

Research on the Control Technology of Surrounding Rock and Optimization of Support System in Deep Coal Mining

Chao Gao

Shaanxi Xihan Xinglong Coal Mine Co., Ltd., Weinan, Shaanxi, 715403, China

Abstract

With the continuous deepening of coal mining in China, deep coal seam extraction faces complex geological environments characterized by high ground stress, elevated temperatures, high gas content, and strong disturbances, leading to significant deformation and failure of surrounding rock. Traditional support systems struggle to effectively control surrounding rock stability. Based on the mechanical characteristics of deep coal seams and the failure mechanisms of surrounding rock, this study systematically analyzes stress distribution patterns and surrounding rock instability evolution under deep mining conditions, while exploring optimization paths for support parameters and innovative technical systems. Through numerical simulations, theoretical analysis, and field validation, the research proposes a “active-passive-synergistic” composite control technology. This system, centered on multi-level anchoring, strength zoning, and energy dissipation, achieves rational stress release and redistribution in surrounding rock. Results demonstrate that this system significantly mitigates roof subsidence, rib convergence, and floor bulging, thereby enhancing long-term roadway stability and support material utilization efficiency.

Keywords

deep coal seam; surrounding rock control; high geostress; support optimization; numerical simulation

深部煤层开采围岩控制技术及其支护体系优化研究

高超

陕西西韩兴隆煤矿有限公司, 中国·陕西·渭南 715403

摘要

随着我国煤炭资源开采深度不断增加,深部煤层开采面临高地应力、高温、高瓦斯及强扰动等复杂地质环境,导致围岩变形破坏特征显著,传统支护体系难以有效控制围岩稳定。本文基于深部煤层力学特征与围岩破坏机理,系统分析了深部开采条件下的应力分布规律与围岩失稳演化过程,探讨了支护参数优化与技术体系创新路径。研究通过数值模拟、理论分析及现场对比验证,提出“主动—被动—协同”复合控制技术,以多级锚固、强度分区与能量耗散为核心,实现围岩应力的合理释放与再分配。结果表明,该体系能够显著减缓顶板下沉、两帮收敛和底鼓上拱现象,提高巷道长期稳定性与支护材料利用效率。

关键词

深部煤层; 围岩控制; 高地应力; 支护优化; 数值模拟

1 引言

深部煤层开采已成为我国煤炭工业发展的必然趋势。随着浅部资源逐步枯竭,开采深度普遍超过 800 米甚至上千米,地应力水平显著提高,地温升高、瓦斯压力增大、断裂构造密集等因素叠加,使得围岩应力状态更加复杂。传统的经验性支护方式在深部环境下表现出明显局限,易出现锚杆剪断、顶板垮落、底鼓隆起等破坏现象,严重威胁矿井安全生产。深部围岩控制的关键在于正确认识围岩力学响应规律,建立适应高应力与强扰动条件的支护体系,实现“应

力可调、变形可控、能量可耗”的动态稳定目标。本文立足深部煤层围岩力学特征,探讨其破坏机理与控制技术,提出系统的支护体系优化思路,为深部矿井安全高效开采提供支撑。

2 深部煤层围岩受力特征与变形机理

2.1 深部地应力分布规律

深部煤层的地应力场由自重应力、构造应力和采动扰动应力共同叠加而成,其分布具有显著的空间非均匀性。随着埋深增加,垂直应力按线性规律增长,而水平应力的变化受构造运动与岩层力学性质影响更为复杂。在断裂发育区或褶皱构造带,水平应力集中现象尤为明显,局部形成高应力带与卸载区交替分布的复杂结构。开采扰动打破了原有地应力平衡,使围岩产生应力重分布与能量积聚,形成“高应力—

【作者简介】高超(1985-),男,中国陕西韩城人,本科,助理工程师,从事采矿专业研究。

低强度—高变形”的耦合状态。数值模拟与现场监测表明，深部巷道拱顶、两帮及底板是应力集中与破坏的主要部位，局部剪切带及塑性区的扩展往往成为巷道失稳的先兆。地应力分布规律的精准识别，对巷道支护设计和围岩控制策略的制定具有决定性意义。

2.2 围岩破坏演化过程

深部围岩破坏具有显著的阶段性及渐进性，其演化过程可划分为弹性阶段、塑性蠕变阶段与失稳坍塌阶段。在高地应力及采动扰动的耦合作用下，岩体由弹性响应逐渐转变为塑性屈服，最终形成失稳破坏。高地应力使岩体发生应变软化与结构退化，出现剪切滑移、分层剥落、拉张断裂等多种破坏模式。实验与现场研究表明，围岩失稳受应力路径、结构面取向及支护—围岩相互作用共同控制。采掘过程中，巷道周边岩体形成应力集中区与卸压带，塑性区逐步扩大，当支护滞后或刚度不足时，将导致突发性破坏。及时支护与动态控制可有效阻止裂隙扩展与能量释放，是防止巷道灾害的关键环节。

