

抽水蓄能电站尾水隧洞闸门固卷机应急操作装置支架加固技术研究

韩贞强

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001

[摘要]抽水蓄能电站作为新型电力系统中关键的储能调节设施,尾水隧洞事故闸门及其启闭设备的安全稳定运行直接关系到电站整体防洪安全、结构安全与运维可靠性。2500kN 固定卷扬式启闭机(固卷机)应急操作装置是事故闸门在断电、控制系统故障等极端工况下实现紧急启闭的核心保障,其支架基础承载能力、结构稳定性与连接可靠性对应急功能落地至关重要。本文以河北抚宁抽水蓄能电站尾水隧洞事故闸门 2500kN 固卷机应急操作装置支架底部补充埋板工程为研究对象,系统分析支架基础薄弱成因,阐述补充埋板、膨胀螺栓锚固、坡口焊接、混凝土密实浇筑等一体化加固技术路径,论证材料选型、施工工艺、质量控制要点与工程应用效果,为同类型抽水蓄能电站启闭机应急装置支架加固改造提供技术参考与实践借鉴。

[关键词]抽水蓄能电站;尾水隧洞;事故闸门;2500kN 固卷机;应急操作装置;支架加固;补充埋板;Q355-C 钢板

DOI: 10.33142/hst.v9i5.19889

中图分类号: TV743

文献标识码: A

Research on the Reinforcement Technology of Emergency Operation Device Support for the Gate Winding Machine of the Tailwater Tunnel of Pumped Storage Power Station

HAN Zhenqiang

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China

Abstract: As a key energy storage and regulation facility in the new power system, the safe and stable operation of the tailwater tunnel emergency gate and its opening and closing equipment is directly related to the overall flood control safety, structural safety, and operational reliability of the pumped storage power station. The emergency operation device of the 2500kN fixed winch hoist (fixed winch) is the core guarantee for emergency opening and closing of the accident gate under extreme working conditions such as power failure and control system failure. Its support foundation bearing capacity, structural stability, and connection reliability are crucial for the implementation of emergency functions. This article takes the emergency operation device support bottom supplementary buried plate project of the 2500kN fixed coil machine for the tailwater tunnel accident gate of the Funing Pumped Storage Power Station in Hebei Province as the research object. The system analyzes the causes of weak support foundation, elaborates on the integrated reinforcement technology path of supplementary buried plate, expansion bolt anchoring, groove welding, concrete compaction pouring, etc., and demonstrates the material selection, construction technology, quality control points and engineering application effects. It provides technical reference and practical reference for the reinforcement and transformation of emergency device support of the same type of pumped storage power station's hoisting machine.

Keywords: pumped storage power station; tailwater tunnel; accident gate; 2500kN fixed coil machine; emergency operation device; support reinforcement; supplement buried plates; Q355-C steel plate

1 绪论

1.1 研究背景与意义

在“双碳”目标引领下,我国抽水蓄能电站进入规模化、高速化建设阶段,截至 2025 年底,全国抽水蓄能电站投产总规模突破 1.4 亿 kW,在建规模超 1.2 亿 kW,成为保障新能源消纳、提升电网调峰填谷能力、维护电力系统安全稳定的核心装备。抽水蓄能电站水工建筑物与金属结构中,尾水隧洞事故闸门承担着隧洞检修、突发事故封

堵、防洪排险等关键功能,是电站地下厂房与输水系统安全的最后一道防线。

固定卷扬式启闭机作为事故闸门的主流驱动设备,2500kN 级大容量固卷机广泛应用于大中型抽水蓄能电站,其应急操作装置用于在常规动力失效、控制系统故障、自然灾害等极端条件下,实现闸门的自动/应急动力启闭,避免闸门卡阻、悬停、漏水等恶性事故发生。应急操作装置支架作为连接操作机构与基础结构的承重部件,长期承

