严格依照相关的各项标准来行事,这无疑是保障工程质量以及运行安全极为关键的一个方面。这套施工质量控制体系务必要涵盖从设计审查环节开始,一直到预制构件的生产、运输环节,再到现场的吊装与安装环节,乃至后续的机电设备安装环节,直至最终的验收环节为止的整个过程,从而达成在质量管理上能够实现全方位、全阶段且全员都参与进来的这样一个状态。在整个体系构建的过程当中,需要清晰明确各个不同环节各自对应的质量责任人以及相应的质量控制要点,要制定出详尽细致的施工操作规程以及检查标准,而且要和国家层面以及行业层面的相关规范相互结合起来,像《建筑施工质量验收规范》《装配式混凝土结构技术规程》等等,以此来确保每一个工序都能够严格按照规定的标准去切实执行。与此还得建立起一套科学合理的质量监督以及检查方面的机制,借助自检、互检以及专职质量管理人员所开展的巡检等多种方式综合起来的方式,针对施工的整个过程展开持续不断的监控工作,以便能够及时察觉到存在的质量问题并且对其进行整改处理。

#### 3.2 预制构件质量控制

在装配式建筑变电站施工期间,预制构件质量把控属于极为关键的环节,其对于确保整体结构的安全性、施工效率以及工程质量都有着十分重要的作用。一开始在预制构件生产阶段,务必要依据设计图纸以及规范要求来加工,这其中就涵盖了钢筋加工、模板制作、混凝土配比与浇筑以及养护等一系列工序,而且每一项工序都得开展严格的质量检验并做好相关记录,以此来保障构件的尺寸精度、结构强度以及表面质量均能够达到相应标准。在运输环节当中,应当结合构件的具体规格、重量以及现场实际条件来合理制定运输方案,并且要采取相应的防护举措,避免构件在搬运以及装卸的过程中出现损伤或者发生变形等情况。现场吊装与安装这一环节同样极为关键,得对构件吊装的先后顺序、支撑的方式以及固定的方法予以科学合理的安排,从而确保构件能够精准定位,并且和相邻构件实现良好的衔接效果。与此针对节点接口、连接螺栓、焊缝以及预埋件等部位也得进行严格的检查工作,进而保证整体结构具备稳固性以及耐久性。

#### 3.3 现场安装质量控制

在装配式建筑变电站施工期间,现场安装质量控制属

于极为关键的环节,其对于保障整个工程的整体结构稳定、施工精准以及后期使用的安全性都起到重要作用。现场安装所涉及的范围比较广,既包含预制构件的吊装以及拼装操作,同时也涵盖了机电设备、管线还有辅助设施的定位与固定事宜,所以有必要建立起一套严格规范的安装质量管理制度。要依据设计图纸以及施工方案来针对现场施工展开详尽细致的规划工作,要清晰明确构件的安装先后顺序、吊装的具体方法以及相应的支撑举措,从而保证构件在整个安装进程当中能够始终处于正确的方位并且维持恰当的垂直度,防止出现偏差不断累积进而对整体结构产生不利影响的情况<sup>[3]</sup>。对于安装过程里涉及到的连接节点、接口处理、螺栓紧固以及焊接质量等诸多方面需要着重予以检查,以此确保各个构件相互之间连接得十分牢固、其间隙设置得较为合理且受力分布也相对均匀。

#### 3.4 电气与机电设备安装质量控制

在装配式建筑变电站施工期间,电气与机电设备安装质量控制属于极为关键的环节,其对于确保变电站能够安全运行、保障系统具备稳定性以及促使工程整体功能得以实现均有着重要意义。这一环节涵盖的内容较为广泛,既包含像变压器、断路器、母线、开关设备这类主要电气设备的安装事宜,又涉及到配电管线、控制系统、保护装置以及辅助机电设备的布置工作与调试事项。一开始,在正式开展设备安装之前,务必要依照设计图纸以及施工规范来仔细核对相关设备,要清楚明确每台设备的具体安装位置、连接的方式以及所采用的支撑方案,以此来保证设备在空间上的布局是合理的,并且方便后续的维护操作。在实施安装的过程中,需要针对设备基础、预埋件以及连接螺栓展开精准的定位操作并予以牢固固定,从而确保设备能够达到相应的水平度、垂直度要求,而且受力情况也需要保持均匀状态,避免因为安装时出现偏差而致使设备在运行过程中出现异常状况或者存在安全隐患。与此还要对电缆桥架、管线敷设、接地系统以及保护接线等方面进行全面且严格的检查,务必使得线路的布置是合理的,各类标识清晰可辨,绝缘性能良好,接地处理也足够可靠。在整个施工过程当中,还需借助精密测量工具以及 BIM 信息模型来对安装过程进行实时的监控与详细记录,一旦发现存在问题就要及时采取纠正举措,以此来确保安装精度以及各项技术指标都能够符合设计方面的具体要求。

#### 3.5 施工全过程质量监测与验收方法

在装配式建筑变电站施工期间,施工全过程的质量监测与验收办法属于保障工程质量、施工安全以及运行可靠

性的关键环节。全过程质量监测包含了从预制构件生产、运输、吊装安装，一直到机电设备安装、管线布置以及系统调试等诸多阶段，需要针对施工的每一道工序、每一个环节展开实时监督并做好数据记录工作。要构建起科学的监测体系，这一体系涉及人员管理、技术标准、检测方法以及监测频次等方面，以此来保证施工活动能够在规范所规定的范围之内开展。接着，借助精密测量设备、BIM信息模型还有信息化管理系统，针对构件尺寸、位置精度、垂直度与水平度、节点连接质量、设备安装精度等这些关键指标实施实时测量以及动态跟踪，以便及时察觉到偏差以及潜在的问题，并且采取相应的纠正举措，避免质量问题不断累积进而对整体结构产生影响<sup>[4]</sup>。在施工过程当中，还需开展定期的质量自检、互检以及由专职人员进行的巡检，进而形成多层次的质量监督网络，提升监测工作的科学性以及有效性。

#### 4 结束语

经过对装配式建筑变电站施工技术以及质量控制展开研究后能够察觉到，装配式建筑在变电站开展建设工作的过程当中，是能够在一定程度上切实有效地提升施工的效率，并且对于工程质量的提高也起到了积极作用。其中，较为科学合理的施工组织安排以及流程方面的精心设计，关键施工技术得以切实应用，严谨细致的安全管理举措，

还有BIM以及信息化技术的引入运用，使得整个施工的过程变得更加规范有序，同时也更具高效性。与之针对预制构件、现场安装环节以及电气机电设备等方面实施全过程的质量控制与细致监测，切实保障了施工的精度以及结构的稳定状态，有效程度地降低了施工期间所存在的各类风险。装配式建筑施工技术与质量控制的相关应用情况，给变电站的建设工作给予了可靠的工程技术支撑，也为后续相关建设积累了宝贵的实践经验，进而为达成施工的安全性、快速推进以及高质量完成等目标打下了坚实的基础。

#### 【参考文献】

- [1] 斯建东.变电站工程绿色施工技术与管理[J].中国水利水电出版社,2023(12):124.
  - [2] 志斌,徐坤,白宝峰,等.基于变电站装配式施工的AR技术应用[J].建筑施工,2023,45(4):764-766.
  - [3] 张肖峰,范绍有.装配式变电站的设计与施工技术研究[J].四川建材,2016,42(8):274-275.
  - [4] 陆晓雨.装配式钢结构变电站在全模块化施工中的关键技术应用[J].产品可靠性报告,2025(8):195-196.
- 作者简介：杜亚成（1981.5—），男，河北人，现就职中国能源建设集团天津电力建设有限公司，技术专家，长期从事新能源输变电工程技术管理工作。

## 公路路面垫层的施工技术分析

严迎雪

新疆北新路桥集团股份有限公司，新疆 乌鲁木齐 830000

**[摘要]**公路路面垫层作为道路结构体系中的重要组成部分，本篇文章首先分析了垫层结构的特点，随后结合具体工程案例，对该技术的具体应用进行了详细分析，研究表明，基于严格把控材料质量、优化施工工艺并加强过程检测等措施，可以大幅度提升垫层的均匀性、密实度与排水效能，保障公路工程的长期耐久性与行车安全。

**[关键词]**公路工程；路面垫层；测量放样

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18351 中图分类号: U416.2 文献标识码: A

## Analysis of Construction Technology for Highway Pavement Cushion Layer

YAN Yingxue

Xinjiang Beixin Road and Bridge Group Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

**Abstract:** As an important component of the road structure system, the highway pavement cushion layer is first analyzed in this article. Then, combined with specific engineering cases, the specific application of this technology is analyzed in detail. The research shows that based on strict control of material quality, optimization of construction technology, and strengthening process detection, the uniformity, compactness, and drainage efficiency of the cushion layer can be greatly improved, ensuring the long-term durability and driving safety of highway engineering.

**Keywords:** highway engineering; pavement cushion layer; survey lofting

### 引言

随着我国公路建设领域逐渐朝着标准化、机械化、精细化的方向发展，对垫层施工也提出了更高要求，在此背景下，深入系统地分析垫层施工各环节的技术要点、质量控制标准及常见问题的解决策略，具有重要的理论价值与实践指导意义。

### 1 公路路面垫层结构特点

公路路面垫层作为路面结构体系的中间层，承担着传递并分散交通荷载的关键作用，同时还构成了一道关键屏障，有效保护下方基层不被外界环境侵蚀与损害，垫层一般是由不同性能的材料复合而成的，其中包括具有一定强度的粗集料、用于填充间隙的细集料以及发挥提高黏结作用的填充料等，经过科学配比以及合理层次排列后，各材料之间形成互补协同，提升路面整体的承载力、结构稳定性以及长期耐久性。

在设计以及施工环节，垫层要依据不同地区的交通荷载特点、气候环境状况以及基层类型来做出针对性的调整，在重载交通的路段，垫层要提高其抗压以及抗剪的性能，防止荷载应力过度向下传递，在多雨或者地下

水丰富的区域，就需要重视其排水以及隔水的功能，避免水分浸入基层导致软化或者冻胀破坏。垫层的厚度、材料级配以及压实工艺也要按照具体的工程条件灵活地进行优化，以此来保证路面结构在动态荷载以及环境作用下可长期保持平稳、具有抗变形能力以及防水防腐性能，最终为公路的安全、舒适以及长效服役给予可靠的保障<sup>[1]</sup>。

### 2 工程概况

本项目是全长 17.8km 的双向四车道公路工程，其路面结构采用典型双层式设计，上层是 1.5cm 厚的沥青混凝土，下层是 3.5cm 厚的中粒式沥青混凝土，按照合同要求，工程重点是路面垫层施工，施工时会挑选级配良好、质地坚硬的天然砂砾作为主要材料，以此保证垫层有足够的承载力和透水性。施工进程中，要严格执行材料筛分、压实度、粒径级配等多项检测工作，并且对垫层厚度进行动态监控，把它严格执行在设计要求的 0.2m 左右，通过这些精细化施工与控制措施，可形成均匀、稳固的基层支撑，有效分散行车荷载、防止反射裂缝，保障整体路面结构的长期稳定和耐久性。

### 3 公路路面垫层施工技术应用

#### 3.1 测量放样

测量放样工作属于道路施工前期的基础部分,其重点是为后续施工工序给予精准的位置和高程参考依据,具体来说,施工人员要沿着路基中线的设计位置开展桩位布设工作,将其作为控制垫层标高的基准点,一般这些桩位在直线段每隔大概 15m 设置一个,这样可以实现经济高效的控制目的。而在道路曲线段,因为线形变化比较复杂,为了更精准地拟合设计轨迹,桩位间距会适当加密到 10m 左右,每个桩位都要准确标明该处垫层的设计高程,方便在填筑过程中随时进行标高校验与调整。

为了更加明确施工范围,需要在道路两侧分别设置指示桩,这些指示桩可清晰地标记出垫层铺设的边界线,形成完整的施工轮廓,让施工机械操作人员以及作业班组可以直观地掌握垫层的宽度与边线位置,切实有效地避免超挖或者欠挖情况的发生,保证垫层断面尺寸符合设计要求,经过这两步系统化的放样工作,可在施工现场建立起一套可见、可测的空间控制网络,为垫层材料的摊铺、整平以及压实提供可靠的技术保障<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 材料要求

垫层施工质量在很大程度上取决于所使用材料是否合格,要对细集料、粗集料、混合料以及水等各项材料进行严格管控,保证其性能符合设计和规范要求,让工程整体质量稳定可靠,在材料选择方面,优先选用质地坚硬、耐压耐磨的石料和碎石作为垫层主体材料,严格把控含泥量与粉尘含量,禁止使用表面附着大量粉尘或者容易产生扬尘的碎石,防止影响材料间的有效粘结以及结构整体性。

为了维持垫层骨架结构可长期保持稳定状态,需要依据三级石料的分级标准来合理挑选材料,选择有适宜粒径以及塑性特征的颗粒组合,以此保证骨料粒径分布合理且级配连续,在保障结构强度的情况下,还具有良好的渗透排水性能,在碎石加工的过程当中,要结合具体工程的需求对石屑进行筛分以及调配,选用匹配型号的破碎机械来开展作业,将碎石率控制在大约 40%,实现骨料颗粒形状与表面纹理的优化,提升垫层的密实程度与承载能力<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 材料运输

要保证建筑材料能安全且高效地从供应地运到施工现场,就需要对运输过程的每个环节做系统规划,依据材料的种类、数量以及施工现场的地理环境,科学挑选合适的运输工具,如平板卡车、厢式货车或者自卸车之类,所选择的车辆需要有足够承载能力和结构稳定性,保证运输

途中材料不会因颠簸、挤压而破损或散落,防止出现不必要的损耗和经济浪费。

在装载过程当中要特别留意细节方面,材料装车时应当均匀且平整,防止出现局部过高堆叠或者偏载的情况,不然会致使车辆重心失衡,对行车安全产生影响,必须采取有效的固定举措,如运用绑带、绳索或者支撑架来加固,避免材料在行驶途中出现移位、松动甚至坠落的状况,以此切实保障道路运输的安全。再次应当优先选择路况良好、平坦宽阔并且障碍较少的道路,尽可能绕开陡坡、连续颠簸路段或者狭窄通道,来减少车辆振动以及材料之间的摩擦碰撞,最大程度降低运输过程中的物理损耗以及潜在风险<sup>[4]</sup>。

当材料运送至工地后,要安排专门的人员负责卸货以及堆放的作业,在卸货时,应当采用平稳且可控制的方式,防止因为抛掷或者猛烈撞击而造成材料出现损伤,在堆放环节,需要严格依照施工计划以及现场管理的要求来进行,要做到分类有序,标识清晰,存取方便,避免材料出现混淆、积压或者因为二次搬运而导致浪费,为后续的施工创造出良好的条件。

#### 3.4 材料摊铺

在沥青路面进行摊铺作业时,为了提升施工效率以及摊铺层整体的均匀程度,一般会采用双机并行的作业模式,两台摊铺机之间前后间隔适宜设置为 8m,沿着同一个方向同步且匀速地向前推进,这样的布置方式可有效地减少纵向接缝,让前后摊铺的混合料温度衔接得更加紧密,对提高接缝处的压实质量极为有利。同时在施工过程中要维持稳定的摊铺速度,严格禁止中途随意改变速度,防止因为速度发生突变而造成铺面密度不均匀、平整度降低,影响路面的使用寿命以及行车的舒适性。

在摊铺过程当中需要重点关注以下几个方面:要强化标高的实时跟踪以及控制,安排专门人员通过基准线或者非接触式平衡梁来进行监测,对于局部出现的高低不平之处,应当及时运用人工补料或者刮平的方式进行处理,以此防止因为机械存在局限性而致使混合料分布不均匀以及出现离析的情况。如果使用未筛分碎石等基层材料,在摊铺的时候要均匀地布料,一旦发现表面集料离析情况严重、粗骨料集中,要马上撒布适量石屑来填补缝隙,防止压实后出现薄弱区域或者水损坏隐患,并且还要合理地组织运输车辆与摊铺机之间的衔接,让运料车在摊铺机前方大约 30m 的地方等待卸料,这样可减少车辆频繁启动与制动对摊铺机造成的干扰,保证供料持续不间断,维持摊铺作业的流畅以及铺面质量的一致。

### 3.5 材料碾压

当垫层材料完成摊铺工作后,需要马上开启碾压施工流程,碾压进程覆盖初压、复压以及终压这三个关键步骤,每一个步骤都有其专门的技术要求以及相应作用,在初压阶段的时候,一般会选用轮胎压路机开展静压轻压操作,此步骤的主要目的是让混合料和下承层路基紧密地贴合在一起,初步消除材料之间的气孔以及空隙,提升垫层的初期密实程度以及整体稳定性,为后续的碾压工作打下基础。复压属于压实的关键步骤,一般会使用振动压路机,以大约 1.6km/h 的匀速开展至少两次的振压作业,振动碾压可有效地克服材料内部的摩擦,促使颗粒重新排列,较大提高密实度以及承载力<sup>[5]</sup>。

终压是在复压完成后开展的工作,其目的在于消除轮迹并保证表面平整,属于修饰性碾压操作,碾压遍数要依据现场实际呈现的效果灵活加以确定,一般情况下整体碾压次数适宜控制在“7±1”遍的范围之内,如此方可实现设计密实度要求,形成平整且均匀的表层,在整个碾压进程当中,操作要保持平稳且连续,严格禁止压路机在作业面上突然进行掉头或者实施紧急刹车,否则容易产生推挤、起浪或者凹陷等状况,对垫层的平整度以及外观质量造成影响。各个环节应当衔接有序,要保证碾压均匀且不存在漏压现象,最终形成质量较高的垫层结构。

### 3.6 接缝处理

垫层接缝施工对保障路面结构完整性与耐久性意义重大,施工前要彻底清除接缝表面杂物、浮尘以及残留水分,让工作面平整且干燥,这是接缝材料充分附着的基础,为后续施工营造良好条件,接缝材料选择极为关键,要具有良好柔韧性、耐久性与附着性能,以适应路面在温度变化和车辆荷载作用下的伸缩变形。当前常用的垫层接缝材料有专用胶泥和沥青类缝材料,它们能有效适应路面动态变化,防止水分和杂质侵入结构内部。

在施工进程中,要依照设计图纸以及现场的实际状况,在预定的位置按照规范的间距开展精准的切割工作,以此形成整齐的接缝槽,紧接着将选定的接缝材料均匀地填充到槽内,填充之际要保证材料充实且饱满,并且与槽壁紧密地黏结在一起,防止内部出现空洞或者分层的情况,实施封缝操作时,一定要严格把控封缝材料的厚度与宽度,让其完全契合设计要求,这是保障密封效果以及长期耐久性的关键所在。施工期间材料应当分布均匀,不可出现局部空缺或者堆积过厚的现象,同时要维持适宜的施工速度,以便保证材料在初凝之前完成铺设并实现良好的黏附与

密实状态。

接缝施工结束后,要开展系统的养护工作,在材料完全固化以前,要设置警示标识,禁止重车通行以及人为踩踏、刮划,避免接缝结构遭到破坏,养护期间还要留意环境温湿度的变化,必要时采取覆盖或者洒水养护措施,保证接缝材料在稳定状况下形成预期强度,最终保障接缝部位的完整以及路面可长期平稳使用。

### 3.7 养护

公路路面垫层施工结束后,一般是在混凝土浇筑后的3~7d这个时间段内,务必要展开持续且细致的养护工作,在这一阶段,垫层材料正处于强度形成以及水分稳定的敏感时期,养护的关键目标在于维持适宜的湿度与温度,避免表面过早干燥或者温变过大引发开裂、起砂等状况。养护期间要严格把控外部负荷,一定要防止过早施加交通荷载或者施工重载,严禁各类车辆和设备在新铺设的垫层上随意行驶,不然极易造成结构扰动、表面压痕甚至内部损伤,影响垫层与后续面层的结合质量,致使路面整体使用寿命缩短,若是因为施工组织的需求,无法完全禁止通行,就应该制定严格的通行管理方案。允许通行的车辆若是轻型设备,并且需要采取充分的防护措施,比如在垫层表面铺设临时防护板、采用宽胎或履带设备来分散荷载,同时限制行驶速度与路线,要安排专人进行监督,保证通行不会对垫层结构造成破坏。

### 3.8 检测验收

路面垫层施工结束后的检测验收工作,要严谨查验施工成果是否完全依照设计规范与技术标准,以此保障公路路面具有长期的结构稳定性、行车安全性以及使用耐久性,还需要开展路面垫层的平整度检测,施工人员通过激光平整度仪或连续式断面仪等专业设备,沿着车道纵向展开系统性扫描测量。依据采集的数据计算国际平整度指数或者标准差等指标,保证垫层表面没有明显波浪、车辙或者局部坑洼,此项检测直接关乎上层路面结构的均匀受力以及未来行车的平稳性与舒适性,是预防车辆颠簸、减少冲击荷载的根基。

厚度测量具有重要意义,可运用钻芯取样法或者无损探地雷达来对全断面展开抽查,钻芯法可直观地获取压实后垫层的实际厚度,并且将其与设计图纸逐点进行核对,探地雷达则可快速地开展大范围连续厚度评估,厚度属于影响路面结构承载能力的关键参数,任何区域出现厚度不足的情况都会形成软弱部位,这有可能引发早期结构性破坏,而局部过厚则会造成材料浪费,并且极有可能对设计

标高产生影响。再次,密实度检测是评价施工压实工艺效果的核心所在,现场一般采用核子密度湿度仪或者灌砂法来进行检测,核子仪可快速且无损地测定垫层的湿密度、干密度以及含水量,依靠与实验室得出的最大干密度进行比对,计算出现场压实度,压实度如果没有达到标准,垫层材料将很难形成稳定板体,孔隙率过大就会导致水分积聚、材料松散,引发整体变形或者反射裂缝,严重缩短路面使用寿命。

最后,材料抽样检测属于从源头把控质量的验证环节,要从施工现场或者料场按照规定的频率随机抽取垫层所使用的材料,如级配碎石、水泥稳定土之类,然后送到标准实验室进行检测,检测的内容包含集料的粒径分布、压碎值、针片状含量,混合料的化学成分和剂量,以及混合料的含水率、无侧限抗压强度等关键指标。唯有所有材料性能都完全契合设计规范,才可保证垫层拥有设计所期望的力学性能与水稳定性。

#### 4 结语

本文结合工程实践与相关规范,对公路路面垫层的材

料选择、施工工艺流程、关键技术参数及质量控制措施进行综合性分析,以期为提升垫层施工质量、优化道路结构性能提供可靠的技术参考。

#### 【参考文献】

- [1]熊嘉伟.公路路面垫层施工问题与解决对策研究[J].运输经理世界,2025(27):47-49.
  - [2]冯浩.高速公路路面垫层试验段施工技术研究[J].价值工程,2025,44(7):92-94.
  - [3]宋海忠.高速公路路面垫层施工技术存在问题及解决措施[J].汽车画刊,2024(6):158-160.
  - [4]杨小兵.旅游公路路面石渣垫层病害分析及改善措施[J].四川建材,2024,50(4):120-122.
  - [5]宋文娇.高速公路路面垫层施工技术分析[J].交通建设与管理,2023(5):138-140.
- 作者简介: 严迎雪 (1995.9—), 女, 毕业院校: 成都理工大学; 所学专业: 土木工程, 当前就职单位: 新疆北新路桥集团股份有限公司四川分公司, 职务: 材料员, 职称级别: 助理工程师。

## 硝酸生产中智能化控制系统对安全与效率的影响分析

段 颖

唐山中浩化工有限公司, 河北 唐山 063000

**[摘要]**文中全面且细致地梳理了硝酸生产所涉及的基本工艺流程, 同时也对其在控制方面的需求做了详尽剖析。文中着重探讨了传统控制方式在响应速度、精度以及自适应能力等诸多方面所呈现出的种种局限性。与此还对智能化控制系统的诸多构成要素进行了阐述, 这其中涵盖了硬件架构、软件算法核心以及数据采集与通信网络等, 另外也对其各自的功能特点予以了说明。从多个不同维度来分析智能化控制系统所带来的积极作用, 像实时风险监测与预警、事故应急自动响应、操作规范化以及人为失误的降低等方面, 以此来阐述其对安全水平的提升效果。

**[关键词]**硝酸生产; 智能化控制系统; 安全; 工艺优化

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18337

中图分类号: TP3

文献标识码: A

## Analysis of the Impact of Intelligent Control System on Safety and Efficiency in Nitric Acid Production

DUAN Ying

Tangshan Zhonghao Chemical Co., Ltd, Tangshan, Hebei, 063000, China

**Abstract:** The article comprehensively and meticulously outlines the basic process flow involved in nitric acid production, and also provides a detailed analysis of its control requirements. The article focuses on exploring the various limitations of traditional control methods in response speed, accuracy, and adaptability. Furthermore, the various components of intelligent control systems were elaborated, including hardware architecture, software algorithm core, and data acquisition and communication networks. In addition, their respective functional characteristics were also explained. Analyze the positive effects of intelligent control systems from multiple dimensions, such as real-time risk monitoring and warning, automatic response to accidents, standardized operation, and reduction of human errors, in order to illustrate their effectiveness in improving safety levels.

