



www.viserdata.com

自然科学研究

NATURAL SCIENCE RESEARCH

季刊

■ 主办单位: Viser Technology Pte.Ltd.

■ ISSN 3041-0584(online) 3041-0576(print)

中国知网 (CNKI) 收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊



2025 **3**

第2卷 总第6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.



自然科学研究

Natural Science Research

2025年 第2卷 第3期 (总第6期)

主办单位: Viser Technology Pte. Ltd.

I S S N: 3041-0584 (online)

3041-0576 (print)

数据库收录: 中国知网收录期刊

RCCSE权威核心学术期刊

发行周期: 季刊

收录时间: 9月

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: 马伟芳

学术副主编: Ajmal Khan

安 宁 安俊明

蔡懿苒 甘银波

张学东 吕贻忠

曹 婷 骆 辉

责任编辑: 尹小文

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; 作者文图责任自负, 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

学术争鸣

森林育林与生态修复结合的可持续发展研究... 许洪斌 1

畜牧业科学

畜禽养殖场环境控制对动物健康和生产性能的影响.....

..... 杨 曼 4

人类活动干扰下野生动物生境退化机理与恢复策略研究..... 顾 瑞 8

化学科学

二氧化硫污染治理技术的研究进展与未来展望.....

王晨晨 苏奇祥 黄龙祥 农熙悦 曾月俊 黄在银 12

GBL 装置 1,4-丁二醇汽化器结垢成因分析及优化改进研究..... 邓仔勇 16

黄铁矿基类芬顿催化剂在有机污染物处理中的研究进展..... 黄 鑫 农熙悦 黄旭东 黄圆圆 李忠明

黄在银 20

生态与环境

新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设

..... 朱文瑜 23

生态环境保护工程中的污水处理问题探析..... 刘继东 27

地表水重金属元素光谱检测方法在农村黑臭水体治理中的实效分析..... 谢舟扬 丁泳博 30

废旧地膜资源化研究进展..... 彭浩雨 任铁真

张锦妮辉 范 卫 邓书礼 张婷婷 34

满洲里旅游季高影响天气特征分析与致灾危险性评估

..... 赵碧莹 王浩东 37

生物科学

叶片结构在可乐烟区烟叶评级中的正确应用.....

..... 熊 科 鲁艳红 范自众 杨彬彬 林 婷 41

食品科学

关于加强预制菜行业标准和评价体系建设的建议.....
..... 王丽媛 黄 鲁 44

资源与地质

基于水质可达的湖湾水环境综合治理.....
刘清华 黎作尚 丰 莉 邓柏松 韩振华 黄璐怡 48
平原水库泥沙淤积对水文情势及水资源利用的影响研
究..... 王宏东 53

材料科学

柔性压电型声学超材料研究..... 李铁莲 56
激光电弧复合增材制造 TC4 组织与力学性能研究.....
.....钱梓尧 徐萌翀 李文龙 翟文正 62

70/30mol%P (VDF-TrFE) 等温晶动力学的超快扫描量
热研究..... 冯晓雯 68

复合增材制造 TC4 合金耐腐蚀性能研究.....
..... 盖文卓 翟文正 71

光电信息与计算机科学

眼镜片顶焦度检定结果的不确定度评定..... 王 磊 74

计算机网络攻防渗透技术的分析和研究.....
..... 张佩云 郝鹏宇 78

电力生产过程 PLC 设备国产化替代策略与路径研究.....
..... 陈小波 邵 全 踪家帅 杨文涵 弭尚文 82

森林育林与生态修复结合的可持续发展研究

许洪斌

宽城满族自治县造字岭林场, 河北 承德 067600

[摘要]森林是陆地生态系统的重要组成部分,是人类文明发展的摇篮和起源。回顾世界各国的发展史,森林先是在人们寻求利益的洪流中遭致破坏,然后又得到努力的修复。森林是维护地球生态环境的关键一环,由于其可再生性及其在社会、生态、经济等各方面所发挥的巨大作用,林业必将在我国“可持续发展”战略中占据重大的位置,得到人们更多的关注。

[关键词]森林育林;生态修复;结合;可持续发展

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17719

中图分类号: X171

文献标识码: A

Research on Sustainable Development Combining Forest Cultivation and Ecological Restoration

XU Hongbin

Kuancheng Manchu Autonomous County Zaozilong Forest Farm, Chengde, Hebei, 067600, China

Abstract: Forests are an important component of terrestrial ecosystems and the cradle and origin of human civilization development. Looking back at the development history of countries around the world, forests were first destroyed in the tide of people seeking benefits, and then they were restored through efforts. Forests are a crucial part of maintaining the Earth's ecological environment. Due to their renewability and their enormous role in various aspects such as society, ecology, and economy, forestry will undoubtedly occupy a significant position in Chinese "sustainable development" strategy and receive more attention from people.

Keywords: forest cultivation; ecological restoration; combination; sustainable development

引言

随着全球生态环境问题变得日益突出起来,森林作为陆地生态系统当中极为重要的组成部分,其在维持生态平衡、调节气候、涵养水源以及保护生物多样性这些方面,发挥着无可替代的关键作用。不过,长期以来受到过度采伐、土地开发、火灾、病虫害还有气候变化等诸多因素的影响,致使大量森林资源出现退化情况,生态系统的功能也遭受了损害,进而使得水土流失、土地沙化以及生物多样性下降等一系列问题一天比一天严重,给区域生态安全以及社会可持续发展带来了巨大威胁。在这样的大背景之下,森林育林和生态修复这两者有机结合起来,便成为了实现生态系统恢复以及可持续管理的一条极为重要的途径。森林育林主要是通过人工种植、林地更新以及管理优化等相关措施,以此来提高森林的覆盖率并增强其生态功能。而生态修复着重于恢复生态系统的结构、功能以及稳定性。将两者融合到一起,不但可以加速退化生态系统恢复的进程,而且还能够强化生态系统自身的抗逆性以及适应性。当下,国内外在森林育林与生态修复相结合方面的相关研究已经取得了一定程度的成果,然而在模式创新、技术应用、可持续发展策略以及制度保障等诸多方面,依旧存在着一些不足之处,特别是对于智慧化管理、生态廊道建设、社会参与机制以及绿色低碳路径展开的系统研究,更是显得不够充分。所以,本文从森林育林与生态修复相互结合的角度出发,去剖析其中的主要模式和技术路径,

并且深入探讨可持续发展的相关策略,从而为提升森林生态系统的稳定性、改善生态环境的质量、推动区域生态安全以及达成人与自然和谐共生的目标,给予相应的理论支撑以及实践方面的参考。

1 森林育林与生态修复结合的主要模式与技术路径

1.1 自然恢复与人工促进相结合模式

自然恢复与人工促进相结合的模式,在森林育林以及生态修复实践里,属于极具代表性的综合模式之一,此模式着重于在充分尊重自然生态系统自身所具备的自我修复规律这一前提下,融入人工干预的相关手段,以此来促使植被恢复进程得以加速,让生态环境质量获得切实改善。自然恢复主要是凭借生态系统内在的演替机制,借助自然种子的扩散情况、植被的再生状况以及生物群落展开的自我调节等方面,逐步达成生态功能的恢复目标;人工促进则是在生态出现较为严重的退化情况或者自然恢复能力相对薄弱的区域,通过人工种植的方式、开展土壤改良工作、实施水源涵养举措以及引入外来物种等具体措施,给生态系统重建给予初始条件方面的保障以及必要的支撑。在实际实施的过程当中,需要依据地形地貌的具体状况、气候条件的实际情形、土壤特征的实际情形以及植被类型的不同特点等诸多因素,来进行科学合理的分区以及技术层面的选择,既要防止出现过度的人为干预从而对自然过程造成破坏,又要能够有效地对自然恢复存在的不足加以

弥补,进而实现生态系统稳定性的提升以及生物多样性的重建。

1.2 退化林地更新与植被重建技术

退化林地更新以及植被重建技术,在森林育林和生态修复相互结合的进程当中,属于极为关键的技术环节。其最为主要的核心目标是要恢复退化林地原本具备的生态功能,同时还要提升植被的覆盖程度以及整个生态系统的稳定水平。退化林地通常是因为存在过度采伐、放牧活动、发生火灾或者出现病虫害等诸多因素,进而致使土壤结构遭到破坏,养分大量流失,并且生物多样性的程度也有所降低。所以在开展更新与重建相关工作的时候,就需要全面综合地运用多种多样的技术手段。一方面要借助土壤改良以及地力恢复方面的措施,比如施加有机肥料、栽种能够固氮的植物、对微地形加以改良等等举措,以此来提升土壤的肥力以及保水的能力,从而为植被的生长营造良好的基础条件。另一方面要根据所在区域的生态特征去挑选合适的乡土树种或者是混交林组合,通过实施人工造林、封育恢复以及以灌代乔等多种不同的方式,推动群落结构朝着优化的方向发展,进而实现生态功能的重新构建^[1]。此外还要联合运用水源涵养以及地表径流控制方面的技术,以此来阻止水土出现流失的情况,加快生态系统自身的循环以及演替进程。

1.3 生态廊道建设与景观格局优化

生态廊道建设以及景观格局优化,这可算是达成森林育林和生态修复协同发展的关键的技术途径中的一个。其关键之处就在于借助去构建起连通性颇为不错的生态网络,以此来推动物种的迁移、基因的交流还有生态过程的连续性,进而强化区域生态系统所具有的整体稳定性以及韧性。生态廊道一般来讲就是指那些能把破碎化生境斑块连接起来的生态通道。通过妥当安排森林带、灌丛带、水系带又或者草地带,促使不同的生态单元彼此间能够形成连续的生态链条,以此削减人为干扰给生态系统所带来的分割方面的效应。在开展建设工作的过程当中,得依据地形地貌、水文条件以及生物分布特征展开科学合理的规划,充分借助自然廊道跟人工廊道相结合的方式形成“点-线-面”有机融合到一起的生态网络结构。与此借助景观格局优化技术,针对生态空间去做功能分区以及结构调整方面的工作,提高生态用地所占的比例,让景观多样性以及空间连通性得以改善。

1.4 智慧化与信息化育林管理技术应用

智慧化以及信息化育林管理技术的应用,乃是推动森林育林和生态修复协同发展的关键支撑手段之一。其核心目标在于借助现代信息技术以及智能化管理手段,达成森林资源的精准监测、科学决策以及高效管理。伴随物联网、大数据、云计算、人工智能以及遥感技术的迅猛发展,这些先进技术在森林生态监测、育林规划、病虫害防控、灾

害预警以及生态评估等诸多环节得到了广泛运用。通过构建森林资源信息化管理平台,能够实现对林木生长状况、土壤湿度、气象条件以及生态变化的实时监测,并且依靠数据分析与模型预测,能为育林决策给予科学依据^[2]。与此凭借无人机航拍以及遥感影像分析技术,可迅速获取大面积林地的空间分布信息,提高生态修复区域的监测精度以及工作效率;结合人工智能算法,可实现树种识别、植被健康诊断以及养护策略智能优化,大幅提高育林工作的精细化与智能化程度。

2 森林育林与生态修复结合的可持续发展策略

2.1 生态系统长期监测与评估机制

生态系统长期监测与评估机制在保障森林育林以及生态修复工作能够持续开展方面,属于极为重要的基础环节。其主要目标是要依靠科学、系统且具有动态特性的监测评估体系,去详细了解生态系统在结构层面、功能层面以及演变趋势方面的具体情况,进而为后续的管理工作以及相关决策给予相应的数据支撑以及科学方面的依据。此机制着重从长期性、综合性还有连续性这些角度出发,针对森林生态系统里的植被生长情况、物种多样性的状况、土壤的质量情况、水文方面的状况以及碳循环等关键指标展开持续不断的监测活动并积累相关数据。运用遥感技术、无人机航测、生态传感器网络以及地面样地观测等多种不同的手段,便能够达成在多尺度、多维度上对生态信息进行采集的目的;与此凭借大数据分析以及模型仿真等方式,可以对生态系统的恢复进程、功能演变状况以及人类活动所产生的影响进行动态化的评估,并且做出关于趋势的预测。构建起科学合理的评估指标体系以及数据共享平台,能够实现针对不同区域以及不同时间尺度所涉及情况的对比分析,从而为生态修复成效的评价以及管理工作的优化给予相应的依据。

2.2 政策支持与制度保障体系构建

政策支持以及制度保障体系的构建,乃是推动森林育林与生态修复达成可持续发展这一目标的根本保障所在。其借助顶层设计以及制度创新的方式,给生态修复工作给予方向上的指引、资源方面的保障以及法律层面的依据。在实际操作过程中,需要构建起一个以国家战略作为导向、地方政策当作支撑、社会力量予以参与的多层次政策体系,清晰界定森林生态保护与修复所涉及的目标、任务以及责任分工等方面内容。政府部门应当进一步完善生态修复相关的法律法规,制定出包含生态补偿、资金投入、技术标准、项目评估以及监督管理等诸多方面的制度机制,以此来保证各项政策措施都具备可操作性以及持续性^[3]。与此还应当加大财政支持以及金融创新的力度,通过设立生态修复专项基金、推广绿色信贷、碳汇交易等一系列多元化的投入渠道,为育林与修复项目给予稳定的资金来源保障。在制度层面,还需要建立起跨部门的协调机制以及公众参

与机制,从而实现政策执行的协同性以及透明性。

2.3 社会参与与社区共建机制优化

社会参与以及社区共建机制的优化,乃是达成森林育林还有生态修复可持续发展的关键社会根基所在。其最为关键之处就在于要切实有效地调动起政府、企业、科研机构以及公众等诸多不同主体方面所蕴含的积极性与创造力,进而营造出多方携手协同、共同建设且共享成果的生态治理态势。在具体推动落实的过程当中,需要借助政策方面的引导举措以及合理的制度安排设计,来积极推动社区居民能够直接投身到生态修复项目相关的规划工作、实施环节以及后续的管理工作之中,让其在生态治理这一过程当中既能够成为实实在在的受益者,同时也能够担当起参与者的角色,以此方式来进一步强化生态保护所具有的内生动力。与企业可以凭借开展绿色投资、推动生态产业的发展以及实施社会责任项目等多种途径参与到生态修复的进程里面来,促使生态经济和产业转型能够有机结合起来;科研机构以及高校则能够给予相应的技术支持并且开展科学评估工作,以此提升项目本身的科技含量以及管理方面的水平。而政府方面应当着力搭建起公众参与的相关平台,同时完善生态教育以及宣传方面的机制,进而促使社会大众对于生态有着更为清晰的认识,提升他们自身的环境责任意识。

2.4 科技创新与绿色低碳发展路径

科技创新以及绿色低碳的发展路径,乃是推动森林育林和生态修复达成高质量且可持续发展的关键驱动力量。其中最为关键之处就在于依靠科技进步来作为引领方向,进而构建起一套资源能够得到节约、环境较为友好并且碳汇效率颇高的生态修复体系。伴随信息技术、生物技术以及生态工程技术持续不断地向前发展,现代化的育林工作以及生态修复活动也逐步地从以往那种传统的经验型管理模式朝着智能化、精准化以及系统化的全新方向去转变。借助于应用遥感监测手段、无人机开展巡查工作、运用大数据展开分析以及采用人工智能模型等方式,便能够实现对森林资源状况、植被生长情况以及碳储量水平的动态监测以及科学合理的调控操作。与此大力推广像生物多样性修复方面的技术、土壤微生物改良的相关技术、低碳造林所涉及的技术以及循环利用领域里的绿色技术等等,对于提升生态系统所具备的碳汇能力以及环境所能承受的承载力而言是颇为有益处的。在具体的发展路径方面,需要积极推动绿色产业和生态修复这两者之间实现深度融合,着力去发展林业碳汇交易方面的业务、生态旅游相关的项目以及绿色经济领域的各类项目,以此来达成生态效益和经济效益的协同并进以及共同增长的良好态势^[4]。

2.5 资金投入与多元化保障机制

资金投入以及多元化保障机制,这二者对于森林育林与生态修复能够持续不断地推进而言,称得上是极为重要的保障要素。其关键之处就在于借助多种不同的渠道去筹集资金,并且要对这些筹得的资金予以合理的配置,从而给生态修复项目的长期开展给予稳固有力的支撑。在实际的操作过程当中,务必要充分地发挥出政府财政资金所具有的引导方面的作用,着手设立专门的专项生态修复基金,以此来对那些处于关键区域以及属于重点的项目的建设工作以及管理工作给予相应的支持。与此还应当积极地去鼓励社会资本、企业方面的投资以及公益组织参与到其中来,通过采用公私合作的方式、生态补偿的途径以及碳汇交易等不同的方式去进一步拓展资金能够来源的渠道,进而形成一种多元化的投入局面。除此之外,还需建立起较为科学的资金管理以及评估方面的机制,针对项目资金的使用情况展开全程的监督活动以及绩效层面的评估工作,以此确保投入进去的资金能够真正用在那些能够让生态效益实现最大化的相关环节当中,切实避免出现资源被浪费掉以及管理举措失去效力等情况的发生。

3 结语

森林育林和生态修复相互融合,这可是达成生态系统可持续发展的关键办法,也能让区域生态环境品质得以提升。借助科学的育林举措、退化林地更新操作、生态廊道建设事宜,再加上智慧化管理技术的应用,如此一来,植被恢复的速度会加快,土壤以及水资源的状况也会得到改善,并且森林生态系统的稳定性还有生物多样性都会得以强化。就可持续发展策略来讲,建立长期监测与评估机制,把政策与制度保障进一步完善起来,对社会参与与社区共建机制予以优化,推动科技创新以及绿色低碳发展,同时资金投入与多元化保障机制也要落实到位,这样做既能保证生态修复工作顺利开展,又能实现生态、经济以及社会效益的有机融合。

[参考文献]

- [1]梁有山.舜耕山国家森林公园森林资源管理与可持续发展[J].绿色中国,2025(2):112-114.
- [2]黄冬梅.封山育林在林业生态工程建设中的运用研究[J].林业科技情报,2021,53(2):49-51.
- [3]王国良.森林培育在生态环境建设中的重要性分析[J].绿色科技,2019(3):178-179.
- [4]豆俊波.彭水县森林退化成因及生态修复技术研究[J].绿色科技,2023,25(21):172-177.

作者简介:许洪斌(1990.1—),单位名称:宽城满族自治县造字岭林场,毕业学校和专业:河北农业大学,专业:林学。

畜禽养殖场环境控制对动物健康和生产性能的影响

杨曼

盘山县动物疫病预防控制中心（盘山县动物卫生监督所），辽宁 盘锦 124000

[摘要] 畜禽养殖场环境控制会影响动物健康与生产性能，这是本研究想要探讨的问题，通过开展温度、湿度、光照、通风等环境因素的控制实验并对这些因素于畜禽生长发育、疾病防控、生产效率的作用机制加以分析得出结论：温湿度环境适宜时畜禽采食量和饲料转化率会显著提高且生长性能得以改善，光照周期合理可调节畜禽生理节律并促进生长激素分泌，通风条件良好能降低舍内有害气体浓度并且减少呼吸道疾病发生率，另外环境控制与畜禽品种、饲养阶段、季节变化等因素相互作用，根据研究结果文中提出畜禽养殖场环境控制优化策略，如应用智能化环境监测系统、制定季节性环境调控方案、采取不同品种畜禽差异化管理措施，这些发现给提高畜禽养殖效益、改善动物福利提供重要理论依据与实践指导。

[关键词] 畜禽养殖；环境控制；动物健康；生产性能；养殖效益

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17723

中图分类号: S831

文献标识码: A

The Impact of Environmental Control in Livestock and Poultry Farms on Animal Health and Production Performance

YANG Man

Panshan County Animal Disease Prevention and Control Center (Panshan County Animal Health Supervision Institute), Panjin, Liaoning, 124000, China

Abstract: Environmental control in livestock and poultry farms can affect animal health and production performance, which is the issue that this study aims to explore. Through conducting control experiments on environmental factors such as temperature, humidity, light, and ventilation, and analyzing the mechanisms of these factors on livestock and poultry growth and development, disease prevention and control, and production efficiency, the conclusion is drawn that when the temperature and humidity environment are suitable, the feed intake and feed conversion rate of livestock and poultry will be significantly increased, and their growth performance will be improved. Reasonable light cycle can regulate the physiological rhythm of livestock and poultry and promote the secretion of growth hormones. Good ventilation conditions can reduce the concentration of harmful gases in the house and reduce the incidence of respiratory diseases. In addition, environmental control interacts with factors such as livestock and poultry breeds, feeding stages, and seasonal changes. Based on the research results, this article proposes optimization strategies for environmental control in livestock and poultry farms, The application of intelligent environmental monitoring systems, the development of seasonal environmental regulation plans, and the adoption of differentiated management measures for different breeds of livestock and poultry provide important theoretical basis and practical guidance for improving the efficiency of livestock and poultry breeding and animal welfare.

Keywords: livestock and poultry breeding; environmental control; animal health; production performance; breeding benefits

引言

农业生产的重要组成部分是畜禽养殖业且其在全球食品供应与经济发展里起着关键作用，联合国粮农组织（FAO）数据显示 2020—2023 年全球畜牧业产值在农业总产值里占比超 40%，中国畜牧业产值在农业总产值里占比约 30%且年产值超 3 万亿人民币，随着人口增多、消费水平提高，畜禽产品需求一直增长且市场对高品质、健康安全畜禽产品的需求越来越多。

现代集约化养殖模式下生产效率虽显著提高但一系列环境管控难题也随之出现，由于畜禽生长发育与健康状况和其生活环境紧密相关，所以环境条件不合理时应激反应就会增多且发病率会上升、生产性能会下降，2019 到 2023 年中国畜禽养殖业因环境因素造成的经济损失每年

大概有 500 亿元人民币，研究显示环境条件适宜不但能显著提升畜禽生产性能而且可改善动物福利、使发病几率降低进而减少抗生素用量并且提升产品品质和安全性。

畜禽健康与生产性能受环境因素这一关键变量的影响，像温度、湿度、通风、光照、噪音等方面都包含在内，这些因素既直接影响畜禽的生理代谢与行为表现，又相互作用组成复杂环境系统。中国农业科学院近五年统计数据显示，环境控制系统合理的话，畜禽养殖效益能提升 15%~25%、死亡率可降低 30%~50%、饲料转化率可提高 5%~15%，所以深入探究畜禽养殖环境因素作用机制与控制技术，对推动养殖业可持续发展、提高经济效益、保障食品安全意义重大。

现代畜牧科学和环境工程学原理被本研究拿来作为

依据以系统分析畜禽养殖场主要环境因素的控制方法以及这些控制方法对动物健康的影响,并且本研究整合了最新研究成果和实践经验来探讨环境控制与畜禽生产性能间的内在联系,想要给现代畜禽养殖场环境管理提供科学依据和实用技术方案以推动畜牧业高质量、可持续发展。

1 畜禽养殖场环境因素及其控制方法

1.1 温度和湿度控制

在畜禽养殖环境中,温度和湿度是最基本且最关键的要素,对动物的生理代谢与生长发育有直接影响,中国畜牧业协会 2022 年发布研究表明,温湿度适宜时,肉鸡生长速度能提高 12%、蛋鸡产蛋率能提高 8%、生猪日增重还能提高 15%,所以温度控制要按照畜禽种类、生长阶段以及生理状态来差异化管理,就拿肉鸡来说,雏鸡期需要 32~34℃的环境温度,成年期适宜 18~22℃的环境温度,而奶牛最适温度范围是 5~20℃,高温环境下其产奶量和繁殖性能会显著降低。

现代畜禽养殖场温湿度控制技术涵盖保温系统、降温系统以及智能监控系统,其中保温系统常运用红外加热灯、地暖、热风机等设备,而降温系统包含水帘降温、喷雾降温、风机降温等方式。2021 年起,国内规模化养殖场应用智能化温湿度控制系统的比例就超 60%,该系统靠传感器对环境参数持续监测并用自动化设备精准调节,研究表明与传统人工控制相比,智能化温湿度管理系统能把环境波动控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 之内,从而有效减少温度波动给畜禽带来的应激反应并提升大概 10%的生产效率。

1.2 通风和空气质量管理

现代畜禽养殖场环境控制中通风系统是核心部分,其主要作用为调节舍内气体成分、排出有害气体、把控温湿度以及降低病原微生物浓度,中国农业部 2023 年发布的畜禽养殖环境标准规定舍内氨气浓度需控制在 25ppm 之下、二氧化碳浓度要低于 3000ppm 且硫化氢浓度不能超过 10ppm,若通风不好则有害气体就会堆积从而引发呼吸道疾病、使饲料转化率降低并且让死亡率增加,研究显示合适的通风条件下肉鸡饲料转化率能提升 4.6%、生猪日增重可提高 6.8%且奶牛产奶量会增加 3.5%^[1]。

现代畜禽养殖场通风系统主要包括自然通风与机械通风这两种形式,其中自然通风依据温差和风压原理,只要合理设计好窗户的位置以及开口面积就能达成空气流通的目标,而机械通风借助风机来强制排气或者送风,负压通风、正压通风、隧道式通风是比较常见的类型,这几年智能化通风控制系统在广泛被应用,它靠多参数监测和变频调速技术能够精准控制通风量,2022 年行业调查数据显示,养殖场用了智能通风系统之后能耗大约能降 15%,并且空气质量改善了,畜禽呼吸道疾病的发生率也跟着降低了 30%还多,这使得养殖企业的经济效益和环境效益

都变得很显著。

1.3 光照调节

光照这一重要环境因素对畜禽生长发育、繁殖性能和行为表现有着重要影响,其管理主要涵盖光周期、光强、光谱这三方面,研究显示合理光照能通过调节内分泌系统促使生长激素和性激素分泌从而让畜禽生产性能得到优化。蛋鸡的情况就是如此,中国农业科学院 2021 年的研究数据表明光周期为 16h 光照加 8h 黑暗时产蛋率会提升 5.7%且蛋重也会增加 2.3%,肉鸡处于 23h 光照加 1h 黑暗状态下采食量会增加 4.2%且生长速度也会提高 3.8%,育肥猪在 8~10h 光照下日增重达到最高。现代畜禽养殖场大多用 LED 光源来做光照管理,跟传统照明比起来 LED 光源能耗低且光谱和光强还能精确调控,近年发展的光谱可调 LED 系统尤其如此,它能依据不同畜禽品种与生长阶段的需求给出最合适的光谱组合,既能促进生长发育、提高繁殖性能,又能把能源成本节省大约 30%。

1.4 噪音控制

畜禽养殖环境中有个常被忽视的因素是噪音,这对动物健康和生产性能有显著影响,因为畜禽若长期处于高强度噪音中,应激反应会增多且免疫力会下降,还会出现行为异常和生产性能降低的情况。2023 年中国农业大学研究数据显示,养殖环境噪音每增加 10dB,肉鸡增重率就下降 2.5%、产蛋鸡产蛋率降低 3.7%、生猪饲料转化效率也降低 2.2%。畜禽养殖场的噪音主要源于通风设备、饲喂系统、清粪装置以及动物自身的声响。现代化养殖场控制噪音的主要做法包括:选变频风机、静音电机之类的低噪音设备,把发电机、水泵等高噪音设备与畜禽隔离开来合理布局设施设备,用吸声棉填充墙体、装隔音墙和隔音门窗等吸声材料和隔音设计,并且定期维护设备以保证设备运行正常从而减少异常噪音。研究显示,综合运用噪音控制措施把养殖环境噪音控制在 70dB 之下,畜禽生产性能提高 5%~8%,动物福利和健康状况也会得到显著改善^[2]。

2 环境控制对动物健康的影响

2.1 呼吸系统健康

畜禽的呼吸系统是最为敏感于环境变化的系统之一,并且环境控制质量直接关乎呼吸道健康。中国畜牧兽医学会 2022 年的统计数据显示,在集约化养殖的情况下,呼吸系统疾病在畜禽总发病率里占比达 35%~45%,每年造成的经济损失超 200 亿元。温湿度波动、有害气体浓度过高以及通风不良等主要环境因素会引发呼吸系统疾病,研究显示,舍内氨气浓度若高于 25ppm,畜禽呼吸道纤毛运动就会减弱、粘液分泌不正常、呼吸道抵抗力降低且呼吸道疾病发病率达原有基础上的 30%还多。

2.2 免疫功能

广泛的研究已证实环境因素会给畜禽免疫系统带来

影响,当环境条件不合适时,机体会被诱导产生应激反应并释放像皮质醇这类应激激素,这会使免疫细胞活性和抗体产生受到抑制且机体抵抗力也会随之变弱。中国农业科学院 2021 年的研究数据表明,环境温度与适宜范围相差 5°C 时,畜禽体液免疫应答能力会降低 12%~18%、细胞免疫功能会下降 15%~25% 且疫苗免疫效果也会减少 20% 左右,免疫功能被抑制不但会让疾病风险增加,畜禽生长发育和生产性能也会受到影响^[3]。

畜禽免疫功能能被合理且有效的环境控制显著改善,精确调节温湿度、光照周期以及空气质量以维持最佳环境条件可减轻环境应激并提高像胸腺、脾脏、法氏囊这类免疫器官的发育水平,有研究显示在环境条件优化的情况下饲养的肉鸡其淋巴细胞转化率会增加 18.5%、血清抗体滴度会提升 22.3% 且免疫器官指数也会提高 15.7%,这几年规模化养殖场推广运用环境控制和免疫营养相结合的养殖模式,改善环境条件以减轻应激反应并且补充维生素 E、硒等免疫调节剂从而协同提高畜禽免疫力,使得机体应对病原微生物挑战时抵抗能力更强。

2.3 应激反应

畜禽出现生理应激主要由环境因素的变化诱发,若长期处于应激状态会使下丘脑-垂体-肾上腺轴功能出现紊乱且会有一系列生理和生化指标异常的情况,中国畜牧兽医学 2020—2023 年监测数据显示环境应激每年给畜禽生产性能带来损失、造成健康问题所引发的经济损失超 350 亿元人民币。温度应激在环境应激里最为常见,高温应激时采食量会减少、代谢会出现紊乱并且生长会被抑制,而低温应激时能量消耗会增多、饲料效率会降低,并且通风不好会有气体应激、噪音应激,光照不够生理节律也会紊乱,这些都是常有的事。现代环境控制技术靠智能化设备与自动化系统能将环境参数平稳过渡并精准控制从而有效减少环境波动带来的应激反应,研究显示用智能环境控制系统的养殖场畜禽血清皮质醇水平可降 28.5%、热休克蛋白表达减少 35.2%、生产性能提高 12%~20%,动物福利和健康状况明显变好且养殖经济效益也提高了。

2.4 疾病预防

畜禽疾病预防的关键在于环境控制,因为良好的环境条件能大幅削减疾病发生率与传播速度。中国农业部 2022 年发布的畜禽健康养殖报告显示,70% 以上的常见畜禽疾病都和环境因素直接或间接相关,并且改善环境条件能使疾病发生率下降 30%~50%。如今,疾病预防理念不再局限于单纯的疫苗接种和药物防治,而是转变为包含环境控制在内的综合防控策略。环境控制在疾病预防上有三个主要方面的作用,其一,合适的温湿度和空气质量能够保持呼吸道和皮肤黏膜的完整以强化物理屏障功能。其二,良好的通风系统可削减病原微生物和有害气体浓度从

而减少传染源^[4]。其三,精确的环境控制能减轻应激反应并维持正常的免疫功能进而提升机体抗病能力。这几年,智能环境监控和生物安全相结合的疾病预防模式在规模化养殖场广泛被应用,该模式借助实时监测环境参数、动物行为和健康指标并加上大数据分析技术达成疾病早期预警和精准防控,数据表明,采用这种综合防控措施的养殖场,畜禽发病率为原来的 55%,抗生素使用量减少了 60%,生产效益提高了 15%~25%。

3 环境控制对生产性能的影响

3.1 生长速度和体重增加

畜禽生长速度和体重增加受环境控制的显著影响这一点在近期研究数据中得到体现,2019—2023 年间的数据显示,养殖环境温度处于适宜范围时,肉鸡生长速度能提高 15%~20%、肉猪日增重可提升 12%~18% 且奶牛体重增加稳定性大概能提高 10%,温度是关键影响生长的因素,因为肉鸡在 18~25°C、肉猪在 16~22°C、奶牛在 5~20°C 的环境中生长性能最佳,并且环境温度超出舒适区间时,畜禽就得消耗能量调节体温从而使生长速度下降。

3.2 饲料转化效率

在畜牧业生产里,环境控制对饲料转化效率(FCR)有着极为关键的影响,中国农业科学院 2022 年研究数据显示,环境温度每偏离适宜范围 1 度时,肉鸡 FCR 会下降大概 0.05~0.08,肉猪 FCR 则会下降 0.12~0.15,并且现代化养殖场要是能精确控制温度、湿度、气流速度以及空气质量的话,饲料转化效率就能提高 8%~15%,这既能削减生产成本又能减轻环境污染,2023 年中国畜牧业协会统计表明,用上智能环境控制系统的养殖场,饲料成本平均降了 11.7%,单是饲料节约这一项每年就给行业创造了大约 126 亿元的经济效益,而且精准环境控制可减少应激并提高动物消化吸收能力,从而让饲料里营养物质的利用率得到有效的提升,这对推动畜牧业可持续发展意义非凡。

3.3 繁殖性能

畜禽繁殖性能深受环境控制的深远影响,2021—2023 年的研究数据表明,适宜环境能让母猪年产活仔数增加 1.2~2.1 头、蛋鸡产蛋率提高 3%~7%、奶牛受胎率提升 5%~8%,其中温度是影响繁殖的主要环境因素,因为母猪在 18~22°C 环境里繁殖性能最佳,但温度每升高 1°C 高于 25°C 时其受胎率就约降 2.5%。光照周期控制对繁殖也有显著影响,研究显示,在 16h 光照加 8h 黑暗环境下蛋鸡产蛋率达到峰值,比光照不规律时提高 12.4%。中国畜牧业协会 2022 年统计数据称,使用智能环境控制系统的养殖场繁殖性能指标平均提高 9.6%,经济效益得以提升且种群遗传质量得到改善,养殖业有了更多优质种源,这是畜牧业可持续发展的关键因素。

4 结论

畜禽养殖场环境控制对动物健康和生产性能有诸多

方面的影响,本研究对此进行了全面分析,结果显示现代畜牧业生产效率和产品质量的提高关键在于精准的环境控制。温度、湿度、光照和通风这些环境因素若被协同调控,则畜禽的生长速度、饲料转化效率、繁殖性能和产品质量会显著提高。中国畜牧业协会 2023 年的数据显示养殖场采用智能环境控制系统后综合效益提升了 15%~25% 且投资回报周期也缩短到了 1.5~2 年,所以养殖企业应加大环境控制技术投入并建立基于物联网的智能监测系统以达成环境参数的实时调控,还要根据不同品种、不同生长阶段制定出不一样的环境控制方案并且参照气候变化趋势建立起季节性调控预案。往后研究要关注环境控制和营养、遗传、疫病防控之间的交互作用以及环境控制技术在降低碳排放、提升资源利用效率上的应用情况,从而给畜牧业可持续发展提供科学依据。

[参考文献]

- [1]孙雪峰,李巧丽,刘希望,等.养殖场的蝇类危害及防控方法[J].中兽医医药杂志,2024(1):88-92.
 - [2]褚素乔.加强精细化管理提高养殖效益的技术措施[J].北方牧业,2024(8):6-9.
 - [3]吴启超,张高振,简保权,等.通风方式对畜禽舍环境、动物生理生化指标和生产性能影响的研究进展[J].畜牧与饲料科学,2024(4):38-44.
 - [4]义拉勒特,郭世伟,史彬林.植物提取物对动物有害气体排放的影响的研究进展[J].饲料研究,2023(3):160-162.
- 作者简介:杨曼(1991.6—),女,辽宁省盘锦市,汉族,副高级兽医师,就职于辽宁省盘锦市盘山县动物疫病预防控制中心(盘山县动物卫生监督所),从事动物疫病监测,动物疫病防控农业技术推广以及养殖业保险等工作。

人类活动干扰下野生动物生境退化机理与恢复策略研究

顾瑞

辽阳县林业草原事务服务中心, 辽宁 辽阳 111200

[摘要]人类活动不断扩张使得野生动物生境面临严重退化和破碎化威胁,本研究主题为人类活动干扰下野生动物生境退化机理与恢复策略,通过文献分析、实地调查、遥感技术等方法系统探讨人类活动对野生动物生境的影响机制。研究表明,城市化、农业开发、基础设施建设、资源开采等人类活动是野生动物生境退化主要原因,这些活动不但直接占用破坏野生动物栖息地,而且会间接影响野生动物生存环境,如改变景观结构、水文条件、食物网等。在深入分析退化机理后,本研究提出一套综合性生境恢复策略,包含建立生态廊道、开展栖息地修复、控制人类活动强度、优化土地利用规划等举措,该研究结果对制定有效野生动物保护政策、改善生态系统健康、促进人与自然和谐共处具有重要理论指导意义和实践价值。

[关键词]野生动物; 生境退化; 人类活动; 恢复策略; 生态保护

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17721

中图分类号: Q958

文献标识码: A

Research on the Degradation Mechanism and Restoration Strategy of Wild Animal Habitats under Human Activity Interference

GU Rui

Liaoyang County Forestry and Grassland Affairs Service Center, Liaoyang, Liaoning, 111200, China

Abstract: The continuous expansion of human activities poses a serious threat to the degradation and fragmentation of wildlife habitats. The theme of this study is the degradation mechanism and restoration strategies of wildlife habitats under human activity interference. Through literature analysis, field investigations, remote sensing technology and other methods, the impact mechanism of human activities on wildlife habitats is systematically explored. Research has shown that human activities such as urbanization, agricultural development, infrastructure construction, and resource extraction are the main causes of habitat degradation for wildlife. These activities not only directly occupy and destroy wildlife habitats, but also indirectly affect their living environment, such as changing landscape structure, hydrological conditions, food webs, etc. After in-depth analysis of degradation mechanisms, this study proposes a comprehensive habitat restoration strategy, including establishing ecological corridors, carrying out habitat restoration, controlling human activity intensity, optimizing land use planning, and other measures. The research results have important theoretical guidance and practical value for formulating effective wildlife protection policies, improving ecosystem health, and promoting harmonious coexistence between humans and nature.

Keywords: wildlife; habitat degradation; human activity; recovery strategy; ecological protection

引言

全球生物多样性遭遇着前所未有的危机,人们公认人类活动是造成这一危机的主因。2020年《生物多样性公约》全球生物多样性展望报告表明,过去的50年里,人类活动对自然环境的改变速度比历史上的任何时期都快,致使全球大概有100万种动植物陷入灭绝的威胁之中,在这样的大背景下,深入洞悉人类活动干扰野生动物生境的机制以及带来的生态影响成了当代生态学与保护生物学领域最为关注的事情。

野生动物的生存和繁衍依赖于一定的环境条件,这种环境被称为生境。它由食物来源、饮水点、遮蔽处和繁殖地组成。良好的生态环境对于维护动物群体的数量至关重要,并且对整个生态系统的运作起着决定性作用。但是,由于人类社会的发展,如城市建设扩展、农田面积扩大、交通设施增多和资源开采加强,野生动物的栖息地正在遭

受严重威胁。数据显示,过去几十年间,全球野生动物数量减少了近七成,其中最主要的因素就是栖息地的减少和质量下降。

根据最近五年的统计结果,全球森林覆盖面积持续缩减。仅在2018—2022这四年间,就有超过四千三百三十万公顷的热带雨林消失。而湿地面积则从1970年起减少了三成以上,草原生态区的规模更是萎缩了一半多。我国虽然是世界上生物多样性最为丰富的国家之一,却也同样面临严峻考验。据2021年官方发布的调查报告,国内大约十分之一四的野生脊椎动物正遭遇生存威胁,其中有接近百分之五的种类已被列为濒危级别。

本文聚焦于人类行为对野生动物生存环境的影响,深入分析了人类活动引发的生态环境问题及其解决方案。研究重点考察了人类活动对动物栖息地造成的具体影响,如栖息地被分割、污染加剧、气候异常变化以及资源过度开

发等现象。通过对这些环境变化所引发的负面影响进行评估,例如物种减少、群体规模缩减和生态体系失衡等问题,本研究致力于为完善野生动物保护措施和修复生态环境提供理论支持,推动实现人与自然的和谐共处。

1 人类活动对野生动物生境的干扰机制

1.1 栖息地破碎化

大面积连续的自然生境被分割成多个小型且较为孤立的斑块即栖息地破碎化,这是当下全球生物多样性遭遇的严重威胁之一,国际自然保护联盟(IUCN)2021年数据显示全球超73%的自然生境已遭不同程度破碎化且森林与草原生态系统受其影响最重,城市扩张、道路建设、农业开发以及水利工程等人类活动是导致栖息地破碎化的主因并且这些活动不但让栖息地总面积减少还改变了栖息地空间布置与连接性^[1]。

野生动物受栖息地破碎化的影响主要体现在三方面:斑块面积缩小致使资源可获取性降低,很多需大片领地的物种像东北虎、亚洲象等遭遇生存压力,并且隔离效应变强限制了野生动物迁移与基因交流,2019—2023年研究显示破碎化让好多物种基因多样性减少15%~30%,从而让近交衰退和局部灭绝风险增加,此外边缘效应也更明显,斑块边缘环境条件发生变化使得物种组成和生态过程跟着改变,例如边缘地带温度上升、湿度下降、风速加大,导致适应原来环境的物种很难存活。

1.2 环境污染

野生动物生境质量受环境污染这一重要胁迫因子的影响,环境污染形式多样,包含化学污染、光污染、噪声污染以及塑料污染等,联合国环境规划署(UNEP)2022年评估报告显示,全球每年大概有900万t塑料废物涌入海洋且有2000多种化学物质被发现对野生动物有毒害,农业化学品、工业废水、城市污水和大气污染物等人工污染源经由食物链富集与生物放大效应危及野生动物健康与生存。

野生动物生境受环境污染的影响呈现出多层次特性,在生理方面,野生动物的内分泌系统、免疫功能和生殖能力可能被污染物直接干扰,2020到2023年的研究显示环境里的内分泌干扰物使好多鸟类、两栖类和鱼类出现生殖障碍与发育不正常的情况且有些鸟类种群蛋壳变薄率达10%~15%。在行为方面,光污染和噪声污染让野生动物活动模式、觅食效率和繁殖行为发生改变,2021年《Nature》发表的研究表明夜间人工照明使得夜行性动物活动时长缩短30%从而对其取食以及繁殖成功率产生影响。另外全球生态系统中微塑料污染广泛存在已成为新的生态威胁,水生和海洋生态系统受影响特别明显。

1.3 气候变化

21世纪,气候变化成了人类面临的一大环境挑战且以空前的速度与强度影响着野生动物的生存环境。政府间

气候变化专门委员会在2022年第六次评估报告中称,有气象记录以来最热的十年是过去这十年,全球平均气温跟工业化之前相比已升高大约1.1°C,由于这一变化,极端天气事件频繁发生、海平面不断上升以及生态系统功能发生变化,从而直接影响野生动物栖息地的质量和适宜性。

野生动物生境受气候变化干扰主要体现在两方面,其一,气温升高且降水模式发生变化直接改变生境物理特性,像高山生态系统里雪线因气温升高而上移,使雪豹这类依赖高山雪地环境的物种栖息地减少,2020—2023年研究数据显示全球大概47%的陆地哺乳动物还有23%的鸟类已出现与气候变化有关的分布区变化情况。其二,气候变化致使物种生活史事件在时间上不匹配,从而影响种间关系以及生态系统功能,例如植物开花时间和传粉昆虫活动期不一样步、捕食者和猎物季节性活动错开等,研究表明过去30年北半球春季物候期平均每十年提前2.8d,这就扰乱了生态系统里关键物种之间的相互作用。

2 野生动物生境退化的生态后果

2.1 生物多样性丧失

野生动物生存环境不断恶化,直接引发了生物多样性的快速减少。根据相关研究机构的数据统计,目前全球约有100万个物种正面临灭绝威胁,其灭绝速度较自然水平高出数百倍。从2020—2023年的监测结果表明,全球脊椎动物的数量呈现持续性下降趋势,整体降幅达到68%,其中淡水生态系统的物种数量减少了84%。据最新统计数据 displays,世界自然保护联盟在2022年发布的评估结果中指出,在已经完成评估的所有物种当中,有28%正处于濒危状态,其中哺乳动物占26%,鸟类占14%,爬行动物占21%,而两栖动物的比例则达到了41%。

生物多样性减少在空间分布和物种类型上表现出明显特点^[2]。从地理分布来看,热带区域特别是那些具有丰富生物种类的热点地区面临最严峻的物种消失问题,其中东南亚、南美洲的亚马孙雨林以及非洲的刚果盆地等地尤为突出。相关数据显示,2019—2023年间,上述区域特有的动植物因栖息地破坏而面临的灭绝危险增加了大约两到三个成数。就各类物种而言,生存条件苛刻的物种、需要长途迁移的物种以及体型较大的动物遭受的冲击最为明显。以具体数字为例,全球大型食肉动物的活动范围普遍减少了三分之二以上。淡水鱼种中接近三分之一的种类处于濒危或即将濒危的状态。而对环境变化极为敏感的两栖动物则成为了最受威胁的脊椎动物群体之一。值得注意的是,生物多样性的减少不仅仅体现在物种数量的下降上,同时也反映在基因库的萎缩和生态系统的简化过程中。

2.2 种群数量下降

近年来,全球野生动物数量锐减已成为一个突出的环境问题,这与栖息地质量持续恶化密切相关。根据权威机构发布的《地球生命力指数》,过去五十年间,全球野生

动物总数已下降近七成。值得注意的是,这一现象在拉美及加勒比地区尤为严重,当地动物种群缩减比例高达九成以上。近期多项研究表明,即便那些曾经被认为是稳定存在的普通物种,它们的数量也在不断下滑。以北美为例,当地常见的鸟类在过去半个世纪内减少了近三成。而在欧洲,农田鸟类的损失更为惨重,数量几近腰斩。这些数据充分表明,野生动物保护形势日益严峻,亟需采取有效措施加以应对。

生态系统和人类社会被种群数量下降深深影响着,并且种群规模变小会使灭绝风险增加,一旦种群数量跌至临界阈值之下,阿利效应也许会让种群陷入灭绝漩涡,2020—2023年的研究表明全球大概15%的脊椎动物种群就处在这么危险的情况下。关键功能物种数量少了会降低生态系统的弹性和功能,像大型食草动物种群减少了就会改变植被结构和演替过程,传粉者变少会影响植物繁殖成功率,因为全球约75%的粮食作物靠动物传粉,传粉者减少使某些地区作物产量下降了10%~15%^[3]。另外,种群数量发生变化还会影响到捕食者-猎物关系、竞争关系和互惠关系等种间相互作用,进而让群落结构和生态系统过程再次改变。

3 野生动物生境恢复策略

3.1 生态廊道建设

为了保护生物多样性,生态廊道作为一种关键结构被广泛应用。研究表明,合理规划生态廊道能够改善生态系统连接度,从而减少动物群体分离的可能性。从2019年到2023年,全球野生动物廊道的面积增加了23.7%,其中增幅最大的区域是亚洲,达到了31.2%。这类设施的形式多种多样,包括森林走廊、河流缓冲带、动物过道以及“生态跳石”等,每种形式都应根据不同动物种类和地理环境的特点量身定制解决方案。

景观生态学原理得用于生态廊道建设且还得把栖息地适宜性分析与动物行为学研究结合起来,有最新研究显示,“3C原则”是成功建设廊道需要遵循的,即连通性、兼容性和成本效益。中国“十四五”规划明确要构建国家生态安全屏障,打算到2025年建成35条关键野生动物迁徙廊道,这意味着生态保护理念已深深扎根于国家战略之中,2022年开启的“东北虎豹国家公园廊道网络计划”在国际野生动物保护领域堪称典型案例。

3.2 栖息地修复与重建

应对生境退化,栖息地修复与重建这种直接干预措施的核心理念在于恢复生态系统结构功能以及生物多样性,并且2020—2023年全球栖息地修复项目数量每年平均增长18.3%、总投资超270亿美元。保护生物学领域的最新研究表明,栖息地修复要有效就得从微生境要素恢复、生态系统过程重建和景观连通性提升这三个层次出发,并且关键物种栖息地的修复更要优先考虑食物资源供给、繁殖

场所提供和避险庇护功能^[4]。

在栖息地重建实践当中,把主动修复和自然恢复相结合的“混合策略”效果相当明显,经2021—2023年案例分析发现,用这种策略的项目成功率比传统单一方法高42%且成本能省大概25%,栖息地重建技术涵盖本土植被恢复、微地形改造、水文条件调节等内容,所以要依据目标物种的生态需求以及本地状况制定出精确的方案,并且栖息地修复得着重于生物群落的完整性和功能性,单纯恢复植被覆盖是不够的,因为最新研究显示,考虑到食物网关系和种间互作的栖息地修复项目,其生物多样性恢复效果远超传统方法。

3.3 污染控制与环境治理

野生动物生境恢复中,污染控制与环境治理有着基础性作用且对生态系统健康以及物种生存状况有直接影响。环境保护部门统计显示,2019—2023年,全球每年因环境污染而死于野生动物的事件平均增长7.8%且水污染和农药残留是两大主要原因。生境污染给野生动物带来危害,主要体现为生理机能受损、繁殖能力降低以及食物链毒素堆积,而且近期研究发现,像亚致死浓度这样的污染物也许会干扰内分泌系统从而对野生动物种群产生长期无法逆转的影响。

“源头控制-过程拦截-末端治理”这一全链条管理理念是环境治理策略的制定依据,在农业方面,要有效减少对周边野生动物栖息地的污染就得减少农药化肥使用并发展有机农业与生态种植模式,而在工业和城市污染治理上,2020—2023年期间,像人工湿地净化系统、植物修复技术这类采用自然基础设施(NBS)的环境治理项目增加了63%,这些举措不但能有效降低污染物浓度还能创造出新的野生动物栖息空间,需要注意的是,环境治理得采用适应性管理策略,即持续监测污染物浓度和生物指标后及时调整治理方案。

4 结论

本研究对人类活动干扰下野生动物生境退化机理加以系统分析并提出一套综合性恢复策略。研究表明,城市化、农业扩张、基础设施建设以及资源开采等多种人类活动共同作用导致生境退化这一复杂现象,这些活动不但直接占用和使野生动物栖息地碎片化,而且会间接影响野生动物生存,因为它们改变了景观格局、生态过程与环境条件。根据上述退化机理,建立生态廊道、修复栖息地、控制环境污染以及优化保护区网络等策略组成了有效的干预体系,并且需要着重指出,想要成功恢复生境就必须基于整体景观视角与系统思维,把物种保护、生态系统功能维持以及人类可持续发展需求有机结合起来。

野生动物生境未来的保护与恢复工作需重点关注如下方向:其一,要加强跨学科研究,特别要整合保护生物学、景观生态学和社会经济学等领域中的理论与方法。其

二,要发展基于大数据和人工智能的生境监测与评估技术以使管理决策更科学、更精准^[5]。其三,要探寻像生态补偿、碳汇交易这类市场化的保护激励机制和融资模式。其四,要强化公众参与以及多方协作并构建“政府主导、企业参与、公众支持、科研支撑”的协同治理体系,因为唯有将生态保护与社会经济发展相整合才可实现野生动物生境的有效恢复和长期保护从而推动人与自然和谐共生这一可持续发展目标。

[参考文献]

[1]刘艳华,栗佳妮,霍继尧,等.中国东北地区梅花鹿种群遗传多样性分析及其保护管理[J].绿洲农业科学与工程,2025,10(2):146-153.

