

井下采矿巷道支护优化研究

王超

内蒙古汇能煤电集团富民煤炭有限责任公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2497

[摘要] 在矿产资源大规模深部开采过程中,巷道围岩稳定性是保障矿井连续安全生产,提高开采效率,实现绿色高效开采的关键环节。鉴于深部高地应力,岩体破碎及采动叠加影响等复杂地质条件,传统巷道支护方案存在承载结构适应性差,围岩变形控制力弱和支护成本高昂及耐久性不足等问题,已无法满足现代安全高效地下开采的要求。本文基于岩石力学与巷道支护工程的基础理论,系统分析了地下巷道岩体变形破坏机理及现有支护技术的局限性,又深入探讨了巷道支护优化的原则,主要方向与技术方案。针对承载结构的选型,支护参数计算,岩体与支护结构协同承载能力及支护施工工艺等方面,提出了针对性的科学优化策略。

[关键词] 地下开采; 围岩稳定性; 协同承载

中图分类号: TD803 **文献标识码:** A

Research on the Optimization of Underground Mining Tunnel Support

Chao Wang

Fumin Coal Co., Ltd., Inner Mongolia Huineng Coal and Electricity Group

[Abstract] In the large-scale deep mining of mineral resources, the stability of tunnel surrounding rock is a key factor in ensuring continuous and safe production, improving mining efficiency, and achieving green and efficient mining. Considering the complex geological conditions such as deep high stress, rock mass fracturing, and the superimposed effects of mining activities, traditional tunnel support schemes have problems including poor adaptability of load-bearing structures, weak control over surrounding rock deformation, high support costs, and inadequate durability, which can no longer meet the requirements of modern safe and efficient underground mining. Based on the fundamental theories of rock mechanics and tunnel support engineering, this paper systematically analyzes the mechanisms of surrounding rock deformation and failure in underground tunnels, as well as the limitations of existing support technologies. It further explores the principles, main directions, and technical solutions for tunnel support optimization. Targeted scientific optimization strategies are proposed regarding the selection of load-bearing structures, calculation of support parameters, synergistic load-bearing capacity of rock mass and support structures, and support construction processes.

[Key words] Underground mining; Surrounding rock stability; Synergistic load-bearing

引言

随着中国矿产资源开采强度的增大,浅部矿藏储量逐渐枯竭,地下开采不断向深部延伸,开采深度持续增加。地下开采的地质条件与建设环境日趋复杂,巷道围岩失稳,支护结构损坏,顶板冒落,帮部坍塌及底鼓等危险问题频发,直接制约着开采的效率与安全。巷道是井下人员通行,矿石运输和通风及排水的主要通道。其稳定性与支护结构的可靠性是整套地下开采系统安全运行的基本前提,支护设计的合理性直接决定了采矿的安全系数,建设成本及整体经济效益。

传统巷道支护设计主要依赖经验参数,采用单一支护结构

加固岩体,忽略了深部岩体应力分布,岩石物理力学性质及采动影响等重要因素。这导致支护体系与地质条件不匹配,常出现围岩过度变形,支护构件损坏乃至整个支护系统失效的情况。这不仅增加了巷道维修工作量,更带来了生产事故隐患推高了开采总成本。在现代的绿色高效和集约化开采要求的背景下,优化地下巷道支护方案,更新支护技术,完善支护设计体系已成为采矿工程领域亟待解决的关键课题。

1 巷道岩体变形破坏机理及影响因素

1.1 巷道岩体变形破坏的主要机理

地下巷道掘进后原岩应力平衡被彻底打破,周边岩体应力

状态重新分布,由天然应力状态转变为集中应力与次生应力叠加的状态。当岩体内应力超过其抗压、抗剪及抗拉强度极限时,岩体内逐渐萌生微裂纹,并扩展贯通,导致塑性变形,结构失稳及岩体整体破坏,这是巷道围岩变形失稳的根本机理。从岩石力学角度看,巷道破坏是应力失衡与岩体结构损伤共同作用的结果,浅部巷道破坏主要受岩体自重控制,以顶板局部下沉和帮部浅表坍塌为主。深部巷道则同时承受高地应力,构造应力及采动反复扰动,岩石流变特性显著,裂隙发育区大幅扩展,变形破坏呈现持续性,不可逆性及大尺度传播特征,表现为顶板离层,两帮剧烈收敛,底鼓和岩体整体滑移失稳等复杂破坏形态。

