

现代技术在溜渣深竖井开挖及支护施工中的应用与优化研究

黄启崇

广西金河矿业股份有限公司/广西途昊集团有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21034

[摘要] 岩溶地貌矿区地层裂隙发育、岩体破碎且地下水富集,深部溜渣深竖井施工极易出现断面成型偏差、溜渣堵塞、围岩失稳等工程问题,传统施工工艺难以适配区域复杂的地质工况。本文以某岩溶山区矿山竖井工程为研究载体,依托三维爆破调控、分层溜渣防堵、数值模拟差异化支护以及智能工序协同的改良策略开展技术优化,通过现场实测数据核验施工成效,有效提升岩溶矿区竖井施工的稳定性和作业效率以及经济价值,可为西南同类矿山工程提供可靠的技术参考。

[关键词] 溜渣深竖井; 现代施工技术; 开挖支护; 工艺优化

中图分类号: TV52 **文献标识码:** A

Application and Optimization Research of Modern Technology in the Excavation and Support Construction of Deep Slurry Shafts

Qichong Huang

Guangxi Jinhe Mining Co., Ltd. / Guangxi Thuhao Group Co., Ltd.

[Abstract] In karst terrain mining areas, the development of stratum fractures, rock mass fragmentation, and groundwater accumulation make deep shaft construction prone to engineering issues such as cross-section deviation, slag blockage, and surrounding rock instability, which traditional construction techniques struggle to adapt to. Taking a vertical shaft project in a karst mountainous mine as the research case, this study employs improved strategies including three-dimensional blasting control, layered slag discharge anti-clogging, numerical simulation-based differentiated support, and intelligent process coordination to optimize technology. Through field measurement data validation, the study effectively enhances the stability, operational efficiency, and economic value of vertical shaft construction in karst mining areas, providing reliable technical references for similar projects in the southwestern region.

[Key words] deep vertical shaft for ore run-off; modern construction technology; excavation and support; process optimization

引言

西南矿山开发工作逐步转向深部地层,岩溶区域大量矿山的深竖井基建需求持续上涨,复杂特殊的喀斯特地质条件大幅增加了竖井开挖与支护的施工难度,老旧粗放的施工模式容易诱发各类安全隐患与质量缺陷。溜渣深竖井作为矿山出渣、通风以及排水的核心竖向构筑物,施工质量直接决定矿山开采的整体安全性与施工进度。本次研究结合区域地质特点优化现代施工技术,能够切实改善岩溶地层竖井的施工短板,对推动区域矿山深部工程标准化建设具备重要的现实意义与工程价值。

1 工程概况

本次研究依托某深部矿山主体工程开展,场区坐落于典型喀斯特岩溶地貌核心区域,复杂的地质环境给井下施工作业带来多重限制。该矿山配套建设的深部溜渣竖井承担矿石转运、

巷道通风以及排水保障等关键功能,场地地层岩体破碎程度高、裂隙发育范围广,多处区段赋存软弱夹层与地下水富集层,天然形成的复杂地质条件大幅提升竖井开挖施工(表1)的整体难度与潜在风险。

表1 竖井工程核心参数统计表

参数名称	具体指标	参数名称	具体指标
竖井总深度	418m	净空直径	4.2m
围岩等级	IV~V级	岩体抗压强度	22~36MPa
地下水位埋深	28~35m	施工工况	岩溶破碎、高地压、富水

2 传统施工工艺及核心缺陷分析

2.1 传统开挖施工工艺

矿区早期深竖井开挖作业普遍采用人工钻孔爆破的传统施工模式,现场作业人员依托常年施工经验确定炮孔布设位置、钻孔深度以及装药总量,固定循环进尺的作业方式完全套用常规矿山施工标准,并未结合岩溶地层多变的地质条件做出灵活调整。人工操控设备完成钻孔作业的精度偏差偏大,爆破药量无法匹配软硬交错的岩体结构,爆破振动持续扰动围岩内部的原生裂隙,让本就破碎的岩溶岩体出现松散脱落的情况。粗放的开挖模式造成竖井断面超挖、欠挖问题频发,不仅增加后续井壁修整的作业量,还会破坏围岩整体完整性,给后续支护施工埋下不少安全隐患^[1]。