**Keywords:** nitric acid production; intelligent control system; safety; process optimization

### 引言

硝酸作为一种具有腐蚀性、易燃易爆特性的危险化学品, 对其储存环境有着严格的要求。传统控制方式主要依赖人工操作和简单自动化仪表, 往往存在响应迟缓误差累积和过度依赖人员经验等缺陷, 难以应对复杂工艺条件下实时变化的风险因素和效率优化需求。随着信息技术和人工智能技术的飞速发展, 智能化控制系统通过融合传感器网络先进算法和高速通信技术, 为硝酸生产实现安全高效运行提供了全新的解决方案。在此背景下, 提升硝酸存储安全管理效率, 以前沿技术实现主动、精准、超前预警报警, 建设智能化的硝酸仓储监测预警系统势在必行。

### 1 硝酸生产工艺及控制需求

#### 1.1 硝酸生产的基本工艺流程

硝酸生产所采用的主流工艺是氨氧化法。这种方法包含

好几个连续的步骤, 像是氨空混合、催化氧化以及吸收与浓缩等环节。具体来讲, 会先把氨气和空气依据一定的比例混合好, 然后经过预热器将其加热。之后, 在铂铑催化剂的作用之下, 并且处在高温的环境当中, 就会发生氧化反应, 进而生成一氧化氮气体。生成的一氧化氮接着还会与空气当中的氧气进行反应, 转化成二氧化氮<sup>[1]</sup>。而这个二氧化氮会被水吸收, 从而形成稀硝酸溶液。再通过浓缩塔来提纯, 最终得到所需要的浓度的硝酸产品。整个这个流程当中, 涉及到十分复杂的化学反应以及物理变化过程, 对于温度、压力、流量以及浓度等这些关键的工艺参数, 其稳定的控制有着极高的要求。要是出现任何微小的偏差, 都有可能致使反应失去控制, 或者设备遭到损坏, 甚至引发安全事故的发生。

#### 1.2 传统控制方式的局限性

传统控制通常依靠模拟仪表以及手动调节, 操作人员

依据仪表盘所呈现的数据,结合自身经验来调整阀门开度或者设备运行状况,此种方式有着不少与生俱来的限制,比如响应速度比较慢、控制精度不高,并且容易受到人为因素的影响,在硝酸生产这样存在高风险的化工环节当中,传统控制很难做到对工艺参数进行实时监测以及动态调整,没办法及时发出针对潜在风险,如温度出现异常或者压力发生波动的预警,使得事故预防的能力有所欠缺,安全方面的问题也频频出现,而且因为控制策略是固定的,并且缺少自适应优化的功能,在生产过程中能源以及物料的消耗往往处于较高的水平,设备运行效率的提升也受到了限制,整体的生产经济效益并不理想。

## 2 智能化控制系统的构成与功能

### 2.1 系统硬件架构

智能化控制系统所涉及的硬件架构,是由多种不同类型的传感器、执行器、控制器以及通信设备共同构成的。这些设备借助工业以太网或者现场总线技术相互连接起来,进而形成一个分布式的网络,以此达成数据采集与设备控制方面的协同运作。其中,传感器主要承担着实时采集诸如温度、压力、流量以及浓度等一系列工艺参数的任务;而执行器则是依据控制指令来对阀门、泵机还有加热器等设备的状态做出相应的调整;至于控制器,它作为整个架构的核心处理单元,负责运行智能算法并且生成控制策略。在整个硬件架构的设计环节当中,充分考量到了硝酸生产环境所具有的高温、高压以及具备腐蚀性的诸多特点,并且采用了防爆以及防腐材料,从而保证系统能够稳定可靠地运行。

### 2.2 软件与算法核心

软件与算法在智能化控制系统当中占据着极为关键的地位,其涵盖了诸多模块,像数据预处理、模型预测、优化控制以及故障诊断等等。这些模块都是依托机器学习、神经网络还有模糊逻辑这类较为先进的算法来加以开发的。就数据预处理模块而言,它是针对所采集到的原始数据展开一系列的操作,比如滤波去噪以及归一化处理等;模型预测模块会凭借历史数据展开相应的训练,进而建立起工艺过程的数字孪生模型;优化控制模块会依据实时数据来动态地对控制参数做出调整,以此达成最佳的运行状态;而故障诊断模块则是借助模式识别技术来检测设备可能出现的异常情况以及潜在的故障状况。

### 2.3 数据采集与通信网络

数据采集以及通信网络属于智能化控制系统当中的基础设施部分,其主要职责在于把传感器所获取的数据实时地传送到控制器那里,并且要把控制指令下发给执行器。

该网络运用的是分层架构模式,其中涵盖了现场层、控制层以及管理层这三个层级。现场层会借助无线或者有线的方式去连接传感器以及执行器;控制层则是凭借工业交换机来达成数据的汇聚以及处理工作;而管理层能够为机交互界面以及数据存储功能予以提供。在通信协议方面,选用的是像 Modbus 或者 OPCUA 这样的标准化工业协议,以此来保证数据传输所具备的实时性以及可靠性,并且在设计网络的时候还特意赋予了它冗余以及容错机制,从而能够妥善应对可能出现的通信中断情况。

## 3 智能化控制系统对安全的影响

### 3.1 实时风险监测与预警

智能化控制系统整合了多种高精度传感器以及先进算法,可达成对硝酸生产流程里温度、压力、流量还有气体浓度等关键参数的连续且实时的监测工作。要是察觉到参数出现偏离正常范围的情况,系统会立刻启动多级预警机制。此系统不但对瞬时数值加以监测,而且借助算法剖析参数变化的趋势以及速率,进而针对潜在的风险做出超前的判断。比如说,在氧化反应器的温度以非正常的速率快速上升之时,即便还未达到安全阈值,系统同样会发出早期预警,提醒操作人员去核查。这样一种依据动态趋势展开的预警模式,切实提高了事故预防工作的主动性与预见性,促使安全管理工作从单纯的被动应对转变为积极主动的干预方式。

### 3.2 事故应急自动响应

当侦测到清晰的异常情况或者事故征兆时,智能化控制系统可依照内置的专家知识库以及预设的逻辑树,自动施行一系列按等级划分的应急响应举措。比如说,要是系统确定发生了氨气泄漏事故,它就会自动联动着去关闭上游的进气阀门,同时启动区域内的强制通风装置,并且激活喷淋吸收装置。这一整套响应流程能够在秒级的时间内完成,大幅度地削减了因人员确认以及手动操作而产生的时延。如此这般快速且自动的响应机制,是能够有效地把事故遏制在刚刚冒头的阶段,或者是对其影响范围加以限制的。

### 3.3 操作规范化与人为失误降低

智能化控制系统把标准操作规程融入控制逻辑里,并且配合严格的权限管理以及操作确认机制,有力地推进了生产操作规范化的进程。该系统针对关键操作步骤设置了逻辑互锁以及顺序控制,强制操作人员依照规定来执行。就好比在停炉检修之前,系统规定必须要依次完成降压、降温、吹扫等好几个确认步骤,要是没完成这些步骤,那么后续指令就没办法执行<sup>[2]</sup>。操作规范化进程不断推进,

在技术层面上对操作行为的随意性进行了约束,使得人为失误发生的可能性被大幅压缩。与此系统会针对所有的操作进行不可篡改的日志记录,这不但方便事后的回溯分析,还形成了有效的行为约束。人为失误降低所具有的深层价值就在于把生产安全建立在了一个更为稳固的系统性基础之上,而不是更多地依赖于个体的状态与经验。

### 3.4 设备状态诊断与预防性维护

智能化控制系统会借助部署在关键设备之上的传感器阵列来持续收集振动、温度、电流以及压力等诸多维度的运行数据,并且运用机器学习模型针对这些数据展开深度剖析,以此达成对设备健康状况的实时诊断以及故障预测的目的。比如说,该系统能够通过对离心泵轴承的振动频谱特性加以分析,提前好几周便能够识别出微弱的疲劳损伤迹象,并且生成预警信息。依照这种预测性的诊断结果,系统能够触发精准的预防性维护工单,指导维护人员在计划停机的时间段里完成具有针对性的检修工作,进而防止出现非计划停机的情况。这样从“故障后维修”模式转变为“预测性维护”模式,一方面直接消除了因设备突发故障而引发的次生安全方面的风险,另一方面也大幅度提升了设备运行的可靠性以及其寿命周期。

## 4 智能化控制系统对效率的影响

### 4.1 工艺参数优化与自适应调整

智能化控制系统凭借其强大的实时计算以及优化算法,可针对硝酸生产全流程的工艺参数展开动态闭环优化与自适应调整。该系统把提升综合收率或者降低单位能耗当作优化目标,持续微调诸如反应温度、压力、空氨比以及吸收液流量等数量众多且相互关联的参数设定值。就好比在氨氧化这个环节,控制器依据实时反馈的一氧化氮浓度来自适应地调节催化网前的温度与混合气配比,让反应一直处在最佳的动力学区间内。这样一种持续不断的微化进程,能够让生产装置自动应对原料气组分出现的波动、催化剂活性产生的衰减等一系列内外扰动,进而使整个生产过程稳定在最优的经济曲线附近开展运行。

### 4.2 能源与物料消耗降低

智能化控制系统对生产过程中的能源与物料流加以精准计量并实施平衡控制,由此达成了对消耗情况的精细化管理,并且从系统层面促使消耗得以降低。在能源方面,该系统将热能与动力网络模型予以集成,进而优化蒸汽、电力以及冷却水等公用工程的分配与使用时序<sup>[3]</sup>。举例来讲,会依据各塔器的实时负荷状况,智能地调度蒸汽透平与电机驱动组合,以此使总耗能量降至最小。在物料方面,

借助先进的过程控制算法,可提高反应转化率,同时减少跑冒滴漏的情况。比如在吸收塔里,通过精准把控循环酸的浓度以及温度,能够降低氮氧化物尾气的排放量,进而提升氨的利用率。

### 4.3 生产连续性提升与故障减少

智能化控制系统借助前文所提及的实时监控、预测性维护以及自适应控制等诸多手段,切实有效地减少了计划外停车以及工艺波动的情况出现,进而大幅度提升了生产运行的连续性。该系统可预先协调设备维护与生产计划,把必要的维护活动对生产流程可能产生的冲击降到最低限度,并且其具备的强大抗扰动控制能力可迅速平抑因外界因素引发的工艺波动,维持生产的稳定状态。生产连续性得以提升所带来的直接成效便是装置年有效运行时间得以延长,产能利用率也相应提高了。

### 4.4 管理决策的数据支持

智能化控制系统所构建起来的工厂数据平台,为处在不同层级的管理决策给予了以往不曾有过的数据方面的有力支撑以及更为敏锐的洞察能力。该系统一方面会提供实时的生产数据,另一方面也会给出历史趋势情况,并且还能够凭借数据挖掘的方式生成各式各样的性能指标报表、效率分析报告以及成本核算明细。生产管理人员能够依照这些极为精准的数据报告来识别出生产环节当中的瓶颈所在,去评估技术改造的效果如何,同时还能对排产计划加以优化<sup>[4]</sup>。而企业高层则可凭借汇总之后的效能指标展开更为科学合理的战略规划以及投资决策。这样一种由数据来驱动的决策模式,削减了因经验主义而产生的诸多不确定性,使得各项管理活动变得更加精准且高效。就像管理学家所说的那样,把生产运营从原本那种依靠经验的技艺转变成了一项依据数据的科学,这无疑是工业智能化发展当中极为重要的一项核心要义。

## 5 结束语

智能化控制系统在硝酸生产方面的应用,给安全以及效率带来了颇为深远的影响。借助实时风险监测,能够实现事故应急响应操作的规范化,同时设备预防性维护也得以强化,如此一来,安全水平得到了明显提升。通过对工艺参数加以优化,使能源消耗得以降低,生产连续性也获得了提升,并且还提供了管理决策方面的有力支持,这使得运行效率得到了大幅改善。虽说智能化控制系统在实施进程当中,可能会碰到技术集成成本以及人员培训等诸多挑战,不过它的长期效益以及转型价值是绝对不可以被忽视掉的。在未来的研究当中,需要进一步去探索算法优化

以及系统集成的方法,以此来推动硝酸生产朝着更加智能、更加安全、更加高效的方向不断向前发展,从而为化工行业的可持续发展贡献出自己的一份力量。

#### [参考文献]

- [1] 刘元,金戈,闫碧成,等.基于 AI 视频分析的硝酸铵仓储智能化系统设计[J].现代职业安全,2025(6):21-24.
- [2] 王迎春,赵晋华,杨刚,等.四元硝酸盐/ $Ti_3C_2Tx$  复合相变材料的制备及性能研究[J].冶金与材料,2025,45(12):13-15.

[3] 王迎春,侯一雷,郭永红.三元硝酸盐/氧化铜复合相变材料的制备及性能研究[J].中国新技术新产品,2025(24):1-4.

[4] 李昊泽,吕春蕾,任永刚,等.电感耦合等离子体原子发射光谱法检测铜冶炼烟灰、铜冶炼渣中的 Mo[J].实验与分析,2025,3(4):10-15.

作者简介: 段颖 (1991.11—), 女, 河北省唐山市人, 汉族, 本科学历, 化工助理工程师, 就职于唐山中浩化工有限公司, 从事化工生产(硝酸生产和罐区储运)相关工作。

## 高层建筑电气消防系统的联动控制设计与安全性优化研究

刘世强

九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**高层建筑作为现代城市发展的重要组成部分，具有结构复杂、人员密集、功能多样的特征，其消防安全问题一直备受关注。电气消防系统在高层建筑中不仅承担火灾报警、灭火联动、应急照明及疏散指示等核心任务，还直接关系到建筑整体的安全性与可靠性。文中以高层建筑电气消防系统为研究对象，探讨其联动控制设计的基本原则与关键技术，分析现有系统中存在的可靠性不足与潜在隐患，并提出优化设计与运行管理的对策。在方法上，研究结合系统集成技术、控制逻辑优化与冗余设计思路，从联动控制逻辑的科学性、设备间协同的有效性以及运行监测的智能化等方面展开分析。结果表明，基于合理联动控制与安全可靠性优化的电气消防系统，能够显著提升火灾处置的效率与准确性，保障人员生命财产安全，并推动高层建筑消防管理的现代化。

**[关键词]**高层建筑；电气消防系统；联动控制；安全可靠性；优化设计

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18363 中图分类号: TU976 文献标识码: A

## Research on Linkage Control Design and Safety Optimization of Electrical Fire Protection System in High-rise Buildings

LIU Shiqiang

Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** As an important component of modern urban development, high-rise buildings have the characteristics of complex structure, dense personnel, and diverse functions, and their fire safety issues have always been of great concern. The electrical fire protection system not only undertakes core tasks such as fire alarm, fire extinguishing linkage, emergency lighting, and evacuation instructions in high-rise buildings, but also directly affects the overall safety and reliability of the building. The article takes the electrical fire protection system of high-rise buildings as the research object, explores the basic principles and key technologies of its linkage control design, analyzes the reliability deficiencies and potential hazards in the existing system, and proposes countermeasures for optimizing design and operation management. In terms of methodology, the study combines system integration technology, control logic optimization, and redundancy design ideas to analyze the scientificity of linkage control logic, the effectiveness of equipment collaboration, and the intelligence of operation monitoring. The results indicate that an electrical fire protection system based on reasonable linkage control and safety reliability optimization can significantly improve the efficiency and accuracy of fire disposal, ensure the safety of personnel and property, and promote the modernization of fire management in high-rise buildings.

**Keywords:** high-rise buildings; electrical fire protection system; linkage control; safety and reliability; optimization design

### 引言

随着城市化进程的加快，高层建筑在城市空间结构中占据了越来越重要的地位。由于建筑高度不断攀升，内部功能不断复杂化，火灾风险呈现高频化和多样化的特点，消防安全已成为高层建筑设计与运行管理中的核心环节。电气消防系统作为消防安全体系的重要组成部分，其联动控制设计不仅要实现火灾的早期探测和报警，还需要与防排烟、喷淋灭火、电梯控制、应急照明等多个子系统实现

高效协同，以确保在火灾发生时能够迅速、准确地响应，最大限度降低人员伤亡与财产损失。然而，传统电气消防系统在控制逻辑设计、系统冗余配置、设备运行可靠性和智能化管理等方面仍存在不足，影响了整体效能的发挥。为此，研究高层建筑电气消防系统的联动控制设计与安全可靠性优化具有重要的理论价值和实践意义。本文将结合高层建筑电气消防系统的运行特征，系统分析其设计思路与存在问题，并提出切实可行的优化策略。

## 1 高层建筑电气消防系统的总体特征

### 1.1 系统结构的复杂性

高层建筑电气消防系统不仅涉及火灾自动报警和灭火装置,还包括防排烟系统、应急照明与疏散指示、电梯控制、消防电源监控等多个子系统。这些子系统之间形成了纵横交错的关系,既需要各自独立运行,又必须通过统一的平台实现协同操作。其复杂性体现在多个方面:一是信号传输链条较长,任何环节故障都有可能引发响应延迟;二是控制逻辑多层嵌套,需要在不同场景下快速选择正确策略;三是跨专业、跨设备的兼容性要求高,不同厂商设备标准不一时常带来集成难题。系统结构复杂带来的挑战在于设计人员必须具备跨学科的综合能力,确保各模块能够有机结合,形成稳定的整体。

### 1.2 运行环境的特殊性

高层建筑所处环境往往复杂多变,内部人流密集,电气设备运行时间长,系统易受到外部环境因素的干扰。例如温度升高可能导致探测器灵敏度降低,湿度增加容易造成线路短路或腐蚀,电磁干扰则可能引发信号传输异常。建筑本身的结构布局对系统运行也会造成影响,超高层建筑内部风压和烟气流动与普通建筑显著不同,增加了防排烟控制与报警响应的难度。这种运行环境的复杂性,要求电气消防系统不仅具备良好的硬件适应性,还需要在设计阶段充分考虑环境约束,增加抗干扰和自检功能,以保证长期稳定运行。

### 1.3 安全可靠性的高要求

高层建筑火灾逃生困难、救援条件有限,决定了电气消防系统必须具备极高的可靠性。与普通建筑不同,高层建筑一旦发生火灾,火势蔓延速度快,烟气扩散迅速,电气消防系统若不能稳定运行,后果将极其严重。因此,可靠性要求不仅表现在关键设备的冗余配置,还体现在系统响应速度、容错能力和抗干扰性能上。系统需要能够在突发情况下迅速启动,在局部设备失效时依旧保持基本功能运转,从而为人员安全疏散和消防救援赢得宝贵时间。

## 2 电气消防系统的联动控制设计原则

### 2.1 探测与报警的及时性

火灾探测与报警是电气消防系统的起点,也是后续联动动作能否顺利展开的关键。设计中需要重点确保探测器布局合理、灵敏度符合标准,并结合建筑内部的空气流动特点设置安装位置,以减少漏报或延迟。报警系统必须具备迅速传递信号的能力,保证火情信息能够在最短时间内到达消防控制室和相关设备。现代系统普遍采用总线技术和智能化探测器,以实现快速识别和定位。及时性不仅体

现在反应速度上,还包括系统在多点报警时的处理能力,能够同时接收并区分多个火情信号,避免因信息拥堵造成延误。

### 2.2 控制逻辑的合理性

联动控制的核心在于逻辑设计。控制逻辑必须根据火灾发展的阶段和不同区域的特点进行优化,既要考虑动作的先后顺序,又要兼顾不同设备之间的协调。例如在探测到火情后,空调与送风系统应立即关闭,防排烟系统随之启动,喷淋系统根据火情发展逐步开启,应急照明与疏散指示同时投入运行,电梯则执行迫降程序。若逻辑设计不合理,可能导致某些设备过早或过迟动作,从而削弱整体防控效果。合理的控制逻辑需要经过反复论证与仿真测试,确保在各种场景下都能实现最优响应。

### 2.3 冗余与容错的必要性

冗余与容错是保证电气消防系统可靠性的必然要求。冗余体现在控制器、电源和通信线路等核心环节上,容错体现在系统在局部故障时仍能保持基本运行功能。例如,在主控制器失效的情况下,备用控制器应能立即接管,保证联动动作不受影响。在通信网络中,可采用双环网设计,确保任意一处线路中断时,信号仍能通过另一条路径传递。容错设计的本质在于降低单点故障带来的风险,使系统能够在突发情况下展现更强的韧性和自恢复能力。

## 3 电气消防系统运行中存在的问题

### 3.1 设备性能差异造成的隐患

现实中,许多高层建筑电气消防系统的设备来源于不同厂商,缺乏统一的标准与接口规范。这种差异会造成信号不兼容、传输延迟甚至功能缺失。例如不同品牌的探测器与报警控制器之间协议不统一,容易出现信息传递失败的情况。在紧急情况下,这种性能差异极有可能削弱系统的整体效能,甚至影响火灾处置的及时性。

### 3.2 系统可靠性不足

为了降低建设成本,部分建筑在设计时没有充分考虑系统的冗余与备份,导致设备在高强度运行下出现故障时缺乏替代机制。一旦发生控制器宕机或电源中断,整个系统可能陷入瘫痪。此外,许多系统在运行中缺乏自检和实时状态监测功能,问题往往在故障发生后才被发现,增加了风险。可靠性不足不仅影响火灾处置能力,还会降低日常运行的安全水平。

### 3.3 智能化水平不高

目前大多数电气消防系统仍以传统联动和集中控制为主,智能化水平有限。系统往往只能在火灾发生后被动响应,缺乏对潜在风险的提前识别和预测能力。维护工作

主要依赖人工巡检，效率低下且容易遗漏。随着建筑规模和复杂度的提升，这种传统模式显然难以满足现代化管理需求。智能化不足已成为制约系统发展的主要瓶颈之一。

## 4 安全可靠性优化的技术路径

### 4.1 系统集成与标准化设计

在电气消防系统建设中，设备差异与兼容性问题长期存在，影响了整体运行的效率与可靠性。为了解决这一难题，需要在设计阶段推动系统集成与标准化建设。通过统一接口和通信协议，可以确保不同品牌与类型的设备实现无缝对接，使各类功能模块能够在同一平台上协调运行。集成平台的建立，使火灾探测、报警、控制等功能得以集中，形成统一的调度与管理机制，提高了响应的速度与准确性。标准化设计不仅提升了系统之间的互通性，还为后续的维护与升级提供了更多便利，减少了因设备更新导致的兼容性问题。统一的技术标准能够将电气消防系统发展为可复制、可推广的应用模式，为更多建筑提供成熟经验与参考。通过这种方式，整体水平得以提升，系统的稳定性和适应性也显著增强，为建筑消防安全奠定了更加坚实的基础。

### 4.2 冗余设计与容错机制

在电气系统的优化过程中，冗余设计与容错机制是确保安全与可靠运行的关键环节。冗余设计通过配置双电源、双控制器以及双环网通信等措施，使系统在某一环节失效的情况下仍能保持稳定运行，从而避免因单点故障导致整体瘫痪。这样的结构不仅增强了系统的稳定性，也为应对突发状况提供了坚实保障。容错机制则更多依赖于软件层面的智能化设计，通过引入智能切换与自修复功能，当某一模块出现故障时，系统能够自动调整控制逻辑，使运行状态迅速恢复到正常水平。这种自适应能力有效避免了个别失效对整体性能造成的连锁影响。冗余与容错的结合，使系统在极端环境下依旧具备较高的运行可靠性，保障了电气系统的持续性与安全性，也为大型建筑和智慧综合体的长期稳定运行提供了强有力的技术支撑。

### 4.3 智能化与信息化应用

未来的电气消防系统将逐步迈向智能化与信息化方向，为建筑安全提供更加全面的技术保障。借助人工智能与大数据分析，系统能够对运行过程中产生的海量数据进行深度挖掘，提前识别潜在风险，从而减少误报和漏报带来的不利影响。通过智能算法的支持，系统不仅能发现异常，还能根据历史数据和运行规律提出预测性判断，为管理人员提供更具前瞻性的参考。物联网技术的应用使得各

类消防设备的运行状态可以实时上传至监控平台，形成统一的动态信息中心。管理人员无论身处何地，都能远程掌握系统的整体状况，并根据需要进行动态调整。信息化应用的核心价值在于提升系统的感知能力与自适应能力，使其在火灾尚未形成时就能具备预警功能，在火灾真正发生时则能够快速、精准地完成处置。

## 5 优化设计的实施与应用效果

### 5.1 提升应急响应效率

优化后的电气消防系统在应急情况下展现出更高的运行效率，其核心在于合理的控制逻辑与高速的信息传输机制。当火灾信号被触发时，系统能够在极短时间内完成各个子系统之间的联动响应，确保应急处置的连贯性与精准性。例如，防排烟系统能够迅速启动，有效控制烟雾扩散，保持疏散通道的安全；应急照明和疏散指示会同步点亮，为人员提供清晰的逃生路线；消防电梯则能够及时执行迫降程序，避免在火灾中误用带来的危险。这一系列快速而有序的响应，大幅缩短了火灾初期的处置时间，使人员能够在更安全的环境中完成疏散，也为后续的救援行动创造了有利条件。通过这种优化设计，电气消防系统不仅提升了火灾防控的效率，还显著增强了建筑整体的安全保障能力，为高层建筑和大型综合体的运营安全提供了坚实支持。

### 5.2 降低系统运行风险

在建筑电气系统中，引入冗余设计与容错机制能够显著降低运行风险。通过为关键设备和线路配置备用方案，即使某些部件在运行过程中出现故障，系统依旧能够保证核心功能的持续运转，从而避免因单点故障导致整体瘫痪的情况发生。这样的设计思路为建筑提供了更高层次的安全保障，也为复杂运行环境下的稳定性奠定了基础。与此同时，系统配备的实时监测与自检功能能够对运行状态进行全程跟踪，一旦出现异常波动或潜在隐患，便会在第一时间发出预警，使管理人员能够快速采取干预措施。通过这一方式，风险被有效控制在萌芽阶段，降低了事故发生的概率。安全等级的提升不仅意味着人员与财产的双重保障，还减少了因突发故障带来的维护成本，使建筑在长期运行中保持高效与可靠，为智慧化管理提供了强有力的支持。

### 5.3 推动建筑消防管理现代化

基于智能化与信息化的优化设计，使电气消防系统在日常运行中具备了强大的数据收集与分析能力。系统能够通过对运行参数的实时监测，积累大量与电气安全相关的

数据,为管理者提供科学的决策依据。借助大数据的统计与分析,系统能够总结出建筑在不同环境与负荷条件下的运行规律,不仅为日常管理提供参考,还为未来类似建筑的设计积累宝贵经验。智能化的应用推动了消防管理模式的根本性转变,使传统依赖事后响应的被动防控逐渐演变为被动预测和动态管理。通过智能算法与实时监控的结合,潜在风险能够在早期被发现并及时干预,大幅提升防控的前瞻性与有效性。

## 6 结论

高层建筑电气消防系统作为保障消防安全的重要组成部分,其联动控制设计与安全可靠性直接关系到建筑运行的整体安全水平。通过探讨系统特征与设计原则,分析存在问题并提出优化路径,可以得出以下结论:系统集成与标准化是实现高效联动的基础,冗余设计与容错机制是提高可靠性的核心,智能化管理是未来发展的方向。优化

后的电气消防系统能够显著提升火灾应对能力,降低运行风险,为高层建筑的消防安全提供坚实保障。未来研究应进一步结合人工智能、大数据分析与云平台应用,构建更加智能、高效的电气消防系统,实现建筑消防的智慧化与可持续发展。

## [参考文献]

- [1] 李强.高层建筑电气消防系统的设计与应用研究[J].建筑电气,2021(6):45-51.
  - [2] 王芳.高层建筑消防联动控制系统可靠性优化探讨[J].消防科学与技术,2022(4):67-73.
  - [3] 张伟.智能化电气消防系统在高层建筑中的应用前景[J].中国安全生产科学技术,2023(2):58-64.
- 作者简介: 刘世强 (1993.1—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北建筑工程学院, 现工作单位: 九易庄宸科技(集团)股份有限公司。

## 机械制造及自动化技术在智能生产中的应用研究

刘 勋

吉林省吉高服务区管理有限公司, 吉林 长春 130000

**[摘要]**随着工业 4.0 以及智能制造理念不断向前推进, 机械制造及自动化技术在智能生产方面的应用, 正展现出极为快速的发展势头。机械制造自动化可提升加工精度以及生产效率, 同时还能明显改进生产柔性与安全性, 达成制造全过程的智能化控制。借助数据采集、人工智能、数字孪生等核心支撑技术, 现代智能生产系统可实现生产调度优化、质量监控以及数据驱动决策, 以此进一步提高企业的竞争力。文中在剖析机械制造自动化特点的基础之上, 深入探讨了智能生产的核心技术、应用实践以及发展趋势, 希望能够为智能制造的实施与优化给予理论方面的参考以及实践层面的指导。

**[关键词]**机械制造; 自动化技术; 智能生产

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18350

中图分类号: TH16

文献标识码: A

## Research on the Application of Mechanical Manufacturing and Automation Technology in Intelligent Production

LIU Xun

Jilin Province Jigao Service Area Management Co., Ltd., Changchun, Jilin, 130000, China

**Abstract:** With the continuous advancement of Industry 4.0 and the concept of intelligent manufacturing, the application of mechanical manufacturing and automation technology in intelligent production is showing an extremely rapid development momentum. Mechanical manufacturing automation can improve machining accuracy and production efficiency, while also significantly improving production flexibility and safety, achieving intelligent control of the entire manufacturing process. With the help of core supporting technologies such as data collection, artificial intelligence, and digital twins, modern intelligent production systems can achieve production scheduling optimization, quality monitoring, and data-driven decision-making, thereby further enhancing the competitiveness of enterprises. On the basis of analyzing the characteristics of mechanical manufacturing automation, this article deeply explores the core technologies, application practices, and development trends of intelligent production, hoping to provide theoretical references and practical guidance for the implementation and optimization of intelligent manufacturing.