相比浅部巷道,深部巷道围岩变形破坏速度更快,损伤程度更高控制难度更大。此外变形具有明显的滞后性和流变属性,单纯的高刚度被动支护无法从根本上抑制岩体结构损伤,反而会增加支护结构荷载,导致岩体与支护共同失效。与此同时巷道围岩具有一定的自承能力,掘进后及时合理的支护能限制岩体变形,维持岩体结构的完整性,激活其自承能力,延缓裂隙扩展,确保巷道长期稳定。传统支护方案忽视岩体自承机制,一味追求高刚度,高强度,割裂了岩体与支护的共同工作联系,是导致支护失效,围岩失稳的主要原因,也是巷道支护优化的核心理论基点。

1.2 影响巷道围岩稳定性与支护效能的主要因素

决定巷道围岩稳定性与支护效能的因素繁多且相互耦合,主要分为四类,客观地质因素,工程设计因素,施工工艺因素及后期运营因素。它们均显著影响支护体系稳定性与围岩变形控制效果。地质因素是不可控的客观基础条件,岩石强度,岩体结构完整性,地质构造发育程度,地下水侵蚀及地应力水平。岩石强度越低,裂隙孔隙结构越发育,构造线越密集,巷道稳定性越差,变形破坏风险越高。地下水会软化岩体,降低其力学强度加剧裂隙冲刷,严重削弱岩体自承能力。深部高地应力和构造应力进一步增加岩体负荷,加速其变形损伤,使支护效能控制复杂化。

设计因素与支护参数是可控的关键环节,支护结构选型,构件尺寸和布置方式,刚度计算及支护时机。当前多数巷道支护设计缺乏精确理论计算,间排距,尺寸和强度多凭经验确定,导致支护结构与现场地质条件脱节。支护滞后方案有点单一,刚度设置不太合理,都与岩体流变特性不是很匹配,致使支护体系无法承受变形应力而提前失效。施工技术与后期运营直接影响支护构件的建造质量和长期服役性能,支护安装工艺违规,巷道轮廓处理不当,构件安装精度不足,连接不可靠和缺乏持续监测与维护,均会降低支护体系整体承载力,引发围岩失稳与支护失效。

2 传统地下巷道支护技术现状与局限

当前主流的地下巷道支护技术分为主动支护与被动支护,经过多年的工程实践,虽已形成标准化作业流程,但在深部复杂地质条件下工程缺陷日益凸显,已难满足现代化巷道支护的要求。被动支护依靠构件自身的刚度被动承受岩体变形压力,虽然

初期稳定性高,施工简便,适用于浅部稳定围岩,但其局限性十分显著,支护结构与巷壁难以实现全断面密贴,易形成空顶区,无法对岩体实施全方位的变形约束。其柔性与抗变形能力差,在深部高应力与大变形作用下,极易发生钢架扭曲还有混凝土开裂乃至结构垮塌。加之材料消耗大,造价高和工效低且返修频繁,极不适应深部巷道的流变特性,长期经济效益很低。

3 进阶优化路径

3.1 支护范式和结构体系的重构

必须彻底扭转传统的被动承压的落后观念,转而构建以“主动强化,刚度适配与时效控制”为核心的现代复合支护体系。应确立以主动支护为主导,柔性结构为补充的技术路线,坚决淘汰那些低效能的被动刚性支架。针对深部高应力环境,软弱破碎围岩及强烈采动扰动区域,需全面普及由高强锚杆,预应力锚索及高性能金属网构成的联合支护系统,以取代传统的木棚或工字的钢架棚支护。

该复合系统通过高预应力锚杆,金属网与锚索的协同作用,形成了“浅部预制,深部锚固与外层防护”的三维集成结构。高预应力锚杆负责强化浅部围岩的完整性,抑制局部裂纹的萌生与扩展,长锚索则深入深部稳定岩层,提供强大的悬吊力与组合梁效应,以抵御集中的构造应力,控制大变形灾害。金属网作为最后一道防线,提供全断面防护,三者相辅相成构建了刚柔并济的承载共同体。此外针对极破碎软岩地层应引入注浆加固技术,利用浆液充填裂隙和胶结岩体,形成了“注浆、锚固、网喷”三位一体的立体加固网络,从根本上激活围岩的自承潜能,确保了极端地质条件下的长期稳定性。

