

地下矿山巷道支护方式比较与应用研究

施 伟 高陈程 汪成刚

江西乐矿能源集团陕西黄陵分公司 陕西 黄陵 727307

摘 要：地下矿山巷道支护是保障采矿作业安全与高效运行的关键技术环节。本文系统梳理了矿山巷道常用支护方式的技术原理、结构特征与力学机制，包括锚杆支护、喷射混凝土支护、锚喷联合支护、金属支架支护及注浆加固等主要类型。在此基础上，从承载机理、围岩适应性、施工工艺、经济成本和维护要求等维度对各支护方式进行了横向比较，揭示了不同支护方式的适用条件与性能边界。进而探讨了巷道支护方式选择的基本原则与决策流程，分析了支护参数优化设计的关键因素，并提出了基于围岩分级和动态反馈的支护设计方法。研究表明，矿山巷道支护方式的选择应摒弃单一模式，走向以围岩稳定性评价为基础、多方式协同的综合支护策略，实现安全可靠与经济合理的统一。

关键词：地下矿山；巷道支护；锚喷支护；金属支架；围岩分级

引言

地下矿山巷道是运输、通风、行人及管线敷设的关键通道，其围岩稳定性直接影响安全与效益。随着开采深度增加、地质条件复杂化及高应力环境加剧，巷道变形破坏问题日益严重，支护难度显著上升。我国金属与非金属矿山每年因巷道失修、冒顶片帮导致的安全事故和经济损失巨大。当前支护技术已形成主动（如锚杆）、被动（如金属支架、砌碇）及联合支护（如锚喷）等体系，各类方式通过不同力学机制发挥作用，适用条件各异。然而，因支护方式选择不当或参数不合理引发的返修、加固乃至事故仍频发，暴露出对适用条件认知不足、设计针对性不强等问题。本文基于围岩稳定控制原理，系统梳理各类支护技术特征与力学机制，通过多维度比较明确其适用范围，并探讨支护选型与参数优化的原则方法，为巷道支护设计提供系统参考。

1 常用巷道支护方式及其技术特征

1.1 锚杆支护

锚杆支护通过锚杆将浅部围岩与深部稳定岩体锚固，形成承载拱或悬吊结构，调动围岩自身承载能力。按锚固方式分为机械锚固型（楔缝式、涨壳式）和粘结锚固型（树脂锚杆、水泥砂浆锚杆）。机械锚固型安装快捷、可立即承载，但锚固力受孔壁粗糙度和岩体完整性影响大，在软弱破碎围岩中效果有限；树脂锚杆以树脂锚固剂粘结，锚固力大且可靠性高，为当前主导品种。按受力状态分为端部锚固型和全长锚固型，前者在端部形成集中锚固力，后者沿全长提供分布式粘结约束，更利于控制围岩离层和结构面滑动^[1]。其力学机制

包括悬吊作用（将不稳定岩层悬吊于上部稳定岩层）、组合梁作用（多层薄岩层锚固为组合厚梁，提高抗弯刚度）、挤压拱作用（锚固端形成压缩带承载拱圈）和围岩加固作用（改善粘结力 c 和内摩擦角 φ 以提高整体强度）。四种机制在不同围岩条件下各自主导，但常协同发挥。

1.2 喷射混凝土支护

喷射混凝土支护是将水泥、砂、石子和速凝剂按比例拌合，通过喷射机高速喷射于围岩表面，形成厚 50 ~ 150mm 的混凝土薄层，起封闭、支撑和加固作用。其即时封闭可隔绝空气与水对围岩的风化侵蚀；支撑作用提供径向约束力，限制围岩向临空面变形；同时能充填裂隙和凹坑，改善应力状态，延缓裂隙扩展。工艺分干喷、湿喷和潮喷：干喷设备简单但粉尘大、回弹率高、质量不稳定；湿喷将拌合料与水一并送入喷嘴，粉尘小、回弹率低、强度高，是主推工艺，但设备投资和清洗工作量较大。

1.3 锚喷联合支护

锚喷联合支护将锚杆与喷射混凝土组合使用，兼具主动锚固与表面封闭双重优势。锚杆提供深部锚固力，调动围岩承载潜力；喷射混凝土封闭表面、防止风化并提供表层抗剪约束，二者互补，形成“深部锚固 + 浅层约束”的协同体系。可根据围岩条件和施工需要灵活组合：稳定围岩以锚杆为主、喷层仅起封闭作用；较差围岩则增加喷层厚度和强度，必要时加设钢筋网或钢纤维。该形式为矿山永久巷道的主流支护方式，尤其适用于中等稳定至不稳定围岩。