[2]李保国,张河,李明,等.中国灵长类动物保护的成就与挑战[J].西北大学学报(自然科学版),2024,54(5):755-766.

[3]温都苏.东北虎豹等哺乳动物物种-栖息地网络、种群分布动态及增长潜力研究[D].黑龙江:东北林业大学,2024.

[4]张晋东.人类与自然干扰下大熊猫空间利用与活动模式研究[D].北京市:中国科学院大学,2012.

[5]刘艳华,刘磊,陈红,等.基于 MaxEnt 模型的北极村国家级自然保护区紫貂栖息地适宜性评价[J].生态学报,2024,44(2):559-569.

作者简介:顾瑞(1971.11—),女,辽宁人,现就职辽阳县林业草原事务服务中心,高级工程师,长期从事野生动植物保护方向工作。

二氧化硫污染治理技术的研究进展与未来展望

王晨晨 苏奇祥 黄龙祥 农熙悦 曾月俊 黄在银*

广西民族大学 化学化工学院, 广西 南宁 530006

[摘要] 二氧化硫 (SO₂) 作为主要大气污染物之一, 对生态环境和人类健康构成严重威胁。本文系统梳理了 SO₂ 污染的来源与分布特征, 重点分析了湿法脱硫、干法脱硫、生物脱硫及电化学氧化等治理技术的研究进展。传统湿法脱硫技术 (如石灰石-石膏法) 效率高但能耗大, 干法脱硫技术 (如活性炭吸附) 无废水但效率较低; 而新兴的生物脱硫和电化学氧化技术兼具高效性与资源化潜力, 体现了“污染治理与资源化结合”的可持续发展理念。未来, SO₂ 污染治理将向多技术协同、智能化控制和新型材料研发方向发展, 同时需政策支持与技术创新的协同推进, 以实现高效、节能、资源化的治理目标, 助力“双碳”战略实施。本文旨在为 SO₂ 污染治理技术的优化与应用提供参考。

[关键词] 二氧化硫污染; 污染治理技术; 资源化利用; 环境治理

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17718

中图分类号: X701

文献标识码: A

Research Progress and Future Prospects of Sulfur Dioxide Pollution Control Technologies

WANG Chenchen, SU Qixiang, HUANG Longxiang; NONG Xiyue; ZENG Yuejun; HUANG Zaiyin*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract: Sulfur dioxide (SO₂), as one of the major atmospheric pollutants, poses a serious threat to the ecological environment and human health. This article systematically reviews the sources and distribution characteristics of SO₂ pollution, with a focus on analyzing the research progress of control technologies such as wet desulfurization, dry desulfurization, biological desulfurization, and electrochemical oxidation. Traditional wet desulfurization technologies (such as limestone-gypsum process) are efficient but consume a lot of energy, while dry desulfurization technologies (such as activated carbon adsorption) produce no wastewater but are less efficient. Emerging biological desulfurization and electrochemical oxidation technologies, on the other hand, combine high efficiency with resource recovery potential, embodying the sustainable development concept of "combining pollution control with resource recovery". In the future, SO₂ pollution control will develop towards multi-technology collaboration, intelligent control, and new material research and development. At the same time, it requires policy support and collaborative promotion of technological innovation to achieve the goals of efficient, energy-saving, and resource-oriented control, thereby supporting the implementation of the "dual carbon" strategy. This article aims to provide references for the optimization and application of SO₂ pollution control technologies.

Keywords: sulfur dioxide pollution; pollution control technology; resource utilization; environmental governance

引言

SO₂ 是大气污染的主要污染物之一, 对生态环境和人类健康造成严重危害。它不仅会直接损害呼吸系统, 还会通过大气化学反应生成硫酸盐气溶胶, 加剧雾霾污染^[1]。随着工业化的快速发展, SO₂ 排放问题日益严峻, 特别是在以煤炭为主要能源的国家, 燃煤电厂、冶金等行业成为 SO₂ 排放的主要来源^[2]。因此, 开发高效、经济的 SO₂ 治理技术, 已成为环境领域的重要课题。

当前, SO₂ 污染治理技术已形成多元化体系。传统的湿法脱硫技术 (如石灰石-石膏法) 脱硫效率高, 但存在能耗大、废水处理难等问题; 干法脱硫技术 (如活性炭吸附) 流程简单、无废水排放, 但效率相对较低^[3]。近年来, 生物脱硫、电化学氧化等新兴技术快速发展, 在实现污染物高效去除的同时, 还能将 SO₂ 转化为有价值的资源, 体现了“污染治理与资源化结合”的可持续发展理念^[4]。然而, 这些技术在稳定性、成本等方面仍需进一步优化。

在全球推进“碳达峰、碳中和”的背景下, SO₂ 治理面临新的挑战。一方面, 超低排放标准要求开发更高效的深度治理技术; 另一方面, 节能降耗、资源循环的理念促使传统技术不断升级。同时, 智能化技术的发展为 SO₂ 污染控制提供了新的解决方案。

本文系统梳理了 SO₂ 污染特征及其治理技术的研究进展, 重点分析了湿法脱硫、干法脱硫、生物脱硫和电化学氧化等技术的原理、特点和应用现状, 探讨了各类技术的优化方向, 并展望了未来发展趋势, 以期 SO₂ 污染治理提供参考。

1 SO₂ 的污染来源与分布特征

SO₂ 的污染来源与分布特征是一个复杂的环境问题, 涉及自然和人为双重因素。自然源虽然包括火山喷发和海洋释放等过程, 但其对全球 SO₂ 污染的贡献相对有限。相比之下, 人为活动产生的 SO₂ 排放占据了主导地位, 特别是在我国这样的工业大国。以煤炭为主的能源结构使得燃

煤电厂成为 SO₂ 排放的最大来源，其排放的烟气中 SO₂ 浓度通常较高，治理难度大^[5]。冶金行业如铜、镍冶炼过程中产生的低浓度 SO₂ 烟气同样不容忽视，这类烟气往往成分复杂，含有多种重金属污染物，需要特殊的处理技术^[6]。

从时空分布来看，SO₂ 污染呈现出明显的季节性和区域性特征。冬季由于取暖需求增加，燃煤量上升，导致 SO₂ 排放量显著增加，这在北方地区尤为明显。空间分布上，京津冀、长三角等工业发达地区的 SO₂ 污染问题更为突出，这些地区的污染物还容易通过大气传输影响周边区域，形成区域性复合污染^[14]。

值得注意的是，SO₂ 在大气中不仅会直接危害人体健康，还会通过化学反应生成二次污染物。SO₂ 可被氧化为 SO₃，进而形成硫酸盐气溶胶，这些细颗粒物是雾霾的重要组成成分。在治理技术方面，传统的湿法脱硫虽然效率较高，但存在废水处理难题；而新兴的干法脱硫技术如活性焦吸附法则显示出较好的应用前景^[7]。此外，紫外荧光法等精准监测手段的应用，为 SO₂ 污染的溯源和治理提供了更可靠的数据支持^[8]。

2 SO₂ 治理技术的研究进展

2.1 湿法脱硫技术

湿法脱硫技术因反应速率快、脱硫效率高，在大型工业烟气治理中居核心地位，其中石灰石-石膏法应用最广。其原理是利用石灰浆液作为吸收剂，在吸收塔内与烟气中 SO₂ 反应：SO₂ 先溶于水生成亚硫酸，再与碳酸钙反应生成亚硫酸钙，最后通过强制氧化转化为石膏。这一系列液相反应高效进行，脱硫效率通常稳定在 90% 以上，部分优化系统可达 95% 以上，能满足多数工业烟气深度治理需求。但石灰石-石膏法存在明显短板：一是脱硫废水含高浓度氯离子、悬浮物及重金属离子，现有处理工艺成本高且可能产生二次污泥；二是副产物石膏因受烟气中粉尘、重金属污染，纯度降低，约 30% 只能堆存，既占用土地又有淋溶污染风险。

近年来，针对上述问题的优化研究取得了多项突破。在吸收塔结构优化方面，研究者通过改进喷淋层布置（如采用多层螺旋式喷淋）和增加湍流促进器（如多孔挡板），强化了气液传质效率，使脱硫剂利用率提升 10%~15%，同时降低了液气比，减少了水泵能耗。研究团队针对燃煤电厂高硫煤燃烧产生的高含硫烟气脱硫难题，通过计算流体力学开展研究，提出基于塔内筛板构件及喷淋系统优化的多手段耦合增效方法。他们建立涵盖喷淋吸收-筛板鼓泡吸收的 SO₂ 多形式吸收脱除耦合模型，发现通过塔内筛板构件及喷淋系统优化多手段协同增效后，可实现不同工况下脱硫塔 SO₂ 脱除效率提升 3%~8%^[9]。添加剂的创新应用也成为重要方向，例如在吸收剂中引入柠檬酸、酒石酸等有机酸，可通过络合钙离子促进石灰石溶解，缓解塔内结垢现象，使系统连续运行周期延长至 30d 以上；而添加镁盐（如 MgSO₃）则能提高吸收液对 SO₂ 的溶解度，

尤其在低浓度 SO₂ 烟气中，脱硫效率可再提升 5%~8%。

2.2 干法脱硫技术

干法脱硫技术以无液相参与、脱硫产物为干态固体为显著特征，因其设备简单、无废水排放的优势，在中小型锅炉、垃圾焚烧炉等低浓度 SO₂ 治理场景中得到广泛应用。目前主流技术包括活性炭吸附法、喷雾干燥法和循环流化床法等，其核心是通过固体吸收剂或干燥反应产物实现 SO₂ 的脱除。

钙基吸附剂（ACS）作为干法脱硫领域的重要研究方向，以其低成本原料（粉煤灰、CaO、废石膏）和独特的化学吸附机制展现出显著优势。Wang Kai-Qi 等通过一步初浸渍法制备的 ACS 吸附剂在 150℃ 条件下表现出卓越的 SO₂ 脱除性能，吸附容量高达 44.26 mg/g，这主要归功于其特殊的纤维网状结构和优化的中孔分布（平均孔径 22.34nm），为 SO₂ 吸附提供了丰富的活性位点^[10]。该材料的脱硫机理表现为多级化学吸附过程：SO₂ 首先被吸附在材料表面，与 Ca(OH)₂ 反应生成亚硫酸钙（CaSO₃）；在 O₂ 存在条件下进一步氧化为更稳定的硫酸钙（CaSO₄）。特别值得注意的是，研究揭示了 O₂ 和 NO 的协同催化作用，烟气中的 NO 可氧化生成 NO₂ 或硝酸盐物种，作为强氧化剂显著促进 SO₂ 向硫酸盐转化，使初期脱硫效率达到 100%。这种基于化学转化的脱硫机制不仅实现了高效的 SO₂ 去除，其最终产物硫酸钙更可直接用于建材或安全填埋，无需复杂再生过程，完美诠释了“以废治废”的环保理念，为工业烟气治理提供了兼具高效性和可持续性的创新解决方案。

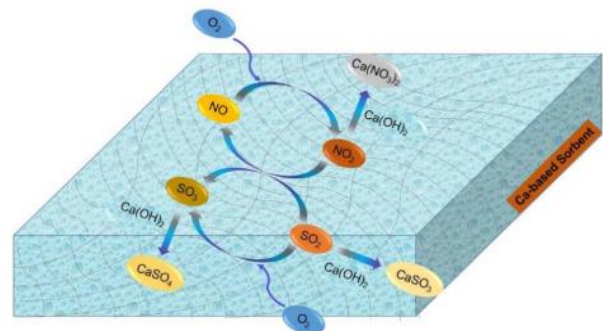


图 1 通过 NO 和 O₂ 的存在增强的脱硫反应路线^[10]

2.3 生物脱硫技术

生物脱硫技术兼具速度快、周期短、设备简单与专一性强、效率高、污染少的特点，是目前世界广泛研究的新型脱硫方法。该法主要依靠特定微生物的代谢活动，将硫化物转化为硫酸盐或其他非硫化物形式。梅山钢铁焦炉煤气 DDS 生物脱硫技术采用具仿血红蛋白载氧特性的 DDS-Fe 催化剂与特种脱硫菌，经吸收、再生和生化降解三阶段反应，将煤气中 H₂S 和有机硫转化为单质硫，还避免了传统湿法脱硫副盐积累问题，为焦化行业提供可推广的绿色解决方案^[11]。

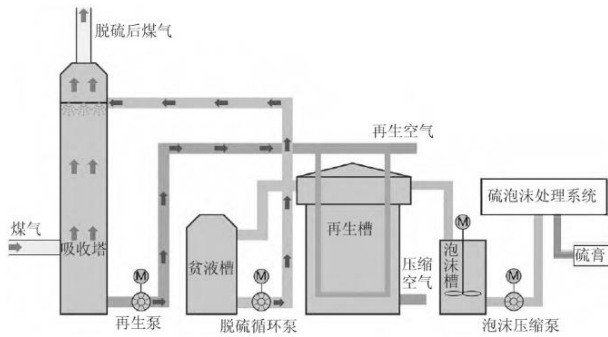


图2 DDS生物脱硫技术工艺流程^[12]

工业烟气中常含有重金属和有机污染物,可能抑制微生物生长,导致系统处理效率波动。针对这些问题,研究者提出了多种优化方案。程灿等通过添加缓冲剂和温度调控装置,将生物反应器的适应性扩展到 pH=2.0~5.0 和 25~45℃范围^[12]。未来研究应聚焦高效反应器设计、功能菌群定向驯化及多技术协同系统开发,推动生物脱硫技术在钢铁、陶瓷等高排放行业规模化应用。

2.4 电化学氧化技术

电化学氧化作为一种新兴的 SO₂ 治理方法,因其高效性和资源化潜力受到广泛关注^[13]。该技术核心是用电催化剂将 SO₂ 直接氧化为硫酸,既高效去除污染物,又转化为有工业价值的硫酸产物^[14]。

张雨蕾研究团队在离子液体电化学氧化 SO₂ 方面获重要进展^[15]。团队研究三种离子液体在含 O₂ 条件下对 SO₂ 的氧化行为,发现[TMG][Lac]体系一次吸收-解吸循环后 SO₂ 氧化率达 6.2%,且 SO₂ 氧化程度与吸收温度和时间正相关,温度从 25℃升至 60℃时氧化率可提高 2-3 倍。为抑制该副反应,引入乙二醇作氧化抑制剂,添加 10wt% 乙二醇可使 SO₂ 氧化率降低 40%以上。此项研究为电化学氧化副反应控制提供新思路,对提升 SO₂ 资源化利用效率意义重大。此外,反应器设计、能耗优化及硫酸产物分离提纯等工程问题亟待解决。未来研究可结合膜分离技术或耦合其他脱硫工艺(如吸附、生物脱硫),提升系统经济性和适用性。总体而言,电化学氧化技术为 SO₂ 治理开辟资源化新路径,但从实验室走向工业现场需跨学科协作和技术迭代。

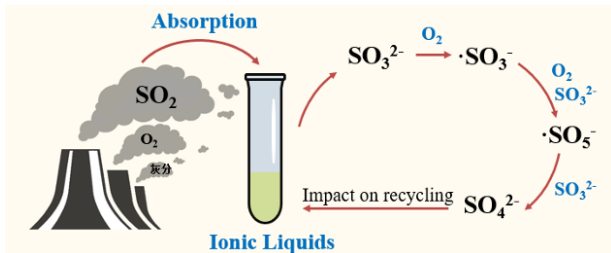


图3 离子液体脱硫过程中 SO₂ 的氧化^[15]

3 未来展望

未来 SO₂ 污染治理将呈现多技术协同发展的趋势。在

技术创新方面,新型吸附材料和催化剂的研发将重点突破现有技术的效率瓶颈,特别是针对低温条件和复杂烟气成分的适应性提升。多种治理技术的系统集成将成为主流发展方向,通过联合脱硫脱硝等协同工艺实现多污染物同步去除,同时降低能耗和运行成本。

智能化转型将深刻改变传统治理模式。高精度传感技术与物联网平台的结合,可实现排放源的实时监测和治理工艺的动态优化,推动污染控制向精准化、智能化方向发展。政策层面需要进一步完善标准体系,通过差异化管控和经济激励措施,促进先进技术的推广应用。

4 结论

SO₂ 污染治理技术已形成多元化体系,传统湿法脱硫效率高但能耗大,干法脱硫无废水但效率较低,生物脱硫和电化学氧化等新兴技术则兼具高效性与资源化潜力。未来发展趋势将聚焦于多技术协同优化、新型材料研发及智能化控制,以提高适应性并降低成本。同时,政策支持与技术创新需协同推进,推动治理技术向高效、节能、资源化方向发展,助力“双碳”目标实现。通过跨学科合作与工程化应用,SO₂ 污染治理将迈向更高效、可持续的新阶段。

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目-202510608002X; 国家自然科学基金项目-22263001。

[参考文献]

- [1] Tengyu Liu, Arthur W. H. Chan, Jonathan P. D. Abbatt. Multiphase Oxidation of Sulfur Dioxide in Aerosol Particles: Implications for Sulfate Formation in Polluted Environments. [J]. Environ. Sci. Technol, 2021, 55(8): 4227-4242.
- [2] 兰文港,孔万林,臧昆鹏,等. 杭州城郊大气二氧化硫和气溶胶浓度演变特征及潜在源分析 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(2): 287-297.
- [3] 徐刚强,张珂,刘涛. 工业废气主要污染物治理措施研究 [J]. 青海环境, 2024, 34(2): 92-95.
- [4] LIGY PHILIP, MARCA. DESHUSS ES. Sulfur Dioxide Treatment from Flue Gases Using a Biotrickling Filter-Bioreactor System [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(9): 1978-1982.
- [5] 贾玉成. 中国环境科学学会年会论文集 [C]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2021.
- [6] 叶新军,邵志超,高泽磊,等. 低浓度二氧化硫烟气分质高效治理技术应用 [J]. 硫酸工业, 2017(9): 42-44.
- [7] 王慧红,刘碧涛. 活性焦联合脱硫脱硝技术在烟气治理中的应用 [J]. 资源节约与环保, 2020(4): 5.
- [8] 王峻. 微型化二氧化硫分析设备关键技术研究 [D]. 河北: 河北工程大学, 2022.
- [9] 赵毅,房慧德,刘侃. 湿法脱硫塔喷淋层布置研究综述 [J]. 山东化工, 2018, 47(3): 46-48.
- [10] Kai-Qi Wang, Xian-Ming Gao, et al. An efficient

calcium-based sorbent for flue gas drydesulfurization: promotion roles of nitrogen oxide and oxygen[J].RSC Adv,2023,13(2):1312-1319.

[11]王军.梅山钢铁焦炉煤气 DDS 生物脱硫技术的应用研究[J].低碳世界,2024,14(5):10-12.

[12]程灿.陶瓷行业烟气中 SO₂ 及 NO_x 治理方法的研究进展[J].四川化工,2023(1):17-20.

[13]黄成吉.电化学脱硫技术综述[J].华中电

力,2004(5):52-55.

[14]张正阳,王海北,孙留根.电化学方法处理二氧化硫研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2020(3):4-6.

[15]张雨蕾.离子液体烟气脱硫过程中二氧化硫的氧化及抑制氧化研究[D].北京:北京化工大学,2023.

作者简介:王晨晨(2004—),男,汉族,河北邯郸,本科在读,广西民族大学化学化工学院,研究方向:环境化学。

GBL 装置 1,4-丁二醇汽化器结垢成因分析及优化改进研究

邓仔勇

四川天华化工集团股份有限公司, 四川 泸州 646000

[摘要]为解决四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置中 1,4-丁二醇汽化器的结垢问题, 保障装置连续稳定运行并降低运维成本, 本研究对结垢成因、现有处理方式展开系统分析, 同时通过对比实验与工艺模拟提出优化方案并验证成效。研究表明, 汽化器结垢主要源于两方面: 一是 1,4-丁二醇进料中未被现有过滤器有效截留的高沸物, 二是 1,4-丁二醇及其杂质在汽化过程中分解形成的残留物, 二者在汽化器列管与翅片表面沉积, 导致换热效率下降, 且当前离线停机清洗模式严重影响装置连续性。针对该问题, 本研究提出两项核心改进措施: 其一, 升级 1,4-丁二醇进料过滤器, 将塑胶骨架替换为 304 不锈钢骨架, 并精准控制进料温度至 45℃, 强化高沸物截留效果; 其二, 优化汽化器结构, 调整装配方向为从上向下安装, 减小翅片宽度, 同时将点焊固定改为进口翅片打孔后钢丝固定。实际应用结果显示, 改进后汽化器结垢周期延长 60% 以上, 离线清洗频次降低 50%, 操作人员拆取翅片效率提升 50%, 且有效保障了 GBL 产品纯度 (>99.7%), 显著提升装置运行连续性与经济性, 为同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可行的技术参考。

[关键词]1,4-丁二醇; 1,4-丁二醇汽化器; GBL 装置

DOI: 10.33142/nstr.v2i3.17725

中图分类号: TQ545

文献标识码: A

Analysis of Scaling Causes and Optimization Improvement Research on 1,4-butanediol Vaporizer in GBL Device

DENG Ziyong

Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., Luzhou, Sichuan, 646000, China

Abstract: In order to solve the scaling problem of 1,4-butanediol vaporizer in the GBL unit of Sichuan Tianhua Chemical Group Co., Ltd., ensure continuous and stable operation of the unit, and reduce operation and maintenance costs, this study conducts a systematic analysis of the causes of scaling and existing treatment methods. At the same time, through comparative experiments and process simulations, optimization solutions are proposed and the effectiveness is verified. Research has shown that scaling in vaporizers is mainly caused by two factors: Firstly, the high boiling material in the 1,4-butanediol feed that is not effectively intercepted by existing filters; secondly, the residue formed by the decomposition of 1,4-butanediol and its impurities during the vaporization process, which deposits on the surface of the vaporizer tubes and fins, resulting in a decrease in heat transfer efficiency, and the current offline shutdown cleaning mode seriously affects the continuity of the device. In response to this issue, this study proposes two core improvement measures: firstly, upgrading the 1,4-butanediol feed filter, replacing the plastic skeleton with a 304 stainless steel skeleton, and accurately controlling the feed temperature to 45 °C to enhance the retention effect of high boiling materials; Secondly, optimize the structure of the vaporizer, adjust the assembly direction to install from top to bottom, reduce the width of the fins, and change the spot welding fixation to steel wire fixation after drilling the inlet fins. The actual application results show that the improved vaporizer has extended the scaling cycle by more than 60%, reduced offline cleaning frequency by 50%, increased the efficiency of removing fins by 50%, and effectively ensured the purity of GBL products (>99.7%), significantly improving the continuity and economy of device operation, providing feasible technical reference for scaling control of similar GBL production devices.

Keywords: 1,4-butanediol; 1,4-butanediol vaporizer; GBL device

1 概述

为解决四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置以 1,4-丁二醇为原料、氢气为载体经铜催化脱氢, 精馏提纯工艺中, 1,4-丁二醇汽化器存在的结垢问题, 本研究针对结垢成因及现有处理方式展开分析, 并提出优化方案。

该装置所用 1,4-丁二醇为原料(含丁二醇车间新鲜料及产品塔侧采回收料)在与循环氢气混合雾化后, 需进入带翅片汽化器管程完成汽化; 但原料中未被现有过滤器去除的高沸物, 及 1,4-丁二醇自身与杂质在汽化过程中分解

形成的残留物, 会在汽化器列管与翅片表面沉积结垢, 直接导致设备换热效率下降。目前针对严重结垢需采用离线停机模式, 通过拆解翅片后进行机械清洗或水力清洗, 不仅影响装置连续运行, 还增加运维成本。

通过对比实验与工艺模拟, 本研究提出两项改进措施: 一是优化 1,4-丁二醇过滤器结构以强化高沸物截留效果, 二是调整汽化器安装方式以改善物料流场与汽化均匀性。结果表明, 上述改进可有效抑制 1,4-丁二醇汽化出口高盐结焦物的生成, 使汽化器结垢周期延长 60% 以上, 离线

清洗频次降低 50%，既保障了 GBL 产品（纯度>99.7%）的稳定产出，又提升了装置运行连续性与经济性，为同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可行技术参考。

2 GBL 装置简介

来自丁二醇车间的原料 1,4-丁二醇经过 1,4-丁二醇汽化器同循环氢气一起加热到 215°C 汽化（高于其露点温度 210°C），在蒸发分离器中除去所夹带的液体后，经过热器过热到 235~245°C，以防止 1,4-丁二醇在反应器内催化剂床层冷凝损坏催化剂；经过过热的 1,4-丁二醇蒸汽和氢气以绝对不含液体的形式通过在含铜催化剂固定床层对 1,4-丁二醇进行气相脱氢反应而生成粗 GBL，反应的热点控制温度在 202~205°C，反应器壳侧通过补偿反应吸热和控制反应器催化剂床层温度^[1]。

反应器出口气经冷却后进入粗 GBL 分离罐，将 BLO 和 H₂ 分离，粗 BLO 经过产品换热器进入精馏系统提纯；H₂ 大部分经循环氢压缩机加压后继续同新鲜的 1,4-丁二醇混合后汽化、过热后在反应器进行 1,4-丁二醇脱氢；副产的部分 H₂ 经过甲烷化炉进出口换热器 E 和电加热器加热到 285°C~290°C 后，在甲烷化炉内将 H₂ 中所含 CO、CO₂ 去除（CO+CO₂≤10ppm），通过氢气升压机升压后送双甲车间。

3 现状分析

3.1 1,4-丁二醇进料过滤器现状分析

在四川天华化工集团股份有限公司 GBL 生产装置的新鲜 1,4-丁二醇进料流程中，原料体系包含丁二醇车间输送的新鲜 1,4-丁二醇与产品塔侧采回收的循环 1,4-丁二醇，两类物料需先经前置过滤器处理后，方可进入后续 1,4-丁二醇汽化器参与汽化反应。当前装置配置的过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉作为核心过滤介质，支撑骨架为塑胶材质，该设计虽能初步拦截原料中粒径较大的机械杂质（如管道碎屑、微量固体残渣），但从实际运行数据来看，存在明显的性能短板与运维痛点——根据连续 12 个月的运行统计，该过滤器平均每 2 个月就需切换到过滤器旁路更换一次过滤棉，不仅增加了人工操作成本与过滤耗材采购支出，还会导致汽化器进料量短暂波动和未过滤的管道碎屑、微量固体残渣进入 1,4-丁二醇汽化器，直接造成 1,4-丁二醇汽化器结垢，间接影响后续铜催化脱氢反应的稳定性，甚至可能因进料中断引发 GBL 产品纯度的瞬时波动。

深入分析过滤器的运行缺陷可知，其核心问题集中在过滤介质与骨架材质的适配性不足：一方面，因 1,4-丁二醇的熔点为 20.1°C，在冬天遇到进料管线和 1,4-丁二醇储罐温度低于 40°C 时 1,4-丁二醇的黏度会上升，导致进料过滤器的压差上升。需要频繁地切过滤器，走旁路。就会导致未被拦截的高沸物随原料进入汽化器后，在列管与翅片表面附着，成为结垢的重要“先驱物”；另一方面，塑胶骨架在 1,4-丁二醇进料系统的常温、弱酸性环境下，长

期接触物料易出现局部溶胀变形，导致过滤棉与骨架内壁贴合度下降，形成约 0.1~0.3mm 的“旁流通道”，部分杂质可直接通过通道绕过过滤棉进入汽化器，进一步削弱过滤效果。此外，频繁的过滤棉更换过程中，进料管道需短暂敞口，空气易与系统内残留的氢气混合，虽通过氮气置换可降低风险，但仍存在潜在安全隐患，且每次更换后需重新调试进料流量，增加了工艺控制的复杂性。

3.2 1,4-丁二醇汽化器现状分析

四川天华化工集团股份有限公司 GBL 装置的 1,4-丁二醇汽化工段，原料体系分为两类：一是丁二醇车间输送的新鲜 1,4-丁二醇，二是产品塔侧线采出的回收 1,4-丁二醇。两类物料与循环氢共同进入混合器，经超音速喷嘴雾化形成的气液混合雾滴后，共同进入带翅片的列管式汽化器管程。该汽化器的加热热源来自 282 系统的 LT 导热油蒸汽，导热油在汽化器壳侧逆向流动，通过翅片与管程壁面的强制传热，使管程内的 1,4-丁二醇雾滴快速汽化，工艺要求汽化器出口温度稳定控制在 210°C 以上，以确保 1,4-丁二醇汽化率≥99.8%，满足后续铜催化脱氢反应对原料气纯度的需求。然而，在长期运行过程中，该汽化器存在显著的结垢问题，其成因可归结为两方面：一方面，新鲜 1,4-丁二醇中含有的微量醛类、酯类杂质，以及回收 1,4-丁二醇在循环过程中因局部高温生成的低聚物，在 210°C 以上的汽化温度下会发生热分解反应，生成羰基残留物；另一方面，当前 1,4-丁二醇前置过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉介质（孔径 5μm），对原料中粒径小于 5μm 的高沸物（如分子量≥200 的 1,4-丁二醇衍生物）截留效率仅为 25%~30%，未被拦截的高沸物随 1,4-丁二醇蒸汽在汽化器管程内流动时，会因翅片表面温度梯度发生相变沉积。上述两类物质共同附着在汽化器列管内壁与翅片表面，形成厚度不均的结垢层，且结垢速率随运行时间呈非线性增长——此时管程与壳侧的传热热阻显著增加，换热系数下降 30%~40%，为维持出口温度≥210°C，需将 LT 导热油蒸汽进口温度提高至 260°C~265°C，不仅增加了导热油系统的能耗，还会加剧 1,4-丁二醇的过度分解，形成“结垢-能耗上升-进一步结垢”的恶性循环^[2]。

1,4-丁二醇汽化器作为实现介质相变的关键设备，其换热性能直接决定了整个工艺系统的运行效率与稳定性，而列管-翅片组合结构是保障换热效果的核心组件。该汽化器采用 444 根列管作为基础换热单元，列管内部均装配翅片，此设计的核心目的在于通过翅片大幅扩展管内换热面积，打破单纯依靠列管管壁换热的局限，尤其针对 1,4-丁二醇这类黏度相对较高、传热系数较低的介质，能有效强化管内对流换热效率，缩短汽化过程所需时间，降低系统能耗。由于列管与花板采用点焊固定，每次清洗时必须将所有焊点完全剔除，才能解除翅片与列管的约束，实现翅片的取出与管内清洗。但在实际操作中，焊点剔除面临

两大问题:

剔除不彻底的普遍性: 444 根列管对应数量庞大的焊点, 且部分焊点可能因焊接时电流、压力不均, 导致焊点与基材结合紧密程度存在差异, 部分焊点甚至出现“深埋”于花板表面的情况。操作人员依靠常规工具(如錾子、角磨机)进行剔除时, 难以保证每一个焊点都被完全清除, 残留的焊点会形成凸起或卡阻结构, 直接导致翅片无法顺利抽出。

设备损伤的高发性: 为尽可能清除残留焊点, 操作人员往往需要加大工具作用力或延长打磨时间, 这一过程极易对列管花板造成损伤。花板作为列管的支撑与密封载体, 其表面平整度与厚度精度直接影响列管的密封性。打磨过程中若出现花板表面划痕、凹陷, 或因过度打磨导致花板局部厚度减薄, 会破坏列管与花板的密封配合面, 后续重新装配时极易出现介质泄漏问题。统计数据显示, 每次清洗后因花板损伤导致的泄漏率约占设备故障总数的 30%~40%, 且泄漏位置多集中于焊点密集区域, 维修难度大、成本高。

即使焊点剔除完成, 翅片取出过程仍面临巨大挑战。一方面, 1,4-丁二醇在汽化过程中可能产生微量腐蚀性物质, 长期运行后翅片与列管内壁可能出现轻微腐蚀粘连, 加之结垢层在翅片与管壁之间的填充, 进一步增加了翅片与列管的摩擦力, 导致翅片取出时需要施加较大外力, 操作难度显著提升。另一方面, 操作人员在取出翅片时, 若用力不均或工具使用不当, 可能导致翅片发生变形、弯折, 甚至出现翅片断裂在列管内的情况, 不仅影响本次清洗效果, 还可能为后续设备运行埋下堵塞隐患。

更严重的是, 每次清洗后都会出现部分列管的翅片无法取出的情况。无法取出的翅片会被永久留在列管内, 其表面的结垢层无法清除, 相当于该列管的有效换热面积大幅缩减, 且结垢层会持续增厚。长期累积下来, 无法取出翅片的列管数量逐渐增加, 444 根列管的有效换热单元不断减少, 设备整体换热效率呈现阶梯式下降趋势。

4 改进措施

4.1 1,4-丁二醇进料过滤器改进措施

为有效解决现有过滤器运行问题, 结合装置实际工况与工艺核心需求, 现从过滤器骨架材质升级、1,4-丁二醇进料温度精准调控两大维度提出针对性改进方案, 具体内容如下:

4.1.1 过滤器骨架材质升级: 塑胶骨架替换为 304 不锈钢骨架

针对原塑胶骨架易因材质特性导致“旁流通道”、结构稳定性不足等问题, 将其全面替换为 304 不锈钢骨架。该材质具备三大核心优势: 一是优异耐腐蚀性, 可适配装置内复杂介质环境, 避免长期运行中的材质老化与腐蚀破损; 二是高强度结构稳定性, 能长期保持骨架形态, 防止因压力波动导致的形变; 三是高精度贴合性, 通过精密机

械加工确保与滤芯的无缝贴合, 从根本上消除“旁流通道”问题, 保障过滤效率。从实际运行效果来看, 改进后过滤器平均更换周期由原周期延长至 8 个月/次, 不仅大幅降低过滤耗材的采购与更换成本, 更避免了因过滤器频繁更换导致的进料波动, 有效保障了 GBL 产品质量稳定性, 同时显著提升装置整体运行的连续性与经济性。

4.1.2 1,4-丁二醇进料温度精准控制: 稳定控制在 45℃

针对原 1,4-丁二醇进料温度偏低易导致过滤器频繁切换的问题, 优化温度控制系统, 将 1,4-丁二醇进料温度精准稳定控制在 45℃。该温度参数经过工艺验证, 既能避免因温度过低导致 1,4-丁二醇物料黏度升高、杂质易附着堵塞滤芯的问题, 又能适配后续反应工艺需求。根据运行数据统计, 当 1,4-丁二醇 进料温度稳定控制在 45℃及以上时, 未再发生因温度控制不当导致的过滤器切换情况, 进一步减少了非计划停机次数, 提升了装置运行稳定性与生产效率。

4.2 1,4-丁二醇汽化器改进措施

从本质层面分析, 当前设备清洗难题的核心根源, 在于结构与运维需求的根本性不匹配。在设备设计阶段, 研发重心过度偏向初期的组装便捷性与初始密封性, 汽化器翅片采用点焊固定结构时, 未将后续长期清洗维护的可操作性纳入核心考量维度, 直接导致设备“一次性组装成型”的设计属性, 与实际运维中“多次性拆解清洗”的现实需求形成尖锐矛盾, 为后续清洗工作埋下先天性障碍。与此同时, 翅片与列管的配合间隙设计存在明显缺陷: 既未充分结合介质物理化学特性预留合理空间, 也未考虑设备长期运行后介质残留引发的翅片与列管粘连风险, 更缺乏便于翅片快速取出的结构优化设计, 进一步加剧了清洗操作的难度。现将原有装配方向调整为由上向下安装, 大幅降低操作人员的体力消耗, 提升组装与拆解效率; 通过优化设计减小翅片宽度, 从物理结构上降低翅片与列管内壁的摩擦阻力, 为翅片拆卸提供更大操作空间; 摒弃传统点焊固定工艺, 采用进口翅片打孔后以钢丝固定的全新方式。该方案不仅保留了结构稳定性, 更彻底解决了传统工艺中“剔除焊点易损坏花板”的关键痛点, 从根本上消除了清洗维护对设备本体的损伤风险。经实际验证, 上述改进方案成效显著, 操作人员拆卸翅片的效率较之前提升 50%, 有效化解了设备设计与运维需求之间的矛盾^[3]。

5 结语

本研究围绕四川天华化工 GBL 装置 1,4-丁二醇汽化器结垢这一核心问题, 通过对装置工艺、设备现状的深入剖析, 明确了结垢的关键诱因, 并针对性提出改进方案, 最终取得显著成效, 主要结论如下:

结垢成因清晰化: 汽化器结垢的核心原因在于原料处理与设备设计的双重不足。一方面, 原有 1,4-丁二醇进料过滤器采用纺纱式缠绕漂白棉介质与塑胶骨架, 不仅对粒

径小于 $5\mu\text{m}$ 的高沸物截留效率低 (仅 25%~30%), 且塑胶骨架易溶胀形成“旁流通道”, 导致杂质进入汽化器; 另一方面, 汽化器列管与翅片点焊固定的设计, 使得清洗时需剔除焊点, 不仅易造成花板损伤 (泄漏率达 30%~40%), 还因翅片与列管配合间隙不合理、粘连等问题, 增加清洗难度与设备损耗。

改进方案高效可行: 针对成因提出的两项改进措施具备显著实用性。过滤器升级后, 304 不锈钢骨架解决了“旁流通道”与腐蚀问题, 45°C 进料温度控制避免了物料黏度升高导致的频繁切换, 使过滤器更换周期从 2 个月延长至 8 个月; 汽化器结构优化后, 从上向下的装配方式降低操作体力消耗, 减小宽度的翅片减少摩擦阻力, 钢丝固定替代点焊彻底消除花板损伤风险, 多维度提升设备运维便捷性。

应用成效显著且具有推广价值: 改进后装置运行指标大幅优化, 汽化器结垢周期延长超 60%、离线清洗频次

降低 50%, 既减少了非计划停机对生产的影响, 又降低了运维成本; 同时, GBL 产品纯度稳定保持在 99.7% 以上, 保障了产品质量。该研究成果不仅为四川天华化工 GBL 装置的稳定运行提供支撑, 其技术思路与方案也为国内同类 GBL 生产装置的结垢控制提供了可借鉴的实践经验, 具备广泛的行业推广意义。

[参考文献]

[1]张悦,郝家悦,胡泽汇,等.1,4-丁二醇生产工艺及其换热网络优化[J].应用技术学报,2024,24(4):402-409.

[2]赵新明.1,4-丁二醇制备工艺的现状分析[J].化工管理,2017(26):49.

[3]李玉芳.我国 1,4-丁二醇生产技术研究进展[J].精细与专用化学品,2024,32(1):52-54.

作者简介: 邓仔勇 (1986.11—), 男, 籍贯: 广元, 学历: 本科, 职位: 工艺技术员, 研究方向: GBL、2-PY、NMP、NVP 等系列产品的生产与应用。

黄铁矿基类芬顿催化剂在有机污染物处理中的研究进展

黄鑫 农熙悦 黄旭东 黄圆圆 李忠明 黄在银*

广西民族大学 化学化工学院, 广西 南宁 530006

[摘要]近年来,随着工业化进程加速,水体中有机污染物的种类和浓度不断增加,因其高毒性、难降解性和在环境中的持久性而备受关注。黄铁矿(pyrite)是一种价格低廉、来源广泛的天然硫化铁矿物,在有机污染物降解方面展现出巨大潜力。本文系统综述了黄铁矿在处理典型有机污染物(如罗丹明 B、卡马西平、微囊藻毒素、泰乐霉素等)中的研究进展,重点探讨了其催化机制、改性策略及实际应用潜力。

[关键词]黄铁矿; 有机污染物; 催化降解; 改性技术; 水处理

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17714

中图分类号: X703

文献标识码: A

Research Progress on Pyrite-Based Fenton-like Catalysts in Organic Pollutant Treatment

HUANG Xin, NONG Xiyue, HUANG Xvdong, HUANG Yuanyuan, LI Zhongming, HUANG Zaiyin*

School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract: In recent years, with the acceleration of industrialization, the types and concentrations of organic pollutants in water bodies have continuously increased, drawing significant attention due to their high toxicity, resistance to degradation, and persistence in the environment. Pyrite, a naturally occurring iron sulfide mineral that is low-cost and widely available, has shown great potential in the degradation of organic pollutants. This paper systematically reviews the research progress of pyrite in the treatment of typical organic pollutants (such as Rhodamine B, carbamazepine, microcystins, tylosin, etc.), with a focus on its catalytic mechanisms, modification strategies, and potential for practical application.

Keywords: Pyrite; organic pollutants; catalytic degradation; modification technology; water treatment

引言

随着现代工业的持续推进,水环境中难降解有机污染物的种类和数量持续增加,对生态系统稳定和人类健康构成了不容忽视的风险。在当前的水污染治理体系中,污水处理厂肩负着阻截污染物进入自然水环境的关键使命。面对日益严格的水质排放标准,传统的水处理技术在处理新型有机污染物方面面临严峻挑战。特别是常规生物处理工艺和混凝沉淀等方法,对于结构复杂、难降解的有机污染物去除效果有限,已难以满足持续提升的水质管理要求。因此,开发经济可行、处理效果显著的深度治理技术,已成为水污染控制领域亟待突破的重要课题。

1 污染现状与治理挑战

当前,水体有机污染呈现复杂化、持久化和微量化的显著特征。除罗丹明 B、亚甲基蓝等传统染料污染物外,药物及个人护理品(PPCPs)、藻毒素等新兴污染物不断检出,其环境行为与生态风险尚未完全明确。以泰乐霉素(TYL)为例,该畜牧业用抗生素具有复杂的大环内酯结构,传统处理方法难以有效降解。微囊藻毒素(MCs)则表现出强嗜肝性,可通过有机阴离子转运蛋白进入肝细胞并在多器官蓄积,对水生生态系统和人体健康构成严重威胁。

在治理技术层面,传统方法面临严峻挑战。好氧生物

处理难以确保出水达标,膜分离技术易受污染堵塞。传统均相芬顿技术虽具有强氧化性,却存在铁泥产量大、pH适用范围窄等固有缺陷,限制了其工程应用。特别是卡马西平的芳香环结构与微囊藻毒素的环状七肽等复杂污染物,需要更强氧化能力和持久作用的降解体系。

非均相芬顿技术的兴起为破解上述难题提供了新思路。天然含铁矿物(黄铁矿、磁铁矿等)因其铁元素丰富、成本低廉、可循环利用等优势,成为催化剂研究的热点。这些矿物凭借独特的晶体结构,在过氧化物活化中展现出优异性能。然而,铁基芬顿体系仍面临 Fe^{3+}/Fe^{2+} 循环效率低导致的自由基生成慢、污染物分解效率不高等问题。同时,较窄的pH适用范围也严重制约了其实际应用。因此,如何加速铁循环、拓宽pH适应性,已成为该领域研究的重点攻关方向。

2 黄铁矿的结构特性

黄铁矿是地球上含量丰富、分布最广泛的金属硫化物,其含有丰富的铁物种,一直被认为是水处理中的高效催化剂。利用SEM测定了黄铁矿的表面形貌和微观结构,结果如图1所示。图1a和1b分别为黄铁矿在放大倍数下的SEM图像,可以看出黄铁矿由不规则的立方颗粒组成,且表面不对称。图1c-e描述了黄铁矿的EDS映射,从图中可以观察到S和Fe在其表面均匀分布^[1]。

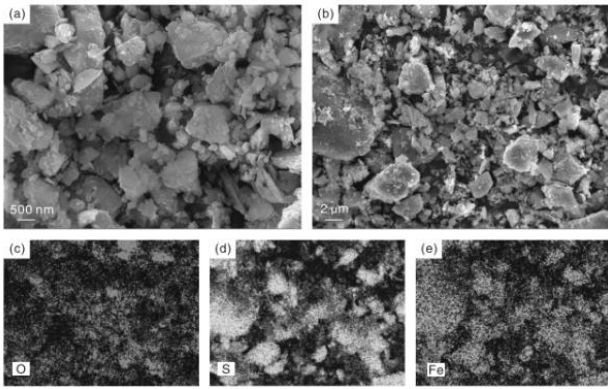


图1 黄铁矿的 SEM 照片^[1]

黄铁矿释放的硫可以促进 Fe(III)/Fe(II)的循环，进而强化 H₂O₂ 的活化过程，半导体特性使其在自然光条件下能产生光电响应，其较窄的带隙（0.88 eV）有利于充分利用自然光，产生 OH 等具有强氧化性的活性物种降解污染物^[2]。这些特性使得黄铁矿催化的非均相类芬顿体系比经典的芬顿反应具有更少的铁泥形成和更宽的 pH 范围工作等优点。

3 黄铁矿在有机污染物降解中的应用

3.1 活化过氧化氢

黄铁矿可作为过氧化氢（H₂O₂）的天然催化剂，产生氧化性很强的羟基自由基（OH）氧化降解有机污染物。蔡文韬等^[1]研究发现，在黄铁矿催化剂投加量 0.5g/L、H₂O₂ 浓度 4.0mmol/L 及反应温度 25°C 的条件下，黄铁矿/H₂O₂ 体系在 20min 内对 RhB 溶液的降解率达到 96.5%，且在较宽 pH 值（3~9）范围内具有适应性，能有效抵抗水体中无机阴离子和腐殖酸的影响。通过自由基捕获实验确定了 RhB 降解过程中的关键活性物种为 OH 和 O₂^{·-}，其中 OH 占主导地位。

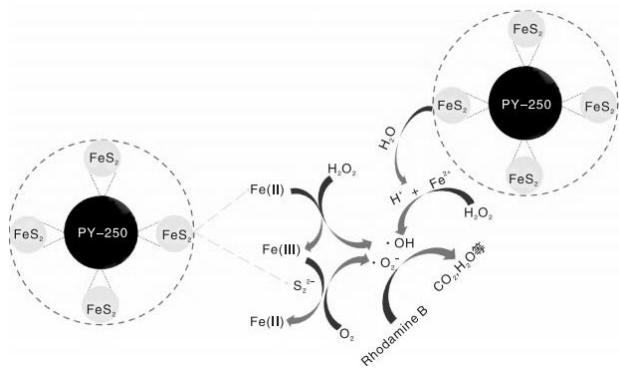


图2 黄铁矿/H₂O₂体系对 RhB 的降解机理^[3]

王异等^[3]基于天然黄铁矿作为芬顿铁源，利用机械球磨成功设计了一种新型自修复非均相芬顿试剂——Pyrite@WS₂。研究表明，助催化剂 WS₂ 的引入显著促进了铁离子与亚铁离子之间的循环转化，实现了亚铁离子的缓释，从而提高了体系中羟基自由基（OH）和超氧

自由基（O₂^{·-}）的生成效率。该催化剂在连续 5 次循环测试中仍保持了 95% 以上的降解率，显示出卓越的降解能力和良好的稳定性。

此外，郭倩等^[4]还开发了黄铁矿与有机酸（酒石酸、柠檬酸、抗坏血酸）构成的光芬顿体系，无需外加 H₂O₂，通过原位生成 H₂O₂，实现卡马西平的高效降解。在最佳条件下，FeS₂/TA、FeS₂/CA 和 FeS₂/AA 体系对卡马西平的降解效率分别达到 70%、60% 和 53%，有机酸通过形成铁络合物促进铁溶出，并为 H₂O₂ 生成提供 H⁺。综上所述，黄铁矿基催化剂能通过有效催化生成 OH 与 O₂^{·-} 等活性物种，在较宽 pH 范围内实现对有机污染物的高效、稳定降解。

3.2 活化过硫酸盐

在活化过一硫酸盐（PMS）方面，顾青存等^[5]基于“以废治废”理念，以采矿废料黄铁矿和废弃黄精中药渣为原材料，采用高温热解法合成黄铁矿/黄精生物炭复合材料，研究其活化 PMS 降解卡马西平（CBZ）的性能。结果表明，生物炭的引入使黄铁矿具有更丰富的活性位点，其在 5min 内对 2.5 mg/L 的卡马西平去除率达到 88.19%，并且对 Cl⁻、NO₃⁻ 和腐殖酸（HA）都有很好的抗干扰能力。左霜霜等^[6]比较了四种不同天然铁矿物（黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿和黄铜矿）活化过一硫酸盐降解亚甲基蓝的性能，发现黄铁矿活化 PMS 具有最佳的降解效果，60 min 时亚甲基蓝（MB）的降解效率可达 60% 左右。与其他三种含铁矿物比较而言，黄铁矿表面的亚铁（Fe(II)）可以作为催化分解 PMS 的主要活性位点，而且其中的硫作为电子供体在固体表面还能促进 Fe(II) 的再生循环，从而使黄铁矿表现出更好的催化活性。

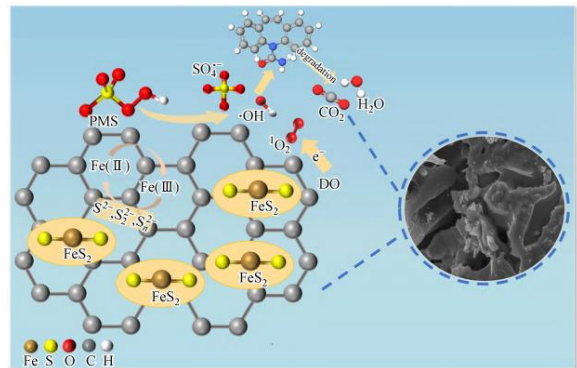


图3 黄铁矿@废弃黄精催化剂活化 PMS 降解 CBZ 的机制^[11]

3.3 黄铁矿的其他降解方式

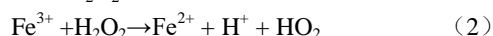
在催化水解反应方面，兰星等^[7]发现外加铁离子（Fe³⁺）能加速黄铁矿常温体系对微囊藻毒素-RR（MC-RR）和微囊藻毒素-LR（MC-LR）的水解效率，其降解速率常数（0.36 h⁻¹）是单独黄铁矿体系（0.12 h⁻¹）的 3 倍。通过研究发现，外加 Fe³⁺ 通过形成 Fe(III)-O 键增加了黄铁矿表面 Lewis 酸位点数，再通过其与 C=O 配位实现了对 MC-RR 酰胺

键的水解。此外，外加的 Fe^{3+} 还能将黄铁矿表面多价态硫物种 (S^{2-} 、 S_2^{2-}) 氧化为单质硫 (S^0)，通过形成氢键进一步促进 MC-RR 的水解。

在光催化与等离子体协同作用方面，周进文等^[8]比较了黄铁矿光催化及其辉光放电等离子体催化降解水体中泰乐霉素 (TYL) 的性能。结果表明，两种技术在 $\text{pH}=3-11$ 内对 TYL 均有稳定的降解性能。黄铁矿光催化技术对 TYL 的降解效率 (99%) 要明显高于黄铁矿耦合等离子体技术 (56.33%)，但其矿化效果却低于等离子体技术。

4 黄铁矿去除有机污染物的主要机制

黄铁矿参与 Fenton 反应的核心机制^[9]如下：黄铁矿主要成分为 FeS_2 ，其中 Fe^{2+} 与 H_2O_2 发生 Fenton 反应，产生具有强氧化性的 OH 自由基 (式一)，进而氧化分解有机污染物。反应生成的 Fe^{3+} 可通过式 (二) 所描述的途径被还原为 Fe^{2+} ，实现 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的循环再生，该循环过程被认为是 Fenton 反应中的限速环节。此外，除 Fe^{2+} 的溶出外， H_2O_2 对黄铁矿的氧化作用也会生成 Fe^{3+} 。黄铁矿在释放铁离子的过程中伴随产生的 H^+ ，有助于维持反应体系的酸性环境，从而起到调节 pH 的作用。因此，黄铁矿通过促进 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的高效循环，增强了 OH 的持续生成能力，进而提高了有机污染物的降解效率。



5 材料改性策略与性能提升

为了进一步提升黄铁矿的催化性能，研究人员开发了多种改性策略。迟彦萧等^[9]系统总结了黄铁矿的改性方法，包括球磨法、热改性、元素掺杂和材料负载等。球磨法可增加比表面积和反应位点；热改性可引入硫空位或形成复合材料如 $\text{FeS}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ；元素掺杂 (如 Ni) 能改变电子结构；材料负载 (如与生物炭、碳纳米管复合) 可增强分散性和稳定性。顾青存等^[5]开发的黄铁矿/黄精生物炭复合材料中，黄精生物炭的负载使材料中有更多高还原性 S 物种 (S^{2-} 、 S_2^{2-} 、 S_n^{2-})，促进了 Fe(III) 向 Fe(II) 的转化，从而增强了过一硫酸盐活化性能。郭倩等^[4]通过热处理黄铁矿原位构建的 Z 型 $\text{FeS}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 光催化剂，利用 FeS_2 和 Fe_2O_3 的协同效应促进光生载流子分离，提高了光催化活性。该 Z 型结构不仅改善了电子-空穴对的分离效率，还保持了较强的氧化还原能力，为光催化降解有机污染物提供了新思路。

6 应用前景与发展趋势

黄铁矿作为一种天然、高效、低成本的类芬顿催化剂，在有机废水处理中表现出良好的应用潜力。当前研究已从单一催化体系拓展至复合改性、自修复设计等多功能材料开发。然而，若干方向仍需深入研究：实际废水复杂水质背景下的抗干扰能力需要进一步验证；长期稳定性与铁溶出控制有待改善；规模化应用的经济性评估尚不充分；多技术耦合机制需要更深入解析。未来通过材料结构精准调控与反应器创新优化，黄铁矿基催化剂有望在工业废水处理领域实现更广泛的应用。特别是基于“以废治废”理念，将工业副产物或废弃物与黄铁矿复合，开发新型高效催化剂，将是未来研究的重要方向。

基金项目：国家大学生创新创业训练计划项目编号-202410608007X；国家自然科学基金项目-22263001。

[参考文献]

- [1]蔡文韬,周贺鹏,马梦霞,等.黄铁矿/ H_2O_2 体系降解罗丹明 B 的性能研究[J].工业催化,2025,33(5):80-87.
 - [2]乔玉萍,刘志强,廖庆,等.黄铁矿去除水中抗生素的研究进展[J].广州化工,2025,53(9):15-18.
 - [3]王异,覃佳勇,陆胜达,等.基于天然黄铁矿构筑自修复循环催化剂及其催化性能研究[J].材料导报,2025,39(20):1-13.
 - [4]郭倩.光照下黄铁矿对卡马西平的降解及其机制研究[D].云南:昆明理工大学,2020.
 - [5]顾青存,梁炳恒,殷玉程,等.黄精生物炭强化黄铁矿 $\text{Fe(II)}/\text{Fe(III)}$ 循环活化过一硫酸盐降解水中卡马西平[J].环境化学,2025(1):1-13.
 - [6]左霜霜,苏妮,李斯淇,等.黄铁矿活化单过硫酸盐降解亚甲基蓝的研究[J].广州化工,2023,51(14):91-94.
 - [7]兰星,贺玉婷,张清,等.黄铁矿- Fe(III) 表面 Lewis 酸位点增强微囊藻毒素催化水解的机制[J].高等学校化学学报,2024,45(7):62-72.
 - [8]周进文,马伟师,李炆,等.黄铁矿的光催化及其辉光放电等离子体催化降解水体中泰乐霉素的性能对比[J].环境工程学报,2022,16(10):3192-3203.
 - [9]迟彦萧,杨宇轩,杨昆仑,等.黄铁矿及其改性复合材料在水污染处理中的应用[J].化学进展,2023,35(10):1544-1558.
- 作者简介：黄鑫 (2005—)，男，壮族，广西百色人，本科在读，广西民族大学化学化工学院，研究方向：环境治理与保护。

新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设

朱文瑜

吉林省白山生态环境监测中心, 吉林 白山 134300

[摘要]中国经济社会的快速发展, 工业的进步以及人口的增多, 都引起了各种各样的环境问题, 而这其中最严重的就是突发环境污染事件。这种突然发生的环境恶化事件往往造成巨大的环境损害, 威胁人们的生存和健康。当前, 基于新形势下环境污染的严峻形势, 在应对突发环境污染事件中, 基层应急监测能力的建设显得尤为重要。文中通过系统研究和分析新形势下突发环境污染事件的特点和基层应对机制, 探讨了基层应急监测能力建设的必要性、基本原则和具体框架。研究表明, 应急环境监测能力建设不仅需要符合环保规定, 更需要符合基层现实情况, 强调人性化、科技化和立体化的建设理念。同时, 为了提升基层应急监测效率, 也需要重视综合性监测技术和多元化监测手段的关键作用。此研究结果将对新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设有着重要的参考价值。

[关键词]突发环境污染事件; 基层应急监测; 经济社会发展; 综合性监测技术; 环保规定

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17733

中图分类号: X507

文献标识码: A

Construction of Grassroots Emergency Monitoring Capacity for Sudden Environmental Pollution Incidents under the New Situation

ZHU Wenyu

Jilin Baishan Ecological Environment Monitoring Center, Baishan, Jilin, 134300, China

Abstract: The rapid development of China's economy and society, industrial progress, and population growth have all caused various environmental problems, among which the most serious is sudden environmental pollution incidents. This sudden environmental degradation event often causes significant environmental damage, threatening people's survival and health. Currently, based on the severe situation of environmental pollution under the new circumstances, the construction of grassroots emergency monitoring capabilities is particularly important in responding to sudden environmental pollution incidents. The article explores the necessity, basic principles, and specific framework of building emergency monitoring capabilities at the grassroots level through systematic research and analysis of the characteristics of sudden environmental pollution incidents and grassroots response mechanisms in the new situation. The research results indicate that the construction of emergency environmental monitoring capabilities not only needs to comply with environmental regulations, but also needs to be in line with the actual situation at the grassroots level, emphasizing the construction concepts of humanization, technology and three dimensionality. At the same time, in order to improve the efficiency of grassroots emergency monitoring, it is also necessary to attach importance to the key role of comprehensive monitoring technology and diversified monitoring methods. This research result will have important reference value for the construction of grassroots emergency monitoring capabilities for sudden environmental pollution incidents in the new situation.

