

# 深部巷道围岩控制技术策略

刘德锋<sup>1</sup> 李红伟<sup>1</sup> 李宁<sup>2</sup>

1 山东宏兴矿山建设有限公司 2 山东东平宏达矿业有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2383

**[摘要]** 深部巷道围岩控制是深部资源开采中的关键技术难题,直接关系到矿山安全生产和经济效益。随着开采深度不断增加,巷道围岩呈现出高应力、强扰动、多场耦合等复杂特征,传统支护方式已难以满足工程需求。本文从深部巷道围岩控制的重要性出发,系统提出了优化巷道布置与开挖方案、构建主动与被动协同的复合支护体系、强化多场耦合针对性控制、实施基于监测反馈的动态调控以及研发新型支护材料与技术等策略。通过综合运用这些技术手段,可以有效降低围岩扰动,改善巷道围岩力学环境,提高支护结构的承载能力和适应性,为深部巷道的稳定与安全提供可靠保障。

**[关键词]** 深部巷道; 围岩控制; 技术研究

**中图分类号:** TD263 **文献标识码:** A

Technical Strategy for Surrounding Rock Control of Deep Tunnels

Defeng Liu<sup>1</sup> Hongwei Li<sup>1</sup> Ning Li<sup>2</sup>

Shandong Hongxing Mine Construction Co., Ltd

**[Abstract]** The control of surrounding rock in deep tunnels is a key technical challenge in deep resource exploitation, which directly affects the safety production and economic benefits of mines. With the continuous increase of mining depth, the surrounding rock of the roadway presents complex characteristics such as high stress, strong disturbance, and multi field coupling. Traditional support methods are no longer able to meet engineering needs. Starting from the importance of controlling the surrounding rock of deep tunnels, this article systematically proposes strategies such as optimizing tunnel layout and excavation plans, constructing active and passive collaborative composite support systems, strengthening multi field coupling targeted control, implementing dynamic control based on monitoring feedback, and developing new support materials and technologies. By comprehensively applying these technological means, it is possible to effectively reduce the disturbance of surrounding rock, improve the mechanical environment of tunnel surrounding rock, enhance the bearing capacity and adaptability of support structures, and provide reliable guarantees for the stability and safety of deep tunnels.

**[Key words]** deep roadway; Surrounding rock control; technical research

随着矿产资源开采深度不断增加,深部巷道所处的高应力、强扰动与多场耦合环境使围岩稳定性问题日益突出,传统支护技术已难以满足工程需求。深部巷道围岩控制不仅关系到矿山安全生产,也直接影响开采效率和经济效益。因此,开展深部巷道围岩控制技术策略研究,对于提升围岩承载能力、减少灾害风险、保障深部资源安全高效开采具有重要意义。

## 1 深部巷道围岩控制的重要性

随着浅部矿产资源的日益枯竭,矿产开采向深部延伸已成为全球矿业发展的必然趋势。我国多数大型矿山开采深度已突破1000米,部分矿山甚至达到2000米以上,深部巷道的数量与规模持续扩大。深部巷道作为矿产开采、通风、运输、排水等核

心作业的关键通道,其围岩稳定性直接决定了矿山生产的安全性、连续性与经济性,围岩控制技术已成为深部矿产资源开发的核心技术瓶颈。

从安全生产角度看,深部巷道围岩失稳易引发顶板垮落、侧壁片帮、底板鼓起等地质灾害,不仅会造成设备损毁,还可能导致人员伤亡,引发重大安全事故。从生产效率角度看,围岩失稳破坏会导致巷道变形量过大,需频繁进行维修、返修,占用大量人力、物力与时间成本,严重影响开采进度,降低矿山产能。从资源利用角度,合理的围岩控制技术可有效保护巷道周边资源,避免因围岩破坏导致资源浪费,同时为深部资源的规模化、集约化开采提供基础保障。此外,深部巷道围岩控制技术的研究与应

