

# Research on Stability Control Technology for Surrounding Rock in Deep Mining Engineering

Guannan Wang

Pingliang Xin'an Coal Industry Co., Ltd., Xu Mining Group, Pingliang, Gansu, 744201, China

## Abstract

Deep mining operations face complex environments characterized by high geostatic stress, elevated temperatures, and high permeability, resulting in significantly different stress conditions for surrounding rock compared to shallow mining. Stability control has become critical for ensuring mine safety and operational efficiency. With increasing depth, surrounding rock deformation exhibits diverse patterns, and its mechanical properties demonstrate stress sensitivity and time-dependent behavior. Traditional static support methods are no longer sufficient, driving the integration of active control and information technology. Based on analyzing the failure mechanisms of deep surrounding rock, this study explores control theories from three dimensions: deformation characteristics, stress transfer pathways, and coupling mechanisms of support systems. Key technologies such as bolt-cable composite support, flexible systems, energy-absorbing structures, and intelligent monitoring systems are investigated. The results indicate that surrounding rock control must adhere to the principle of "rock-centric management," establishing a full lifecycle support system through structural regulation, parameter optimization, and information-based interventions to provide technical support for safe and efficient deep mining operations.

## Keywords

Deep mining; Surrounding rock control; Geostress; Anchoring system

## 深部采矿工程围岩稳定性控制技术研究

王冠南

徐矿集团平凉新安煤业有限责任公司, 中国·甘肃 平凉 744201

## 摘要

深部采矿工程面临高地应力、高温、高渗流等复杂环境, 围岩受力条件显著不同于浅部开采, 其稳定性控制成为影响矿山安全与效率的关键。随着深度增加, 围岩变形呈现多样化, 力学性质表现出应力敏感性与时效性, 传统静态支护已难以满足需求, 技术正向主动调控与信息化协同发展。本研究在分析深部围岩破坏机理基础上, 从变形特征、应力传递路径及支护体系耦合机制三个维度探讨了控制理论, 并对锚杆锚索联合支护、柔性体系、能量吸收型结构及智能监测系统关键技术展开研究。结果表明, 围岩控制必须坚持“以围岩为主体”的理念, 通过结构调控、参数优化与信息化干预构建全寿命周期支护体系, 为深部矿山安全高效开采提供技术支撑。

## 关键词

深部采矿; 围岩控制; 地应力; 锚固体系

## 1 引言

我国矿山开采深度不断增加, 当前众多金属矿与非金属矿已进入 800 米甚至千米级深部开采阶段。在深部复杂地质条件下, 围岩应力调整剧烈, 破裂形式多样, 动力灾害风险显著提升, 围岩稳定性控制成为深部采矿的核心技术问题。与浅部工程相比, 深部围岩不仅面临高地应力集中, 还呈现出温度升高、地下水压力加大以及岩体结构节理发育等多重影响因素。传统支护技术难以解决深部围岩的变形持续性、突发性及破坏不可逆性等问题, 迫切需要构建适应深部

工程环境的新型控制体系。近年来, 随着力学理论、数值模拟、监测技术与材料科学发展, 深部围岩控制技术逐步从经验型向机理型、从单一支护向多技术耦合体系转变。本研究旨在梳理深部围岩变形破坏机理, 分析典型工程特征, 探讨综合支护和智能监测技术的应用路径, 为深部采矿工程的安全高效运行提供理论与实践参考。

## 2 深部围岩变形破坏机理分析

### 2.1 高地应力作用下的围岩破裂模式特征

深部围岩的最显著特征是高地应力作用, 其破裂过程与浅部工程存在显著差异。随着埋深增加, 原岩应力水平显著提高, 当巷道开挖导致原有应力场重新分布时, 局部区域极易形成应力集中带, 使围岩发生剪切破坏、压剪破坏、张

【作者简介】王冠南 (1990—), 男, 中国江苏新沂人, 本科, 助理工程师, 从事煤矿安全生产管理研究。

拉剥落以及冲击型破裂等多种模式。高地应力条件下,岩体常表现为“脆性—延性”转化行为,即岩体先经历裂隙萌生与局部破坏,随后在持续应力作用下裂隙扩展、贯通并最终导致整体失稳。此外,围岩破坏具有明显的时效性,由于岩体松弛过程不均匀,应力持续释放可能造成二次变形甚至晚期灾害,对支护体系及时性与可靠性提出更高要求。因此,深入分析高地应力下围岩破裂模式对制定有效控制技术具有重要意义。

## 2.2 深部高温环境对围岩结构稳定性的影响

深部采矿随深度增加会产生显著的地温升高,高温作用对岩体力学性质和围岩稳定性产生多重影响。高温可降低岩体的抗压强度、黏聚力和弹性模量,使其承载能力下降,更易在载荷作用下发生破裂。温度梯度导致的热膨胀差异会在岩体内部形成温度应力,诱发热裂隙并加速原有结构面的退化。此外,高温环境会影响支护体系性能,使锚固剂固结能力下降,支护构件在长期作用下疲劳加剧,降低整体支护效能。因此,在深部工程设计中必须充分考虑温度因素,结合通风降温和耐高温材料使用等措施,才能有效降低高温对围岩稳定性的负面影响。