Keywords: sudden environmental pollution incidents; grassroots emergency monitoring; economic and social development; comprehensive monitoring technology; environmental regulations

引言

在 21 世纪初, 全球面临着许多创新性和复杂性的环境挑战, 其中最大的挑战之一就是突发环境污染事件。这些事件的破坏性和影响力越来越大, 已经显著影响到人们的健康和生活质量, 引起了全球的关注。特别是在我国, 由于经济社会的快速发展, 工业的进步以及人口的增多, 环境问题更加突出, 突发性的环境污染事件频发。这种突然发生的环境恶化事件, 往往在短期内就能造成巨大的环境损害, 威胁人们的生存和健康。在这种环境形势下, 对于应对突发环境污染事件, 基层应急监测能力建设的重要性不言而喻。事实上, 基层的应急监测能力能直接影响到

对环境污染事件的应急反应效果。因此, 对于基层应急监测能力建设, 尤其是在新的社会经济环境下, 需要就其必要性、基本原则和具体框架等方面进行深入的研究和讨论。综上, 本文将进一步分析新形势下突发环境污染事件的特点和基层应对机制, 并探讨基层应急监测能力建设的必要性和基本原则。同时, 也将提出一些具体的建设框架和方案。希望本研究能对新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设提供有益的参考和借鉴。

1 新形势下突发环境污染事件的分析

1.1 突发环境污染事件的趋势和特点

突发环境污染事件是指那些在没有预警的情况下突

然发生的环境污染问题，这类事件通常具有突发性、高危害性、复杂性和不可预测性，它们往往对环境、生态系统以及人类社会造成不可逆转的影响^[1]。其趋势和特点在近年来因经济高速发展、工业化进程加快及城市化规模扩大而愈加明显。

近年来，随着全球气候变化、极端气象事件频繁发生，突发环境污染事件表现出频次增加和影响范围扩大的趋势。人口密集地区的工业源污染、环境保护基础设施的不足以及环境管理体系的欠缺，使得这类事件的处理难度增大。例如，一旦工业企业出现事故泄漏，可能导致水体、土壤、大气等多环境介质的污染，从而对周边生态环境造成长期伤害。

突发环境污染事件还具有多样化和复合化的特点。环境污染不再局限于单一的水体、大气或土壤污染，而是更常以复合污染的形式出现。由于化学品种类多样化的发展，泄漏物质类型复杂多变，其产生的污染后果难以预计和控制^[2]。突发环境污染事件的应对需要更加综合和灵活的措施。

另外，因突发环境污染事件的高危害性，在其发生后，常对社会稳定、经济发展和公众健康带来巨大威胁。这类事件不仅带来生态健康威胁，还可能引发社会恐慌，必须加强对其趋势和特点的分析，以便在未雨绸缪中提高应急响应和管理的能力。

1.2 新形势下环境污染的严峻形势

新形势下，环境污染呈现出愈加复杂和严峻的趋势。经济的快速发展和城市化进程的加快使得工业污染和城市废弃物排放激增。工业化所带来的废气、废水以及固体废弃物等污染源，没有得到有效控制，成为环境污染的重要因素。能源消耗的持续增长导致大气污染问题尤为突出，尤其是以雾霾为主要表现形式的空气质量下降现象频发，这不仅影响居民的生活质量，也对大气环境造成了长期的破坏。

与此气候变化加剧了环境风险。在气温升高、降水规律改变的情况下，污染物的扩散和转移更加难以预测，加剧了突发环境污染事件的复杂性和不确定性。农业化学品的过度使用和管理不善也导致了土壤污染和水体富营养化等问题的严重化。农村与城市的水土污染和土壤退化问题日益明显，影响了生态系统的平衡与健康。

新污染问题也在不断涌现。随着新材料和新技术的推广，许多新型污染物如微塑料和持久性有机污染物正威胁生态环境安全。这些物质难以通过传统的污染监测手段进行检测，增加了治理的难度。当前环境污染问题愈发多元化和动态化，突发环境污染事件的防范和应对面临更大挑战。

1.3 突发环境污染事件对社会经济发展的影响

突发环境污染事件给社会经济发展带来了深远的影响。此类事件往往导致大范围的环境破坏，造成生态系统失衡，大量动植物死亡，进而影响农业、渔业等依赖自然

资源的产业。环境污染事件使地区的经济活动受到限制或中断，如工厂停产、交通中断等，进而导致经济损失和产业链的断裂。环境污染对居民健康造成危害，增加公共卫生支出和社会保障负担。环境忧虑亦可能降低投资者信心，影响区域长期经济发展稳定性和可持续性。

2 基层应急监测能力建设的必要性与原则

2.1 应急监测能力建设的必要性论述

在新形势下，突发环境污染事件的频发及复杂化，对社会经济和公众健康造成了显著影响。构建基层应急监测能力成为关键环节，其必要性体现在多个方面^[3]。突发环境污染事件通常具有不可预见性和迅速传播性，这就要求基层监测系统具备高效的响应速度和准确的信息收集能力，以便及时采取相应的应急措施。基层地处事件前沿，其监测能力的强弱直接关系到整个事件处理的效率和效果。

突发环境事件的多样性和复杂性要求基层具备能够处理多种环境介质的监测手段，包括大气、水体、土壤等不同介质的污染监测。这种全面的监测能力不仅需要应急设备的优化配置，还需要检测人员具备丰富的专业知识和实践经验，以确保在突发事件中准确分析、判断污染状况和发展趋势。

进一步来看，基层应急监测能力建设有助于提升环境治理的总体水平和效率。通过系统的监测，能够更明确地掌握环境质量的动态变化趋势，及时识别潜在的环境风险，进而指导相关政策的制定和执行。强大的应急监测体系也是提升公众环境安全感的重要因素，因为其为快速控制和消减环境污染影响提供了技术保障，减少了突发事件带来的不确定性。基层应急监测能力的建设不可或缺，是适应当前环境保护需求的必要条件。

2.2 环保监测的基本原则

环保监测作为基层应急监测能力建设中的重要组成部分，需要遵循一系列基本原则，以确保监测工作的科学性和有效性。准确性是环保监测的首要原则。突发环境污染事件具有不可预见性和快速变化性的特点，环保监测数据的准确性直接关系到应急处置的成效。严谨的采样、分析和数据处理方法是保证监测结果准确的必要手段。

及时性也是环保监测中不可或缺的原则。在环境污染事件的应急响应中，时间通常是决定性因素。通过快速获取和分析监测数据，可以为决策者提供及时的信息支撑，从而大幅度降低环境损害和人身风险。快速反应和信息传递机制是确保监测及时性的核心。

全面性同样是基层环保监测需坚持的原则。全面性要求监测内容涵盖各类潜在的污染源和受影响对象，以全面评估污染事件的范围和影响。这不仅需要关注主要污染物，还应注重次要污染物及邻域扩散的监测。

科技化的原则对于提升环保监测的效率和精确度至

关重要^[4]。新技术的引入，如无人机监测、遥感技术和自动化监测设备，均可提高监测的覆盖面和反应速度，使得监测工作更加高效和灵活^[5]。

公众参与的原则也应在环保监测中加以重视。通过公众的参与和监督，可以提高环保监测的透明度和公信力，形成政府、企业、公众共同应对环境事故的良好氛围。

2.3 基层应急监测的具体框架和实现途径

基层应急监测的具体框架和实现途径应包括组织架构、监测技术、信息管理和人力资源四个方面。组织架构需明确各级监督管理者和操作人员的职责分工，以确保信息的快速传递和决策的高效执行。监测技术则需要引入先进的设备和实时监测手段，以提高监测的准确性和及时性。信息管理应实现数据的集成与共享，利用大数据分析提升预警能力。人力资源方面，通过专业培训和模拟演练强化人员的应急响应和处理能力。这些环节协同作用，为基层应急监测能力的有效提升奠定基础。

3 基层应急监测能力建设的方式和策略

3.1 基层应急监测系统的结构和要求

在构建基层应急监测系统时，需要明确其结构和要求，以充分发挥其在应对突发环境污染事件中的作用。基层应急监测系统应具备多层次的结构，包括数据采集层、数据处理层和决策支持层。数据采集层的任务是通过设置监测站点或安装监测设备，实时获取污染源、污染物浓度、大气质量、水体质量等环境信息。数据处理层需要配备先进的数据处理技术，以便对收集到的数据进行及时分析、诊断和评估，为应急响应提供重要依据。决策支持层应基于数据分析结果，利用模型进行预测和风险评估，支持决策的科学制定。

在系统要求方面，可靠性和准确性是需要考虑的因素，以确保数据的真实性和监测的全面性。在信息传递上，系统应该具备快速和高效的数据传输能力，保证在污染事件中数据能够迅速送达决策者手中。系统还需具备灵活性，能够根据不同污染事件的特点进行调整与优化，确保其在各种情境下均能高效运作。系统的可扩展性同样是关键，系统应支持新功能模块的添加，以便随着科技的发展和污染特点的变化进行升级。为了确保系统在实际操作中的可用性，还需注重人员培训和技术支持，为监测工作的顺利开展提供保障。通过这样一套结构严谨、要求明确的监测系统，可以有效增强基层应对突发环境污染事件的能力，提升整体应急监测水平。

3.2 健全基层应急监测体系的立体化科技化构建

健全基层应急监测体系的立体化科技化构建是提升应急响应能力的关键环节。需构建立体化监测网络，实现多层次、多维度的环境数据获取。这包括地面监测站点、移动监测设备以及卫星遥感技术的综合应用，以全面覆盖潜在污染源和受影响区域，确保监测体系的全面

性和准确性。

在科技化方面，应充分利用物联网、大数据和人工智能等先进技术，提升监测数据的实时性和处理速度。通过物联网技术，实现监测设备的互联互通，实时采集并传输环境数据；借助大数据技术，对海量监测数据进行分析 and 挖掘，识别污染源、评估环境风险；依靠人工智能算法，提高环境污染趋势预测的精准度和决策的科学性，以便迅速制定和调整应急响应措施。

鼓励创新技术的研发与应用也是科技化构建的重要内容。新型传感器、绿色监测工具的开发，有助于提高监测效率和减少环境影响。在技术应用过程中，应重视人员培训和技术支持，加强监测人员的科学素养和操作技能，以确保新技术的有效实施与推广。通过立体化和科技化的综合构建，将显著增强基层应急监测能力，为突发环境污染事件的快速响应提供坚实保障。

3.3 提升基层应急监测效率的促进措施综合性监测技术和多元化监测手段

提升基层应急监测效率需要在综合性监测技术和多元化监测手段方面开展促进措施。综合性监测技术的应用有助于全面了解突发环境污染事件的动态变化，通过整合多源数据，实现实时监测和动态评估。多元化的监测手段则包括遥感技术、物联网传感器及无人机监测等，这些技术的结合能够增强监测数据的准确性和时效性。通过将最新的科技手段引入基层监测体系，可以有效提高突发事件的应对速度和决策准确性。在实际操作中，需建立灵活快速的反应机制，确保综合技术和监测手段的最大化应用，提升环境污染事件的应急响应能力。

4 结束语

首先，本研究对新形势下突发环境污染事件的特点和基层应对机制进行了系统性的研究，得出了基层应急监测能力建设的必要性、基本原则和具体框架。通过实证研究，我们明确了环保规定并结合了基层的现实情况，强调了人性化、科技化和立体化的建设理念的重要性。其次，与以往的研究不同，本文重视了综合性监测技术和多元化监测手段的关键作用，提出了提升基层应急监测效率的新途径。然而，当前的研究还存在局限性，如综合性监测技术和多元化监测手段的具体实施方式、人员培训和政策支持等问题还需进行深入研究探讨。总结而言，本研究不仅对新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设提供了理论参考，也为未来相关领域的研究提供了丰富的实证数据和实践经验。我们期待着有更多研究者能在此基础上，进行相关的深入研究，以提升基层应急监测的效率和精准度，从而更有效地应对突发环境污染事件，保护我们的生存环境。

[参考文献]

[1]徐国栋,张守申,张福全.突发环境污染事件及其应急监

测探讨[J].区域治理,2020(13):59.

[2]胡馨予.基于突发环境污染事件应急监测分析[J].写真地理,2020(16): 19.

[3]李思琪.新形势下突发环境污染事件的基层应急监测能力建设[J].农村科学实验,2023(13):46-48.

[4]仝玉军魏英华.农业环境污染突发事件应急监测技术[J].

农民致富之友,2021(19):229-229.

[5]闫晓峰.突发环境污染事故应急管理与监测[J].区域治理,2020(39):48.

作者简介:朱文瑜(1981.8—),女,民族:汉族,籍贯:吉林省白山市人,学历:大学本科,研究方向:生态环境监测。

生态环境保护工程中的污水处理问题探析

刘继东

梁山县马营镇人民政府应急安全保障中心, 山东 济宁 272600

[摘要]随着社会对环境污染问题的关注程度一天天提高起来, 公众对于污水处理这件事的关注度同样也在逐步攀升。为了能够减少污水的排放量, 避免污水给水体环境带来污染影响, 大多数城市都积极着手建设起了污水处理厂。近些年来, 污水处理技术一直在不断发展前进, 从事相关领域研究的科研人员始终努力朝着提升污水净化的效率以及彻底性的方向去开展工作, 促使水资源的循环利用水准得以持续提升。文章就生态环境保护工程里面的污水处理技术展开了较为系统的剖析, 希望能给相关专业的工作者给予有价值的参考与借鉴。

[关键词]生态环境保护; 污水处理; 问题探析

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17732

中图分类号: X703

文献标识码: A

Analysis of Wastewater Treatment Problems in Ecological Environment Protection Projects

LIU Jidong

Emergency Security Center of Liangshan County Maying Town People's Government, Jining, Shandong, 272600, China

Abstract: With the increasing attention of society to environmental pollution issues, the public's attention to sewage treatment is also gradually rising. In order to reduce the discharge of sewage and avoid the pollution impact of sewage on the water environment, most cities have actively started to build sewage treatment plants. In recent years, sewage treatment technology has been constantly developing and advancing, and researchers engaged in related fields have been striving to improve the efficiency and thoroughness of sewage purification, promoting the continuous improvement of the level of water resource recycling. The article provides a systematic analysis of sewage treatment technology in ecological environment protection engineering, hoping to provide valuable reference and inspiration for relevant professionals.

Keywords: ecological environment protection; wastewater treatment; problem analysis

引言

随着工业化进程不断推进, 城市人口也在快速增长, 水环境污染问题变得日益严峻起来, 污水排放已然成为影响生态环境质量提升的关键因素之一。那些没有经过有效处理的生活污水以及工业废水, 不但致使水体出现富营养化的情况, 让生态系统发生退化, 而且对人类健康以及社会的可持续发展构成了威胁。生态环境保护工程是改善水环境质量、修复生态功能的重要途径, 其中污水处理技术的应用尤其重要。污水处理可有效去除水里的有害污染物, 防止环境进一步恶化, 还能推动水资源的循环利用, 助力生态系统的恢复, 有明显的环境、经济和社会效益。不过, 随着污染物种类以及排放量持续发生变化, 传统污水处理技术遇到了效率不够、难以去除新型污染物以及成本压力等诸多挑战。所以深入剖析生态环境保护工程里污水处理方面存在的问题, 评估现有技术的长处与短处以及应用时碰到的难题, 对于推动污水治理技术创新发展, 达成水环境持续改善的目标, 有着重要的理论价值与实践意义。本文会围绕污水处理在生态环境保护工程中的价值、技术现状、应用挑战以及优化策略展开全面研究, 期望能给生态环境保护给予科学依据与技术指引。

1 污水处理在生态环境保护工程中的重要价值

污水处理在生态环境保护工程里有着无可取代的重要价值, 其不但是达成生态环境修复以及水体质量改善的基本保障, 而且是促使可持续发展战略得以落实的关键环节。伴随着工业化与城镇化进程不断加快, 数量众多的工业废水、生活污水还有农业面源污染物持续不断地排入水体当中, 进而导致水资源出现污染情况, 水生态系统也发生退化现象, 对人类健康以及生态安全形成了极为严重的威胁。在这样的背景之下, 污水处理工程借助科学且高效的各类技术手段, 切实有效地削减水体里的有机物、氮磷营养盐、重金属、有毒有害物质以及病原微生物, 降低污染物针对水体的入侵负荷, 如此一来, 既有利于保障饮用水源的安全状况, 又能对河流、湖泊等水生态系统的自净能力起到修复作用, 还能提升整体的生态服务功能。与此现代污水处理技术正逐步朝着资源化、能源化的方向去发展, 推动废水当中的有用物质以及能量实现回收利用, 达成从“污染物”到“资源”再到“产品”的转化路径, 这无疑提升了污水处理工程的环境效益以及经济效益, 还为构建资源节约型以及环境友好型社会给予了强有力的支撑^[1]。所以说, 污水处理已然成为生态环境保护工程当中

极为重要且不可或缺的核心内容,对于实现生态文明建设的目标、改善人居环境的质量而言,有着十分深远的意义。

2 生态环境保护工程中的污水处理技术

2.1 生物处理方法

生物处理这一方法,在生态环境保护相关工程当中,属于应用范围极为广泛的污水处理技术,并且它还具备相当程度的可持续性。该方法主要是凭借微生物展开代谢活动,进而把污水里所含有的有机污染物给分解转化成为无害或者能够再度被利用起来的物质,以此达成对水体予以净化的目的。生物处理方法涵盖好氧生物处理以及厌氧生物处理这两个大类别。在好氧处理方面,常见的工艺包含了活性污泥法、生物滤池、生物转盘还有氧化沟等等,这些工艺多适用于城市生活污水以及部分工业废水的处理工作。而厌氧处理通常会被应用于像食品、造纸、化工等行业产生的那种高浓度有机废水当中,它有着能耗比较低、产气能力颇为强劲等诸多优势。生物处理方法由于其运行成本相较于其他方法而言是比较低的,处理的过程也较为绿色环保,而且还能够实现对污染物的资源化利用,所以被广泛地进行推广。不过,它的实际效果会受到微生物种群结构、温度、pH值以及营养元素配比等一系列环境因素的影响,因此需要有科学且合理的运行控制措施来加以保障。

2.2 物理处理方法

物理处理方法在生态环境保护工程里属于常用的基础性污水处理技术。它主要是借助物理作用手段把污水里的悬浮物、漂浮物、沉淀物以及部分胶体颗粒这类非溶解性污染物给去除掉,并且在这个过程中不会涉及化学反应或者生物代谢过程,具备工艺简单、操作便捷、运行稳定等特性。常见的物理处理工艺有沉淀、过滤、筛滤、离心、气浮等^[2]。其中,沉淀法在重力作用下能够去除密度比较大的颗粒物,是污水预处理阶段极为关键的一个步骤;过滤法主要用于进一步截留细小颗粒,通常会和石英砂、无烟煤等滤料一块儿使用;气浮技术是通过形成微气泡并让其与污染物相结合,以此来实现上浮分离,这种方法适用于油类以及疏水性悬浮物的去除。

2.3 化学处理方法

化学处理方法属于生态环境保护工程里处理污水中溶解性污染物以及难降解有害物质的关键手段,主要是借助化学反应把污染物转变为无害或者容易去除的物质,进而达成污水净化的目的。常见的化学处理技术有中和反应、混凝沉淀、氧化还原反应、吸附法还有高级氧化技术等等。其中,中和反应主要用于调整污水的酸碱度,确保后续处理环节能够正常运转;混凝沉淀是通过添加化学药剂促使胶体颗粒聚集形成絮体,以此来有效去除悬浮物以及部分重金属;氧化还原反应会利用强氧化剂或者还原剂来处理含有毒有害成分的污水,像氰化物、硫化物这类情况;吸

附法常常采用活性炭、沸石等材料来吸附有机物或者金属离子,适用于深度处理阶段。

3 污水处理技术在生态环境保护工程中的应用挑战

3.1 技术成本高

在生态环境保护工程当中,污水处理技术尽管在净化水体以及保护生态方面起到了十分关键的作用,然而其昂贵的技术成本却一直充当着限制其广泛推广以及高效运行的关键阻碍。不论是传统的生物处理办法,还是先进的物理、化学以及综合处理技术,在设计建设、设备采购、运行维护以及人员培训等诸多环节都需要投入大量的资金。举例来讲,膜处理、臭氧氧化、反渗透等高端技术虽说有着出色的处理效果,可其设备投资额度颇高、能耗情况严重、运行管理的要求极为严格,这便致使整体的运营成本始终处于居高不下的态势。并且在实际工程里,为了确保能够达标排放并且恢复生态功能,常常需要将多种工艺联合起来使用,如此一来更是进一步提升了系统集成以及调控的复杂程度,同时也让运营支出的负担变得更为沉重。除此之外,像一些偏远地区或者经济基础相对较为薄弱的区域,由于缺乏足够的财政支持以及专业的运维力量,这就使得高成本的污水处理技术很难真正落实并加以实施。

3.2 处理效率与环境可持续性之间的平衡

污水处理技术发展需要在提高处理效率和确保环境可持续性之间找到一个平衡点。一方面,为了达到更高的水质净化水平,污水处理往往需要使用复杂的技术组合,可能会导致能源消耗增加和二次污染物的产生。另一方面,环境可持续性要求处理过程尽可能地减少对生态系统的破坏、节能降耗和循环利用资源。如何在有效去除污染物与最小化环境影响之间找到一个最优解,是目前污水处理技术发展中需要着重考虑的问题。

3.3 新型污染物的处理难题

在生态环境保护相关工程当中,新型污染物的出现已然给污水处理技术带来了极为严峻的挑战。这类新型污染物涵盖了抗生素、内分泌干扰物、微塑料、持久性有机污染物(POPs)还有纳米材料等等,它们一般具备结构较为复杂、浓度极低、毒性较强以及难以降解等诸多特点,所以很难被传统污水处理工艺有效地去除掉。这些污染物有着广泛的来源,像医疗废水、化妆品、农药、塑料制品以及工业添加剂等都有涉及,并且多数情况下在污水里是以痕量形式存在的,这既对生态系统构成了潜在的威胁,还很有可能会通过食物链的富集作用给人类健康带来长期的影响^[3]。就现有的生物处理以及物理化学处理技术而言,其对于这些污染物的去除能力是有限的,特别在常规的活性污泥系统里面,这些微量污染物往往没办法被彻底地降解或者转化掉,甚至部分还可能在处理的过程当中发生迁移转化,进而形成更加难以处理的副产物。

4 生态环境保护工程中的污水处理策略

4.1 加强污水处理技术的研发与创新

在生态环境保护相关工程当中，强化针对污水处理技术展开的研发以及创新举措，这已然成为促使污水治理水准得以提升并且达成水环境可持续管理这一目标的关键策略所在。就目前的情况而言，伴随着污染物种类变得日益复杂起来，排放标准也在不断地趋于严格，传统的处理工艺在去除效率、能耗控制以及运行稳定性等诸多方面，已经渐渐地呈现出不少的局限性了。所以，务必要增加对新型且高效的污水处理技术在研发方面的投入力度，推动核心技术装备能够实现自主创新以及完成升级换代的相关工作。在生物处理这个领域里面，需要着重加强针对功能微生物菌群展开筛选以及优化方面的研究，以此来提升对于那些难以降解的有机物以及新型污染物所具备的生物转化能力。而在物理以及化学处理这两个方面，则应当去开发具有高选择性并且能耗较低的新型材料以及反应工艺，像纳米吸附材料、催化氧化剂、智能膜分离技术等这类的，从而达到提高污染物去除效率并且降低运营成本的目的。与此还要积极推动人工智能、大数据、自动控制等这些处于前沿位置的技术和污水处理系统能够实现深度融合，借助智能化的调控手段来达到精准投药、能耗最优以及处理负荷动态调节的效果，进而进一步提升系统运行所具有的科学性以及稳定性。

4.2 实施多技术联合处理策略

在生态环境保护相关工程当中，采取多技术联合处理的策略，这可是针对复杂且多样的污水污染状况来加以应对的一个办法，同时也是提高处理成效以及保证系统稳定性的关键举措。要知道，随着污水所含成分变得越来越多元，而且污染负荷也在持续不断地提升，在这种情况下，单一的处理技术常常是没办法满足那种既要高效地去去除多种多样的污染物，又要能够妥善应对不同水质出现的变化，并且还要达成达标排放这样一系列综合要求的。所以说，把生物、物理、化学等多种不同的处理技术相互融合起来，进而去构建起一个协同作用且高效的多级联动处理系统，这就已然成为了污水治理工程方面极为重要的一个发展走向。就好比在城市生活污水的处理环节，可以运用“格栅+沉砂池+生物处理+膜过滤”这样的工艺流程，如此一来便能够有效地达成从粗颗粒物一直到微量污染物的全程拦截以及净化的目的；而在工业废水的处理过程里，通常得依靠像“化学氧化+气浮+生化处理+高级氧化”等一系列多种工艺组合起来的方式，这样才能有针对性地去除掉高浓度的有机物、重金属亦或是新型污染物^[4]。多技术联合这种方式，一方面能够充分地发挥出各种处理方式自身所具备的优势，另一方面也能够对单一工艺存在的局限予以弥补，从而实现针对复杂污染物展开分级处理、一步步地进行降解以及最终实现资源化利用这样的目标。

4.3 强化污水处理项目的管理和监督

强化对污水处理项目加以管理以及予以监督，这乃是保证生态环境保护工程能够达成实际成效、达成可持续发展这一目标的关键环节所在。科学且完善的管理体系可对项目的整个过程运行起到规范作用，在规划设计、设备采购、施工建设以及运行维护各个阶段都施行严格的质量把控以及风险管控举措，以此来防止技术标准与环保要求仅仅停留在表面形式上。要强化对污水处理设施的运行监督工作，构建起完备的监测以及预警机制，实时且全面地掌握污水处理的效率情况、排放水质状况以及设备的运行状态，及时察觉并妥善处理出现的异常问题，从而避免因污染物超标排放而给生态环境带来不利影响。除此之外，还应当推动信息化管理手段的应用，借助智能监控系统、大数据分析以及远程调度等方式，达成对污水处理全过程的动态管理以及科学决策目的，提升管理的透明程度以及响应的速度。与此需要强化监管责任的落实情况，清晰明确相关部门以及人员各自的职责分工，建立起严格的考核评价以及问责相关机制，以此来确保各项环保措施以及技术规范都能够得到切实有效的执行。

5 结语

污水处理在生态环境保护工程里属于极为关键的环节，它对于水环境质量的改善以及生态系统健康的维护都有着不容忽视的重要意义。当下，虽然污水处理技术已经收获了颇为显著的进展，可是依旧在技术成本、处理效率还有针对新型污染物的应对等诸多方面面临着不少的挑战。往后的日子，需要进一步强化技术创新，并且要注重多种技术的联合运用，以此来提升污水处理的整体效能。与此还得强化项目管理以及监督工作，保证工程能够规范地运行并且持续不断地得到优化。唯有各个方面的力量协同发力推动，才能够达成污水治理的高质量发展，进而有力地促进生态环境的可持续保护，助力构建绿色生态文明。

[参考文献]

- [1]李俏俏,毕付英,户宝军.污水处理技术在生态环境保护工程中的应用[J].农村科学实验,2025(11):66-68.
- [2]王林.生态环境保护工程中的污水处理问题探析[J].黑龙江环境通报,2023,36(9):98-100.
- [3]陆芳芳.生态环境保护工程中的污水处理问题探析[J].黑龙江环境通报,2024,37(11):22-24.
- [4]王庆力,何育梅,梁娟.生态环境保护工程中污水处理技术分析[J].化纤与纺织技术,2024,53(8):88-90.

作者简介：刘继东（1970.4—），男，毕业院校：山东师范大学，学历大专，所学专业：法律专业，当前就职单位：梁山县马营镇人民政府应急安全保障中心，职务：马营镇工会副主席，党建办公室群团服务岗、应急安全保障中心生态环境岗负责人，所在职务的年限：11年，职称级别：助理工程师。

地表水重金属元素光谱检测方法在农村黑臭水体治理中的实效分析

谢舟扬 丁泳博

陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西 西安 710000

[摘要]农村黑臭水体的形成中地表水中重金属污染是重要因素之一且对生态安全与居民健康影响严重,光谱检测技术因具有高效、无损、实时的特性在重金属元素识别与浓度分析方面已被广泛应用,结合典型农村黑臭水体治理案例分析光谱检测在污染源追踪、水质动态监控与治理效果评估中的具体应用以验证其在治理过程中的可行性与实效性,结果显示光谱检测技术可显著提升水体重金属监测的精度和响应速度并给治理策略的优化提供数据支撑。

[关键词]光谱检测技术; 重金属元素; 地表水; 黑臭水体; 农村水环境治理

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17731

中图分类号: X52

文献标识码: A

Analysis of the Effectiveness of Surface Water Heavy Metal Element Spectral Detection Method in the Treatment of Black and Odorous Water Bodies in Rural Areas

XIE Zhouyang, DING Yongbo

Shaanxi Institute of Engineering Investigation Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract: Heavy metal pollution in surface water is one of the important factors in the formation of rural black and odorous water bodies, and has a serious impact on ecological security and residents' health. Spectral detection technology has been widely used in heavy metal element identification and concentration analysis due to its efficient, non-destructive, and real-time characteristics. Combining typical rural black and odorous water treatment cases, the specific application of spectral detection in pollution source tracking, water quality dynamic monitoring, and treatment effect evaluation is analyzed to verify its feasibility and effectiveness in the treatment process. The results show that spectral detection technology can significantly improve the accuracy and response speed of water weight and metal monitoring, and provide data support for the optimization of treatment strategies.

Keywords: spectral detection technology; heavy metal elements; surface water; black and odorous water bodies; rural water environment governance

引言

农村的生态环境受到黑臭水体影响且居民的生产生活和身体健康也被危及,这使农村黑臭水体成为地下水环境治理的重难点,重金属元素是主要污染源之一且隐蔽性强、迁移范围广、累积程度高,急需高效且精准的监测手段,光谱检测技术因有着实时性和高灵敏度的优势而在环境监测领域冒尖,探索光谱检测技术在农村黑臭水体治理中的应用有助于提升污染识别效率并能给科学治理路径提供技术支撑,其研究价值和现实意义都很重要。

1 农村黑臭水体的成因与重金属污染特征分析

农村黑臭水体治理难度很大且成因复杂,其中重金属污染具有广泛性和隐蔽性,深入探讨其污染特征与成因对提高治理效率意义重大。

1.1 农村黑臭水体的主要成因剖析

多种因素交织影响农村黑臭水体的形成,像生活污水直排、畜禽养殖废水渗漏、农业面源污染、水体自净能力下降等都是主要因素,部分农村地区基础设施建设滞后、污水处理能力不足,生活污水未经有效处理直排入水体,导致有机物和氮磷营养物质富集、水体富营养化,畜禽养殖排放的含氮有机废液在雨季会随地表径流流入沟渠和

池塘也是重要污染源,而且大量使用化肥和农药的农业活动增加了氮磷等营养物和有毒物质的输入,使水质进一步恶化,当水体里有机物大量积累且长期缺氧时就会呈现发臭发黑的恶劣状态,产生典型的黑臭现象,尤其在水体流动性差、水浅、水温高的情况下,黑臭水体形成得更快更严重。

1.2 重金属在水体中的来源与迁移

农村水体中的重金属元素来源多样,农业投入品残留、工业排放遗留、土壤侵蚀、垃圾渗滤液扩散等都是主要来源,部分靠近工业区或者城镇边缘的农村早期采矿和冶炼活动无序,可能会留下大量重金属污染物,风化或者被雨水冲刷后就进入到水体里了,现代农业活动中使用含镉、铅等重金属的化肥、农药也成了持续的隐性污染源,农村垃圾处理机制有缺陷,电池、油漆、金属制品等被随意倾倒,在雨水作用下释放重金属离子,随地表径流进入水体造成污染,而且重金属在水体里迁移性和生物积累性强,能通过水-沉积物界面在不同介质间迁移,进入食物链产生生态风险,重金属污染难以识别和去除也是这些特性造成的,在治理黑臭水体时常成为隐性障碍。

1.3 重金属污染对水体黑臭现象的作用机制

在黑臭水体形成过程中,重金属污染发挥着放大和协

同作用。水体中微生物的正常代谢被重金属抑制后有机物分解能力降低,导致有机污染物累积更严重、水体厌氧化进程加快并产生硫化氢和甲烷这些黑臭气体;铁、锰等部分重金属在缺氧状态下容易被还原释放,产生黑色或深褐色沉积物,显著加深水体颜色,增强黑臭视觉表现;再者,重金属与有机物形成稳定络合物,使得污染物更难降解,降低水体自净能力,并且随着沉积物中重金属不断累积,在特定条件下它又会重新释放,造成“二次污染”效应,这种缓释特性让治理工作面临周期长成本高的挑战。在黑臭水体治理中重金属污染不容忽视,要从根源上改善水质必须和营养污染协同控制。

2 地表水重金属元素光谱检测技术原理与优势

光谱检测技术有着高灵敏度、快速响应、非破坏性的特点,在地表水重金属监测里潜力巨大,因此成为了精细化水环境治理的重要手段。

2.1 光谱检测基本原理分析

物质对电磁辐射的吸收、发射或散射有一定规律,光谱检测技术基于此靠分析光谱信号来识别物质组成与浓度,地表水重金属元素检测用到的光谱技术主要有原子吸收光谱(AAS)、电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)、激光诱导击穿光谱(LIBS)、紫外-可见光谱(UV-Vis)等,水样中的金属元素被这些技术激发会释放特定波长的光或者吸收特定波段能量从而建立起光谱信号和重金属浓度的定量关系,拿 LIBS 来说,高能激光产生等离子体是一瞬间的事,分析发射光谱就能实现多种金属元素同步检测,不同的光谱方法因有不同的物理机制和仪器配置,能有效满足不同类型水体和目标元素的检测需求,适应性和拓展性都挺强的。

2.2 应用于重金属检测的技术优势

光谱检测技术跟传统化学分析方法比起来优势明显,传统化学分析方法复杂而光谱检测技术检测速度快、样品预处理简单且部分技术能实现原位、实时监测从而工作效率大幅提高,光谱检测技术灵敏度高且能精准识别哪怕是 ppb 甚至 ppt 级别的重金属浓度变化因而适用于微量污染物预警监测,光谱检测多为非接触或者少量样本操作进而使水体环境受到的干扰小且减少有害试剂使用从而体现绿色监测理念,在空间尺度方面,便携设备或者无人机平台若与光谱检测技术相结合则广阔区域快速覆盖不成问题从而提升农村水体巡查效率,在时间维度上借助物联网与传感网络就能实现连续动态监测从而为污染演变趋势分析和响应决策提供数据支撑,光谱检测在农村复杂水环境中适用前景广泛正是这些优势起的作用。

2.3 技术发展与应用瓶颈分析

光谱检测技术发展快、应用潜力大,但实际推广时仍面临不少挑战。其一,水体中悬浮颗粒、有机物等干扰物质较多,可能影响光谱信号准确识别,且黑臭水体背景复

杂,误判风险更高;其二,不同重金属元素光谱特征差异小、谱线重叠,定量分析更难,需要高性能仪器和精密算法;其三,一些先进设备昂贵且维护要求高,在经济条件差的农村地区普及受限;现场操作人员需具备较高专业水平才能用好设备、解读数据,这也给技术推广的培训和管理工作带来新问题。

3 光谱检测技术在黑臭水体治理中的实际应用路径

把光谱检测技术嵌入农村黑臭水体治理的全过程,污染源识别、水质变化监控、治理效果评估就能得到全链条的支撑且治理的科学性和实效性也能得以提升。

3.1 前期排查中的污染识别应用

黑臭水体治理初期,制定治理方案的关键在于识别污染源的种类、分布与强度,而光谱检测技术能快速检测多种元素,可有效辅助进行污染普查与风险识别,用 LIBS 或 ICP-OES 等技术快速分析不同采样点的地表水,就能明确镉、铅、铜等重金属元素浓度水平和超标范围,识别出重点污染区域和污染物类型,再配合地理信息系统(GIS)定位污染源头,后续溯源调查和治理策略制定就有数据支撑了,且与传统采样送检模式相比,光谱检测前期调查周期大大缩短,污染突发时还能快速部署,应急响应能力得以提升。

3.2 治理过程中的动态水质监测

黑臭水体治理是个动态过程,污染物迁移、释放与沉积有时变性和空间差异性实时水质监控相当重要,布设在线光谱检测设备或者使用便携式仪器能实现对治理区内重点断面、入水口、排水点等位置连续监测以实时掌握重金属浓度变化趋势,像采用紫外可见光谱结合化学计量学方法便可实时分析水体中铁、锰离子变化、判断水体氧化还原状态、评估治理措施即时效果,监测数据异常波动时能及时预警、调整处理工艺或者加密采样频次以达成治理过程精细化控制,这种模式强化数据驱动治理理念、减少人为判断失误、提升治理效率。

3.3 后期评估中的效果验证与追踪

治理工程结束了,保障治理长期稳定的关键在于科学评估治理成效以及预防污染反弹,光谱检测技术在后期评估时也很重要。各检测点治理前后重金属含量数据一对比就能直观反映水体污染负荷变化,从而对治理效果定量打分,而且有些光谱仪器能检测沉积物,分析出底泥里残留的重金属含量,评估潜在二次污染风险,要是检测结果表明底泥里污染物仍有释放风险,就可以制定进一步的干预措施,再进一步说,和自动监测站或者移动监测系统相结合开展定期或者连续检测,就容易形成长效追踪机制,巩固治理成果并防止污染回潮。

4 典型治理案例中的实效分析与数据对比

光谱检测技术的实效与价值可通过典型农村黑臭水

体治理案例的实地应用得到全面验证,下面以江苏省盐城市某村河沟治理工程为例分析其技术路径和治理成效。

4.1 项目背景与污染状况概述

江苏省盐城市滨海区 X 村有一条全长大概 1.6 公里的主排灌沟,农业灌溉和生活污水常年排放在此,由于村里未建污水处理设施,畜禽养殖的粪污、生活灰水还有农业废弃物直接排入沟中,导致水体长期黑臭,居民意见很大。初步采样分析显示,沟里的水呈深黑色且臭味明显,水中溶解氧近乎为 0,铅、镉、锌等重金属元素严重超标,存在严重的生态和健康隐患。项目组引进便携式 LIBS 和在线 UV-Vis 光谱检测设备,对全沟进行断面排查并结合传统采样送检方法建立污染分布图,为后续治理提供依据。

4.2 治理过程中的光谱技术介入

明确污染成因和空间分布后,工程实施将生态修复与污染拦截相结合并配套光谱检测来全程监控,治理措施包括建设人工湿地、布设微生物填料床、设置雨污分流系统和清理底泥,在上游、中游与出水口三处设置在线 UV-Vis 光谱仪实时监测 COD、NH₃-N、Fe²⁺和 Mn²⁺浓度的变化,每周用便携式 LIBS 设备对不同断面的水样和底泥采样检测以追踪重金属元素浓度,整个治理周期为 3 个月,光谱检测设备在关键节点分析数据辅助决策调整,中途数据显示中游重金属浓度异常,追溯后发现是养殖废水回流便赶紧加设拦截渠有效防止污染扩散,这体现了光谱检测的实时预警功能。

4.3 治理成效评估与数据对比分析

治理完成之后,把光谱检测数据和传统检测数据一比对就会发现整体水质提升得很明显,治理前后主要重金属浓度对比(单位: μg/L)如下表 1 所示。

表 1 农村黑臭水体治理前后主要重金属元素浓度变化对比表

检测项目	治理前浓度	治理后浓度	降幅(%)
铅(Pb)	148.2	37.4	74.8
镉(Cd)	12.5	3.1	75.2
锌(Zn)	330.8	96.5	70.8
铁(Fe)	1980	480	75.8
锰(Mn)	570	145	74.6

治理之后,水体的透明度和溶解氧显著提高且黑臭现象大体上消除了,居民满意度回访表明超 90%的居民认可治理成果,尤其在重金属控制方面,光谱检测数据和实验室检测的吻合度超 93%验证了该技术的精准性与实用性,此案例表明光谱检测不但能有效地指导治理过程而且能形成动态反馈机制,提高治理效率与响应能力,实战价值和推广前景良好。

5 光谱检测技术在农村水环境治理中的发展前景与优化建议

在农村水环境治理里,光谱检测技术已经展现出不错的应用前景,以后要不断推动和优化其普及以及深化应用

就必须技术创新、机制建设和治理体系融合这些方面下功夫。

5.1 光谱检测技术的应用趋势

环境治理朝着高精度、数字化发展,光谱检测技术在农村水环境里的应用趋势越来越显著,其具有快速响应、非接触测量、实时分析的特点,能给水质管理提供连续且可视化的数据支持,往后便携化、自动化、集成化会是技术发展的主要方向,像正在研发的复合型传感器集成了 LIBS、UV-Vis、拉曼光谱等多种光谱技术,能同步监测多个污染因子,让检测覆盖面更广、准确性更高,并且光谱检测系统借助 5G 通信和物联网平台,可以实现远程监控、异常报警和自动上传数据,构建起“设备-平台-决策”的闭环体系,政策推动加上市场需求,光谱技术会从点状部署慢慢发展成区域网格化覆盖,促使农村水质管理迈进“智慧化”新阶段。

5.2 当前面临的主要挑战问题

光谱检测技术优势明显,但在农村推广应用时仍面临不少现实挑战,先说说成本,有些先进光谱仪器太贵且配套系统建设费钱,在经济欠发达农村大规模布设困难,再讲述适应性,农村黑臭水体成分复杂且干扰因子多,光谱识别的准确性易受影响而需靠算法模型来修正校准,还有运维保障体系不完善,不少村镇没专业检测人员,导致设备使用效率低、数据解读有误甚至闲置浪费,现在还没有统一的农村水质在线监测标准体系,数据整合和跨区域对比分析不方便,治理时光谱数据没充分融入管理流程,技术成果转化为实际治理成效的比例还有待提升,要解决这些问题,技术得不断突破且制度和治理机制也得跟上。

5.3 推动技术优化与机制融合路径

要让光谱检测在农村水环境治理中充分发挥作用,需从技术、运维、政策、管理几个方面优化融合:技术上推动研发低成本、低功耗的光谱设备以提高识别复杂水质和抗干扰能力,并加强与人工智能算法的融合构建智能监测系统;运维方面建立区域运维中心负责设备维护、人员培训和数据管理提升基层技术能力;政策上用财政补贴、试点示范推动设备采购和应用并鼓励社会资本参与水环境第三方检测服务;管理上把光谱检测数据纳入农村水污染治理考核体系使其成为污染源管控、水质评价和治理效果审查的重要依据推动数据驱动的决策机制构建,靠“技术+制度”双轮推动将光谱检测融入农村水环境治理全流程,有望使治理模式从经验型彻底转变为科学型。

6 结语

农村黑臭水体治理中地表水重金属污染是关键难题,光谱检测技术高效、实时、精确,能为污染识别、动态监测与治理评估提供可靠手段,典型案例实践应用验证了该技术在实际治理中具有显著成效和可操作性。往后,随着技术不断优化并与治理机制融合推进,光谱检测将在农村

水环境管理中发挥更大作用，助力实现水体治理精准化、智能化、长效化目标，推动农村生态环境持续改善。

[参考文献]

[1]陈宏展,朱国政,余鑫,等.环境重金属元素的原子光谱和质谱分析检测技术综述[J].中国资源综合利用,2021,39(12):98-101.

[2]田宏武.水体重金属激光诱导击穿光谱快速测量方法研究与仪器研制[D].辽宁:沈阳农业大学,2022.

[3]李鹏飞.关于土壤重金属光谱检测方法的研究[J].中国金属通报,2023,11(2):174-176.

[4]王一童.基于光谱技术对土壤—水体—气体中污染物检测研究[D].河北:河北大学,2024.

[5]许方豪.植物汁液重金属元素的激光诱导击穿光谱检测方法研究[D].甘肃:甘肃农业大学,2024.

