

深部煤矿巷道围岩控制技术与稳定性研究

黄克斌 耿磊超 吴佩凝

中煤航测遥感集团有限公司(西安煤航遥感信息有限公司) 陕西西安 710100

摘要: 深部煤矿巷道围岩控制技术对保障煤矿安全生产至关重要。研究聚焦深部煤矿巷道围岩控制技术与稳定性,分析深部巷道围岩特征及受力情况,探究锚杆支护、注浆加固等控制技术原理与应用效果,评估巷道围岩稳定性影响因素。旨在为优化深部煤矿巷道围岩控制方案、提升巷道稳定性提供理论支持与技术参考。

关键词: 深部煤矿; 巷道围岩; 控制技术; 稳定性研究

引言

随着煤矿开采向深部延伸,深部巷道围岩控制与稳定性问题愈发突出。深部高地应力、复杂地质条件等给巷道支护带来巨大挑战,巷道变形、破坏等问题频发,影响煤矿正常生产与安全。开展深部煤矿巷道围岩控制技术与稳定性研究,对于保障深部煤矿安全高效开采、降低巷道维护成本具有重要现实意义。

一、深部煤矿巷道围岩特征

(一) 深部围岩地质条件

深部煤矿巷道围岩所处的地质条件极为复杂,普遍存在地质构造发育的显著特点,常见断层、褶皱、节理等多种地质构造交织分布,这些构造会直接破坏围岩的完整性和连续性,形成应力集中区域和易失稳的软弱结构面。同时,深部地层受长期地质作用和地层沉积影响,岩层赋存状态复杂多变,部分区域还可能伴随含水层分布,地下水的渗透和溶蚀作用会进一步弱化围岩的力学性能,加剧围岩的破碎程度。此外,深部围岩因埋深增加还可能面临岩爆、冲击地压等动力地质灾害的潜在风险,地质条件的高度不确定性和复杂性,为巷道开挖施工和后期围岩控制工作带来了极大挑战。

(二) 围岩应力分布特点

深部煤矿巷道围岩应力分布呈现出显著的复杂性和特殊性,在巷道开挖前,围岩处于原始的三维应力平衡状态,而开挖作业会直接打破这种稳定平衡,在巷道周边形成围绕巷道的二次应力场。应力分布以巷道周边为

核心呈现明显的非均匀性特征,其中巷帮和顶底板部位最容易出现应力集中现象,且应力集中程度会随埋深增加而显著提升。同时,受地质构造发育情况和岩层走向、倾角等因素影响,应力分布还会出现明显的方向性差异,部分区域可能出现拉应力集中,而拉应力的存在极易导致围岩产生新的裂隙并加速原有裂隙扩展,最终引发围岩破坏。

二、巷道围岩控制技术

(一) 锚杆支护技术

锚杆支护技术是深部煤矿巷道围岩控制的核心技术之一,在实际工程中应用极为广泛,其核心原理是通过锚杆将巷道周边松动、破碎的围岩与深部稳定岩层紧密连接为一个整体,利用锚杆自身的抗拉、抗剪能力有效传递围岩应力,抑制围岩裂隙的产生、扩展和贯通。该技术通过科学合理布置锚杆的间距、排距和锚固深度,在巷道周边构建起有效的围岩承载结构,从而显著增强围岩的自承载能力。在实际应用过程中,需充分结合围岩的地质条件、破碎程度和应力分布特点,选择合适的锚杆类型、规格和锚固方式,确保锚杆与围岩形成可靠的整体受力体系,从而有效控制围岩的变形和破坏,保障巷道开挖后的初期稳定性和后期使用安全。

(二) 注浆加固技术

注浆加固技术主要用于处理深部煤矿巷道围岩中的裂隙、孔洞和软弱夹层等不良地质体,是提升围岩整体性和稳定性的关键技术手段,其核心原理是通过专用注浆设备向围岩裂隙或软弱区域注入特定浆液,浆液在裂隙中渗透、扩散并凝固后,可有效填充围岩内部裂隙、胶结破碎岩体,形成完整、连续的加固层,从而显著提升围岩的整体性、密实度和力学性能。该技术的关键在于根据围岩的渗透性、破碎程度和地质条件,选择适配

作者简介: 黄克斌(1996.04-),男,汉族,陕西榆林人,硕士研究生,初级工程师,研究方向:煤矿工程地质与灾害防治,瓦斯地质,矿井地质建模。

的浆液类型、配方和注浆参数，确保浆液能够均匀渗透到围岩各部位并充分胶结。注浆加固技术可单独使用处理局部不良区域，也可与其他支护技术联合应用，尤其适用于围岩破碎严重、裂隙发育广泛的区域，能够有效改善围岩的承载条件，提高巷道围岩的长期稳定性。