**Keywords:** mechanical manufacturing; automation technology; smart production

### 引言

机械制造在现代工业体系里占据着极为重要的位置, 它的发展状况对产业效率以及技术竞争力有着直接的影响。传统的机械加工模式存在着诸多问题, 比如生产效率不高、对人工的依赖程度较强、缺乏足够的柔性以及安全隐患相对较多等, 这些问题使得其很难契合现代制造业对于高质量、个性化以及高效生产方面的需求。不过随着自动化技术、信息处理技术还有智能决策技术持续向前发展, 机械制造从开始到结束的整个过程慢慢实现了自动化以及智能化, 这给工业生产模式的转变给予了全新的技术方面的支持。智能生产把机械制造自动化技术、较为先进的传感器系统、数据采集并且分析的平台、人工智能算法以

及数字孪生技术加以集成, 从而达成对生产过程的全方位感知、实时的监控以及智能的决策, 进而让生产活动变得更为灵活、更为精准以及更为高效。本文依据智能生产的相关理论, 着重围绕机械制造以及自动化技术的应用来开展相关的研究工作, 较为系统地对其核心技术所起到的支撑作用以及未来的发展趋势展开分析, 希望能够为智能制造体系的构建给予一定的理论层面以及实践层面的参考。

### 1 机械制造自动化的特点

机械制造自动化以机械制造为对象, 综合运用自动控制、信息处理、智能决策等技术, 实现制造全过程的自动化、智能化。与传统机械加工模式相比, 机械制造自动化具有以下特点:(1)加工精度高。在数控系统精确控制下,

自动化设备的定位精度和重复定位精度可达微米级,加工精度远高于手工水平。(2)生产柔性强。机械制造自动化设备可通过编程实现工艺参数、加工对象的快速切换,减少换型时间,满足多品种、小批量定制化生产需求,过程透明可控。应用传感器、数据采集等技术,机械制造过程的各项参数可实现实时采集、分析与监控,有利于提高生产过程的透明度和可控性。(3)运行安全可靠。自动化设备可在恶劣环境下稳定运行,代替工人完成繁重、危险的工作,极大降低安全事故发生率。(4)经济效益显著。机械制造自动化降低了人工成本,减少了原材料消耗,提高了产品质量,极大提升了机械制造的投入产出效益。

## 2 智能生产的核心支撑技术

### 2.1 数据采集与工业网络

数据采集以及工业网络技术作为智能生产体系的重要基石,肩负着把生产现场各式各样的设备、传感器还有控制系统所产生的数据加以汇聚、传输以及处理这样关键的任务,在智能生产的环境当中,机械设备的运转状况、加工的相关参数以及生产环境方面的信息会借助传感器来实时地予以采集,而后经过工业以太网、现场总线或者无线通信网络传送到数据中心又或者是云端系统,达成多层级且多节点的信息共享。高效的、稳定的采集与传输数据一方面能够确保生产流程的透明化以及可追溯性,另一方面也给生产调度、故障诊断以及优化决策给予可靠的数据方面的支撑。并且,现代的工业网络技术着重于实时性、可靠性以及安全性,凭借标准化的通信协议以及网络管理的策略,达成设备之间的互联互通以及生产系统的高效协同,进而为智能生产筑牢坚实的技术根基。

### 2.2 人工智能与机器学习

人工智能以及机器学习在智能生产方面的运用,让生产系统的自适应性有了提升,其智能决策的能力也得到了加强。通过针对历史生产数据、设备状态数据还有质量检测数据展开深度学习以及模型训练的操作,智能生产系统可达成生产预测、故障预警、工艺优化以及自动调度等目的,而且能依据不同的生产环境以及工艺条件来灵活地调节生产策略。人工智能技术不但能够识别出生产过程里的异常模式,还能对设备资源实施智能调配与优化,如此一来,可削减能源消耗以及材料浪费,促使生产效率得以提高,并且在多品种、小批量的生产环境当中实现高效的柔性调度。伴随机器学习算法不断地进行迭代与优化,智能生产系统能够针对实时生产数据展开动态分析,进而实现自主学习以及智能决策,进一步强化生产的稳定性和可靠性,与此同时推动机械制造从传统的被动响应模式朝着主

动优化以及智能化管理模式去转变,为企业提升产品质量、降低运营成本以及达成生产全过程精细化管理给予稳固的技术支撑以及应用保障。

### 2.3 数字孪生与虚拟仿真

数字孪生技术构建物理实体的虚拟映射,让生产系统于数字空间达成全生命周期的监控、分析以及优化操作。针对机械设备、生产线还有工艺流程展开数字化建模工作,企业便可在虚拟环境里开展生产仿真、工艺验证以及运行优化等相关事宜,如此一来可降低试错成本并削减生产风险。虚拟仿真同数字孪生相结合,使得智能生产能够预先预测设备故障、优化生产计划并且改进工艺参数,进而实现精细化管理以及智能化控制。在复杂的生产环境下,数字孪生技术能够完成多场景、多工况的模拟与优化,给决策者给予科学依据,与此同时推动机械制造自动化设备和信息系统相互融合,为智能生产给予稳固的技术支撑以及创新途径。

## 3 机械制造及自动化技术在智能生产中的应用

### 3.1 自动化生产线设计与优化

自动化生产线的设计以及优化工作,属于智能生产体系达成高效运行的关键环节所在,在当代的机械制造领域当中,自动化生产线所包含的内容并不单单只有数控机床、机器人还有传送系统这类硬件方面的设施,同时还涉及到生产流程方面的规划事宜、工艺设计相关的工作以及生产管理系统所涉及的集成方面。通过对设备予以合理的布局安排、对工艺路径展开优化操作、对生产节拍加以协调以及对物流流向进行把控等方式,自动化生产线便能够达成高效且连续的生产作业状态,如此一来便可以大幅度地降低人工的干预程度,进而促使生产灵活性以及可靠性得以提升。在开展优化工作的过程当中,把生产数据的相关分析情况同仿真模拟所取得的成果结合起来,生产线便能够实现动态的调整操作,以此来契合不同产品规格以及批量方面的需求,最终促使资源利用率得以提升,能耗有所减少,并且保证产品质量的稳定性能够得到维持。

### 3.2 生产过程实时监控与智能调度

生产过程的实时监控以及智能调度,对于智能生产达成高效运作与细致管理而言极为关键。当在生产过程中安装了传感器、数据采集设备还有控制系统之后,那么生产过程里的每一个环节都能够实现实时监控,像设备的状态、加工的各项参数、生产所处的进度以及环境方面的条件等各类信息均包含在内。凭借着工业网络以及智能算法,生产调度系统可依据实时获取的数据来动态地对生产计划做出调整,进而达成设备负荷处于均衡状态、作业顺序得

以优化以及生产节拍能够被控制的目标。智能调度一方面提升了生产线的利用效率,另一方面还能够在出现异常情况的时候及时察觉,并且采取相应的纠正举措,以此降低生产过程中存在的风险。借助由数据驱动而开展的调度与控制工作,企业在维持较高产能的情况下,可以确保生产过程的稳定性以及产品的质量,从而实现对智能生产的全方位优化。

### 3.3 质量控制与故障诊断智能化

质量控制以及故障诊断走向智能化,这已然成为机械制造自动化于智能生产环节里极为关键的应用指向。当在生产设备还有那些至关重要的工序之处去布置高精度的传感器时,便能够实时地将加工进程里的各类数据都采集起来,而后联合人工智能算法展开一番细致的剖析,如此一来,系统便能够达成针对产品质量的在线式监测、对缺陷予以预测以及对趋势做出评估这样的效果。凭借着对加工参数、环境条件以及设备状态展开实时的监控举措,智能系统可迅速识别出异常的波动情况以及潜在存在的故障状况,还能精准地判定故障的具体类型,并且会生成相应的维护或者调整方面的方案,进而切实有效地降低停机所花费的时间以及产品出现报废的比率,提升生产的连续性以及经济效益方面的情况<sup>[1]</sup>。相较于传统的那种依靠人工开展巡检工作、凭借经验来进行判断以及按照定期安排去实施维护的方式来言,智能化的质量控制以及故障诊断着实是让监测的准确性以及反应的速度都得到了大幅度的提升,同时也强化了生产流程的可控性以及稳定性,达成了对制造全过程实现高效的管理以及持续不断的改进这样的一种状态。除此之外,借助数据的不断积累以及深入分析的操作,系统能够持续不断地对工艺参数以及维护策略加以优化,促使机械制造能够在智能化以及精细化的方向上不断地向前发展,与此同时还能为企业给予可靠的决策依据以及生产优化的空间。

### 3.4 数据驱动的生产优化与决策

数据驱动的生产优化与决策,借助对生产进程中所产生的各类数据展开系统且细致的分析,可为生产管理、工艺改进以及资源配置给予科学的依据与决策方面的有力支撑。智能生产系统会实时收集设备状态、加工参数、能耗信息、产品质量数据以及环境条件等诸多维度的数据,再结合大数据分析、机器学习、优化算法以及预测模型等手段,能够精准识别出生产瓶颈所在之处,预判潜在的设备故障情况,对工艺参数加以优化,并且能够动态地调整生产流程,以此达成生产效率以及资源利用率的最优化目

标<sup>[2]</sup>。数据驱动的方式不但能助力企业制定更为科学合理的生产计划与调度策略,而且在长期的运行过程当中还能形成一种闭环自学习机制,达成生产过程的持续优化以及智能化管理的目的,大幅提高系统的适应性与灵活性。与此通过对历史数据以及实时数据展开分析,企业能够更为精准地去评估生产风险,减少能源以及材料的浪费情况,还可为战略决策提供较为可靠的依据,促使机械制造及自动化技术在智能生产当中的应用价值得以充分展现,并推动整个生产体系朝着高效、精细以及智能化的方向不断前行。

## 4 智能生产发展趋势与挑战

### 4.1 技术发展趋势

智能生产技术正朝着高度集成化、数字化以及智能化的方向不断发展,而且渐渐地朝着全流程、全生命周期的智能管理方面演进。在未来,机械制造自动化设备将会拥有更为强大的自主感知能力、智能决策能力以及自动执行能力,能够在复杂且多变的生产环境当中自主地调整生产策略,与此同时还能达成设备运行的最优调度以及能耗管理的目标<sup>[3]</sup>。人工智能和机器学习技术会在生产预测、质量控制、工艺优化以及异常处理等诸多方面起到更加关键的作用,借助对海量的历史数据以及实时数据展开深度剖析的方式,达成智能预测以及自主优化的效果。数字孪生、虚拟仿真以及物联网技术相互融合的程度会越来越高,这会让生产系统能够在虚拟的空间里模拟并优化实际的生产过程,进而实现精准控制、远程操作以及协同制造。随着工业大数据、云计算平台以及边缘计算技术逐渐走向成熟,生产数据的实时分析能力以及智能决策能力都会得到明显提升,能够为企业给出科学且可量化的优化方案,而且还会进一步推动机械制造以及自动化技术在智能生产当中的高效运用以及系统化发展。

### 4.2 面临的主要技术与管理挑战

智能生产技术发展快,但应用有挑战。技术方面,设备系统要兼容,数据采集得准,复杂工艺调度难;管理方面,企业要调整架构,培养人才,保障数据安全,跨部门协作,成本高、技术更新快。推广时,要综合考虑技术、管理和效益,让技术管理一起发展。

## 5 结束语

机械制造以及自动化技术于智能生产当中的实际应用情况,正有力地推动着制造业朝着高效能、高柔性的方向不断发展,同时也向着更为安全且更加智能化的态势迈进。借助核心支撑技术加以集成并付诸应用之后,智能生

产系统便能够达成自动化生产的目的,还能做到实时监控相关状况,另外在质量优化方面也能取得成效,并且能够凭借数据来驱动决策的制定,如此一来便能让生产效率得以大幅提升,产品质量也能够获得明显改善。在未来的发展进程中,伴随人工智能技术、数字孪生技术以及工业网络技术不断地向前发展,智能生产将会呈现出更高层次的自主决策能力,其系统优化能力也会达到新的水平。不过,技术层面以及管理方面的诸多挑战仍旧需要企业在具体实施的过程当中持续不断地去探索并予以解决,唯有如此才能切实保障智能生产的可持续发展态势。机械制造以及自动化技术得到更为深入的应用,将会为构建起高效能、

绿色环保且智能化的现代生产体系给予强有力的支撑。

#### 【参考文献】

- [1]吴金玲.机械设计制造及自动化技术在机械生产中的应用[J].河北农机,2025(18):36-38.
- [2]陈新伟.智能自动化技术在机械设计制造中的应用研究[J].中国高新科技,2021(18):60-61.
- [3]滕昇.智能技术在机械制造自动化中的应用[J].造纸装备及材料,2025,54(3):88-90.

作者简介: 刘勋 (1986.11—), 男, 就职于吉林省吉高服务区管理有限公司, 安全管理, 中级工程师(机械制造及自动化), 从事相关工作。

## 北方农村散煤取暖替代技术应用与室内暖和保障效果研究

李洪昊

九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**北方农村长期以来以散煤为主要取暖方式，但散煤燃烧效率低、污染物排放大，不仅造成能源浪费，也严重影响空气质量与居民健康。近年来，随着清洁取暖政策的推进，电取暖、天然气供暖、生物质能源利用、空气源热泵等多种替代技术逐步在北方农村得到应用。然而，替代技术在实际推广过程中面临成本高、供暖稳定性差、农户接受度不一等问题，影响了室内暖和保障效果。文中在分析北方农村散煤取暖现状及其弊端的基础上，探讨了主要替代技术的特点、应用条件与适配性，重点研究了替代技术在室内暖和保障中的实际效果。研究表明，分散式清洁取暖与集中供暖相结合，能够显著提升室内温度稳定性，降低碳排放，实现经济性与舒适度的平衡。文章提出了完善配套政策、优化技术路径、提高农户参与度的对策建议，以期为推动北方农村取暖方式的绿色转型与室内环境质量的改善提供参考。

**[关键词]**北方农村；散煤取暖；替代技术；室内暖和；清洁能源

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18362 中图分类号: TK62 文献标识码: A

## Research on the Application of Bulk Coal Heating Replacement Technology and Indoor Heating Guarantee Effect in Northern Rural Areas

LI Honghao

Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** For a long time, scattered coal has been the main heating method in rural areas of northern China. However, the combustion efficiency of scattered coal is low and the emission of pollutants is large, which not only causes energy waste but also seriously affects air quality and residents' health. In recent years, with the promotion of clean heating policies, various alternative technologies such as electric heating, natural gas heating, biomass energy utilization, and air source heat pumps have gradually been applied in rural areas in the north. However, in the actual promotion process, alternative technologies face problems such as high costs, poor heating stability, and uneven acceptance among farmers, which affect the effectiveness of indoor heating guarantee. On the basis of analyzing the current situation and drawbacks of loose coal heating in rural areas of northern China, this article explores the characteristics, application conditions, and adaptability of the main alternative technologies, with a focus on studying the practical effects of alternative technologies in indoor heating guarantee. Research has shown that combining decentralized clean heating with centralized heating can significantly improve indoor temperature stability, reduce carbon emissions, and achieve a balance between economy and comfort. The article proposes countermeasures and suggestions to improve supporting policies, optimize technological paths, and increase farmers' participation, in order to provide reference for promoting the green transformation of heating methods and improving indoor environmental quality in northern rural areas.

**Keywords:** northern rural areas; scattered coal heating; alternative technologies; indoor warmth; clean energy

### 引言

在北方农村，冬季取暖是关系到居民生活质量和生存安全的首要问题。长期以来，受经济水平和能源获取方式的限制，散煤燃烧成为最主要的取暖方式。然而，散煤燃烧存在热效率低、燃烧不完全、污染排放严重等问题，导致雾霾频发和农村环境质量恶化。近年来，国家提出“蓝

天保卫战”和“清洁取暖”战略，要求逐步减少散煤使用，推广电能、天然气、生物质及可再生能源等清洁替代方案。这些措施的实施，不仅有助于降低空气污染，还能够提升农户生活的舒适度和健康水平。但在推广过程中，替代技术的经济性、运行稳定性和农户接受度成为制约因素。如何在保证取暖效果的前提下，实现技术的可持续应用，是

亟待解决的现实问题。本文将从散煤取暖问题出发,结合替代技术的应用现状,深入分析其在室内暖和保障中的效果,总结经验与不足,提出优化路径,以期为农村清洁取暖转型提供理论与实践支持。

## 1 北方农村散煤取暖的现状与问题

### 1.1 散煤取暖的普遍性与经济性

北方农村地域辽阔,冬季漫长而寒冷,农户对取暖的依赖度极高。由于长期缺乏统一的供暖体系,分散取暖成为主要形式。在能源选择上,散煤凭借价格低廉、获取便利,成为农户首选。多数家庭在采暖季会提前储备煤炭,以保障整个冬季的燃料需求。散煤燃烧具有一定的即效性,投入炉膛即可快速产生热量,满足农户对取暖的直接需求,这种即时性和灵活性与农村生活方式高度契合。然而,表面上的经济性掩盖了其潜在问题。散煤取暖往往忽视了设备效率和燃烧方式,虽然燃料价格便宜,但单位热量输出偏低,农户在长时间取暖过程中实际花费并不低于清洁能源。

### 1.2 散煤燃烧的环境与健康问题

散煤燃烧过程中会排放大量的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物,这些污染物是冬季雾霾的重要来源。农村地区普遍缺乏集中监测手段,环境治理不到位,因而散煤燃烧对空气质量的影响更为直接。空气污染不仅影响外部环境,也危及室内空气质量。在通风条件不足的农户家中,燃煤容易积聚一氧化碳,若烟囱和通风系统不畅,极易引发中毒事故,严重威胁居民生命安全。从健康角度看,长期处于煤烟环境中,会增加呼吸系统疾病、心血管疾病的发生率,老年人和儿童成为高风险人群。这些健康隐患逐渐引起社会关注,使得散煤取暖问题成为环境治理和公共健康的重要议题。

### 1.3 散煤取暖的能源利用效率不足

传统的农村煤炉燃烧方式粗放,热能损耗严重。燃烧效率偏低,导致单位煤炭的有效利用率不足,增加了能源消耗。多数炉具设计简单,保温和传热效果有限,产生的热量很大一部分散失到空气中,实际传递到室内的热量有限。这种低效的燃烧模式既造成资源浪费,也增加了农户的劳动强度。农户需要频繁添煤、清理炉渣,增加日常负担。长期来看,低效利用带来的经济损失不可忽视,尤其是在能源价格波动时期,农户实际承担的成本甚至高于清洁取暖方式。

## 2 散煤替代技术的类型与应用条件

### 2.1 电取暖技术

电取暖作为散煤替代的重要方式,因其高效、清洁和

便捷逐渐受到关注。电取暖包括电暖气、电热膜、电锅炉等形式,这些设备能够实现快速升温恒温控制,避免了煤炉燃烧不稳定的问题。电取暖运行过程中没有直接排放,对室内外环境均友好,符合绿色能源发展趋势。然而,电取暖的推广受到农村电网条件的制约。部分偏远地区电力负荷不足,高峰期可能出现供电不稳定,影响供暖的连续性。同时,电价水平直接决定了农户的使用意愿,在一些地区,电取暖的运行费用高于农户的承受能力,制约了普及程度。

### 2.2 天然气供暖技术

天然气因其清洁性和高热效率,被视为散煤替代的理想能源。天然气供暖方式多样,既可以通过分户壁挂炉供暖,也可以采用集中供暖模式。分户供暖灵活性高,能够根据家庭需求灵活调节温度,提升使用体验。集中供暖则适合人口密集的村镇,通过统一供气与供热管网实现规模效益。但天然气推广的难点在于基础设施建设。管网铺设投资大、周期长,对于偏远分散的村落而言,天然气难以覆盖。此外,气源保障问题也是制约因素,一旦出现供气不足,可能影响供暖稳定性。

### 2.3 生物质能源利用

生物质燃料包括秸秆压块、木屑颗粒等,是农村丰富的农业废弃物再利用形式。生物质能源具有可再生、低碳排放等优点,其燃烧效率经过专用炉具优化后显著提升,污染排放量远低于散煤。生物质能源符合农村农业资源特点,能够在本地实现生产与消费的循环。然而,生物质能源产业链尚不完善,加工设备分布不均,运输成本较高,燃料供应的不稳定性影响了农户的使用积极性。如何建立完善的供应体系,是推广生物质取暖的关键。

## 3 散煤替代技术的室内暖和保障效果分析

### 3.1 电取暖的温度稳定性

电取暖能够通过智能控制系统实现精准调节,室内温度波动小,居住舒适性显著提升。现代电取暖设备多具备恒温控制功能,可根据室外气温自动调节功率输出,使室内温度维持在适宜范围。对比散煤取暖的时冷时热,电取暖在温度稳定性上具有明显优势。然而,长期高负荷运行下,电费支出可能成为农户的负担。部分地区虽然出台了电价补贴政策,但农户仍担心费用过高,导致电取暖的应用受到一定限制。

### 3.2 天然气供暖的连续性与舒适性

天然气燃烧稳定、热效率高,供暖过程连续性强。壁挂炉可实现灵活控制,农户可以根据需要设定不同房间的温度,满足差异化需求。集中供暖则能够提供大范围稳定

的热量，避免散煤取暖频繁加料的问题。在室内温度保障方面，天然气供暖能够持续维持适宜的温度，居住体验明显改善。然而，气源波动和管网条件不足可能造成供暖中断，尤其在极寒天气下，供气不足问题更为突出，影响了暖和效果。

### 3.3 生物质取暖的可再生性与适应性

生物质燃料取暖的优势在于资源可再生，且符合农村农业特征。高效炉具的使用能够大幅提高燃烧效率，室内温度可达到与散煤相当甚至更高的水平。同时，生物质燃烧的污染物排放量低，改善了室内外空气质量，对健康具有积极作用。然而，由于供应链不稳定，部分农户在取暖季面临燃料不足问题，这在一定程度上影响了供暖连续性。燃料获取的便利性与稳定性，直接决定了其室内暖和保障效果。

## 4 影响替代技术取暖效果的关键因素

### 4.1 经济成本与补贴政策

农户对取暖方式的选择首先取决于经济承受能力。散煤的低成本是其长期普及的关键原因，而电取暖、天然气、生物质燃料均存在前期投入高或运行费用高的特点。为了推动清洁取暖，政府出台了多项补贴政策，包括设备补贴、燃料补贴和电价优惠。但在实际执行中，政策落实存在地区差异，部分农户无法享受到长期稳定的补贴，导致使用积极性下降。经济成本与补贴机制的不匹配，是影响替代技术推广的重要因素。

### 4.2 基础设施与配套建设

清洁取暖技术的有效应用有赖于完善的基础设施支撑。电取暖依靠稳定的电网运行，如果电网承载能力不足，就可能出现供电不稳定甚至频繁停电的情况，直接影响取暖效果。天然气供暖需要依托管网建设，覆盖率不足会导致气源供应不畅，使集中供暖难以发挥优势。生物质能源的推广则依赖于完整的加工与运输体系，如果缺乏高效的燃料收集、储存与配送环节，农户很难长期获得稳定的燃料保障。在部分农村地区，基础设施建设相对滞后，这些问题成为制约清洁取暖技术应用的重要因素。运行条件的不完善不仅降低了农户的使用体验，也削弱了他们对替代技术的信任感。要实现清洁取暖的可持续发展，必须加快电网、天然气管网与生物质能源供应链的建设，只有在完善的基础设施支持下，新技术才能真正落地并发挥作用。