作者简介：谢舟扬（1992.11—），毕业院校：陕西师范大学，所学专业：化学（创新实验），当前就职单位：陕西工程勘察研究院有限公司，职称级别：工程师；丁泳博（1997.8—），毕业院校：河南城建学院，所学专业：化学工程与工艺，当前就职单位：陕西工程勘察研究院有限公司，职称级别：助理工程师。

废旧地膜资源化研究进展

彭浩雨¹ 任铁真^{1*} 张锦妮辉¹ 范卫² 邓书礼³ 张婷婷³

1.新疆大学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 841000

2.新疆赛格环保科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830017

3.新疆能源科技创新研发中心有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830063

[摘要]废弃农用地膜的回收处理是农业可持续发展中的关键环节,它不仅有助于缓解白色污染问题,还能促进资源的循环利用和生态环境保护。根据回收地膜所含杂质的程度不同,目前主要形成了两种处理模式:一种是高纯地膜处理模式,其纯度通常达到99%以上,杂质含量极低,适合高效回收和再利用;另一种是高杂地膜处理模式,含有大量秸秆、沙土等杂质,处理过程复杂且挑战较大。这两种模式在技术路线上存在明显区别。文中将对这些模式在技术路线、产物应用和成本结构上的显著差异进行系统分析,以期期为废弃物资源化发展提供新思路。

[关键词]聚乙烯; 低温分解技术; 废旧地膜; 催化热解; 废弃物资源化

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17727

中图分类号: X712

文献标识码: A

Research Progress on Resource Utilization of Waste Plastic Film

PENG Haoyu¹, REN Tiezhen^{1*}, ZHANG Jinnihui¹, FAN Wei², DENG Shuli³, ZHANG Tingting³

1. School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 841000, China

2. Xinjiang SEGE Environmental Protection Technology Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830017, China

3. Xinjiang Energy Technology Innovation and Research Development Center Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830063, China

Abstract: The recycling and treatment of discarded agricultural plastic film is a key link in sustainable agricultural development. It not only helps alleviate the problem of white pollution, but also promotes the recycling of resources and ecological environment protection. There are currently two main processing modes based on the degree of impurities contained in recycled plastic film: one is the high-purity plastic film processing mode, which usually has a purity of over 99% and extremely low impurity content, suitable for efficient recycling and reuse; Another type is the high impurity plastic film treatment mode, which contains a large amount of impurities such as straw and sand, and the treatment process is complex and challenging. There is a clear difference in the technical roadmap between these two modes. The article will systematically analyze the significant differences in technical routes, product applications, and cost structures among these modes, in order to provide new ideas for the development of waste resource utilization.

Keywords: polyethylene; low temperature decomposition technology; waste plastic film; catalytic pyrolysis; waste resource utilization

引言

随着农业现代化的快速发展,农用地膜在提高作物产量和保护土壤方面发挥着重要作用,但大量废弃地膜的产生带来了严重的环境问题,如土壤污染、生态破坏和资源浪费。这些问题不仅威胁农业生产的可持续性,还加剧了生态环境的压力。长期以来,我国对农用地膜要求较低,在GB 13735—2017《聚乙烯吹塑农用地膜覆盖薄膜》颁布以前,市场上流通的地膜厚度多为0.004~0.006 mm。这种厚度的地膜易老化破碎,与土壤杂草混合,分拣难度大^[1]。回收的混合物中约80%为沙土杂草,总体热值较低,无法直接焚烧。聚乙烯成分结构稳定,不易自然降解,成为我国农业生态环境保护的突出问题。本文基于机收废弃地膜的纯度差异,系统探讨高纯地膜处理模式和高杂地膜处理模式。

1 废旧地膜产生情况

农膜是继化肥、农药、种子后的第四大农业生产资料,可分为棚膜和地膜。其中,地膜覆盖技术已被广泛用于农

业生产,地膜的使用能够有效防止养分流失,使作物水分利用效率提高20%~30%,增产50%左右^[2]。但随着地膜用量与使用年限的增加,地膜污染问题也愈加严重^[3]。新疆地区农业种植面积大,机收地膜以棉花种植为主,每亩地使用地膜量由传统地膜约5kg,到加厚地膜7kg,因此导致耕层地下膜累积量增加第二次全国污染源普查结果显示,我国用膜地区地膜亩残留量4.5公斤^[4],Yoshito Ohtake T K等^[5]通过推算指出:在填埋条件下,60μm厚的聚乙烯薄膜完全降解所需时间长达300年,且薄膜填埋过程中产生的薄膜碎片、微塑料等,会随生态循环进入土壤、水源,对生态环境、生物生存带来不可预知的威胁。据不完全统计,机收地膜受机械设备影响,一般含有30%~40%的秸秆,20%~40%的土壤,这为机收地膜的分选和使用增加了成本,机收地膜二次造粒成本高达5千元^[6],市场竞争力弱。因此,高效、经济地回收处理废弃地膜已成为当前农业环保领域的迫切需求。催化热解和

低温气化节能技术的联合使用,能够在最低成本下实现效益最大化,为废旧地膜处理提供了新思路。

2 高纯地膜的资源化转化

高纯地膜处理采用“除杂-粉碎-筛分-催化热解”的工艺流程。其中除杂部分,旋风分离与磁选联用技术可去除 99% 以上的沙土及金属杂质,满足后续催化热解进料标准;催化剂有降低反应活化能的功效,表现为降低反应能耗,极大地缓解了热解技术中能耗高的问题。催化剂能够提高反应效率、调控反应历程,是影响催化热解的重要因素。催化剂制备环节, Song 等^[7]通过流态化焙烧制备纳米 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂,实现废地膜高效裂解产油,将轻油($\text{C}_5\text{-C}_{20}$)含量提至 89.21wt%。废旧地膜经催化热解后,转化为热解气和热解油两部分。热解气主要含 H_2 、 CH_4 、 $\text{C}_2\text{-C}_4$ 烯烃及 CO/CO_2 等,是优质的气体燃料,具有较高的热值。当它们在氧气存在下燃烧时,能够释放大量的热能。这一特性为热解技术本身提供了重要的能源解决方案:通过将产生的部分或全部热解气引入燃烧系统,利用其燃烧释放的热能,可以直接为热解反应器或其他工艺环节提供所需的热量。这种“以气供热”的模式,实现了系统的能量自持或部分自持,显著降低了对外部能源的依赖,提升了整个工艺过程的热效率和运行经济性,是热解技术实现能量平衡和可持续运行的核心优势;提高催化热解可以得到约 70% 液体产物,其中碳数分布在 C7-C11 之间(如图 1)。但初生热解油因含氧量高,导致热值偏低、酸性强、稳定性差,难以直接用作高效燃料。为克服此缺陷,催化提质是其转化为实用燃料的核心步骤。

催化提质过程首先基于对初生热解油系统化的理化性质分析,精准识别油品特性与缺陷。同时,严格对比目标燃料的关键参数:农用柴油^[8]需满足十六烷值、冷滤点要求;航空燃料^[9]则需符合密度、冰点、闪点、芳烃含量等严苛标准。在此基础上,紧密结合目标发动机的实际需求进行深度优化,脱除氧原子,提升氢碳比和热值,改善稳定性和燃烧性能。经此精制转化获得的高品质成品燃料,可满足高端应用:作为清洁燃料用于农机设备,可以提升能效并减少农业碳足迹;作为符合航空燃料替代或掺混传统航煤,能够显著降低航空业碳排放,增强能源韧性。该模式初始投资较大(设备专业化程度高),但产品附加值高,长期回报率可观,尤

其适合大规模集中处理场景。

3 高杂地膜的资源化转化

高杂地膜采用“低温负氧离子气化-氧化吸收”的处理路径。其中,电子辅助分解工艺能够在保持物质成分不变的前提下进行有机固废的资源化转化^[10]。该技术对原料纯度要求较低,具有通用性强,反应可控,能耗低的特点^[11]。此工艺主要反应组分负氧离子对有机固废的分解均有促进作用,因此反应物投放无需分类,地膜可掺杂秸秆、沙土等一并投入炉中进行处理,有机质进行反应随尾气排出,无机成分自然沉降,实现自分拣和选择性转化;作为反应及传热的重要部分,电子注入速率将决定反应进行程度,电子辅助分解工艺通过对反应进程的调控等效转换为对电子注入速率的调整,使反应进程能够根据反应物类型及实际分解情况进行实时调整,大大提高了反应的灵活性;同时,反应中唯一耗能组分电子发生器功率仅为 0.4W,解决了传统分解方式的高能耗问题,降低了地膜处理成本,促进了低温分解技术的推广应用。氧化吸收部分主要分为喷淋吸收及尾气净化,经检验,喷淋系统处理后,气体碳含量可减少 99% 以上。而后,静电除尘装置将除去剩余气体携带的液体组分,得到的干燥尾气进入催化阶段,利用自主研发的 CuMn/CA-2 催化剂对尾气中微量 CO 组分进行催化氧化,最后尾气成分近似为空气,可作为反应组分通入负氧离子炉或洁净排放。

废旧地膜经低温分解技术处理后,剩余产物仅有无机灰分、吸收液。气化残余的无机灰分沃土粉作为纳米级无机材料,主要成分为硅、铝、铁等矿物元素,具有独特的微孔结构与巨大比表面积,将其掺入土壤后,可显著改善土壤团粒结构,使土壤孔隙度增加 15%~25%,从而大幅提升保水保肥性能,减少养分淋失;氧化吸收得到的液体营养液绿萃液富含高浓度的有机物及多种微量元素,不仅能显著提升作物产量与果实品质,还能有效替代 30%~50% 的传统化肥施用量,既降低了农业生产成本,又减轻了化肥过量使用导致的土壤板结^[12]与水体富营养化风险。两种产物均可直接应用于种植环节,形成循环农业模式。低温操作节省能耗,运营成本低,但催化剂等耗材需要定期更换,土地改良收益对应的直接经济回报较低,但环境效益显著,可获得政策支持。

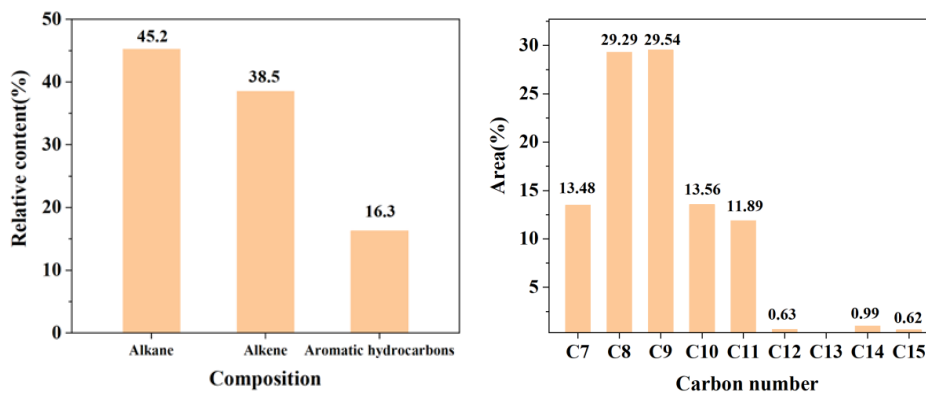


图 1 (左) 地膜热分解液体组分和 (右) 液体组分的碳数分布

通过将绿萃液与沃土粉协同应用于大田种植或设施农业,不仅实现了农作物全生育期的营养精准供给与根际环境优化,更构建了“废弃物-资源-农产品”的完整物质循环链条。这种创新模式使农业废弃物资源化利用率提升至90%以上,在降低化肥农药投入的同时提高作物抗逆性,真正实现了经济收益与生态效益的双重提升,为破解农业面源污染难题、推动绿色低碳农业发展提供了可复制的技术路径。该模式初始投入适中,运营成本可控,特别适合分散式处理和资源匮乏地区,其环境效益可转化为长期经济价值。

4 高纯地膜与高杂地膜处理模式比较

对于地膜回收体系完善、资金充裕的地区,高纯地膜模式可创造更高经济价值;对于回收体系尚不完善、注重生态环境效益的地区,高杂地膜模式更具实用性。理想状态下可建立两种模式的协同系统,根据原料品质分流处理。理想情况下,可构建高纯与高杂模式协同的分级处理系统:根据地膜收集后的杂质含量进行分流,高纯度原料进入催化热解链生产高值燃料,高杂质原料则走气化—资源化路径。若进一步研发可兼容两类物料的柔性化处理系统,实现设备共享和流程优化,则可通过规模化效应和催化剂循环利用降低高纯模式单位成本。同时,应建立基于全生命周期评价(LCA)的环境效益补偿机制,对高杂模式带来的正外部性予以经济补偿,并积极开发高杂产物(如特种营养液、土壤调理剂)的高值化应用渠道,提升其市场竞争力。

表1 高纯地膜与高杂地膜处理模式比较

比较维度	高纯地膜模式	高杂地膜模式
原料要求	高纯度(>90%)	可接受高杂质含量(>70%)
主要产物	高附加值燃料	土壤改良材料
初始投资	高	中等
技术复杂度	高	中等
二次污染	有	无
适用规模	大规模集中处理	分散式处理
投资回报周期	较长(但单位收益高)	较短(环境效益显著)
政策依赖度	较低	较高

总之,两种处理模式各具优势(表1),实际应用中应根据当地条件选择或组合使用,以实现经济效益与环境效益的最大化。未来随着技术进步和政策完善,机收地膜处理成本有望进一步降低,推动农业循环经济发展。

5 结语

作为农业大国,在农业迅速发展、作物产量提升的同时也应重视相关生产资料的生产与处置。科技的生命力在于服务人民,尽管各类可降解地膜相继问世,但在相当一

部分地区,传统地膜仍被大量使用,催化热解与低温分解技术的联用方式为废旧地膜乃至有机固废资源化利用开辟了新路径,期望能为废弃物处理提供新思路,为民族振兴提供坚实的科技保障。

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B02038);新疆庭州科技团队育才项目,以及新疆乌鲁木齐红山小组团项目(B241018001)。

[参考文献]

- [1]靳拓,薛颖昊,张明明,等.国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J].生态环境学报,2020,29(2):411-420.
 - [2]詹慧龙.小小的地膜大大的功效[J].农村工作通讯,2011(23):66-67.
 - [3]李艳芳.可回收地膜覆盖种植玉米的应用[J].云南农业,2021(4):56-57.
 - [4]王泽农.以生态环境高水平保护推动农业农村高质量发展[N].农民日报,2022-06-16(08).
 - [5]Yoshito Ohtake T K, Hitoshi Asabe, Nobunao Murakami, et al.Oxidative degradation and molecular weight change of LDPE buried under bioactive soil for 32–37 years[J].Journal of Applied Polymer Science,1998,70(9):1643-1648.
 - [6]刘琪.废旧聚乙烯基农用地膜回收造粒工艺设计及工厂化研究[D].甘肃:西北民族大学,2022.
 - [7]Song Z-H,Muhammad I,Ren T-Z,et al.Preparation of Al₂O₃ Nanoparticles via Fluidized Roasting and Their Application in the Pyrolysis of Spent Mulching Film for Hydrocarbon Production[J].ACS Sustainable Resource Management,2025,2(3):435-445.
 - [8]能源行业农村能源标准化技术委员会.农用醇醚柴油燃料:NB/T 34013-2024:[S].北京:中国农业出版社,2024:9.
 - [9]中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院,空军油料研究所,中国航空油料有限责任公司.3号喷气燃料:GB 6537-2018[S].北京:中国标准出版社,2018:16.
 - [10]Cui M-J,Muhammad I,Ren T-Z,et al.Preparation of SiO₂ Photocatalyst via Electron-Assisted Thermal Decomposition of Rice Husks and its Application for Chromium (VI) Determination[J].Silicon,2025,17(3):571-583.
 - [11]彭浩雨,任铁真,张锦妮辉,等.低温分解技术处理农业固废研究进展[J].自然科学研究,2025,2(2):22-25.
 - [12]杨彪.程海流域生态保护及综合管理对策[J].绿色科技,2020(22):32-35.
- 作者简介:彭浩雨(2006—),女,汉族,河北邢台人,本科在读,新疆大学化工学院,研究方向:碳基固废资源化。

满洲里旅游季高影响天气特征分析与致灾危险性评估

赵碧莹 王浩东

满洲里市气象局, 内蒙古自治区 满洲里 021400

[摘要]安全是旅游业发展的前提,开展满洲里旅游高影响天气特征分析及致灾危险性评估,能够促进旅游气象灾害防御能力提高。基于满洲里境内 1957—2023 年气象观测数据和景区监测资料,采取频率统计法、马尔科夫链概率率等方法开展分析与评估。结果表明:各景区大雨暴雨、大风、高温致灾危险等级分别评估为,国门景区重、轻、重;套娃景区重、轻、重;大觉禅寺中、轻、中;猛犸旅游区中、轻、中;呼伦湖景区轻、中、轻。应用分析与评估结果,制定适宜景区的旅游气象灾害风险防御指引、发布旅游气象灾害风险预警,为旅游活动防范和减轻气象灾害影响提供科学依据。

[关键词]旅游高影响天气;特征分析;致灾危险性;评估

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17726

中图分类号: P208

文献标识码: A

Analysis of High Impact Weather Characteristics and Disaster Risk Assessment during the Tourism Season in Manzhouli

ZHAO Biying, WANG Haodong

Manzhouli Meteorological Bureau, Manzhouli, Inner Mongolia, 021400, China

Abstract: Safety is a prerequisite for the development of the tourism industry. Conducting analysis on the high impact weather characteristics and disaster risk assessment of tourism in Manzhouli can promote the improvement of tourism meteorological disaster prevention capabilities. Based on meteorological observation data and scenic spot monitoring data from 1957 to 2023 in Manzhouli, frequency statistics and Markov chain probability methods were used for analysis and evaluation. The results show that the hazard level of heavy rain, rainstorm, strong wind and high temperature in each scenic spot is respectively assessed as heavy, light and heavy in Guomen scenic spot; The nesting doll scenic area is heavy, light, heavy; Dajuechan Temple: medium, light, medium; Mammoth Tourist Area medium, light, medium; Hulun Lake Scenic Area is light, medium and light. Based on the analysis and evaluation results, develop suitable guidelines for tourism meteorological disaster risk prevention in scenic areas, issue tourism meteorological disaster risk warnings, and provide scientific basis for preventing and mitigating the impact of meteorological disasters on tourism activities.

Keywords: tourism high impact weather; feature analysis; disaster risk; evaluation

引言

旅游业与气象气候条件息息相关^[1],在全球气候变化加剧的背景下,局地性、突发性气象灾害呈现多发、频发的趋势,且具有难预防等特点。气候变化对旅游业的影响已引起广泛关注^[2-3]。随着出游人次日益攀高,由气象灾害造成或引发的旅游损失也越来越大,已影响到广大旅游者的出游安全和旅游经济的持续健康发展^[4]。安全是旅游业发展的生命线,国内外关于旅游安全风险^[5]的研究主要集中在自然灾害、气候变化等对旅游业的影响。国内学者们借鉴系统论、风险评估理论、灾害风险理论等模型,运用模糊综合评价法、灰色关联分析法^[5]、动态贝叶斯方法,从旅游灾害、旅游线路、旅游景区等不同的方面,展开了旅游安全风险研究^[6]。总体看,已有旅游安全风险研究虽已取得一系列进展,但仍存在不足之处。旅游是以游客流动为主要特征的,旅游气象灾害不同于一般的自然灾害,其灾害直接影响旅游资源和旅游基础设施、旅游者的出游决策以及游客人身安全。因此需要综合运用多种方法,对旅游气象灾害特征进行

分析预估,构建适合于旅游业的气象灾害风险评估模型,强化旅游气象灾害风险评估及预警能力建设,为旅游业防灾减灾提供基础性科学支撑。满洲里旅游高影响天气种类多、灾害多发、灾情较重,对游客生命财产安全、景区基础设施等存在较大的威胁。近年来,满洲里市被评为 2023 年全国县域旅游发展潜力百佳县,大力发展“旅游+”跨业融合新业态,对旅游安全提出了更高的要求,因此运用多种方法开展本地区的旅游高影响天气特征分析和致灾危险性评估,在旅游活动中发挥气象服务的保障作用,对完善旅游安全体系十分必要。

1 资料与方法

1.1 资料

大雨暴雨、大风、高温旅游高影响天气资料来源于满洲里境内基准站、互贸区区域气象站、小河口区域气象站。旅游景区信息来源于市文体旅游广电局(表 1)。

大风统计日最大风速 $\geq 10.8\text{m/s}$ 大风日数。高温统计日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ 高温日数。大雨暴雨统计 24h 降雨量 $\geq 25.0\text{mm}$ 降雨日数。

表 1 满洲里旅游景区情况表

景区	经度	纬度	气象站	站号	气象资料年代
国门景区	117.3996	49.6133	互贸区	C0088	2004年至2023年
套娃景区	117.3996	49.6133	互贸区	C0088	2004年至2023年
大觉禅寺	117.6284	49.5291	基准站	50514	1957年至2023年
猛犸旅游区	117.6766	49.499	基准站	50514	1957年至2023年
呼伦湖景区	117.6643	49.3312	小河口	C0089	2004年至2023年

1.2 方法

致灾危险性评估方法。

(1) 风险评估思路

根据历史资料的可靠性、代表性和样本量数，基于历史资料的概率密度分布作为风险分布函数，假定孕灾环境基本没有变化，风险系统变化是平稳的马尔科夫链随机过程。旅游气象灾害风险评估思路^[7]是研究各景区致灾因子（气象灾害）发生概率，得出各种灾害综合风险指数，从而划分风险评估等级。灾害强度标准划分参考气象灾害相关等级标准。

(2) 统计方法

频率统计法。计算不同致灾因子（临界气象条件）强度出现频率^[8]。计算公式：

$f_i = t_i / Y$ ，式中 f_i 为第 i 等级致灾因子强度出现频率， t_i 为统计年限 Y 年内第 i 等级的某种致灾因子出现次数， Y 一般 30a 以上。用不同强度等级灾害频率加权求和，值越大风险越大。

平稳马尔科夫链过程。马尔科夫链概率（转移概率），是从实测序列中抽出随机过程概率规律，对未来风险概率进行估计^[9]。

灾害风险评估模型构建，以灾种为基本评价单元，以自然灾害风险评价理论为基础，选取自然灾害风险数学表达式中的四大基本内容作为评价的主要因子。本研究主要以历史气象观测资料和旅游气象灾害为依据进行致灾危险性评估，即采用两要素模型。

2 结果分析

2.1 大雨暴雨特征分析与致灾危险性评估

2.1.1 大雨暴雨特征分析

根据统计，1957年至2023年67年间，满洲里市旅游旺季出现大雨暴雨119次，年均1.8次，年际次数差异较大，最多年份7次，出现在1998年。无大雨暴雨年占比21%。大雨暴雨发生时常常伴有强降雨，强度大、历时短、突发性强，1小时最大雨强达到84.8mm。景区一旦出现大雨暴雨，常造成积水内涝、出游受阻、车辆熄火停运、游乐露营设施损毁等灾害，对游客生命财产安全造成危害^[10]。

2.1.2 旅游景区大雨暴雨致灾危险性评估

(1) 资料统计分析

满洲里地处半干旱气候区，往往大雨以上量级降雨既能造成雨涝灾害，因此本评估对大雨及以上降雨进行统计分析。以20h为日界，将24h降雨量 $\geq 25.0\text{mm}$ 的降雨，

统计为1次单站降雨过程。降雨强度分类，按24h降雨量进行分级。统计满洲里国家基准气候站1957年至2023年大雨、暴雨及连续降雨出现次数，以及互贸区、小河口站2004年至2023年的气象数据，参考气象灾害等级标准，对降雨致灾强度和脆弱性等级进行级别划分（表2）。

表 2 降雨致灾因子强度与脆弱性等级划分表（1957~2023年）

级别	脆弱性	致灾因子强度
1	年大雨以上降雨次数 ≤ 2 次	$\geq 25.0\text{mm}$
2	年暴雨次数3~4次	$\geq 50.0\text{mm}$
3	年大雨以上降雨次数 ≥ 5 次	连续2天或以上 $RR \geq 25.0\text{mm}$

应用频率统计法 $f_i = t_i / Y$ 计算各站不同级别降雨日数概率（表3）。统计各站逐年大雨暴雨出现次数，按照表1中脆弱性分级标准对各站逐年大雨暴雨次数进行分级，将各站逐年大雨暴雨次数排成序列。

表 3 满洲里各站点各级降水出现日数概率（%）统计表（ $f_i = t_i / Y$ ）

强度	基准站 (1957~2023年)	互贸区 (2004~2023年)	小河口 (2004~2023年)
一级 ($\geq 25.0\text{mm}$)	1.40	0.75	1.00
二级 ($\geq 50.0\text{mm}$)	0.22	0.15	0.05
三级 (连续暴雨)	0.15	0.1	0.10

根据分级结果，采用马尔科夫链方法^[9]，得出各站不同级别大雨暴雨次数历史实测资料各个状态之间的转移概率，出现高级别概率越大，雨涝风险越高，基准站转移概率统计见表4（其他站点略）。

表 4 基准站不同级别大雨暴雨转移概率统计表

转移概率	1级	2级	3级
1级1次转移概率	1.00	0.00	0.00
1级2次转移概率	0.67	0.27	0.07
1级3次转移概率	0.00	1.00	0.00
1级4次转移概率	0.00	0.75	0.25
2级1次转移概率	0.62	0.31	0.08
2级2次转移概率	0.00	0.00	1.00
3级2次转移概率	0.33	0.67	0.00
3级4次转移概率	0.00	0.00	1.00
合计	2.62	2.99	2.39

(2) 致灾危险性评估

采用上述线性加权模型，根据对已发生大雨或暴雨的历史概率（强度与脆弱性）统计和未来潜在危险结果，计算出各景区（站点）致灾危险性指数 C ，结果见表5。

危险性等级评估，以表5中综合危险指数为指标，将满洲里地区大雨暴雨致灾综合危险指数评估分为重、中、轻三个等级，其中国门景区、套娃景区综合危险指数为8.5，相较于其他旅游景区较高，危险等级评估为重；呼伦湖景区综合危险指数为5.75较小，其危险等级评估为轻，具体详见表6。

表 5 旅游景区大雨暴雨致灾危险综合指数表

指数概率	国门景区（互贸区）	套娃景区（互贸区）	大觉禅寺（基准站）	猛犸旅游区（基准站）	呼伦湖景区（小河口）
强降水危险指数	1.5	1.5	2.55	2.55	1.75
未来风险概率（1级）	1.83	1.83	2.62	2.62	2.80
未来风险概率（2级）	5.17	5.17	2.99	2.99	1.20
综合危险指数 C	8.5	8.5	8.16	8.16	5.75

表 6 满洲里旅游景区大雨暴雨致灾危险指数等级评估

评估	国门景区	套娃景区	大觉禅寺	猛犸旅游区	呼伦湖景区
综合危险指数 C	≥8.3		6.1~8.2		≤6.0
危险等级评估	重		中		轻

2.2 大风特征分析与致灾危险性评估

2.2.1 大风特征分析

根据统计，1994—2023 年 30a 间，满洲里市年均 6 级以上大风 60.1d，各年大风出现日数不一，出现最多的为 2017 年 109d，最少的为 48d。历史上极大风速达到 12 级飓风，陆地罕见。满洲里旅游旺季多对流性大风，风力等级高、突发性强，常能达到 8 级以上，风向突变，可伴有下击暴流^[11]，在其影响景区时，对旅游安全影响大，易使户外大型游乐设施在运行中出现危险，还会造成搭建物倒塌、高大建筑物受损、树枝折断、吹翻车辆等，威胁游客人身安全^[12]。

2.2.2 大风致灾危险性评估

(1) 资料统计分析

根据脆弱性和大风强度将其划分为四级：6 级以上大风占全年日数 10% 及以下（0~37d）或者强度为 6~7 级大风为一级；6 级以上大风占全年日数 10%~20%（38~74d）或者强度为 8 至 9 级大风为二级；6 级以上大风占全年日数 20%~40%（75~146 天）或者强度为 10 级以上大风为三级；6 级以上大风占全年日数 40% 以上（146d 以上）或者强度连续 5d 为 6 级以上大风为四级^[13]。

(2) 致灾危险性评估

采用大雨暴雨致灾危险性评估同样的方法，先进行级别或强度划分，再求出各级别大风等级出现概率，最后采用线性加权模型，求出大风灾害综合危险指数，制作旅游景区大风危险综合指数表。

将满洲里旅游景区大风危险等级评估分为轻、中两个等级，其中呼伦湖景区大风综合危险指数为 8.13 在 7.5 以上，等级评估为中；其余景区大风危险指数为 7.05，在 7.5 以下，其等级评估为轻。

2.3 高温特征分析与致灾危险性评估

2.3.1 高温特征分析

满洲里高温天气年际分布不均，根据资料统计，1957~2023 年 67a 间，有 28 年出现 35.0℃ 以上高温天气共计 75 次，高温还有一年之内集中出现的特点，2004 年出现 7 次高温。有 39 年未出现高温天气，无高温年占 58%。历史上极端最高气温达 41.0℃。高温常出现在正午前后，

人体不能适应环境，超过人体的耐受极限，从而导致疾病的发生或加重、引起旅游者中暑，对旅游安全有一定影响^[14]。

2.3.2 高温致灾危险性评估

(1) 资料统计分析

满洲里地区高温天气年际变化大、阶段性发生、极端气温高。就此将高温划分成四个等级：一级标准为出现 35℃~37℃（包括 37℃）高温的年数；二级标准为出现连续 3 天在 35℃~37℃高温的年数；三级标准为出现大于 37℃且在 40℃及以下高温的年数；四级标准为出现 40℃以上高温的年数。

(2) 致灾危险性评估

对于高温，先进行级别或强度划分，再求出各级别日数出现概率，最后采用线性加权模型，求出高温综合危险指数，制作旅游景区高温综合危险指数表。

国门景区和套娃景区高温综合危险指数为 3.00 大于 2.1，级别评估为重；大觉禅寺和猛犸旅游区危险指数为 1.88 在 1.6~2.0 之间，级别评估为中级；呼伦湖景区危险指数为 1.20 小于 1.5，级别评估为轻。

3 结论

(1) 根据景区高影响天气发生的历史概率，参考气象灾害相关等级标准，采用线性加权求和模型以及马尔科夫链的方法求取综合危险指数，实现了各景区大风、大雨暴雨、高温致灾危险性等级评估。

(2) 本文从旅游高影响天气趋势特征和景区致灾危险性两个方面进行全面深入的研究，基于景区场景、高影响天气特征和危险性等级提出有针对性的有效防御措施和指引，为旅游气象灾害防御提供科学参考，具有一定的理论和实践应用创新性。

基金项目：满洲里市科技计划项目“满洲里旅游气象灾害风险研究（2023010）”。

[参考文献]

[1]李尚锦,周学云,吴亚平,等.四川雅安碧峰峡避暑旅游气候适宜性分析[J].气象与环境学报,2024,40(3):124-130.
 [2]张驰,白莹莹,刘晓冉,等.重庆旅游气象扰动模型初步研究[J].气象与环境科学,2021,44(3):83-90.

- [3]朱妮娜,曾刚,史正燕,等.旅游气候舒适度的模型改进及时空演化[J].旅游科学,2023,37(4):144-160.
- [4]李蔚,杨洋.自然灾害与旅游目的地恢复营销[J].旅游学刊,2022,37(7):8-10.
- [5]李自强,席建超,张瑞英.滇藏公路沿线旅游安全风险评价[J].山地学报,2022,40(5):753-763.
- [6]章国材.气象灾害风险评估与区划方法[M].北京:气象出版社,2010.
- [7]阮迪陈,袁淑杰,黄萍,等.四川省龙门山暴雨灾害旅游风险评估[J].高原山地气象研究,2023,43(2):134-142.
- [8]罗菊英,闫永财,虞列辉.区域旅游气象灾害风险评估与区划研究[C].第31届中国气象学会年会 S10 第四届气象服务发展论坛——提高气象灾害防御能力论文集,北京:中国气象学会,2014.
- [9]黄嘉佑,李庆祥.气象数据统计分析方法[M].北京:气象出版社,2015.
- [10]黄麟元,王致杰.马尔科夫理论及其在预测中的应用综述[J].创新与实践,2015,22(9):12-13.
- [11]杨鹏武,周德丽,吉文娟,等.云南区域性暴雨过程时空变化特征[J].气象与环境学报,2024,40(3):83-90.
- [12]高展,许剑勇,王胜,等.黄山风景区暴雨山洪灾害风险区划研究[J].暴雨灾害,2015,34(3):281-285.
- [13]胡鹏宇,徐爽,耿世波,等.一次冷涡背景下沈阳地区雷暴大风过程的特征分析[J].气象与环境学报,2023,39(5):9-18.
- [14]王静,刘焕彬,曹洁,等.1984—2013年山东省主要气象灾情特征分析[J].内蒙古气象,2015(5):53-56.

作者简介:赵碧莹(1978—),主要从事气象服务方面研究,当前就职单位:满洲里市气象局,职称级别:副高级工程师。

叶片结构在可乐烟区烟叶评级中的正确应用

熊科 鲁艳红 范自众 杨彬彬 林婷

广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂, 广西 柳州 545000

[摘要]原料检验是卷烟生产中源头质量管理的重要环节。烟叶评级是原料检验核心技能之一, 能够清晰把握烟叶部位、色度、等级。叶片结构主要是指烟叶内细胞排列的疏密程度, 也是烟叶评级中重要参考因数。贵州省毕节市赫章县可乐乡是高等级烟叶的黄金产区。文章依据烤烟国家标准探讨叶片结构在可乐烟区烟叶评级的应用方法, 并对其各部位的影响因素进行综合研判, 以期做到选择高效科学策略, 确保精确分级。

[关键词]原料检验; 可乐烟区; 烟叶评级

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17730

中图分类号: Q945

文献标识码: A

Correct Application of Leaf Structure in Tobacco Leaf Rating in Kele Tobacco Areas

XIONG Ke, LU Yanhong, FAN Zizhong, YANG Binbin, LIN Ting

Liuzhou Cigarette Factory of China Tobacco Guangxi Industry Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi, 545000, China

Abstract: Raw material inspection is an important link in the source quality management of cigarette production. Tobacco rating is one of the core skills in raw material inspection, which can clearly grasp the position, color, and grade of tobacco leaves. Leaf structure mainly refers to the density of cell arrangement in tobacco leaves, and is also an important reference factor in tobacco leaf grading. Kele Township, Hezhang County, Bijie City, Guizhou Province is a golden production area for high-grade tobacco leaves. This article explores the application method of leaf structure in tobacco grading in cola tobacco areas based on national standards for tobacco, and comprehensively analyzes the influencing factors of each part, in order to select efficient and scientific strategies and ensure accurate grading.

Keywords: raw material inspection; Kele tobacco areas; tobacco rating

引言

赫章县可乐彝族苗族乡年平均降水量 847.8mm。产区内的烟叶品质具有产量高、抗病性强、油分好、香气足等特点。烟区积极实施“科技+质量+效益”战略, 狠抓生产环节标准化, 加大科技推广力度。技术员扎根田间, 全程督促指导烟农落实科学种植、规范管理, 把每个环节都抓到位。在采收、烘烤期, 可乐烟区严格落实烘烤技术责任制, 技术人员包户指导, 确保成熟采收、科学烘烤。在实验室里, 我们将送烟样品先取出 1/3, 然后在主要叶片进行分级, 分级以后进行称重去计算它的合格率。包括工业企业和商业企业交接检查时, 也是采用这个方法。如果对结果又异议, 必须再取 1/3, 去检验, 然后以两次检验结果的平均数为主。

按照评级的程序, 首先我们应该先区分产区, 再来区分它的组别。组别确定以后, 我们先区分它的部位、颜色, 最后区分它的等级。那么区分产区呢? 我们拿到一片烟叶好, 第一步就是区分产区, 那么通过这个烟叶的外观特征来判断它是南方烟还是北方烟, 那么它如果是南方烟, 它是西南烟区的, 还是东南烟区的, 还是长江中下游的? 如果它是北方烟, 它到底是黑吉辽哪个省份, 内蒙省或者甘肃省的烟叶, 还是黄淮烟区的山东河南, 我们要做到这个

心中有数。

接着继续往下分, 因为产区对这个部位颜色的判断是非常关键的。那么你知道它的这个产区以后, 我们接下来我们第二步就是要区分正负组, 那么我们看的就是它的叶的颜色, 它具不具备烟叶的基本色, 它叶片有没有含青、含杂、含光滑。如果不具备烟叶的基本色, 那么我们就定正级, 不具备烟叶的基本色, 那如果青杂色有其中一个, 那么我们就在相应的副主定级, 所以我们区分正副主的时候是看颜色, 看叶面, 看叶基, 主要是看青不含青, 不含青我们很多微带青, 它的中部是没有明显的含青。往往是这个叶基中下部, 而我们的把烟是一种自然的状态, 很容易被大家忽略, 过去这把烟乍一眼看 CF3 级。三级烟和二级烟弄混, 就是因为我们没有把它打开, 看它的叶基部, 其实好多的这个微带青杂色块都隐藏在叶基部。那么你区分了正副组以后, 那么接下来不管是正组还是副组都要会分部位, 副组也是依据部位和它相应的这个特点来划分的, 那么正组是更加要分部位了。

1 产区叶片结构分析

国标《烤烟》(GB 2635—1992) 主要将全国烤烟分为 42 个等级, 并将叶片结构分为疏松、尚疏松、稍密和紧密 4 个层次。许多新入职的原料检验员对于叶片结构认

识不够深刻,容易将叶片结构与叶片组别混淆。在实际工作中,由于烤烟国标中叶片结构各个层次之间的定义过于笼统,容易造成烟叶评级时存在较大的差异,极易造成等级间的判断错误。

1.1 疏松

疏松指正常发育成熟的中下部叶及完熟叶,叶片细胞排列间隙大,成熟度高^[1]。其外观具备了成熟叶片的质量特征,韧性和弹性好,色泽饱满,人工加压不会使烟叶黏结而出现难以松散的现象。叶片结构为疏松时,大概出现在下部叶和中部叶、完熟叶。整体叶型头大屁股大。下部叶脉象容易与中部烟叶相似,但是注意观察叶型是不是较宽圆,类似宽圆就是下部烟叶的叶型。其中下部叶片状态感觉趴在桌面,没有支撑感,上手抚摸烟叶时,感觉没有任何内涵物质。也可以根据烟片的色度,如果色度偏弱有可能是 X3F 级烟叶。如果多种因素指向下部烟叶时,其他因素就不要考虑。X2L 级烟叶和 X3L 级烟叶首先主要看色度,第二看叶面面积大小,较大可能是一级和二级烟叶,较小可能是三级和四级烟叶。看杂色,主要注意下部微带青,烟片中间至基部都会略带浮清,不要完全比对平均色。X2F 级烟叶烘烤转化时,主脉附近烟叶颜色鲜艳。下部叶注意尖级差的差别,叶肩的颜色比较深,干物质较多较厚,叶基部的颜色比较浅,干物质较薄较浅。假熟存在于脚叶部分。干物质和支脉搭建的网络,搭不到头,就会造成下部烟头部很多烂掉了,尤其是西南产区的山地地形产生的烟,个子细长长长的,下部烟叶尖容易烂。下部烟叶从中间最宽处切开,发现下半部烟叶的干物质过分消耗后,出现白色透明物质,在打叶环节,一打就碎了。

而产区的中部烟叶颜色斑驳状比较明显^[2]。总结起来就是三个字“驳”“干”“花”,驳是指烟叶颜色的斑驳感,干是指烟叶油分少,花是烟叶颜色斑点。同时注意观看烟叶的色度,注意看交接颜色深浅,观察时可以往后退一步,底色有白色观感,整体色度特别浅可以定四级柠檬色烟叶。中部叶面展开最宽点在腰部,头顶也不大,尾部也不大,类似梭镖状。向前一步看,容易将柠檬色误认为橘黄色。叶片脉相看起来比较像内向,半遮半漏,叶型是宽圆的,色素和聚集程度不够,但是均匀性可以,要看主脉和脉象,叶型和脉相同时指向中部烟,才有可能中部烟。如果遇上交接颜色,就根据其他因素,先定色再定型,根据浓度和油份,质量最好的评定 C2F 级烟叶,中等烟叶定 C2L 级烟叶,再差一点定 C3F 级。它与黄淮烟区的烟叶相比,黄淮烟区大田生产前期比较干旱,身份比较薄,而可乐烟区大田生产前期雨水充足,日照时间长,身份比较厚。可乐烟区 C3F 带有一部分特有的高原红色素,叶片颜色均匀性不够。如果烟片碎了,经得起搓揉,就说明烟叶的干物质是足够的,说明是一个叶型较好的 C3F 级烟叶。中

部烟的叶肉不可能有那么多平展地方来检查。典型的柠檬黄颜色有一小部分红色点点,可以定义为 CF4 级烟叶。如果色度冲击感强,比较鲜亮时,就要考虑高等级,如果是下部就考虑下部一级,中部就考虑中部二级,上部就考虑上部一级。我们主要看这个烟叶肉折叠也挺好,立体感也挺好的,就考虑 C2L 级烟叶。

1.2 尚疏松

尚疏松指正常发育成熟的上部烟叶或尚熟的中下部叶,叶片细胞排列同隙大,松弛度尚高。B1F、B1R、B2F、B3F、CX2K 时,叶片结构为尚疏松。产区上部叶主脉沟槽特别深,一般处于中上部交接位置。如果要定一级或者二级烟叶,主要看色度。如果对标开片面积平均值,较低的可以定为三级烟叶,开片面积和液位高度有关。注意上部二级烟叶和三级烟叶油份是一样的^[3]。杂色叶片主要考虑斑点和杂色的面积,要将斑点和杂色面积叠加到一起考虑,考虑油份是不是稍有。杂色程度比较重,不能列为一,只能列为二级。杂色一级与二级区别在叶肩部与叶基部的尖级差,油分区别大小,观察烟叶的液位高低。C3F 级烟叶干物质有肉,不是单存的物理厚度,是有硬度。虽然物理厚度不是那么厚,但是很硬。烟区烟叶的杂色都会比较偏挂灰多一点,还有烟筋这种杂色会比较多一点点。烟区微带青级一般以混色为主,我们要对色块有一定的包容性。

B1F 级烟叶给人一种色彩浓重的视觉感,而且上部的叶型也比较宽,接近中部的叶型,那么身份与结构呢,与 C1F 级非常接近,颜色、油分、色度都是达到了一个极致,基本没有缺陷,但是它比中部一级的唯一的区别就是上部一级的自然稍显粗糙。那么上部二级的,它的叶面结构有重叠,叶体叶面的皱缩感还是比较明显,油分较足,色度较好,而上部三级呢,它的叶面的皱缩感就不明显了,不像上部二级它的皱缩感那么明显,上部三级呢,它开片就明显,和二级来讲就不是太好。

它的叶型上从上部三级开始,叶型开始收窄,而且结构偏紧,光泽度也要差一些。那么上部四级烟,它是底面它开片小,结构紧凑。所以说上部它的区别主要是看开片,看叶片的结构,手握有没有这个紧密感。评级时,我们根据主要就是眼看手摸,感觉它的部位特征,通过把烟的重量,干物质的充实和基部的柔软度来确定部位。

把烟评级主要讲究烟叶的大部分特征属于哪个部位,不要去纠结其中的一片或几片烟叶。那么对于特征,我们把握一个点,就是觉得它像什么等级我们就定什么等级,看大多数情况,不要以偏概全。那么对于把烟评级时,如果颜色不好判断,我们就要学会去找中间色,最深的叶片是中间色的话,那么这把烟我们就定义为柠檬黄,如果这把烟最浅的颜色是中间色,那么我们就定义为中橘黄。当这把烟的颜色比较凌乱的时候,那么我们想到的第一感觉就是它可能是副组烟叶,我们要注意一些明显叶片的提示

作用，比如说褪色叶片，光滑叶片。

1.3 稍密

稍密指正常成熟的上部烟叶或欠熟的中下部叶，叶片细胞排列间隙较小。视觉反映主要是油润感及光亮度一般^[4]。手触感觉叶片有一定厚度，稍有平滑感。北方烟区上部叶成熟的季节是九月和十月，温度下降比较明显，光照也没有那么强。南方上部叶成熟的季节是七八月份，类似湖南、福建、广西更早。上部叶采收时间更早，大概在五一期间，上部烟成熟时间无非就是六七月份。上部烟叶会有蜡质感，更厚实，因为它没有充分地成熟。生长时间越长，干物质越多，整体烟叶重量就越重。主脉必须要撑得起整片烟叶。主脉必须足够木质化，必须很硬。上部叶整体凹凸不平，因为上部烟支脉和主脉都定型后就开始长肉，因为上部烟一直迟迟不采收，一直长肉吸收光照，长肉越来越长成泡泡状了，鼓包感特别明显。早移栽 10d，烟叶生长期就多 10d，品质自然更优。特别是 B1K 型烟叶重点考虑烟片长度。B2L 级烟叶和 B3L 级烟叶主要看叶片结构。B2L 级烟叶颜色比较鲜亮，缺少斑驳感。本产区与黄淮烟区最大区别在，黄淮烟区同类型烟叶比较灰蒙，特别是黄淮烟区中河南省三门峡市几个山区县的烟区。烟区土壤肥力水平不高，烟叶没有长宽，但是烟叶很长，整体细长型，尽量不考虑烟叶顶部的老鼠尾现象。上部烟叶在长肉的过程中，在整体烟叶框架固定的情况下，烟叶的尾部有叶耳。B3F 级烟叶与 B4F 级烟叶相比，B3F 级的颜色更鲜亮，更均匀，没有支脉发青的现象，个头开片面积大就是 B3F 级，面积过小就是 B4F 级，B4F 级烟叶没有完全展开，集中在一起像一根管子。青黄烟叶一级主要用腰叶和上下二棚叶作为鉴别重点。工业企业应用上部烟叶比较多，但是烟叶刺激性比较大，通过其他的技术手段，让上部烟变得更柔软一点，油分更好一点。

上部烟叶如果色度不正，光泽较暗，出现这种边缘绿色烟叶时，我们要注意它的提示作用。特别是对于把烟等级不确定时候，我们快速打开几片烟叶，主要是看它的品质因素，包括它的油分、它的身份、它的色度。然后就是看打开这个叶面，它有没有副组特征，它的叶基部有没有含青。我们要验证我们定的等级对不对。

1.4 紧密

紧密指上部烟叶，细胞间隙小排列致密^[5]。其特点是组织细密，结构紧实，韧性尚好。紧密和稍密区别烟叶时，主要是看烟叶开片面积，越大越好，特别是在大顶叶和小顶叶之间。评级高低是主要看均匀度的高低区分叶子的上半部，它高低是有油分和均匀度的，然后，主要看叶的筋骨，但是在采收环节可能会被揉烂，造成筋骨破碎。烟叶的上半截它是完好的，如果是 C4L 级烟叶的话，它是一整把烟全部都是烂的。上面它也干枯也不完整，就是叶尖的部分，上面也干燥也不完整，几乎也是这种。

可乐烟区与陕西烟区相比，油分很足，色度好，慎重打四级烟，它的二级烟、三级烟居多。尤其碰到陕西烟区的部分把烟的下部烟叶都要查看，每一片烟叶都很宽油分很足，越翻越宽，整把烟叶越翻越大。特别是可乐烟区的上部烟叶里柠色，二级烟叶、三级烟叶一定要注意查看烟叶的红色素。现在一般是四个基本色，红、棕、橘黄和柠檬，但是这个颜色受这些环境条件的影响。首先这个颜色是怎么来的，一个是光源，一个是人，再有一个是物体，少了哪一个，这个颜色都产生不了。就是说光源发出的光经过物体或者反射吸收以后的。这个光反射到人的眼睛，然后才能判断它的有这个颜色的。我们一般都可可见光大概是 400~700nm。烟叶叶位在翠碧一号和中烟 100 这两个品种，在辨别时必须首先确认。烟叶的年份也很重要，年份久远的烟叶颜色比较沉闷，中部烟叶比较淡，但是比较有烟叶香味。橘色烟叶有点挂灰，加了一些黑点，显得比较红，比较像莫兰迪那种颜色。

3 结语

卷烟工业企业原料检验人员在烟叶评级时，一定要尽可能依据产区烟叶特点。烟叶第一印象很重要，我们不要去刻意去找副组的特征。烟叶品质因素就是我们的基本功啊，就考验我们的基本功修炼的扎实程度，我们要把握关键因素，比如说色素、油分，叶片结构这些档次，我们要进行推敲推理。最后来判定等级。先从叶型、脉象、叶肉去体会这个烟叶特点，既要抓住烟叶外形特征，科学合理评定烟叶等级，又要抓好烟叶内在特征，清甜香特色突出，香气量足，内在化学成分含量适宜，整体协调性较好，不断坚持以质量为核心，以创新为动力，坚持“体、面、线、点”四维协同，匠心构建数智烟叶转型体系，推动烟叶产业从数字模式向智慧生态跃迁。努力打造高端卷烟的金字招牌。

[参考文献]

- [1]王德文,崔玉霞,孙海然,等.浅谈叶片结构在烟叶分级中的正确运用[J].内蒙古农业科技,2014,2(4):127-134.
- [2]梁太波,张艳玲,尹启生,等.山东烤烟烟叶颜色量化分析及与多酚和类胡萝卜素含量的关系[J].烟草科技,2012,4(8):67-71.
- [3]王卫康.《烤烟》国标中分级因素的概念及把握[J].烟草科技,2004,5(10):44-48.
- [4]柏永超,周家新,左伟标,等.烤烟 C2L 等级合格率低的原因及对策[J].现代农业科技,2019,4(8):53-55.
- [5]许自成,赵瑞蕊,王龙宪,等.烟叶成熟度的研究进展[J].东北农业大学学报,2014,1(2):123-128.

作者简介：熊科，男，广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂；鲁艳红，女，广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂；范自众，男，广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂；杨彬彬，男，广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂；林婷，女，广西中烟工业有限责任公司柳州卷烟厂。

关于加强预制菜行业标准和评价体系建设的建议

王丽媛 黄鲁

民建涪陵区综合一支部, 重庆 404100

[摘要]近年来预制菜市场蓬勃发展,为保障食品安全,国家和地方陆续出台了相关政策法规,地方、行业和团体相继制定了预制菜系列标准。但目前预制菜行业标准质量不高、覆盖不全、对接国际不足、人才缺乏、等不足开始凸显,预制菜评价体系缺失,这都将制约预制菜行业市场推广和进一步发展。文中介绍了当前预制菜行业标准现状,分析了当前存在的问题,并提出了相应的对策和建议,以期对预制菜行业标准化体系和评价体系建设提供参考。

[关键词]预制菜; 标准; 评价体系

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17715

中图分类号: F42

文献标识码: A

Suggestions on Strengthening the Construction of Standards and Evaluation System in the Prepared Dishes Industry

WANG Liyuan, HUANG Lu

Minjian Fuling District Comprehensive No. 1 Branch, Chongqing, 404100, China

Abstract: In recent years, the prepared dishes market has flourished. In order to ensure food safety, the country and local governments have successively introduced relevant policies and regulations, and local governments, industries, and organizations have successively formulated prepared dishes series standards. However, at present, the standards and quality of the prepared dishes industry are not high, the coverage is incomplete, there is a lack of international integration, and there is a shortage of talent. The lack of a prepared dishes evaluation system will also constrain the market promotion and further development of the prepared dishes industry. The article introduces the current status of standards in the prepared dishes industry, analyzes the existing problems, and proposes corresponding countermeasures and suggestions, in order to provide reference for the construction of standardization and evaluation systems in the prepared dishes industry.

