

Analysis on the application of coal mine excavation support technology under complex geological conditions

Meng Zhen Guohua Chang

Kexin Coal Industry Co., Ltd., Aksu, Xinjiang, 842000, China

Abstract

The safe and efficient excavation in coal mines is severely constrained by complex geological conditions. This paper focuses on typical complex geological environments, including fault zones, fractured zones, soft rock, high ground stress, and water-rich areas. It delves into the complex and challenging deformation mechanisms of surrounding rock and the core technical bottlenecks, such as the tendency for conventional support to fail. The paper explores key technical approaches, including precise advanced geological exploration, dynamic support design based on surrounding rock characteristics, high prestress active support, and special passive support structures. The aim is to provide theoretical support for enhancing tunnel stability control under complex conditions and to guide practical implementation.

Keywords

complex geological conditions; coal mine excavation; support technology; surrounding rock control

复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术应用解析

孟震 常国华

库车市科兴煤炭实业有限责任公司, 中国·新疆阿克苏 842000

摘要

煤矿安全高效掘进受到复杂地质条件的严重制约, 本文对此聚集于断层破碎带、软岩、高地应力及富水区等典型的复杂地质环境上, 针对其中围岩变形机理呈现出的复杂难测状况, 以及常规支护容易失效等核心技术瓶颈展开深入剖析。围绕精细化超前地质探测、基于围岩特性进行的动态支护设计、高预应力主动支护以及特殊被动支护结构等关键技术路径, 针对性地探讨其应用价值所在, 研究目的在于为复杂条件下提升巷道稳定性控制能力给予理论支撑, 并指明实践方向。

关键词

复杂地质条件; 煤矿掘进; 支护技术; 围岩控制

1 引言

煤炭能源的稳定供给对国家发展至关重要, 而复杂多变的地质条件显著增加了煤矿巷道掘进与维护的安全风险和技术难度。在断层破碎带、软弱围岩、高地应力还有富水区等这类复杂地质环境中, 传统的支护方式往往在控制围岩变形失稳方面难以取得良好效果, 经常会出现支护结构遭到破坏的情况, 甚至有可能引发安全事故。本文从保障煤矿安全生产和提升资源开采效率的角度出发, 针对此类复杂地质条件, 对巷道围岩变形破坏所蕴含的内在机理进行解析, 系统且全面地研究并应用那些科学有效的掘进支护关键技术, 具有迫切的现实意义和重要的工程价值。

2 复杂地质条件与煤矿掘进支护的理论基础

2.1 煤矿掘进面临的主要复杂地质类型

掘进是在岩(土)层中, 开掘各种形状、断面或纵横交错的井、巷、硐室的工作。而在复杂地质环境中进行煤矿开拓作业时, 巷道穿行区域常遇多重地质构造挑战。断层破碎带表现为岩体连续性显著中断, 密集节理及裂隙网络发育, 原始岩层结构被强烈扰动甚至完全破坏, 形成极其不稳定的块状或碎裂状地质体, 其力学强度远低于未受干扰的原生岩层, 对围岩的整体稳定性构成显著风险。软弱岩层则以其明显的流变特性区别于普通岩体, 这类岩石往往矿物成分特殊或胶结疏松, 暴露于采掘空间后表现出快速时效变形, 持续底鼓等围岩变形现象, 加剧了工程维护的复杂性。深层开采延伸至大地应力显著增强区域时, 高地应力场引发岩体产生剧烈能量释放潜能, 高静载压力造成岩体微裂隙扩张, 诱导岩爆或大规模片帮风险陡增。富含地下水环境揭露后水力活动频繁, 多孔隙或岩溶发育地层蕴含高压含水层, 水岩相互