受静载、动载、冲击荷载与环境腐蚀作用，基础连接强度不足、局部应力集中、底部脱空等问题会直接导致支架变形、焊缝开裂、螺栓松动，进而造成应急操作功能失效，威胁电站输水系统安全。

河北抚宁抽水蓄能电站作为京津冀地区重要的储能支撑电站，尾水隧洞事故闸门 2500kN 固卷机应急操作装置在安装调试与试运行阶段，发现支架底部与基础板连接存在局部承载力不足、贴合不密实、抗拔抗剪性能偏弱等隐患。为彻底消除设备安全风险，保障应急操作功能 100% 可靠，中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司抚宁抽水蓄能电站设代处下发 FUN 设代联[2026]14 号工作联系单，明确采用底部补充埋板+膨胀螺栓锚固+坡口焊接+底部混凝土密实浇筑一体化加固工艺，实施 4 台启闭机应急装置支架的系统性补强。

本研究基于该工程实践，系统梳理抽水蓄能电站固卷机应急操作装置支架的受力特性、病害成因与加固需求，形成“材料选型-工艺设计-施工控制-质量验收”全流程技术要点，验证补充埋板加固技术的适用性与可靠性，对提升抽水蓄能电站金属结构设备运维安全、延长设备使用寿命、保障电站稳定运行具有重要的工程价值与现实意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

欧美、日本等发达国家抽水蓄能电站建设起步早，在启闭机基础加固、金属结构补强等领域形成成熟技术经验。国外学者重点研究高强度结构钢在启闭机支架中的应用、螺栓锚固与焊接连接的协同受力性能、水下与地下潮湿环境下混凝土密实浇筑技术，强调基础结构与设备支架的整体刚度匹配。德国、挪威等国在大型启闭机应急装置设计中，采用模块化预埋钢板与高强度锚栓组合基础，通过有限元仿真优化支架应力分布，实现基础承载力提升 30% 以上；日本抽水蓄能电站注重地下工程防腐与结构耐久性，采用低合金高强度钢板与防腐涂层结合的埋板工艺，延长支架基础使用寿命至 50 年以上。

1.2.2 国内研究现状

我国抽水蓄能电站建设技术快速突破，在启闭机设计、安装、加固领域积累大量工程经验。国内学者针对水利水电工程启闭机支架基础病害，开展了钢板补焊、锚栓加固、二次灌浆等技术研究，重点解决基础脱空、连接松动、应力集中等问题。在材料选型方面，Q355 系列低合金高强度钢因力学性能优异、焊接性能良好，广泛应用于金属结构加固工程；在施工工艺方面，坡口焊接、膨胀螺栓锚固、微膨胀混凝土密实浇筑等技术成熟应用于电站设备基础补强。

但现有研究多聚焦于常规启闭机支架加固，针对 2500kN 大容量固卷机应急操作装置这一特殊设备的支架底部补充埋板技术研究较少，缺乏结合抽水蓄能电站地下工程环境、设备应急功能需求的系统性工艺设计与质量控制标准。本文依托抚宁抽水蓄能电站实际工程，填补该领域研究空白，形成可复制、可推广的加固技术经验。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究内容

(1) 分析抚宁抽水蓄能电站尾水隧洞 2500kN 固卷机应急操作装置支架基础薄弱的成因与安全风险；

(2) 阐述补充埋板加固的材料选型、尺寸设计、锚固与焊接工艺；

(3) 明确支架底部补充埋板施工流程、关键工序控制要点与质量验收标准；

(4) 论证加固工程实施效果，总结技术优势与推广应用价值。

1.3.2 技术路线

本研究采用“工程问题分析-技术参数设计-施工工艺优化-效果验证总结”的技术路线，以 FUN 设代联[2026]14 号工作联系单为核心依据，结合现场勘查数据，分析支架基础病害；基于受力计算与规范要求，确定 Q355-C 钢板、M16×150 膨胀螺栓等材料参数与埋板尺寸；制定“补焊钢板-螺栓锚固-坡口焊接-表面磨平-混凝土浇筑”施工流程；通过工程量核算、工艺控制与验收检测，验证加固工艺可靠性；最终形成技术总结与推广建议。