## 2.3 渗流压力与节理结构对围岩的复合影响

深部围岩往往伴随较高的地下水压力,渗流作用会改变岩体有效应力状态,使黏聚力与内摩擦角下降,从而削弱岩体强度。节理裂隙较发育的区域在水压作用下更易发生剪滑或坍塌,尤其在高地应力环境中,水力劣化效应与结构劣化效应叠加,使破裂模式更加复杂。水—力耦合作用会促进裂隙扩展,形成渗流通道,进一步降低围岩的承载能力。实际工程中,围岩破坏往往呈现应力、渗流和节理结构共同作用的结果。因此,深部围岩控制需综合考虑水压削减、节理加固与支护优化,例如采取超前探水、注浆封堵及多级支护等措施,才能有效提升围岩的整体稳定性。

# 3 深部围岩稳定性影响因素分析

## 3.1 岩体结构与力学性质的控制作用

深部围岩的稳定性在很大程度上取决于岩体自身的结构特征与力学性质,不同岩性对载荷作用的响应方式差异显著。坚硬岩体在高地应力环境下更容易发生脆性破裂,表现为裂隙瞬时贯通、剥落甚至冲击式破坏;而软弱岩体结构致密度低,富含黏土矿物,常在长期应力作用下产生明显蠕变,导致巷道持续变形。节理裂隙的发育程度直接决定围岩整体性,节理密度越大,岩体越难形成自承结构,对支护依赖性更强。层理与节理面方向与巷道开挖方向若呈不利组合,则会形成滑移面,极易诱发剪切破坏。岩体完整性指数、单轴抗压强度及变形模量等力学参数不仅影响围岩稳定性判断,也与支护系统设计密切相关。因此,在深部开采过程中必须针对不同岩体结构特征开展专项研究,确保支护参数匹配围岩承载特性,以获得更高稳定性。

## 3.2 开挖方式与施工扰动的影响机制

深部巷道开挖不可避免地改变围岩原有应力平衡,扰动强度与方式直接决定围岩失稳风险。机械化掘进能够提高施工效率,但在节理裂隙发育、破碎带显著的区域,强力切削会加剧岩体松动,使松动圈范围扩大。爆破开挖虽适用于多种地质条件,但爆破振动易导致岩体微裂隙扩展,若装药量或起爆顺序控制不当,会产生超挖、欠挖甚至大面积块体脱落。巷道开挖速度也影响围岩的力学应力调整过程,过快开挖会导致围岩来不及形成新的支撑结构,使变形集中于短时段内,诱发围岩突然失稳。施工顺序若安排不合理,如跳空开挖或长距离无支护推进,将进一步加剧应力集中。因此,合理规划开挖工艺、爆破参数及施工节奏,是减少围岩扰动、提高深部巷道稳定性的必要条件。

## 3.3 支护体系参数匹配与协同效应影响

深部围岩控制并非单一支护结构的作用结果,而是不同支护构件之间形成的协同体系。锚杆用于加固围岩浅部松动层,通过形成加固体改善围岩整体性;锚索则承担深层加固作用,其预应力能够有效限制深部裂隙扩展。钢拱架负责提供整体支撑框架,而喷射混凝土则在构建表层封闭结构、提高围岩抗剪能力方面发挥重要作用。支护体系的有效性依赖于各构件的参数匹配,包括锚固深度、支护间距、预应力大小、拱架刚度等。如果锚固深度不足,难以穿越松动圈进入稳定围岩;若支护间距过大,则无法形成连续结构面;预应力不足或不均会造成局部围岩承载失衡。此外,支护的施工时机也极为关键,越早施加支护越能减轻围岩松弛和应力重新分布带来的不利影响。只有通过合理匹配支护参数并构建协同体系,才能保证深部巷道在全生命周期内保持稳定。

# 4 深部围岩控制关键技术体系

## 4.1 锚杆—锚索联合支护技术

深部采矿环境中围岩受力条件复杂,单一支护方式往往难以形成有效的稳定结构,因此锚杆—锚索联合支护成为广泛应用的核心技术。浅层锚杆负责加固围岩松动圈,通过形成“锚固体”增强岩体整体性,使围岩具备一定的自承能力;深层锚索则深入稳定围岩区,其预应力作用可有效限制深部裂隙扩展,承担高应力作用下的主承载任务,形成深浅联动的分级加固体体系。联合支护的关键在于形成连续的受力链,使围岩应力释放过程更为平缓,避免局部集中导致的破裂失稳。工程实践表明,在高地应力区域施加合理预应力,可显著降低岩爆发生概率,强化巷道长期稳定性。通过优化锚固深度、锚索间距及预应力参数,联合支护体系能够适应多种复杂地质条件,是深部巷道围岩控制的重要途径。