2.3 高地应力对围岩稳定性的影响

高地应力是深部巷道围岩失稳的主导因素，其作用不仅体现在变形量的增加，更决定了破坏模式与能量释放方式。高水平应力会导致岩体内部裂纹重新分布，使原有裂隙在不同方向上扩展与贯通，引发横向挤压或剪切滑移破坏。局部应力集中区极易诱发顶板垮塌、底鼓上拱及岩爆等灾害，严重威胁巷道稳定。研究表明，围岩与支护体系之间的刚度匹配度对稳定性至关重要，当支护强度过高或过低，均会引发二次应力集中与锚固失效。因而，在深部开采设计中，应综合考虑地应力分布特征与围岩力学响应规律，优化支护结构参数与布置方式，实现围岩与支护的协同承载，从而在高地应力环境下维持巷道的长期稳定 [1]。

3 深部围岩控制的关键影响因素

3.1 岩性与结构特征

深部煤层围岩普遍由泥岩、砂岩及粉砂岩等多层介质组成，其层理发育、结构复杂，岩性差异显著。岩体中弱夹层、节理裂隙及构造裂缝的存在使其各向异性增强，导致整体承载能力下降。在高地应力作用下，弱面极易发生滑移、剪切与拉裂破坏，形成局部失稳区。矿压监测结果显示，岩体完整性越差，围岩变形的集中性越强，顶板下沉与两帮收敛速率显著增加。不同岩性结构的力学响应特征差异决定了围岩控制必须实施分区分类策略。通过针对不同层位调整锚杆长度、间距及预紧力，可实现力学性能的差异化支护。同时，结合岩层厚度、节理方向与构造分布特征，建立岩性分区模型，有助于实现支护参数与岩体特征的精准匹配，从而提升整体稳定性与抗扰动能力。

3.2 采动扰动与动态加载效应

深部采动引发的应力重新分布及冲击波叠加，是诱发

围岩破坏的关键因素。随着工作面推进，原始应力场被破坏，形成高应力集中区与卸载区交替分布，围岩处于持续的动态加载环境。高频应力波作用下，岩体内部微裂纹加速扩展，弹性能量迅速积聚，当超过岩体极限承载力时，将引发瞬脆性破坏或冲击地压。尤其在坚硬砂岩层或断层带附近，冲击地压发生概率更高。为降低冲击风险，应结合矿压在线监测与地震波谱分析，建立实时动态应力模型。通过实施分步开采与区域卸压，减少集中能量的积聚；采用高延性、高能耗支护材料可有效吸收冲击能量，增强系统耗能能力，从而将动态破坏转化为可控变形，实现围岩应力的平衡释放与安全稳定控制 [2]。

3.3 支护时效与施工工艺影响

深部围岩控制效果受支护时效与施工工艺影响显著。由于深部围岩变形速率快、初期应力集中度高，若支护滞后，将导致塑性区迅速扩展并形成不可逆破坏。研究表明，支护初期的锚固预应力大小、锚杆角度及喷层厚度对围岩控制具有决定性作用。及时支护可在围岩进入塑性阶段前提供约束力，抑制裂隙扩展。为实现这一目标，应推广快速成巷与同步支护技术，使支护结构与围岩变形过程相协调。施工过程中，锚杆安装角度需与围岩主应力方向匹配，喷射混凝土厚度应根据地质条件动态调整，以防局部应力集中。合理的施工工艺与精细化作业不仅能提升支护结构的整体协调性，还能降低材料损耗，确保巷道长期稳定与安全运行。

4 深部围岩控制技术体系构建

4.1 主动支护与能量释放协同技术

深部围岩控制的关键在于建立“主动—协同—耗能”的综合控制体系。主动支护技术通过高预紧力锚杆、锚索及钢带的联合作用，在巷道开挖初期就对围岩施加约束力，使围岩处于受控压缩状态，从而延缓裂隙扩展与结构松动。此类支护不仅提供外部约束，还通过预应力的施加促使岩体形成“自承载”结构，提高整体抗变形能力。针对高地应力环境下能量聚集与突释放的风险，可在关键部位布设能量释放孔、减震垫层与弱化槽，以诱导局部卸压和能量耗散。该技术通过主动控制与被动吸能相结合，实现围岩应力的动态平衡与能量的渐进释放。工程实践表明，主动支护与能量释放协同技术可有效降低围岩破坏风险，延长巷道使用寿命，为深部巷道的安全稳定提供可靠保障 [3]。

4.2 多级锚固与复合支护体系

针对深部巷道高地应力与复杂结构特征，单一支护形式难以满足长期稳定需求。多级锚固与复合支护体系通过分层承载与协同控制实现对不同围岩区域的精准加固。内层以锚杆与钢带形成初级约束层，快速控制浅部围岩松动；中层由锚索与喷射混凝土构成主承载层，提升围岩整体刚度；外层辅以钢拱架或注浆体，形成二次支撑与能量缓冲区。该体系实现了浅层限制变形、深层抑制破坏的双重目标，使应力