（三）联合支护技术

联合支护技术是针对深部煤矿巷道复杂地质条件、高应力环境和围岩易失稳特点发展而来的综合控制技术，其核心思路是通过结合两种或多种单一支护技术的优势，实现对围岩的全方位、多层次、立体化控制。常见的联合支护形式包括锚杆与锚索联合、锚杆与注浆联合、锚杆、锚索与金属网联合以及锚索与注浆联合等，不同支护技术之间相互补充、协同作用，既能利用锚杆快速控制围岩初期变形，又能通过锚索提供深层、高强度的支护力，注浆则可进一步强化围岩整体性、填补隐蔽裂隙。该技术需根据巷道围岩特征、应力状况和工程需求进行科学组合设计，明确各支护技术的应用时序和参数匹配关系，确保各支护环节有效衔接，形成稳定可靠、承载能力强的支护体系。

三、稳定性影响因素分析

（一）地质构造影响

地质构造是影响深部煤矿巷道围岩稳定性的核心因素之一，其对围岩稳定性的影响具有普遍性和显著性，断层、褶皱、节理等地质构造会直接破坏围岩的完整性和连续性，形成易滑动、易坍塌的软弱结构面。其中，断层破碎带区域的岩体多为松散破碎的岩块和碎屑，强度极低，遇扰动易发生坍塌和大幅变形；褶皱构造会使岩层产生弯曲变形，在褶皱核部区域岩层受拉应力作用易产生裂隙，形成应力集中，进一步加剧围岩破坏；节理的发育会将完整岩体切割成大小不一的块状，大幅降低岩体的整体承载能力和抗变形能力。此外，地质构造的规模、产状、分布密度和连通性不同，对围岩稳定性的影响程度也存在明显差异，复杂地质构造叠加区域的巷道开挖后，围岩稳定性更难控制。

（二）开采扰动影响

开采扰动是导致深部煤矿巷道围岩稳定性下降的重要外部因素，其影响具有动态性和累积性，在巷道周边进行采掘活动时，会打破围岩原有的应力平衡状态，产生附加应力场。这种附加应力会与原始地应力叠加，进一步加剧巷道周边的应力集中程度，导致围岩内部裂隙快速扩展、变形量增大甚至发生突发性破坏。同时，多次、多区域的开采扰动会使围岩应力场不断动态调整，

在围岩内部形成累积损伤效应，逐步弱化围岩的力学性能和承载能力。此外，开采过程中产生的震动会直接作用于围岩和支护结构，对支护体系造成冲击荷载，影响支护效果的正常发挥，若支护体系无法抵御这种冲击，会进一步引发围岩失稳，威胁巷道施工和使用安全。

（三）支护参数影响

支护参数的合理性直接决定深部煤矿巷道围岩控制的效果和围岩长期稳定性，是支护体系设计的核心内容，其中锚杆的间距、排距、锚固深度和直径，锚索的长度、直径、预紧力和布置方式，注浆的浆液类型、注浆压力、注浆量和注浆范围等参数，均会对支护效果产生显著影响。若支护参数设计不足，支护体系的整体承载能力无法满足抵御围岩应力的需求，难以有效约束围岩变形，易导致围岩失稳和支护结构失效；若参数设计过量，不仅会大幅增加支护工程成本，造成资源浪费，还可能因支护结构过于密集破坏围岩原有的完整性，引发新的应力集中问题，反而降低围岩稳定性。此外，支护参数与围岩地质条件、应力状况的适配性至关重要，参数选择不当会大幅降低支护体系的承载能力和稳定性。

四、稳定性评估方法

（一）数值模拟评估

数值模拟评估是深部煤矿巷道围岩稳定性评估的常用且重要方法，其核心是借助专业的数值分析软件，建立与实际巷道地质条件、开挖方式和支护方案高度相符的数值模型，通过模拟巷道开挖和支护施工全过程，分析围岩在不同阶段的应力分布规律、变形演化特征和潜在破坏模式。该方法能够实现对围岩稳定性的动态预测和预判，可根据不同的地质条件、开采方案和支护参数组合进行多场景模拟分析，对比不同方案的控制效果，为支护方案的优化设计提供科学的理论依据。数值模拟评估具有操作灵活便捷、研究成本较低、可重复性强和适用范围广的优势，能够有效弥补现场监测难以覆盖全部工况和极端条件的不足，是开展巷道围岩稳定性研究的核心手段之一。

（二）现场监测评估

现场监测评估是保障深部煤矿巷道施工安全和围岩长期稳定的关键手段，具有真实性强、针对性明确和实时性突出的特点，其核心是通过在巷道顶底板、巷帮等关键部位布置专业监测设备，实时采集围岩表面及内部变形、应力变化、支护结构受力等核心数据，直观、准确地反映围岩的稳定性状态和支护体系的工作情况。监测内容主要包括巷道顶底板移近量、巷帮收敛量、围岩