### 4.3 农户接受度与使用习惯

农户的接受度在清洁取暖的推广过程中起着决定性作用。由于长期依赖散煤取暖，部分农户对新型替代技术

缺乏了解，甚至心存不信任。当运行费用高于心理预期、设备操作复杂或燃料供应不够稳定时，他们往往倾向于回归传统的散煤方式，以寻求熟悉且低成本的解决方案。要提升农户对清洁取暖的接受度，就需要在宣传与教育环节下功夫。通过多渠道传播清洁取暖的优势，让农户认识到其在改善居住环境、保护身体健康以及降低污染方面的积极作用。与此同时，技能培训也至关重要，帮助农户熟练掌握新设备的操作方法，增强使用信心。随着认知的提升和经验的积累，农户会逐步养成新的取暖习惯，从被动尝试转向主动使用。只有当农户真正认可并愿意坚持使用，清洁取暖的推广才能实现可持续发展目标。

## 5 优化路径与发展建议

### 5.1 多元化技术结合

北方农村地区受自然条件、经济基础和资源禀赋等因素影响，差异性十分明显，单一取暖技术往往难以满足所有农户的需求。因此，清洁取暖的推广需要因地制宜，推动多元化技术结合。在电网条件较为完善的地区，可以优先推广电取暖方式，利用清洁电力实现稳定供暖。在人口较为密集的村镇，引入集中供暖模式，通过天然气管网建设与集中锅炉运行，提升能源利用效率，减轻个体设备投入负担。在农业资源丰富的地区，则应积极发展生物质能源利用体系，将秸秆、林木废料等资源转化为清洁能源，实现废物利用与供暖需求的有机结合。通过不同方式的合理分工与优势互补，能够形成灵活高效的取暖格局，实现清洁取暖在农村地区的全面覆盖。这种多元化路径不仅契合区域实际条件，也有助于推动农村能源转型和生态环境改善。

### 5.2 完善配套政策与补贴机制

清洁取暖的普及与可持续发展，离不开政策的有力支持。政府在这一过程中应建立长期而稳定的补贴机制，使农户在使用新型取暖方式时能够持续享受到经济上的扶持，从而减轻投入压力，增强推广效果。与此同时，还需要加大对基础设施建设的投资力度，提升电网和天然气管网在农村地区的覆盖率，使清洁取暖具备更广泛的实施条件。生物质燃料的开发与供应链的完善也是重要环节，只有保障燃料的稳定供给，才能让农户放心使用并形成依赖。通过财政支持与制度保障的结合，能够有效打破清洁取暖在推广中的瓶颈，建立起可持续的运行模式。政策引导不仅推动了能源结构的优化，还改善了农村生活环境，为绿色低碳发展提供坚实基础。在这样的长效机制下，清洁取暖将真正成为改善民生与生态环境的双重动力。

### 5.3 提升农户参与度与认知水平

清洁取暖的可持续发展离不开农户的积极参与。推广过程中需要充分倾听农户的意见与需求,使其在决策环节中拥有话语权,从而增强对新技术的理解与认可。只有让农户真正认识到清洁取暖在改善生活质量、降低环境污染和节约能源方面的价值,才能激发他们主动采用的意愿。通过培训活动和示范工程,农户能够直观了解新设备的使用方法与效果,逐步掌握清洁取暖技术的操作要点,减少因陌生感带来的抵触心理。技术的可操作性与实际体验将显著增强他们的使用信心。随着经验的积累与观念的转变,农户将不再是被动接受者,而是清洁取暖的主动实践者和推广者。

## 6 结论

北方农村散煤取暖的替代是实现清洁能源转型和改善环境质量的必然趋势。通过对电取暖、天然气供暖、生物质利用等技术的分析可知,这些替代方式在提升室内温度稳定性、改善舒适度和降低污染方面均表现出显著优势。

但在实际应用中,经济成本高、基础设施不足和农户接受度不高成为主要制约因素。研究认为,应推动多元技术结合,完善政策与补贴机制,加强宣传与培训,逐步形成清洁取暖的长效机制。未来,应进一步探索智能控制与可再生能源结合的新路径,推动北方农村取暖向低碳化、绿色化方向发展,为实现“双碳”目标和改善农村居民生活质量提供有力保障。

### [参考文献]

- [1]王志强.北方农村清洁取暖技术应用与推广路径研究[J].农村能源,2021(6):15-22.
- [2]李春雷.北方农村散煤替代的现状、问题与对策[J].中国农村经济,2022(4):48-56.
- [3]张明辉.清洁取暖政策背景下的农村取暖模式优化研究[J].能源研究与管理,2023(2):33-41.

作者简介: 李洪昊 (2000.6—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北建筑工程学院, 现工作单位: 九易庄宸科技(集团)股份有限公司。

## 煤矿开采技术与掘进支护技术的探析

刘汉磊

江苏能源股份有限公司，江苏 徐州 221616

**[摘要]**此文全面且细致地对井工煤矿生产环节里的开采技术以及掘进支护技术展开探析。文章先是梳理了井工开采技术的不同分类、具体方法以及选择时所依据的相关因素，接着阐述了巷道掘进技术的具体工艺流程、借助机械化来实现的方式、针对灾害的防控举措以及呈现出的高效化发展趋向。而后还对支护技术的原理以及不同形式进行了辨析，将传统支护技术和现代支护技术之间的差异做了对比，并且归纳出了支护方案在设计时所遵循的逻辑思路。着重探讨了开采技术和掘进支护技术之间那种相互制约又相互促进的协同关联，从技术匹配情况、系统集成状况、智能化程度以及面临的未来挑战等诸多方面，论证了达成煤矿安全、高效且绿色开采目标的综合技术途径。

**[关键词]**煤矿开采；巷道掘进；支护技术；协同优化；安全保障

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18360 中图分类号: TD353 文献标识码: A

## Exploration on Coal Mining Technology and Excavation Support Technology

LIU Hanlei

Jiangsu Energy Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221616, China

**Abstract:** This article comprehensively and meticulously explores the mining technology and excavation support technology in the production process of underground coal mines. The article first sorted out the different classifications, specific methods, and relevant factors used in the selection of underground mining technology, and then elaborated on the specific process flow of tunnel excavation technology, the ways to achieve it through mechanization, disaster prevention and control measures, and the high-efficiency development trend it presents. Then, the principles and different forms of support technology were analyzed, and the differences between traditional and modern support technologies were compared. The logical thinking followed in the design of support schemes was summarized. This paper focuses on exploring the synergistic relationship between mining technology and excavation support technology, which constrains and promotes each other. From various aspects such as technology matching, system integration, intelligence level, and future challenges, it demonstrates the comprehensive technical approach to achieving the goals of safe, efficient, and green mining in coal mines.

**Keywords:** coal mining; tunnel excavation; support technology; collaborative optimization; safety guarantee

煤矿开采与掘进支护技术的高精尖化发展，对煤矿开采安全、效率、矿区环境保护等均有深远影响。近年来，我国在煤矿开采方面虽取得了一定成果，但仍然有很多问题亟待解决。因此，当前进行煤矿开采技术分析和掘进支护技术的研究，并明确发展方向，对提高煤矿开采安全性、提升煤矿开采效率、减轻煤矿开采带来的环境污染以及促进我国煤矿开采工作发展具有现实意义。

### 1 井工煤矿开采技术概述

#### 1.1 开采技术分类与特点

井工开采技术依照煤层的具体条件、所采用的工艺以及使用的设备能够从多个不同维度来进行划分。就采场围

岩管理这一方面而言，主要存在着垮落法、充填法还有煤柱支撑法等等不同的类别。其核心的区别就在于对于采空区顶板的处理方式以及由此所引发的覆岩移动和地表沉陷等问题的处理方法上。垮落法这种开采方式，它的工艺相对来说比较简单，而且成本也比较低，所以在实际的应用当中是比较广泛的。充填法是通过使用特定的材料进行回填的方式来对围岩的移动加以控制，这种方法属于绿色开采的范畴，不过它的成本以及操作的复杂性相较于其他方法都有所增加。在选择具体的开采技术类别时，这与矿山的长远规划以及整体的综合效益是有着十分密切的关系的。

## 1.2 常见井工开采方法

长壁开采以及房柱式开采算得上是两种颇为典型的开采方法。就长壁开采而言，其工作面的长度往往颇为可观，连续推进的特性也比较明显，机械化程度更是处在较高的水平，单产方面所呈现出的能力也极为突出，已然成为我国大中型煤矿实现高产高效生产的主要技术模式之一。而房柱式开采则是凭借在煤层当中开掘出具有一定规则的煤房，并且对煤柱加以回收以此来获取资源，这种方法在巷道布置方面表现出了相当的灵活性，特别适合于那些煤层本身不够稳定、地质情况较为复杂或者需要对地表予以保护的区域，不过其资源回采率相对来说是比较低的，而且煤柱的稳定性也存在着一定的隐患。

## 1.3 开采技术选择的影响因素

开采技术的选择实则是一个复杂的决策流程，在这个过程中需要对多个目标加以权衡考量。它会受到诸多方面的影响，像自然条件、技术经济状况以及社会环境等等。其中，煤层所处的地质赋存条件是最基本的约束要素，这里面包含了煤层的厚度、倾角、埋藏的深度、顶底板的岩性特点、地质构造情况以及自然灾害可能带来的威胁程度等方面。从技术经济的角度来讲，涉及的因素有装备所达到的水平、投资方面的实力、生产所能实现的效率以及产生的成本、资源能够回收的比率等等。而在社会环境这其体现出来的因素在于安全生产所要遵循的标准、环保方面的相关法规以及对于矿工健康给予保障的责任等方面。

# 2 井工煤矿巷道掘进技术

## 2.1 掘进工艺与流程

巷道掘进属于工序衔接极为紧密的系统性工程，其标准流程是从测量定位以及断面设计开始的，之后会依次开展钻眼爆破或者借助机械截割来破岩，接着进行装载转运操作，再实施支护工作，最终完成巷道成形以及功能化方面的作业任务。各道工序的质量以及效率会对整体的进度与安全产生影响，其中破岩与支护之间的协同配合往往成为提升单进水平的关键所在。而如何优化劳动组织、实现工序在时空上的平行作业、减少不必要的间歇时间，这便成了提高循环效率方面的重要管理研究课题。

## 2.2 机械化掘进技术

机械化掘进技术已经历了从普通的钻爆法转变成综合机械化的重大变革，悬臂式掘进机以及全断面掘进机这类综合机械化装备，当属当前较为高级的形式，它们将截割、装载、转运以及行走等多种功能集成起来，能够达成煤岩的连续破碎以及出渣操作，如此一来便能提高掘进的速度，并且对安全环境也有所改善，不过这类设备对于地

质条件是有一定要求的，在碰到极硬岩石、断层破碎带或者涌水量较大的情况时，其效能就会受到限制，而且成本也会比较高，所以需要依据不同的实际情形来选择与之相匹配的方案，同时还要着力去研发那种适应性更强的智能装备。

## 2.3 挖进中的灾害防控技术

巷道掘进过程中始终伴随着与地质灾害的激烈斗争，要想保障掘进作业的安全，那么有效的超前探测以及实时的防控措施便是必不可少的前提条件。就瓦斯灾害而言，必须严格遵循“先抽后掘”“监测监控”“以风定产”这样的原则，借助千米钻机等相关设备来开展瓦斯预抽工作，并且要配备完善的监测报警系统。而在水害防治方面，最为关键之处就在于要彻底查清楚水文地质的具体条件，始终秉持着“预测预报”“有疑必探”“先探后掘”“先治后采”这样的方针，通过运用电法、钻探等多种手段来实现超前探测以及后续的疏放操作。顶板事故的防控则要依靠对围岩状况的准确判断、对地应力情况的科学评估以及及时有效的支护措施。像煤尘、火灾以及地温热害等问题也同样需要与之相适应的防治技术来加以应对。

## 2.4 高效掘进技术的发展趋势

随着开采深度不断增加，地质条件也变得愈发复杂，在这样的大背景之下，巷道掘进技术正在朝着高效化、智能化以及少人化的方向不断迈进。其发展趋势主要体现在装备方面，智能感知以及自主决策的能力得到了进一步提升，就好比那些拥有地层自适应截割功能、位姿导航功能以及故障自诊断功能的智能掘进机器人系统。就工艺而言，其趋向于和支护进行深度融合，比如掘锚一体化能够实现平行作业，进而缩短循环时间。而远程监控以及集中操作则让工作面逐步达成“有人巡视、无人操作”的状态。高效掘进的发展情况是生产模式朝着本质安全以及精益管理转型当中的一个极为重要的组成部分。

# 3 井工煤矿巷道支护技术

## 3.1 支护原理与支护形式分类

巷道支护的主要目的就是要维持在开挖之后围岩的稳定状态，进而为相关作业提供一个安全的地下空间环境。其作用原理主要是依托于对围岩强度特性方面的利用以及对变形能量加以控制，是通过诸如“支”“挡”“悬”“固”等一系列力学机制来达成这一目标的。依据支护结构和围岩之间的关系来看，可以将其划分为被动支护以及主动支护这两种类型。像架棚、砌碹这类方式就属于被动支护，它是依靠结构自身的强度来承受围岩所施加的压力的，而像锚杆锚索、喷射混凝土这样的方式则属于主动支护，

它是通过施加预应力的方式来对围岩的应力状态进行改善,以此激发围岩自身的承重能力,最终形成一个能够共同承载的体系。

### 3.2 传统支护技术

架棚支护以及砌碹支护在过往曾发挥出十分重要的作用。架棚支护有着架设速度较为快捷这一特点,并且其初期的承载能力也比较快,在那种压力相对较大、变形情况颇为剧烈的巷道当中,或者作为临时支护手段来使用的时候,依旧有着一定的价值。砌碹支护是采用混凝土或者料石来构筑成连续拱形的结构,它的稳定性表现良好,服务的年限也相对较长,而且其防火以及防水的性能也都较为出色,通常会被应用于主要硐室等这类永久性的工程之中。不过传统技术是存在着诸如材料消耗量偏大、施工进度较为缓慢、劳动强度颇高等一系列局限性的,在深部高应力的巷道当中,其支护所取得的效果以及成本效益方面都面临着不小的挑战。

### 3.3 现代支护技术

以锚杆锚索支护当作核心,再加上喷射混凝土、金属网等等所构成的现代主动支护体系,已然成为当下煤矿巷道支护方面占据主导地位的技术。锚杆支护是把杆体固定于围岩深处较为稳固的岩层之上,以此来给浅部破碎的围岩施加预应力,进而形成具有较高承载能力的“组合梁”或者“挤压加固拱”。当其与喷射混凝土相结合时,便能够及时地将围岩封闭起来,避免风化情况的发生,并且可以一同发生变形,同时保持住承载能力。随着高预应力以及高强度锚杆锚索技术的广泛推广,对于复杂巷道围岩变形所进行的主动控制能力也获得了革命性的提升。注浆加固技术作为一种重要的补强手段,能够对破碎岩体的力学参数起到改善的作用,而且常常会和锚喷支护联合在一起使用。

### 3.4 支护方案设计原则与评价

科学且合理的支护方案设计,得遵循安全性、经济性、技术可行性还有和掘进工艺相互协调性这几项原则。其中,安全性得确保巷道在整个服务期间都保持稳定状态,避免出现冒顶片帮这类事故;经济性方面,则要在保障安全的前提下对成本加以优化;技术可行性要能契合当地的装备状况以及施工水平;而协调性则要求达成快速支护的目标,不能对掘进效率产生影响。支护方案的评价其实是一个涉及多个指标的综合性过程,这里面包含了像巷道位移收敛量、支护体受力等力学方面的观测指标,同时也涵盖了成本、施工速度等技术经济方面的指标,而且还需要长期去跟踪其耐久性情况。支护设计当下正从单纯依靠经验

类比的方法朝着以数值模拟以及现场监测作为基础的信息化动态设计方法转变。

## 4 开采技术与掘进支护技术的协同发展

### 4.1 技术匹配与系统优化

煤矿生产系统属于一个有机的整体,在这个系统当中,开采、掘进以及支护等各个子系统务必要达成高度的匹配,并且要进行协同优化的操作,只有这样才能够把它们的最大效能给释放出来。开采方式会对巷道布置的基本格局起到决定性的作用,比如说采用长壁综采的方式,那么这就要求顺槽巷道要保持平直的状态,其断面也要规整,而且支护必须要可靠才行<sup>[3]</sup>。而房柱式开采则会衍生出复杂的巷道网络,对于交叉点的支护要求也会更高一些。在选择掘进技术的时候,必须要以能够满足开采对于巷道规格、进度以及质量等方面的需求作为前提条件来考虑。支护技术同样需要和掘进工艺、巷道的服务年限以及采动影响的强度相互适配。

### 4.2 智能化开采与支护一体化

煤矿智能化建设为开采与掘支技术的深度融合开拓了新的途径。智能开采工作面需要配套的巷道系统拥有状态自感知、故障自诊断以及参数自调整的能力,这推动着掘支装备朝着智能化的方向不断升级。智能掘进系统能够依据地质探测所获取的数据来自动对截割参数做出调整,并且会把巷道成型的相关数据传送给智能支护系统。智能支护系统可以凭借围岩变形以及压力方面的数据动态地去调整锚杆锚索支护的各项参数,进而达成自适应支护的效果。各个环节的数据会在统一的数字孪生平台上汇聚起来并进行分析决策,以此形成闭环控制,向着工作面智能开采与巷道智能快速掘支一体化协调推进的美好愿景逐步前行。

### 4.3 安全高效开采的技术路径

实现安全且高效的开采,其根本的途径在于推进技术创新以及系统集成工作,要把安全理念贯穿到每一个技术环节当中<sup>[4]</sup>。这就需要不断地去研发能够适应深部复杂状况的、具备高可靠性的开采装备和相关工艺,要着力发展那种快速、精准并且智能的巷道掘支技术,还要构建起能够覆盖整个矿井的灾害监测预警以及协同防控体系。与此务必要十分重视技术层面、管理层面以及人员素质方面的同步提升,借助精细化的管理方式以及高素质队伍的建设来保证先进技术得以正确且有效地加以应用。

## 5 结束语

通过对井工煤矿在开采方面的技术、掘进所涉及的技

术以及支护相关的技术展开分项的梳理工作，并且对它们相互间的关系加以关联分析之后可以发现，这三者共同组成了煤矿地下生产当中不可或缺的一条技术链条。其中，开采技术在这一链条里充当着明确目标以及指引方向的角色，掘进技术则是负责开拓作业以及做好相关准备工作，而支护技术的作用在于确保稳固并给予安全保障。任何一个环节要是出现技术方面存在短板的情况，或者各个环节之间的协同配合出现失灵状况，那么都有可能对整个系统的安全状况以及运行效率产生影响。就目前而言，煤矿技术正好处于朝着智能化方向进行转型的关键阶段，这样的情况无疑给技术的深度融合以及一体化创新带来了在历史上都不多见的机遇。应当始终把保障矿工的生命安全以及身体健康当作是最高的伦理准则来坚持，把提高资源的回收比率以及开采的工作效率作为核心的经济目标去追求，同时也要把尽可能地减轻对环境所产生的影响视为一

项十分重要的社会责任，不断地去推动技术在协同方面取得进步以及实现系统的优化。

#### [参考文献]

- [1]胡文宣,张斌.关于煤矿开采技术与掘进支护技术探讨[J].冶金管理,2024(7):107-109.
- [2]张永,鹿艳东.复杂地质条件下煤矿开采掘进支护技术探析[J].内蒙古煤炭经济,2024(14):70-72.
- [3]马洪波.关于煤矿开采技术与掘进支护技术的探究[J].西部探矿工程,2025,37(1):91-93.
- [4]喻明.煤矿开采工程巷道掘进和支护技术分析[J].内蒙古煤炭经济,2025(9):25-27.

作者简介：刘汉磊（1987.11—），男，毕业院校：中国矿业大学，学历：本科，所学专业：地质工程，当前就职单位：江苏能源股份有限公司张双楼，职务：副科长，年限：5年，职称级别：助理工程师。

## 煤矿防治冲击地压中复合爆破卸压技术的应用分析

谢自通

江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿，江苏 徐州 221616

**[摘要]**冲击地压是煤矿开采里常见的一种动力灾害，其防治工作和矿山安全生产、资源高效回收有着直接联系。复合爆破卸压技术把多种爆破方法和工艺参数整合起来，达成了对冲击地压危险区域主动卸压以及能量释放的目的，让灾害发生的概率得以有效降低。此文全面梳理了冲击地压的形成原理与分类办法，深入阐释了复合爆破卸压技术的力学根基和技术内涵，还构建起一套完整的由爆破参数设计、装药结构优化以及时序控制构成的技术体系。

**[关键词]**冲击地压；复合爆破；卸压技术；煤矿安全；爆破参数

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18357 中图分类号: TD324 文献标识码: A

## Application Analysis of Composite Blasting Pressure Relief Technology in Preventing and Controlling Rockburst in Coal Mines

XIE Zitong

Zhangshuanglou Coal Mine of Jiangsu Xukuang Energy Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221616, China

**Abstract:** Rockburst is a common dynamic disaster in coal mining, and its prevention and control work is directly related to mine safety production and efficient resource recovery. The composite blasting pressure relief technology integrates multiple blasting methods and process parameters, achieving the goal of active pressure relief and energy release in areas prone to rockburst hazards, effectively reducing the probability of disasters occurring. This article comprehensively summarizes the formation principles and classification methods of rockburst, deeply explains the mechanical foundation and technical connotation of composite blasting pressure relief technology, and constructs a complete technical system consisting of blasting parameter design, charge structure optimization, and timing control.

**Keywords:** impact ground pressure; composite blasting; pressure relief technology; coal mine safety; blasting parameters

冲击地压灾害破坏性强，危害性巨大。我国煤矿冲击地压灾害 85%发生在回采巷道，主要原因是巷道近场高应力区煤岩体所受叠加应力超过其强度极限发生破坏，积聚的弹性应变能瞬间释放导致巷道剧烈破坏。而爆破卸压措施作为一种行之有效的解危技术在治理矿井冲击地压中得到了广泛应用。但从国内多数矿井使用情况看，受不同地质条件、参数设计、现场装药及封孔技术影响，效果千差万别，或解危效果不理想、应力不能得到充分释放，或爆破后局部形成新的高应力集中，或孔口形成喇叭口等情况。因此，研究合理的爆破卸压技术为冲击地压矿井安全生产提供技术保障是很有必要的。

### 1 冲击地压的形成机理与危害

#### 1.1 冲击地压的定义与分类

冲击地压是煤矿井下围岩在应力作用下突然释放弹性应变能而出现的一种剧烈破坏情况，常伴有巨响、震动

以及岩体抛射等特征。依据能量来源和表现形式的不同，冲击地压可划分成重力型、构造型以及复合型这三大类别。其中，重力型主要由上覆岩层自重应力集中所引发，构造型受到地质断层与褶皱的控制，复合型兼具二者特点并且其破坏力更为强大<sup>[1]</sup>。这样的分类方式对于识别灾害成因以及制定有针对性的防治策略是有帮助的。

#### 1.2 冲击地压的主要成因及危害

冲击地压的产生是由多种因素相互作用而形成的，其中地质构造比较复杂、开采过程中扰动程度强烈、围岩物理力学性质出现突变以及应力场失去平衡等因素较为重要。具体来讲，煤矿处于深部且存在高地应力环境，同时还有软弱夹层存在，这种情况下容易造成能量不断积聚并且在某一时刻突然释放出来，而且采掘活动会破坏原有的应力平衡状态，从而进一步引发冲击风险。从危害层面来讲，冲击地压会导致巷道支护无法发挥作用并且使设备受

到损坏,还可能引发瓦斯突出以及透水等一系列次生灾害,这给矿工的生命安全以及生产的连续性都带来了严重威胁。从长远角度来看,频繁发生的冲击事件会使得矿井的服务年限变短,并且还会增加治理的成本,这对煤炭行业的可持续发展起到了制约作用。所以,要充分理解和掌握冲击地压产生的原因以及它所带来的危害,这是开发出有效防治技术的基础条件,同时也为复合爆破卸压的应用打下了理论方面的基础。

## 2 复合爆破卸压技术的基本原理

### 2.1 爆破卸压的力学机制

爆破卸压的力学机制关键之处在于借助炸药爆炸时所产生的高压冲击波以及气体膨胀的作用,人为地去营造围岩裂隙网络,进而改变原本的应力分布状况并且释放积聚起来的能量。此一过程涵盖了应力波传播、岩体破碎还有能量耗散等诸多物理环节,在这个过程当中,应力波会在岩体当中形成压缩区域以及拉伸区域,推动微裂纹不断扩展并且相互连通,最后达成卸压的目的。复合爆破卸压技术是在这样的基础上,着重指出多种爆破方式所具有的协同效应,比如说将钻孔爆破和表面爆破相结合的方式,能够同时对深部岩层以及浅部岩层起到作用,以此来提升卸压的均匀程度。只有凭借对爆破能量以及作用范围加以精细的把控,才能够实现既能够降低应力集中情况又可以防止过度破坏这样的一种理想效果,而这需要全面且细致地考量岩性条件以及应力状态这些因素。

### 2.2 复合爆破的技术内涵

复合爆破的技术内涵在于将钻孔爆破、预裂爆破以及松动爆破等多种方法整合起来,进而构建起一个时空耦合的卸压体系。该体系并非仅仅着眼于单一爆破参数的优化,而是把重点放在不同爆破阶段相互之间的衔接以及互补方面,就好比先运用预裂爆破来创造出导向裂隙,随后借助钻孔爆破去拓展卸压的范围。其技术内涵另外还包含了装药结构方面的创新以及起爆时序的设计,目的就在于尽可能提高能量利用的效率,并且尽力降低有害效应。和传统爆破不一样的是,复合爆破着重于动态的调整以及适应性,它能够依据现场监测到的数据实时地修正相关方案,以此来满足在复杂地质条件下针对冲击地压防治的需求。