Keywords: prepared dishes; standard; evaluation system

近年来现代社会的高速发展,人们的生活节奏越来越快,预制菜在烹饪便捷化趋势的影响下快速发展,受到了越来越多消费者的青睐。2024 年我国预制菜市场规模已达 6000 亿元,2025 年预计将突破 8000 亿元。预制菜产业的迅猛发展对农产品深加工、食品工业转型、消费升级、创业就业等方面均有积极意义。为促进预制菜市场良好有序发展,保障公众食品安全,引导预制菜行业健康稳步走向市场化和国际化,国家和地方陆续出台了相关政策法规,地方、行业与团体相继制定了预制菜系列标准。但由于我国预制菜市场标准化体系不完善、不规范、不系统,评价体系缺失,预制菜市场面临着不少问题,这些问题制约着我国预制菜行业的发展和市场推广。

1 预制菜行业标准现状

1.1 预制菜定义

2024 年 3 月,市场监管总局、教育部、工业和信息化部、农业农村部、商业部、国家卫生健康委联合印发《关于加强预制菜食品安全监管促进产业高质量发展的通知》,明确“预制菜也称预制菜肴,是以一种或多种食用农产品及其制品为原料,使用或不使用调味料等辅料,不添加防腐剂,经工业化预加工(如搅拌、腌制、滚揉、成型、炒、

炸、烤、煮、蒸等)制成,配以或不配以调味料包,符合产品标签标明的贮存、运输及销售条件,加热或熟制后方可食用的预包装菜肴,不包括主食类食品,如速冻面米食品、方便食品、盒饭、盖浇饭、馒头、糕点、肉夹馍、面包、汉堡、三明治、比萨等”,这也是第一次在国家层面上明确预制菜的定义和范围。

1.2 预制菜的分类

1.2.1 国外预制菜主要类型

美国并没有“预制菜”的概念,主要预制食品种类为罐头、冷冻比萨、预制沙拉、预制热狗、汉堡、混合晚餐等。日本预制菜种类更注重菜肴而非主食。

1.2.2 国内预制菜主要类型

目前国内预制菜种类十分丰富。按照使用的主要原料可以分为预制蔬菜产品、预制水产品、预制禽畜产品等。按照加工方式可分为生制预制菜、熟制预制菜、生熟混制预制菜。按照贮存温度可分为常温贮存预制菜、冷藏贮存预制菜、冷冻贮存预制菜。按照食用方式可分为即食预制菜、即热预制菜、即烹预制菜及即配预制菜。

1.3 国内外预制菜相关标准

1.3.1 国外预制菜相关标准情况

预制菜食品原料、加工方式、储存方式各异,各国预制菜的食品安全指标主要是从真菌毒素、污染物、微生物、农兽药残留以及食品添加剂等方面制定。规定也大相径庭,大都是依据产品本身的原料特点分别执行其相应品类的指标要求。暂无针对“预制菜”的统一规定。比如美国没有专门针对预制菜的法规标准,而是通过控制原料的安全性来确保预制菜类产品的食品安全,此类食品的生产、加工、包装、运输等环节均需符合 21CFR110《食品生产、包装和储藏的现行良好操作规范》(CGMP)、21CFR117《人类食品现行良好操作规范和基于风险的危害分析及预防性控制措施》要求,以确保其产品安全性。日本也没有法律法规层面针对“预制菜”的特定食品分类。日本的《食品卫生法》是食品安全根本大法;《食品、添加剂等的规格标准》是涉及食品成分规格等最主要的法律法规,规定了冷冻食品、包装后加压加热杀菌食品等通用的成分规格、食品通用生产、加工及调理基准、食品通用的保存标准。

1.3.2 国内预制菜相关标准情况

我国预制菜标准体系建设尚处于起步阶段,相关研究报道较少,除了近两年新闻报道比较关注和呼吁外,仅有少数研究在一些预制菜产品相关期刊或论文中提到,当前预制菜还没有统一的标准体系、认证体系、追溯体系、评价体系等有效监管评价机制,我国预制菜标准体系建设工作亟待关注解决。国家层面,《预制菜食品安全国家标准》草案已通过审查,即将向社会公开征求意见;《预制菜术语和分类》国家标准的制定也在推进中。截至 2025 年 9 月,现行有效的预制菜团体标准共 216 个,预制菜企业标准共计 82 项,包括预制类肉制品标准 47 个、预制类水产品标准 7 个。地方标准方面,以广东省为例,截至 2025 年 9 月,已出台 8 项预制菜省级地方标准。工业和信息化部等部委近年来相继发布了采用“方便菜肴”“预制肉类”“速冻调制”等命名的 7 项行业标准。我国食品工业协会、我国蔬菜流通协会等都颁布了与“预制菜”有关的团体标准。^[1,2]

2 预制菜行业标准和评价体系建设存在的主要问题

2.1 标准化程度低

2.1.1 标准质量不高,缺乏权威性

一方面,预制菜食品安全国家标准也正在征求意见中,现行的预制菜标准主要为团体标准和企业标准,由行业协会、相关企业牵头制定,普遍缺乏全局性、系统性的统筹规划和考虑,权威性、可行性、前瞻性和适用性不高。如新疆特色农副产品加工业协会发布的预制菜团体标准,起草单位仅新疆特色农副产品加工业协会、塔里木大学 2 家,未广泛征求相关企业和广大消费者意见建议,市场认可度不高。另一方面,由于发布主体不同,部分标准规范存在交叉重复,甚至相互矛盾冲突。如广东省冷链协会、广

东省企业创新发展协会、惠州市标准化协会、佛山市农业产业联合会等 4 家协会都发布了关于预制菜冷链配送的团体标准,但在适用范围和主要技术内容上存在交叉重复和部分偏差,给企业运行和行业监管带来困惑和难度。^[3,4]

2.1.2 分类覆盖不全,缺乏普遍性

预制菜全产业链涉及原料供应、生产加工、包装运输、冷链储存、产品销售等多个领域,但现行标准主要聚焦生产环节,原料供应、产品销售等环节覆盖不够。据全国标准信息公共服务平台数据显示,现存有效的预制菜团体标准共 216 个,但仅有我国民营科技实业家协会、佛山市农业产业联合会发布的《预制菜原料供应商选用指南》《预制菜水产品原料安全卫生要求》专门对预制菜原料供应提出要求,且仅有惠州市标准化协会发布的《预制菜电商销售及物流服务规范》对预制菜产品销售进行了规范。此外,由于预制菜产品种类繁多、成分复杂,标准制定难以覆盖大多数产品,导致部分预制菜产品仍处于“无标可依”的尴尬局面。据重庆涪陵区市场监管局相关负责人介绍,预制菜产品成分复杂,一道菜往往同时包含禽肉类、水产类、蔬果类、菌类等食材,难以按照原料进行分类。因此,现行标准大多针对具体菜品制定,如,安徽省食品行业协会针对药膳芍花鸡、药膳麻椒鸡等 10 道菜品分别制定了团体标准,但这样的标准不仅约束了菜品创新,也难以覆盖成千上万种预制菜产品。

2.1.3 国际标准接轨不足,缺乏竞争性

一方面,由于缺乏健全的行业标准体系,预制菜行业准入门槛较低,呈现出发展不均衡、集中度低、规模化少的特点,具备出口资质和能力的预制菜企业较少。据广州南沙雪印预制菜进出口公司总经理宁学军介绍,预制菜出口企业通常面临五大痛点——想出口没有出口资质、有出口资质但缺少专业人才、有团队但没订单、有订单但利润低和通关能力差导致时效性低,达不到客户的要求。另一方面,预制菜出口企业获取国外法规标准信息的能力不足,实施的预制菜产品质量认证标准体系没有完全与国际规范、国际标准接轨,导致通过国内质量检测和认证的食品产品出口受阻。如 2022 年欧盟食品和饲料快速预警系统(RASFF)通报我国输欧食品类消费品风险种类共 313 项,其中使用未经授权的材料 61 项、添加剂 20 项、文件/证书错误 16 项、含有新型食品成分 7 项、标签错误 5 项,共占总风险类型的 34.8%。

2.1.4 标准化人才储备不足

当下,预制菜行业因其准入门槛不算高,所以正迅速扩张,不过企业间的发展质量差别挺大。企业在高端产品领域创新突破不多,多数企业都碰到了研发方面的难题,很难往产业链高附加值的部分发展,如此一来,它们对高端以及复合型人才的吸引力也变弱了。

就企业经营策略来讲,众多企业把资源都集中在市场

销售以及短期产品迭代方面,盼着能快速获取利益,然而对于和长期发展密切相关的质量安全以及标准体系建设却不够重视。这样的战略短视使得企业普遍缺少配置专职标准制定人员的意识,有的甚至直接忽视相关岗位的设置。其直接产生的后果就是,那些既精通食品科学技术又熟悉标准化工作的跨领域专业人才存在严重的短缺情况,没办法满足行业标准化进程不断加快的需求。

2.2 评价体系尚未完善

随着消费升级这一趋势的推进,消费者的关注点已经发生了变化,从最初的便捷性以及基础口味方面,逐渐扩展到了食品安全、营养健康还有风味品质等诸多更为全面的层面。不过现有的预制菜评价机制存在着比较明显的局限性,它的覆盖范围大多仅仅局限于基础的安全以及生产规范等方面,所以很难有效地回应市场对于营养成分、感官体验等方面日益增长的这些需求。

虽然像我国蔬菜流通协会这样的行业组织已经牵头发布了相关的团体标准,尝试去建立起产品质量评价方面的规范,然而那种权威性较强、能够涵盖所有品类并且在全国范围内统一的顶层评价体系依旧是缺失的。在规模化以及工业化开展生产的这种大背景之下,要是原料管控环节或者加工环节所存在的潜在风险没有体系性的评价以及相应的约束措施,那么这将会直接对消费者针对预制菜产品所持有的信任程度以及接受的程度产生影响。^[5]

3 加强预制菜行业标准和评价体系建设的对策建议

3.1 完善行业标准

3.1.1 制定国家标准

依托食品安全法、标准化法,加快推进《预制菜术语与分类》国家标准和《预制菜食品安全国家标准》的制定和出台工作,明确预制菜的定义、范围以及相关管理原则,进一步研究论证《食品安全国家标准》中对预制菜的混合类方便食品的污染物限量、真菌毒素限量和食品添加剂限量等国家标准,对预制菜原料规范、安全生产、质量指标、检测方法等作出明确规定。引导预制菜产业向精准营养、高附加值方向升级。

3.1.2 整合资源,建立健全标准体系

支持相关部门和技术机构开展预制菜标准研究,加快完善预制菜标准体系建设,聚焦预制菜原材料采购、生产加工、包装运输、仓储保鲜等全产业链各环节,解决发展过程中“散、乱、小”的问题,整合资源,分级分类制定完善预制菜国家标准、行业标准、地方标准和团体标准等,建立健全可操作性、可指导性和可约束性的预制菜产业标准体系。龙头企业应发挥示范作用,带头落实食品安全主体责任,积极参与预制菜行业标准制定,发挥企业技术优势,整合上下游产业资源,完善产业链体系,打造预制菜自主品牌,实现预制菜企业高质量发展。

3.1.3 推动标准国际化与便利化

要提高我国预制菜标准在国际上的竞争力,得积极推动它和国际标准相互对接并达成互认。在这个推进的过程中,要主动去抓住《区域全面经济伙伴关系协定》所给出的战略方面的机遇。标准制定这项工作一方面要立足于国内产业的实际状况,另一方面还得具备前瞻性,要想着怎样借助 RCEP 的相关规则来消除技术性贸易壁垒。可以依照《技术性贸易壁垒协定》所搭建的框架,借助信息的相互交换以及开展国际合作的方式,着重强化和澳大利亚、新加坡、越南等这些在关键成员国之间,在标准技术这个层面上的协调以及互认事宜,一道努力去构建起一个能够获得区域范围内广泛认可的预制菜标准体系,靠此来推动国家标准化工作实现创新并且完成升级。

为切实支持企业开拓国际市场,建议配套出台针对预制菜出口的专项标准规范,并强化海关、检验检疫等部门的服务协同。

3.1.4 强化人才引进与培养机制

人才乃是行业实现可持续发展的核心驱动力所在。就处在高速成长阶段的预制菜行业来讲,迫切需要构建起一支对食品科学、工艺技术以及标准化管理都颇为精通的专业人才队伍,而这与行业标准体系的建设质量以及产业的长久健康持续发展有着极为紧密的关联性。

在人才战略层面,可考虑参考国际上已取得成功的经验,对引才以及育才模式加以创新。具体来讲,需充分利用大数据这类信息化工具,去建立起能够动态更新的全球高层次专业人才数据库,进而达成按图索骥般精准寻访的效果。与此还应当搭建起一个高效能的产学研对接平台,紧紧聚焦于企业实际的研发情况以及技术方面的需求,以此来实现人才和岗位的精准对接,最终为行业源源不断地输送高素质的创新人才,筑牢产业发展在智力方面的根基。

3.2 探索构建评价体系

预制菜评价体系构建可参照我国的《绿色产品评价通则》《绿色工厂评价通则》以及我国蔬菜流通协会发布的《预制菜产品质量评价规范》团体标准,搭建框架。包括指标体系的框架结构,评价通则的术语定义、各类指标选取等。如何定义预制菜、预制菜分类、如何界定其内涵和外延、预制菜评价通则适用于什么范围、预制菜标准体系框架应覆盖什么范围、如何建立预制菜评价指标体系、制定预制菜评价标准的原则、如何选择产品类别^[6]。在预制菜标准体系框架上应有流通运输、供应链等相关内容评价。预制菜评价体系要能对不同类别预制菜评价标准有指导作用,统一制定预制菜评价标准,相关评价工作要以标准为依据,找到消费者认知与行业实际分类的结合点,标准制定的必要性以及预制菜评价指标的共性需求精细分类。

3.2.1 应遵循的原则

为确保预制菜评价体系的科学性与实用性,其构建工

作应基于以下几项核心原则：①全流程覆盖原则：评价体系应当贯穿产品整个生命周期，包含从原料采购、加工制造、仓储物流、消费使用直至最终废弃处理的所有环节。对各个阶段的资源消耗情况、环境产生的影响以及健康安全方面存在的风险展开全面剖析，从中筛选出关键且能够量化的监测指标，以此形成一套系统性的评价依据。②关键指标筛选原则：指标的选取不能闭门造车，而应建立在充分的调研基础上。需系统对比国内外现有相关标准；应深入了解行业实践和消费者的核心关切。最终确定的指标应能精准反映产品在安全、健康、环保等方面的关键特性，确保其典型性和代表性。③实操可行性原则：所有入选的评价指标都得具备现实的可操作性。这就要求得有成熟且可靠的检测方法来作为支撑，并且国内的检测机构大多得具备与之相应的检测能力。在选取指标的时候，要鼓励直接去采纳或者参考国际上通行的先进标准，以此来提升这个体系在国际上的认可程度。④系统平衡的原则来讲，评价体系务必要有不错的兼容性以及协调性。在去设定那些具体指标的基准值的时候，得开展科学的关联性分析，要全面且妥善地兼顾到产品的绿色环保方面的属性还有其核心的质量属性，进而让这两者能够达成平衡状态，防止出现相互之间产生冲突的情况，以此来推动产业朝着全面高质量的方向不断发展。

3.2.2 评价指标的系统框架构想

预制菜评价指标体系的整体框架可由两大模块构成：基本准入要求和多维评价指标。

此模块确立了企业参与评价的准入条件，强制要求企业得先遵循国家在节能、环保等方面的相关法律法规，运

用合规的生产工艺和技术，构建并运转完善的质量管理体系，其产品须契合所有适用的强制性产品标准。

评价指标方面的要求：该模块属于体系当中的核心部分，主要用于针对产品展开分级评价工作。不妨设立四个一级指标类别，分别是资源属性、能源属性、环境属性以及品质属性。每一个一级指标之下，都得进一步细化成一系列能够被精确测量、能够经得起验证并且可以接受审核的二级指标。在实际的应用场景当中，依据不同预制菜品类各自所具有的具体特点、其对环境以及健康所产生的影响程度还有现有标准的覆盖状况，去对上述的一级指标展开动态的选取以及权重方面的调整操作，进而达成分类且精准的评价效果。

[参考文献]

- [1]中华人民共和国中央人民政府.市场监管总局等六部门联合发布《关于加强预制菜食品安全监管促进产业高质量发展的通知》[EB/OL].2024-03-21.
- [2]国家标准信息公共服务平台.预制菜相关标准查询[EB/OL].
- [3]广东省市场监督管理局.广东省地方标准公示[EB/OL].
- [4]杨芳仪.广西G市预制菜产业食品安全监管问题的研究[D].广西:广西师范大学,2025.
- [5]李静,李皎月,柳杨,等.我国现行预制菜标准研究进展[J].大连工业大学学报,2025,44(3):180-184.
- [6]张永兵,陈勇美.预制菜食品安全存在的问题及对策[J].现代食品,2024,30(13):159-161.

作者简介：王丽媛（1989.9—），女，籍贯：重庆渝北，学历：硕士研究生，职位：重庆市涪陵区机关事务管理中心标准化工程师。

基于水质可达的湖湾水环境综合治理

刘清华 黎作尚 丰莉 邓柏松 韩振华 黄璐怡
长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]湖泊水环境治理需统筹控源截污、内源清除及生态修复等系统性措施。针对当前治理方案依赖经验、缺乏定量评估的问题,以汤逊湖香榭湾劣V类水体为对象,应用 MIKE21 构建水质水动力模型,定量评估综合治理工程的水质目标可达性。结果表明:实施排口截污、岸线整治、生态缓冲带及水生态修复工程后,湖区 COD、NH₃-N、TP 等指标浓度显著下降,出口水质可稳定达到V类标准,污染物削减率超 80%。

[关键词]水动力模型; MIKE21; 水质可达性; 综合治理; 汤逊湖香榭湾

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17722

中图分类号: X524

文献标识码: A

Comprehensive Management of Lake Bay Water Environment Based on Achievable Water Quality

LIU Qinghua, LI Zuoshang, FENG Li, DENG Baisong, HAN Zhenhua, HUANG Luyi
Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: The management of lake water environment requires systematic measures such as controlling sources and intercepting pollution, removing internal sources, and ecological restoration. In response to the problem of relying on experience and lacking quantitative evaluation in the current governance plan, a water quality hydrodynamic model was constructed using MIKE21 for the inferior Class V water body in Xiangxie Bay, Tangxun Lake, to quantitatively evaluate the water quality target reachability of the comprehensive governance project. The results showed that after implementing the discharge interception, shoreline remediation, ecological buffer zone, and water ecological restoration projects, the concentrations of COD, NH₃-N, TP and other indicators in the lake area significantly decreased, and the outlet water quality could stably meet the Class V standard, with a pollutant reduction rate of over 80%.

Keywords: hydrodynamic model; MIKE21; water quality accessibility; comprehensive governance; Tangxun Lake Xiangxie Bay

引言

在共抓开展长江大保护、打好水污染防治攻坚战背景下,湖泊生态修复成为重点任务。2019 年武汉市印发《武汉市河湖流域水环境“三清”行动方案》^[1],重点开展汤逊湖等流域综合治理,消除劣 V 类水体,确保 2025 年全市河湖流域水质基本达标。汤逊湖近年水质持续恶化,湿地健康等级为中等,湖水 TN、TP 严重超标^[2],其子湖香榭湾片区因外源污染输入、水动力条件弱化等问题,水质达劣V类,生态退化显著。

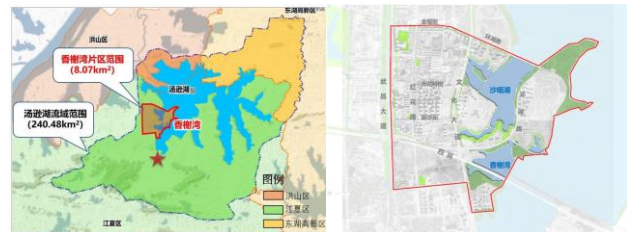
截断外源污染、移除内源污染、修复水生态是提升河湖水质的重要措施^[3-5]。以汤逊湖香榭湾片区为例,在对研究区水环境、水生态、水景观全面排查的基础上,以“通湖水、控污水、固岸线、修生态、净水质”的思路制定了排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、水生态修复工程等工程措施。由于浅水湖泊水动力弱、水环境容量小等特性,合理的前期方案设计和论证是确保水质效果达标的重要保证^[6],仅靠经验分析和整体分析难以准确评估工程方案的目标可达性^[7]。MIKE21 模型在湖泊水质模拟中应用广泛^[8-9],可有效支撑治理方案的科学设计。以香榭湾为对象,应用 MIKE21 构建水质水动力模型,评估“控源截污-生态修复”综合治理措施的水质可达性,评

估实施效果。

1 基本情况

1.1 研究区域位置

香榭湾片区汤逊湖流域西侧(图 1a),汇水面积 8.07km²,水域面积 1.05km²,主要包括水域面积 0.31km²的香榭湾和水域面积 0.74km²的沙咀湖(图 1b)。香榭湾片区平均水深 1.5~2.0m,水体透明度在 30~80cm,平均透明度 50cm。岸线总长度 14.85km,未整治岸线长度 2.67km。



(a) 香榭湾片区位置

(b) 香榭湾片区水系图

图 1 香榭湾片区和水系分布

1.2 水系现状问题

香榭湾片区现状水质为劣V类, TN 超标 0.5 倍, TP 超标 1 倍。其中沙咀湖排口水质最差,其中总氮超标 20 倍,总磷超标 17.3 倍以上,降雨期污染物浓度稍微较低。

总体上看,香榭湾水质优于沙咀湖。香榭湾水环境表现在以下突出问题。

(1) 雨污混流严重:香榭湾片区雨水排放模式以直排汤逊湖为主,正在进行雨污分流改造。沿湖湾较明显的混流排口有 5 处,管径 D600~D1500,晴天有混流污水外排,对水体环境影响较大。

(2) 水系功能退化:沙咀湖底泥淤积深度范围为 60~90cm,平均深度 75cm,沙咀湖南侧底泥淤积严重,水体流速缓慢,湖体之间联通性较差。

(3) 岸线杂乱无章:香榭湾岸线总长度 14.85km,未整治岸线长度 2.67km,占 17.98%。未整治岸线多为泥土边坡,不利于水体生态净化。西北角靠近文化大道附近堆土严重,影响生态环境,现状岸滨带无法亲水,缺乏沿湖景观设施。

(4) 生态结构失衡:香榭湾片区水生植被覆盖率较低,浮游动物密度及生物量逐年减少,湖泊水生态系统结构遭到破坏。浮游植物香浓维纳多样性指数在 0.9~2.1 之间,呈现中度至重度污染状态。沙咀湖的叶绿素 a 浓度范围为 12.4~24.3μg,综合营养状态指数 TLI(chl)沙咀湖为 52.3~59.7,均为轻度富营养状态。浮游动物香浓维纳多样性指数在 1.7~2.6 之间,总体呈现轻中度污染状态。

1.3 水环境容量及污染削减分析

沙咀湖片区污染类型主要有生活污染、工业污染、雨水径流污染、降尘污染和内源污染。污染物总量为 COD 622.42t/a、NH₃-N 51.19t/a、TP 6.46t/a、TN 84.28t/a。按照各类污染源来看,沙咀湖主要污染源来源为生活点源(51%~82%),雨水径流污染(17%~51%),内源主要有部分 TN 和 TP 污染(16%~19%)。各类型污染源统计情况详见表 1。

表 1 沙咀湖入湖污染负荷分析

污染源类型	COD/ (t/a)	NH ₃ -N/ (t/a)	TN/ (t/a)	TP/ (t/a)
生活点源	322.26	42.3	52.64	3.81
工业点源	0.0887	0.0027	0.0078	0.0003
雨水径流污染	287.27	8.89	16.59	1.28
降尘污染	12.8	0	1.55	0.08
内源污染	0	0	13.49	1.29
污染合计	622.42	51.19	84.28	6.46

根据《武汉市水功能区划》等,2025 年汤逊湖主湖水质达到IV类,沙咀湖水质达到 V 类。根据沙咀湖水质治理目标,计算得到 2025 年环境容量如下表 2 所示,COD 为 124.14t/a,NH₃-N 为 6.21t/a,TN 为 8.67t/a,TP 为 0.69t/a。

在不考虑治理工程措施的边界情况下,对汤逊湖流域中的污染量进行预测。考虑 2025 年汤逊湖污水处理厂尾水入湖污染维持不变,工业企业不增加排污,汤逊湖 2025 年规划人口 97.5 万人测算点源污染。面源污染以维持现

有负荷情况考虑。预测降尘污染以维持现有负荷情况考虑。按照污染来源,对比现状污染情况,其污染增长量主要来自区域内的人口增长及内源污染释放量增加。

表 2 沙咀湖入湖污染与环境容量对比

内容	COD/ (t/a)	NH ₃ -N/ (t/a)	TN/ (t/a)	TP/ (t/a)
入湖污染物	622.42	51.19	84.28	6.46
2025 年入湖污染物预测	766.88	70.31	108.06	8.17
2025 年环境容量	124.14	6.21	8.67	0.69

通过对比现状入湖污染与 2025 环境容量,2025 年入湖污染量总量增加,入湖 COD、NH₃-N、TN、TP 超过环境容量的 6.3 倍、11.3 倍、12.5 倍、11.8 倍。为达到沙咀湖水质 V 类的目标,COD、NH₃-N、TN 和 TP 削减率较高,分别为 80.06%、87.88%、89.71%、89.33%,均超过 80%。

2 治理策略

2.1 技术路线

香榭湾片区水环境综合治理工程为系统工程,涉及源头、过程和末端等方面,工程措施包括“控源截污”“退渔还湖”“岸线整治”“生态缓冲带”“连通疏浚”“水生态修复”等,工程量大,需要系统考虑,协同实施,综合综效,实现香榭湾水环境总体目标。

坚持问题导向和目标导向,通过排查香榭湾片区水环境、水景观、水生态等现状存在的问题,明确综合治理的目标。遵循“控源截污、生态修复、长制久清”的水环境综合治理路线,通过水岸同治、系统治理、因地制宜,安排沿湖排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、两湖连通疏浚工程、水生态修复工程共五大类的工程措施,系统治理香榭湾片区水环境问题。

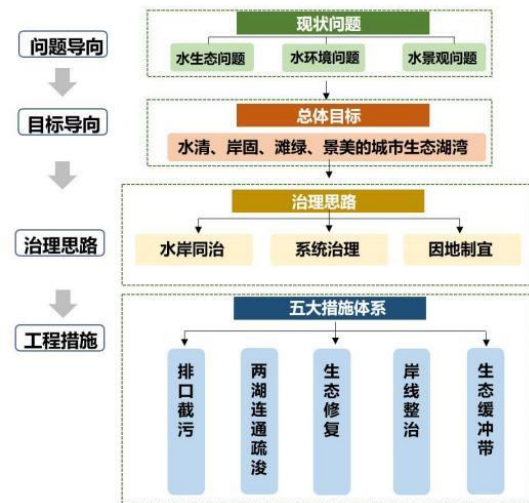


图 2 综合治理技术路线

(1) 沿湖排口截污工程

5 处沿湖混流排口截污改造,包括新建截流井 4 座、

闸门井 1 座、一体化污水泵站（1500m³/d）1 座及配套污水管道。



图 3 沿湖排口截污工程总体布局

(2) 岸线整治工程

香榭湾西北角四环线下存在在 2007 年左右形成发大量堆土，侵占了湖泊蓝线，在护岸整治前需要提前进行占湖清退，恢复湖泊水面。对香榭湾片区开展占湖清退，按照宜退则退、逐级削坡、生态缓冲的原则，清退后开展岸线生态修复，本次占湖清退工程范围现状地面高程 18.2~27.5m 左右，通过土方开挖恢复至湖底高程 17.5m 处，占湖清退工程范围约 10 万 m³。此外，对侵占岸线的土坑进行退坑还湖，挖土方工程量约 2.3 万 m³。

(3) 沙咀湖生态净化工程设计

对污染较重，淤积深度大的区域实施清淤，清淤面积约 6.7 万 m²，平均深度 0.3m。配合清淤，进行有害鱼类清除和拦截，对部分区域进行清杂及清表，提高水体透明度，营造良好的水生植物种植条件。种植亚洲苦草、密齿苦草等约 35 万 m²，恢复沉水植物群落，构建湖泊恢复并保持优良水质及清水态的基础。采用直接种植的方式种植睡莲、荇菜、水鳖等去污能力强的浮叶植物约 0.8 万 m²。为进一步增加水体的净化能力，增加生态系统的多样性和稳定性，种植菖蒲、黄花鸢尾、水生花叶美人蕉等挺水植物约 2.5 万 m²，如图 4 所示。

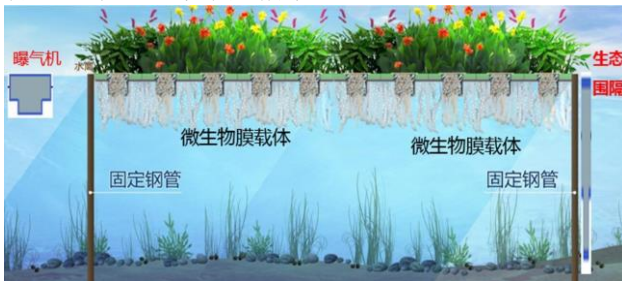


图 4 排口生态改造示意图

为调节水生动物结构群落，通过投放鱼类，以优化湖泊生态系统，增加水体自净能力，改善水质，考虑鲢鳙和肉食性乌鳢对浮游植物摄食的下行效应，控制蓝藻水华爆

发，通过乌鳢控制小杂鱼，按 100 尾/亩的密度投放。此外，投放螺、蚌等构建合理的大型底栖动物群落，促进水生植物的生长。

对沿湖排口进行生态化处理，利用曝气和生态附着基质优化提升排口区域的水质。在雨水排口周边水域布设强化处理设施主要包括生态拦污围隔、生态浮床及曝气充氧设备。单体为复合纤维浮动湿地，布置曝气设备避免水体黑臭，设置强化预处理系统，结合挺水、沉水植物布置构建净化湿地。

3 目标可达性分析

3.1 水环境数学模型

为了定量分析工程实施后对沙咀湖水环境效果和影响，并制定合理的调度运行方案，采用 MIKE 21 构建沙咀湖的二维湖泊水动力水质模型。MIKE 21 是一个专业的与水有关的工程软件包，可用于模拟河流、湖泊、河口、海湾、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙及环境场。基于 MIKE 21 中的 AD 模块（Transport 模块）模拟沙咀湖生态湿地水体中的对流和扩散过程。

MIKE 21 模型基于 Boussinesq 和流体静压假定的二维不可压雷诺平均 N-S 方程，其基本原理如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

MIKE 21 FM 对流扩散模块（Transport）描述水体中污染成分输移转化运动过程的平面二维运动方程为：

$$h \frac{\partial c}{\partial t} + u h \frac{\partial c}{\partial x} + v h \frac{\partial c}{\partial y} = D_x h \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y h \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + S_c + P_c \quad (2)$$

式中：c 为污染成分浓度（mg/l）；u、v 为沿 x、y 方向的流速（m/s）；D_x、D_y 为 x、y 方向的扩散系数（m²/s²）；S_c 表示源（汇）项（g/m²/s）；P_c 表示污染成分的生化反应过程。

3.2 模型建立

以汤逊湖 2012 年典型年降雨文件、2022 年水质监测数据为初始条件、沙咀湖径流面源水量水质为边界条件，得到各种因素作用的水质模拟结果，验证沙咀湖生态湿地出流水质目标可以达到 V 类。沙咀湖水动力水质二维模型计算网格及地形见下图所示，二维模型其他相关参数取值见下表。沙咀湖湖底曼宁系数根据水生生态修复方案和水生植物布局设置，布局了水生植物区域的曼宁系数大于无植物区域，即有水生植物区域湖底糙率大于无植物区域，如图 5 所示。

3.3 水质目标可达性分析

考虑沙咀湖片区采取的生活污水收集处理、环湖缓冲带建设等措施，沙咀湖生态湿地主要削减进入沙咀湖的雨水径流污染。模拟生态湿地工程实施后的水质浓度场动态分布，模型输出典型年逐日水质浓度场结果，以夏雨后 3d 和冬季雨后 3d 水质较差的时刻为例，各指标浓度空间变化见下图，结果显示沙咀湖与汤逊湖连通的北部出流区

和南部出流区 COD、NH₃-N、TP 各指标浓度均达到 IV~V

类水质标准，如图 6 所示。

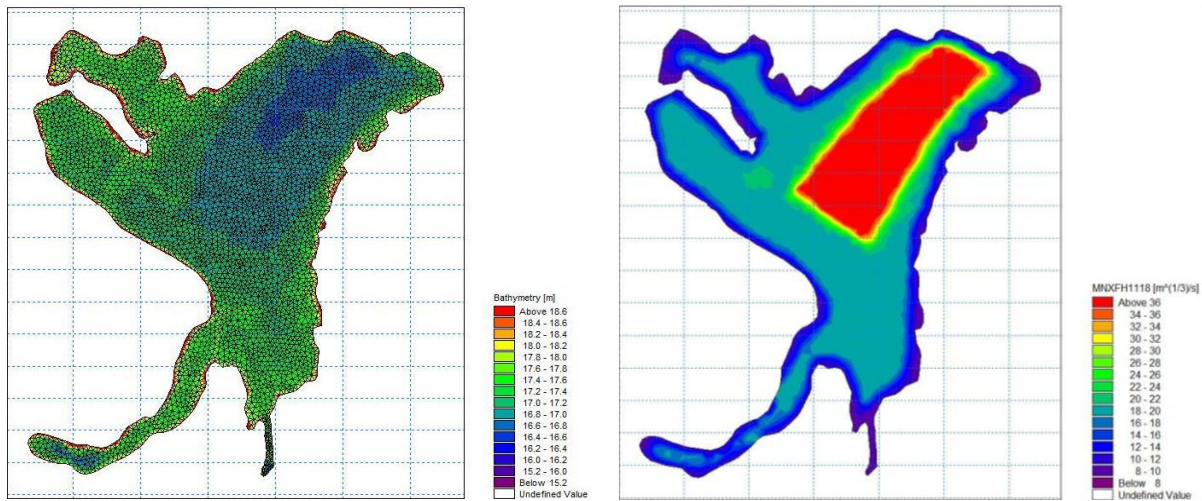
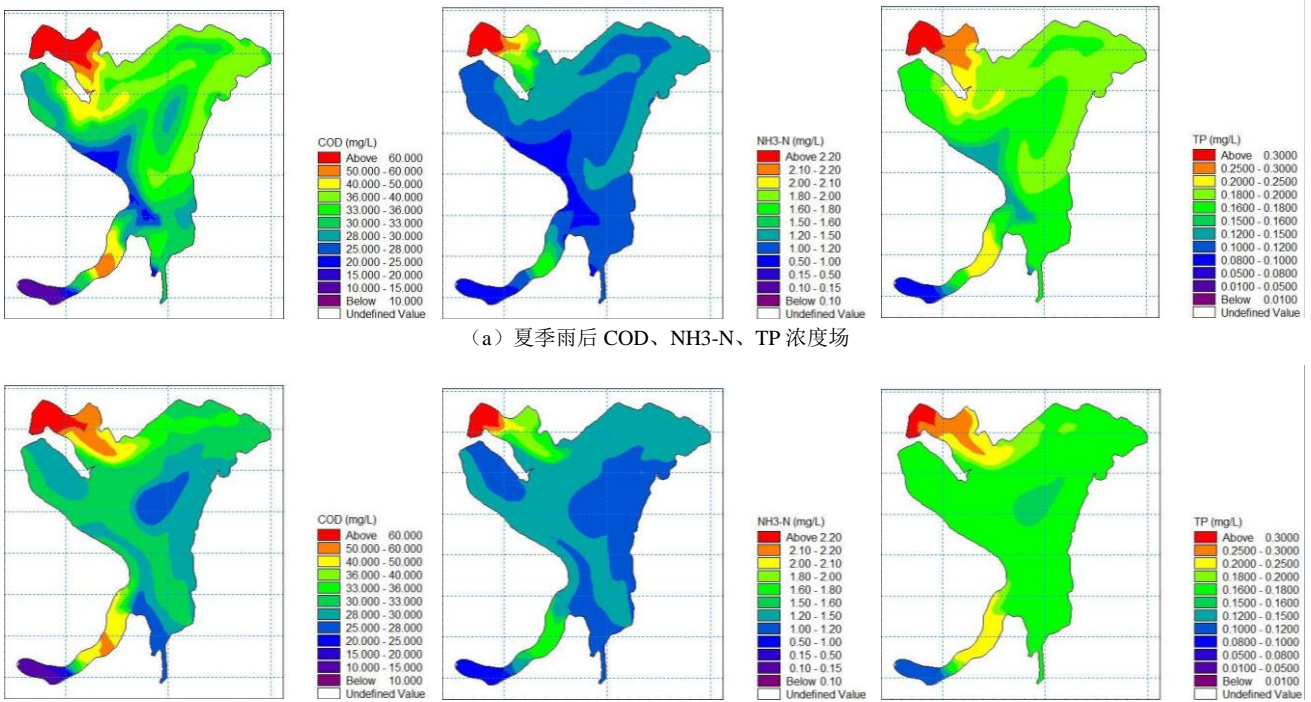


图 5 沙咀湖水动力模型计算网格及地形



(a) 夏季雨后 COD、NH₃-N、TP 浓度场
 (b) 冬季雨后 COD、NH₃-N、TP 浓度场
 图 6 沙咀湖生态湿地夏季、冬季 COD、NH₃-N、TP 浓度场

4 结论与建议

(1) 汤逊湖香榭湾片区污染较为严重，雨污混流严重、湖泊底泥淤积、岸线杂乱、水生态系统受到破坏。现状水质为劣 V 类，入湖 COD、NH₃-N、TN 和 TP 需 80% 以上削减率方可实现 V 类水质目标。

(2) 通过沿湖排口截污工程、岸线整治工程、生态缓冲带工程、水生态修复工程等工程措施，可显著改善水体流动性及自净能力。

(3) MIKE21 模型验证了治理方案的有效性，评估

了水环境治理水质目标可达性，结果表明工程实施后，沙咀湖水质将得到明显改善，各指标浓度均达到 IV~V 类水质标准。MIKE21 能很好地用于浅水湖泊综合治理成效评估中，对优化前期设计方案具有重要作用。

[参考文献]

[1]刘力,张雅,李朋,等.武汉市典型湖泊湿地生态系统健康评价——以汤逊湖为例[J].资源环境与工程,2022,36(6):773-781.
 [2]向莹,黄守斌,黄安,等.九江市琵琶湖外源污染模拟与削

减控制工程设计[J].中国给水排水,2023,39(6):113-121.

[3]周道坤,刘晓伟,荣楠,等.湖北网湖自然保护区水质改善对策研究[J].环境科学与技术,2020,43(2):255-261.

[4]付俊峰,杨淑敏,宋炳月,等.人工湿地植被覆盖对营养物质净化作用的模拟研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,1(13):22.

[5]毛毅,饶世雄,陈铁,等.基于水动力水质模型的浅水型湖泊水环境治理目标可达性评估[J].给水排水,2024,60(2):65-71.

[6]刘克臻,周艳莉,崔潇龙.基于 InFoWorks ICM 模型的城市片区排水防涝方案优化研究[J].给水排水,2023,59(3):60-64.

[7]黄明,马飞虎,匡武,等.基于 MIKE21 研究生态补水对巢湖水质时空分布的影响[J].环境污染与防治,2024,46(4):463-470.

[8]奚斌,陈倩倩,陈伟,等.基于 Mike21 模型的河道水质提升工程试验研究[J].中国农村水利水电,2023(5):5-11.

作者简介:刘清华(1987.11—),男,工程师。研究方向:主要从事流域水环境综合治理相关研究。

平原水库泥沙淤积对水文情势及水资源利用的影响研究

王宏东

自治区塔里木河流域和田水利管理中心, 新疆 和田 848000

[摘要]平原水库属于区域水资源配置以及调控方面的关键基础设施,其蓄水能力还有水质状况和农业灌溉、工业供水、生活用水以及生态环境维护有着直接的关联。不过,水库泥沙淤积这一问题长期以来一直存在,对库容的有效利用、洪水调控能力以及水资源可持续利用的程度都产生了影响。文章依据泥沙输移以及淤积的特点,针对平原水库泥沙淤积给水文情势以及水资源利用带来的影响展开系统的分析,并且结合淤积预测模型以及调控办法给出管理方面的建议。研究说明,泥沙淤积不但致使库容出现下降的情况,而且让水位波动变得更加剧烈,同时对农业灌溉、工业以及生活用水、生态环境用水也都产生了直接的影响。

[关键词]水库泥沙;淤积;水文影响;水资源利用影响

DOI: 10.33142/nst.v2i3.17717

中图分类号: TV213

文献标识码: A

Study on the Impact of Sedimentation in Plain Reservoirs on Hydrological Conditions and Water Resource Utilization

WANG Hongdong

Tarim River Basin Hotan River Water Conservancy Management Center, Hotan, Xinjiang, 848000, China

Abstract: Plain reservoirs are key infrastructure for regional water resource allocation and regulation, and their water storage capacity is directly related to water quality, agricultural irrigation, industrial water supply, domestic water use, and ecological environment maintenance. However, the problem of sedimentation in reservoirs has long existed, affecting the effective utilization of storage capacity, flood control capabilities, and the degree of sustainable use of water resources. Based on the characteristics of sediment transport and deposition, this article systematically analyzes the impact of sediment deposition in plain reservoirs on hydrological conditions and water resource utilization, and provides management suggestions in combination with sedimentation prediction models and control methods. Research has shown that sedimentation not only leads to a decrease in storage capacity, but also makes water level fluctuations more severe, and has a direct impact on agricultural irrigation, industrial and domestic water use, and ecological environment water use.

Keywords: reservoir sediment; sedimentation; hydrological impact; impact of water resource utilization

引言

随着区域经济不断发展以及人口持续增长,水资源的需求也在不断提高。平原水库属于水量调节以及水质保障方面极为重要的设施,其运行效率对于社会经济以及生态系统均有着直接的影响。不过,泥沙淤积的情况长期存在并且还在逐渐变得更加严重,这使得水库库容一年比一年下降,水库在洪水调节方面的功能以及在干旱期的供水能力都受到了限制,水资源的可持续利用也面临着诸多挑战。近些年来,国内外的学者围绕水库泥沙输移、淤积规律以及其对水文情势和水资源利用的影响展开了大量的研究工作,然而针对平原地区水库所进行的系统分析相对来说还是较为有限的。所以,本文目的在于全面且细致地梳理平原水库泥沙淤积的特性以及其对水文情势和水资源利用产生的影响,同时探讨相关的预测模型与调控措施,期望能够为科学管理给予一定的参考依据。

1 水库泥沙淤积概述

1.1 平原水库特点及优势

平原水库所在之地地势平缓开阔,建设时所处条件较

为宽松,其土建方面存在的难度以及所需的投资成本都比山区水库要低得多,在开展区域水利规划相关工作的时候,它具备相当不错的可行性以及经济方面的特性。它的库区面积颇很大,这就有利于将水集中起来进行蓄存以及灵活调度,能够涵盖范围较为广泛的灌区,从而为农业灌溉事宜给予稳定可靠的水源保障。平原水库能够对水量予以均匀的调节和蓄积,但是平原水库不具备冲砂的功能,必须要用机械进行清库,以此来缓解下游径流出现波动时所面临的压力。

1.2 平原水库主要弊端

平原水库有着建设以及调度方面的优势,不过同样存在着十分突出的弊端。其库面较为广阔,如此一来便使得蒸发量变得很大,在高温季节的时候,这会对有效库容以及可用水量形成一定程度的损失。而且库容是有限的,并且很容易受到泥沙淤积方面的影响,切不具备冲砂的功能,必须要用机械进行清库,这会进一步让蓄水以及调水的能力有所削弱,与此同时还会增加清淤的难度以及管理的成本。长期出现淤积的情况还很可能对水质、水流特性以及生态环境产生影响,进而对水资源的可持续利用起到限制作用。平原地

区地势平坦,水库蓄水面大、坝高较低,水体与透水层接触面积广,下渗路径更长。所以说,平原水库在规划以及管理的时候,务必要将蒸发、下渗、库容以及泥沙治理这些方面都考虑进去,以此来保障其运行效率以及资源的可持续性。

2 泥沙淤积对水文情势的影响

2.1 库容变化与蓄水能力影响

泥沙沉积的情况会明显削减水库的有效库容,致使蓄水能力随着时间的推移不断下降,对水库所具备的洪水调控以及供水的综合功能产生影响。随着库容逐渐变小,水库在出现洪峰时期的调蓄能力也会随之降低,超高水位事件的发生频次有所增加,与此在干旱季节,其供水保障能力同样会出现下降的状况。泥沙淤积呈现出的空间分布并不均匀,有一部分区域会快速地丧失储水能力,而另一些区域则依旧保持着较大的蓄水空间,这样一种不均衡的状态进一步加大了水库调度管理工作的复杂程度。相关研究显示,哪怕每年淤积量占库容的比例并不是很大,但是经过长期的累积之后,依旧会对水库的整体功能造成较为显著的影响,使得调水效率有所降低,并且还会增加水资源管理方面的风险。所以说,准确地去评估库容的变化情况以及淤积的速度,对于水库的运行管理而言是极为重要的。

2.2 水位调节与流量特征变化

泥沙淤积给水库水位调节以及下游流量特性带来了不容忽视的影响。随着库容慢慢变少,调蓄期间水位波动的程度变得更为显著,原先设计好的调水周期以及蓄排水规律都受到了干扰,其削减洪峰的能力有所降低,下泄流量的变化呈现出波动的态势,这使得水库运行的不确定性进一步增大。淤积致使水流断面缩小,水流流速降低,沉积物的堆积速度加快,进而形成了水位与流量之间的负反馈循环。在季节性较强降雨的时候,水库水位容易迅速上升,增加防洪方面的压力,还可能给下游堤防以及防洪设施带来额外的负担;而在枯水期,淤积会占用部分库容,使得出水量不足,对下游水资源供给以及生态调度产生直接影响,甚至有可能导致水质变差以及生态系统出现不稳定的情况。所以,泥沙淤积改变了水库的水位曲线以及流量特性,对流量调控模式以及水库运行管理提出了更高的要求,同时也对水资源的长期可持续利用产生了潜在的影响。

2.3 洪水调控与干旱期供水影响

泥沙沉积致使水库调蓄能力出现下滑情况,使得洪水调控以及干旱期供水都受到了限制。在洪水期间,因有效库容有所缩减,水库削峰填谷的能力也跟着变弱了,洪峰有可能没办法得到有效且充分的控制,进而增加了下游溢洪的风险。与之相反,在干旱时期,淤积占据了部分库容,导致蓄水量不足,水量分配方面的压力不断增大,农业灌溉以及工业用水都受到了影响,与此生态用水的保障能力也出现了下降的情况。泥沙淤积还会对水库调度策略的科学性造成影响,使得水文预测与调控之间存在偏差,最终

降低了水资源利用的效率以及可持续性。所以说,水库管理务必要综合考量泥沙淤积给水文调节功能带来的长期影响,以此来对蓄排水方案加以优化。

2.4 蒸发损失及其对水文调控的影响

平原水库由于其库面较为开阔,所以蒸发量相较于山区水库而言要明显更高一些,这一情况对水文调控产生的影响是颇为显著的。在出现高温或者干旱的时期,蒸发所造成的损失在可用库容当中所占的比例是比较大的,这无疑会使得可调水量有所减少,进而对枯水期时下游供水以及灌溉方面的保障能力产生一定程度的削弱作用。与此蒸发还会致使水质出现浓缩的情况,使得水盐类以及营养盐的含量有所增加,如此一来,管理的难度便随之增大了,而且对于水位调节以及流量控制也会形成一定的制约,从而增加了多目标调度的复杂程度。所以说,平原水库在运行的时候务必要充分考虑到蒸发这一因素,借助机械进行清库,以此来减缓水量的损失,进而保障水资源调控具备科学性并且能够实现可持续发展。

3 泥沙淤积对水资源利用的影响

3.1 农业灌溉水利用影响

泥沙淤积致使库容呈现出逐年递减的态势,这无疑直接对农业灌溉水的保障能力形成了削弱作用,而且给灌溉制度的稳定性带来了颇为深远的影响。库容变小之后,枯水期出水量常常出现不足的情况,下游灌区能够取到的水量也随之减少,如此一来,灌溉安排就很难依据实际需求来顺利实施,进而有可能对作物生长周期、产量的稳定性以及农业生产整体所取得的效益都产生影响。除此之外,泥沙沉积还会改变水流输送的效率以及渠道输水的能力,使得水资源调配出现了空间上存在不均衡以及时间上有延迟等诸多问题。长期淤积不但会增加灌溉系统在维护与管理方面的成本,而且还可能造成灌区土壤水分分布出现不均的情况,对土壤盐碱化的发展趋势以及土壤肥力的状况都会产生影响,最终进一步对作物生长环境以及农田生态系统的稳定性造成影响。所以,泥沙对于农业灌溉水利用所产生的影响,不仅仅体现在水量有所减少这还体现在灌溉效率有所下降、水质发生了变化以及生态环境所面临的压力有所增加等多个不同方面,必须要在水库运行调度以及水资源管理相关工作当中给予充分的考量,以此来保障农业能够实现可持续发展并且确保区域粮食安全得以维护。

3.2 工业及生活用水影响

泥沙淤积对于工业以及生活用水而言,存在着潜在且影响颇为深远的情况。随着库容呈现出逐年递减的态势,枯水期时可用水量往往难以满足需求,这使得工业生产遭遇了原料用水较为紧张的局面,而且生产的连续性也会受到限制,与此居民生活用水的保障能力有所下滑,尤其是在用水高峰期时,极有可能会发生供水不足的状况。与此沉积泥沙里面的颗粒物、有机物还有污染物进入到输

水系统当中,会使得水处理设施的负担加重,进而致使净水成本有所提高,设备磨损的程度加剧,水处理效率也因此而降低。泥沙淤积还很有可能引发水源水质出现波动,使得水体的化学以及物理性质发生改变,如此一来,供水的安全性以及水质的稳定性都会受到一定程度的制约,最终会对工业生产工艺以及居民生活用水带来直接的影响以及潜在的风险。所以说,在水库调度以及泥沙管理方面,仅仅保证水量能够满足需求是不够的,还必须要十分重视水质的调控以及稳定性的维护工作,借助科学的监测手段以及合理的管理举措,来确保工业与生活用水具备可靠性以及可持续性,以此保障区域社会经济以及居民生活的稳定有序运行。

3.3 生态环境用水影响

一方面,库区水位抬高不仅增大了水库淹没损失,还引起两岸地下水位升高,加重了土地沼泽化、盐碱化;另一方面,泥沙是有机物、铵离子、磷酸盐、重金属以及其他有毒有害物质的主要携带者,在一定外部条件下,泥沙释放污染物进入水体;同时,耗氧有机物的降解又造成了水底低氧环境,滋生了更多厌氧微生物及有害藻类,造成水生态环境的恶性循环。长久以来,这样的情况不但对水库库区的生物多样性产生了影响,而且还让水体的自净能力有所削弱,使得水质出现更加剧烈的波动情况。除此之外,水生态系统本身的稳定性出现了下滑,这给周边的灌溉用水以及生活取水都带来了潜在的风险隐患,同时也加大了水资源管理以及调控工作的相应难度。

4 泥沙淤积预测与调控方法

4.1 泥沙输移与淤积预测模型

泥沙输移与淤积预测模型在科学管理水库泥沙方面发挥着重要作用,它能够保障水库安全运行,同时促进水资源的合理利用。该模型借助综合分析多种参数的方式,比如流量、降雨量、地形坡度、土壤类型以及植被覆盖等,再结合数学模拟、数值计算以及物理过程模型,可较为精准地预测泥沙在库区的沉积速率、空间分布特点以及随时间推移的变化趋势^[1]。常用的模型有经验公式、统计回归模型以及基于物理过程的模拟模型,它们能够针对库容下降的速度、淤积厚度的变化以及沉积的位置展开定量预测,从而给水库调度以及洪水防控给予科学方面的依据。除此之外,这些模型还能结合遥感影像、实地监测的数据以及水位水质的观测情况,达成对长期泥沙淤积过程的动态模拟效果,这既有利于优化水库的运营策略,也为制定泥沙治理方案、排沙调度方案以及生态保护方案提供了科学支撑,使得水库管理的精细化程度得以提高,同时也增强了水资源可持续利用的能力。

4.2 水库调度与泥沙管理措施

就泥沙淤积这一问题而言,水库所采取的调度策略务必要全面考量库容方面的变化情况以及水文方面的相关特征,借助对蓄排水方案予以优化的方式来达成对泥沙的有效排控^[2]。具体来讲,其包含在出现洪峰的时候增加排

沙的流量,在处于枯水期时实施分层放水操作,还有开展周期性的冲刷工作以处理沉积物等一系列的措施。与此还需要强化对上游径流的管理举措以及水土保持方面的工作,通过从源头上减少泥沙进入水库的数量,以此来减缓淤积的速率。除此之外,把库区实时监测所获取的数据综合起来加以运用,便能够实现动态化的调度操作,进而提升水库调节工作的效率,从而缓解泥沙给水文情势以及水资源利用所带来的影响。

4.3 河道生态调控及排沙技术

河道生态调控以及排沙技术属于缓解水库泥沙淤积的关键举措。借助人工疏浚这一方式,还有底流排沙以及实施生态护岸的相关措施,能够对沉积给水库功能所带来的影响起到一定程度的减缓作用。与此生态调控涵盖了要维持河道生态廊道处于良好状态,也要保护好生物栖息环境,促使水体污染物浓度的波动得以减少,进而维持水生态系统的健康状况^[3]。将排沙技术同生态保护相互结合起来,在确保水库调度功能可以正常发挥作用之际,还能够达成水生态环境的可持续发展目的,从而为水资源的综合利用给予相应的支撑。

5 结语

本文从泥沙所具备的特性方面、水文情势所产生的影响层面以及水资源的具体利用情况等不同角度出发,对平原水库出现的泥沙淤积这一问题展开了较为系统的分析工作。经过相关研究可以发现,泥沙淤积的情况在很大程度上会使得库容有所降低,进而对水位的调节以及洪水控制的能力都造成了一定的影响,并且对于农业领域、工业领域、日常生活以及生态环境等方面所涉及的用水情况而言,也都产生了或多或少的直接或者潜在的影响。面对这样的问题,就需要采取像泥沙输移预测模型这类手段、对水库调度予以优化的相关举措以及河道生态调控等方面的一系列综合性的措施,从而达成泥沙治理和水资源可持续利用能够协调发展的目的。在未来的研究过程当中,应当进一步把长期监测所获取的数据充分结合起来,对预测模型以及管理策略加以完善,以此来有效应对泥沙淤积给水文调控以及水资源利用所带来的那种持续不断的挑战。

[参考文献]

- [1]余欣,王仲梅,来志强,等.水库淤积风险与治理研究[J].水利发展研究,2025(1):1-9.
- [2]陆杨,许慧,李国斌,等.泥沙淤积对不同类型水库功能影响评价[J].人民长江,2021,52(2):237-241.
- [3]裴锋.山区水库泥沙淤积机理及其对水资源可持续利用的影响分析[J].农业灾害研究,2025,15(5):248-250.