用,还能推动岩石力学、地下工程等学科的发展,为其他深部地下工程(如隧道、储能硐室等)提供技术借鉴,具有重要的学术价值与工程意义。

## 2 深部巷道围岩控制技术策略

### 2.1 优化巷道布置与开挖方案,减少围岩扰动

合理的巷道布置与开挖方案是控制深部围岩稳定的核心前提,其核心逻辑在于通过科学规避高应力风险区、精准控制应力集中程度与开挖扰动强度,从源头降低围岩失稳概率,为后续支护体系发挥作用奠定基础。在巷道布置方面,需以精细化地质勘察数据为支撑,结合地应力测试结果与岩层物理力学参数,系统性避开构造破碎带、富水含水层及高应力集中区域,尤其针对断层发育、岩层倾角较大的区域,需提前调整巷道走向。同时,尽量使巷道轴线与最大主应力方向保持平行,可将应力集中系数控制在合理范围,若受地质条件限制无法平行布置,需通过数值模拟优化巷道断面形态,采用拱形、椭圆形等抗爆性更强的断面结构,进一步削弱应力集中影响。对于群巷布置场景,需根据岩层完整性、地应力大小合理确定巷道间距,一般控制在8-15倍巷道跨度,避免相邻巷道开挖引发的应力场叠加,必要时在巷道间设置由弱胶结岩体或人工填充层构成的缓冲层,有效阻隔应力传递与扰动扩散。

在开挖方案方面,需结合巷道用途、地质条件与施工成本,推广适配深部环境的微扰动开挖技术,替代传统粗放式爆破开挖,最大限度降低对围岩的冲击损伤与裂隙发育。对于岩层较完整、断面规整的主运输巷道,优先采用盾构法、TBM(隧道掘进机)法等机械开挖方式,通过智能化掘进系统精准控制切削速度与推力,实现平稳掘进,配合同步喷浆封闭技术,实时抑制围岩裂隙萌生与扩展。若受巷道断面尺寸、地质复杂程度限制需采用爆破开挖,需通过数值模拟优化炮眼间距、装药量、起爆顺序等参数,严格采用光面爆破、预裂爆破技术,将爆破震动速度控制在2cm/s以内,减少爆破冲击波对围岩的破坏,保障爆破后围岩完整性。同时,严格控制开挖循环进尺,根据岩层稳定性确定单次进尺为1.5-3.0米,避免开挖范围过大导致围岩应力释放过快,开挖后4小时内完成喷射混凝土初期支护,厚度控制在5-10cm,快速封闭围岩表面,缩短围岩暴露时间,防止围岩因长时间卸压引发塑性变形、裂隙贯通,最终导致失稳破坏。

### 2.2 采用主动支护与被动支护协同的复合支护体系

针对深部围岩高应力、大变形、强蠕变的核心特性,单一支护方式难以实现长期稳定控制,需构建“主动支护+被动支护”协同工作的复合支护体系。其核心是通过主动预控强化围岩自承能力,结合被动约束抵御残余变形,形成“围岩-支护”一体化承载系统,从根本上提升巷道稳定性。主动支护作为体系核心,以预加载力为关键手段,通过主动施加荷载压缩围岩内部原生裂隙与次生裂隙,遏制裂隙扩展贯通,同步提升围岩整体性与承载强度,为后续被动支护筑牢基础。常用技术包括预应力锚杆支护、预应力锚索支护及注浆加固,需结合围岩破碎程度与应力分布精准选用。