1.4 金属支架支护

金属支架支护属被动支护形式,依靠支架自身强度和刚度直接承受围岩压力。常用类型有U型钢可缩性支架、工字钢刚性支架和矿用工字钢梯形支架。U型钢可缩性支架由拱形构件搭接并以卡缆固定,围岩压力过大时可控制缩动,既提供较大抗力,又能适应围岩变形,常用于深部高应力及软岩巷道。其优点是承载能力大、刚度可调、安装简便、支撑可靠;缺点为被动承载难以主动控制变形,支架与围岩接触不充分易致应力集中,且大断面或长距离巷道中钢材用量大、成本高、存在腐蚀问题。

1.5 注浆加固技术

注浆加固是通过注浆设备向围岩裂隙和孔隙注入浆液(水泥浆、化学浆或水泥-水玻璃双液浆),浆液凝结硬化后胶结破碎岩体、充填裂隙,提高围岩整体性和强度并改善力学参数,本质为围岩介质改良。与附加构件支护不同,其从内部提高围岩自身承载能力。工艺分帷幕注浆、渗透注浆和劈裂注浆,适用条件取决于裂隙开度和渗透系数。该技术通常不单独作为永久支护,而与锚喷或金属支架联合使用,用于破碎带、断层带或采动影响区的超前加固和事后补强。

2 各支护方式的比较分析

2.1 承载机理与力学特性的比较

从承载机理来看,锚杆和喷射混凝土属于主动支护,其核心在于调动和利用围岩自身的承载潜力,通过与围岩的相互作用形成共同承载体系。锚杆支护将荷载传递至深部稳定岩体,喷层提供表层约束,两者使围岩从“承载结构”转变为“被承载结构”的被动角色转变为主动受力单元。金属支架则属于典型的被动支护,其承载能力不依赖于围岩的协同作用,而是完全依靠支架自身结构的强度来抵抗围岩压力,围岩在支架发挥作用之前必然发生一定程度的变形和松动^[2]。注浆加固的力学机制更为根本——它改变的是围岩的物理力学性质本身,而非施加外部约束。从荷载传递路径看,锚喷支护形成“围岩-锚杆-喷层”的多层次传力体系,受力路径分散、冗余度高;金属支架的荷载路径则高度集中于支架结构,一旦支架某一部位屈服或失稳,整体承载能力急剧下降。

2.2 围岩适应性与适用条件

不同支护方式对围岩条件的适应性差异显著。锚杆支护适用于围岩完整性较好、能够提供足够锚固力的中硬以上岩层,对于节理裂隙发育或软弱破碎围

岩,锚杆锚固力难以保证,单独使用效果较差。喷射混凝土支护的适应性相对较广,从稳定围岩的简单封闭到不稳定围岩的表面约束均可应用,但其单独承载力有限,不能作为高应力巷道的唯一支护手段。锚喷联合支护则具有最宽的围岩适应性,从较稳定到中等不稳定围岩均有良好表现,是目前适用性最强的支护形式。金属支架支护在围岩极破碎、松散或高应力大变形条件下具有独特优势,此时锚杆难以形成有效锚固点,而支架的强力支撑可以控制变形发展。注浆加固则主要适用于围岩裂隙发育、渗透性较好但不适合直接支护的破碎带和断层影响区。

2.3 施工工艺与进度影响

施工工艺的复杂程度直接影响巷道掘进速度和施工组织。锚杆支护施工工序少、设备轻便,单根锚杆安装时间短(树脂锚杆通常不超过5分钟),对掘进循环影响小。喷射混凝土施工涉及拌料、运输、喷射和养护等多个环节,湿喷工艺的回弹率低但设备清洗耗时长,干喷工艺虽然机动灵活但粉尘污染严重,且喷层强度受操作水平影响较大,往往需要专门的喷射班组连续作业。锚喷联合支护在施工组织上需要锚杆钻孔安装与喷射混凝土交替进行,工序衔接要求高,对施工管理水平要求更严^[3]。金属支架支护的施工主要涉及支架的运输、组装和架设,U型钢支架的搭接和卡缆紧固需要一定时间,但总体上工序相对独立,不依赖复杂的设备配合。注浆加固则是工序最为复杂、耗时最长的方式,需要钻孔、下管、封孔、注浆和养护等完整流程,往往需占用单独的施工循环或提前预注。

2.4 经济性与维护成本比较

从一次性投入来看,锚杆支护的单位长度成本最低,材料用量少、施工速度快;喷射混凝土次之;锚喷联合因组合使用两种材料,成本较单项有所增加但通常仍低于金属支架;金属支架支护的钢材用量大、单位成本最高,尤其是在大断面巷道中;注浆加固的设备和材料成本也较高,且通常作为辅助措施叠加使用。然而,经济性的比较不能仅看初期投入,还必须考虑维护成本和服役寿命。锚喷支护若设计合理、施工质量可靠,巷道长期稳定,后期维护量很小;而金属支架在腐蚀环境和动压影响下,支架锈蚀、变形乃至失效后更换成本高昂,长期经济性未必优于锚喷。注浆加固虽然前期投入较高,但若能使巷道在服务期内免于大修,则在全生命周期成本上可能具有优势。因此,经济性评价应立足于全生命周期视角,而非单纯的初始造价比较。