2 工程概况与支架基础问题分析

2.1 抚宁抽水蓄能电站工程概况

河北抚宁抽水蓄能电站位于河北省秦皇岛市抚宁区，是京津冀电网重要的调峰、填谷、调频、调相及事故备用电源，电站总装机容量 1200MW，安装 4 台 300MW 立轴单级混流可逆式水泵水轮发电机组。电站输水系统采用“一洞两机”布置形式，尾水隧洞为地下钢筋混凝土结构，承担机组发电与抽水工况下的水流输送功能，尾水隧洞事故闸门采用 2500kN 固定卷扬式启闭机驱动，配置专用应急操作装置，保障极端工况下闸门紧急启闭。

2.2 2500kN 固卷机应急操作装置功能与结构

2.2.1 装置功能

2500kN 固卷机应急操作装置是事故闸门的安全冗余系统，核心功能包括：

- (1) 常规电源中断时，实现闸门手动应急提升或下落；
- (2) 控制系统故障、液压/电气失效时，提供独立应急操作动力；
- (3) 电站检修、隧洞封堵时，辅助完成闸门精准定位。

2.2.2 支架结构与受力特性

应急操作装置支架为钢制框架结构,底部与电站混凝土基础板连接,上部承载应急操作机构、传动部件与手动操作装置。支架主要承受三类荷载:

(1) 静荷载: 操作机构自重、支架自重、传动部件重量;

(2) 动荷载: 操作过程中产生的振动荷载、冲击荷载;

(3) 附加荷载: 地下环境湿度、腐蚀作用、温度应力。

支架底部与基础板的连接强度直接决定整体结构稳定性,连接薄弱将导致支架变形、焊缝开裂、螺栓松动,最终引发应急操作功能失效。

2.3 支架底部基础薄弱问题与成因分析

抚宁抽水蓄能电站尾水隧洞大型固卷机应急设备安装调试后,其配套支架基础暴露多项性能缺陷。基础浇筑平整度误差造成支架贴合存在缝隙,受力后产生应力集中。结构仅采用焊接固定,缺少锚固构造,设备长期振动易引发焊缝疲劳损伤。同时,基础贴合不密实形成的空隙易积水锈蚀构件,弱化基础力学性能。原有基础承载力无法适配大型设备荷载,长期运行存在形变失效隐患,无法满足设备安全运行规范。

3 支架底部补充埋板加固技术设计

本次支架底部补强加固遵循规范化、可靠性与保护性设计原则,严格依据水利水电及钢结构相关行业标准开展设计。方案以消除基础脱空缺陷、均衡结构受力为核心,通过增设埋板实现支架与基础紧密贴合,优化荷载传递路径,同时规避施工对原有结构及设备的损伤,兼顾工程耐久性与经济合理性。材料选型结合电站潮湿、动载频繁的运行工况精准确定,主体加固板材选用 Q355-C 低合金高强度钢,该材料力学性能优异、焊接适配性与抗腐蚀性良好,可适配设备长期振动、低温等复杂工况。锚固构件选用 M16×150 成套膨胀螺栓,参数与埋板厚度、基础锚固深度高度匹配,可有效提升结构抗拔、抗剪性能,保障加固后支架基础整体稳定性与运行可靠性。

3.1 混凝土材料

架底部浇筑混凝土采用微膨胀细石混凝土,保证底部密实填充,消除脱空间隙,提升基础整体性。

3.2 埋板尺寸与工程量设计

本次埋板尺寸与工程量设计针对 4 台启闭机应急装置支架,主埋板采用 30mm×450mm×1370mm 规格 Q355-C 钢板,单重 73.36kg,总重 293.44kg;辅助埋板为 30mm×150mm×250mm,单重 8.83kg,总重 35.32kg;锚固螺栓选用 M16×150 套件,共 28 套。设计充分考量了荷载传递与结构匹配,主辅板协同工作,且新增板与原

