

地下矿山巷道掘进支护施工工艺优化与实践

潘新明

甘肃蓝野建设监理有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要：地下矿山巷道掘进与支护是井下开采的核心基础工程，其施工质量直接关乎矿山生产安全、掘进效率与建设成本。针对传统巷道施工存在的掘支脱节、参数粗放、地质适配性差、安全隐患突出等问题，本文系统梳理钻爆法、机械化掘进、TBM硬岩掘进三大主流掘进技术，对比各类支护工艺的性能特点与适用场景。结合现场施工痛点，从掘支协同作业、参数精细化设计、施工管控、通风防尘安全保障多维度制定工艺优化策略，结合金矿、煤矿两类典型工程案例开展实践验证。优化工艺可有效稳固围岩、提升掘进效率、规避施工风险，适配复杂岩层与大断面巷道施工，可为矿山巷道标准化施工提供技术支持。

关键词：地下矿山；巷道掘进；支护工艺；联合支护；优化实践

引言：当前国内矿产开采逐步向深部复杂地层延伸，巷道普遍面临高地应力、岩层破碎、地质条件复杂等工况，传统粗放的掘进支护工艺已无法满足现代矿山安全生产标准。巷道掘支施工是保障井下通风、运输、排水系统稳定运行的核心，也是防范冒顶、片帮、坍塌事故的关键。对此，本文构建完善的掘支技术体系，针对性优化施工工艺，结合多工况工程实践验证技术成效，旨在打造多场景适配的施工方案，全面提升井下巷道施工的安全与经济效益。

1 地下矿山巷道掘进技术体系

1.1 钻爆法掘进

钻爆法是我国地下矿山应用最广泛的传统掘进技术，核心原理是通过凿岩钻孔、装填炸药、爆破落岩实现巷道岩体开挖，配套出渣、找平工序完成循环掘进作业。该技术设备投入低、工艺成熟、适配性极强，可灵活应用于各类软硬岩层、不规则断面及复杂地质巷道，尤其适用于中小型矿山及地质条件多变的井下巷道施工。但传统钻爆法存在明显短板，爆破冲击波会严重扰动围岩原生结构，破坏岩体完整性，易造成巷道超挖、欠挖、轮廓不规整等问题。同时施工工序繁琐，人工依赖度高，单循环掘进进度有限，爆破粉尘、振动污染严重，围岩裸露时间较长，极易诱发局部掉块、坍塌隐患，在深部高地应力破碎岩层中施工安全性与效率均难以保障，需通过参数优化与工序改良提升施工性能。

1.2 机械化掘进

机械化掘进以悬臂式掘进机、掘锚一体机为核心设备，是中小型矿山升级改造的主流掘进技术，摒弃传统爆破落岩模式，依靠机械切割实现连续掘进作业。该技术最大优势是无爆破扰动，可最大程度保留围岩完整

性，巷道成型规整，超欠挖量远低于钻爆法，从源头降低围岩失稳风险。机械化掘进工序衔接紧凑，可实现掘进、清渣、支护交叉作业，有效缩短围岩裸露时间，大幅提升施工安全性。但该技术存在一定局限性，设备切割硬度有限，仅适用于中软岩层、煤系地层巷道，在坚硬完整岩层中切割效率大幅下降，设备磨损严重，施工经济性较差，应用场景存在明显制约^[1]。

1.3 TBM硬岩掘进

TBM硬岩掘进机是大型现代化矿山深部巷道施工的高端掘进技术，集机械切割、支护、出渣、衬砌于一体，适用于长距离、大断面、硬岩地层巷道掘进施工。该技术依靠全断面刀盘整体破岩，掘进连续性强、成型精度高、围岩扰动极小，可实现巷道一次成型，大幅减少后续支护与返修工作量。TBM掘进自动化、智能化程度高，施工安全系数高，单月掘进进尺远超传统工艺，适配大型矿山规模化、高效化开采需求。但该技术短板同样突出，设备造价高昂、拆装运输难度大、前期筹备周期长，对巷道断面规格、岩层均匀性要求极高，无法适配破碎带、断层、软硬交替复杂地层施工，灵活性较差，仅适用于地质条件稳定的长距离硬岩巷道工程。

2 巷道支护技术体系与适用分析

2.1 四大核心支护工艺对比

当前地下矿山主流支护工艺包含锚杆支护、锚网喷支护、钢架支护、注浆支护四大类型，各工艺支护原理、性能特点与适用场景差异显著。为清晰区分各工艺适配性，结合支护强度、施工效率、经济性、围岩适配性开展综合对比，可为不同地质巷道支护选型提供依据。单一锚杆支护施工便捷、成本低廉，适用于围岩稳定、地应力较小的浅部巷道；锚网喷联合支护封闭性