作者简介:王宏东(1990.5—),毕业院校:塔里木大学,所学专业:土木工程,就职单位职务:自治区塔里木河流域和田水利管理中心,喀拉喀什河下游管理站副站长,职称级别:工程师。

柔性压电型声学超材料研究

李铁莲

山西工程职业学院, 山西 太原 030001

[摘要]声学超材料因其在我国降噪技术领域具有显著的研究意义和应用价值,已引起广泛关注。本研究运用柔性材料技术,设计并实现了一种带有弹性薄膜顶部的柔性亥姆霍兹共振腔,进一步将其与压电材料结合,构建了一种具有双局域共振效应的柔性压电型声学超材料。通过 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立声学模型,并在不同驱动电压条件下开展有限元分析。仿真结果表明,在平面波照射下,该声学超材料表现出明显的双局域共振特性,其传递函数曲线呈现为两个显著的共振峰。在电压由 0V 变化至 200V 的过程中,共振峰频率由 734Hz 跃迁至 838Hz,频率偏移量达到 104Hz,实现了对中低频噪声的有效控制。此外,搭建了压电型声学超材料的声学性能实验平台,以验证仿真结果的准确性和可靠性。实验结果验证了所设计的压电型声学超材料确实具有双局域共振效应,其传递函数曲线与仿真预测高度一致。

[关键词]柔性声学超材料;双局域共振;低频噪声;消声性能

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17720

中图分类号: TB556

文献标识码: A

Research on Flexible Piezoelectric Acoustic Metamaterials

LI Tielian

Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan, Shanxi, 030001, China

Abstract: Acoustic metamaterials have attracted widespread attention due to their significant research significance and application value in the field of noise reduction technology in China. This study utilized flexible material technology to design and implement a flexible Helmholtz resonant cavity with an elastic thin film top, and further combined it with piezoelectric materials to construct a flexible piezoelectric acoustic metamaterial with dual local resonance effects. Establish an acoustic model using COMSOL Multiphysics simulation software and conduct finite element analysis under different driving voltage conditions. The simulation results show that under plane wave irradiation, the acoustic metamaterial exhibits significant dual local resonance characteristics, and its transfer function curve presents two significant resonance peaks. During the process of voltage changing from 0V to 200V, the frequency of the resonance peak transitions from 734Hz to 838Hz, with a frequency offset of 104Hz, achieving effective control of mid to low frequency noise. In addition, an acoustic performance experimental platform for piezoelectric acoustic metamaterials was established to verify the accuracy and reliability of simulation results. The experimental results confirmed that the designed piezoelectric acoustic metamaterial indeed exhibits dual local resonance effect, and its transfer function curve is highly consistent with the simulation prediction.

Keywords: flexible acoustic metamaterials; dual local resonance; low frequency noise; noise reduction performance

引言

近代以来,随着工业革命和科学技术的发展,各类噪声问题日益严重。在声学超材料快速发展的今天,刚性材料一直作为声学超材料的首要选择,而刚性材料一旦定型,物理性能和结构参数也随之固定,其较差的抗变形能力使其不能适用一些复杂场合,具有一定的局限性^[1]。而柔性超材料可以弯曲,折叠,拉伸,压缩,变形且仍能保持高效声学性能^[2]。柔性技术利用在可调式声学超材料中,使其在节约成本、容易加工成型的同时,可以贴合异形曲面,拓宽其实际运用场合^[3]。

Ding 等^[4]研究了不同尺寸的开口空心球组成亥姆霍兹共振式声学超材料,研究表明,该声学超材料具有多禁带负体积模量。YTang 等^[5]设计了多个亥姆霍兹共振器串联或并联起来构成一种多腔式声学超材料,该超材料同时

具有低频吸声以及高承载能力两种超材料特性。Y.Li 等^[6]设计了一种空间折叠型亥姆霍兹共振腔,该结构通过折叠腔体空间缩小了厚度波长比,在有限的结构尺寸内实现了低频降噪,给超材料的微型化应用带来一些参考。洪志恒等^[7]设计了一种螺旋型亥姆霍兹共振式声学超材料。研究表明,该声学超材料在 240Hz~330Hz 频带内均能有效吸声,平均吸声效果可达 54%,可广泛应用于管道的低频噪声控制。

本文设计了一种基于柔性技术,将亥姆霍兹共振效应和弹性薄膜共振效应及压电片共同作用的声学超材料,其具备双局域共振效应,通过改变驱动电压,压电陶瓷片产生形变,进而引起弹性薄膜刚度发生变化,系统固有频率改变,导致消声共振峰发生偏移,拓宽声学超材料的噪声控制频带实现噪声的自适应控制。

1 理论介绍

1.1 亥姆霍兹共振理论研究

亥姆霍兹共振器是噪声控制领域最常使用的一种消声设备，常用于汽车和飞机等交通工具排气管降噪、建筑声学、医院的隔声墙等应用场合，它的结构主要由颈部和腔体组成^[8]，其数学模型如图1所示，图中 l_e 为颈部高度， h 为腔体高度， R 为腔体半径， r 为颈部半径。本文设计的颈部高度 l_e 为5mm，腔体高度 h 为50mm，腔体边长 D 为60mm，颈部半径 r 为2mm。

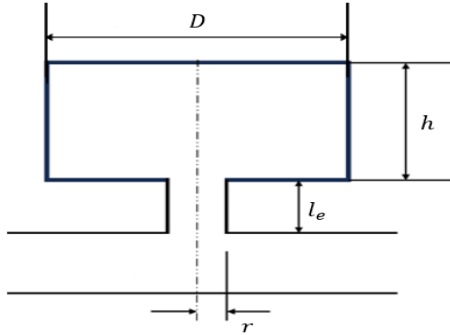


图1 亥姆霍兹共振器数学模型

对于亥姆霍兹共振腔，传递矩阵能够简化为：

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos(kl) & j(c/S)\sin(kl) \\ j(S/c)\sin(kl) & \cos(kl) \end{bmatrix} \quad (1)$$

亥姆霍兹共振器等效为一维振动系统，只有空气对其有阻尼作用，可以忽略不计，当平面声波入射时，在分界面处声压和速度满足以下条件^[9]：

$$P_1 = P_2 = P_3 \quad (2)$$

$$\rho S_1 u_1 = \rho S_1 u_2 + \rho S_1 u_3 \quad (3)$$

如图1所示，共振腔颈部与外部结构的阻抗为：

$$Z_3 = P_3 / (\rho c u_3) \quad (4)$$

结合上式可以得到：

$$\begin{cases} p_3 \\ \rho S_{HR} u_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos(kl_e) & j(c/S_{HR})\sin(kl_e) \\ j(S_{HR}/c)\sin(kl_e) & \cos(kl_e) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(kh) & j(c/S')\sin(kh) \\ j(S'/c)\sin(kh) & \cos(kh) \end{bmatrix} \begin{cases} p_5 \\ \rho S' u_5 \end{cases} \quad (5)$$

式中， ρ 表示气体密度， c 为介质（空气）中的声速， k 为波数，这是研究声学性能常用的一种参数， $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ； S_{HR} 为亥姆霍兹共振器颈部截面积， S' 为共振腔横截面积， l_e 表示共振器颈部有效长度， h 表示共振腔高度， u 表示质点振动速度。

如果入射声波的波长远大于共振器管径，颈部所受辐射对于颈部的声阻抗影响等效为在颈部延长了一部分长度，被称为端部修正，从物理层面理解端部修正，处于颈部附近的空气与颈部内的空气一起振动，相当于弹簧振子系统的质量块增大，也就是说变相的增大了颈部长度。经

过端部修正后，颈部的长度等效为颈部的有效长度 l_e ， l_e 的表达式为 $l_e = l_{HR} + \delta_1 + \delta_2$ ， l_{HR} 为所设计亥姆霍兹共振器颈部的实际长度， δ_1 和 δ_2 分别表示共振腔颈部与外部结构和亥姆霍兹共振腔的修正系数。

端部的修正系数近似等于：

$$\delta = \frac{8}{3\pi} r_{HR} (1 - 1.25\sqrt{\phi}) \approx 0.85 r_{HR} (1 - 1.25\sqrt{\phi}) \quad (6)$$

式中， ϕ 表示颈部截面积和共振腔截面积之比； r_{HR} 表示颈部半径，该表达式为 $\phi < 0.2$ 时有效。结合公式(1-3)可以得到：

$$\frac{1}{Z_3} = j \frac{\tan(kl_e) + (S'/S_{HR})\tan(kh)}{1 - (S'/S_{HR})\tan(kl_e)\tan(kh)} \quad (7)$$

将上式代入(1-5)，可以得到：

$$\begin{cases} p_1 \\ \rho S_1 u_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ j \frac{S_{HR}}{c} j \frac{\tan(kl_e) + (S'/S_{HR})\tan(kh)}{1 - (S'/S_{HR})\tan(kl_e)\tan(kh)} & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} p_2 \\ \rho S_1 u_2 \end{cases} \quad (8)$$

进一步简化得到亥姆霍兹共振器的传递损失：

$$TL = 10 \lg \left\{ 1 + \left[\frac{S_{HR}}{2S_1} j \frac{\tan(kl_e) + (S'/S_{HR})\tan(kh)}{1 - (S'/S_{HR})\tan(kl_e)\tan(kh)} \right]^2 \right\} \quad (9)$$

当传递损失接近无穷大时，亥姆霍兹共振器产生共振效应，由上可以得出，共振器产生共振的条件为：

$$1 - (S'/S_{HR})\tan(kl_e)\tan(kh) = 0 \quad (10)$$

当输入频率很小时，会出现 $kl_e \ll 0$ ， $kh \ll 0$ ，上式可以等效为：

$$kl_e kh = S_{HR} / S' \quad (11)$$

综合上式，可以得到亥姆霍兹共振器的共振频率为：

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{HR}}{V l_e}} \quad (12)$$

表达式中 c 为媒介（空气） l_e 中的声速， S_{HR} 为颈部截面积， V 为共振腔的体积，表示颈部有效长度。

1.2 薄膜共振理论研究

薄膜在受到外力的影响下，会产生一种内在拉力使薄膜恢复到初始状态，这种拉力主要产生在薄膜相邻质点间，被称为薄膜的张力^[10]。薄膜的振动主要与其张力相关，其自身的韧性强度可以忽略。

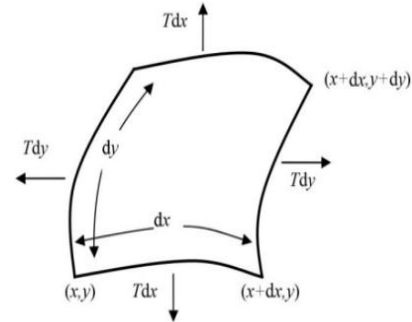


图2 薄膜面单元受力示意图

如图2所示,假设薄膜做小幅度的横向振动,其振动平面为 xy 平面,若薄膜平面所受各方向的力相同,其单位长度所承受的拉力成为薄膜张力,用符号 T 表示,单位为 N/m ,在薄膜受到振动变形时,微面元 $dxdy$ 的四周与相邻面微元存在张力作用,单位设为 kg/m 。若薄膜张力与 x 方向的夹角为 a ,则张力 T 在该面单元 x 轴方向的分量为 $T\sin a$,在小振幅作用下,由于夹角 a 较小,由此可得出 $\sin a \approx \tan a$ 。

在笛卡尔坐标系下,在某时刻 t 上某一位置 (x,y) 的位移可以用 $w(x,y,t)$ 表示:

$$\tan a = \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_x \quad (13)$$

面单元 x 和 $x+dx$ 在边缘上所受垂直方向的合力如公式(14)所示,其 y 和 $y+dy$ 在边缘上所受垂直方向的合力如公式(15)所示。

$$T \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{x+dx} dy - T \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_x dy = T \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) dxdy \quad (14)$$

$$T \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_{y+dy} dx - T \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_y dx = T \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dxdy \quad (15)$$

由牛顿第二定理可得,薄膜的运动方程为:

$$T \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) dxdy = \rho_s dxdy \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad (16)$$

由此推导出薄膜的振动方程为:

$$T \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \rho_s \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad (17)$$

通过极坐标对薄膜振动方程进行分析。在极坐标中 r 一般表示极径,即坐标原点到某一位置的距离,用 θ 表示极角,即极径 r 与 x 轴的正向夹角,极坐标与直角坐标换算关系为: $x=r \cos \theta, y=r \sin \theta$,将公式(17)进行极坐标变换可得公式:

$$T \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial}{r \partial r} + \frac{\partial^2}{r^2 \partial \theta^2} \right) = \rho_s \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \quad (18)$$

由此可得出薄膜的自由振动方程:

$$\rho_s \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) = T \nabla^2 w \quad (19)$$

在上式中 ∇^2 表示二维坐标下的拉普拉斯算子。经过上式推导可得:

$$\eta(t, r) = \eta_a e^{j\omega t} \quad (20)$$

式中 η_a 表示薄膜振动时某一位置振幅的大小,而薄膜在平均位置上为:

$$\bar{\eta}_a = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a 2\pi \eta_a r dr = \frac{p_a J_2(ka)}{k^2 T J_0(ka)} \quad (21)$$

式中: $J_2(ka)$ 为二阶贝塞尔函数,由此得出薄膜共振频率为:

$$f_{mn} = \frac{\mu_{mn}}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (22)$$

其中: T 表示薄膜张力, σ 表示面密度。

2 压电型声学超材料结构设计与性能仿真

2.1 压电型声学超材料模型建立

图3为弹性薄膜在驱动电压下的形变简易图,壳体采用了硅胶材料制作,亥姆霍兹空气腔由模具浇注脱模而成,弹性薄膜由硅胶和硅胶固化剂按比例 100:2.5 充分搅拌均匀固化制作。所设计的压电声学超材料可等效为两个“弹簧-质量块”系统的耦合作用。当输入驱动电压时,一方面亥姆霍兹共振腔腔体体积会发生改变,导致系统的固有频率发生变化;另一方面由于压电效应压电片发生形变,改变了弹性薄膜的刚度,进而改变系统的共振消声频率。通过分析可得出该系统具有明显的双局域共振效应,可通过改变驱动电压达到主动调频效果。

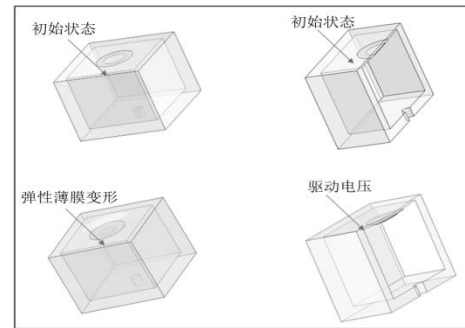


图3 弹性薄膜在驱动电压下的变形图

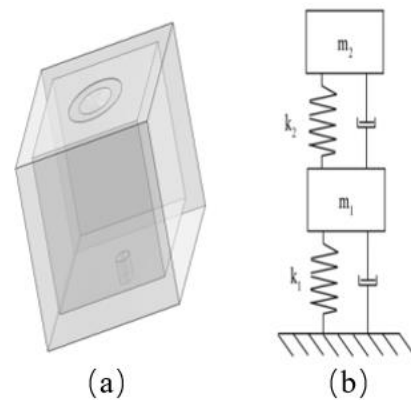


图4 超材料单元模型与理论模型

上图4(a)为声学超材料结构单元与理论模型示意图,其中亥姆霍兹共振腔等效为一个单自由度“弹簧-质量块”系统,共振腔基底由弹性薄膜取代,等效为另一个单自由度“弹簧-质量块”系统;本文所设计的超材料相当于亥姆霍兹共振腔与薄膜系统等效叠加的双局域共振系统,图

4(b)为双自由度弹簧振动系统的等效类比示意图。

2.2 压电型声学超材料仿真分析

本文采用了有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.5 对所设计声学超材料进行声学性能仿真模拟分析,验证超材料低频消声性能。为测试本文所设计压电声学超材料的声学性能,建立了如图 5 所示声学超材料仿真模型。其中亥姆霍兹共振腔颈部半径 $r=2\text{mm}$, 颈部高度 $l_c=5\text{mm}$, 空气腔截面积是边长 $D=60\text{mm}$, 空气腔高度 $h=50\text{mm}$, 薄膜厚度设为 $b=1\text{mm}$, 空气柱截面积设为 $80\text{mm}\times 80\text{mm}$, 长度设为 300mm 。

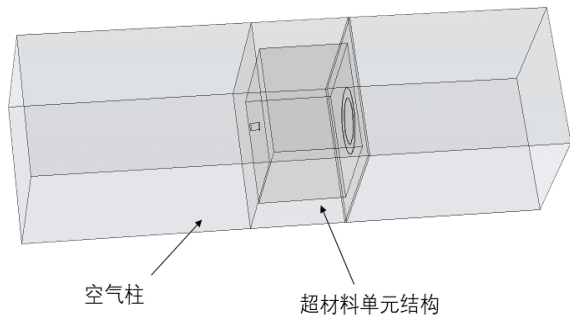


图 5 压电型声学超材料的仿真模型

2.3 声学超材料仿真结果分析

图 6 为不同驱动电压下声学超材料传递损失曲线图,从曲线可以看出所设计的声学超材料具有明显的双局域共振效应,首先在噪声频率达到 120Hz 时,亥姆霍兹共振腔与柔性壳体产生声固耦合效应,声学超材料达到共振峰值,在此处有明显亥姆霍兹共振效应,传递损失峰值可达到 72dB ,在噪声频率达到 200Hz 左右时,声学超材料处于传递损失的反共振峰,此时系统消声效果减弱,随着噪声频率的不断增加,声学超材料发生了薄膜共振效应,消声效果有了显著提升。从传递损失曲线图可以看出,在对声学超材料施加的驱动电压,会导致传递损失共振峰值向左侧偏移,在施加 0V 到 200V 电压时,共振峰值所对应频率由 734Hz 偏移到 838Hz ,偏移量达到 104Hz 。上述结果证明声学超材料实现了低频、宽频带消声的可能性。

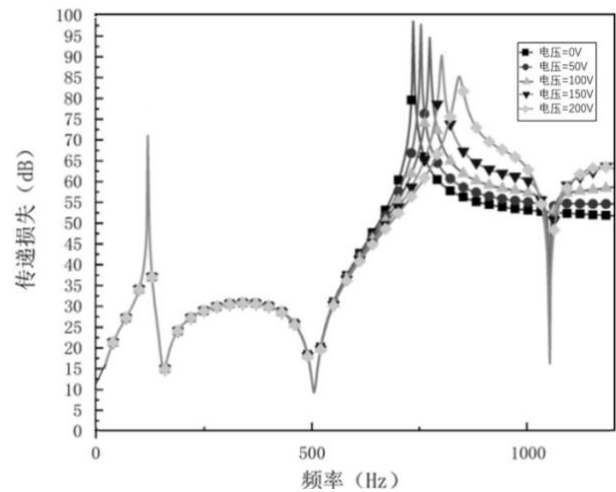


图 6 不同驱动电压下声学超材料传递损失曲线图

3 压电型声学测试系统的构建

本文采用双负载法测量阻抗管中柔性声学超材料的声学性能。搭建的声学测试平台由计算机 PC 端、功率放大器、扬声器、数据采集卡、声阻抗管、四个声学传感器以及声学末端组成,其中计算机 PC 端采用了 Labview 软件作为实验信号的发射端。使用了 YE5871A 型功率放大器,选用 DQ30TZF-05 型扬声器,功率范围在 $8\sim 16\text{W}$,频率响应范围在 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 。选用了 NI-DAQ9234 型数据采集卡,其具有 4 个信号传输通道,符合双负载法实验需要。采用了 AIWA14425 型声学传感器,其采集信号不受自由场、扩散场、温度场以及压力场等声场影响,如图 7 所示。

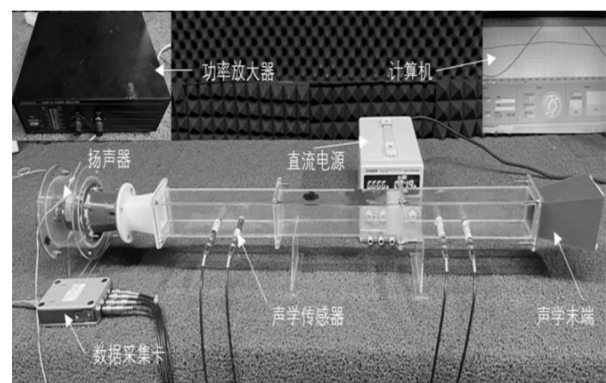


图 7 压电型声学超材料声学测试平台

3.1 压电型声学超材料声学性能验证

为了能够更加准确地测量压电型声学超材料的声学性能,本实验特地选择在密闭消声工作室中进行,这样做的目的是为了最大程度地排除环境噪音等各种因素的影响,从而确保实验结果的准确性和可靠性。在本次实验中,我们采用了双负载法进行实验研究。为了进一步确保实验数据的精确性,我们首先需要测量阻抗管空管(即无声学超材料)情况下的传递损失,然后再对比测量放置柔性声

学超材料时的声学性能。我们按照上图7所示的方式搭建了声学性能测试平台,在这个平台上,我们使用了四个传声器来记录四个不同位置的声压幅值,并根据这些数据绘制出了如下图所示的传递损失曲线。

如图8所示,在空阻抗管的条件下,系统的传递损失大约为2dB到3dB,这个测量结果是由于测试系统受到环境因素的影响而产生的。为了得到声学超材料的实际传递损失曲线,我们需要用压电型声学超材料的测量结果减去空阻抗管的测量结果。从上图中可以清晰地看出,柔性声学超材料具有非常明显的双局域共振效应。在低频噪声处,会出现亥姆霍兹共振消声峰,其消声峰值可以达到50dB。在中低噪声频段,与空阻抗管的传递损失相比,由于受到声学超材料外壳的影响,系统的传递损失处于较高的水平,能够维持在30dB左右。而在中高噪声频段,则会出现薄膜共振消声峰,此时的消声峰值可以达到74dB。

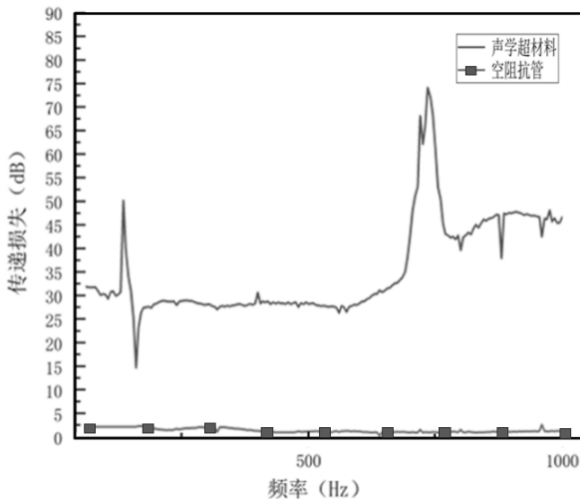


图8 压电型声学超材料与空阻抗管传递损失对比图

3.2 压电型声学超材料的调频特性验证

为验证压电型声学超材料的调频特性,本文进行了通过驱动电压改变薄膜张力实现不同频段消声的实验,实验结果如图9所示。

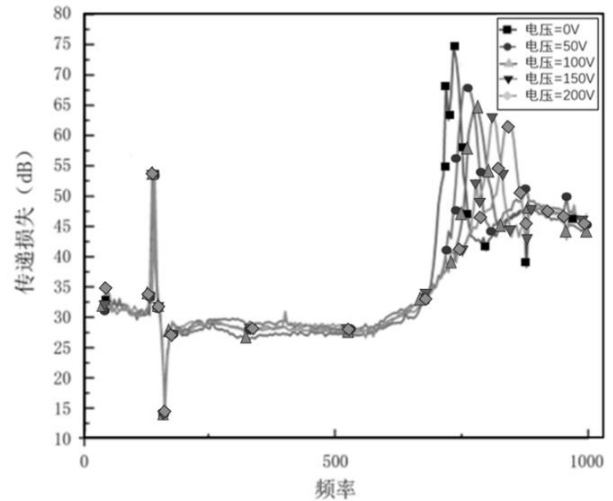


图9 压电型声学超材料传递损失曲线图

通过分析实验结果可以看出,压电型声学超材料传递损失曲线与仿真结果基本吻合,在驱动电压为0V时,系统会在130Hz和735Hz产生两个消声共振峰值,可以明显看出该声学超材料受到亥姆霍兹共振效应和薄膜共振效应共同作用影响,出现了两个消声共振峰,当驱动电压由0V逐步增大到200V时,由薄膜共振效应引起的消声共振峰由735Hz偏移到了840Hz,偏移量达到了105dB,这是由于在驱动电压的情况下,压电陶瓷片产生形变,进而引起弹性薄膜刚度发生变化,系统固有频率改变,导致消声共振峰发生偏移,驱动电压越大,压电陶瓷片形变越明显,消声共振峰偏移量越大,验证了压电型声学超材料的主动调频特性,由于压电片形变对亥姆霍兹共振腔体体积影响较小,亥姆霍兹共振消声峰几乎没有偏移。

4 结论

本文首先从理论分析了柔性压电型声学超材料的振动特性,接着通过仿真和实验研究了柔性压电型声学超材料的声学性能,得出结论如下:

(1) 柔性压电型声学超材料在低频处消声取决于亥姆霍兹共振效应,在中高频段消声效果取决于薄膜共振效应,在不同驱动电压下薄膜共振峰值受影响较大,施加电压越大,弹性薄膜所受张力越大,共振峰值向右偏移越明显,这个结果与理论研究相一致,验证了驱动电压实现对声学超材料调频方案是可行的。

(2) 通过对压电型声学超材料仿真分析表明在施加0V到200V电压时,共振峰值所对应频率由734Hz偏移到838Hz,偏移量达到104Hz。

(3) 通过对压电型声学超材料实验分析表明当驱动电压由0V逐步增大到200V时,由薄膜共振效应引起的消声共振峰由735Hz偏移到840Hz,偏移量达到了105dB,与仿真结果基本吻合,上述结果证明了压电型声学超材料实现噪声控制的可能性。

本文的研究为主动声学超材料以及中低频降噪领域的发展开辟了新道路。

基金项目：“山西工程职业学院 2023 年度教学改革与实践研究课题‘双高背景下基于“产教协同育人”的高职机电类专业人才培养模式的创新和实践探究’（JG 2023-06）”。

[参考文献]

[1]Qiangbing L ,Xin L ,Xiujuan Z, et al.Perspective: Acoustic Metamaterials in Future Engineering[J].Engineering,2022(17):22-30.
 [2]马智宇.柔性声学超材料低频消声技术研究[D].太原:中北大学,2023.
 [3]唐瀚川.柔性声学超构材料的功能基元与序构设计研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
 [4]Ding,C.-L., Zhao ,X.-P.. Multi-band and broadband acoustic metamaterial with resonant structures[J]. Journal of Physics, D. Applied Physics: A Europhysics Journal,2011,44(21):1-8.

[5]Tang Yufan ,Ren Shuwei ,Meng Han ,et al. Hybrid acoustic metamaterial as super absorber for broadband low-frequency sound[J]. Scientific reports,2017(7):1-4.

[6]Li, Yong ,Assouar ,Badreddine M. Acoustic metasurface-based perfect absorber with deep subwavelength thickness[J]. Applied physics letters,2016,108(6):1-4.

[7]洪志恒.螺旋型亥姆霍兹共振消声器及吸收体设计与声学特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.

[8]陈文渊.基于声学超材料的低频吸声结构与自适应吸声系统设计研究[D].重庆:西南大学,2021.

[9]林远鹏.基于声学超材料的声吸收和声隔离的研究[D].南京:南京大学,2019.

[10]陈琳.基于局域共振原理的瓣型宽带隙声学超材料研究[D].镇江:江苏大学,2016.

作者简介：李铁莲（1974.4—），毕业院校：太原理工大学，所学专业：机械，当前就职单位：山西工程职业学院，职务：教师，职称级别：副教授。

激光电弧复合增材制造 TC4 组织与力学性能研究

钱梓尧¹ 徐萌翀¹ 李文龙² 翟文正¹

1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

2. 武汉科技大学机械工程学院, 湖北 武汉 430081

[摘要]随着航空航天等高端制造领域对高性能、轻量化材料的需求增加, 钛合金(如 TC4) 因其优异的性能成为应用热门。传统制造工艺在复杂结构件制造中存在局限性, 而增材制造技术通过逐层堆积材料的方式提供了新的解决方案。激光电弧复合增材制造技术通过激光辅助电弧增材制造, 并引入同步轧制工艺进一步改善材料的微观组织和力学性能, 从而制造出综合性能优秀的 TC4 合金。然而, 关于激光电弧复合增材制造技术在 TC4 合金中的应用及其对组织与力学性能的影响研究尚不充分, 尤其是在不同工艺参数和退火处理条件下的研究更为有限。本研究旨在探讨激光电弧复合增材制造技术在 TC4 合金中的应用, 分析退火前后激光模式(振荡/脉冲)、轧制工艺及送丝速度对材料组织与性能的影响, 并研究退火处理对材料性能的改善机制, 为高性能钛合金零件的制造提供理论依据和技术支持。

[关键词]TC4 合金; 复合增材制造; 微观组织; 相变机制; 力学性能

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17713

中图分类号: TG444

文献标识码: A

Research on the Microstructure and Mechanical Properties of TC4 Produced by Laser Arc Composite Additive Manufacturing

QIAN Ziyao¹, XU Mengchong¹, LI Wenlong², ZHAI Wenzheng¹

1. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

2. School of Mechanical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430081, China

Abstract: With the increasing demand for high-performance and lightweight materials in high-end manufacturing fields such as aerospace, titanium alloys (such as TC4) have become popular due to their excellent performance. Traditional manufacturing processes have limitations in the manufacturing of complex structural components, while additive manufacturing technology provides a new solution by stacking materials layer by layer. The laser arc composite additive manufacturing technology uses laser assisted arc additive manufacturing and introduces synchronous rolling technology to further improve the microstructure and mechanical properties of the material, thereby producing TC4 alloy with excellent comprehensive performance. However, there is still insufficient research on the application of laser arc composite additive manufacturing technology in TC4 alloy and its impact on the microstructure and mechanical properties, especially under different process parameters and annealing conditions. The purpose of this study is to explore the application of laser arc composite additive manufacturing technology in TC4 alloy, analyze the effects of laser mode (oscillation/pulse), rolling process, and wire feeding speed on material structure and properties before and after annealing, and investigate the improvement mechanism of annealing treatment on material properties, providing theoretical basis and technical support for the manufacturing of high-performance titanium alloy parts.

Keywords: TC4 alloy; composite additive manufacturing; microstructure; phase transition mechanism; mechanical properties

1 研究背景

钛合金因具有优异的比强度、耐蚀性及高温性能, 自 20 世纪 50 年代问世以来, 已被广泛应用于航空航天、兵器舰船、化工、汽车、医疗及建筑等领域^[1,2]。其对酸碱溶液、海水及海洋环境具有出色的抗侵蚀能力, 因此被誉为“海洋金属”^[3,4]。

在众多钛合金中, TC4(Ti-6Al-4V)是典型的 $\alpha + \beta$ 型双相合金, 兼具较高的强度、塑性和可焊性。其中, 铝为 α 稳定元素, 稳定密排六方结构的 α 相; 钒为 β 稳定元素, 稳定体心立方结构的 β 相。两者共同决定了合金的相组成与相变特性^[5]。TC4 的 β 转变温度约为 882.5°C, 高

于此温度以 β 相为主, 低于时 β 相逐渐转变为 α 相。在冷却过程中, β 相可通过扩散型转变或无扩散型马氏体相变形成亚稳的 α 相。在快速冷却时, β 相还可能转变为马氏体 α' 相, 这是一种亚稳的体心立方结构, 进一步增强了合金的强度。

为克服传统钛合金加工工艺在复杂构件制造中的局限, 近年来增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术的发展为钛合金高性能制造提供了新思路。该技术通过逐层堆积材料实现复杂构件的近净成形, 具有材料利用率高、周期短及设计灵活等优势^[6,7]。目前, 应用于 TC4 合金的增材制造技术主要包括激光粉末床熔融(Laser Powder

Bed Fusion, LPBF)、激光定向能量沉积 (Laser Directed Energy Deposition, LDED) 以及电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)。其中, LPBF 技术因凝固冷却速率和温度梯度极高, 可获得细小晶粒和精细组织, 从而赋予零件较高强度^[8]。但其残余应力较大, 需经热处理等手段调控^[9]。相比之下, WAAM 技术冷却速率较低, 残余应力小, 但晶粒生长充分, 组织较粗。两种工艺各具优劣, 需依据应用需求选择与优化^[10]。

针对传统增材制造技术的局限, 通过引入机械场、磁场、声场或多热源等辅助能量, 显著优化了 TC4 钛合金的成形过程^[11]。其中, 激光电弧复合增材制造融合激光与电弧熔化沉积优势^[12], 并在沉积过程中施加同步轧制作用, 可显著改善组织与力学性能^[13]。该技术不仅提升了沉积效率和成形精度, 还降低了气孔、裂纹等缺陷, 使部件具备更高致密度与力学性能, 适用于高性能金属构件制造。然而, 复合能场引入的复杂热力耦合效应使组织演变与性能调控机理仍不清晰。系统研究不同工艺参数对成形质量、组织和性能的影响规律, 是推动该技术应用与性能优化的关键。

本文主要研究了新型增材制造工艺参数及退火处理对双相 TC4 合金显微组织与力学性能的影响。通过微观组织表征、室温拉伸实验及硬度测试, 系统分析了不同工艺条件及退火处理下 TC4 合金的组织演变与力学性能变化规律, 并探索了优化增材制造工艺参数的途径。

2 实验材料样品制备与实验方法

本文所使用的 TC4 合金是通过激光电弧复合增材制造在保护气氛环境中打印而成。随后, 对试样进行了热处理, 探究热处理对其性能和组织结构的改善效果。试验所用原材料为 TC4 丝材, 焊丝直径 1.2mm, 该丝材的主要化学成分如表 1 所示, 各元素含量符合国标 GB/T 3623—2007 的要求。实验所用基板材料为两相区锻造退火态的 TC4 钛合金。通过金相法对钛合金成形试块的相变点进行实测, 结果为 985±5°C。

表 1 实验用基板与焊丝化学成分 (wt%)

元素	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
TC4 基板	Bal.	6.10~6.13	4.10~4.12	0.10	0.01	0.01	0.001	0.10
TC4-D 焊丝	Bal.	5.92~5.93	3.95~4.0	<0.05	0.012~0.015	0.0093	0.004	0.097

激光电弧成形实验采用了实验室自主研发的复合增材制造设备和系统。该系统由激光器、电弧焊机、送丝机构和同步轧制装置组成, 具备激光与电弧双热源耦合以及实时机械加载功能。实验过程中保护气体为 99.999% 的高纯氩, 气流量设定为 17L/min, 搭配伊特克斯净化系统进行整体气氛保护, 氧含量控制在低于 100ppm, 水含量控制在低于 20ppm。系统同时配备水冷循环装置以控制基板

升温, 防止热积累造成晶粒粗化。

本研究中的 TC4 合金是基于激光电弧复合增材制造实验系统加工的。激光器和送丝机与基板角度为 60°, 轧辊位于焊枪滚动方向后 35mm, 轧辊轧制力固定为 15kN, 轧辊行走速度为 500mm/min, 电弧电流为 220A, TC4 试样详细沉积参数见表 2。

表 2 激光电弧复合增材制造 TC4 试样工艺参数

序号	固定参数	工艺参数变化量	
LAM-1	500 mm/min 行走速度, 220A 电流, 4m/min 送丝速度	连续激光 (1600W)	
LAM-2		激光 (1600W) + 轧制 (15 kN)	
LAM-3		脉冲激光 (50 占空比、100Hz)	
LAM-4		脉冲激光 (50 占空比、100 Hz) + 轧制 (15kN)	
LAM-5		振荡激光 (5mm 振幅、100 Hz)	
LAM-6		振荡激光 (5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)	
LAM-7		脉冲振荡激光 (50 占空比、5mm 振幅、100Hz)	
LAM-8		脉冲振荡激光 (50 占空比、5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)	
LAM-9		500mm/min 行走速度, 220A 电流、4m/min 送丝速度	振荡激光 (5mm 振幅、100 Hz) + 轧制 (15kN)
LAM-10		500mm/min 行走速度, 220A 电流、4m/min 送丝速度	振荡激光 (5mm 振幅、100Hz) + 轧制 (15kN)

成形完成后, 样品采用线切割机沿沉积方向 (Z 向) 和行进方向 (X 向) 取样, 以便后续组织与性能测试。金相样品经镶嵌、磨抛与腐蚀制备, 腐蚀剂为 Kroll 试剂, 其成分为 HF+HNO₃+H₂O (1:2:17), 腐蚀时间控制在 15~18s 之间, 以显露 α 相与 β 相边界。用于 EBSD 分析的样品在抛光后进行多次轻腐蚀, 以去除表面应变层并获得高质量衍射图像。

显微组织采用光学显微镜和扫描电子显微镜观察, 以检测磨屑形貌以及磨损体积与微观形貌分析。扫描电子显微镜配备能谱分析仪 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS), 可以利用表面电子进行能谱分析测试。电子背散射衍射 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 用于低倍宏观晶粒的观测。X 射线衍射仪 (X-ray Diffraction, XRD) 用于对试样的成分和退火加工后试样表面成分进行检测。

3 力学性能测试条件

根据不同试件取样条件, 室温拉伸性能测试采用片状 (图 1) 试样, 测试过程按 GB/T 228.1 标准执行。除特殊描述外, 在试验过程中, 从开始试验至达到屈服强度期间, 采用应变速率控制, 应变速率为 0.005mm/min, 发生屈服之后, 切换横梁位移速率为 5mm/min。

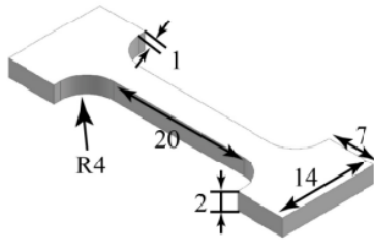


图1 拉伸片状试样

将上文中测试的 EBSD 的样品进行表面打磨抛光至光滑后, 每个样品测试五个点, 参数使用默认设置 Test force=100mN, Min force=0.2mN, Speed=1.025mN/sec, Hold time=0 sec, 得到维氏硬度数据和图表。

4 结果与分析

4.1 增材制造 TC4 合金相组织分析

不同工艺下单道直壁宏观组织差异明显。低倍组织以等轴晶组织为主, 高倍组织为片层状组织。未轧制试样 (LAM-1、3、5、7) 晶粒为粗大的柱状晶, 最大晶粒尺寸超过 7 mm。施加 15KN 轧制后, 焊道宽度显著增大, 晶粒细化至 200 μm 以下。脉冲激光与振荡激光的加入会进一步减小晶粒尺寸。

从 Y-Z 截面的组织形貌可见, 试样中部晶粒受挤压呈现出与 X 方向呈一定角度的扁平状等轴晶, 两端为细小等轴状晶粒。道间两侧的凹陷部分易形成尺寸较大的晶粒, 存在组织不均匀性, 可能引发应力集中, 腐蚀-磨损下易成为裂纹萌生位点。

未经轧制处理的 TC4 试样的微观组织形貌, 存在较大的晶粒及柱状晶结构, 各向异性强; 轧制后微观组织变得更细小均匀, α 相和 β 相的边界清晰, 各向异性降低。连续激光 (LAM-1)、脉冲激光 (LAM-3) 与振荡激光 (LAM-5) 均能改善均匀性。脉冲振荡激光耦合工艺 (LAM-7), 反而均匀性降低, 各向异性增强。随着送丝速度的增加, 冷却速率降低, 晶粒长大并形成树枝晶结构。轧制通过晶粒细化和取向随机化提升整体力学均匀性, 提高了材料质量和减少了微观缺陷。

热处理是让打印试样在 850 $^{\circ}\text{C}$ 高温下保温两小时后空气中自然冷却。该温度位于 TC4 的 $\alpha+\beta$ 两相区 (低于 β 转变点约 980 $^{\circ}\text{C}$)。此时, α 相与 β 相间的元素扩散活跃, 促进两相体积分数向平衡状态转变。缓慢的空冷速率使从 β 基体中以片层形态析出, 形成典型的双态组织—由等轴初生 α 相和转变 β 基体中的次生 α 片层构成。与未退火样品相比, 退火后原先的针状或板条状 α' 马氏体相转化为平衡 α 相, 轧制破碎的弥散 β 相聚集并长大为短棒状 β 相。这种转变易使得材料的强度降低, 塑性提高。退火处理促使 α 相和 β 相的转变, 在后续的时效过程中分解并形成细小的针状 α 相或层状 $\alpha+\beta$ 相, 晶粒间连接更紧密, 减少位错密度和各向异性。

4.2 增材制造 TC4 合金晶粒尺寸与结构分析

通过 EBSD 分析, 可以观察到 LAM-1、LAM-5、LAM-6、LAM-8 和 LAM-10 工艺条件下制备的合金样品具有不同的晶粒尺寸分布。在 LAM-1 中因高能量密度激光导致的瞬时热梯度 G 增加, 凝固速率降低, 促进了两相晶粒外延生长 (3-7 μm)。振荡激光 (LAM-5), 通过引入周期搅拌, 降低热梯度, 使熔池温度分布更加均匀, 晶粒尺寸有所减小。LAM-6 (振荡激光+轧制) 工艺中, 轧制引入的塑性变形激活动态再结晶机制, 形成亚晶界, 同时轧制破碎晶粒, 抑制晶粒生长, 晶粒集中在 1~4 μm 。LAM-8 (脉冲振荡激光+轧制) 周期性热输入, 并对熔池产生冲击效应, 促进了非均匀形核, 同时轧制细化晶粒, 使得晶粒尺寸较 LAM-6 进一步减小。当送丝速度从 4 m/min 增加到 6 m/min (LAM-10) 时, 晶粒尺寸增大, 但分布较为集中。

根据相邻晶粒取向之间的取向角 θ , 晶界可分为两种类型: 高角度晶界 (High - Angle Grain Boundary, HAGB) 和低角度晶界 (Low - Angle Grain Boundary, LAGB)。Jiang 等^[14]的研究表明, 与 LAGBs 相比, HAGBs 在阻碍位错运动方面表现出更优越的能力, 有助于抑制甚至阻止裂纹扩展, 从而提升合金的整体韧性及其他理想性能。LAGBs 的取向角范围为 2 $^{\circ}$ ~ 15 $^{\circ}$, 而 HAGBs 的取向角大于 15 $^{\circ}$ 。TC4 样品中晶界类型以 HAGBs 为主。由图 2 可以看出, LAM-1 晶粒尺寸较大且分布较离散, 低角度晶界 (LAGBs) 比例为 9.4%。引入振荡激光的 LAM-5 低角度晶界比例增加至 16%。振荡激光引起周期性温度波动, 激活位错运动和晶界迁移, 使晶粒结构更细小均匀。LAM-6 工艺中结合轧制, 低角度晶界比例降至 7.1%。轧制过程促进了动态再结晶的发生, 使晶粒间取向差角度增大, 高角度晶界比例显著提升。这一结果表明, 轧制工艺能够有效细化晶粒并改善其取向一致性。脉冲振荡激光结合轧制的 LAM-8 工艺优化了晶粒结构, 低角度晶界比例增加到 11.7%。脉冲激光的高能量密度和快速冷却速率不仅有助于形成更细小的晶粒, 还能促进更均匀的晶界分布。送丝速度从 4 m/min 增加到 6 m/min 时, 低角度晶界比例增加到 15%。这些动态变化最终导致材料的微观组织从以高角度晶界主导的细晶结构, 转向含有更多亚晶和低角度晶界的复合结构。尽管晶粒尺寸略有增大, 但低角度晶界的形成优化了晶界化学稳定性, 从而在耐腐蚀性方面表现出积极影响。

重构 β 相的极图 (Inverse Pole Figure, IPF) 与晶粒尺寸的统计分析结果表明, 未经轧制的晶粒呈柱状形貌, 而轧制后的晶粒则转变为等轴状形貌。由于未轧制试样的晶粒尺寸过大, 仅对轧制后的增材制造 TC4 合金进行统计。大部分晶粒尺寸小于 200 μm , 其中 LAM-6 样品的平均晶粒尺寸最小, 为 71.3 μm 。随着送丝速度的增加, 平均晶粒尺

寸呈增大趋势, LAM-10 的平均晶粒尺寸达到 126.9 μm , 并出现接近 900 μm 的较大尺寸晶粒。这可能是由于熔池稳定性变差, 晶粒生长速度不一, 同时还可能干扰同步轧制正常作用、减弱其细化晶粒效果, 最终产生不均匀的晶粒组织。