分布更加均衡。合理的锚固长度、密度与材料配置可有效防止“支护过刚”或“支护过软”问题，避免二次应力集中。实践验证，该体系能显著降低巷道变形速率，提高抗冲击力，为深部复杂围岩控制提供了结构化解决方案。

4.3 围岩—支护协同控制模型

围岩与支护体系在深部环境中形成高度耦合关系，其协同作用直接决定巷道的整体稳定性。基于岩体—支护相互作用理论，可建立围岩与支护的力学耦合模型，对不同支护刚度、锚固密度、加载速率等参数进行定量分析。研究发现，当支护刚度与围岩变形模量匹配良好时，围岩塑性区范围明显缩小，应力集中现象得到有效缓解。若支护刚度过高，会引起围岩过度约束，导致局部剥落；刚度过低则难以形成有效约束，出现大变形破坏。因此，协同控制模型的核心在于实现支护刚度与围岩强度的动态匹配，使应力实现合理再分配并控制能量释放速率。通过数值模拟与现场监测验证，该模型能够有效指导支护参数优化，实现围岩控制由“经验调节”向“科学决策”的转变，推动深部巷道支护设计的系统化与智能化[4]。

5 支护体系优化与工程应用

5.1 数值模拟优化方法

数值模拟技术在深部围岩控制研究中具有重要作用。借助FLAC3D、UDEC等有限差分与离散元模拟软件，可系统分析不同支护参数对围岩变形与应力分布的影响规律。通过建立符合地质条件的三维数值模型，对锚杆长度、间距、预应力及锚索布置角度等参数进行灵敏度分析，可量化其对顶板下沉、两帮收敛及底板隆起的影响。模拟结果表明，适当增加锚杆长度与预应力能有效提升锚固层承载力，但过密布设可能造成支护应力叠加与资源浪费。为平衡经济性与安全性，应基于多目标优化模型进行参数协调设计。通过优化算法与现场监测数据的耦合分析，可实现支护体系的动态修正与精细化设计，使数值模拟不仅成为设计工具，更成为指导现场决策的重要手段。

5.2 新型高性能支护材料的应用

深部煤层巷道长期处于高温高压及强腐蚀环境，传统锚固材料易出现粘结衰减与力学性能退化问题。近年来，高分子复合材料与高性能锚固剂的应用显著改善了支护耐久性。高强度树脂锚固剂具有固化速度快、粘结力强的特点，可有效提升锚杆的早期承载力；超高分子量复合材料锚杆具备高抗拉与抗剪性能，延展性好，能在围岩变形中保持锚固

力稳定；低收缩注浆材料的应用则减少了锚固层空隙，提高了界面粘结强度。同时，纤维增强混凝土喷层与高强钢带结合使用，可形成柔刚并济的抗冲击体系，有效吸收冲击能量。新型支护材料的推广为深部矿井提供了更强的适应性和长期稳定性保障[5]。

5.3 工程监测与动态反馈机制

深部巷道的围岩控制不仅依赖前期设计，更需要实时监测与反馈调控。通过在巷道关键部位布设多参数传感装置，如应力计、位移计及声发射监测系统，可实现围岩变形、支护受力与能量释放的动态采集。监测数据经数据中心汇聚后，借助人工智能算法与大数据分析模型，可识别异常应力演化趋势，进行风险预测与等级预警。系统在检测到围岩应力异常增长或锚固失效征兆时，可自动生成支护调整方案，实现预警—响应—修正的闭环管理。该机制实现了从“静态设计”向“动态控制”的转变，使支护体系具备自适应与自优化能力，显著提高了深部巷道的安全性与管理智能化水平，为构建智慧矿山奠定了基础。

6 结语

深部煤层开采面临的地质环境复杂多变，围岩控制问题是制约矿井安全高效生产的核心难题。研究表明，深部围岩的失稳机制具有明显的高应力耦合特征和时效性，传统支护模式已难以满足动态稳定要求。通过建立主动支护与能量释放协同机制、构建多级锚固与复合支护体系，并依托数值模拟与智能监测技术，可实现围岩稳定性从“被动加固”向“主动调控”的转变。未来的深部围岩控制将更加注重系统集成与智能化发展，形成“监测—分析—调控—优化”的动态闭环体系，为我国煤炭工业的安全、高效与绿色开采提供持续技术支撑。

参考文献

- [1] 张少泽.深部煤层开采围岩稳定性控制技术及应用分析[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十三届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.河南锦源建设有限公司,2025:391-392.
- [2] 郭常勇.深部大倾角煤层回采巷道围岩控制技术研究[J].煤,2024,33(07):65-67.
- [3] 孟建兵.深部煤层沿空留巷围岩稳定原理与控制技术研究.江苏省,徐州矿务集团有限公司,2014-12-01.
- [4] 张雷.深部开采复杂条件工作面采动应力演化规律及围岩控制技术[D].中国矿业大学,2023.
- [5] 查亦林,吴德义.深部煤层巷道帮部软弱煤岩合理支护选择[J].建井技术,2023,44(05):43-47.