【作者简介】孟震(1991-), 男, 中国河南浚池人, 本科, 工程师, 注册安全工程师, 从事煤矿工程研究。

作用弱化岩体力学参数，大量渗水乃至突涌水直接威胁巷道整体稳固。

2.2 煤矿巷道围岩稳定性控制基本原理

煤层围岩指煤层周围一定厚度范围内对其稳定性产生显著影响的岩层组合，主要包括直接顶、基本顶和直接底板三个核心构造层。巷道开挖打破了原始地层的力学平衡状态，引起围岩应力重新分布并在巷道周边形成集中应力带，围岩自身强度能否有效抵抗这种应力集中决定了其短期稳定性。时效效应下，围岩的流变特性可能促使应力持续调整与变形累积，其长期稳定则依赖于围岩内部结构抵抗损伤劣化的能力以及支护结构适时提供的约束力。科学支护的核心在于理解并顺应围岩应力场演化的内在规律，通过主动或被动的方式优化围岩应力状态，充分激发围岩自身承载潜力，同时及时补偿其强度损失，最终促成“围岩-支护”体系在新的力学环境下达到动态平衡与协同承载。

3 复杂地质条件下煤矿掘进支护面临的技术问题

3.1 围岩变形破坏机理复杂且预测困难

在构造复杂区域进行煤巷掘进作业时，岩体破坏形态呈现高度非线性特征，地应力场与断层破碎带叠加作用使得围岩变形模式超出传统理论框架，塑性流变、结构面错动离层及应力驱动型碎裂可能同时显现且相互耦合。软岩地层吸水膨胀特性与高地应力环境形成特殊岩体力学响应，传统弹塑性模型难以准确捕捉其时效变形全过程，尤其在断层交会带区域失稳突变现象频发。高地应力区能量积累释放过程导致岩爆孕育规律隐蔽性增强，微观裂隙发育程度与宏观破坏时间节点存在显著统计离散性，现有监测系统对岩体内部损伤演化捕捉存在明显滞后性。断层构造影响区岩体破坏边界模糊不清，不同层位岩石力学行为差异导致破坏范围预测误差扩大，常规位移监测数据常滞后于实际围岩劣化进程，多元耦合致灾机制的系统辨识构成围岩稳定性分析的核心挑战^[1-3]。

3.2 常规支护方式适应性差且易失效

在断层破碎带、高地应力区或软岩地层等复杂地质环境中，常规设计的锚杆锚索支护体系时常遭遇围岩应力场显著异于预设条件的挑战，其提供的支护阻力难以有效平衡围岩剧烈变形释放的能量，导致杆体承受超出材料极限的拉伸或剪切载荷而出现破断失效。与此同时，传统刚性支架结构面对围岩持续不均匀变形与异常压力作用时，其连接节点与主体构件易产生超出弹性范围的塑性变形甚至结构失稳，无法维持巷道设计断面所需的稳定几何形态，使得支护功能大打折扣。

3.3 高地压软岩巷道支护难度大且返修率高

高地应力环境与岩体强烈流变特性交互作用，软岩巷道围岩呈现出远超常规工程经验的持续非均匀变形特征，塑性区向深部不规则扩展形成时变压力拱。高地压显现形式的

动态演变导致常规支护结构受力响应呈现强非线性，支护体初始设计依据常偏离实际压力演化轨迹。软岩矿物成分遇水活化产生的差异膨胀使围岩内部应力重分布更趋紊乱，诱发支护结构局部应力集中与整体协调变形能力失衡。高地压驱动下碎裂岩块沿弱面持续扩容产生蠕变挤压效应，引起锚固结构渐进性拉伸失效或剪切滑脱。

4 复杂地质条件下煤矿掘进支护的关键技术措施

4.1 地质条件精细化超前探测与评估技术应用

现代煤矿掘进实践中，地质条件精细化超前探测依赖于多种地球物理方法与定向钻探技术的综合运用，利用震波反射、电磁感应或电阻率测量原理捕捉掘进前方岩层结构、断层位置及富水异常区的物理响应信号。定向钻探设备配合随钻测量系统能够精确控制钻孔轨迹并实时获取岩屑样本与孔内参数，为直接验证物探推断提供关键依据。采集的海量地球物理数据与钻探信息需要借助专业软件平台进行深度处理与联合反演，剔除干扰信号并融合多源信息，最终构建出反映掘进前方数十至数百米范围内地质构造、岩性分布及水文特征的高精度三维可视化地质模型。地质工程师基于该动态更新的模型数据，结合区域地质规律与工程经验，定量评估目标区段围岩的完整性级别、地应力状态及潜在灾害风险等级，形成具有明确空间位置和属性特征的精细化地质评估报告，为后续支护方案的针对性设计与施工决策提供不可替代的原始数据支撑。具体流程如图1所示：