预应力锚杆/锚索支护需根据围岩力学参数优化设计,锚杆直径选用22-25mm,长度控制在2.5-4.0m,预紧力不低于100kN。通过多点均匀施加预紧力使围岩形成连续承压拱,将浅层围岩应力传递至深层稳定岩体,避免局部应力集中导致的围岩破坏;锚索则针对高应力区域补充支护,长度8-15m,预紧力300-500kN,强化深部围岩锚固效果。注浆加固技术需区分围岩类型选用浆液。破碎带优先采用水泥-水玻璃双液浆,凝胶时间控制在30-120s,快速胶结破碎岩体;含水层采用化学浆液提升抗渗性,通过高压注浆填充裂隙孔隙,使松散围岩形成整体结构,显著提升抗压、抗剪力学参数。被动支护作为主动支护的补充与兜底保障,重点抵御围岩开挖后产生的残余变形与突发荷载,常用技术包括金属支架、U型钢支架及喷射混凝土,与主动支护形成功能互补。喷射混凝土需在开挖后及时施工,采用C25-C30早强混凝土,厚度8-12cm,配合钢纤维掺量优化,快速封闭围岩表面,防止风化崩解与渗水侵蚀,同时与锚杆形成组合支护结构,传递分散应力;U型钢支架选用29U、36U型号,根据巷道断面调整弧度,支架间距0.8-1.2m,采用拉杆与垫板固定,利用其优良的韧性与塑性变形能力,适应围岩大变形而不发生断裂失效。通过数值模拟优化主动与被动支护的参数匹配,明确锚杆锚索布置密度、支架间距与喷射混凝土厚度的适配关系,实现主动预控与被动约束的协同联动,最大化发挥支护体系的承载能力与抗变形性能,满足深部巷道长期稳定需求。

### 2.3 强化多场耦合针对性控制,改善围岩力学环境

深部巷道围岩处于力学场、渗流场、温度场交织耦合的复杂环境,各场域相互作用、叠加放大,显著加剧围岩失稳风险,因此需针对性实施分场控制、协同治理,通过削弱各场不利影响、优化围岩力学性能,构建稳定的围岩环境。核心思路是立足多场耦合作用机理,精准靶向施策,既要单独管控各场域有害因素,又要兼顾场间协同影响,实现从“被动应对”到“主动改善”的转变。

在渗流场控制方面,秉持“堵、排、截”三位一体的综合治理原则,从源头阻断地下水对围岩的软化与侵蚀。针对富水含水层围岩,优先采用超前预注浆堵水技术,选用水泥-水玻璃双液浆或化学浆液,通过加密注浆孔(孔距1.5-2.5m)、控制注浆压力2-4MPa,形成连续完整的隔水帷幕,有效封闭含水层裂隙,将水压降至安全阈值以下。对于巷道开挖后出现的局部渗水,在巷道周边布设排水钻孔(倾角15-30°),搭配纵向排水廊道与环向排水管,构建立体排水系统,及时排出围岩孔隙水与裂隙水,彻底消除水压力对围岩的附加应力影响,避免裂隙因水压作用持续扩展。同时,对破碎带与含水层交界区域,增设截水墙或隔水垫,防止地下水跨区域渗透引发围岩泥化、崩解。在温度场控制方面,针对深部地层温度普遍达35℃以上、部分区域超50℃的问题,采用“降温+耐温”双重策略应对温度应力危害。通风降温选用大功率轴流风机搭配导流装置,优化通风路径,将巷道内环境温度控制在30℃以内;对高温异常区域,增设机械制冷设备,通过冷媒循环实现精准降温,减少围岩热胀冷缩引发的温度应力与

裂隙发育。材料选用上,支护结构采用耐高温合金钢锚杆、锚索,注浆材料选用耐温型环氧树脂浆液,确保支护体系在高温环境下力学性能不衰减。

#### 2.4 基于监测反馈的动态调控技术

深部巷道围岩力学环境具有显著的动态性与不确定性,受开挖扰动、多场耦合、应力重分布等因素持续影响,围岩状态实时变化,单一固定的支护方案难以适配全周期围岩稳定需求。因此,需建立“实时监测-数据解析-风险预警-动态调控”的闭环体系,以监测数据为核心支撑,实现支护方案与围岩状态的动态匹配,大幅提升围岩控制的精准性与可靠性,为深部巷道长期稳定提供保障。