2.2传统支护施工工艺

矿区传统竖井支护作业统一采用干喷混凝土搭配普通砂浆锚杆的单一支护形式,整套支护体系沿用固定施工参数,并未根据竖井不同深度的围岩应力状态、破碎程度以及渗水情况做出差异化调整。干喷施工工艺的物料拌合均匀度较差,喷射成型的混凝土支护层密实度不足,表层容易出现开裂、起壳以及脱落等质量问题,整体结构强度很难达到工程设计标准。普通锚杆的锚固性能有限,无法抵御岩溶深部高地压作用与溜渣反复冲击带来的动态荷载,支护结构长期受力后容易出现变形失效的情况。传统施工模式缺乏动态监测手段,井下支护结构的隐性损伤无法及时排查,大幅降低竖井整体施工安全储备^[2]。

3 现代精细化施工技术优化方案

3.1精准控制爆破开挖技术优化

针对岩溶矿区围岩破碎、软硬不均、爆破成型质量差的问题,本次施工采用三维激光扫描建模搭配毫秒微差精准爆破的现代优化技术^[3]。施工前期利用三维激光扫描设备对竖井掌子面围岩开展全方位扫描,精准识别岩溶裂隙、软弱夹层以及溶洞分布位置,依托扫描数据构建掌子面精细化数字模型,结合岩体硬度参数差异化规划周边孔、掏槽孔、辅助孔的布设参数(表2)。优化后周边孔间距控制在45cm,孔深误差严格管控在±5cm以内,采用小药量分层起爆模式,将单次爆破最大装药量由传统的32kg降至18kg,通过毫秒级延时起爆削弱爆破振动对围岩的扰动损伤。

表2 优化后精准爆破炮孔参数配置表

炮孔类型	孔间距 (cm)	单孔装药量 (kg)	起爆延时 (ms)
掏槽孔	60	1.2	50
辅助孔	50	0.8	30
周边孔	45	0.5	20

这套优化技术能够适配河池岩溶地层的复杂特性,有效规避超挖、欠挖的常见问题,现场实测优化后竖井超挖量降至5.2cm,欠挖返工率降至4.1%,井壁成型规整度得到大幅提升,同时爆破振动传播范围得到有效控制,围岩原有裂隙扩张现象基本杜绝,为后续支护施工营造稳定的作业基础。

3.2溜渣防堵精细化工艺优化

岩溶矿区竖井开挖产生的渣土混杂黏土、碎石以及岩溶充填物,物料黏结性强、粒径不均,传统开放式溜渣工艺极易出现通道堵塞、渣土滞留的问题,直接影响施工连续性。本次结合竖井418米大深度作业特点,优化形成分层控速、分级筛分、实时清堵的精细化溜渣工艺(表3)。施工团队在竖井每间隔80米位置布设临时缓冲溜渣平台,削弱大高度落渣产生的冲击荷载同时规避渣土黏结堆积,在掌子面出渣环节增设简易筛分设备,将粒径大于15cm的大块岩体提前破碎处理,杜绝大块石料堵塞溜渣通道。

表3 分层精细化溜渣工艺参数对照表

竖井分段深度 (m)	缓冲平台间距 (m)	允许最大落料粒径 (cm)	通道冲洗频次
0~80	80	15	每循环出渣后 1 次
80~160	80	12	每循环出渣后 1 次
160~418	80	10	每循环出渣前后各 1 次

除此之外,现场安排专人依托可视化监控设备实时监测溜渣通道运行状态,针对岩溶地层富水导致的渣土黏壁问题,采用高压水雾定时冲洗通道内壁,从源头减少渣土附着堆积的隐患。优化工艺实施后,竖井溜渣堵塞频次大幅降低,单次循环出渣时长由传统的4.5小时缩短至2.8小时,作业流畅度得到根本性改善。

3.3基于数值模拟的差异化支护体系优化

为解决传统单一支护模式适配性不足、安全冗余偏低的问题,本次采用MIDAS/GTS数值模拟软件对竖井全段围岩应力、位移状态开展仿真分析,结合岩溶地层层分特性,划分浅部完整岩层、中部裂隙发育岩层、深部破碎富水岩层三类区段,针对性搭建差异化支护体系。浅部0~120米围岩应力小、地质条件稳定,保留常规湿喷混凝土搭配普通锚杆的基础支护形式,混凝土厚度维持120mm,合理控制施工成本。中部120~280米裂隙发育、轻微渗水,采用加厚湿喷混凝土搭配加长锚杆的支护方案,混凝土厚度提升至150mm,锚杆长度由2.0m增至2.5m。

深部280~418米区段为断层破碎带与岩溶富水区,围岩应力集中明显且受溜渣冲击最强,优化采用钢纤维湿喷混凝土搭配预应力锚索的复合支护体系,混凝土厚度提升至180mm,增设Φ15.24mm预应力锚索,锚索张拉荷载严格控制在120kN,同时在溜渣通道两侧增设8mm厚耐磨钢板,强化局部抗冲击、抗磨损能力。数值模拟结果显示,差异化支护体系可将围岩最大位移量由传统模式的18.3mm降至6.7mm,支护结构应力分布更加均匀,完全适配岩溶深部复杂工况。