好、整体性强,适配中等破碎围岩;钢架支护承载能力强,可抵御高地应力挤压,适用于深部软岩巷道;注浆支护可固结松散岩体、修复围岩裂隙,多用于断层破碎

带、渗水岩层。各工艺单独应用均存在短板,工程中多采用组合形式提升支护效果。

表1 矿山巷道核心支护工艺性能及适用场景对比

支护工艺	支护优势	存在短板	适用场景
锚杆支护	施工快、成本低、占用空间小	整体性差、抗变形能力弱	稳定围岩、浅部常规巷道
锚网喷支护	封闭性好、围岩贴合度高、整体性强	柔性不足,高地应力下易因围岩大变形而开裂或剥落	中等破碎围岩、无强挤压巷道
钢架支护	承载强度高、抗挤压能力强	被动支护、适应性差、成本高	深部高地应力、软岩大变形巷道
注浆支护	固结岩体、封堵渗水、修复裂隙	施工周期长、工艺复杂	断层破碎带、渗水松散岩层

2.2 锚杆支护深入分析

锚杆支护是地下矿山最基础、应用最普遍的主动支护技术,核心原理是通过锚杆锚固作用,将浅层松散围岩与深部稳定岩体连接为整体,调动围岩自身承载能力,实现自主稳控。现阶段矿山常用锚杆分为树脂锚杆、砂浆锚杆、预应力锚杆三类,其中树脂锚杆锚固速度快、粘结强度高,适配多数井下巷道;预应力锚杆可施加预紧力,主动约束围岩裂隙扩张,在破碎围岩中应用效果最优。锚杆支护施工关键控制点集中在钻孔精度、锚固质量与预紧力控制,钻孔偏移、深度不足、注浆不饱满均会导致锚固失效。传统锚杆支护存在间距偏大、预紧力不足或施加不规范、布置形式单一等问题,无法适配高地应力巷道变形需求,易出现锚杆脱落、围岩松动等病害,需通过参数精细化设计与配套优化提升支护可靠性。

2.3 联合支护与新技术

单一支护工艺难以适配复杂多变的井下地质条件,联合支护技术已成为深部矿山巷道施工的主流方案,核心是整合不同支护工艺优势,形成互补增效的支护体系。当前应用最成熟的为“锚网喷+锚索+注浆”联合支护模式,以锚杆、挂网、喷砼为基础浅层支护,约束表层围岩松动;以高强度锚索为深部补强,对接稳定岩层提升整体承载力;以注浆技术固结松散岩体、封堵渗水,从根本上改善围岩力学性能^[2]。同时,新型柔性支护、让压支护技术逐步推广,可适配软岩巷道大变形特征,避免支护结构刚性受压破坏。联合支护打破了单一支护的局限性,兼具封闭、锚固、固结、承载多重功能,可有效应对破碎、渗水、高地应力等复杂工况,大幅降低巷道变形与返修概率。

3 施工工艺优化策略

3.1 掘进与支护协同优化

针对掘进与支护工序脱节、围岩裸露时间长的问

题,构建掘支协同作业体系。摒弃“先掘后护”的传统模式,推行“短进尺、快封闭、勤支护”原则,并根据围岩稳定性动态调整进尺:中等稳定围岩控制在1.5~2.0m,破碎围岩控制在1.2~1.5m,极破碎岩层采用“短掘短支”策略,进尺控制在0.5~0.8m,掘进后立即支护。爆破或掘进完成后,立即开展危岩排险与初喷封闭,同步交叉进行锚杆、锚索安装,实现多工序平行穿插。通过协同优化,缩短围岩裸露空窗期,规避失稳风险,提升施工效率与安全性^[3]。

3.2 支护参数精细化设计

改变传统统一化、经验化的支护参数设计模式,基于巷道理深、地应力大小、围岩破碎程度、断面尺寸开展差异化精细化设计。稳定浅部巷道,优化锚杆间距、排距,合理缩减支护密度,降低施工成本;中等破碎巷道,增设钢筋网片,加厚喷砼厚度,提升表层封闭效果;深部高地应力巷道,加密锚索布置、提高锚杆预紧力,强化深部承载能力。针对渗水、破碎带区域,精准设计注浆压力、浆液配比与注浆范围,保证浆液充分渗透围岩裂隙。同时量化各类施工参数,明确钻孔深度、锚固长度、喷层厚度、钢架间距等核心指标,杜绝人为随意施工。精细化参数设计可实现支护适配围岩工况,避免过度支护或支护不足问题,提升支护体系的科学性与经济性。

3.3 施工组织与安全管理

完善标准化施工组织体系,优化人员、设备、班组配置,建立循环施工台账管理制度,明确各岗位施工职责、操作规范与质量标准。划分掘进、支护、检修、安全巡查专项班组,实现专人专岗、闭环管控,避免施工混乱、工序漏项等问题。建立全过程质量检查机制,每循环作业完成后,对巷道成型、锚固质量、喷层质量等进行验收,不合格工序立即整改,杜绝质量隐患遗留。同时强化现场安全管理,施工前开展地质预判与安全技