### 2.3 复合爆破与传统爆破的对比

传统爆破卸压技术往往依靠单一的爆破模式以及固定的参数,其卸压效果受到作用深度以及均匀性的限制,并且容易引发围岩出现二次应力集中的情况。与之相比,复合爆破借助多种方法组合的方式,达成了卸压过程的层次化以及可控化,比如在存在高压应力的区域运用高能爆

破,而在较为敏感的区域则改为使用低能爆破,以此来平衡卸压和安全二者之间的关系。复合爆破在能量分配以及传播控制方面同样具备优势,可以降低爆破震动给周边结构带来的损伤,进而提升整体施工的安全性。所以,复合爆破卸压技术彰显了爆破防治领域的发展趋向,它的应用能够大幅度提高煤矿冲击地压防治的可靠性以及经济性。

## 3 复合爆破卸压技术体系

### 3.1 技术构成与工艺流程

复合爆破卸压技术体系涵盖多个环节,像探测评估、参数设计、施工实施以及效果监测等,这些环节共同组成了一个闭环管理流程。其工艺流程是从地质力学探测和应力场分析开始的,在此基础上去确定卸压目标区域以及爆破方式的选择事宜,接着要开展爆破参数的计算工作,并且安排好装药结构的布置情况,最终借助起爆网络来达成时序控制的目的。此流程着重于各个环节的连贯性以及反馈调整,比如依据前期爆破所取得的效果来对后续参数加以优化,从而保证卸压效果能够不断得到改进。在技术构成方面,还包含了安全防护方面的措施以及应急方案,目的是用来应对施工过程中可能出现的突发风险,以此来保障作业人员以及设备的安全。

### 3.2 爆破参数设计

爆破参数的设计属于该技术体系当中极为关键的核心内容,这里面牵涉到诸多要素,像是炸药量、钻孔间距、装药密度以及爆破时序等等,都需要去确定其具体数值。而这些参数的确立并不是凭空想象出来的,而是要依据岩体的实际强度状况、所处的应力水平情况以及最终想要达成的卸压目标来展开综合性的计算。就好比说,在那些存在着高应力集中现象的区域当中,就需要相应地增加炸药的投放量,以此来促使裂隙能够进一步得以拓展;反观在破碎不堪的岩层环境里,则应当适当地把钻孔之间的间距缩小一些,从而防止出现能量白白流失掉的情况。除此之外,参数设计的时候还会充分考虑到经济效益方面的因素以及环保方面的要求,努力要在尽可能小的爆破规模之下达成最大的卸压成效,进而有效减少材料的消耗量以及对环境可能产生的不良影响。借助于数值模拟的方式和现场实际试验相结合起来的操作手段,爆破参数便能够不断地得到优化改进,进而为复合爆破卸压这一整个过程提供具备科学依据支撑的相关内容。

### 3.3 装药结构与方法

装药结构以及装药方法这两者会对爆破能量的传递情况以及岩体的破坏模式产生直接的影响,在复合爆破的操作当中,通常会采用像分段装药、空气间隔装药还有耦

合装药等诸多不同的形式。分段装药具体是通过在不同的钻孔段位去放置炸药,以此来达成能量能够分层释放的效果,进而让卸压的均匀性得以增强;空气间隔装药则是借助空气层起到对冲击波的缓冲作用,从而使得围岩不至于出现过度破碎的情况;耦合装药能够提升能量传递的效率,特别适用于那种质地比较坚硬的岩层<sup>[2]</sup>。装药方法除了上述提到的这些之外,还存在着手工装药和机械化装药这两种不同的选择方式,要依据实际的施工条件以及对于精度的要求来进行灵活的应用,从而保证装药的质量以及整个操作过程的安全性。

### 3.4 起爆网络与时序控制

起爆网络以时序控制在很大程度上决定了爆破过程中协同性以及效果稳定性的实际情况,在复合爆破相关操作当中,一般会采用电子雷管和导爆索相互组合的方式,以此达成多点点燃爆破以及延迟起爆的目的。时序控制借助微差爆破技术来实现,可让各个爆破点按照预先设定好的顺序依次发挥作用,进而产生应力叠加以及裂隙扩展方面的效应,就好比先去起爆浅孔,随后再起爆深孔,借此引导能量朝着目标区域进行传播。起爆网络在设计的时候,还得充分考量其抗干扰能力以及可靠性,防止出现哑炮或者早爆这类事故,而这需要依靠严格的测试以及冗余配置才能够予以保障。只有做到良好的时序控制,才能够将卸压效果发挥到最大,与此还能够在一定程度上降低爆破所引发的震动以及噪声所带来的危害。

## 4 复合爆破卸压的实施与效果评价

### 4.1 实施前的探测与评估

实施复合爆破卸压技术之前所开展的探测以及评估工作,这无疑构成了整个技术流程的初始阶段,同时也是后续决策的重要依据。其要求全面且综合地运用各类地球物理方面的多种方法,再加上工程地质相关的诸多手段,以此针对目标区域展开全方位的诊断活动。这一过程并非仅仅停留在传统意义上的地质雷达扫描操作,也不仅仅是依靠钻孔应力计来开展测量工作,而是应当把微震监测所获取的历史数据加以深入细致的分析,同时还要将三维地应力场的相关情况通过反演模拟的方式呈现出来,进而达成对冲击地压存在危险的区域在空间层面予以精准定位的目标,同时也能够对这些区域的风险等级做出较为精确的划分。而评估工作必须要建立在对矿井地质构造的具体特征有着清晰认识的基础之上,要充分了解该矿井的开采历史,并且清楚当前采掘布局的实际情况,如此才能够对不同爆破方案可能引发的围岩响应状况以及应力转移的

具体路径做出相应的预测。唯有经过这样细致周全的探测以及严谨缜密的评估之后,才能够为后续的爆破参数设计给予可靠的数据输入,防止因为信息有所缺失或者判断出现偏差等情况,致使卸压效果不尽如人意,甚至引发次生灾害的发生,从整个技术应用的链条来看,这一点的重要性是不言而喻的。

### 4.2 现场施工与安全控制

施工现场乃是把设计方案切实转变为实际效果的重要环节所在,其中涉及到钻孔的精准定位、装药工艺的具体执行以及起爆网络的连接等一系列颇为细致的操作流程,而且对于作业环境在安全方面的管控也提出了相当高的要求<sup>[3]</sup>。施工团队务必要依照事先预先设计好的钻孔布置图来开展施工活动,要保证孔深、孔距还有角度等诸多参数均能够契合相关规定的要求,一旦出现任何偏差的情况,都有可能对爆破能量的传播以及叠加效果产生影响,之后才能够进入到后续的装药工作环节当中。在装药的过程里,得格外留心炸药的耦合状态以及密封的质量状况,借助机械化装药设备可提升工作效率以及一致性程度,然而在那些较为复杂的孔段位置,依旧还是得依靠有着丰富经验的人员凭借其精细的操作来完成任务。安全控制这一方面是贯穿于从施工准备阶段一直到爆后检查的整个过程当中的,囊括了要设置完备无缺的警戒区域、要确保所有的人员都能够撤离到安全的地点、要实时对作业面的瓦斯浓度以及通风状况加以监测,并且还要制定出针对哑炮处理、突发冒顶这类意外情况的应急预案。现场的指挥者必须要具备足够的权威以及较强的应变能力,能够依据实时反馈回来的围岩声发射信号或者钻屑量的变化情况,果敢地对装药量或者起爆时序做出细微的调整,这样的一种动态调整的能力恰恰是保障施工安全以及效果得以实现的重要体现形式。

### 4.3 卸压效果监测方法

卸压效果的监测方法,就好比是检验爆破行动能否达成预期目标的一把标尺。它要依靠一套具备多参数特点且呈立体化态势的监测网络,以此来精准捕捉爆破发生前后的围岩状态所产生的那些细微乃至宏观方面的各类变化。其中,应力监测具体是通过在卸压区域以及其周边的稳定岩层当中安装光纤光栅传感器或者液压式应力计的方式来进行。如此一来,便能够连续不断地将垂直方向以及水平方向应力分量的衰减过程以及重分布特征都记录下来,进而可直接对卸压的强度以及范围予以量化处理。而微震监测系统就好比是专门用来监听岩体破裂情况的一双灵

敏的耳朵,它具备定位以及记录的能力,可以将爆破所诱发的以及因应力调整而产生的新生微破裂事件都准确地记录下来<sup>[4]</sup>。通过对这些事件的能量、频次以及空间从集特征展开细致分析,便能够间接地勾勒出裂隙网络具体的发育状况以及贯通情形。至于表面位移与深部位移的测量,则是借助多点位移计以及钻孔电视观测这两种手段来实施的。

#### 4.4 效果评价指标体系

效果评价指标体系涵盖安全性指标、经济性指标以及技术性指标这三个方面,能够对复合爆破卸压的综合效能予以较为全面的衡量。其中,安全性指标包含事故率有所降低以及灾害发生频率得以减少等情况;经济性指标涉及到成本方面有所节约以及生产效率得到提升等方面;技术性指标着重关注卸压所达到的深度以及应力降低的具体幅度等相关参数。通过对这些多指标展开加权分析的操作,便可以对技术应用所处的成熟程度以及具备的推广价值做出相应判断,就好比在多个不同的矿井之间进行比较的时候,去评估其适应性存在的差异情况。这一整套指标体系对于实现效果评价的标准化有着一定帮助作用,也有助于推动复合爆破卸压技术朝着规范化方向不断发展。

#### 5 结束语

复合爆破卸压技术在煤矿防治冲击地压方面成效不

错,经集成创新和动态调整后,其应用潜力和优势愈发明显。本文全面阐述了该技术的理论依据与实践框架,着重指出从机理理解到实施评价的全过程管理的重要性。后续研究需更加关注智能化爆破控制以及绿色卸压材料开发,以此来应对更为复杂的开采条件所提出的挑战。复合爆破卸压技术的应用能给煤矿安全生产带来新的助力,推动矿山行业实现可持续发展,而这离不开学术界与工程界的持续合作与深入探索。

#### [参考文献]

- [1]王永涛,谢中辉,余江,等.沿空巷道围岩变形破坏特征及控制技术研究[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):161-171.
- [2]孙刘伟.煤巷爆破卸压-支护加固协同防冲技术研究[D].北京:煤炭科学研究院,2020.
- [3]孙洪金.深井巷道变形破坏特征及爆破卸压-支护协同控制技术研究[D].安徽:安徽建筑大学,2025.
- [4]申斌学,周宏范,朱磊,等.深井复合顶板切顶卸压柔模墙支护沿空留巷技术[J].工矿自动化,2021,47(11):101-106.

作者简介: 谢自通 (1997.12—), 男, 毕业院校: 河南理工大学, 学历: 本科, 专业: 采矿工程, 就职单位: 江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿, 职务: 防冲管理科技术主管, 任职年限: 4 年, 职称级别: 助理工程师。

## 矿业项目设备物资全过程管理模式研究

亓朝阳

水电九局, 贵州 贵阳 550000

**[摘要]**矿业项目设备物资管理有着复杂的特性以及系统的属性,这在很大程度上对矿山企业的成本以及效率产生着极为重要的影响。此项研究着重于构建起一套能够契合现代矿业实际需求的设备物资全过程管理模式,具体做法是深入分析设备物资从需求计划一直到报废回收这一整个生命周期当中那些极为关键的各个环节,同时仔细剖析当下管理在协同、信息以及资源等层面所存在的各类问题,进而提出以流程优化、组织再造还有信息化集成作为核心要素的构建框架。

**[关键词]**矿业工程;设备物资管理;全过程管理

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18354

中图分类号: F532

文献标识码: A

## Research on the Whole Process Management Mode of Mining Project Equipment and Materials

QI Zhaoyang

Hydropower Bureau 9, Guiyang, Guizhou, 550000, China

**Abstract:** The management of equipment and materials in mining projects has complex characteristics and systematic attributes, which greatly affect the cost and efficiency of mining enterprises. This study focuses on building a comprehensive management model for equipment and materials that can meet the practical needs of modern mining. The specific approach is to deeply analyze the critical links in the entire lifecycle of equipment and materials, from demand planning to scrap recycling. At the same time, it carefully analyzes the various problems in collaboration, information, and resources in current management, and proposes a construction framework with process optimization, organizational restructuring, and information integration as core elements.

**Keywords:** mining engineering; equipment and material management; whole process management

设备作为人们在生产与生活上所需的机械、装置,可供其长期使用,而矿业设备主要分为探矿设备、采矿设备及选矿设备这3类。为了延长设备寿命,提高矿业生产效率,就必须加强对矿业设备的管理。所以,把管理视角从孤立的某个环节拓展至可涵盖设备物资完整生命周期的范畴,达成技术、资金、信息以及责任方面的系统整合与闭环优化,已然成为矿业项目管理迈向现代化进程里一个颇为重要的研究课题。

### 1 矿业项目设备物资管理概述

#### 1.1 设备物资管理的内涵与特点

矿业项目设备物资管理贯穿矿山整个过程,涉及对机械设备、备品备件以及各类材料展开的计划、组织、协调与控制等一系列活动,其关键目的在于保证在恰当的时间、地点以合理的成本获取合适质量与数量的物资,确保其安全可靠、经济高效地运行,从而服务于项目整体目标。和一般工业企业不同,矿业设备物资管理有明显特点:管理对象专用性强且价值高,像大型电铲、矿用卡车等核心装

备往往是为特定条件定制的;管理环境复杂且存在诸多不确定性,井下恶劣条件给设备可靠性带来严峻考验;供应链条长且协同难度大,高端设备依靠全球采购;而且管理活动有很高的安全敏感性,直接关系到矿山安全生产与人员生命安全。

#### 1.2 全过程管理的理论基础

全过程管理理论有着深厚的根基,其主要植根于系统工程、供应链管理以及全生命周期成本管理这几个方面。系统工程在看待事物的时候,会着重从整体以及各个部分之间的联系这样的角度出发,如此一来便为对各个管理环节加以统筹管理给出了相应的方法论方面的指导。供应链管理把目光聚焦在物流、信息流还有资金流的集成协同之上,这就给矿业管理带来了启示,那就是必须要去打破内部和外部所存在的种种壁垒。全生命周期成本管理秉持这样的主张,就是要把成本核算不再仅仅局限于采购价格这一项,而是要将其拓展至设备在整个使用周期当中的所有成本,这其中囊括了运行时的能耗费用、维护保养所产生

的费用、因停机而造成的损失费用以及报废处置相关的费用等等。通过这样一系列的做法,能够强有力地论证出对设备物资实行系统性的、贯穿整个周期的成本管控,其必要性是不言而喻的,同时从经济层面来讲也是很有意义的。

## 2 设备物资全过程管理的关键环节分析

### 2.1 需求计划与预算编制

需求计划与预算编制需要凭借多源信息协同来制定计划。设备部门要依照状态监测以及寿命预测给出预防性维修方面的安排还有备件的需求情况;生产部门得拿出作业计划;采购仓储部门则要反馈库存状况以及市场相关信息。把历史数据和预测模型综合起来运用,就能够达成需求的滚动预测。预算方面必须要贯穿全生命周期的理念,把购置、安装、运行、维护以及处置等所有预估的成本都涵盖进去,进而形成能够指导采购并且用于管控的综合性方案。

### 2.2 采购与供应商管理

采购目标应当从一味地追求低价转变为追求全生命周期总拥有成本达到最优状态。供应商评价体系要将设备可靠性历史情况、能耗水平状况、售后服务能力以及备件供应可持续性等一系列长期绩效指标都涵盖进去。就核心设备而言,需要和优质的供应商构建起战略伙伴关系,借助信息共享以及联合开发等方式来达成深度协同的效果。合同管理方面得让责任得以延伸,把性能考核方面的条款、技术支持方面的条款以及退役回收等方面的条款都明确清楚。

### 2.3 仓储与物流配送

需达成库存结构的优化以及精准配送的目标。运用ABC分类法并结合关键性分析来针对物资展开差异化管控,对于那些关键备件,可以去尝试探索寄售或者紧急协议这样的模式<sup>[1]</sup>。借助条码或者是RFID技术来达成仓库作业的信息化以及数据的实时更新状态。搭建起多级配送网络,依靠智能调度系统还有无人配送设备,以此实现依据生产工单所要求的精准且及时的配送,从而降低现场的等待时长。

### 2.4 现场使用与维护保养

推行操作人员和维护人员协同配合的生产维护体系。要严格依照操作规程来执行操作,并且认真开展点检工作,借助移动终端对运行数据加以记录。维护策略需要朝着依靠实时状态监测所开展的预测性维护方向去升级,凭借对数据展开分析来达成故障预警以及适时进行干预的目的。从维修工单的开具开始,经过领料环节,再到施工阶段,直至最后的验收环节,整个流程都应当在统一的平台上实施闭环式的管理,同时不断积累相关知识库,以此来为决策提供有力的支持。

## 2.5 报废处置与资源循环

处于管理闭环的终点位置,需要按照规范来开展评估以及后续的处置工作。要着手建立起跨部门的技术鉴定流程,以此实现对报废事项的科学决策。对于那些已经退役的设备,首先得对其价值予以评估,从而将其中的可再制造部件、可再利用零件、可回收材料以及危险废物等区分开来。接着针对不同情况分别采取相应的策略,像是再制造、再利用、资源化回收以及无害化处理等等,通过这样的方式来充分回收资源所具有的价值,进而切实践行循环经济的理念。

## 3 全过程管理模式的构建

### 3.1 管理模式的设计原则与目标

构建全过程管理模式时,得确立清晰明确的设计原则以及核心目标。这些原则要包含:一是系统性,要把整个过程的所有环节当作一个整体来考虑,进行全面且周密的优化;二是经济性,要力求在全生命周期当中实现总成本的最小化,或者达成效益的最大化;三是协同性,要去掉组织方面以及信息方面的各种壁垒,进而构建起高效能的协同网络;四是预防性,要把工作的重心从以往那种被动应对的状态转变成主动去预防风险的状态;五是可持续性,要契合绿色发展的要求以及循环经济的相关规定。而其目标应当是多维度的:从效率方面来讲,要提高物资的保障程度,提升设备的使用效率,并且尽可能地缩短故障修复所花费的时间;从成本方面来讲,要加快库存的周转速度,减少资金的占用情况,并且对总成本加以有效控制;从战略方面来讲,要打造出可靠的供应链韧性,积累起丰富的数据资产,并且树立起企业在资源节约以及环境友好方面的良好形象。

### 3.2 组织架构与职责划分

构建与之适配的组织体系,这乃是模式能够顺利运行的根基所在。可以考虑在公司这一层面去设立一个“设备物资全生命周期管理委员会”,其主要负责对那些重大的战略、相关的政策以及预算等方面内容展开审议工作,同时还要负责去协调可能出现的跨部门冲突情况。在操作执行这个层级上,需要清晰明确地设立起“全过程管理归口部门”,让它充当整个流程当中的关键枢纽,全面承担起从需求整合开始,经过规划阶段,再到采购支持环节,接着是资产状态管理方面,直至最后的报废处置等一系列的核心职责,并且要对设备物资在整个全生命周期当中所呈现出的综合绩效负责起来<sup>[2]</sup>。原有的那些职能部门,依旧会在各自的专业领域范围之内,依据协同流程来切实履行自身的各项职能,而且还要接受归口部门所进行的协调安

排。对于那些核心设备而言，可以专门设立一个“设备经理”的岗位，该岗位要对单台设备从引进之时起到最终退役为止的整个全过程中的状态情况、相关成本以及绩效表现等各方面负起总的责任，以此方式来把管理责任实实在在地落实到具体的人身上。

### 3.3 流程优化与制度设计

流程优化应当围绕设备物资金生命周期价值流来展开，要重新去设计业务流程，把那些非增值的环节都给消除掉，把多余的环节予以简化，同时建立起关键的跨部门决策节点。就好比说，需求计划流程就可以优化成在线化且可视化的协同审批流程，把各个环节的时限以及标准都明确清楚。在制度方面，需要构建起能够覆盖全过程的管理制度体系，这里面既要有作为总纲的《设备物资金生命周期管理办法》，也要有涵盖前期规划采购、资产台账、状态监测、库存定额、报废处置等内容的专项制度，而且还要配套相应的《绩效考核细则》，把全生命周期成本、设备可用率、库存周转率等这些关键指标纳入到相关部门以及相关人员的考核当中，借助制度的力量来引导并固化那些符合要求的行为模式。

### 3.4 信息化平台建设与数据集成

高度集成且具备智能分析功能的信息化平台在模式运行中充当着“神经中枢”的关键角色。该平台建设所确立的目标是要达成设备物资金链条数据的采集工作、数据的流转操作、数据的集成处理以及数据的智能应用目的。其架构应当依照统一的标准并借助中间件来构建，进而实现 ERP 系统、EAM 系统、CMMS 系统、物联网监测系统以及供应商协同系统等各类系统的深度集成以及数据的融合。核心功能模块应当涵盖：资产主数据的管理、全生命周期成本的归集与核算、智能需求的预测以及库存的优化处理、设备健康的监测与预测性维护分析、可视化协同工作流引擎以及移动应用端的相关功能。其中最为关键的是要构建起能够覆盖设备整个生命周期的“数字孪生”模型，使其与设备的物理实体实现同步映射，完整记录下设备全部的技术参数、维修历史、成本消耗情况以及性能方面的变迁状况，以此为设备的健康管理、寿命预测、更新改造以及残值评估等工作给予数据驱动层面的支持，最终促使管理方式从依靠经验驱动转变为依靠数据驱动，达成智能化的跃升转变。

## 4 实施策略与保障机制

### 4.1 管理协同与资源配置

模式要成功落地，得强化自上而下的推动以及全员达

成共识。高层管理者得拿出坚定的变革决心，在资源配置以及冲突仲裁方面积极参与进来。并且借助培训、研讨还有宣传等方式来培育一种新的文化，让全员都关注全生命周期的成本，能够主动协同合作，依据数据来做决策<sup>[3]</sup>。在资源配置方面，得保障信息化建设、流程咨询、人员培训以及变革管理所需要的经费，并且要选拔并培养那些既懂技术又熟悉管理以及数据分析的复合型人才去充实到核心岗位。在实施的过程中，适宜采用“总体规划、分步实施、试点先行”的策略，先通过局部试点来积累经验，然后再修正方案，最后再全面推广，以此来有效控制变革风险。

### 4.2 风险控制与应急预案

推行新模式会面临技术整合、流程执行、数据质量以及供应链中断等诸多方面的风险，所以需要构建起具有前瞻性的控制机制。具体而言，要成立专门的专项小组，针对技术方案展开充分的论证工作，并且进行相应的测试；要借助详细的操作手册，开展模拟演练活动，同时依靠流程审计来保障执行环节不出问题；要制定较为严格的数据治理的相关规范，并且定期对数据质量进行审计；对于关键物资，要制定出备用供应商的名单，设置应急通道，并且维持一定的安全库存量。与此还需要针对设备出现突发的重大故障、关键物资供应中断这类极端情况去制定具体的应急预案，明确应急指挥的具体安排、资源调配的方式以及替代方案等内容，以此来确保在异常情况之下，生产能够获得最低限度的保障，把损失控制在最小的范围之内。

### 4.3 绩效评价与持续改进

建立起科学的用于衡量成效并且能够推动优化的绩效评价以及持续改进方面的机制。这个评价体系得突破局部指标所存在的局限性，去构建一个包含财务、运营、客户服务还有学习成长等多个维度在内的综合指标体系，像全生命周期的总成本、库存周转率、设备利用率、供应及时率以及数据决策采纳率等等这类指标，然后把这些指标分解到各个相关部门的岗位上，和绩效考核挂钩起来。更为重要的是要建立起定期开展的管理评审会议制度，由高层来主持，依据绩效数据采用分析模式来进行运作，深入剖析其中的根本原因并且识别出短板所在，接着制定出改进措施，明确好责任以及时限，并且要对效果加以跟踪验证，从而形成完整的“计划-执行-检查-行动”这样一个闭环，以此来确保模式可以实现动态的演进并且能够内化为企业持久的核心管理能力。

#### 4.4 人才培养与文化支撑

人才以及文化乃是此模式成功的关键保障所在。需要精心去设计分层分类的培训体系：对于高层来讲，要侧重于全生命周期成本管理方面以及数据决策理念方面的培训；而针对中层以及骨干而言，则需开展全面的培训，内容涉及流程、制度、系统操作以及数据分析技能等方面；至于一线人员，其培训应侧重于操作规程、终端使用以及数据录入规范等内容<sup>[4]</sup>。应当积极鼓励员工参与到流程优化与问题解决小组当中，以此在实际的操作过程中不断提升自身的各项能力。从文化层面来讲，必须推动一系列的转型，具体包括从“部门本位”朝着“流程协同与整体最优”转变、从“经验主导”迈向“数据驱动与科学决策”转变、从“重购置轻维护”转变为“关注全生命周期总成本”以及从“被动响应”转变为“主动预防与持续改进”。通过树立典型人物、分享相关故事、举办知识分享活动以及把价值观纳入到行为考核等种种方式，来引导并强化新的文化要素，进而让全过程管理的理念能够深深地扎根于员工的意识之中以及成为他们的日常习惯，并且融入到企业的血脉当中。

#### 5 结束语

矿业项目设备物资管理要走向现代化，这是提升企业竞争力、达成高质量发展的必然途径。构建起覆盖整个生命周期的、具备系统集成和数字智能化特点的全过程管理模式，属于一项既有必要又颇具前瞻性的管理改革举措。

本文探讨了其理论根基、关键环节、构建框架以及实施保障等方面内容，指出其核心要点在于把全生命周期总成本最优当作经济方面的指导原则，把业务流程横向整合作为实践操作的主要脉络，把数据信息全域智能应用视为技术层面的重要抓手，进而促使管理从单纯的降低成本转变为能够创造价值的中心所在。在未来的发展进程中，伴随物联网、大数据、人工智能以及数字孪生等相关技术的不断深度融合，该管理模式会朝着更为智能化、更加精准化的方向持续演进，它在降本增效方面所起到的作用十分突出，在推动矿业实现绿色转型以及安全可持续发展方面也将发挥极为关键的角色，可为全球矿业应对各类挑战提供颇为重要的管理思路与实践办法。

#### [参考文献]

- [1]邹双.煤矿机电设备节能管理策略探讨[J].中国设备工程,2025(23):53-55.
  - [2]余智勇.煤矿煤炭洗选设备维护管理系统的建立与维护方法分析[J].产品可靠性报告,2025(11):233-235.
  - [3]冯杰.探究智能化煤矿设备全生命周期管理体系的构建措施[J].中国设备工程,2025(22):68-70.
  - [4]王勇,陈建峰,李飞,等.煤矿机电设备的全生命周期管理优化探索[J].内蒙古煤炭经济,2025(20):139-141.
- 作者简介：亓朝阳（1996.10—），单位名称：水电九局，毕业学校和专业：中北大学 武器系统与工程。

## 煤矿顶板事故分析与防治对策研究

张 强

江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿，江苏 徐州 221616

**[摘要]**煤矿顶板事故属于在煤矿生产进程中发生频次颇高且危害程度颇为严重的安全事故类别之一，其一旦发生，不但会对井下作业人员的生命安全构成严重威胁，而且还会给矿井生产系统的连贯性以及稳定性带来较为突出的影响。鉴于此，此文紧扣煤矿顶板事故的形成原理，从地质条件、采煤工艺、支护设计以及现场管理等多个方面来对顶板事故的关键成因展开系统剖析，并且在此根基之上着重对顶板支护优化、联合支护技术、复杂顶板控制以及监测预警等一系列关键防治技术予以深入探讨，希望能够为煤矿顶板事故的防控事宜给予一定的参考。

**[关键词]**煤矿顶板事故；采煤工作面；防治对策

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18340

中图分类号: TD912

文献标识码: A

## Analysis of Coal Mine Roof Accidents and Research on Prevention and Control Countermeasures

ZHANG Qiang

Zhangshuanglou Coal Mine of Jiangsu Xukuang Energy Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221616, China

**Abstract:** Coal mine roof accidents belong to one of the safety accident categories that occur frequently and have a serious degree of harm in the coal mine production process. Once they occur, they not only pose a serious threat to the life safety of underground workers, but also have a prominent impact on the continuity and stability of the mine production system. In view of this, this article closely follows the formation principle of coal mine roof accidents, systematically analyzes the key causes of roof accidents from multiple aspects such as geological conditions, coal mining technology, support design, and on-site management, and focuses on a series of key prevention and control technologies such as roof support optimization, joint support technology, complex roof control, and monitoring and early warning, so as to provide some reference for the prevention and control of coal mine roof accidents.