内部位移、锚杆锚索受力、围岩应力等，通过对监测数据的实时整理、分析和趋势预判，可及时发现围岩稳定性隐患和支护体系的薄弱环节，为施工工艺调整和支护加固措施的实施提供可靠依据。同时，现场监测评估结果还能够有效验证数值模拟结果的准确性，指导现场支护作业的科学开展。

（三）综合指标评估

综合指标评估是结合多种评估维度和关键指标，对深部煤矿巷道围岩稳定性进行全面、系统、客观评价的方法，其核心是通过选取能够反映围岩地质条件、应力状态、支护效果、变形特征和环境影响等多方面的关键指标，构建科学完善的综合评估体系。该方法不仅考虑单一指标对围岩稳定性的独立影响，还注重各指标之间的关联性、协同性和制约作用，通过对各指标进行合理的权重分配和量化分析，结合定性与定量评价手段，得出围岩稳定性的整体评价结果和等级划分。综合指标评估能够有效避免单一评估方法的局限性和片面性，全面、准确地反映影响围岩稳定性的各类因素及其相互作用，为巷道围岩控制方案的制定、优化和调整提供全面的理论支撑。

五、控制技术优化策略

（一）支护参数优化

支护参数优化是提升深部煤矿巷道围岩控制效果、保障围岩稳定的核心策略，其核心思路是以围岩地质条件、破碎程度和应力分布特征为基础，结合数值模拟分析结果和现场监测数据，对锚杆、锚索、注浆等各项支护参数进行动态调整和优化匹配。优化过程中需严格遵循适配性原则，确保支护参数与围岩力学性能、应力大小和变形需求相匹配，在充分满足支护强度和稳定性要求的前提下，兼顾工程经济性和施工可行性。同时，针对巷道不同区域的围岩稳定性差异，采用差异化的支护参数设计思路，对应力集中区域、软弱结构面区域和围岩破碎严重区域适当强化支护参数，对稳定性较好的区域合理简化支护，实现支护资源的科学合理配置，全面提升支护体系的整体承载能力。

（二）施工工艺改进

施工工艺的改进对提升深部煤矿巷道围岩控制效果、降低施工扰动影响具有重要意义，是保障支护质量和围岩稳定的关键环节。在开挖工艺方面，应摒弃传统的一次性开挖方式，采用分步开挖、及时支护的施工模式，严格控制单次开挖进尺，减少开挖过程中围岩的暴露时间和暴露面积，最大程度降低围岩扰动程度。在支护施

工工艺方面，需规范锚杆锚索的钻孔、安装和锚固流程，严格把控锚固剂质量和搅拌时间，确保锚固质量可靠，同时优化注浆工艺，合理选择注浆顺序和方式，提高浆液的渗透效果和胶结强度。此外，还需加强施工过程中的质量管控，严格执行各施工环节的技术标准和验收规范，避免因施工操作不当导致支护效果下降，合理安排施工顺序，避免多区域同时开挖产生的叠加扰动。

（三）动态调控措施

动态调控措施是应对深部煤矿巷道围岩应力动态变化、稳定性波动和突发情况的有效策略，其核心是建立基于实时监测数据和地质条件动态变化的动态调控机制，通过对围岩变形、应力、支护结构受力等监测数据的持续采集、整理和分析，精准判断围岩稳定性状态和支护体系的工作性能。当监测数据出现异常波动或超出预警阈值时，及时采取针对性的调控措施，如补充锚杆锚索、强化注浆加固、调整支护间距或增加支护层数等，防止围岩变形进一步发展和失稳。同时，结合开采进度、采掘布局和地质条件的动态变化，提前预判围岩应力场的演变趋势和可能出现的稳定性问题，制定前瞻性的调控方案，实现对围岩稳定性的主动控制和精准调控，保障巷道在整个服务周期内的稳定安全。

结束语

深部煤矿巷道围岩控制技术与稳定性研究是保障深部煤矿安全生产的关键。通过对深部巷道围岩特征、控制技术、稳定性影响因素等方面研究，明确了优化控制技术与提升稳定性的方向。未来需进一步深化研究，结合实际工程不断完善控制方案，为深部煤矿安全高效开采提供坚实技术保障。

参考文献

- [1] 曹庆华. 深部巷道围岩稳定性控制技术[J]. 能源与环保, 2020, 42(08): 213-215+219.
- [2] 刘永. 深部巷道围岩稳定性控制技术[J]. 矿业装备, 2021, (02): 82-83.
- [3] 孙俊彦. 深部软岩巷道围岩稳定性控制技术[J]. 陕西煤炭, 2022, 41(06): 21-25.
- [4] 岳东. 焦坪矿区深部煤矿巷道围岩动力破坏机理及其控制技术. 陕西省, 陕西陕煤铜川矿业有限公司, 2023-07-13.
- [5] 降承春. 深部区域破碎围岩开拓巷道围岩控制技术研究[J]. 山西化工, 2024, 44(01): 223-224.