术交底, 施工中实时监测围岩变形、支护应力变化, 施工后做好隐患排查。定期开展操作人员技能培训, 规范设备操作与施工流程, 杜绝粗放式施工, 全面提升巷道施工标准化水平。

3.4 瓦斯通风与防尘管理

对于高瓦斯矿井或粉尘严重的掘进面, 通风防尘与瓦斯管理是支护工艺安全实施的前提保障。针对粉尘、瓦斯积聚等主要隐患, 需配套优化通风防尘与瓦斯管控工艺。优化通风系统, 根据掘进进度实时调整风筒位置, 保证风量充足, 有效稀释并排出瓦斯等有害气体, 杜绝局部积聚。采用湿式凿岩、喷雾降尘、转载点封闭除尘等综合防尘技术, 从源头抑制粉尘扩散, 降低井下粉尘浓度, 改善作业环境。建立瓦斯动态监测体系, 布设智能瓦斯传感器, 实时采集浓度数据, 超标即自动断电预警并停工通风^[4]。同时规范动火、爆破作业流程, 严禁违规操作, 完善应急处置预案, 形成通风、防尘、瓦斯管控一体化安全保障体系, 筑牢井下施工安全防线。

4 工程实践案例

4.1 图古日格金矿——不稳定岩层巷道

图古日格金矿井下试验巷道埋深520m, 巷道断面 $3.8\text{m}\times 3.5\text{m}$, 围岩以破碎板岩、泥岩为主, 裂隙发育、整体性极差, 且存在轻微渗水现象, 属于典型不稳定岩层巷道。项目初期采用传统单一锚网支护工艺, 施工后巷道顶板下沉、两帮收敛问题突出, 月返修次数达3次以上, 施工安全隐患大、成本高。针对该工况, 应用优化后的联合支护工艺, 采用“短循环掘进+初喷封闭+高预紧力锚网索+注浆加固+复喷成型”施工方案, 精细化调整支护参数, 加密锚杆锚索布置, 对破碎区域全程注浆固结。实践结果表明, 优化工艺实施后, 巷道围岩变形量降低75%以上, 无开裂、片帮、冒顶病害, 巷道无需返修, 施工安全性大幅提升, 适配不稳定破碎岩层巷道施工需求^[5]。

4.2 寺河煤矿——大断面快速掘进

寺河煤矿试验巷道为井下主要运输巷道, 断面尺寸 $5.2\text{m}\times 4.0\text{m}$, 属于大断面巷道, 围岩整体稳定、地应力

较小, 核心施工需求为提升掘进效率、保障巷道成型质量。该巷道传统采用钻爆法掘进、分段支护模式, 工序衔接滞后, 单月掘进进尺有限, 难以满足矿井高产高效生产需求。本次应用掘进支护协同优化工艺, 采用机械化掘进设备, 推行平行交叉作业模式, 精简冗余工序, 精细化设计爆破与支护参数, 配套完善通风防尘安全体系。经过现场实践, 巷道成型质量显著提升, 超欠挖量大幅减少, 单循环作业时间缩短28%, 月掘进进尺提升32%, 施工人工与返修成本降低16%, 实现大断面巷道安全、快速、标准化掘进施工, 适配现代化煤矿高效开采模式。

结束语

本文系统梳理了矿山巷道主流掘进技术与核心支护工艺, 厘清各类技术的优缺点与适用场景。针对传统施工掘支脱节、参数粗放、管理滞后等问题, 从工序协同、参数设计、施工组织及安全防护四个维度完成工艺优化。通过不稳定岩层与大断面巷道两类工程实践验证, 优化体系可有效改善巷道成型效果、抑制围岩变形、提升掘进效率, 显著降低施工隐患与工程成本。该方案适配井下复杂工况, 实用性较强, 弥补了传统工艺短板, 可为矿山巷道掘进支护标准化施工提供参考, 对矿山巷道施工安全提质、增效降本具有重要实践价值。

参考文献

- [1]徐艳阳.地下矿山井下巷道掘进顶板支护方法及应用措施思考[J].中国金属通报,2023(24):46-48.
- [2]郜晓龙.地下矿山井下巷道掘进顶板支护技术探讨[J].世界有色金属, 2022(17): 46-48.
- [3]肖广波.地下矿山井巷掘进新技术的探讨[J].有色金属设计, 2023, 50(3):13-16.
- [4]杨博,孙任杰,郭争飞.复杂地质条件下地下金属矿山巷道施工及顶板安全技术优化[J].山西冶金,2025,48(12): 144-146.
- [5]扬毅,孙立虎.矿山巷道掘进和支护技术的应用[J].世界有色金属, 2024(2): 118-120.