**Keywords:** coal mine roof accidents; coal mining face; prevention and control countermeasures

### 引言

煤矿安全生产在矿业领域一直备受关注，其中顶板事故因为突发性较强且致灾后果颇为严重，所以它已然成为影响煤矿安全生产的关键因素之一。在采煤工作面推进之时，受到地质构造出现变化、采动应力重新分布以及支护措施不够恰当等诸多因素的影响，顶板特别容易产生失稳破坏的情况，进而引发冒顶、片帮这类事故。对煤矿顶板事故成因展开深入研究，并且对防治技术与管理措施加以系统总结，这对于提高矿井的安全保障程度以及达成煤矿安全高效生产有着十分重要的实际意义。

### 1 煤矿采煤工作面顶板事故概述

煤矿采煤工作面顶板事故指在煤矿开采过程中，由于地质条件和采动工作面等因素影响，造成煤矿顶板失稳或发生坍塌。这类事故在煤矿生产中具有极高风险和严重的危害性，不仅威胁矿工生命安全，还会中断煤矿生产，加

剧经济损失，一方面会对矿井通风系统以及运输系统的正常运作产生不利影响，另一方面也会影响到后续采掘作业的有序开展。顶板事故通常突发性比较强，而且隐蔽性也很高，其破坏的范围往往还颇大，一旦发生，很容易引发一系列连锁的安全事故。所以，全面且细致地去剖析煤矿采煤工作面顶板事故的发生原理，充分探讨导致事故发生的各种因素，并且给出具有针对性的防治技术以及管理方面的对策，这对于增强煤矿顶板安全防护的能力，达成煤矿安全且高效的生产目标而言，有着十分重要的实际意义。

### 2 煤矿顶板事故成因分析

#### 2.1 地质条件对顶板稳定性的影响

地质条件对于煤矿顶板稳定性而言属于基础性的影响要素，不同煤层所处的赋存条件之下，其顶板在岩性方面、结构特征层面以及完整程度上都会呈现出明显的差异情况。那种软弱夹层、断层破碎带还有节理裂隙发育程度

比较高的顶板结构,它的整体承载能力是比较薄弱的,在受到采动扰动的作用之时,特别容易出现变形以及破坏的现象。除此之外,顶板岩层的厚度存在着变化,并且岩性组合也不够均匀,这就会致使顶板在受力分布上出现不均衡的情况,进而引发局部冒落或者整体失稳等问题。随着开采深度一步步地增加,原本就存在的原岩应力水平以及构造应力的作用变得更加突出起来,顶板围岩的稳定性也会随之进一步地下降,灾害演化的整个过程也就变得更为复杂了。所以说,在地质条件较为复杂的状况下开展采煤作业活动,顶板事故发生的可能性会大幅度地提升,这已然成为限制煤矿安全生产的关键因素之一。

## 2.2 采煤工艺与作业方式因素

采煤工艺以及作业方式会对顶板的受力状态及其稳定性产生直接影响,不合理的采煤方法会让顶板灾害风险明显增加,在实际生产过程中,工作面推进速度过快、回采顺序安排不合理、采高控制不合理或者支护与采掘节奏不协调等情况,都可能导致顶板应力集中、围岩失稳以及结构破坏。部分矿井在地质条件复杂或者顶板岩性多变的特殊地段仍然沿用传统采煤方式,没有结合顶板承载能力及时调整工艺参数,使得顶板长时间处于不利受力状态,这增加了局部顶板下沉、离层和悬顶的发生概率,也加大了整体顶板事故风险,给矿井安全生产带来了潜在威胁。所以,科学地选择采煤工艺、合理地安排作业方式,是有效降低顶板事故发生率的关键技术措施。

## 2.3 顶板支护设计与施工因素

顶板支护设计及施工质量乃是确保顶板稳定的极为重要的一项技术环节。要是支护参数选取得不合理,又或者支护形式和顶板实际条件不相匹配,那么通常情况下会使得支护系统的整体承载能力大打折扣,进而致使局部顶板出现受力过于集中的情况,甚至还会造成支护系统彻底失效。除此之外,在施工进程当中,像锚杆(索)没有安装到位、预紧力不够充足以及液压支架初撑力过低等一系列问题,同样会对支护效果产生极为严重的影响,让顶板在采动扰动以及应力重新分布的作用之下一步步地丧失稳定状态。尤其是在地质条件相对复杂或者顶板岩层厚度存在较大变化的工作面,这类施工技术方面存在的缺陷更是容易诱发冒顶或者片帮这类事故的发生。并且,支护施工过程当中缺少严格的针对质量的控制以及检验的相关手段,这也进一步增加了顶板事故发生的潜在可能性。所以说,科学且合理的支护设计再加上严格规范的施工管理,二者相结合才是减少顶板事故发生的最为关键的保障所在。

## 2.4 现场管理与人员行为因素

现场管理的水平以及作业人员的行为,这两者对于顶板安全有着直接的影响。部分矿井在开展顶板管理工作的时侯,存在着制度落实不够彻底、现场监管力度不够严谨的情况,所以没能及时察觉并处置顶板方面存在的隐患。与此作业人员的安全意识比较淡薄,违规操作的现象也时常出现,比如没有按照规定去做支护工作,或者擅自把支护构件给拆除了,这些情况都会让顶板安全保障的条件受到削弱,进而使得事故发生的可能性增大。

# 3 煤矿顶板事故防治关键技术

## 3.1 顶板支护参数优化与结构设计

在面对不一样的顶板情况时,对支护参数以及支护结构予以合理的优化,这可是提升顶板稳定性的一项极为关键的技术举措。仔细且系统地去剖析顶板岩层的力学特性,如此一来便能够较为科学地确定出锚杆的具体长度、布置时的间距、所呈现的倾角还有预紧力的大小等。并且要综合考量顶板岩性以及开采的实际条件,合理地去安排液压支架的支护强度以及支撑的方式方法,进而构建起一个完整的支护体系。经过优化之后的支护结构,一方面能够强化顶板整体的承载能力,另一方面也能够有效地将因采动而引发的应力集中给分散开来,对顶板出现下沉、离层以及悬顶这类现象起到抑制的作用。与此借助参数方面的优化操作,可以让支护系统的适应性以及稳定性都得以提高,确保其能够在不同的采煤深度、采高乃至各种各样的地质条件之下都能够充分发挥出良好的支护效果,进而为矿井的安全生产给予可靠的技术保障。

## 3.2 锚杆(索)与液压支架协同支护技术

锚杆(索)与液压支架协同支护技术,借助这两种支护形式所具备的互补优势,达成对顶板的综合性掌控。其中,锚杆和锚索着重于加固围岩结构,以此提升顶板的整体性,防范局部裂隙不断扩展以及顶板出现离层情况。液压支架则给工作面给予持续且稳定的支撑力,能够承受采动荷载,并且维持顶板处于初始的位置。经由对锚杆布置方式、预紧力以及液压支架支撑参数予以合理的规划设计,这两者协同发力,便能有效地遏制顶板下沉、悬顶以及片帮等现象的发生,进一步强化顶板整体抵御破坏的能力。此项技术在地质条件较为复杂、顶板岩层厚薄不一或者结构破碎程度颇为严重的情形下尤为适用,而且还能提升支护系统的适应性与可靠性,从而为安全高效的开采作业筑牢坚实的保障。

## 3.3 坚硬顶板与复杂顶板控制技术

在坚硬顶板或者复杂顶板这样的条件下,顶板通常很

难做到及时垮落，反而很容易形成大跨度的悬顶结构，如此一来便增加了发生事故的风险。借助采用合理的顶板控制技术，像是对采高做出调整、让推进速度得到优化，还有实施必要的顶板弱化举措等，能够促使顶板按照预期的方式去破断，进而减少应力出现集中的情况。并且，在面对复杂顶板条件的时候，得结合现场的实际状况动态地去调整控制方案，以此来增强顶板管理所具有的针对性以及有效性。

### 3.4 顶板监测与预警技术应用

顶板监测与预警技术依靠实时获取顶板变形、应力变化以及支护位移等关键参数，给事故防控给予科学技术方面的有力支撑。凭借现代传感器、光纤监测、无线数据传输还有信息化管理平台，可以达成对顶板状态的动态监控以及数据分析，能及时察觉潜在风险区域并且自动发出预警信号。此技术手段一方面能为管理人员提供精准的顶板安全信息，使其在危险出现之前采取有效的防控举措，另一方面还能够凭借历史数据积累来预测顶板失稳的趋势，进而提升决策的科学性与准确性。借助持续运用监测与预警技术，矿井顶板安全管理的水平得到了明显提升，为实现安全且高效的煤矿生产提供了稳固的保障。

## 4 煤矿顶板事故防治管理对策

### 4.1 完善顶板安全管理制度

健全的安全管理制度对于顶板事故的防治而言，可算是极为重要的一项保障。煤矿企业需要依据自身的生产实际情况，去构建起较为完善的顶板管理制度以及相应的责任体系，要清楚明确各级各类人员在顶板管理工作当中所应承担的具体职责、具体任务以及操作规范等方面的要求，务必要保证每一个环节都有人切实负责起来。这一制度务必要将顶板支护设计的审批事宜、施工过程中的操作事项、日常的巡查检查工作、隐患的细致排查情况以及应急处置等相关事宜都囊括进去，实现对整个管理过程的全程覆盖<sup>[1]</sup>。与此还应当建立起奖惩方面的机制以及定期开展考核的制度，以此来推动各项制度得以切实有效地执行下去。借助于制度所形成的约束作用以及对操作行为加以规范的做法，不但可以让作业流程变得更加规范有序，而且能够提升现场管理的整体水平，还能够形成一套较为科学合理的安全管理闭环，进而从源头上降低顶板事故发生的可能性，保证矿井能够实现安全生产，并且可以持续且稳定地运行下去。

### 4.2 强化顶板灾害风险分级管控

通过针对不同区域以及不同作业环节的顶板风险展开系统性的辨识，并且实施分级管理的方式，是能够切实

有效地达成对顶板灾害予以精准防控这一目标的。企业需要依据地质方面的具体条件、顶板所呈现出的岩性特点、采煤所采用的工艺流程以及过往的历史事故相关数据等情况，去对各个工作面以及各项作业环节的风险等级做出科学合理的划分，要清晰明确地界定出高风险区域、中风险区域以及低风险区域，并且与之相对应地确定好相应的管理举措。对于那些处于高风险区域的地方，应当制订出极为严格的巡查方面的制度、监测方面的方案以及应急处置的相关预案，以此来保障潜在存在的各类隐患可以被及时地察觉到、完整地记录下来并且妥善地加以处理<sup>[2]</sup>。与此还应当将信息化的手段以及数据分析的方法相结合起来运用，依据实际情况动态地去对风险等级以及防控策略作出调整，进而让顶板事故防治工作的开展具备更强的主动性、更为超前的前瞻性以及更加严谨的科学性，最终实现提升矿井整体在安全管理方面水平的目的。

### 4.3 加强施工过程与支护质量控制

在整个施工进程里，其质量把控情况可是和顶板支护所达成的效果以及矿井所具备的安全水准紧密关联着的。煤矿企业在施工期间务必要严格遵守施工方面的各项规范还有技术层面的相关标准，针对支护材料、施工工艺、锚杆安装以及液压支架调试等诸多环节展开全方位的管理工作，以此来保证每一个工序都能够契合设计方面的要求<sup>[3]</sup>。在此期间，还需进一步完善施工过程当中的检查、验收以及记录方面的相关制度，加强施工现场的监督管理以及质量追踪工作，做到能够及时察觉并且纠正施工过程中出现的偏差或者材料存在的缺陷，避免因支护出现问题而致使顶板出现下沉、悬顶或者片帮这类事故的发生。借助科学且合理的施工质量管理方式，不但能够让支护系统在可靠性与耐久性这两个方面都得以提升，而且还能为顶板的防控事宜给予稳固有力的保障，进而确保采煤工作面能够实现安全且高效的运行状态。

### 4.4 提升从业人员安全培训与技术水平

作业人员作为顶板安全管理的直接执行者，其安全意识、操作规范以及技术水平在事故防治方面有着十分重要的影响。煤矿企业应当定期开展系统化且安全性较高的教育培训工作，让从业人员全面知晓顶板灾害的形成原理、预防办法以及应急处置手段，以此提高他们识别风险和自我防护的能力。与此还需强化技术人员的专业培训与技能提升，促使他们可以熟练运用顶板支护设计、施工管理以及监测预警技术，推动顶板防治措施朝着科学化、规范化以及持续改进的方向发展。凭借全员共同参与、分层管理

以及持续教育的方式,能够有效降低违规操作与人为失误的发生概率,提升矿井顶板安全管理的整体水准,从而为达成安全且高效的生产目标给予强有力的保障。

## 5 结语

煤矿顶板事故的发生往往呈现出多种因素相互交织的复杂特点,其防治工作得从技术以及管理这两个不同层面来协同开展推进。通过对顶板事故成因展开系统分析,并且结合支护优化、协同支护、顶板控制以及监测预警等一系列关键技术,与此同时进一步完善安全管理制度以及人员培训机制,如此便能够有效地提升煤矿顶板事故防控的整体水平。本文所展开的相关研究对于煤矿顶板安全管理而言具备一定的参考价值,能够为达成煤矿安全、稳定

且高效的生产目标给予相应支撑。

## 参考文献

- [1] 马秋聪,卢晗,朱春.煤矿顶板事故分析与防治对策研究[J].内蒙古煤炭经济,2024(12):100-102.
- [2] 陈堃,谭吉玉,丁元春.煤矿顶板事故的知识发现及灾害链网络分析[J].煤矿安全,2024,55(8):249-256.
- [3] 宣强磊.煤矿顶板事故致因分析与危险性评价[D].河南:河南理工大学,2023.

作者简介: 张强 (1985.7—), 男, 毕业院校: 中国矿业大学, 学历: 本科, 所学专业: 采矿工程, 当前就职单位: 江苏徐矿能源股份有限公司张双楼煤矿, 职务: 技术主管, 及所在职务的年限 8 年, 职称级别: 助理工程师。

## 基于 BIM 技术的建筑结构协同设计流程优化研究

王 颖

九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**随着建筑行业的快速发展，工程项目规模不断扩大，专业间协同设计的重要性日益凸显。传统建筑设计流程中存在信息传递不畅、数据割裂和设计冲突频发等问题，严重影响设计效率与工程质量。BIM (Building Information Modeling) 技术凭借其信息集成与三维可视化优势，为建筑结构协同设计提供了新的解决思路。文中通过分析 BIM 技术的核心特征，结合建筑结构协同设计的流程现状，探讨了 BIM 在优化协同流程中的具体路径，主要从信息共享机制建立、协同平台构建、冲突检测应用、全过程动态管理等方面提出实践方法。研究结果表明，基于 BIM 的协同设计能够显著提高设计效率，减少结构与建筑、机电等专业之间的矛盾冲突，提升整体设计质量和施工可实施性。文中的研究为推动 BIM 在结构设计中的深度应用提供了参考，对提高工程项目的精细化管理水平具有积极意义。

**[关键词]**BIM 技术；建筑结构；协同设计；流程优化；冲突检测

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18364 中图分类号: TU318 文献标识码: A

## Research on Optimization of Collaborative Design Process for Building Structures Based on BIM Technology

WANG Ying

Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the rapid development of the construction industry, the scale of engineering projects continues to expand, and the importance of collaborative design between specialties is becoming increasingly prominent. In the traditional architectural design process, there are problems such as poor information transmission, data fragmentation, and frequent design conflicts, which seriously affect design efficiency and engineering quality. BIM (Building Information Modeling) technology, with its advantages of information integration and 3D visualization, provides a new solution for collaborative design of building structures. By analyzing the core features of BIM technology and combining with the current status of collaborative design processes in building structures, this article explores the specific path of BIM in optimizing collaborative processes. Practical methods are mainly proposed from the aspects of establishing information sharing mechanisms, constructing collaborative platforms, conflict detection applications, and dynamic management throughout the entire process. The research results indicate that collaborative design based on BIM can significantly improve design efficiency, reduce conflicts between structural and architectural, mechanical and electrical specialties, and enhance overall design quality and construction feasibility. The research in the article provides a reference for promoting the deep application of BIM in structural design, and has positive significance for improving the level of refined management of engineering projects.

**Keywords:** BIM technology; building structure; collaborative design; process optimization; conflict detection

### 引言

近年来，我国建筑行业正处于由粗放型向集约型、由经验型向信息化、智能化转型的关键时期。随着工程项目复杂性的增加，单一专业的独立设计已经难以满足建筑全生命周期管理的需求，如何实现多专业间的高效协同成为行业关注的焦点。传统结构设计模式普遍采用二维图纸和文件交换方式，不仅效率低下，而且容易造成数据冗余与

偏差，导致设计阶段与施工阶段频繁出现返工与冲突。BIM 技术的出现为这一问题提供了新的解决方案。它通过建立建筑全生命周期的数字化信息模型，实现多专业信息的集成与共享，使协同设计成为可能。基于 BIM 的协同设计流程优化，不仅能够改善传统设计的低效问题，还能促进结构设计的科学化与合理化。本文将结合核心素养导向的工程教育理念，对基于 BIM 技术的建筑结构协同

设计流程优化路径进行系统研究，旨在为设计实践提供理论依据和操作思路。

## 1 BIM 技术与建筑结构协同设计的契合性

### 1.1 BIM 技术的核心特征

BIM 技术作为一种数字化工具，其本质是对建筑物生命周期全过程的三维信息化管理，它不仅仅是三维建模，更重要的是数据驱动和信息集成。与传统二维设计不同，BIM 将建筑几何信息、结构构件参数、材料性能和施工工艺等数据进行整合，形成一个动态、可更新、可追踪的信息系统。这一特征使得设计过程中的信息传递不再依赖于纸质图纸或分散文件，而是通过模型实现统一。BIM 的三维可视化功能能够让设计人员在空间中直观地理解结构体系与建筑、机电系统之间的关系，从而减少因图纸表达模糊导致的误差。同时，BIM 的全生命周期理念使得设计不仅服务于施工，更延伸至运维管理，保证了设计成果的可持续性和高效性。这些特征为建筑结构协同设计提供了坚实的技术条件。

### 1.2 建筑结构协同设计的内涵

建筑工程是一个高度复杂的系统工程，涉及建筑、结构、机电、给排水、暖通等多个专业。协同设计的核心在于打破专业壁垒，通过信息共享和目标一致，实现多方合作。对于结构专业而言，其任务不仅是保证结构安全和功能实现，还需要与建筑空间设计、机电布置进行充分配合。传统模式下，结构与建筑往往存在设计顺序和逻辑上的差异，导致冲突频发。协同设计的提出，要求结构设计师不仅仅关注自身学科目标，还要从整体工程角度出发，在设计过程中主动与其他专业协调。其价值在于减少返工、提高效率、保障项目整体质量，并推动设计向综合化、智能化方向发展。

### 1.3 BIM 与协同设计的契合点

BIM 与协同设计之间存在天然的契合关系。首先，BIM 提供了一个统一的数据平台，使不同专业能够在同一模型环境下开展工作，解决了传统模式下信息孤岛的问题。其次，BIM 的动态更新机制可以保证当某一专业修改设计时，其他专业能够同步获知并调整，避免了信息延迟和错误传递。再次，BIM 的冲突检测功能能够提前发现设计矛盾，如梁柱位置与管道布置的冲突等，这些在二维图纸中难以察觉的问题，在三维模型中则一目了然。最后，BIM 的参数化设计特性使得结构设计可以快速响应建筑方案的调整，提高了设计的灵活性和科学性。由此可见，BIM 与协同设计的结合能够实现从单一专业设计到多专业集成的跃升。

## 2 传统结构设计流程的局限性

### 2.1 信息传递不畅

传统二维设计依赖图纸与文件，设计信息通过不同版本的图纸进行传递。这种方式效率低下，且容易产生误差与遗漏。例如，在建筑与结构的接口处，如果建筑师修改了空间布局，信息往往不能第一时间传递给结构工程师，导致结构方案与建筑方案不匹配。这种滞后不仅影响设计效率，还可能在施工阶段引发返工和矛盾，增加成本。由于缺乏统一的数字化平台，专业间的信息交流依赖人为沟通，存在很大局限性。

### 2.2 设计冲突频发

在传统流程中，建筑、结构和机电专业往往是分阶段独立完成各自任务，再进行汇总。由于缺乏整体协调，专业间的冲突在所难免。结构设计常常需要根据建筑师的方案进行调整，但由于机电系统的复杂性，常出现梁柱与管线冲突的情况。这类冲突在施工阶段暴露后，需要频繁修改设计，延误工期，甚至造成经济损失。设计冲突不仅影响施工进度，还会对建筑整体性能造成负面影响。

### 2.3 过程管理缺乏动态性

传统设计管理模式以阶段性成果为导向，缺乏对设计全过程的实时监控。设计方案一旦形成，修改难度大，代价高。由于信息传递延迟，管理者往往在问题严重化后才介入，缺乏提前预警和动态调整的机制。这种静态管理方式无法适应现代建筑项目复杂多变的需求，导致设计灵活性和应变能力不足。

## 3 基于 BIM 的结构协同设计流程优化原则

### 3.1 整体性与系统性原则

在 BIM 环境下，协同设计必须以工程整体为核心，打破专业之间的界限，实现设计的系统优化。整体性原则要求各专业在设计初期就进行充分沟通，确定统一的目标和标准，避免因目标分散而导致的矛盾。系统性原则强调在设计过程中保持逻辑一致性，使建筑、结构、机电形成一个相互支撑的有机整体。这不仅有利于方案的合理性，也能提升工程项目的经济性和安全性。

### 3.2 信息共享与透明化原则

信息共享是协同设计的核心，透明化是保证共享有效性的关键。在 BIM 平台上，所有专业的设计数据实时更新，其他参与方能够第一时间获取最新信息，避免了因信息滞后而产生的误差。透明化的机制还能够增强各方的责任意识，减少因信息封闭而导致的相互推诿。在信息透明的环境下，各专业的协作更加高效，设计决策也更加科学。

### 3.3 动态反馈与持续改进原则

协同设计并非一次性完成,而是一个不断反馈与优化的过程。在 BIM 环境下,可以通过动态更新与冲突检测机制,及时发现问题并进行调整。持续改进原则要求在整个设计周期内保持敏感性与开放性,将反馈结果转化为优化措施,不断提高设计质量。这种循环改进的模式,能够最大限度地减少返工和浪费,保证项目的顺利推进。

## 4 基于 BIM 的协同设计实践路径

### 4.1 建立统一的信息平台

在协同设计的实施过程中,建立统一的信息平台是实现多专业高效合作的关键举措。该平台不仅能够支持精细化的三维模型构建,还能整合材料性能、荷载参数以及施工工艺等多维度信息,为设计与管理提供全面的数据支撑。通过这一共享环境,各专业设计人员能够在同一工作界面中进行交流与修改,避免因软件差异或数据割裂而导致的信息障碍。平台的版本控制功能可以记录每一次调整,确保项目进展的可追溯性与透明性;权限管理机制则保障了不同层级人员的操作范围,有效维护数据的安全与一致性。统一平台的应用不仅提升了设计过程的协调性,还增强了信息流转的实时性与准确性,从根本上解决了传统模式下多方协作效率低、沟通不畅的问题,为建筑工程全生命周期的管理奠定了坚实基础。