3.4智能监测与工序协同优化

依托现代物联网与数字化管控技术,搭建适配岩溶矿区竖井施工的全流程智能监测与工序协同体系,有效解决传统施工监测滞后、工序衔接混乱的问题。施工团队在竖井井壁、锚杆锚索构件以及围岩内部布设位移传感器、应力传感器、渗水监

测设备共126套,设备24小时不间断采集围岩变形、支护应力、地下水流量等核心数据(表4),实时上传至地面云端管控平台,系统通过大数据算法自动分析数据变化趋势,实现安全风险提前预警。

表4 智能监测系统布设及运行参数表

监测设备类型	布设数量	采集频率	监测精度
围岩位移传感器	42套	1次/10min	±0.1mm
支护应力传感器	48套	1次/10min	±0.01MPa
渗水监测设备	36套	1次/30min	±0.5L/h

4 工程应用效果分析

4.1 溜渣通畅性效果

精细化溜渣工艺优化落地后,示范工程竖井溜渣作业的流畅度得到质的提升,大深度、富水岩溶地层渣土黏堵、通道堵塞的核心难题得到彻底解决。施工全程统计数据显示,优化前单月溜渣堵塞频次平均达到11.3次,每次堵渣故障处理耗时平均2.2小时,严重打断施工连续性。优化后单月堵渣频次降至1.8次,故障处理时长缩短至0.5小时以内,单次施工循环出渣效率提升37.8%。分层缓冲、分级筛分的作业模式,不仅规避了大块渣土堵塞通道的问题,还减少了落渣冲击对井壁支护结构的磨损破坏,溜渣系统整体运行稳定性大幅提升。

4.2 围岩稳定性效果

通过精准爆破开挖搭配数值模拟差异化支护体系的组合优化方案,岩溶矿区竖井围岩稳定性得到显著改善,各类围岩失稳隐患得到全面管控。现场持续3个月的跟踪监测数据表明,优化施工方案实施后,竖井浅部、中部、深部围岩最大沉降位移分别控制在3.2mm、5.1mm、6.7mm以内,远低于规范允许的20mm限值,相较于传统施工模式围岩变形量降幅达到63.4%。井壁表层裂缝宽度全部控制在0.2mm规范限值以内,混凝土支护强度达标率提升至98.7%,锚杆锚索锚固力合格率达到100%,岩溶地层常见的

围岩掉块、裂隙扩张、局部坍塌等问题彻底消除,井壁整体完整性与稳定性达标。

4.3 施工安全性与经济性

智能监测系统与工序协同优化体系的应用,全方位提升了竖井施工的安全管控水平,施工全过程未出现任何安全隐患与人身安全事故,相较于传统施工模式,现场安全隐患排查效率提升52.6%,隐性风险预警处置率达到100%。从经济层面来看,优化工艺减少了超挖回填、支护返工、堵渣处理等额外作业量,单米竖井施工综合成本降低8.2%,整体工程施工工期缩短28天。机械化、智能化设备的规范应用,减少了井下作业人员的劳动强度与作业数量,有效规避了岩溶深部高危工况的作业风险,在保障工程质量与施工安全的基础上,实现了降本增效的核心目标,综合工程效益十分突出。

5 结束语

岩溶矿区复杂的地质环境对溜渣深竖井施工体系提出严苛建设要求,现代精细化施工技术的落地改良能够有效弥补传统工艺的各类弊端,显著提升竖井围岩稳定性、溜渣通畅度以及施工综合效益。实测工程数据可以证实,分级支护、智能监测以及精细化爆破等改良技术,高度适配岩溶地层的深部施工工况。后续行业可结合新型支护材料、物联网智能管控算法持续迭代施工体系,进一步提升深部竖井工程的适配能力与安全储备,助力西南岩溶矿山深部开发工程的高质量推进。

[参考文献]

- [1]王国元,牛鹏翔.深竖井破碎岩体井壁破裂特征与支护加固技术研究[J].矿业研究与开发,2026,46(3):37-45.
- [2]朱向东.现代技术在竖井开挖及支护施工中的应用与优化研究[J].技术与市场,2024,31(12):141-144.
- [3]翁凯乐,罗超,余磊,等.复杂地质条件下深竖井开挖围岩及支护结构稳定性研究[J].水力发电,2025,51(2):75-79+114.

作者简介:

黄启崇(1980--),男,壮族,广西大化人,函授大专,工作方向是矿井施工。