4.2 基于围岩特性的差异化动态支护设计技术

地质信息系统实时采集揭露面物理力学参数与构造产状数据，建立随掘进动态更新的三维地质力学模型，指导支护参数动态调整。监测数据分析锚杆轴力时空变化规律与表面位移速率关联性，当收敛速率突破设定阈值时触发支护强度升级预案。结构组合依据围岩分类指数优化初始配置方案，软弱夹层区段强化护表构件与锚固深部稳定岩层的协同作用。断层影响带采用三维锚索桁架与自适应托盘构筑立体支护网络，抵御构造应力引发的多向变形。岩性过渡区段设计变刚度复合结构，刚柔交替层缓冲应力重分布冲击，顶部桁架锚索匹配帮部可缩性U型钢形成梯度承载区；高地应力区域控制施工扰动采取短段掘砌方式，预留变形量值依据上一循环监测反馈结果修正；含水地层选择疏水型锚固剂与全断面封闭层，在控制渗流路径的同时维护注浆体长期黏结强度。

4.3 高强度高预应力主动支护技术应用

高强度高预应力主动支护体系的核心在于选用抗拉强度显著超越普通材料的特种钢材制造强力锚杆锚索杆体，其大直径结构与优化的螺纹设计赋予其抵抗高地应力复杂环境下巨大拉伸与剪切载荷的固有力量。施工过程中借助大扭矩锚杆钻机与专用张拉设备，在锚杆锚索安装伊始即对其施

加数百千牛量级的初始预紧力，促使杆体瞬间绷紧并对围岩表面产生强有力的主动约束，有效抑制围岩早期离层与松弛变形的发展趋势。与之相协同的注浆加固技术侧重于将特定配比的水泥基或化学浆液，在合理控制的压力梯度下灌注至锚杆锚索钻孔周围的岩体裂隙网络内部，浆液凝固后在岩体内部形成纵横交错的结石体骨架，显著增强破碎围岩或软弱夹层的整体性、密实度及其抵抗变形传递的能力。精心设计的注浆参数确保浆液有效渗透至目标加固区域，最终在巷道周边塑造出一个由高强度锚固结构与改良后围岩共同组成的、具备优异抗变形能力的承载结构圈^[4]。