### 4.2 引入冲突检测机制

在协同设计过程中,BIM 软件的冲突检测功能发挥着不可替代的作用。借助内置的空间分析工具,可以对不同专业的设计模型进行全面比对,从而快速发现潜在的冲突。例如,常见的梁柱与管道交叉问题、设备布置与结构构件的空间干扰,甚至管线之间的标高冲突,都能够在设计阶段被直观呈现并加以解决。冲突检测不仅提升了设计的前瞻性,还能通过三维可视化的方式帮助设计人员快速定位问题区域,便于团队在早期阶段就开展针对性的优化。这一过程有效减少了信息传递中的误差和沟通障碍,使各专业之间能够形成更高效的协同合作。更为重要的是,提前解决冲突大大降低了施工阶段的返工风险,不仅节约了人力物力成本,还提高了工程进度的可控性与施工质量,为项目的顺利推进提供了坚实保障。

### 4.3 推进全过程协同管理

在现代建筑项目中,协同设计不应局限于单一阶段,而应贯穿于建筑的全生命周期。从方案设计到施工图绘制,再到施工实施与后期运维,信息的一致性与高效协同都是保障工程顺利推进的重要基础。BIM 平台的应用为这一

目标提供了有力支持,它能够实现全过程动态管理,使结构设计成果与后续的施工数据、运维信息紧密衔接。在施工过程中,BIM 模型能够进行施工模拟与进度控制,有效减少冲突和返工,提高施工效率与安全性。而在运维环节,BIM 数据还能作为设施管理与维护的重要依据,帮助管理者及时掌握建筑运行状态,提升管理的科学性与精准性。通过这种全生命周期的协同管理,建筑项目不仅能够实现更高的整体效益,还能在可持续性方面取得长远价值,为建筑行业的现代化发展提供坚实支撑。

## 5 协同设计流程优化的实施保障

### 5.1 提升设计人员的 BIM 应用能力

在 BIM 协同设计过程中,人员素质往往直接决定整体效果。当前,一些设计人员对 BIM 的理解仍局限于建模操作,未能充分认识其在跨专业协作、信息共享与过程管理中的价值。这种局限性不仅削弱了技术应用的深度,也影响了协同设计的整体效率。要想实现流程的全面优化,必须通过系统化培训与实践引导,帮助设计人员掌握数据整合、冲突检测和信息交互等关键技能。同时,还应注重培养跨学科的协作意识,使设计人员能够在沟通与合作中更好地发挥 BIM 的优势。鼓励设计人员树立信息化思维,主动接受并适应新的工作模式,对于提升团队的整体水平和推动项目顺利实施具有重要意义。只有当人员素质与技术应用相匹配,协同设计的潜力才能得到最大限度的发挥,从而推动建筑行业迈向更加精细化与智能化的发展。

### 5.2 建立标准化流程体系

在 BIM 协同设计中,标准化不仅是保证流程顺畅的前提,也是实现高效运行的重要保障。企业应在行业规范和项目实践的基础上,制定统一的 BIM 应用标准,明确不同专业之间的数据接口方式、文件格式以及成果交付的具体要求。标准化的建立能够有效减少因沟通不畅或信息不一致带来的混乱与重复劳动,使各专业在同一规范下协作,从而提升整体设计效率与成果质量。与此同时,标准化流程还为知识与经验的沉淀创造了条件,使不同项目之间可以形成可借鉴、可推广的应用模式。通过持续优化与完善标准,企业能够逐步建立起系统化、可复制的 BIM 应用体系,不仅提升单个项目的协作效率,还能在长期发展中形成核心竞争力。这种标准化导向的管理思路,将为建筑行业的数字化转型和精细化发展提供坚实支撑。

### 5.3 完善制度与技术支持

在 BIM 协同设计的推进过程中,制度建设与技术支持同样是不可或缺的关键环节。企业要在管理层面构建完

善的 BIM 管理制度,明确不同岗位和专业人员的责任分工,建立科学的考核与激励机制,使各专业能够在协同过程中保持高效配合与积极参与。制度的健全不仅能够提升团队的执行力,也为设计过程中的协调与监督提供了可靠依据。在技术层面,需要持续加大投入,配备高性能的硬件设备和先进的 BIM 软件平台,确保大规模数据的快速处理与流畅交互,为设计人员提供良好的操作体验和技术环境。同时,还应重视数据安全与信息共享机制的建设,保障协同过程中数据的准确性与完整性。

## 6 结论

在建筑工程设计领域,基于 BIM 技术的协同流程优化已成为提升设计水平的重要方向。传统设计模式往往存在信息传递不及时、专业间沟通不足和冲突频发等问题,导致返工率高、设计周期延长。BIM 技术通过建立统一的三维信息平台,使结构、建筑与机电等多专业在同一环境中共享数据,减少了信息壁垒与重复劳动。借助碰撞检测功能,可以在设计阶段提前发现并解决管线、构件之间

的冲突,避免施工中出现重大问题。全过程协同管理则打通了设计、施工与运维的全链条,使工程数据实现动态更新和追溯,增强了项目的精细化与可控性。未来的发展趋势在于 BIM 与人工智能、大数据等新兴技术的深度融合,通过智能分析与预测优化设计方案,实现更高水平的自动化和智慧化协同,从而推动建筑行业向数字化、智能化和高效化全面升级。

## [参考文献]

- [1] 李强.BIM 技术在建筑结构设计中的应用研究[J].建筑技术开发,2021(10):112-115.
  - [2] 王伟.基于 BIM 的建筑工程协同设计模式探析[J].建筑结构,2022(7):44-48.
  - [3] 张敏.BIM 技术在建筑全生命周期管理中的实践与思考[J].土木建筑工程信息技术,2023(3):67-72.
- 作者简介: 王颖 (1997.4—), 女, 汉族, 毕业学校: 河北建筑工程学院, 现工作单位: 九易庄宸科技(集团)股份有限公司。

## 绿色建筑理念在公共建筑设计中的综合应用探析

张铭昊

雄安城市规划设计研究院有限公司，河北 保定 071700

**[摘要]**资源环境方面的问题日益变得明显起来，绿色建筑理念慢慢变成引领现代建筑设计的关键方向之一。公共建筑属于城市建设里的重要构成部分，它的绿色化程度直接对城市可持续发展进程产生影响。文中从绿色建筑理念在公共建筑设计当中应用的意义着手，细致剖析绿色化设计所遵循的基本原则，同时从材料挑选、外部设计、内部空间优化、智能化系统建设以及资源回收等诸多方面全面且系统地探讨其实施的具体策略，希望能够为公共建筑实现绿色转型给予理论方面的支撑以及实践层面的路径指引。

**[关键词]**绿色建筑设计理念；公共建筑；应用

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18356

中图分类号: TU2

文献标识码: A

## Analysis of the Comprehensive Application of Green Building Concept in Public Buildings Design

ZHANG Minghao

Xiong'an Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071700, China

**Abstract:** Issues related to resources and environment are becoming increasingly apparent, and the concept of green buildings is gradually becoming one of the key directions leading modern architectural design. Public buildings are an important component of urban construction, and their degree of greening directly affects the sustainable development process of cities. Starting from the significance of applying green building concepts in public building design, this article carefully analyzes the basic principles followed by green design, and comprehensively and systematically explores the specific strategies for its implementation from various aspects such as material selection, external design, internal space optimization, intelligent system construction, and resource recycling. It is hoped that this can provide theoretical support and practical path guidance for the green transformation of public buildings.

**Keywords:** green building design concept; public buildings; application

### 引言

在全球气候变化以及生态环境不断恶化这样的大背景之下，传统的那种高能耗且高污染的建筑模式已然没办法契合可持续发展方面的要求了。绿色建筑理念算得上是一种能够把生态、经济以及社会效益都兼顾到的建筑模式，它着重于对资源节约、环境友好还有人居舒适性这几个方面进行综合性的平衡处理。公共建筑自身有着规模比较庞大、能耗相对较高并且使用频率颇高等一系列的特点，所以它自然就成为了绿色建筑推广应用时最为关键的一个领域。本文会围绕着绿色建筑理念在公共建筑设计当中的应用所具有的意义、设计应当遵循的原则以及具体的实施策略等方面来展开较为系统的分析。

### 1 公共建筑中绿色建筑设计理念的应用意义

将绿色建筑设计理念引入其中，一方面能够大幅降低

公共建筑在使用期间的能源消耗以及对环境产生的负荷。具体来讲，借助优化建筑的形体、强化围护结构的隔热性能以及引入智能化的节能设备等一系列举措，可以切实有效地削减暖通空调以及照明等系统方面的能耗，进而从源头处对碳排放以及污染物的释放加以控制。提高资源利用的效率同样是绿色设计所着重追求的一个重要目标。公共建筑通过回收利用雨水、充分利用可再生能源以及大力推广绿色建材等多种方式，促使建筑资源从原本的线性消耗模式逐步转变为循环利用的模式，以此达成资源的高效配置。绿色建筑还十分注重同时实现经济效益和社会效益。通过开展合理的建筑设计以及实施技术集成等相关工作，不但能够降低建筑在整个生命周期当中的运营成本，而且还有助于提升建筑的综合品质以及其在社会公众心目中的形象。除此之外，绿色建筑理念还推动着城市空间朝着

生态化以及人性化的方向不断发展,对于构建起绿色的城市体系以及实现生态文明方面所设定的目标都有着极为重要的促进作用。

## 2 公共建筑设计的绿色化原则

### 2.1 可持续性原则

可持续性原则即需绿色建筑设计理念,从人和自然持续发展视角着手开展建筑设计和建造,把生态意识与建筑设计使用结合,做到绿色建筑设计理念的有效落实,确保人、建筑以及自然在整体上互融。

### 2.2 节能环保性原则

环保性原则即针对建筑在建设以及使用过程里产生的环境污染,需要建筑行业在发展过程中依照能源消耗以及过度污染等具体状况,合理地将环保理念与建筑设计相融,做到生态平衡和建筑绿色环保化,达到建筑设计和自然的协调统一,进行环保型社会的打造。把资源节约、能源高效利用以及环境友好型发展有机地结合起来,推动绿色低碳理念在建筑领域得以全面贯彻落实。

### 2.3 协调融合性原则

协调融合性原则着重指出,在公共建筑的设计进程里,务必要全面且细致地考量建筑和周边自然环境、社会文化以及城市格局之间所存在的整体协调关联以及有机融合状况。绿色建筑绝不仅仅只是建筑自身实现绿色化这它还应当切实体现出和自然景观、气候条件达成的和谐统一状态,从而促使建筑能够融入到所处的环境当中,进而服务于该环境,并且对环境起到一定的改善作用。在实际开展设计工作的过程当中,需要依据具体的地理位置情况来因时制宜地去行动,同时要综合当地的实际气候条件、生态系统以及文化特征等诸多因素,运用与之相匹配的设计策略,使得建筑既拥有绿色节能方面的技术性能,又具备空间美学与环境适应性相互统一的良好特性。有力地推动了公共建筑从原本单一的功能状态朝着多元复合的空间形态转变,进而提升了其对于公众的包容程度以及公众的参与程度。

### 2.4 健康舒适性原则

健康舒适性原则着重考虑建筑内部环境给使用者的身体健康以及心理感受所带来的影响,此原则在绿色建筑设计里占据着人本核心的地位。公共建筑的使用人群颇为密集,其功能也相对复杂,所以在设计的过程当中,需要对空气质量、光照充足程度、噪声控制情况以及温湿度调节等诸多方面的要素予以高度的重视,进而营造出更为舒适、健康的公共使用空间,达成以人为本的绿色设计目标。

## 3 公共建筑中绿色建筑设计理念的实施策略

### 3.1 绿色建筑材料的选择与使用

绿色建筑材料乃是绿色设计理念得以切实落地施行的关键物质根基所在。就公共建筑来讲,在材料选取方面应当优先考虑那些资源耗费相对较低、污染排放量较少并且能够实现循环再利用的环保型建材,像再生混凝土、可以回收利用的钢材、天然的竹木材料以及低 VOC (即挥发性有机化合物) 涂料等等这类材料。这些材料自身不光有着不错的物理力学性能以及较强的耐久特性,并且还在施工以及后续使用的整个过程当中能够有效地削减其对环境所可能产生的影响。与此若能对建筑材料做出本地化的挑选选择,那么这无疑也有助于进一步压低运输环节当中的能耗情况,进而达成对碳足迹的有效把控。在开展选材工作的整个过程里面,还应当全面且综合地去考量材料所具有的隔热、隔音、防火、防潮等一系列综合性能表现,从而切实保障建筑整体在实际运行期间的安全性以及居住使用的舒适性。借助构建起绿色材料方面的数据库,同时制定出相应的材料评价标准,如此便能够为公共建筑的设计工作给予科学层面的依据参考以及技术方面的有力支撑。

### 3.2 公共建筑外部设计优化策略

#### 3.2.1 建筑形态与朝向设计

合理的建筑形态与朝向是节能设计的基础。设计要充分考虑地域气候特征,优先采用有利于自然通风与采光的形体构造,降低建筑外壳对冷热负荷的敏感度。比如在寒冷地区可选用紧凑型体块来减少热量散失,在炎热地区宜采用疏松通透型结构以增强空气流动性。建筑朝向以南向为主,提高采光效率,充分利用太阳能,结合遮阳系统解决夏季过热问题。优化形体与朝向,可大幅降低建筑对机械制冷与照明的依赖,提高整体能效水平。

#### 3.2.2 建筑体形系数控制

建筑体形系数指的是建筑物外表面积和其体积之间的比值,这属于衡量建筑热工性能的一项关键参数。当体形系数越低时,单位体积所出现的能量流失情况就会越少。在开展相关设计工作的时候,需要尽最大努力去降低体形系数,举例来讲,可以采用那种规则且紧凑的体块样式,同时还要减少存在凹凸不平状况的造型设计,通过这样的方式来促使热交换面积得以减少。除此之外,对围护结构的热工性能加以优化也是很有必要的,像是可以让外墙保温层变得更加厚实一些,又或者采用那些具有高性能的绝热玻璃等相关举措,如此一来便能够进一步让建筑的保温隔热能力得到提升。科学合理地对体形系数加以控制,对

于建筑在不同气候条件下实现节能适应性有着十分重要的帮助作用。

### 3.2.3 墙窗比与屋顶开窗面积控制

墙窗比以及屋顶开窗面积对于建筑的采光状况、通风情况还有能耗水平均会产生直接的影响。过高的墙窗比虽说对自然采光较为有利,然而却会致使热量传导增多,并且让室内温度出现较大波动,如此一来便会使能耗负担加重。所以在开展设计工作的时候,需要综合考虑建筑所处的朝向、功能分区的具体情况以及气候方面的特征,科学地去设定墙窗比以及屋顶开窗的比例。在建筑的采光面设置遮阳的相关设施,选用像中空 LOW-E 玻璃这类节能型的窗材,如此便能够在确保视觉舒适的条件之下提升建筑的热工性能。与此对屋顶开窗面积予以合理的把控,防止因过度的阳光直射而引发室内温度过热的情况,这同样有助于保持室内热环境的稳定状态。

### 3.2.4 土地与生态资源合理利用

绿色建筑设计要着重对土地以及生态资源予以节约并加以保护。公共建筑在进行选址的时候,需要避开生态敏感区域还有耕地红线,应当优先去利用闲置用地、已经建设过的区块或者棕地资源,以此达成土地的集约化利用效果。在建筑布局方面,得顺着地形走势来,并且对自然给予尊重,尽力减少大规模的土方开挖行为以及对地貌的破坏情况,与此同时还要把原有的植被与水体系统保留下来。绿地设计能够运用雨水花园、绿色屋顶、垂直绿化等一系列手段,以此来提升地表的透水性能以及生态的多样性,进而构建起良性的微气候环境,强化城市系统对于气候变化所具备的适应能力以及韧性程度。

## 3.3 公共建筑内部空间的绿色设计

### 3.3.1 声环境与热环境设计

声环境设计着重于对室内噪声加以控制,进而营造出安静且舒适的公共空间。借助合理地去布局各个功能区,同时运用吸声材料以及声学隔断等方式,能够有效地将噪音干扰降下来,以此来保障使用者在心理健康方面的情况以及工作方面的效率。热环境设计把侧重点放在对室内温度和湿度进行合理的调控之上,会采用保温隔热材料、智能温控系统等这类手段,从而确保能够拥有冬暖夏凉的那种环境条件。这样的一种双重环境设计,一方面能够满足人性化的需求,另一方面也对降低建筑在运行过程当中的能耗起到帮助作用,进而实现节能与舒适二者达成统一的目标。

### 3.3.2 自然通风与采光优化

充分利用自然通风以及采光,这无疑是绿色建筑实现

节能的重要策略之一。借助合理的建筑布局以及精心设计的窗户,要切实保证室内空气能够顺畅地流通起来,尽量削减对机械通风设备的依靠程度,进而使得能耗得以降低。与此凭借大面积的窗户还有天窗,将充足的自然光引入到室内,如此一来便能减少对人工照明的需求,促使室内光环境的质量得以提升<sup>[1]</sup>。在实际开展具体设计工作的时候,务必要结合当地的气候条件来综合考量,设置相应的遮阳设施,以此防止在夏季出现过度日照的情况,既要保障良好的采光效果,又要避免室内温度过高,从而推动能源能够得到合理的利用。

### 3.3.3 门窗系统节能配置

门窗系统属于建筑外围护的关键部分,它的节能性能会对室内环境质量以及能耗水平产生直接影响。公共建筑适宜采用高性能节能门窗,像是多层中空玻璃、LOW-E 玻璃还有断热铝合金框架这类,以此来提高隔热以及隔音的功效。智能控制系统能够依据室内外的温差情况自动对门窗的开闭进行调节,从而优化空气的流通状况,并且防止热量出现流失的情况。与此合理的密封设计能够有效地阻止冷暖空气发生渗漏现象,进而提升整体的节能效果,确保建筑在运行过程中既舒适又高效。

## 3.4 建筑智能化系统与能源管理

智能化系统在绿色公共建筑当中占据着极为关键的地位,其能够借助数据采集以及分析这一途径来达成对建筑能耗的精确管理目的。把智能照明系统、空调控制系统以及能耗监测系统加以集成之后,建筑便能够依据自身的使用需求去动态地对能源消耗做出调节,如此一来便可以有效避免出现资源浪费的情况。比如说,智能照明系统是能够凭借自然光的强度状况以及人员的活动情况来自动地对灯光的亮度进行调节的,而中央空调系统则会通过传感器来感知室内温度所发生的各种变化,并且据此智能地对自身的运行状态予以调节<sup>[2]</sup>。除此之外,针对能耗数据展开实时的监控与分析,这能够助力管理人员去制定出更为有效的节能策略,进而推动整个建筑朝着绿色低碳的方向实现转型。在未来的发展进程中,倘若能够将物联网技术以及人工智能技术很好地结合起来,那么建筑智能化便能够达成更加高效且更加智能的能源管理水平。

## 3.5 雨水回收与可再生资源利用系统

雨水回收系统在绿色建筑节水方面占据着极为重要的地位。公共建筑能够凭借在屋顶以及地面设置雨水收集的相关设施,把雨水经过初步的过滤以及净化处理之后,将其应用于绿化灌溉、冲厕还有清洁等方面的非饮用水需

求,如此一来便能大幅度地缓解市政供水所面临的压<sup>力[3]</sup>。与此积极地去引入像太阳能光伏、地热能以及风能这类可再生能源技术,进而构建起多元化的能源供应体系,以此提升能源的自给程度,减少对于传统能源的依赖情况。这样的雨水与能源系统的综合运用方式,一方面可以节约资源,另一方面还能够降低运营方面的成本,有力地推动公共建筑朝着真正具备可持续性的绿色发展道路不断迈进。

#### 4 结语

全面落实绿色建筑理念,这无疑让公共建筑的环保性能得以提升,同时也让其使用舒适度有了改善,除此之外,它还进一步推动了城市朝着可持续发展的方向迈进,并且对生态文明建设起到了促进作用。借助对绿色设计原则加以系统应用以及采取具体的技术措施,公共建筑便可以切实有效地减少能源方面的消耗,也能减轻对环境所造成的负荷,进而达成在经济层面、社会层面以及环境层面均能

获益的局面,实现多方面的共赢。在未来,需要强化政策方面的支持力度,同时还要注重技术创新,要深入地推进绿色建筑理念的推广以及应用工作,持续不断地促使公共建筑完成绿色转型,从而为营造更为美好、更为健康并且更具可持续性的城市环境做出应有的贡献。

#### 【参考文献】

- [1] 卢真琼,叶光挺,张兴富,等.绿色建筑设计理念在公共建筑中的应用研究[J].城市建筑空间,2023,30(2):177-178.
- [2] 马俊,丁金红.绿色建筑设计理念在大型公共建筑中的应用[J].美术馆,2023,4(4):109-111.
- [3] 姜宏利.绿色建筑设计理念在公共建筑设计中的应用分析[J].未来城市设计与运营,2022(7):37-39.

作者简介: 张铭昊 (1991.3—), 男, 汉族, 毕业学校: 河北工业大学, 现工作单位: 雄安城市规划设计研究院有限公司。

## 低碳理念下公共建筑设计的优化研究

程 浩<sup>1</sup> 李心田<sup>2</sup>

1. 九易庄宸科技（集团）股份有限公司，河北 石家庄 050000

2. 北方工程设计研究院有限公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**随着全球气候变化问题的加剧，建筑行业作为能源消耗与碳排放的重要来源，其绿色转型已成为推动低碳社会建设的关键环节。公共建筑因其体量大、能耗高、使用频繁，成为低碳建筑设计研究的重点领域。文中在低碳理念的指导下，从建筑规划布局、建筑材料选择、能源系统优化、绿色技术应用及后期运维管理等方面，对公共建筑的低碳设计策略进行系统探讨。研究指出，低碳公共建筑应在全生命周期内实现能源节约与碳排放控制的有机统一，借助建筑科技与生态理念的融合，构建节能高效、舒适宜居的公共空间。文章的结论为公共建筑设计提供了科学的优化思路，对推动我国建筑业绿色转型与可持续发展具有重要意义。

**[关键词]**低碳理念；公共建筑；节能设计；绿色建筑；可持续发展

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18353 中图分类号: TU201 文献标识码: A

## Research on Optimization of Public Building Design under Low Carbon Concept

CHENG Hao<sup>1</sup>, LI Xintian<sup>2</sup>

1. Jiuyi Zhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

2. North Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the intensification of global climate change, the green transformation of the construction industry, as an important source of energy consumption and carbon emissions, has become a key link in promoting the construction of a low-carbon society. Public buildings have become a key area of research in low-carbon building design due to their large size, high energy consumption, and frequent use. Guided by the low-carbon concept, this article systematically explores low-carbon design strategies for public buildings from the aspects of building planning and layout, selection of building materials, optimization of energy systems, application of green technologies, and later operation and maintenance management. Research suggests that low-carbon public buildings should achieve an organic unity of energy conservation and carbon emission control throughout their entire lifecycle. By integrating building technology with ecological concepts, they can construct energy-efficient, efficient, comfortable, and livable public spaces. The conclusion of the article provides a scientific optimization approach for public building design, which is of great significance for promoting the green transformation and sustainable development of Chinese construction industry.