3 支护方式选择的原则与方法

3.1 基于围岩分级的基本选型框架

我国矿山巷道普遍采用围岩稳定性分级方法,按岩体完整性、岩石强度、结构面发育程度和地下水影响等指标将围岩分为稳定(I级)、较稳定(II级)、中等稳定(III级)、不稳定(IV级)和极不稳定(V级)五个等级。围岩分级与支护方式之间存在基本的对应关系:I~II级围岩中,围岩自稳能力强,通常只需喷射混凝土封闭表面或局部锚杆加固即可;III级围岩是锚喷联合支护的典型适用对象,锚杆间距和喷层厚度按规范选取;IV级围岩需加强锚喷参数或增设钢筋网、钢纤维,必要时辅以金属支架;V级围岩则以金属支架或砌碇等强力支撑为主,超前注浆或管棚预支护常为必备措施。这一分级选型框架是工程实践的通用准则,但仅作为初步选型的依据,最终方案需结合巷道断面形状、服务年限和采动影响等因素综合确定。

3.2 支护参数设计的优化方法

锚杆支护的参数主要包括锚杆长度、直径、间排距和预紧力。锚杆长度应不小于围岩松动圈厚度,通常按锚固段位于稳定岩层内1.0~1.5m控制;锚杆间排距取决于锚杆的锚固力和围岩自承拱厚度,常用经验公式为间排距不超过锚杆长度的1/2。喷射混凝土的参数包括喷层厚度、强度等级和配合比,喷层厚度由围岩等级和巷道断面尺寸共同决定,一般在50~150mm之间选取。金属支架的主要设计参数是支架间距、型钢规格和卡缆拧紧力矩,支架间距通常为0.6~1.0m,型钢规格依据巷道断面和预计围岩压力选择^[4]。所有参数设计均需满足相关设计规范(如GB50086《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》)的最低要求,同时结合矿山具体条件进行验证调整。

3.3 特殊地质条件下的策略调整

在高应力区段(如深部开采、构造应力集中区),围岩可能表现出显著的塑性流变和冲击倾向性,常规锚喷支护可能难以控制变形,此时应优先采用U型钢可缩性支架或“锚喷+可缩支架”的组合形式,并设置较大的变形预留量。在断层破碎带和软弱夹层区,围岩自稳时间极短、锚固力难以保证,支护策略应从超前治理入手——先进行超前注浆或超前锚杆加固,形成“人工顶板”后再掘进通过,通过后立即架设加密支架和喷射混凝土封闭。在遇水膨胀性软

岩中,常规水泥浆注浆效果差,应选用化学浆液(如聚氨酯)进行加固,并加强巷道防排水措施,防止围岩浸水后强度骤降。特殊条件下的支护设计必须超越“标准化”套路,转向“一区一策”的针对性方案。

3.4 动态设计与信息施工方法

动态设计的核心是“监测-反馈-调整”的闭环机制——在巷道掘进和支护施工过程中,布置收敛监测、锚杆受力监测和围岩位移监测点,定期采集数据并与设计预估值对比。当监测数据显示围岩变形速率或累计变形量超过预警值时,应及时分析原因,判断是地质条件变化、施工质量问题还是设计参数不足,并据此调整支护参数或变更支护方式。信息施工法(也称观察法)将施工过程中的地质编录、监测数据和分析决策融为一体,使支护方案在实施中不断优化。这种动态调整机制尤其适用于地质条件复杂多变的长距离巷道,能够有效避免“一刀切”设计带来的局部不足或过度浪费。

4 结语

地下矿山巷道支护是融合地质、力学、材料与施工的系统工程。本文系统比较锚杆、喷射混凝土、锚喷联合、金属支架及注浆加固等主要支护方式,明确其技术特征、适用条件与性能边界,提出基于围岩分级、动态设计和信息施工的选型与优化方法。研究表明,不存在普适的最佳支护方式,唯有契合具体围岩条件与工程需求的最优组合方案。有效支护应以围岩稳定性评价为基础,推行“主动为主、被动为辅、多方式协同”的综合策略,充分发挥锚喷等主动支护调动围岩自承能力的优势,并在特殊区段辅以支架或注浆等措施。未来应推动支护设计由经验类比向理论计算与现场监测融合的精准化转型,并加快高韧性支护材料与智能监测预警系统的工程应用。

参考文献

- [1] 何满潮,孙晓明,张国峰.深部软岩巷道支护理论与技术研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):1-13.
- [2] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护技术现状与发展趋势[J].煤炭学报,2022,47(6):2133-2145.
- [3] 余伟健,高谦,张建明.锚喷支护在金属矿山巷道中的应用与效果评价[J].金属矿山,2021(8):34-42.
- [4] 宋振骥,蒋金泉,秦忠诚.矿山巷道围岩稳定性分类与支护决策[J].煤炭科学技术,2022,50(9):1-9.