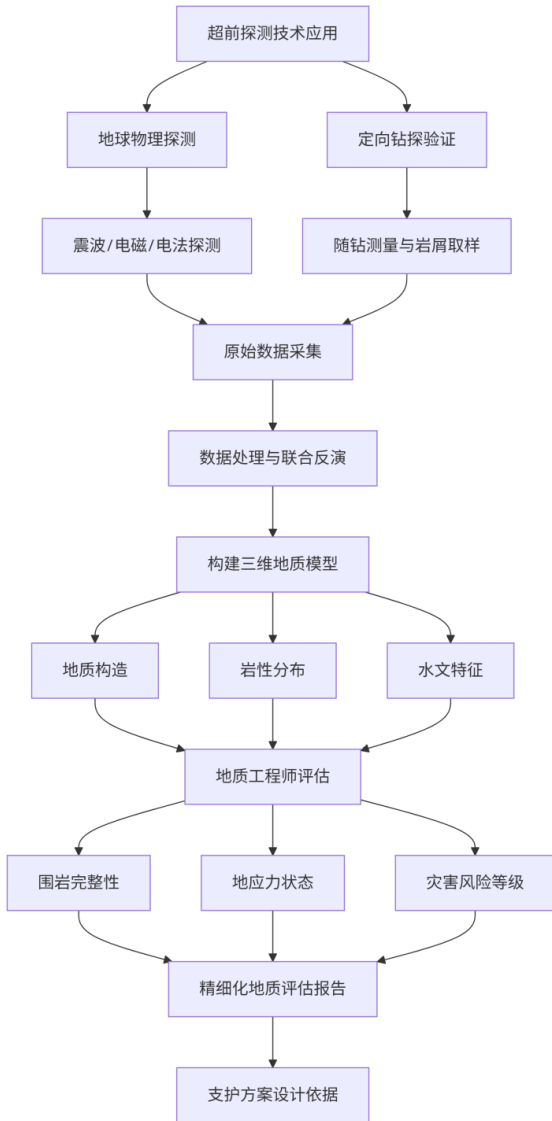


图 1 超前探测评估流程体系图

4.4 适用于特殊条件的新型被动支护技术

在围岩大变形控制领域，可缩性支架通过摩擦装置与恒阻结构的精密配合赋予支护系统可控让压特性，当围岩应力转移至支架结构时，双楔块卡缆的滑动摩擦耗能可将峰值压力限定在预设工作阻力区间。其变形机构核心在于拱梁接头

处的多级滑移构造，分级屈服节点依据不同岩层应力历史预先标定，确保支架在遭遇 200 毫米以上异常收敛时仍维持有效支撑截面。U 型钢封闭支架凭借型钢构件搭接区的力学闭锁效应形成整体承载环，卡缆预紧力精准控制产生的径向约束力场抑制了帮部碎裂岩体的侧向扩容，封闭式弧板结构均匀传递顶板水平构造应力至两帮锚固端。支架选型参数与巷道断面尺寸严格关联，针对 4.5 米以上跨度巷道采用多节可缩顶梁与加强柱腿的复合框架，柱腿底部球铰结构自适应底板不均匀沉降，顶梁弧板曲率半径优化设计控制局部弯矩值在材料弹性范围。高强度卡缆螺栓的扭矩梯度施加流程形成渐进式结构刚度，初始工作阻力设定为支护失效临界值的 70% 区域，为后续围岩流变预留结构响应空间。摩擦耗能装置内置高耐磨铜基合金衬板维持恒阻滑移稳定性，在支架经历极限变形后仍保有残余承载力 45% 的安全冗余。施工阶段运用激光指向仪实时校正支架空间位姿，误差值需限制在巷道轴向的 1% 区间内，支架安装后的顶梁水平偏移角度直接影响后续让压性能的有效发挥^[5,6]。

5 结语

复杂地质条件下煤矿巷道的稳定控制是一项极具挑战的系统工程，对于突破围岩变形机理认知方面的局限，以及克服常规支护适应性不足这类难题而言，关键举措在于对地质进行精细化的超前探测评估并加以深化，要实施基于围岩动态响应的差异化支护设计，对高预应力主动支护效能予以强化，同时还要发展能适用于极端条件的新型被动支护结构。未来研究应把着力点放在促使支护技术同智能感知、大数据分析进行深度融合之上，以此推动支护体系朝着自适应、高可靠以及智能化的方向不断演进，为深部及复杂煤层的安全开采筑牢坚实的技术根基。

参考文献

- [1] 雷亮,郭永利,田永青,等. 复杂地质条件下煤矿掘进支护技术要点及应用难点 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, (07): 178-180. DOI:10.13487/j.cnki.imce.026543.
- [2] 任国伟. 复杂地质条件下煤矿掘进支护技术的应用 [J]. 矿业装备, 2024, (08): 28-30.
- [3] 刘策,王帅. 复杂地质条件下的煤矿掘进支护技术的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (11): 148-150. DOI:10.13487/j.cnki.imce.025276.
- [4] 袁义龙. 复杂地质条件下煤矿资源掘进支护技术应用探索 [J]. 生态与资源, 2024, (04): 96-98.
- [5] 韩于锋. 复杂地质条件下的煤矿掘进与支护技术的应用研究 [J]. 自动化应用, 2024, 65 (04): 154-156. DOI:10.19769/j.zdhy.2024.04.051.
- [6] 叶敬明. 复杂地质条件下煤矿巷道掘进支护技术的应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (22): 154-156. DOI:10.13487/j.cnki.imce.024491.