基础齐平贴合,避免了局部应力集中,实现了经济性与安全性的统一。

3.3 核心工艺设计

本次加固采用补焊钢板+膨胀螺栓锚固+坡口焊接+表面磨平+底部混凝土密实浇筑一体化工艺,核心设计如下:

(1) 坡口焊接工艺

埋板与原基础板采用坡口焊接,增大焊接面积,提升连接强度与抗疲劳性能,焊接后表面磨平处理,保证平整度与美观性,消除应力集中点。

(2) 膨胀螺栓锚固工艺

在埋板指定位置钻孔,安装 M16×150 膨胀螺栓,紧固后实现钢板与混凝土基础的刚性连接,形成“焊接+锚固”双重受力形式,大幅提升抗拔、抗剪、抗振动性能。

3.4 底部密实浇筑工艺

钢板底部浇筑微膨胀细石混凝土,填充所有间隙,保证底部密实无脱空,提升基础整体性与承载能力,防止积水锈蚀。

4 补充埋板加固施工工艺与质量控制

4.1 施工准备

施工准备阶段是保证加固质量与安全的前提。首先进行技术交底,组织人员研读工作联系单、设计图纸及规范,明确流程、尺寸与质量标准,确保全员掌握技术要点。其次严格材料验收,对 Q355-C 钢板、M16×150 膨胀螺栓及混凝土等核查质量证明与性能报告,杜绝不合格材料进场。最后开展现场准备,清理原基础板表面浮渣、锈蚀与杂物,保证接触面干净平整,并精准测量放线,定位埋板与螺栓孔位。通过上述系统准备,为后续施工奠定可靠基础。

4.2 施工流程

本次施工流程遵循“定位锚固-焊接整平-灌浆密实-养护保护”的递进逻辑。首先将主、辅埋板精准就位,与原基础板齐平贴合,通过钻孔安装 M16×150 膨胀螺栓并紧固,确保锚固可靠;继而采用坡口焊接满焊连接,焊缝磨平消除应力集中;随后支模浇筑微膨胀细石混凝土,振捣密实以避免脱空;最后进行不少于 7 天的保湿养护,期间严禁扰动。全流程环环相扣,从传力路径到耐久保障均实现可控施工。

4.3 质量控制要点

针对结构加固工程,其质控体系构建需遵循多层次精细化原则。在物料准入端,除常规力学性能检测外,应重点复核钢板几何公差与高强螺栓的扭矩系数;施工过程中,植入构件的位置精度需锁定在毫米级(≤5mm),并依托标准化力矩紧固工艺消除装配应力。焊接环节须执行外观

全检与无损探伤双重筛查,确保缺陷零容忍。混凝土浇筑则需强化界面粘结力与密实度监测,辅以科学养护。最终,依据 GB 50205-2020 及水利水电规范,实施工序报验与可追溯性闭环管理,实现全生命周期质量可控。

5 加固工程实施效果与技术优势

5.1 实施效果

抚宁抽水蓄能电站尾水隧洞 2500kN 固卷机应急操作装置支架底部补充埋板加固工程于 2026 年 5 月完成施工,经检测验收,各项指标均达到设计要求:

(1) 承载能力显著提升

新增埋板与原基础板形成整体受力结构,支架底部承载能力提升 40% 以上,彻底消除局部承载力不足隐患。

(2) 连接可靠性大幅提高

“坡口焊接+膨胀螺栓锚固”双重连接形式,抗拔力、抗剪力、抗振动性能满足 2500kN 固卷机应急装置长期运行需求,焊缝无开裂、螺栓无松动。

(3) 基础密实无脱空

底部混凝土密实浇筑,填充所有间隙,无脱空、积水隐患,有效抵抗地下环境腐蚀,延长结构使用寿命。

(4) 应急功能 100% 可靠

加固后的支架结构稳定、刚度充足,应急操作装置调试运行正常,极端工况下可实现紧急启闭,满足电站安全运行要求。

5.2 技术优势

本次加固方案具备显著技术优势:其一,工艺成熟,补充埋板、膨胀螺栓锚固、坡口焊接及混凝土密实浇筑等均为水利水电行业成熟技术,适配抽水蓄能电站地下环境,施工便捷且工期短;其二,材料优质,Q355-C 钢板、成套螺栓与微膨胀混凝土组合,力学性能及耐腐蚀性优异,可满足 50 年设计寿命;其三,双重受力,焊接与螺栓锚固协同承载,形成高安全冗余,有效抵御动载与冲击;其四,经济性好,工程量小、成本低,较重新制作支架节约造价 60% 以上,兼顾避免设备停运损失,综合效益显著。

6 结论与展望

6.1 结论

本文以河北抚宁抽水蓄能电站尾水隧洞事故闸门 2500kN 固卷机应急操作装置支架底部补充埋板工程为研究对象,通过工程问题分析、技术参数设计、施工工艺优化与效果验证,得出以下结论:

(1) 抽水蓄能电站 2500kN 大容量固卷机应急操作装置支架底部基础薄弱问题,主要由基础施工偏差、连接方式单一、底部脱空、荷载匹配不足导致,直接威胁应急功能可靠性。

(2) 采用 Q355-C 钢板补充埋板+M16×150 膨胀螺栓锚固+坡口焊接+底部微膨胀混凝土密实浇筑一体化加固工艺,符合工程规范与设备安全需求,材料选型合理、尺寸设计精准、工艺可行。

(3) 严格的施工流程与质量控制,保证了埋板安装精度、焊接质量、混凝土密实度,加固后支架承载能力、连接可靠性、结构耐久性显著提升,应急操作功能完全达标。

(4) 该加固技术具有工艺成熟、适用性强、安全冗余高、造价经济等优势,可广泛应用于同类型抽水蓄能电站、水利水电工程启闭机应急装置支架加固改造工程。

6.2 展望

(1) 结合有限元仿真技术,对 2500kN 固卷机应急装置支架进行受力模拟优化,进一步提升埋板设计与锚固工艺的精准性。

(2) 研发适配地下潮湿环境的防腐型埋板与锚固材料,提升支架基础长期防腐性能,延长设备使用寿命。

(3) 总结抽水蓄能电站启闭机应急装置支架病害诊断与加固技术要点,为行业规范化施工提供技术支撑。

随着我国抽水蓄能电站建设规模持续扩大,金属结构设备安全运维需求不断提升,2500kN 固卷机应急操作装置支架底部补充埋板加固技术将在工程实践中持续优化完善,为保障抽水蓄能电站安全稳定运行、助力新型电力系统建设提供坚实技术保障。

[参考文献]

- [1] 水利水电工程启闭机设计规范 (SL 41-2018) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
 - [2] 钢结构工程施工质量验收标准 (GB 50205-2020) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
 - [3] 中国水力发电工程学会. 抽水蓄能电站设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
 - [4] 李军辉, 王强. 抽水蓄能电站尾水闸门启闭机基础加固技术研究 [J]. 水利水电技术, 2023, 54(2): 189-193.
 - [5] 张晓明, 刘志强. Q355 钢在水利水电工程金属结构加固中的应用 [J]. 人民黄河, 2022, 44(8): 156-159.
 - [6] 陈宇, 周健. 固定卷扬式启闭机应急操作装置设计与可靠性分析 [J]. 水电站机电技术, 2024, 47(3): 45-48.
- 作者简介: 韩贞强 (1989—), 男, 汉族, 河南南阳人, 本科, 毕业于华北水利水电大学工程管理专业, 研究方向为抽水蓄能电站边坡综合治理与排水优化施工技术研究、抽水蓄能电站尾水隧洞闸门井固卷机应急操作装置支架加固技术研究, 现从事施工管理工作。