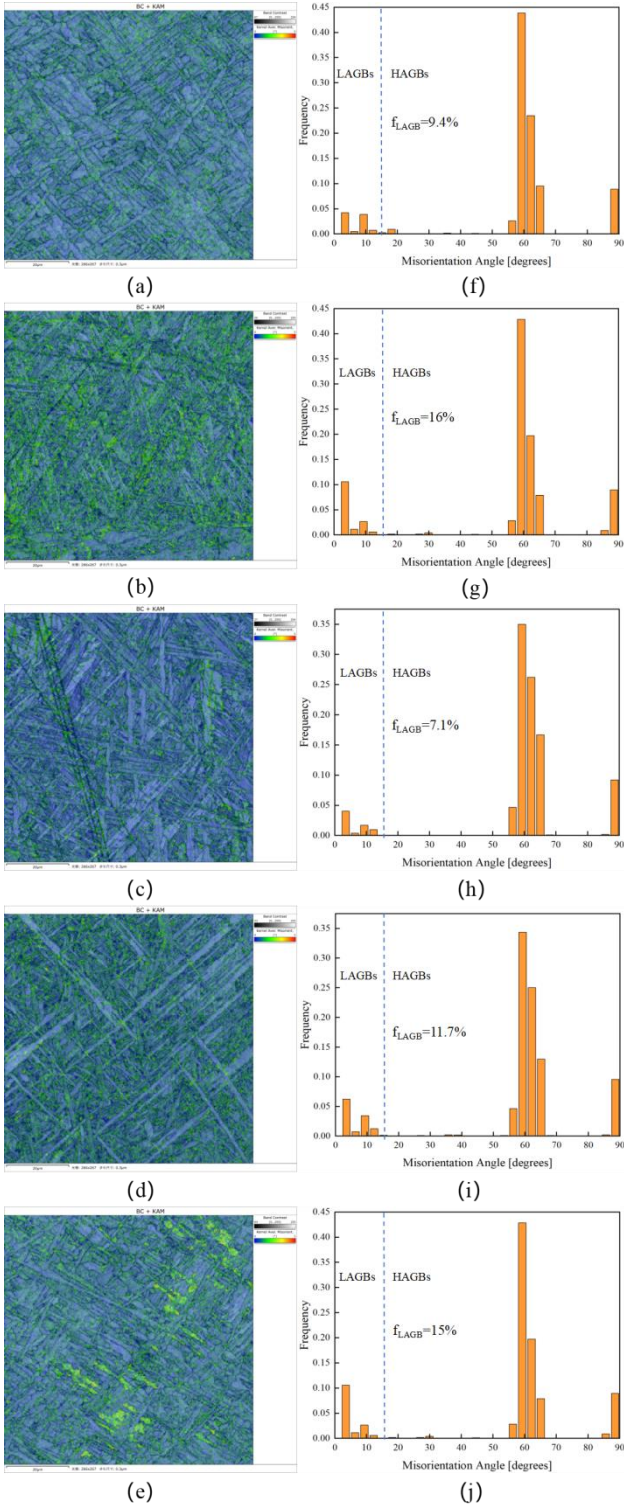


图2 TC4 合金样品的晶界分布图和取向差角分布统计图(a、f)LAM-1、

(b、g) LAM-5、(c、h) LAM-6、(d、i) LAM-8、(e、j) LAM-10

为探究热处理对材料微观组织的影响机制, 对热处理前后的轧制试样进行了 XRD 测试。热处理后 α 相的衍射峰呈现出明显的尖锐化且右移, 表明晶粒尺寸增大且残余应力显著降低, 择优取向程度减弱; β 相的衍射峰特征变化并不显著。根据布拉格定律 ($2d\sin\theta=n\lambda$), 衍射峰位置与晶面间距 (d 值) 呈负相关关系, 晶面间距的减小将导致衍射角 (2θ) 增大, 退火后观察到的 XRD 峰右移现象主要归因于晶格常数的减小和残余应力的释放, 这一变化证实了材料微观结构的均匀化和稳定性得到改善。

4.3 增材制造 TC4 合金硬度分析

通过不同工艺下硬度对比结果可知, 轧制参数试样的硬度显著高于未轧制试样, 且硬度波动范围更小, 组织硬度分布更加均匀。此外, 振荡激光 (LAM-6) 与轧制工艺的协同作用对试样硬度的提升效果明显优于脉冲激光与轧制复合工艺 (LAM-4), 而单独使用振荡激光 (LAM-5) 对硬度的提升效果则低于单独使用脉冲激光 (LAM-3)。而较高的送丝速度 (LAM-10) 对材料硬度产生了负面影响。通过对比发现, 试样 9 的硬度值最大, 达到 342HV; 试样 6 的硬度值次之, 为 339HV, 但总体上, 轧制后试样的硬度差异较小。

4.4 增材制造 TC4 拉伸性能分析

通过不同工艺下在室温下 X 向与 Z 向的拉伸生成的拉伸曲线可知, X 向的极限抗拉强度优于 Z 向。X 方向的抗拉强度和屈服强度均大于 Z 方向, 而延伸率分布则无明显规律, 而 Z 方向是逐层堆积的方向, 每一层的热循环会导致热影响区和层界线的形成, 强度较低。施加轧制力的试样的抗拉强度、屈服强度与延伸率优于未轧制试样。图 3 为热处理前拉伸性能数据。由图可以看出, 与连续激光相比, 脉冲激光、振荡激光与脉冲振荡激光对 TC4 合金的抗拉强度与屈服强度无明显优化, 延伸率有所降低。随着送丝速度的增加, TC4 合金拉伸性能有所下降。经对比, 试样 LAM-6 的综合力学性能最佳, 其 X 向抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 961.5MPa、844.1MPa 和 15.1%; Z 向抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 891.1MPa、802MPa 和 12.1%, LAM-4 与 LAM-8 拉伸性能略微有所降低。

图 4 为热处理后拉伸性能数据。由图可知, X 向的极限抗拉强度均有所下降, Z 向的极限抗拉强度有所上升。退火处理后的拉伸强度数据对比如图 4 所示。通过对比, 热处理后 X 方向的抗拉强度和屈服强度依旧均大于 Z 方向。与未热处理试样对比, X 方向与 Z 方向的抗拉强度和屈服强度差距明显减小。X 方向的强度略微减小, Z 方向上的

强度增加,整体强度均匀化。延伸率在热处理后明显提升,这是由于热处理改善了材料的微观结构,减少了应力集中和脆性相含量,从而显著提高了 TC4 合金的塑性和变形能力。此外,送丝速度的提升,拉伸性能仍为下降趋势,与未处理试样规律一致,但整体拉伸强度下降率降低,表明退火处理后送丝速率对 TC4 合金的负面影响有所改善。**RLAM-8** 试样在热处理后性能得到了显著的优化,综合力学性能最佳,其 X 向抗拉、屈服强度和延伸率分别为 900MPa、839MPa 和 13.3%; Z 向抗拉、屈服强度和延伸率分别为 884.8MPa、789.4MPa 和 12.3%。**RLAM-4**、**RLAM-6** 与 **RLAM-9** 拉伸性能略微有所降低。

5 结论

本研究系统探讨了激光电弧复合增材制造工艺及退火处理对 TC4 钛合金显微组织与力学性能的影响。振荡激光与同步轧制协同作用可有效细化晶粒并改善组织均匀性,显著减弱各向异性。轧制引入的塑性变形激活了动态再结晶,使柱状晶向等轴晶转变,晶粒平均尺寸显

著降低。而且单向轧制能明显细化晶粒,但对复杂形貌区的粗晶仍需多向轧制或后加工优化。送丝速度的增加导致单位面积轧制力降低,轧制力的减弱减少了对晶粒的塑性变形和动态再结晶的驱动力,从而削弱了晶粒细化的效果。

退火处理促使 α' 马氏体向平衡 α 相转变,并伴随 β 相的聚集与长大,形成等轴-片层双态组织。该过程释放了残余应力并降低了晶格常数,材料的组织稳定性与塑性得到提升。力学性能分析显示不同激光模式与轧制协同辅助电弧增材制造工艺显著提高了 TC4 合金的硬度与拉伸性能,**LAM-6** 工艺样品表现出最优的综合性能。退火处理进一步均化了 X/Z 方向的强度差异,延伸率显著提高。过高的送丝速度削弱了微轧制细化作用,对力学性能产生不利影响。

基金项目:国家自然科学基金(52175169),项目名称:基于拓扑优化的金属超滑表面微纳形貌构建及界面调控研究。

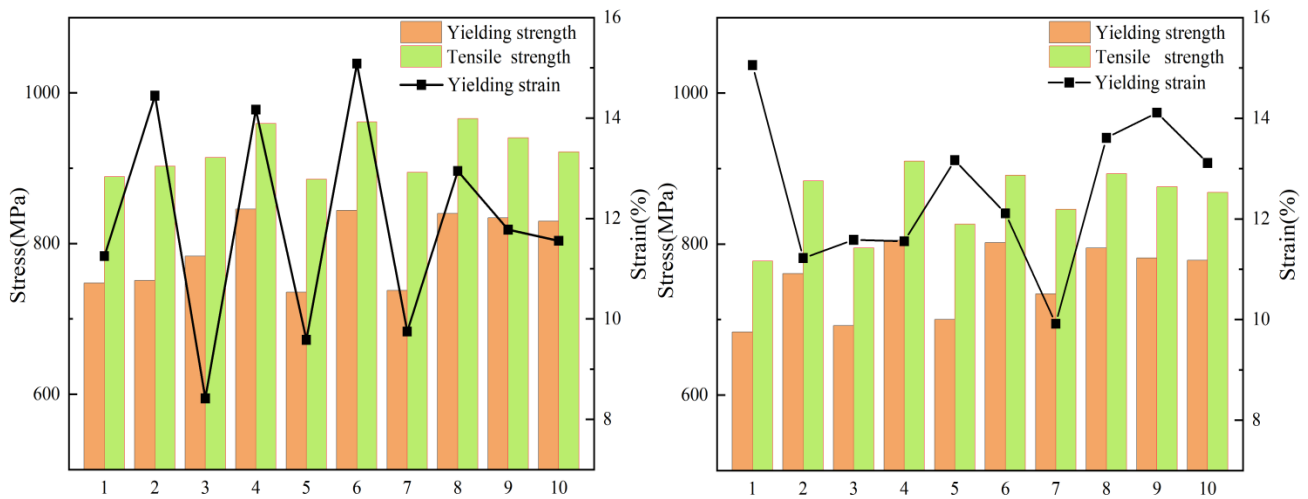


图3 不同工艺下增材制造 TC4 室温拉伸性能对比

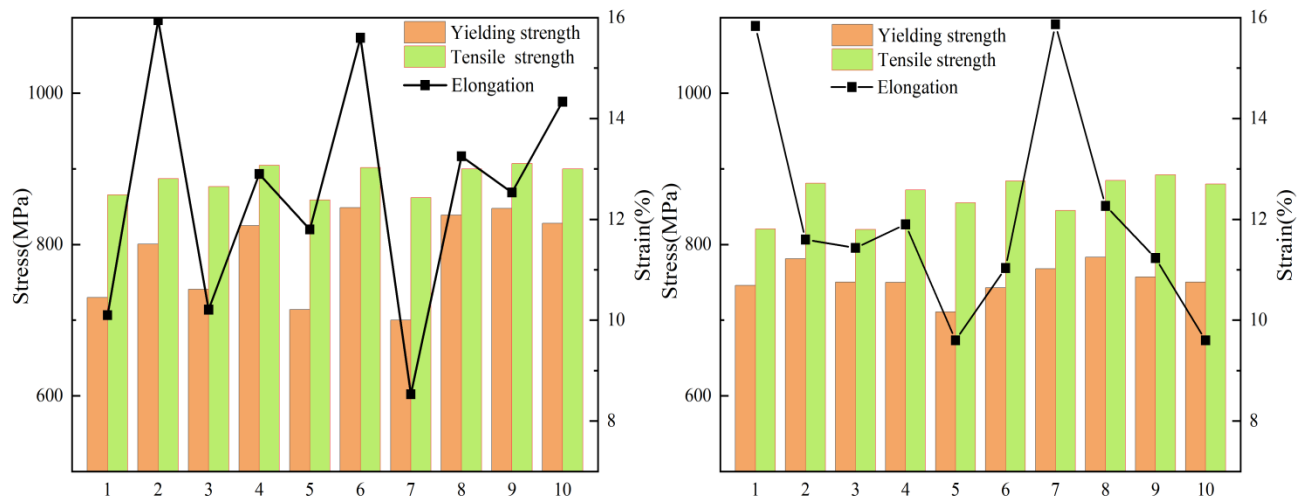


图4 热处理后室温拉伸性能对比

[参考文献]

- [1]SHAO L,LI W,LI D,et al.A review on combustion behavior and mechanism of Ti alloys for advanced aero-engine[J].Journal of Alloys and Compounds,2023(960):170584.
- [2]RAZA D,K UMAR G,UZAIR M,et al.Development and heat treatment of β -phase titanium alloy for orthopedic application[J].Materials Today:Proceedings,2022(50):649-654.
- [3]YANG X,LIN B,ZHANG H,et al.Influence of stress on the corrosion behavior of Ti alloys: A review[J].Journal of Alloys and Compounds,2024(985):173346.
- [4]OKONKWO B O,LI Z,LI L,et al.Multifaceted study of the galvanic corrosion behaviour of titanium-TC4 and 304 stainless steel dissimilar metals couple in deep-sea environment[J].Electrochimica Acta,2025(517):145753.
- [5]OBASI G C,BIROSCA S,FONSECA J Q D.Effect of p grain growth on variant selection and texture memory effect during $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase transformation in Ti-6 Al-4 V[J].Acta materialia,2012,60(3):1048-1058.
- [6]卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
- [7]NAJMON J C,RAEISI S,TOVAR A.Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry[M].Additive Manufacturing for the Aerospace Industry.Amsterdam:Elsevier Science,2019.
- [8]王泽宇,冯泉,杨森,等.激光粉末床熔融 3D 打印 TC4 钛合金的研究进展[J].阀门,2025(2):210-219.
- [9]邹定锦,张亮,吴文恒.激光粉末床熔融成形 TC4 钛合金疲劳与断裂韧性研究进展[J].材料工程,2024(9):1-13.
- [10]SIDDQUI N A,MUZAMIL M,JAMIL T,et al.Heat sources in wire arc additive manufacturing and their impact on macro-microstructural characteristics and mechanical properties – An overview[J].Smart Materials in Manufacturing,2025(3):100059.
- [11]CHAOLIN T,RUNSHENG L,JINLONG S,et al.Review on field assisted metal additive manufacturing[J].International Journal of Machine Tools and Manufacture,2023(189):104032.
- [12]PARDAL G,MARTINA F,WILLIAMS S.Laser stabilization of GMAW additive manufacturing of Ti-6Al-4V components[J].Journal of Materials Processing Technology,2019(272):1-8.
- [13]JIMING L,KAIYU L,HAI FEI L,et al.Achieving high strength and ductility in selective laser melting Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening[J].Journal of Alloys and Compounds,2022(899):163335.
- [14]JIANG P F,NIE M H,ZONG X M,et al.Microstructure and mechanical properties of TC4/NiTi bionic gradient heterogeneous alloy prepared by multi-wire arc additive manufacturing[J].Materials Science and Engineering:A,2023(866):144678.

作者简介：钱梓尧（2002.9—），男，毕业院校：英国南安普顿大学，所学专业：电子工程。

70/30mol%P (VDF-TrFE) 等温结晶动力学的超快扫描量热研究

冯晓雯^{1,2}

1.伊犁师范大学 物理科学与技术学院 新疆凝聚态相变与微结构实验室, 新疆 伊宁 835000

2.伊犁师范大学 物理科学与技术学院 伊犁绿色硅基材料工程研究中心, 新疆 伊宁 835000

[摘要]聚偏氟乙烯 (Poly(vinylidene fluoride), PVDF) 及其共聚物是目前铁电聚合物中的研究热点, 是高能电容器最常用的介电材料之一, 通常具有较大的铁电特性、压电特性。超快扫描量热仪 (Fast Scanning Calorimetry, FSC) 可控的温度和速率对研究聚合物的成核和结晶动力学有很大的优势, 本文对配比为 70/30 mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯进行了 FSC 检测。

[关键词]超快扫描量热; 等温结晶; 聚(偏氟乙烯-三氟乙烯)

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17724

中图分类号: O469

文献标识码: A

Study on Isothermal Crystallization and Kinetics of 70/30mol%P(VDF-TrFE) by Fast Scanning Calorimetry

FENG Xiaowen^{1,2}

1. Xinjiang Laboratory of Phase Transitions and Microstructures in Condensed Matters, College of Physical Science and Technology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang, 835000, China

2. Yili Research Center of Green Silicon-based Materials Engineering, College of Physical Science and Technology; Yili Normal University, Yining, Xinjiang, 835000, China

Abstract: Polyvinylidene fluoride (PVDF) and its copolymers are currently a research hotspot in ferroelectric polymers, and are one of the most commonly used dielectric materials for high-energy capacitors. They usually have significant ferroelectric and piezoelectric properties. The controllable temperature and rate of Fast Scanning Calorimetry (FSC) have great advantages in studying the nucleation and crystallization kinetics of polymers. This article conducted FSC detection on polyvinylidene fluoride trifluoroethylene with a ratio of 70/30 mol%.

Keywords: ultrafast scanning calorimetry; isothermal crystallization; P(VDF-TrFE)

引言

铁电材料至今已有几十年的历史, 铁电材料主要包括无机的单晶、陶瓷和有机的聚合物。1920 年法国科学家第一个发现了酒石酸钾钠特异的介电性能, 首次提出了铁电性的概念, 铁电材料的研究序幕也由此揭开^[1,2]。由于铁电性材料综合了电学、磁学甚至机械性能, 而受到越来越多的关注。在铁电聚合物中, 聚偏氟乙烯与其聚合物具有较大的铁电特性和压电特性, 使用与探究尤为广泛。经研究发现, 添加一些的其他物质更容易得到铁电性能强的 β 相晶体, 一般添加的是和聚偏氟乙烯结构类似的三氟乙烯 (Trifluoroethylene, TrFE)。聚(偏氟乙烯-三氟乙烯) (P(VDF-TrFE)) 有三种结晶结构, 高温相 (HT)、冷却相 (CL) 和低温相 (LT)^[4-6]。

铁电序列低温结晶行为若是使用传统的差示扫描量热法 (DSC) 测量那一定是困难的, 因为它们的结晶速度通常很快。差示扫描量热法 (DSC) 在聚合物结晶和重组分析方面有许多限制, 可以通过使用超快扫描量热仪 (Fast Scanning Calorimetry, FSC) 来克服。超快扫描量热仪可控的温度和速率对研究聚合物的成核和结晶动力学

有很大的优势, 尤其在研究过程动力学与基于聚合物材料和金属中出现的小型、纳米到微米尺寸系统热力学的预期之间的关系时, 对于动力学研究来说, 重要的是从传统 DSC 到 FSC 的时间尺度分别从秒下降到毫秒。通过匹配 FSC 的升温速率, 使其能够捕捉到重组、熔化、化学反应、蒸发、变性、分解等一系列反应的变化^[7]。Schick^[8,9]等人, 借助商业应用的热传导性真空规 (Xen-TCG3880), 发展出一种功率补偿型超快扫描量热仪, 该仪器的可控扫描速率高达 10^6 K/s。本文对配比为 70/30mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯的等温结晶动力学进行了 FSC 检测。

1 实验部分

1.1 实验样品

本文所用的样品是北京爱普思隆科技有限公司生产的 70/30 mol%P (VDF-TrFE)。

1.2 实验主要仪器及设备

本文使用的超快扫描量热仪是在 Schick 所改进的超快扫描芯片量热仪的基础上自行搭建的非绝热功率补偿型 FSC, 此仪器的可控升降温速率达 10^5 K/s; 使用的芯片是 Xensor Integration 公司生产的 Xen-39470b 薄膜芯片传

感器；体视显微镜准备样品时辅助使用。

1.3 实验方案

在显微镜下将 P (VDF-TrFE) 70/30mol% 的样品切成纳微级颗粒，并预融在芯片传感器样品侧的中心加热区。实验装备装入炉体后抽真空通氮气，使用 FSC_NI 程序控制整个系统的升降温速率和等温时间。本实验都将使用 5000K/s 的扫描速率对配比为 70/30mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品进行研究。

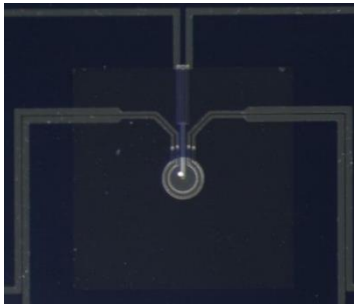


图 1 显微镜下的预融后的 P(VDF-TrFE) 70/30 mol% 样品

2 分析与讨论

图 2 是使用 5000K/s 的扫描速率对配比为 70/30mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品进行扫描。利用超快扫描量热仪 FSC 使样品在相同的等温时间下升到不同的等温结晶温度，先升温至 480K 再降至 160K 以消除热历史；然后升至不同的温度 (200~470K) 等温 20s 后降回 160K；最后再进行一次升降温，升温至 480K 再降回 160K，以获取熔融曲线，结果如图 2 所示。研究再升温得到的熔融曲线。

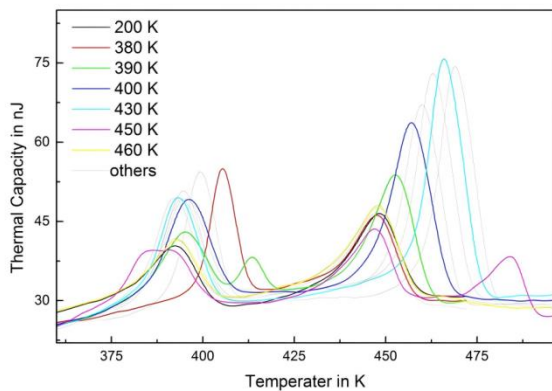
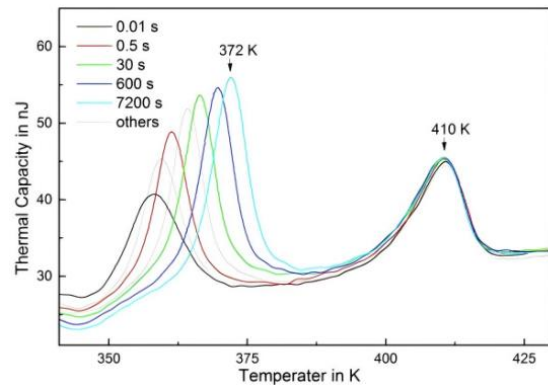


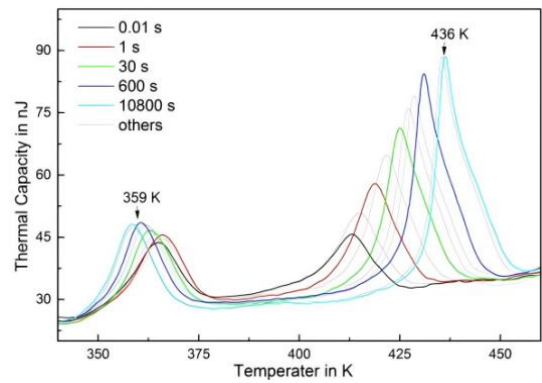
图 2 P (VDF-TrFE) 70/30mol% 样品在 200~470K 分别等温 20s 的熔融曲线图

从图中可以看出 P (VDF-TrFE) 70/30mol% 样品从等温温度在 380K 附近低温峰开始向着高温区移动。在 390K 等温结晶时，出现了三个峰，发生了顺电-铁电转变。等温温度在 390K 之前样品的熔点没有发生变化，一直稳定在 447K 左右，低温峰向高温移动并且面积增大，信号变强，峰形越来越尖锐。等温温度超过 390K 后，配比为 70/30mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯的熔融峰慢慢向温度高的区域靠近，面积也一直增大，峰形也变得越来越大，越来越尖锐，

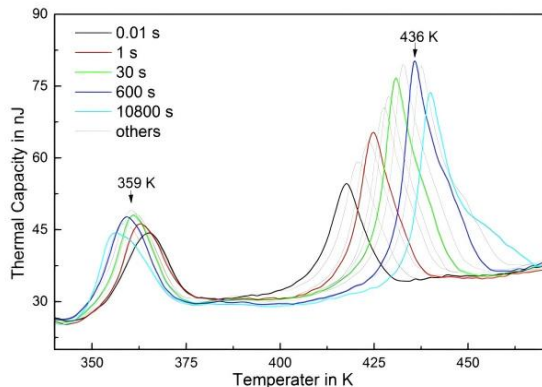
低温居里峰则向低温移动，两个峰分布在两边没有融合。等温温度在 430K 时熔融峰达到最大值，此时的熔点大概在 465K。等温温度在 450K 时，再次出现三个峰，超过 450K 后低温居里峰与高温熔融峰都减弱，回到了 380K 之前没有发生顺电-铁电转变的时候。说明配比为 70/30mol% 的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品在低温下等温结晶生成顺电相，过高与过低的温度都不利于 P (VDF-TrFE) 70/30 样品铁电相的结晶。



(a) P(VDF-TrFE) 70/30mol% 的样品在 340K 等温结晶 0.01~10800s 的熔融曲线图



(b) P(VDF-TrFE) 70/30mol% 的样品在 380K 等温结晶 0.01~10800s 的熔融曲线图



(c) P (VDF-TrFE) 70/30mol% 的样品在 400K 等温结晶 0.01~10800 s 的熔融曲线图

图 3 聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品熔融曲线图

图3(a)是配比为70/30mol%的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品在340K处等温结晶0.01~10800s的熔融曲线图。P(VDF-TrFE)70/30在340K处等温结晶生成顺电相,没有转变为铁电相,顺电相随着等温时间的增加变得越来越稳定。随着等温时间的增加,低温峰慢慢向着高温区移动,熔点由360K附近慢慢增大并稳定在370K左右,熔融峰的面积则逐渐增大,峰值越来越高,峰形也变得愈来愈尖锐。高温峰则一直稳定在410K左右,几乎没有变化,熔融峰的面积也没有发生改变。

图3(b)是配比为70/30mol%的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品在380K下等温结晶0.01~10800s的熔融曲线图。由图可以看出,P(VDF-TrFE)70/30样品起始出现两个小的熔融峰,随着等温时间的增加,低温峰没有发生太大的变化稳定在359K左右,高温峰逐渐向着高温区移动并稳定在436K左右,熔融峰的面积越来越大,峰形越来越尖锐。随着等温时间逐渐增大,聚偏氟乙烯-三氟乙烯等温结晶产生的晶体稳定性更高。在380K下等温结晶的高温峰在等温了600s后开始发生偏移,峰形不再对称,说明此时晶体内存在两种晶体。低温峰几乎没有发生改变。

图3(c)是配比为70/30mol%的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品在400K下等温结晶0.01~10800s的熔融曲线图。低温峰没有发生移动,一直在359K附近,高温峰则以更快的速率向高温区移动,等温结晶的时间越久,高温峰的峰值越大,直至600s后达到最大值,接着慢慢开始减小。同样地,在等温时间为600s时峰值达到最大值,此时熔融峰熔点达到了436K。等温时间超过600s后,熔融峰的峰值开始有了下降的趋势,仍然向着高温区移动。说明等温结晶温度超过390K后不利于P(VDF-TrFE)70/30mol%样品的铁电相的生长。

3 结束语

通过对配比为70/30mol%的P(VDF-TrFE)进行FSC检测得出以下结论:

利用FSC对样品使用5000K/s的扫描速率,在200~470K分别等温20s,熔融峰峰值随着等温温度的升高表现出先增强后减弱的走向,这表明过高和过低的温度都会限制配比为70/30mol%的聚偏氟乙烯-三氟乙烯样品结晶,

它在等温结晶温度为390K之前生成顺电相,等温结晶温度在390~430K之间生成铁电相。

样品在同样的等温温度下,等温结晶时间越大样品的结晶度越高。样品的熔融峰随着等温时间的增大而变得愈发平稳,产生的晶体稳定性更高。等温结晶温度过高时,样品结晶能力下降。

[参考文献]

- [1]Valasek, J. Piezo-Electric and Allied Phenomena in Rochelle Salt[J]. Physical Review,1920,17(4):475-481.
- [2]吴强,宋玉洁,李俊.P(VDF-TrFE)的铁电性能影响因素及研究现状[J].高分子材料科学与工程,2019,35(8):7.
- [3]张小娅,王金斌,钟向丽,等.二维铁电材料的研究进展[J].湘潭大学学报(自然科学版),2019,41(4):92-106.
- [4]Tanaka R, Tashiro K, Kobayashi M. Annealing effect on the ferroelectric phase transition behavior and domain structure of vinylidene fluoride (VDF)-trifluoroethylene copolymers: a comparison between uniaxially oriented VDF 73 and 65% copolymers[J]. Polymer,1999,40(13):3855-3865.
- [5]Prabu A A, Lee J S, Kim K J, et al. Infrared spectroscopic studies on crystallization and Curie transition behavior of ultrathin films of P(VDF/TrFE) (72/28)[J]. Vibrational Spectroscopy,2006,41(1):1-13.
- [6]张小芳,夏卫民,邢俊红,等.聚偏氟乙烯及其共聚物基压电复合材料的研究进展[J].复合材料学报,2021,38(4):23.
- [7]Poel G V, Istrate D, Magon A, et al. Performance and calibration of the Flash DSC 1, a new, MEMS-based fast scanning calorimeter[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry,2012,110(3):1533-1546.
- [8]ZHURAVLEV E,SCHICK C. Fast scanning power compensated differential scanning nano-calorimeter: 1. The device[J]. Thermochimica Acta,2010,505(1):1-13.
- [9]MINAKOV A,SCHICK C. Ultrafast thermal processing and nanocalorimetry at heating and cooling rates up to 1 MK/s[J]. The Review of scientific instruments,2007,78(7):073902.

作者简介:冯晓雯(1996—),女,汉族,新疆塔城人,伊犁师范大学,研究方向:凝聚态相变与微结构。

复合增材制造 TC4 合金耐腐蚀性能研究

盖文卓 翟文正

华中科技大学机械工程学院, 湖北 武汉 430074

[摘要]钛合金是一种应用领域广泛的重要金属,为探索复合增材制造技术制成的 TC4 钛合金的耐腐蚀性能,本论文对不同工艺复合增材制造 TC4 钛合金进行了多种电化学腐蚀测试,研究结果表明:振荡激光-轧制高送丝速率(LAM-10)试样表现出优秀的耐腐蚀性能,腐蚀电流密度(I_{corr})仅 $9.387 \times 10^{-9} \text{ A cm}^{-2}$,电荷转移电阻(R_{ct})高达 $7.686 \times 10^5 \Omega$,表明其钝化膜稳定程度高。未轧制试样耐腐蚀性能普遍优于轧制试样,即轧制工艺对耐腐蚀性能起到削弱作用。

[关键词]复合增材制造; TC4 合金; 电化学腐蚀; 耐腐蚀性能

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17712

中图分类号: TG146

文献标识码: A

Research on the Corrosion Resistance of TC4 Alloy in Composite Additive Manufacturing

GAI Wenzhuo, ZHAI Wenzheng

School of Mechanical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei, 430074, China

Abstract: Titanium alloy is an important metal with a wide range of applications. In order to explore the corrosion resistance of TC4 titanium alloy made by composite additive manufacturing technology, this paper conducted various electrochemical corrosion tests on TC4 titanium alloy made by different composite additive manufacturing processes. The research results showed that the oscillation laser rolling high wire feed rate (LAM-10) sample exhibited excellent corrosion resistance, with a corrosion current density (I_{corr}) of only $9.387 \times 10^{-9} \text{ A cm}^{-2}$ and a charge transfer resistance (R_{ct}) of up to $7.686 \times 10^5 \Omega$, indicating a high stability of its passivation film. The corrosion resistance of unrolled samples is generally better than that of rolled samples, indicating that the rolling process weakens the corrosion resistance.

Keywords: composite additive manufacturing; TC4 alloy; electrochemical corrosion; corrosion resistance

1 绪论

钛合金作为一种关键结构材料,具有密度低、强度高及耐腐蚀等优异特性,广泛应用于兵器舰船、航空航天、化工、汽车、医疗与建筑等领域^[1,2]。然而,采用铸造、锻造等传统工艺制造复杂钛合金零件时,常出现晶粒粗大与微观组织不均匀等问题,进而影响其耐腐蚀性能。将增材制造与机械场、热场、磁场、声场等辅助能场相结合所形成的复合增材制造技术,能够有效弥补单一增材制造方法的不足。

提升复合增材制造钛合金耐腐蚀性能的方法主要包括表面处理、热处理和成分优化。如 M. Fazel 等^[3]通过微弧氧化(MAO)技术将陶瓷涂层在纯钛和 TC4 合金表面成功制备,使耐蚀性能大幅度提升。Khaled M. Ibrahim 等^[4]采用固溶热处理技术实现了双相亚稳态 β 型钛合金 α 相晶粒的细化,并优化了 β 相分布,使其形成了更均匀致密的微观结构。Xiao 等^[5]通过向合金中添加含量为 5%~20% 的 Zr,降低了合金的腐蚀电流密度并提高了极化电阻,使腐蚀速率显著下降。

本文以激光电弧微锻复合增材制造技术所制备的 TC4 钛合金为研究对象,系统分析了不同工艺参数对其耐腐蚀性能的影响。研究结合多种电化学腐蚀测试方法,旨

在深入揭示工艺参数与材料性能之间的内在联系,为高性能 TC4 钛合金构件的可靠制造提供理论依据与技术支撑。

2 实验方法

电化学腐蚀测试采用标准三电极体系,其中,样品为工作电极,铂电极为辅助电极(对电极),饱和甘汞电极为参比电极,电化学工作站为上海辰华 CHI660E 型。通过测定极化曲线,结合等效电路拟合分析及恒电位极化法,对试样的腐蚀行为进行表征。

测试过程中,使用水浴锅将溶液温度维持在 $25 \pm 1^\circ \text{C}$ 。极化曲线测试的电位区间为相对于开路电位 $\pm 500 \text{ mV}$,扫描速率为 0.5 mV/s 。此外,根据极化曲线(PDP)结果,在 200 mV vs. SCE 下进行了持续 1800s 的恒电位极化测试。

3 结果与讨论

3.1 极化曲线

图 1 展示了激光电弧微锻复合增材制造 TC4 合金在 3.5wt% NaCl 溶液中的极化曲线。从图中可以看出,不同工艺制备的 TC4 合金在模拟海水腐蚀环境下的极化曲线形状较为相似。在保持其他工艺参数一致的情况下,经过轧制的 TC4 试样其极化曲线较未轧制试样更靠近正方向,表明在腐蚀初期阶段,轧制 TC4 合金表现出更大的腐蚀倾向。

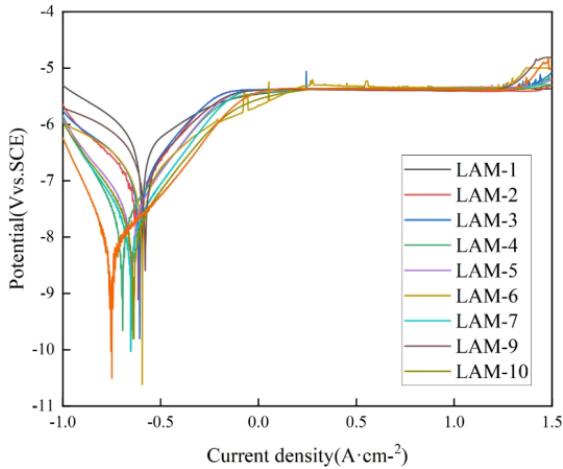


图1 TC4 钛合金在 3.5 wt% NaCl 溶液中的极化曲线

为定量分析不同增材制造工艺对 TC4 合金耐腐蚀性能的影响，通过软件拟合得到了腐蚀电位 (E_{corr}) 与腐蚀电流密度 (i_{corr})，具体数据列于表 1。结果显示，LAM-7 和 LAM-10 试样的腐蚀电流密度最低，即腐蚀速率最慢；而 LAM-6 和 LAM-8 试样的腐蚀速率较快。轧制工艺的引入导致 TC4 合金中晶界数量增多，由于晶界区域钒元素含量较高，其化学稳定性与 α 相存在差异，可能形成微电偶效应，从而降低了材料的耐腐蚀性能。

振荡激光与脉冲激光对腐蚀性能的影响较为复杂。单独使用时，二者均有助于提升耐腐蚀性；但在与轧制工艺结合后，材料的耐腐蚀性能显著下降。值得关注的是，较高的送丝速度（如 LAM-9、LAM-10）显著降低了腐蚀电流密度，说明送丝速度对改善腐蚀性能具有积极作用。

表 1 TC4 钛合金在 3.5wt% NaCl 溶液中的动电位极化测试拟合结果

样品	E_{corr}/V vs. SCE	$I_{corr}/A\ cm^{-2}$
LAM-1	-0.595	7.632×10^{-8}
LAM-2	-0.665	8.825×10^{-8}
LAM-3	-0.593	9.411×10^{-8}
LAM-4	-0.676	1.966×10^{-8}
LAM-5	-0.627	2.618×10^{-8}
LAM-6	-0.461	9.694×10^{-8}
LAM-7	-0.623	1.490×10^{-8}
LAM-8	-0.434	8.946×10^{-8}
LAM-9	-0.623	1.581×10^{-8}
LAM-10	-0.623	9.387×10^{-9}

3.2 等效电路拟合分析

为定量分析钝化膜的生成特性，采用图 2 所示等效电路对腐蚀行为进行模拟。该电路中， R_s 表示溶液电阻， R_f 为材料表面钝化膜电阻， R_{ct} 为电荷转移电阻， CPE_f 和 CPE_{dl} 分别代表钝化膜电容及材料表面与溶液之间的双电层电容。利用 ZView 软件对抗谱数据进行拟合计算，具体结果列于表 2 和表 3。

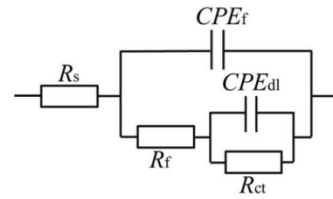


图 2 TC4 钛合金在 3.5 wt% NaCl 溶液中的等效电路图

表 2 TC4 钛合金在 3.5 wt% NaCl 溶液中浸泡 2h 的阻抗谱拟合结果

样品	R_s (Ω)	C_f ($\mu F \cdot cm^{-2}$)	n_f	R_f (Ω)
LAM-1	1.473	62.52	0.918	545.6
LAM-2	1.097	332.2	0.886	97.52
LAM-3	0.942	268.4	0.891	1420
LAM-4	1.092	296.2	0.878	623
LAM-5	1.023	259.74	0.89	18.12
LAM-6	1.112	44.518	0.841	83.9
LAM-7	1.175	168.2	0.918	1365
LAM-8	1.273	193.08	0.852	432.6
LAM-9	1.141	266.9	0.864	452.6
LAM-10	1.016	232.33	0.925	15.18

表 3 TC4 钛合金在 3.5wt% NaCl 溶液中浸泡 2h 的阻抗谱拟合结果

(续)

样品	C_d ($\mu F \cdot cm^{-2}$)	n_d	R_{ct} (Ω)
LAM-1	239.5	0.91	8.078×10^4
LAM-2	46.57	0.954	4.35×10^4
LAM-3	6393	0.847	8.827×10^4
LAM-4	12.36	0.832	2.432×10^5
LAM-5	96.102	0.892	2.258×10^5
LAM-6	11.322	0.904	2.971×10^4
LAM-7	159.8	0.951	2.56×10^5
LAM-8	55.969	0.913	4.705×10^4
LAM-9	39.357	0.899	2.03×10^5
LAM-10	45.404	0.906	7.686×10^5

基于电化学阻抗谱 (EIS) 等效电路拟合分析可知，不同激光电弧微锻复合增材制造工艺对 TC4 合金钝化膜动力学特性及耐蚀性具有显著调控作用。TC4 钛合金钝化膜的外层电阻 R_f 普遍远小于电荷转移电阻 R_{ct} ，说明其耐腐蚀性能主要取决于钝化膜内部致密层，外部疏松多孔层对耐蚀性的贡献较小^[6]。根据表 2 和表 3 数据，LAM-10 试样的 R_{ct} 最大，耐腐蚀性能最优；LAM-6 试样的 R_{ct} 最小，耐腐蚀性能最差。当送丝速度从 5 m/min (LAM-9) 提高至 6m/min (LAM-10) 时， R_{ct} 出现显著上升。脉冲振荡激光工艺 (LAM-7) 相较于基础激光工艺 (LAM-1)， R_{ct} 提高了 3.2 倍；脉冲激光结合轧制工艺 (LAM-4) 则使 R_{ct} 较未轧制样品 (LAM-3) 提升 2.7 倍。此外，表面致密层的弥散系数 n_f 在轧制前后未发生明显变化，表明

轧制工艺对钝化膜稳定性影响不大。而 LAM-3 与 LAM-4 试样的 n_p 值较 LAM-1 明显降低,说明脉冲激光对钝化膜稳定性产生不利影响。

3.3 恒电位极化测试

表 4 是由恒电位极化测试曲线拟合得到的 TC4 钛合金的 k 值,根据表格所列数据,LAM-8 试样的 K 值最低,说明其对受损钝化膜的修复能力最差^[7,8]。相比之下,经过脉冲处理的 LAM-10 试样具有最高的 K 值,显示出优异的钝化膜修复能力。

表 4 由恒电位极化曲线得出的 TC4 钛合金的 k 值

样品	K 值
LAM-1	0.87
LAM-2	0.86
LAM-3	0.85
LAM-4	0.87
LAM-5	0.87
LAM-6	0.85
LAM-7	0.9
LAM-8	0.83
LAM-9	0.84
LAM-10	0.92

4 结论

本文研究了激光电弧微锻复合增材制造工艺对 TC4 合金耐腐蚀性能的影响机制,通过极化曲线、等效电路拟合分析和恒电位极化法等方法,对比分析不同工艺参数下材料的耐腐蚀性能差异,建立了工艺-组织-性能的对应关系,并优化出综合性能优异的工艺参数组合。主要结论如下:

(1) 轧制工艺的引入降低了材料的耐腐蚀性,振荡和脉冲激光的单独使用时能提升耐腐蚀性,但结合轧制工艺后耐腐蚀性显著下降。除此之外,较高的送丝速度对腐蚀性能具有积极影响。

(2) 送丝速度的增加可提升钝化膜稳定性,轧制对钝化膜稳定性没有明显影响。脉冲激光单独作用时会削弱钝化膜稳定性,但与振荡激光协同作用时能够增强钝化膜稳定性。

(3) 综合性能对比表明,LAM-10 试样表现出最优的耐腐蚀性能。在相同工艺参数条件下,未轧制试样的耐腐蚀性能普遍优于轧制试样。进一步通过钝化膜稳定性

测试发现,耐腐蚀性能优异的试样,其表面钝化膜具有更高的致密性和稳定性,这与其优异的耐腐蚀性能密切相关。

基金项目:国家自然科学基金(52175169),项目名称:基于拓扑优化的金属超滑表面微纳形貌构建及界面调控研究。

[参考文献]

[1]SHAO L,LI W,LI D,et al.A review on combustion behavior and mechanism of Ti alloys for advanced aero-engine [J].Journal of Alloys and Compounds,2023(960):170584.

[2]RAZA D,KUMAR G,UZAIR M,et al.Development and heat treatment of β -phase titanium alloy for orthopedic application [J].Materials Today:Proceedings,2022(50):649-654.

[3]FAZEL M,SALIMIJAZI H R,GOLOZAR M A,et al.A comparison of corrosion, tribocorrosion and electrochemical impedance properties of pure Ti and Ti6Al4V alloy treated by micro-arc oxidation process [J].Applied Surface Science,2015(324):751-756.

[4]IBRAHIM K M,MAHMOUDMOUSTAFA M,AL-GRAFI M W,et al.Effect of solution heat treatment on microstructure and wear and corrosion behavior of a two phase β -metastable titanium alloy [J].International Journal of Electrochemical Science,2016,11(4):3206-3226.

[5]XIA C,ZHANG Z,FENG Z,et al.Effect of zirconium content on the microstructure and corrosion behavior of Ti-6Al-4V-x Zr alloys [J].Corrosion Science,2016(112):687-695.

[6]徐江,鲍习科,蒋书运.纳米晶 Ta2N 涂层在模拟人体环境中的耐蚀性能研究[J].金属学报,2018,54(3):443-456.

[7]ENGELHARDT G R,KURSTEN B,MACDONALD D D.On the nature of the electric field within the barrier layer of a passive film [J].Electrochimica Acta,2019(313):367-377.

[8]FATTAH-ALHOSSEINI A,SOLTANI F,SHIRSALIMI F,et al.The semiconducting properties of passive films formed on AISI 316 L and AISI 321 stainless steels:A test of the point defect model (PDM) [J].Corrosion Science,2011,53(10):3186-3192.

作者简介:盖文卓(2000.5—),男,毕业院校:天津工业大学,所学专业:电子科学与技术。

眼镜片顶焦度检定结果的不确定度评定

王磊

蒙城县市场监督检验所, 安徽 蒙城 233500

[摘要]文中围绕眼镜片顶焦度检定结果的不确定度评定展开研究, 结合标准焦度计测量原理与量值传递模型, 对 A 类和 B 类不确定度分量进行了详细评估, 并利用方差合成方法计算合成标准不确定度。通过对测量重复性、标准器误差及焦度计分辨率的分量分析, 得出顶焦度检定结果的合成标准不确定度为 0.01m^{-1} , 有效自由度约 50, 进一步计算扩展不确定度为 0.03m^{-1} 。结果表明, 在现行实验条件下, 顶焦度检定具有较高可靠性, 为眼镜片质量控制、生产检定和标准化量值传递提供了科学依据。

[关键词]眼镜片; 顶焦度; 不确定度; 合成标准不确定度; 扩展不确定度

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17729

中图分类号: TB96

文献标识码: A

Uncertainty Assessment of the Calibration Results of the Top Focal Length of Eyeglass Lenses

WANG Lei

Mengcheng County Market Supervision and Inspection Institute, Mengcheng, Anhui, 233500, China

Abstract: This article focuses on the uncertainty evaluation of the calibration results of the top focus of eyeglass lenses. Combining the measurement principle of the standard focus meter and the value transfer model, a detailed evaluation of the uncertainty components of Class A and Class B is carried out, and the variance synthesis method is used to calculate the synthesized standard uncertainty. By analyzing the components of measurement repeatability, standard error, and resolution of focal point score, the composite standard uncertainty of the top focal point calibration result is obtained to be 0.01m^{-1} , with an effective degree of freedom of about 50. Further calculation of the expanded uncertainty is 0.03m^{-1} . The results indicate that under current experimental conditions, the top focus calibration has high reliability, providing a scientific basis for quality control, production calibration, and standardized value transmission of eyeglass lenses.