**Keywords:** low carbon concept; public buildings; energy-saving design; green building; sustainable development

### 引言

近年来，低碳发展已成为全球可持续发展的战略方向。建筑业作为能源消耗与碳排放的重要行业，占全球碳排放总量的近 40%。公共建筑如办公楼、学校、医院、会展中心等，其能耗密度显著高于住宅建筑，若在设计阶段缺乏系统性的低碳思维，将对环境造成持续性负担。我国提出“双碳”目标以来，低碳建筑设计的研究与实践不断深化，公共建筑作为城市生态体系的核心组成部分，其低碳设计优化已成为建筑学界与工程领域的重要研究课题。本

文旨在分析低碳理念在公共建筑设计中的应用原则，探讨优化策略与技术路径，为实现建筑领域的绿色转型提供理论依据与实践参考。

### 1 低碳建筑设计的理论基础与内涵

#### 1.1 低碳理念的核心内涵

低碳理念强调在建筑全生命周期内通过技术创新与设计优化，实现能源消耗与碳排放的最小化。这一理念不仅关注建筑的节能性能，还涵盖材料选择、施工方式、设备运行及废弃物处理等环节。其目标是实现生态、经济与

社会效益的协调统一。

### 1.2 公共建筑低碳设计的特征

公共建筑低碳化的特点在于综合性与系统性。与住宅建筑相比,公共建筑功能复杂、人员密集、能源使用多样,因此其低碳设计需兼顾节能性与舒适性、经济性与美观性。低碳公共建筑设计应通过系统控制手段,实现建筑性能与环境可持续的动态平衡。

### 1.3 低碳设计的多维度构成

低碳设计是一种多维度综合体系,涵盖建筑学、环境工程、材料科学与信息技术等多个领域。它通过空间优化、能源管理、智能控制、材料选择等手段,构建出以生态效益为导向的建筑系统,实现人与自然的和谐共生。

## 2 低碳理念下公共建筑设计的总体原则

### 2.1 全生命周期的节能控制原则

低碳设计应贯穿建筑全生命周期,包括规划、设计、施工、运营与拆除阶段。设计阶段的节能理念决定了建筑未来的碳排放水平,因此应从源头进行能耗模拟与评估,确保建筑在运行中保持较低能源强度。

### 2.2 因地制宜与生态融合原则

公共建筑的低碳设计应充分回应地域的自然与人文特征,通过对气候条件、地形地貌和文化背景的深入分析,制定具有适应性的设计方案。不同地区的气候差异决定了节能策略的重点与方式。寒冷地区的建筑应注重保温与隔热,通过高性能围护结构、紧凑体型设计以及被动式采暖手段减少热量流失;炎热地区则需强化通风与遮阳设计,利用自然风和建筑遮蔽来降低室内温度,从而减少空调能耗。地形起伏较大的区域可结合地势特点进行半地下式或分层式布局,使建筑与自然环境融为一体。

### 2.3 技术创新与可持续发展原则

低碳建筑设计的核心在于以科技创新为驱动力,将智能化、信息化与新材料技术有机融合,构建高效、绿色、可持续的建筑系统。智能控制技术能够实现对能源的动态监测与优化配置,使建筑在运行中保持高效运转;信息化管理系统则通过数据分析提升决策的科学性,让建筑运维更加精准。新材料的应用,如高性能保温材料、可再生复合结构与自修复混凝土,不仅提高了建筑的耐久性,也显著降低了能源消耗。设计过程中应充分考虑可再生能源的集成使用,将太阳能、风能与地源热能融入建筑体系,实现能源的多元化与平衡化。这样的综合设计理念使建筑从被动节能转向主动调控,在满足功能与舒适性的同时实现碳排放的持续降低,体现科技与生态相融合的现代建筑精神,推动建筑行业向高质量、低碳化方向发展。

## 3 公共建筑低碳设计的空间与材料优化策略

### 3.1 建筑布局与空间结构的低碳优化

建筑的空间布局对能源利用效率具有决定性作用。合理的朝向不仅能够提升自然采光与通风效果,还能有效减少人工照明与空调系统的能耗,使建筑在运行过程中实现更高的能效表现。建筑师在总体规划中应充分分析当地的日照规律与主导风向,结合噪声控制与景观视线,构建节能与生态兼顾的空间格局。通过对建筑体量与开口位置的科学安排,可以最大限度地利用自然资源,减少能源浪费。中庭、廊道、天井等设计元素的引入,为空气循环与热量交换提供了通道,使室内微气候更加舒适宜人。这种基于环境响应的空间组织方式,使建筑在满足功能需求的同时具备生态适应性。合理的布局设计不仅体现节能理念的实践,也展现了建筑与自然和谐共生的智慧,让空间成为可持续发展的有机载体。

### 3.2 绿色材料的选择与应用

建筑材料的选择对碳排放水平有着直接而深远的影响。低碳建筑理念强调在设计与施工过程中应优先使用可再生、可回收、低污染的环保材料,使建筑在全生命周期内实现能源与资源的高效利用。高性能保温材料能够减少建筑的能量损耗,透光混凝土在保障结构强度的同时提高自然采光效率,竹基复合材料则以其生长周期短、可再生性强的特征成为绿色建材的重要选择。建筑师在材料选用上不仅要关注其物理性能,还应重视生产、运输与施工环节中的碳足迹,减少因长距离运输造成的能源消耗。推动建筑材料的本地化供应,有助于形成区域性的绿色建造体系,实现环境效益与经济效益的平衡。通过科学的材料策略,建筑能够在节能降碳的基础上展现独特的美学价值,真正实现生态、文化与技术的融合发展。

### 3.3 建筑围护结构的节能设计

建筑围护结构是建筑内部能量与外部环境之间的主要交换界面,也是能量损失最集中的环节。通过科学的结构设计与材料选择,可以显著提升建筑的保温与隔热性能,从而降低能耗。优化墙体构造、提高保温层厚度、选用高性能隔热材料,能够有效减少热量在传递过程中的损失。双层幕墙系统的应用不仅增强了保温效果,还能通过中空层调节气流,改善室内热环境。高效隔热窗的使用,使室内温度更加稳定,减少外界冷热空气的渗透。遮阳系统与自然通风策略的结合,则进一步强化了建筑的被动节能能力。通过对光照与风向的合理引导,建筑能够在不同季节中实现热环境的自我调节,降低对空调系统的依赖。围护结构的优化不仅体现了节能理念的落地,也展现了建筑设

计对生态平衡与可持续发展的积极响应。

#### 4 低碳建筑的能源系统与技术创新路径

##### 4.1 可再生能源系统的集成应用

公共建筑在节能减排中承担着重要责任,可再生能源技术的应用为其实现低碳运行提供了有效途径。太阳能、地源热泵与风能等清洁能源的引入,使建筑能够减少对传统能源的依赖,构建更加绿色的能源体系。太阳能光伏系统可为建筑提供稳定电力,满足照明、办公设备及部分空调系统的能源需求;太阳能热水系统则通过集热装置为生活与服务空间提供热水,减少燃气或电能消耗。地源热泵技术利用浅层地能实现高效的冷热调节,在不同季节间自动平衡能量交换,提升运行效率。风能系统的合理布置也能为建筑补充可再生动力。这些技术的综合应用使公共建筑在运行阶段大幅降低能耗与碳排放,展现出绿色、智能、可持续的发展方向,为未来城市建设树立低碳典范。

##### 4.2 智能控制系统的节能管理

建筑智能化的广泛应用为低碳运行提供了强有力的技术支撑。通过智能照明、智能空调与能耗监测系统的协同控制,建筑能够根据实时环境与人流变化自动调节设备状态,实现能源的动态分配与精细化管理。传感器与数据算法的结合,让系统能够主动识别使用需求,在保障舒适度的同时最大限度地减少能源浪费。建筑信息模型(BIM)与物联网技术的引入,使设计者与管理者能够在建筑全生命周期内对能耗进行监测与分析。数据的持续积累与反馈有助于优化运行策略,提前预判设备能效问题,提升维护的科学性与经济性。智能化系统不仅提高了建筑的运行效率,也让低碳理念从设计阶段延伸至运营管理的每个环节,使建筑成为技术与生态融合的载体,推动城市建设向高效、绿色、智慧的方向发展。

##### 4.3 水资源与废弃物的循环利用

低碳建筑的核心不仅在于能源节约,更在于资源的高效利用与循环再生。建筑在设计阶段就应融入节水与资源回用理念,通过雨水收集系统、灰水回用系统和高效节水器具的配置,实现水资源的多层次利用。这样的系统可将雨水与生活污水经过简单处理后重新用于景观灌溉、清洁等非饮用环节,减少对自来水的依赖,降低建筑的整体运行能耗。在施工与运营阶段,废弃物的分类与再利用同样至关重要。对建筑废料进行回收再加工,不仅能减少填埋量,还能为再生材料的使用创造条件。通过建立完善的回收体系与管理机制,建筑可逐步向“零废弃”目标迈进。资源循环利用的理念让低碳建筑不再局限于节能技术的

应用,而成为推动社会绿色转型的重要力量,使建筑真正承担起生态文明建设的责任。

#### 5 低碳理念下公共建筑设计的未来发展方向

##### 5.1 低碳建筑标准化与政策支持

推动低碳公共建筑的普及,离不开完善的政策支持与制度保障。建立健全的政策体系与设计标准,是实现建筑业绿色转型的基础。政府应从宏观层面制定明确的节能设计规范与碳排放标准,使低碳理念贯穿建筑规划、设计、施工与运维的全过程。通过立法与政策引导,可以为建筑行业提供可操作的技术路径和评价体系。完善的激励机制也是推动低碳建筑发展的关键环节,可通过税收减免、财政补贴、技术奖励等方式,鼓励企业与设计机构积极参与低碳建筑的研发与实践。政策的推动不仅能提升建筑能效水平,也能促进新材料、新技术的创新应用。行业在政策引导下将形成可持续发展的良性循环,让低碳建筑从个别示范走向普遍实践,最终实现生态效益、经济效益与社会效益的统一,推动城市建设迈向绿色与高质量发展的新阶段。

##### 5.2 数字化与智能化技术的深度融合

随着人工智能与大数据技术的不断进步,未来公共建筑的低碳设计将更加依赖数字化手段的支持。建筑师可以利用能耗预测模型,对不同设计方案进行精确的碳排放分析,提前判断建筑在运行过程中的能源消耗趋势。这种基于数据的设计方法让方案评估更加科学,为优化结构形式、材料选择与空间布局提供有力依据。虚拟仿真技术的应用进一步拓展了设计的可能性,设计者能够在虚拟环境中模拟建筑与气候、光照、风向等因素的互动,探索最优的节能策略。智能运维系统的引入也让建筑的管理进入全生命周期模式,通过实时监测与数据反馈,实现能源使用的动态调控与持续优化。数字化设计与智能运维的结合,使建筑从设计到运行的每一个环节都具备节能意识,让低碳理念真正落地,推动建筑向高效、绿色、智慧的方向发展。

##### 5.3 社会参与与公众意识提升

低碳建筑的推广并不仅仅依靠技术手段的更新,更需要全社会的认知提升与行为转变。节能设计、绿色材料和智能系统能够为建筑带来低碳效益,但如果缺乏公众的理解与参与,其效果将难以长期维系。公众教育是推动这一理念落地的关键环节,通过宣传低碳建筑的价值与实际意义,可以让更多人意识到自身行为与环境之间的密切关系。社区在这一过程中也应成为实践的主体,鼓励居民参与节

能项目与绿色空间建设,让节能减排从设计理念转化为生活方式的自觉选择。使用者在日常中践行低碳理念,从节约能源、优化居住习惯到支持绿色技术应用,都是对环境的积极回应。只有当低碳理念融入社会文化与生活常态,建筑低碳化才能真正成为全民共建的目标,构建人与自然和谐共生的可持续未来。

## 6 结论

低碳理念下的公共建筑设计是建筑业可持续发展的重要方向。本文通过对低碳建筑设计原则、空间优化、能源利用及技术创新的系统分析,指出公共建筑在设计阶段应强化生态思维,优化能源结构,融合智能技术,注重全生命周期管理。未来的公共建筑设计不仅应实现节能减排,更应在文化表达与社会责任中体现低碳价值观。低碳建筑

的发展将引领城市建设的绿色转型,为实现“双碳”目标与生态文明建设贡献力量。

### [参考文献]

- [1]李娜.低碳理念下的公共建筑节能设计研究[J].建筑科学,2021(6):58-64.
- [2]周建.公共建筑绿色设计与能源系统优化分析[J].建筑节能,2022(8):45-52.
- [3]陈伟.基于可持续发展的低碳建筑设计创新路径探讨[J].建筑技术开发,2023(4):71-78.

作者简介:程浩(1986.2—),男,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:九易庄宸科技(集团)股份有限公司;李心田(1984.9—),女,汉族,毕业学校:河北工业大学,现工作单位:北方工程设计研究院有限公司。

## 城市高架桥抗震设计关键技术与结构体系分析

梁朝阳 袁野\*

雄安城市规划设计研究院有限公司, 河北 保定 071700

**[摘要]**城市交通的重要基础设施城市高架桥, 其抗震性能直接影响地震灾害中的交通安全与救援效率, 要分析高架桥在不同地质条件和结构形式下的受力行为需结合地震作用下的动力特性, 并且探讨支座设计、墩柱刚度分布、隔震减震技术在结构体系中的协同作用, 提出基于性能的抗震设计理念以优化结构布置并提高整体抗震韧性和恢复力, 采用典型案例研究的方式验证关键技术在实际工程中的适用性与有效性, 从而为高架桥抗震设计提供技术支撑。

**[关键词]**城市高架桥; 抗震设计; 结构体系; 隔震技术; 性能化设计

DOI: 10.33142/ect.v3i11.18349 中图分类号: U448.28 文献标识码: A

### Key Technologies and Structural System Analysis for Seismic Design of Urban Elevated Bridges

LIANG Chaoyang, YUAN Ye\*

Xiong'an Urban Planning and Design Institute Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071700, China

**Abstract:** Urban elevated bridges are important infrastructure for urban transportation, and their seismic performance directly affects traffic safety and rescue efficiency in earthquake disasters. In order to analyze the stress behavior of elevated bridges under different geological conditions and structural forms, it is necessary to combine the dynamic characteristics under earthquake action, and explore the synergistic effect of bearing design, pier column stiffness distribution, and seismic isolation and reduction technology in the structural system. A performance-based seismic design concept is proposed to optimize structural layout and improve overall seismic resilience and recovery. The applicability and effectiveness of key technologies in practical engineering are verified through typical case studies, providing technical support for seismic design of elevated bridges.

**Keywords:** urban elevated bridge; seismic design; structural system; seismic isolation technology; performance based design

### 引言

城市化进程加快, 高架桥在缓解交通压力方面有着不可替代的作用, 不过地震灾害频频发生, 严重威胁着城市基础设施, 像高架桥这种长线型结构, 其抗震性能越来越受关注, 结构遭到破坏不但影响交通运行, 还可能堵住救援通道, 让灾后损失更严重, 探索高架桥在地震下的响应机制, 研究更安全可靠的结构体系和设计方法, 这对提升城市抗震韧性很关键。

### 1 城市高架桥抗震设计的必要性与挑战

城市高架桥是重要的交通枢纽, 其抗震能力与城市运行和安全息息相关, 分析其抗震设计的必要性和挑战有助于提升结构可靠性与防灾能力。

#### 1.1 城市交通体系中的高架桥重要地位

城市化快速推进使交通需求日益增长, 高架桥因占地少、通行效率高而被当作缓解城市交通压力的重要手段, 在城市主干道、立交枢纽、快速通道等地常是交通“主动

脉”, 不仅承载大量车辆通行, 紧急时还得保障通行和疏散, 其结构布局集中、长且跨度大, 一旦被破坏, 不但会造成区域性交通瘫痪, 生命救援和城市秩序恢复都会受到影响, 高架桥在城市交通体系里不可替代, 其抗震安全性影响灾后交通功能可用性, 是城市抗震韧性建设的关键。

#### 1.2 地震灾害对高架桥结构的威胁

高架桥是延展性强、连续性高的线性结构, 地震等地质灾害来袭时其受力模式复杂、破坏形式多样, 典型地震案例显示震害常集中在墩柱破坏、梁体落跨、支座失效等方面, 某个局部构件一旦失效可能引发连锁反应, 致使整体结构失稳甚至倒塌, 城市地质条件复杂, 软土层、断层带和不均匀地基等因素使地震效应的不确定性进一步加大, 高架桥大多位于城市核心区域, 建筑密集、人流车流多, 抗震性能不足会直接危及人民生命财产安全、严重干扰灾后抢险与物资运输, 地震活动日趋频繁且强度增大, 提升高架桥结构的抗震能力刻不容缓。

### 1.3 当前抗震设计面临的关键难点

现行规范虽已对桥梁抗震设计有基本要求,但高架桥具体应用时仍有不少难题,因其结构体系多样,像单柱式、门式、连续梁、多跨联通这些,它们对地震作用的响应差别很大,一套标准难以完全适用,并且设计时精准评估地震动参数、结构动力特性不容易,多向地震耦合作用和结构非线性行为的模拟还不够,而且抗震的关键构件如支座、墩台与基础系统协同设计有不足,一些工程不太重视隔震、减震技术,实际抗震能力达不到预期,旧桥改造时原结构资料缺失、荷载标准有变化、施工技术受限制,这让抗震提升更难,突破关键技术瓶颈,让性能化、系统化抗震设计理念落地,是当前高架桥抗震设计急需解决的核心问题。

## 2 高架桥地震响应特性与影响因素分析

高架桥在地震作用下响应特性及其影响因素被了解是开展科学合理抗震设计的基础,对桥梁抗震性能的提升有着重要的指导意义。

### 2.1 地震荷载作用下的结构响应特点

高架桥自身结构形式和地震动特征与它在地震作用下的响应密切相关,由于高架桥线性延展特征明显,地震中桥梁各部分所受动能不均匀,相位差、周期差及耦合振动现象常出现,使得结构有扭转、摆动等复杂响应,并且墩柱、支座和桥梁连接部位会集中地震荷载引起的结构变形,容易成为薄弱环节,产生塑性铰或局部失稳,纵向地震作用下,连续梁桥梁体可能滑移或落梁,横向地震往往对桥墩和桥台造成较大水平冲击,桥梁周期接近地震主频时易共振,结构响应会被显著放大,要准确预测高架桥动力特性,结合地震动特征分析其响应机制,这是精准抗震设计的前提。

### 2.2 地质与场地条件对响应的影响

高架桥的地震响应被其所处地质环境决定性地影响着,复杂地质条件像软弱土层、填土地基和断层带,地震时容易放大地震波能量、引发强烈地面运动,使得基础沉降、侧移,结构甚至不均匀变形,并且场地类型对地震动输入特征有直接影响,硬质地基较稳定,软土层场地则易引发长周期振动,拉长结构响应时间,增加受力持续性,场地地形变化如斜坡、河谷、高填方等或许也会形成反射波与聚焦效应,局部放大地震烈度,在实际设计里要是忽略地质和场地差异性,结构抗震能力评估往往就会失真,详细的地质勘查和地震动参数分析得开展起来,结合区域地震风险特征,这是高架桥抗震设计科学性提高的重要保障。

### 2.3 结构参数变化对响应的敏感性

高架桥地震响应对结构几何布置和构件参数变化很

敏感,跨径越大的桥梁结构越柔性,地震中越易发生大位移且墩柱高度、刚度分布不均会使结构扭转和局部失稳,桥面连续性和支座类型决定结构整体响应模式,铰接结构虽减小地震力传递但易落梁且连续梁桥有一定冗余度,不过其能量耗散能力要求更高,再次,伸缩缝、支座、限位装置等附属构造在地震中的性能直接影响结构响应,若设计不足或老化失效的话结构易受力失衡,还有,结构质量分布和阻尼比也关键影响响应特性,设计与建模时,要充分考虑各类参数变化范围和不确定性,多工况、多参数分析来提高抗震设计的鲁棒性和适应性。

## 3 抗震关键技术在高架桥设计中的应用

关键技术合理应用能提升高架桥抗震性能且抗震措施系统化整合有助于构建韧性和安全性更佳的桥梁结构体系。

### 3.1 支座抗震设计的技术路径

上部结构和下部墩台靠支座这一重要构件来连接,在地震作用下支座承担能量传递和变形调节的双重功能。要有效控制结构响应并防止梁体滑移、落梁等灾害性破坏就少不了合理的支座设计。抗震球型支座、减震橡胶支座、弹性滑动支座等常用抗震支座具备变形适应性和能量耗散能力。支座设计时考虑到地震动方向性、结构变位需求、温度变化影响才能保证强震作用下有足够的承载力和位移容许度。限位装置的配置对防止结构过度位移非常关键,要和支座系统协同设计才能形成多道防线。高架桥结构要安全稳定,对不同地震工况进行响应分析并优化支座类型和布置形式是关键环节。

### 3.2 隔震与减震技术的融合应用

抗震理念发展起来后,隔震与减震技术就成为提升桥梁抗震能力的重要手段,在桥梁结构里设置如叠层橡胶支座、铅芯支座之类的隔震层的隔震技术能有效减少地震能量传递、延长结构自振周期从而减小地震反应,靠黏滞阻尼器、屈曲约束支撑(BRB)、摩擦阻尼器等构件的减震技术通过耗散地震能量、控制结构变形来提升抗震性能,高架桥设计时这两种技术常一起使用,在主墩设置隔震支座、在梁体或者墩柱之间配置阻尼器以使隔震减震协同工作,该技术在控制位移、降低内力、延缓结构失效方面效果明显,在地震烈度高、软土层分布广的地方尤其适用,隔震和减震技术融合不仅能改善结构地震响应,还能提高桥梁的可恢复性和服务连续性。

### 3.3 抗震构造细节设计的重要性

高架桥性能得以保障除了靠总体结构体系和关键构件外,构造细节的抗震设计也是基础,伸缩缝、限位装置、

桥墩与盖梁连接、墩台配筋以及基础锚固等部位都被细节设计覆盖,地震中任何一处薄弱环节都可能引发灾害,伸缩缝得满足结构在地震位移下的变形需求,防止剪切破坏和开裂,限位装置要有足够强度和延性,防止梁体偏移超限,墩柱配筋设计要符合延性要求,避免地震时出现脆性破坏,基础设计要加强桩基与土体相互作用分析,提高抗拔、抗滑能力,细部构造在整体结构里占比不大,但其设计水平却直接关系到桥梁整体的抗震韧性和失效模式,构造细节抗震能力的强化,是高架桥系统性安全保障不可或缺的一环。

#### 4 高架桥结构体系的抗震优化策略

高架桥结构体系的优化设计处于提升整体抗震能力的核心地位,通过系统布局调整与构造协同能提高结构韧性和地震适应性以保障桥梁安全运行。

##### 4.1 合理选择结构体系形式

高架桥的结构体系形式对其地震表现有着决定性影响,不同体系的受力路径与破坏机制不同,像连续梁桥、刚构桥、悬臂组合桥等体系在地震作用下变形能力和能量耗散特性各异,连续体系构造连续且内力能重新分布,抗震性能较好,适用于中等烈度地震区,而分离式桥梁施工和变形控制方便,但强震时易落梁或连接失效,要根据地震烈度、桥址地质条件和功能需求优先选择适应性强的结构体系,结构布置以简洁、对称为宜,避免复杂连接和不均匀刚度分布以减少地震时的扭转效应和应力集中,并且要注重结构整体性和局部构件性能协调,通过连续性设计提高结构冗余度以提升极端工况下的韧性和稳定性,合理选择结构形式是抗震优化的首要前提。

##### 4.2 强弱构件协同设计原则

在抗震体系里,结构构件得形成明确的“强-弱”层级关系,即采用强基础、强连接、弱耗能构件的组合方式,让地震能量在能控制的地方集中耗散,桥墩作为主要耗能单元,其配筋和截面设计要符合塑性发展要求,而连接节点、盖梁和基础要有足够强度,不能提前坏掉,并且支座和限位装置要遵循“可动但不失控”原则,允许结构有必要变形的控制其不发生灾难性位移,再者,使用屈服型构件(像屈曲约束支撑)可人为设置破坏机制以达成结构“以小保大”的设计目的,构件间功能分工、强弱搭配,这既增强了结构抗震韧性,也为地震后的结构检测和修复创造了有利条件。

##### 4.3 抗震设计与施工一体化推进

高架桥抗震的优化不能只在设计阶段体现,施工全过程也得贯穿,才能让“设计-施工-运维”一体化落地,设

计环节要充分顾及施工的可行性以保证抗震构造在现场能有效施行,像支座和隔震层的设置要方便后期更换和维护且复杂节点要用模块化预制技术来保证质量和连接精度,施工阶段要严格把控关键节点的质量验收且配筋、锚固、焊接等工艺要达到设计标准以免因施工有偏差使抗震性能变弱,施工单位要依据施工进度制定动态调整方案让每一道工序和抗震功能协调起来,运维环节要建立地震后快速检测机制和结构健康监测系统以实时了解桥梁响应状态从而灾后能精准评估和快速反应,设计和施工协同起来就能提升抗震体系整体的可靠性,进一步保障高架桥在地震中的安全和可持续运行,给未来智慧桥梁建设打下技术基础。

#### 5 典型工程案例分析与技术应用验证

典型高架桥工程的抗震设计与应用案例可验证关键技术的有效性并总结经验做法,给后续桥梁抗震优化提供实践参考。

##### 5.1 北京四环路高架桥隔震改造

北京四环路作为城市核心交通环线,其高架桥系统背负着巨大车流压力,2008年,北京市政工程设计研究院对其四环路高架桥的数段进行隔震改造,用铅芯橡胶支座(LRB)换掉原来的刚性支座,由于铅芯橡胶支座能提供初始刚度且能量耗散能力也不错,从而让桥梁自振周期有效延长,改造后,桥梁结构的地震响应降低了大概40%,桥墩剪力减少了约35%,整体抗震性能显著提升,还配套增设限位装置以避免梁体在地震时过度位移,确保结构完整,这个项目是我国早期大规模高架桥隔震改造的示范工程,技术应用成熟且运行稳定。

##### 5.2 台北捷运南港线高架段抗震设计

台北捷运南港线高架段所穿越之处地震活动频繁,其抗震设计烈度达0.4g,这一高架段采用“强墩弱梁”结构体系,并且像阻尼器、屈曲约束支撑(BRB)这类减震装置被广泛应用,墩柱底部被设计成可控塑性铰区,靠限位钢筋以及横向箍筋加密来实现延性耗能,从而强震之下结构不会发生脆性破坏,关键连接节点用钢管混凝土嵌套结构以提高剪切承载力,通过三维非线性动力分析进行结构多工况模拟,结果显示地震最大位移控制在200mm以内,满足安全使用要求,这一工程验证了多项抗震关键技术在复杂城市环境中的实际效果。

##### 5.3 成都东三环高架桥智能监测系统应用

成都东三环高架桥这一西南地区典型的城市快速通道全长大概18公里,建成之后给它配置了包含高灵敏度

加速度计、倾斜传感器以及无线数据采集终端的地震响应实时监测系统,该系统能够实时采集桥梁在地震作用下的响应并远程分析,还具备震后自动报警和快速评估功能,2022年四川泸定发生6.8级地震时这座桥的监测系统成功记录下地震动全过程数据,分析结果显示结构最大加速度没超过0.12g且各节点位移比设计限值低得多、结构完好无损,这说明智能化监测技术对桥梁抗震有很重要的辅助价值且给震后决策提供了科学依据。

## 6 结语

城市交通的核心载体城市高架桥直接影响城市运行的连续性与公共安全的抗震性能,通过系统分析高架桥地震响应特性、结构体系选择、关键抗震技术及典型工程实践可知,提升桥梁抗震能力的关键在于科学结构设计、合理技术应用以及完善施工与运维体系,以后要持续推进性能化设计理念、强化地震模拟与响应评估并融合智能监测与快速响应机制,构建多层次多维度抗震防护体系,以全面提升高架桥在地震灾害中的适应性与韧性,给城市交通

安全有力支撑。

## [参考文献]

- [1]廖鑫,刘楠.城市高架桥抗震设计中的关键问题[J].住宅与房地产,2017(3):259.
  - [2]王凯华.考虑城市复杂桥梁节点的交通系统抗震韧性功能损失分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
  - [3]韩振.城市轨道交通桥梁工程设计的安全风险分析与对策[D].南京:东南大学,2020.
  - [4]张海莹.基于三重摩擦摆支座的城市高架桥梁隔震性能研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
  - [5]王培晓.地震高烈度区高架桥结构选型及受力特点分析[J].城市道桥与防洪,2022(1):50-53.
- 作者简介: 梁朝阳 (1992.10—), 男, 汉族, 毕业院校: 西安建筑科技大学; 现就职单位: 雄安城市规划设计研究院有限公司; \*通讯作者: 袁野 (1994.7—), 男, 汉族, 毕业院校: 西南交通大学, 现就职单位: 雄安城市规划设计研究院有限公司。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

195 Pearl's Hill Terrace, #02-41, Singapore 168976

官方网站

[www.viserdata.com](http://www.viserdata.com)