3.2 支护参数的量化与精细化设计

参数设计的科学性直接决定了支护效能的上限,必须摒弃依赖经验的粗略估算,建立了基于地应力实测,岩体力学特性分析及数值模拟的量化设计方法。需对锚杆的直径和长度,间排距和预紧力矩,锚固深度以及注浆压力等关键指标进行系统优化。设计过程中应依据岩体强度和地应力场分布特征及塑性区范围,精准反演围岩荷载谱,进而动态匹配支护阻力。对于高应力大变形巷道,应采取“高强度,长锚固,密布设”的策略,增大构件规格,提高支护密度,而对于完整性较好的岩体,则应优化参数以避免“过支护”造成的资源浪费。特别强调的是,必须大幅提高锚杆的初始预应力,以此在变形初期即形成约束,阻断离层与裂隙的发展通道。通过均匀对称的布置形式,消除支护盲区,确保荷载均匀。这种精细化的参数匹配,既能规避因支护力不足引发的失稳风险,又能有效遏制因过度的保守设计带来的成本虚高。

4 多维效能评估

通过对支护理念,结构体系,参数设计及监测反馈的全链条优化,巷道围岩的控制水平实现了质的飞跃,在安全和经济及社会价值层面均展现出显著优势。

重构后的复合支护体系能够精准适配复杂的井下地质力学环境,有效抑制塑性区的过度扩张。它不仅显著降低了顶板离层,

片帮及底鼓的发生率,更从根本上遏制了冒顶、坍塌等重大恶性事故,极大消除了作业现场的安全隐患,为矿工的生命安全构筑了坚实屏障,推动了矿山本质安全水平的提升。还有经济和运营效益等方面上,量化设计杜绝了材料的盲目消耗,工艺标准化大幅提升了掘进与支护效率,从而显著降低了初期建设成本与后期维护费用,更重要的呢,是高稳定性的支护系统减少了因返修导致的非计划停产,保障了采掘接替的连续性,直接提升了矿井的年产量与生产效率,实现了真正的“降本增效”!

还有在社会价值上,这些技术体系高度契合深部开采的战略需求,完善了地下空间支护的理论架构,不仅延长了巷道的服务年限,更是推动了支护行业向科学化和智能化,绿色化转型。它为矿山企业实现节能减排与可持续发展提供了强有力的技术支撑,具有极高的行业推广价值与广阔的应用前景。

5 结语

地下巷道支护优化是保障深部矿井安全运营,提升开采综合经济效益的重要技术举措。传统支护技术存在的理念陈旧,结构单一,设计粗放及适应性差等缺陷,已难以满足高地应力,松软破碎岩体及强采动影响下的巷道稳定控制要求。本文系统剖析了巷道围岩变形破坏机理与现有技术短板,确立了科学优化原则,构建了涵盖理念更新,结构体系重构和参数精准计算,安装工艺升级及全流程质量控制的综合性优化体系。从理论上攻克了传统技术的根本弊病,实现了支护结构与地质条件的精

准匹配,系统要素的协同工作以及安全与经济的双赢。

未来的地下巷道支护优化将向智能化,精准化和绿色化方向发展,通过融合智能监测,数字仿真及人工智能等前沿技术,将实现地质条件的智能判识、支护参数的智能计算,安装质量的智能管控及围岩变形的实时预警。持续更新巷道支护技术体系,深化采矿工程与数字智能技术的融合,将稳步提升中国地下巷道支护技术的整体水平,为深部矿产的资源安全高效开发构筑更为完善和现代化的技术基石。

[参考文献]

- [1]康红普,王金华,林健.煤矿巷道锚杆支护理论与成套技术[J].岩石力学与工程学报,2018,37(10):2419-2435.
- [2]何满潮,李晨,官伟力,等.NPR锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1513-1529.
- [3]尹胜,周宗红,张晶,等.地下掘进巷道富水破碎围岩锚杆支护参数优化[J].有色金属工程,2024,14(2):119-127.
- [4]刘少伟,米超,贺德印,等.三软厚煤层工作面回采巷道超前“卸一支”协同围岩控制技术及应用[J].河南理工大学学报(自然科学版),2026,45(2):76-85.

作者简介:

王超(1992—),汉族,内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗恩格贝镇人,政治面貌:群众,本科,职称职务:采矿中级工程师,研究方向:采矿工程。