Keywords: eyeglass lenses; top focus; uncertainty; composite standard uncertainty; expand uncertainty

1 眼镜片光学参数的质量控制需求

在眼镜片的生产、流通和使用全链条中, 确保其标称顶焦度与实际光学性能的高度一致性是质量控制的核心任务, 这项工作的基础在于建立并维护一个准确可靠且具可操作性的量值溯源体系。依据国家强制检定计量器具目录, 用于眼镜片顶焦度检定的焦度计属于必须接受周期性强制检定的计量器具, 其自身的准确度等级和检定结果的可靠性是保障量值准确传递的基石。中国计量科学研究院光学所专家在 2024 年发表于《中国计量》期刊的综述文章《眼镜光学计量现状与发展》中强调: “眼镜片顶焦度计量量值的准确一致, 是保障亿万眼镜佩戴者视力矫正效果和视觉健康的根本前提, 其量值传递链的完整性与不确定度评定的科学性, 构成了眼镜光学计量领域质量控制体系的‘双支柱’。”^[1]近年来, 随着消费者对视觉质量要求的提升以及功能性镜片的普及, 对顶焦度参数的测量精度提出了更高要求, 传统的检定模式正面临着挑战。国家眼镜玻璃搪瓷制品质量监督检验中心在 2025 年第一季度发布的行业分析报告中援引数据指出, 因顶焦度参数争议引发的消费投诉连续三年呈现增长态势, 年均增幅约 8.5%, 这从市场反馈层面印证了强化相关计量检定能力建设、提升不确定度评定水平对维护行业秩序、保障消费

者权益的极端重要性, 也要求我们必须构建更加完善、透明、可验证的顶焦度检定结果评价体系, 以科学数据支撑质量提升。

2 理论基础与评定模型

2.1 顶焦度计量学原理

眼镜片的顶焦度定义为镜片后顶点焦距(以米为单位)的倒数, 其单位为屈光度 (m^{-1}), 它是定量描述镜片对光线会聚或发散能力的核心光学参数^[2]。在计量学实践中, 镜片顶焦度的检定工作主要借助标准焦度计完成, 该仪器的工作原理基于准直光学系统和可移动的聚焦探测装置(如 CCD 或光电位置传感器); 其工作过程可简述为: 准直平行光束垂直入射至被检镜片表面, 经镜片折射后在后方空间形成焦点或焦线, 焦度计内部的精密移动机构驱动探测靶面沿光轴前后扫描, 通过精确捕捉最佳聚焦位置并测量该位置相对于镜片后顶点的距离, 进而计算得出镜片的顶焦度值, 这一测量过程严格遵循几何光学成像的基本定律。国际标准化组织制定的 ISO 9342 系列标准及我国现行的 JJG 579—2010《验光镜片箱》检定规程、JJG 580—2005《焦度计》检定规程共同构成了眼镜片顶焦度量值传递与检定的技术规范体系, 确保了全球范围内测量方法和量值评价的统一性, 为我国眼镜片顶焦度检定工作的规

范化和量值溯源的有效性奠定了坚实的理论基础和操作依据。

2.2 测量模型

在评定眼镜片顶焦度检定结果的不确定度时，核心关注量是焦度计的示值误差，其定义式为：

$$d_D = D_m - D_n \quad (1)$$

式中： d_D —顶焦度示值误差；

D_m —焦度计的测量值；

D_n —验光镜片的名义值。

该模型清晰地表达了检定工作的目标量——示值误差 d_D 其大小直接反映了焦度计测量结果的准确性。在不确定度评定中， D_m 的不确定度主要来源于焦度计自身的性能（如重复性、分辨力、标准器误差等）以及测量环境条件的影响；而 D_n 的不确定度则主要取决于作为标准器的标准镜片组的定值不确定度及其在量值传递链中的位置。中国合格评定国家认可委员会（CNAS）在其官方网站公开的《光学计量领域常见不确定度评定示例》文档明确指出：“依据该模型进行评定时，通常假设 D_n 为相对真值，其不确定度远小于 D_m 的不确定度，因此评定重点在于分析焦度计测量过程引入的各项分量。”

3 标准不确定度分量的评定

选一只顶焦度为+2.00 的眼镜片，重复测量 10 次，数值 y 如下：

单位： m^{-1}

2.08, 2.09, 2.09, 2.10, 2.08, 2.08, 2.08, 2.10, 2.10, 2.09

$$\bar{y} = 2.09 \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

$$s(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \approx 0.009 \text{ m}^{-1} \quad (3)$$

$$s(\bar{y}) = \frac{s(y_i)}{\sqrt{10}} = 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (4)$$

(1) 标准不确定度 A 类评定

A 类不确定度评定基于对观测值的统计分析，通过重复测量序列的内在离散性进行量化。对于选定的+2.00m⁻¹ 镜片，通过上述 10 次独立重复测量（n=10），计算得到单次测量结果的实验标准差 $s=0.007$ 。然而，在评定顶焦度示值误差 d_D 的不确定度时，更关注的是平均值的分散性^[3]。因此，由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 采用平均值的实验标准差：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.007}{\sqrt{10}} \approx 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (5)$$

该分量的自由度 v_1 由重复测量次数决定：

$$v_1 = n - 1 = 9 \quad (6)$$

这个数值反映了测量结果的重复性水平，是表征测量过程随机效应的重要分量。需要指出的是，重复性分量的

大小与操作者的熟练程度、仪器的稳定性、环境条件的控制以及被测镜片本身表面的清洁度、放置的一致性等因素密切相关，在恒温恒湿且操作规范的实验室内，该值通常能控制在较低水平。中国计量测试学会官网上《光学计量不确定度评定案例分析》一文（2025 年 3 月访问）提到：“测量重复性是焦度计检定中 A 类评定的主要来源，尤其对于低度数镜片，其相对影响可能更为显著，必须通过足够次数的重复测量来可靠评估。”

(2) 标准不确定度 B 类评定

B 类不确定度评定基于非统计分析方法，利用已知信息（如检定证书、技术规范、仪器特性等）进行科学推断和估算。

①标准器误差引入的标准不确定度 u_2

焦度计本身作为测量仪器，其示值的最大允许误差（MPE）是引入不确定度的关键因素。依据 JJG 2090—1994《顶焦度计量器具》检定系统表（注：该规程已被 JJG 2090—2019 替代，但原文引用此版本，此处保留）的要求，对于一级焦度计，在测量范围（-25.00m⁻¹~+25.00m⁻¹）内，其总不确定度要求为 $\pm 0.03 \text{ m}^{-1}$ ，并指明包含因子 $k=3$ 。据此，标准不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{0.03}{3} = 0.01 \text{ m}^{-1} \quad (7)$$

对该 u_2 值本身可靠性的估计（即其相对标准不确定度）假设为 10%（即 0.1）。根据 Welch - Satterthwaite 公式中关于 B 类分量自由度的近似估算方法：

$$v_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta u_2}{u_2} \right)^{-2} = \frac{1}{2} \times (0.1)^{-2} = \frac{1}{2} \times 100 = 50 \quad (8)$$

该分量通常在整个不确定度预算中占有较大比重，反映了所用焦度计本身的计量特性上限。

②焦度计分辨力引入的标准不确定度 u_3

焦度计的分辨力是指其显示装置能有效辨别的最小示值差异。对于一级焦度计，其分辨力通常为 0.01 m^{-1} 。分辨力导致的不确定度可用一个矩形分布来模拟，其区间半宽度为分辨力值的一半（ $\delta x/2=0.005 \text{ m}^{-1}$ ）。矩形分布下的换算为：

$$u_3 = \frac{\delta x/2}{\sqrt{3}} = \frac{0.01/2}{\sqrt{3}} \approx \frac{0.005}{1.732} \approx 0.00289 \text{ m}^{-1} \approx 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (9)$$

同样，估计该 u_3 值的相对标准不确定度为 10%（0.1），其自由度的估算方式与 u_2 相同：

$$v_3 = \frac{1}{2} \times (0.1)^{-2} = 50 \quad (10)$$

值得注意的是，分辨力引入的分量 u_3 与测量重复性引入的分量 u_1 存在关联性。若重复性引入的分散性显著大于分辨力效应（即 $s > \delta x/(2\sqrt{3})$ ），则分辨力效应可能已被重复性所覆盖；反之，若重复性很小，分辨力效应将成为主要随机影响源。在本例中， $u_1=0.003 \text{ m}^{-1}$ 、 $u_3=0.003 \text{ m}^{-1}$ ，两者数值相当。根据 JJF1059.1—2012 的建议，为避免重复计算， u_1 与 u_3 应取两者中的较大者参与合成（或进行相关性处理，但通常取大值更简便）。鉴于两者相等，取作

$u_1=0.003\text{m}^{-1}$ 为代表两者效应的分量（见下表）。

(3) 标准不确定度分量一览表（表 1）

表 1 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度分量	来源	数值	自由度
	u_1	测量重复性	0.003	9
	u_2	标准器误差	0.01	50
	u_3	焦度计分辨力	0.003	50
		u_1 与 u_3 二者取大值	0.003	

(4) 合成不确定度评定

$$\mu_c = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} = \sqrt{0.003^2 + 0.01^2} \approx 0.01\text{m}^{-1} \quad (11)$$

(5) 有效自由度

$$V_{eff} = \frac{\mu_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i^4}{V_i}} = \frac{0.035^4}{\frac{(0.003)^4}{9} + \frac{(0.035)^4}{50}} = 50 \quad (12)$$

(6) 扩展不确定度

按 t 分布处理，查 t 分布临界表，取 $P=0.99$ ，覆盖因子 $k=2.69$ ，则 $t_{99}(47)=2.69$ ，

$$U = k \times u_c \quad (k \text{ 取 } 2)$$

$$U_p = 2.69 \times 0.01 = 0.03\text{m}^{-1} \quad (k_p=2.69) \quad V_{eff}=50$$

(7) 测量不确定度报告

$$U_p = 0.03\text{m}^{-1} \quad (k_p=2.69) \quad V_{eff}=50$$

4 合成不确定度计算

4.1 方差合成公式

测量模型见式：

$$d_D = D_m - D_n \quad (13)$$

这是一个简单的线性函数。假设输入量 D_m 和 D_n 相互独立（这是合理的，因为 D_n 是标准镜片的约定量值，其不确定度在此模型中通常被视为可忽略或已包含在 D_m 的不确定度评定中），则输出量 d_D 的合成方差 $u_c^2(d_D)$ 为：

$$u_c^2(d_D) = \left(\frac{\partial d_D}{\partial D_m}\right)^2 u^2(D_m) + \left(\frac{\partial d_D}{\partial D_n}\right)^2 u^2(D_n) \quad (14)$$

代入偏导数：

$$u_c^2(d_D) = (1)^2 u^2(D_m) + (-1)^2 u^2(D_n) \quad (15)$$

若 $u^2(D_n) \ll u^2(D_m)$ ，则近似有：

$$u_c(d_D) \approx u(D_m) \quad (16)$$

这正是本文第 3 节所采用的方法，即重点评定了焦度计测量值 D_m 的不确定度 $u(D_m) \approx 0.01\text{m}^{-1}$ ，并将其作为示值误差 d_D 的合成标准不确定度。方差合成公式是处理多个相互独立或具有特定相关性的不确定度分量时普遍适用的根本方法，其理论基础是误差传播定律。

4.2 分量贡献度分析

深入理解各不确定度分量对合成结果的相对贡献，对于优化测量方案、合理配置资源以降低关键不确定度来源具有重要指导意义。贡献度通常通过各分量的平方（即方差 u_i^2 ）占合成方差 u_c^2 的比例来衡量：

分量 u_1 （重复性， 0.003m^{-1} ）贡献的方差：

$$u_1^2 = (0.003)^2 = 9 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (17)$$

分量 u_2 （标准器误差， 0.01m^{-1} ）贡献的方差：

$$u_2^2 = (0.01)^2 = 100 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (18)$$

合成方差：

$$u_c^2 \approx u_1^2 + u_2^2 = 109 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (19)$$

分量 u_2 的贡献度：

$$\frac{u_2^2}{u_c^2} \times 100\% \approx \frac{100}{109} \times 100\% \approx 91.7\% \quad (20)$$

分量 u_1 的贡献度：

$$\frac{u_1^2}{u_c^2} \times 100\% \approx \frac{9}{109} \times 100\% \approx 8.3\% \quad (21)$$

5 扩展不确定度计算

在不确定度评定中，标准不确定度 $u_c(d_D)$ 只能表征测量结果的“平均不确定度水平”，并不能直接反映测量结果在一定置信概率下的可靠区间^[4]。为了使不确定度表述更贴近实际应用需求，需要引入扩展不确定度。扩展不确定度通过覆盖因子 k 将标准不确定度放大，使测量结果在所给定的置信水平下落入区间的概率达到要求。

5.1 理论基础

扩展不确定度的定义式为：

$$U = k \cdot u_c(d_D) \quad (22)$$

其中： U 为扩展不确定度； k 为覆盖因子； $u_c(d_D)$ 为由不确定度传播定律计算得到的合成标准不确定度。

国际计量委员会（CIPM）和 ISO《测量不确定度表示指南》（GUM）明确指出：当合成标准不确定度 $u_c(d_D)$ 服从或近似服从正态分布时，若覆盖因子 $k=2$ ，则约 95% 的概率保证真实值落在测量结果的扩展不确定度区间内。这一概率水平在计量和检测实践中被广泛接受。

5.2 覆盖因子的选择

覆盖因子的取值并非固定，通常需根据目标置信水平而定：

当要求置信水平约 68% 时，取 $k=1$ ；当要求置信水平约 95% 时，取 $k=2$ ；当要求置信水平约 99.7% 时，取 $k=3$ 。

在多数国家法制计量检定工作中，约定采用 $k=2$ ，这既能满足结果的可靠性需求，又避免过度扩大不确定度区间。对于眼镜片顶焦度检定而言， $k=2$ 的约定值是业内共识。

5.3 数值计算

根据第 4 章的计算，得到合成标准不确定度为：

$$u_c(d_D) = 0.0104 \text{ m}^{-1} \quad (23)$$

代入公式 $U = k \cdot u_c(d_D)$ ，并取覆盖因子 $k=2$ ：

$$U = 2 \times 0.0104 = 0.0208 \text{ m}^{-1} \quad (24)$$

经四舍五入，得到最终结果：

$$U = 0.021 \text{ m}^{-1} \quad (k = 2, \text{置信水平约 } 95\%) \quad (25)$$

5.4 结果解释

这表明，在置信水平约 95% 的条件下，被检眼镜片顶焦度的真实值位于以下区间内：

$$d_D \pm U = d_D \pm 0.021 \text{ m}^{-1} \quad (26)$$

这一不确定度区间既反映了检定结果的可信范围，又为后续的质量判定提供了统计学基础。例如，当焦度计的

示值误差限值为 $\pm 0.05\text{m}^{-1}$ 时,本次检定的扩展不确定度仅占该限值的42%,说明测量结果的可靠性较高。

5.5 实际应用与对比

值得注意的是,不同实验室在具体实施时,可能会因设备等级、环境稳定性或操作规范的差异,导致 $u_c(d_D)$ 有所不同。在高等级计量实验室,如国家级重点实验室,合成标准不确定度可降低至约 0.005m^{-1} ,此时扩展不确定度 U 约为 0.01m^{-1} 。

在一般校准实验室,常见水平为 $U=0.02\sim 0.03\text{m}^{-1}$ 。我国多项行业研究,如中国计量大学光学与电子科技学院2024年报告表明,若标准焦度计本身的最大允许误差控制在 $\pm 0.01\text{m}^{-1}$ 以内,则检定结果的扩展不确定度往往能稳定保持在 0.015m^{-1} 以下,这对保证眼镜产品质量具有重要意义。

6 结束语

本文系统评定了眼镜片顶焦度检定结果的不确定度,结合A类和B类评定方法,明确了测量重复性、标准器误差及分辨力的贡献,并利用方差合成与扩展不确定度计算完成了最终测量不确定度报告。结果显示,在当前实验

条件下,顶焦度检定的扩展不确定度为 0.03m^{-1} ,测量可靠性较高,为眼镜片生产、质量控制和量值溯源提供了科学依据。进一步分析各分量贡献,发现标准器误差是主要不确定度来源,提示未来可通过提高标准器精度、优化实验环境和操作规范,进一步降低不确定度。

[参考文献]

- [1]施俊,沙海峰.验光镜片顶焦度量值计量比对及结果分析[J].上海计量测试,2024,51(2):54-55.
- [2]陈犁,张寅辉,丁辰,等.眼镜镜片顶焦度和透射比测量盲样考核实施及应用评价[J].中国标准化,2024(10):180-185.
- [3]姜明奎,吕凯旋,徐鑫,等.验光镜片顶焦度量值计量比对与结果分析[J].计量与测试技术,2024,51(5):112-114.
- [4]石远菊,杨超,郑泰,等.阿贝数在镜片顶焦度检测中的应用研究[J].工业计量,2025,35(4):113-117.

作者简介:王磊(1978.10—),毕业院校:中央广播电视大学,所学专业:计算机应用(网络方向),当前就职单位:蒙城县市场监督检验所,职务:技术负责人,职称级别:工程师。

计算机网络攻防渗透技术的分析和研究

张佩云 郝鹏宇

硅湖职业技术学院, 江苏 苏州 215300

[摘要]信息技术快速发展, 计算机网络成现代必备基础设施。但网络规模扩大, 应用变复杂, 网络攻击多发, 安全威胁加剧。网络攻防渗透技术是保障网络安全重要方式, 涉及分析网络攻击技术、设计防御措施、实施渗透测试等。文章分析当下主流网络攻击技术如 DOS/DDOS 攻击、Web 渗透攻击, 探讨相应防御和渗透防护技术, 介绍渗透测试技术基本流程与方法, 最后展望人工智能、云计算、物联网等新兴技术给网络安全领域带来的挑战与机遇, 给网络安全技术研究与实践提供理论参考与技术指导。

[关键词]计算机网络; 网络攻击技术; 渗透防护技术

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17728

中图分类号: TP39

文献标识码: A

Analysis and Research on Computer Network Attack and Defense Penetration Technology

ZHANG Peiyun, HAO Pengyu

Silicon Lake Vocational & Technical Institute, Suzhou, Jiangsu, 215300, China

Abstract: With the rapid development of information technology, computer networks have become an essential modern infrastructure. However, as the scale of the network expands, applications become more complex, network attacks become more frequent, and security threats intensify. Network attack and defense penetration technology is an important way to ensure network security, involving analyzing network attack technology, designing defense measures, and implementing penetration testing. The article analyzes the current mainstream network attack technologies such as DOS/DDOS attacks and Web penetration attacks, explores corresponding defense and penetration protection technologies, introduces the basic process and methods of penetration testing technology, and finally looks forward to the challenges and opportunities brought by emerging technologies such as artificial intelligence, cloud computing, and the Internet of Things to the field of network security, providing theoretical reference and technical guidance for network security technology research and practice.

Keywords: computer network; network attack technology; penetration protection technology

引言

随着互联网的广泛普及以及计算机网络技术持续向前发展, 网络环境变得日益复杂且更为开放, 网络安全方面的问题渐渐变成了各个行业都重点关注的对象。网络攻击所采用的手段一天比一天多, 而且越来越智能, 这对信息系统的平稳运行以及数据安全形成了十分严峻的考验。传统的防御技术虽说在某种程度上缓解了安全方面的威胁, 但是面对新型的攻击, 其防护的效果还是显得不够充分。所以, 全面且细致地去剖析计算机网络攻击技术, 进一步提升防御以及渗透防护的能力, 系统性地开展渗透测试工作, 这已然成为了保障网络安全极为关键的一个环节。紧扣计算机网络攻防渗透技术这一主题, 从攻击技术分析、防御措施、渗透测试技术以及未来的发展趋势等四个不同的方面来展开阐述, 以此为构建起更为坚实的网络安全防线给予相应的理论支撑以及技术方面的帮助。

1 计算机网络攻击技术分析

1.1 网络攻击概述

网络攻击中是指攻击者主要利用系统漏洞、技术缺陷或人为疏忽, 对网络环境中的硬件设备、软件系统、数据

或用户造成损害的行为。攻击者一般会仔细侦察目标系统的薄弱环节, 运用多种技术手段避开防护措施, 以此达成破坏系统、窃取数据或者干扰正常服务的目的。随着攻击技术持续发展, 攻击方式变得越来越智能化和隐蔽化, 网络安全防御所面临的挑战也日益严峻。

1.2 常见网络攻击类型

网络攻击的类型繁多, 包含从简单的端口扫描、网络嗅探, 一直到复杂的高级持续性威胁 (APT) 均有涉及。常见的攻击手段有拒绝服务攻击 (DOS/DDOS)、系统漏洞利用、网络钓鱼、恶意代码植入以及针对 Web 应用的注入攻击等。

1.2.1 DOS 及 DDOS 攻击技术

拒绝服务攻击 (Denial of Service, DOS) 属于一种攻击手段, 它是借助向目标系统发出数量众多的无效请求, 进而将目标系统的资源耗尽, 致使服务无法正常运转。DOS 攻击一般依靠单一的攻击来源, 虽说具备一定的破坏作用, 然而相对而言是比较容易被识别出来的, 防御起来也并非难事。分布式拒绝服务攻击 (Distributed Denial of Service, DDOS) 与之不同, 它会利用多个处于受控状态

的僵尸主机一同发起攻击，如此一来，攻击的规模得以明显扩大，隐蔽性也得到了极大的提升。DDOS 攻击不但能够冲破传统防御设备所构建的防护网，而且还可能引发网络出现拥塞状况，甚至让系统发生崩溃情况，对业务的连续性产生极为严重的影响。攻击者常常会凭借漏洞去感染大量的终端设备，进而把这些终端组织成僵尸网络，以此来发动规模庞大的协同攻击。对于 DOS/DDOS 攻击而言，其技术防护主要涵盖了流量清洗、访问控制以及行为分析等多种不同层次的防御策略。

1.2.2 系统漏洞攻击技术

程序员所编写的计算机程序难以避免地会存在或多或少不足，而这些漏洞也会在计算机程序的持续使用中逐渐显现出来，但是程序员也会编写更多的补丁来修补程序，原有的系统程序会在补丁的帮助下逐渐完善。从漏洞出现到补丁修复的过程中，会存在一些网络攻击。针对网络协议中存在的缺陷，一些不法分子可能会使用虚假的数据包使程序单纯地认为数据包中的信息是合法的，等到数据包进入系统以后才会影响程序，这属于典型的电子欺骗攻击，其影响程度与技术本身相关。一些不法分子要预先掌握用户计算机系统的情况，才能实现电子欺骗攻击，用户的计算机在遭受攻击的阶段丧失通信能力，不法分子将特定的信息包传输到用户的计算机系统后，执行错误的身份验证，以此来突破计算机的防护程序，由于电子欺骗的攻击需要在特定的情况下实现，许多不法分子会通过修改 IP 地址来获取防火walls 的信任，进行持续不间断的攻击。

1.2.3 Web 渗透攻击技术（SQL 注入、XSS 等）

Web 应用身为现代网络服务极为重要的承载形式，凭借着其开放性以及复杂性这两个特点，已然成为了攻击者眼中主要的攻击对象。SQL 注入攻击是通过往输入数据里植入恶意的 SQL 代码，进而对数据库的操作逻辑予以破坏，最终达成数据出现泄露情况、遭到篡改或者后台服务器被控制的目的。跨站脚本攻击，也就是 Cross-Site Scripting，简称 XSS，它是借助注入恶意的脚本代码这一手段，致使用户的浏览器去执行那些不安全的操作，进而窃取到用户的身份信息，或者是对会话进行劫持。除此之外，Web 渗透攻击还涵盖了跨站请求伪造，即 CSRF，还有利用文件上传漏洞等多种不同的攻击方式。这些攻击技术往往都是依靠着程序设计方面存在的缺陷以及输入校验不够严格的情况来实施的。对于这些攻击的防御，就需要综合运用安全编码规范、输入过滤以及 Web 应用防火墙，也就是 WAF 等一系列的手段来加以应对。

2 网络防御与渗透防护技术

2.1 防火墙与入侵检测系统（IDS/IPS）

防火墙是网络安全领域极为重要的一道防线，其主要职责在于对进出网络的数据流加以监控以及实施相应的控制举措，从而阻断那些未经许可的访问行为，进而切实

保障网络边界的安危状况。现代意义上的防火墙除了能够支撑基于包过滤所涉及的基础性功能之外，还拥有诸如状态检测、应用层过滤以及深度包检测等诸多能力，凭借这些能力来应对日趋复杂的各类攻击行为。入侵检测系统（IDS）以及入侵防御系统（IPS）主要用于对网络以及主机活动展开实时的监测操作，以此来精准识别出其中存在的异常行为以及潜在的威胁情况。IDS 主要是负责发出报警提示信息，而 IPS 则具备自动阻断的相关功能。将防火墙和 IDS/IPS 相互结合起来，便能够构建起多层的防御架构体系，以此有效地防范网络入侵以及恶意攻击等事件的发生，从而切实保障网络环境能够保持稳定且安全的良好状态。

2.2 漏洞扫描与补丁管理

漏洞属于系统安全风险的关键来源之一，及时察觉并修复漏洞在防御攻击方面属于重要环节，漏洞扫描技术借助自动化工具针对系统、应用程序以及网络设备展开全面检测，以此来识别出存在的安全缺陷以及风险点，扫描得出的结果可助力安全人员去评估威胁等级，并制定出具有针对性的修补方案。补丁管理其实就是对系统漏洞实施修补以及升级的这一过程，其能够修复软件缺陷，进而提升系统的稳定性以及安全性，科学的补丁管理流程需要做到及时测试以及部署补丁，防止因为更新不及时或者操作不当致使系统出现异常或者存在安全隐患。把漏洞扫描和补丁管理结合起来，可以有效地封堵攻击者利用漏洞发动攻击的途径。

2.3 Web 应用防护技术

Web 应用因其具备开放性以及复杂性的特点，已然成为网络攻击所着重瞄准的关键目标。Web 应用防护技术涵盖了诸如输入验证、身份认证、权限控制、会话管理以及日志审计等一系列举措，其用意在于从源头处尽力削减攻击所带来的风险。就技术手段来讲，Web 应用防火墙（WAF）可对 HTTP/HTTPS 流量予以实时的监控，进而拦截像 SQL 注入、跨站脚本这类常见的攻击请求，以此来阻止恶意流量进入到后台系统当中。安全编码规范以及漏洞修复构成了减少 Web 漏洞极为重要的基础，而安全测试以及动态防护则能够给予持续不断的保障。除此之外，内容安全策略（CSP）等相关技术同样可以有效地抵御来自客户端的脚本攻击，从而促使 Web 应用的整体安全性得以提升。

3 渗透测试技术与方法

3.1 渗透测试基本流程

渗透测试通常会遵循一系列的阶段，依次是信息收集、漏洞分析、漏洞利用、权限提升、保持访问权限以及编写测试报告等（见图 1）。一开始，测试人员会借助多种多样的手段去收集目标系统的相关信息，像网络拓扑情况、开放的端口状况、服务版本详情以及操作系统的类型等方

面,这些收集到的信息能够给后续的攻击策略给予相应的依据。接着开展漏洞扫描以及风险评估相关工作,从中识别出潜在存在的安全方面的缺陷。之后利用已知的漏洞或者是自行定制的攻击方法来对目标展开攻击尝试,以此来验证这些漏洞实际可利用的可能性,并且尝试着去提升权限,进而达成对系统更为深层次的访问控制目的。要撰写出详尽完备的测试报告,把所发现的安全风险以及对应的修复建议都阐述清楚,从而为企业网络安全防护事宜提供一定的参考依据。渗透测试的整个流程是比较严谨的,始终强调要合法合规行事,务必要确保所有的测试活动都是在获得授权的范围之内开展的。

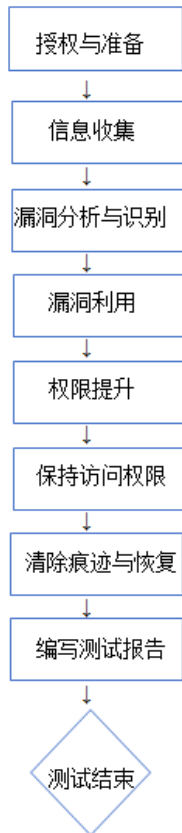


图 1 渗透测试流程图

3.2 信息收集与漏洞扫描技术

信息收集乃是渗透测试当中极为关键的一个基础环节,其主要是借助主动以及被动这两种方式来去获取目标网络还有系统相关的各类信息。就主动方式来讲,这里面包含了像端口扫描、服务探测以及操作系统指纹识别等一系列操作,凭借这些操作便能够较为详尽地将目标环境的具体细节给掌握清楚。而被动方式则是通过公开资源、社交工程或者网络嗅探这类方式来获取信息,如此一来便能够在很大程度上降低被对方发现的风险。漏洞扫描会运用自动化工具针对系统展开全面细致的检测,从而去识别出配置存在错误、软件漏洞没有打补丁以及安全策略有所

缺失等诸多问题。把数据库和漏洞库结合起来之后,扫描工具就能够迅速且精准地定位到已知漏洞,进而为后续的漏洞利用环节筑牢坚实的基础。有效的信息收集工作以及漏洞扫描操作,能够颇为有效地提升渗透测试所具有的针对性以及工作效率。

3.3 漏洞利用与权限提升

漏洞利用在渗透测试里占据着极为关键的地位,它是借助对漏洞的利用来达成对目标系统加以控制或者从中窃取信息的目的。测试人员会依据漏洞扫描所得到的结果,运用各式各样的技术手段去构建攻击载体,像缓冲区溢出、代码注入、逻辑绕过这类情况,进而开展攻击方面的相关行为。当成功地利用了漏洞之后,渗透测试者往往会尝试着去做权限提升这件事,也就是从普通的用户权限去争取获得更高的系统管理权限,以此来对系统的安全态势展开更为全面的评估。权限提升所涉及到的技术包含有本地提权漏洞的利用、提权工具的使用以及对配置错误加以利用等等,其常见的方法涵盖了绕过权限验证、提升进程的权限、获取内核级别的访问等内容。权限提升一方面能够验证漏洞究竟有多么严重的程度,另一方面还能助力于发现后续可能存在的攻击路径,从而进一步提升渗透测试所能达到的深度以及广度。

4 未来发展趋势与技术挑战

4.1 人工智能与机器学习在攻防中的应用

人工智能(AI)以及机器学习(ML)技术于网络安全领域所发挥的应用作用变得日益普遍起来,其一方面给防御事宜增添了全新的工具,另一方面同样被攻击者拿来当作是能够强化自身攻击能力的手段。借助大数据方面的分析操作以及智能模式的识别举措,安全系统便可以更为精确地去检测那些异常的行为以及未知的威胁情况,进而达成实时的响应效果以及实现自适应的防护状态。与此在恶意软件的识别工作、入侵检测相关事务以及异常流量的分析事宜等方面,机器学习算法均展现出了颇为显著的优势特点^[1]。不过,攻击者也会凭借AI技术来开展自动化攻击行动、实施智能化漏洞挖掘操作并且绕开防御机制,如此一来,便能够让攻击的隐蔽性得以进一步提升,其效率同样也会有所提高。所以说,未来的网络安全攻防局面将会呈现出“以AI对抗AI”这样的态势走向,技术双方展开的博弈较量势必会变得更加激烈且复杂多变。

4.2 云计算及虚拟化环境安全问题

云计算的普及应用在很大程度上提高了计算资源所具有的灵活性以及可扩展性,然而与此也催生出全新的安全方面风险。虚拟化技术虽说达成了资源的高效利用目的,可是像虚拟机逃逸、虚拟网络攻击还有跨租户数据泄露这类问题却日渐凸显出来^[2]。云环境具备的多租户共享这一特性致使攻击面变得更为宽广,攻击者存在通过云服务漏洞或者配置错误来获取对多个租户资源控制权的可能性。

除此之外,云平台安全管理的复杂程度有所提高,对于身份认证、访问控制以及数据加密等方面提出了更高的要求。怎样确保云环境的隔离性与数据安全,已然成为网络攻防技术相关研究的关键指向所在。

4.3 物联网 (IoT) 安全挑战

物联网设备广泛普及,给网络攻击开了新入口。IoT设备一般资源有限,安全防护差,常被攻击者盯上。物联网系统设备身份难验证,固件有漏洞,通讯协议不安全^[3]。攻击者能劫持 IoT 设备发动大规模攻击,还能偷敏感信息。物联网种类多、数量大,管理更难。智能家居、工业控制、智慧城市等领域发展快,建物联网综合防护体系迫在眉睫。

5 结语

随着计算机网络技术发展迅速,网络安全问题日益突出,网络攻防渗透技术在保障信息系统安全方面有重要作用,本文分析了主流网络攻击技术及其机制,探讨了网络防御与渗透防护关键技术,介绍了渗透测试流程和方法,

展望了人工智能、云计算、物联网等带来的挑战与机遇,网络攻防技术需不断创新完善,未来安全防护体系要利用先进技术,加强安全防御能力建设,实现动态防御和主动防护,有效应对网络攻击,保障信息系统安全稳定运行,为数字经济发展提供安全保障。

[参考文献]

- [1]程志宇.计算机网络攻防渗透技术分析[J].中国信息界,2024(4):7-9.
- [2]田永民.计算机网络攻防渗透技术研究[J].无线互联科技,2022,19(20):149-151.
- [3]王芸芸.网络安全保障与电力网络攻防技术[J].电子技术,2021,50(11):72-73.

作者简介:张佩云(1989—),女,江苏省淮安市涟水县人,助教,2015年6月毕业于南京信息工程大学,硕士研究生,现在硅湖职业技术学院,计算机科学与技术学院任专业教师。

电力生产过程 PLC 设备国产化替代策略与路径研究

陈小波¹ 邵全¹ 踪家帅¹ 杨文涵² 弭尚文²

1. 国家电投集团东北电力有限公司本溪热电分公司, 辽宁 本溪 117008

2. 中电投东北能源科技有限公司, 辽宁 沈阳 110179

[摘要]可编程逻辑控制器 PLC 是电力生产控制系统的神经中枢, 当前我国电力行业 80% 以上的关键 PLC 仍依赖西门子、施耐德、ABB 等外资品牌, 存在供应链断供、网络安全、运维成本高等风险。随着电力行业的快速发展和国家信息安全需求的提升, PLC 设备的国产化替代已成为趋势, 本文通过研究电力生产过程中 PLC 设备国产化替代的策略与路径, 设计开发了一套自动化测试系统平台, 实现了 PLC 产品的自动化测试。研究结果表明自动化测试具有可行性, 本文为提高可编程逻辑控制器 PLC 产品的测试效率以及降低维护成本提供了理论支撑, 为实现 PLC 设备的自主可控, 提升电力系统的安全性和可靠性, 以及电力行业高质量发展提供保障。

[关键词]电力生产; PLC; 自主可控

DOI: 10.33142/nst.v2i3.17716

中图分类号: TM623

文献标识码: A

Research on the Domestic Replacement Strategy and Path of PLC Equipment in Power Production Process

CHEN Xiaobo¹, SHAO Quan¹, ZONG Jiashuai¹, YANG Wenhan², MI Shangwen²

1. Benxi Thermal Power Branch of SPIC Northeast Electric Power Co., Ltd., Benxi, Liaoning, 117008, China

2. China Power Investment Northeast Energy Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110179, China

Abstract: Programmable logic controller (PLC) is the nerve center of power production control system. Currently, more than 80% of key PLC in Chinese power industry still rely on foreign brands such as Siemens, Schneider, ABB, etc., which poses risks such as supply chain interruption, network security, and high operation and maintenance costs. With the rapid development of the power industry and the increasing demand for national information security, the localization replacement of PLC equipment has become a trend. This article studies the strategies and paths of localization replacement of PLC equipment in the power production process, designs and develops an automated testing system platform, and realizes the automation testing of PLC products. The research results indicate that automated testing is feasible. This article provides theoretical support for improving the testing efficiency of programmable logic controller (PLC) products and reducing maintenance costs. It also guarantees the autonomous controllability of PLC equipment, enhances the safety and reliability of the power system, and ensures the high-quality development of the power industry.

Keywords: electricity production; PLC; self-developed and controllable

引言

随着我国电力行业的快速发展, 自动化控制设备在电力生产过程中的作用日益凸显。作为工业控制的核心设备, 可编程逻辑控制器 PLC 在发电、输电、配电等环节中发挥着关键作用。然而, 长期以来我国电力行业的高端 PLC 设备主要依赖进口, 存在供应链安全和技术受制于人的风险。在当前国际形势下, 推进 PLC 设备的国产化替代具有重要的战略意义。

1 技术背景

1.1 PLC 设备在电力生产中的应用现状

PLC 设备在电力生产过程中扮演着不可替代的角色。在火电厂中, PLC 系统负责锅炉控制、汽轮机监控等重要功能; 在水电站中, PLC 设备用于水轮机组的启停控制和状态监测; 在新能源领域, PLC 系统是风电场和光伏电站控制系统的核心部件。这些应用场景对 PLC 设备

的可靠性、实时性和环境适应性提出了极高要求。

当前我国电力行业 PLC 设备市场呈现外资品牌主导的格局。西门子、施耐德、罗克韦尔等国际巨头占据了大部分市场份额, 特别是在大型发电机组和关键控制系统中。这些外资品牌凭借成熟的技术、完善的生态和长期积累的品牌优势, 形成了较高的市场壁垒。相比之下, 国产 PLC 设备主要应用于中小型项目和辅助系统, 在高端应用领域仍存在明显差距。

1.2 PLC 设备国产化替代面临的挑战

PLC 设备国产化替代面临多方面的挑战。技术层面, 国产 PLC 在处理器性能、通信协议兼容性、软件生态等方面与国际领先水平存在差距。特别是在高可靠性设计和极端环境适应性方面, 还需要持续的技术积累和验证。市场层面, 用户对国产设备的信任度不足, 存在“不敢用、不愿用”的心理障碍, 同时外资品牌建立的生态系统也形

成了较高的转换成本。此外，标准体系不完善也是制约国产化替代的重要因素。目前电力行业自动化控制标准多参照国际标准制定，国产 PLC 设备在标准符合性和互操作性方面面临挑战。产业链协同不足也影响了国产化进程，芯片操作系统等关键基础部件仍依赖进口，制约了国产 PLC 的自主可控程度。

1.3 PLC 设备国产化替代策略

针对上述挑战，本文提出分阶段实施 PLC 设备国产化替代的策略。在初期阶段，可在辅助系统和中小型项目中推广国产 PLC，积累应用经验。中期可逐步向主控系统和大型项目扩展；最终实现全领域、全流程的国产化替代。这一过程需要配套的技术研发路径，重点突破高性能处理器设计、实时操作系统开发、工业通信协议兼容等关键技术。标准体系建设是国产化替代的重要保障，应加快制定符合国情的电力行业 PLC 技术标准，推动国产标准国际化，增强在国际标准制定中的话语权。同时加强产业链协同，推动芯片、操作系统、软件开发工具等基础环节的自主创新，构建完整的国产 PLC 产业生态。

2 PLC 设备国产化替代的实施路径

2.1 测试平台设计

本测试平台制定一套统一的高性能 PLC 评价指标，用量化结果直观展示国产 PLC 的功能强弱和性能差距，帮助用户快速判断和选型。同时平台用软件构建出与真实工业现场等效的虚拟被控对象（数字孪生），低成本、高效率地复现整个控制系统环境。

2.2 系统总体设计

此测试平台运用的是四层分布式架构来展开设计工作的。在传统工业控制系统所具备的现场设备层、控制采集层以及监控层这三层的基础之上，又极具创新性地融入了平台管理层，进而搭建起一个完整的闭环测试生态系统。该系统借助统一的测试管理核心来对多套 PLC 控制系统加以协同管控，各个层级彼此间依靠标准化测试案例、统一通信协议以及实时数据流来达成高效的信息交互。系统总体架构如图 1 所示。

平台管理层充当着系统的指挥中枢这一角色，它将综合控制平台以及指标分析系统予以集成起来，进而肩负起测试任务调度、资源分配还有结果评估等一系列的核心管理方面的职能。测试监视层设置了三套相互独立的测试执行环境，而每一套环境当中都涵盖了 PLC 编程平台、运行监视器以及测试执行器这几部分，其主要负责测试案例的管理工作、程序的下装操作以及对工艺过程实施监控等相关事宜。控制采集层是由三套处于并行运行状态的 PLC 设备所组成的，这些设备各自分别去执行控制算法、驱动相应的执行机构并且采集现场的数据信息。现场设备层借助三组虚拟仿真系统来构建起一个高保真的测试环境，从而能够精准地模拟出实际工业场景里面设备的行为状况

以及工况特性方面的相关内容^[1]。

这种分层架构的设计方式，一方面确保了各个功能模块能够保持独立的状态，另一方面借助标准化接口达成了系统的高度集成效果，从而给自动化测试给予了稳固可靠的平台方面的支撑。

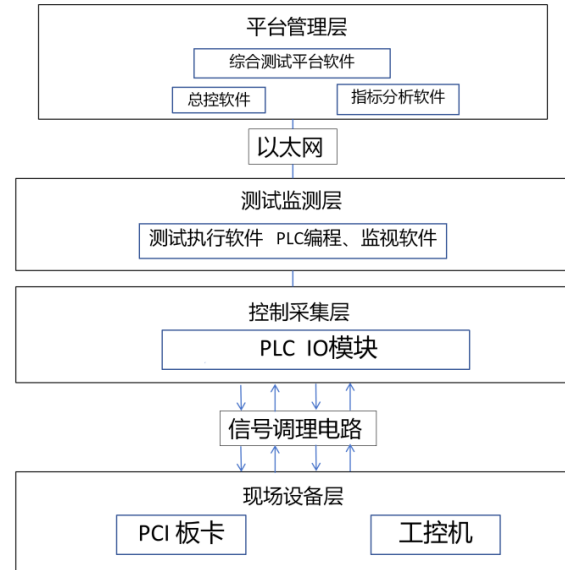


图 1 系统总体架构

2.3 硬件设计

系统硬件架构由综合测试平台、PLC 控制系统和等效仿真系统三大核心组件构成。

(1) 综合测试平台在系统当中充当着中枢控制单元的角色，其选用的是工业级计算机架构，并且还配备了多通道数据采集卡以及高速以太网通信模块。该平台借助专用的人机交互界面来达成对测试流程的全链路管理目的，能够支持测试用例实现动态加载，同时也可对测试参数做到实时配置，并且还能对测试结果完成自动采集以及分析操作。其核心功能涵盖了测试方案管理、测试任务调度、数据可视化展示以及测试报告生成等方面。

(2) PLC 控制系统有着三套彼此独立的控制单元，在这当中有两组选用的是国产高性能 PLC，其型号分别为 NA400 以及 LK210，而作为对照的那一组则采用的是西门子 S7-400PLC。每一个控制单元都配备了完整的 I/O 模块、通信模块还有专用的编程软件，由此便形成了一条完整的控制回路。凭借模块化的设计方式，该系统能够很好地支持不同类型 PLC 实现快速的接入操作以及切换操作，进而确保测试平台具备通用性以及扩展性这两个方面的特性。

(3) 等效仿真系统是以 PCIe 总线架构为基础来搭建的，其运用了 NI 公司所出产的高精度数据采集卡，同时结合 LabVIEW 虚拟仪器平台，进而构建出一个设备仿真的环境，这个环境有着相当高的保真度。此系统当中内置

有电机、阀门以及传感器等一系列在工业设备中较为常见的设备模型,它还支持借助图形化编程的方式去快速地搭建起测试场景。凭借参数化建模技术,用户能够依据实际需求灵活地对模型的各项参数加以调整,以此来模拟处在不同工况之下的设备具体的运行状态^[2]。

三大系统借助千兆工业以太网达成数据互联互通的状态,由此搭建起完整的硬件在环测试环境,进而形成一个完整的闭环测试体系,这个体系涵盖了从指令下发开始,经过逻辑执行这一环节,一直到状态反馈为止的整个过程。

2.4 软件设计

软件系统采用了分层架构来开展设计工作,依照标准化的开发流程顺利完成了需求分析、系统设计、模块开发以及集成测试等一系列相关事宜。在开发环境方面,选用了跨平台框架 Qt,同时搭配 MySQL 数据库,并且还借助 Rational Rose 等建模工具来助力系统架构的设计工作。

系统软件功能划分为两大模块:

系统管理模块,其中囊括了多级用户权限管理方面的内容,还有操作日志追踪的相关功能,另外自动报表生成以及人机界面管理等也都包含在内,以此来保障系统的安全性以及可维护性。

业务应用模块方面,其集成了像平台导航这类功能,还有设备状态的监控功能,另外指标测试分析以及实时数据的显示功能也都包含其中,当然文档输出的核心功能同样具备,进而能够给出完整的测试解决方案。

核心算法模块运用 C++和 Python 混合编程的方式予以实现,数据处理层凭借 MATLAB 引擎来构建,达成了测试数据的实时分析以及可视化呈现。借助插件化架构,该系统能够对功能模块实现动态加载以及拓展操作。

在报告生成这个阶段当中,当测试工作全部完成之后,系统会自动去生成一份完整的报告,这份报告里面包含了测试概要、数据分析以及性能评价等内容,并且还支持报告预览、打印以及导出这些功能,进而形成一个完整的测试闭环。

2.5 PLC 指标分析过程

2.5.1 测试流程

本系统采用标准化的自动化测试流程,具体包含以下五个阶段:

(1)测试准备阶段:用户通过身份验证登录系统后,首先选择待测 PLC 设备(支持单设备或多设备并行测试),然后根据测试需求选择基础性能测试或应用场景测试模式。基础测试主要评估 PLC 固有性能参数,场景测试则模拟实际工业应用环境。

(2)测试执行阶段:系统根据测试方案生成标准化测试指令,通过 TCP/IP 协议将指令集下发至各 PLC 监控主机。测试控制终端自动执行测试脚本,从案例库中提取

对应测试案例,完成程序下载与启动^[3]。

(3)数据采集阶段:PLC 执行测试程序过程中,通过 PCIe 接口与等效仿真系统进行实时数据交换。仿真系统接收控制指令并反馈设备状态信号,PLC 依据输入信号计算各项性能指标。

(4)数据分析阶段:测试平台自动采集各 PLC 的测试数据,采用多维度对比分析方法,支持表格、柱状图、曲线图等多种可视化展示方式。系统提供专业数据分析工具,支持用户自定义图表样式和统计分析参数。

(5)报告生成阶段:测试完成后,系统自动生成包含测试概要、数据分析和性能评价的完整报告,支持报告预览、打印和导出功能,形成测试闭环。

2.5.2 PLC 指标分析

2.5.2 PLC 指标分析

此测试平台搭建起了完备的 PLC 性能评估体系,该体系包含处理器核心效能以及输入输出特性这两个维度。就处理器性能来讲,系统针对工作速度、中断响应速度、满载运行速度还有持续运行稳定性等关键参数展开量化的评估操作。而在输入输出性能这个层面上,平台着重对输出响应时间、抗干扰输出响应时间、信号采集精度以及灵敏度等核心指标予以测试。

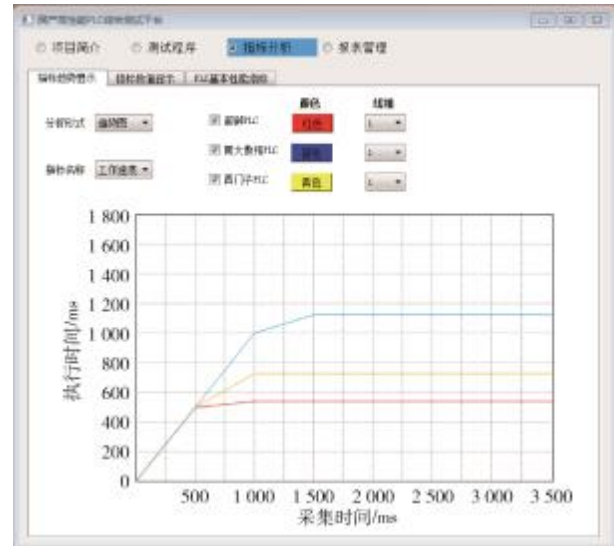


图2 指标分析界面

在测试期间运用标准化的测试程序以及精密的计量办法。就处理器工作速度测试来讲,借助执行 $a=a+1$ 这一基础指令的循环运算,把单次执行的时间累积放大 5000 倍,以此来精准测量各个型号的 PLC 完成相同计算任务所耗费的时间周期。执行的时长和处理器的运算效率呈现出负相关的态势,进而能够客观地反映出不同设备在性能方面存在的差异。指标分析界面如图 2 所示,该界面集成多维度数据可视化功能,支持测试结果的实时对比与分析研判。

3 PLC 硬件自动化测试的设计与实现

3.1 PLC 硬件自动化测试的设计方案

PLC 硬件自动化测试系统采用的是软硬件深度融合这样的技术路线,由此成功构建起了完整的自动化验证平台。

(1) 在硬件架构这块,系统把美国国家仪器(NI)所出品的高性能数据采集卡当作核心测试硬件来选用。此板卡有着相当不错的测量精度,其运行特性也极为稳定,并且还配有丰富的用户接口,这些都能够很好地契合工业级测试方面的诸多需求。凭借着经过精心设计而成的测试电路,该系统可针对 PLC 的各个输入输出通道展开全面检测,这里面既涉及对模拟量信号采集精度的测试,也有对数字量通道逻辑功能的验证^[4]。

(2) 在软件开发这一层面,凭借 LabVIEW 所营造的图形化编程环境来着手构建测试平台。此平台运用了虚拟仪器方面的技术,借助模块化的方式去开展设计工作,进而达成了对测试资源加以灵活配置的目的。其系统所具备的核心功能涵盖了如下方面:和 PLC 控制器之间能够实现双向的数据通信;可以对 NI 板卡予以精确的控制操作;能够针对测试过程展开图形化的实时监控;并且还能够对测试数据实施智能且细致的分析与处理工作。硬件自动化测试环境如图 3 所示。

测试平台凭借软硬件系统密切配合起来,可对 AI/AO 模块的精度特性、稳定性状况、通道隔离度予以全面评估,还能检测 DI/DO 接口的逻辑功能,进而给 PLC 硬件性能给出客观且准确的量化依据。

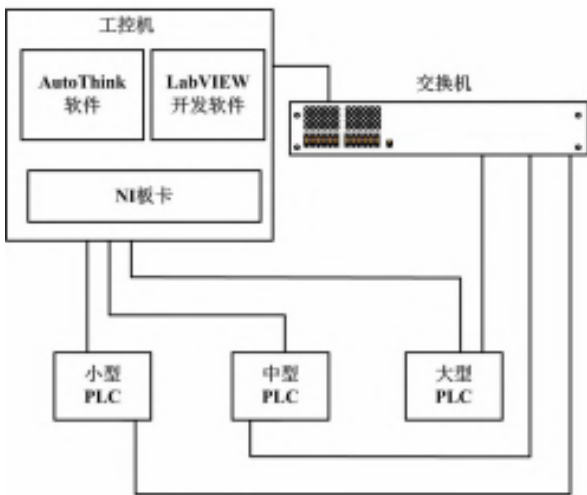


图 3 硬件自动化测试环境

3.2 PLC 硬件自动化测试的测试流程

PLC 硬件自动化测试遵循标准化的作业流程,确保测试结果的一致性和可靠性:

在测试准备阶段,要先借助专用编程软件来创建标准化的测试工程,并且通过 LabVIEW 平台去调用系统接口,进而把组态程序下载到目标 PLC 当中,同时完成对硬件

通道工作模式的配置^[5]。

在测试执行这个阶段当中, LabVIEW 测试软件能够精准地对 NI 板卡加以操控,进而生成多种多样的测试信号,像模拟量输入信号、数字量激励信号以及通信指令等都包含在内,并且还借助动态链接库技术同 PLC 构建起实时的数据交互通道,以此来采集测试进程里各项性能参数的具体情况。在结果处理这个阶段,测试系统会自动去完成数据的记录以及分析方面的工作,进而生成一份详细的报告,这份报告里面包含了测试所得到的数据、性能呈现出的曲线状况以及相应的结论与建议等内容,并且还能够实现将测试数据以结构化的形式进行存储。

3.3 流程框架设计及测试场景

系统采用 Jenkins 持续集成平台实现测试流程的自动化调度,具体执行流程如下:

(1) 环境准备:自动去运行部署脚本,还要安装去最新版本的编程软件,并且记得更新 PLC 固件,通过这些操作来保证测试环境能够保持一致性。

(2) 软件测试:执行用户界面测试套件,以此来验证编程软件的各项功能,并且能够自动生成 UI 测试报告。

(3) 固件测试:运行嵌入式软件测试案例,评估控制器固件的稳定性和可靠性,输出固件测试报告。

(4) 结果反馈:将全部测试报告通过邮件系统自动分发至项目相关人员。

测试流程方面,其支持灵活的配置方式,用户依据自身的实际需求状况,可自主选择去执行 UI 测试、固件测试或者完整的测试套件。PLC 自动化测试系统平台示意图如图 4 所示。

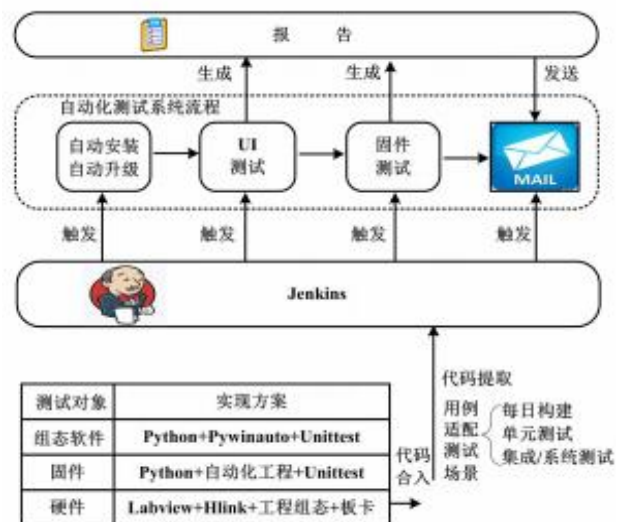


图 4 PLC 自动化测试系统平台示意图

该测试平台已然在和利时 LE、MC、LK 系列 PLC 产品以及 AutoThink 编程软件方面获得了实际的应用。系统能够支持三种较为典型的测试场景:

(1) 每日构建测试: 挑选出那些能够针对关键功能的测试案例, 进而将其组合成一个快速验证套件, 以此来确保每日构建所得软件版本的基本质量得以保障。

(2) 就单元测试而言, 会采用一套专门针对核心功能的测试案例集, 以此来保证在把代码提交到集成仓库之前, 其基本功能能够保持正确的状态。

(3) 集成或者系统测试, 依据版本变更的具体范围来开展全面或是定向的测试工作, 以此来验证新增功能和既有功能在兼容性以及稳定性方面的状况。

4 结论

本文设计并实现了以 PLC 产品及其编程软件为对象的自动化测试系统平台。该平台对不同的被测对象选取了不同的测试方案, 并使用 Jenkins 将各部分流程串接起来, 实现了整体的自动化测试。该平台可满足每日构建测试、单元测试和集成测试场景的使用。该平台的投用大大提升了 PLC 产品的测试效率及产品稳定性。

PLC 设备国产化替代是提升我国电力行业自主可控能力的重要举措。通过分阶段实施策略、关键技术攻关、标准体系建设和产业链协同, 可逐步实现电力生产过程中 PLC 设备的自主可控。这一过程需要政府、企业、科研机构和用户的共同努力, 形成推进国产化替代的合力。未来随着技术的进步和应用的深入, 国产 PLC 设备有望在

性能、可靠性和服务等方面达到国际领先水平, 为我国电力行业的高质量发展提供坚实支撑。

[参考文献]

- [1] 史腾虎, 李少波, 于丽娅, 等. PLC 编程方法方式研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(7): 31-36.
- [2] 董凯. “十四五”智能制造发展规划解读及趋势研判[J]. 中国工业和信息化, 2022(1): 26-29.
- [3] 王奚, 王新月, 李航, 等. 面向 PLC 产品的自动化测试系统平台设计与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43(5): 9-11.
- [4] 许大好, 李询, 谢倩. 用 Matlab 控制 NI 数据采集卡实现实时数据采集[J]. 常州工学报, 2006, 19(5): 35-38.
- [5] 邢玲玲. 基于 labview 的自动控制原理虚拟实验系统[J]. 电子测试, 2020, 1(15): 32-34.

作者简介: 陈小波 (1973—), 男, 汉族, 辽宁阜新, 本科, 辽宁工程技术大学, 研究方向: 控制技术; 邵全 (1988—), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 本科, 沈阳工程学院, 研究方向: 电气工程自动化; 踪家帅 (1993—), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 本科, 沈阳工程学院, 研究方向: 自动化; 杨文涵 (1994—), 女, 汉, 辽宁沈阳人, 硕士, 东北大学, 研究方向: 自动化控制; 弭尚文, (1968—), 男, 汉, 辽宁抚顺人, 本科, 东北电力大学, 研究方向: 自动化控制。

Viser Technology Pte. Ltd.

公司地址

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

官方网站

www.viserdata.com