## 4.2 柔性支护与能量吸收型结构应用

深部工程中的动力扰动强烈,围岩变形常具有突发性与大尺度特征,使传统的刚性支护结构难以在大变形环境中保持承载能力。柔性支护体系通过材料特性与结构设计,使

支护构件能够在变形过程中持续吸收能量,有效延缓破坏过程。钢带网、可让式支架、可伸缩锚杆与能量吸收器等支护形式具有较高的延展性,可在围岩快速变形阶段保持高强度支撑,同时允许一定程度的受控让压,使围岩形成稳定的承载圈。柔性支护结构尤其适用于软岩大变形巷道、高应力变形区及冲击地压显著区域。其优势在于不以刚性抵抗变形,而是通过延性与耗能机制实现“缓释—调控—稳定”的作用过程,为深部动力灾害多发区提供了更高安全裕度。

### 4.3 信息化监测与数字化围岩评估

深部围岩控制技术的发展离不开信息化与数字化手段的支撑。通过激光扫描技术可快速获取巷道三维变形数据,为围岩状态分析提供高精度依据;分布式光纤监测能够实现锚杆、锚索受力状态及围岩变形量的连续测量,揭示围岩力学响应过程;微震监测系统则能够捕捉岩体破裂活动,为动力灾害预测提供临近预警信号。随着数字孪生与三维地质建模技术的发展,工程人员可以构建真实地质条件下的动态虚拟巷道,实现围岩稳定性模拟、风险预测与支护方案优化。数字化评估体系的引入,使围岩控制从经验判断转向数据驱动与模型决策,显著提升支护设计、施工调整与安全预警的精度与可靠性,是未来深部采矿智能化发展的重要方向。

## 5 深部围岩控制的系统优化策略

### 5.1 构建主动可调控的支护体系

深部围岩变形具有显著的延时性、突发性和区域差异性,使传统以被动抗力为主的支护模式难以满足控制需求。构建主动可调控支护体系是提升深部巷道稳定性的关键方向。通过设置可调预应力锚索,可在围岩应力释放阶段及时施加约束力,使支护结构与围岩形成协同受力关系,从而避免初期大变形导致的不可逆破坏。让压结构能够在围岩变形早期提供缓冲空间,使围岩在受控条件下实现“可控让压—逐步闭合”的变形模式,有利于形成新的承载结构。分级支护方式通过“早期强约束—中期调控—后期补强”的步骤推进,使支护体系具备动态响应能力。主动调控体系的构建不仅提高了围岩稳定性,也为复杂地质环境下的深部采矿提供了更加灵活、安全的技术体系。

### 5.2 强化围岩—支护耦合机制研究

深部工程中围岩的力学行为受到应力调整、渗流作用和结构面变化的共同影响,支护体系只有在与围岩形成合理耦合关系时才能发挥最大效能。因此,围岩—支护耦合机制研究是提升控制效果的重要基础。通过数值模拟技术,可深

入分析不同支护参数配置下围岩塑性区发展规律、应力传递路径及变形特征,为支护设计提供理论依据。现场监测数据能够反映支护构件在实际受力状态下的工作机制,如锚杆受力曲线、围岩位移演化等,为优化支护体系提供关键参考。合理的支护刚度与柔度搭配,可使围岩围压逐步恢复,提高岩体自承能力。通过研究围岩与支护在不同阶段的力学耦合关系,可建立更加精准的控制模型,使深部巷道保持长期稳定。

### 5.3 发展绿色、高耐久材料与智能装备

深部采矿环境中温度高、湿度大、腐蚀性强,对支护材料的耐久性与环保性提出更高要求。绿色高分子锚固材料具有强度高、固化快、环保性好等优点,可在高应力区提供更可靠的锚固效果;耐高温喷射混凝土能在深部高温条件下保持稳定力学性能,降低强度衰减风险;可回收或可降解支护材料的开发则符合绿色矿山建设理念,有助于减少工程遗留物对环境的影响。在装备方面,自动化钻锚设备可提高施工效率与支护精度,减少深部危险环境下人工暴露时间。智能巡检与监测平台通过传感器实时采集变形、应力与温湿度数据,结合云端分析实现预警与主动干预,使支护体系从“被动监测”转向“智能控制”。材料技术与智能装备的协同进步,将推动深部围岩控制进入高效、安全与绿色发展的新阶段。

## 6 结语

深部采矿工程围岩稳定性控制是一个集力学机理分析、结构优化设计、智能监测与材料技术于一体的综合研究问题。深部环境复杂多变,围岩破坏模式多样,使传统单一的支护方式难以满足安全需求。本研究从深部围岩变形特征出发,分析了影响围岩稳定性的多重因素,提出了以联合支护、柔性结构与信息化监测为核心的综合控制技术体系。未来,随着深部采矿向更高深度和更复杂地质条件推进,围岩控制技术将更加注重主动调控、智能响应与材料创新。构建以围岩为主体、以信息化为支撑的全寿命周期控制体系,将成为实现矿山安全高效开采的重要方向,为我国矿产资源战略开发提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 权开兴,杨坤.深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论及技术探究[J].中国金属通报,2024,(07):58-60.
- [2] 蔡美峰.深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2020,2(03):5-13.
- [3] 杜剑.试论采矿工程中煤矿深部岩巷围岩稳定与支护对策[J].内蒙古煤炭经济,2016,(Z1):34+95.