构建全方位、立体化的围岩综合监测系统是动态调控的基础,需结合巷道地质条件与受力特征,布设多维度监测点位,实现对围岩及支护结构的全要素监测。应力监测采用钻孔应力计,按间距2-3m布设于巷道周边围岩关键应力集中区,实时捕捉地应力变化规律;变形监测选用收敛计、位移计,监测巷道顶板下沉、两帮收敛及底板鼓起量,数据采集频率不低于每2小时1次;裂隙发育监测采用光纤传感技术与裂隙计结合,精准捕捉裂隙萌生、扩展速率及贯通情况;支护结构受力监测通过在锚杆、锚索及支架上安装测力计,实时掌握支护体承载状态,及时发现受力异常部位。同时,搭建数据传输专网,实现监测数据的实时上传与存储,保障数据连续性与完整性。依托大数据、人工智能及数值模拟技术,对海量监测数据进行深度解析与风险预判,构建科学的预警机制。通过数据挖掘算法剔除监测噪声,提取围岩变形速率、应力增量、裂隙扩展速度等核心特征参数,结合预设阈值构建多级预警体系,分为蓝色预警(轻微异常)、黄色预警(中度异常)、红色预警(重度异常)。当监测数据触发预警时,系统自动联动数值模拟模型,预测围岩后续变形趋势与失稳风险范围。基于预警等级与预测结果,精准制定调控措施:变形速率超阈值时,加密锚杆锚索布置,将预紧力提升20%-30%,对裂隙发育区域补充高压注浆加固;局部应力集中时,采用卸压钻孔(孔径80-100mm,深度5-8m)或卸压槽技术释放应力;支护结构受力过载时,及时增设U型钢支架补强。

#### 2.5 研发新型支护材料与技术,提升控制能力

新型支护材料与技术的创新研发,是突破深部围岩高应力、

大变形、多场耦合控制瓶颈的核心路径,更是推动围岩控制从“被动防护”向“主动适配”升级的关键。面对深部复杂力学环境对支护体系的严苛要求,需同步推进材料性能迭代与技术模式创新,通过软硬件协同优化,大幅提升支护结构的力学承载能力、环境适配性与智能化水平,为深部巷道长期稳定提供核心技术支撑。

在新型支护材料研发方面,聚焦深部极端环境适配性,定向突破材料关键性能指标。针对高应力工况,研发强度达1200MPa以上的高强度锚杆钢,搭配高韧性喷射混凝土(抗弯强度 $\geq$ 15MPa),提升支护结构抗断裂与抗变形能力;针对多场耦合环境,开发耐腐耐高温注浆材料,可在50℃以上高温、地下水侵蚀环境下保持力学性能稳定,同时研发碳纤维、玻璃纤维复合材料支架,兼具轻量化与抗腐蚀特性,适配潮湿、高温等恶劣工况。

### 3 结语

深部巷道围岩控制是深部资源安全高效开采的关键环节。通过优化巷道布置与开挖方式、构建主动与被动协同的复合支护体系、实施多场耦合针对性控制、开展监测反馈的动态调控以及研发新型支护材料与技术,可以显著提升围岩稳定性和支护结构适应性。未来应进一步加强多学科交叉研究,推动深部围岩控制理论与技术的持续创新,为深部工程安全提供更加可靠的技术保障。

#### [参考文献]

- [1]杨江峰,许良全,李子建,等.深部高应力软岩巷道围岩失稳机理及控制技术研究[J].能源与环保,2024,46(10):280-286.
- [2]刘桥.深部回采巷道变形破坏机理及围岩控制技术研究[J].能源与节能,2024,(10):171-174.
- [3]李鹏,姜关照,李红.某煤矿深部软岩巷道围岩破坏特征及控制技术研究[J].矿产保护与利用,2024,44(04):58-64.
- [4]薛永,陈晋龙,薛强.深部区域破碎围岩开拓巷道围岩控制技术[J].江西煤炭科技,2024,(03):26-28.
- [5]张志永,鲁学恭.深部复合顶板回采巷道围岩控制技术研究[J].中阿科技论坛(中英文),2024,(08):77-81.

#### 作者简介:

刘德锋(1979--),男,汉族,山东省济南市莱芜区人,本科,中级采矿职称,从事的研究方向或工作领域:采矿工程。