

Coordinated Research on Surrounding Rock Control and Safe-Efficient Production in Coal Mine Mining

Xuehua Liu

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

Abstract

The stability control of surrounding rock during coal mining directly affects both workforce safety and production efficiency. With increasing mining depth, elevated geostress levels, and intensified mining activities, the challenges of surrounding rock control have significantly intensified. Traditional empirical support methods struggle to adapt to deep, high-stress conditions. This study utilizes field monitoring, theoretical analysis, and numerical simulations to reveal the mechanical mechanisms of surrounding rock instability and their synergistic relationship with mining-induced disturbances. A systematic control model integrating “zoned management, dynamic support, and information-based management” is proposed. Research demonstrates that surrounding rock deformation exhibits spatiotemporal variations and dynamic nonlinear characteristics. Scientific zoning combined with real-time monitoring and feedback can effectively reduce roadway deformation rates and roof delamination risks. Engineering validation shows that this coordinated system significantly reduces support costs, improves mining efficiency, and enhances safety factors, providing theoretical support and practical evidence for safe and efficient deep coal mining.

Keywords

coal mine recovery; rock control; dynamic support; safe production

煤矿回采过程中围岩控制与安全高效生产协同研究

刘学化

平凉新安煤业有限责任公司，中国·甘肃平凉 744201

摘要

煤矿回采过程中围岩稳定控制直接关系到工作面安全与生产效率。随着开采深度增加、地应力水平提高及采动强度加大，围岩控制难度显著提升，传统经验支护方式难以适应深部高应力条件。本文基于现场监测、理论分析与数值模拟，揭示围岩失稳的力学机理及其与采动扰动的协同关系，提出“分区控制—动态支护—信息化管理”系统化控制模式。研究表明，围岩变形具有时空分异与动力非线性特征，科学分区与实时监测反馈可有效降低巷道变形速率与顶板离层风险。工程验证显示，该协同体系在降低支护成本、提升回采率和安全系数方面效果显著，为深部煤矿安全高效开采提供理论支持与实践依据。

关键词

煤矿回采；围岩控制；动态支护；安全生产

1 引言

如何在动态应力环境中实现围岩稳定与安全生产的协同优化，成为当前煤矿工程领域的研究热点。近年来，国内外学者在采动应力分布规律、围岩变形机制及支护系统响应特征方面取得诸多成果，提出了多种分区支护与监测反馈方法。然而，这些研究多集中于局部力学分析或静态支护参数优化，缺乏对围岩控制与安全生产全过程耦合关系的系统探讨。本文从围岩—支护—采动三者协同作用的视角出发，构建动态控制体系，分析回采过程中的多场耦合特征及协同机

制，提出以信息化为支撑的高效安全协同策略，以期为煤矿回采工程提供系统化技术支撑与实践路径。

2 煤矿回采围岩力学特征与变形规律

2.1 采动应力场特征与分布规律

煤矿回采过程中，采动扰动打破原岩的力学平衡，使得应力重新分布并形成明显的应力集中与卸压区。工作面前方 20~60 m 范围通常形成采动应力集中带，后方形成卸压松动区，而其间的过渡带应力梯度大，围岩结构最为复杂。随着工作面推进，应力集中峰值呈前移趋势，并逐渐向深部传递，形成“应力前缘效应”。理论计算与 FLAC3D 数值模拟结果表明，应力集中系数一般为 2.0~3.5，局部在硬岩夹层区域可达 5.0 以上。受采动应力作用，围岩破碎带、裂隙带及松动带相继发育，形成典型的“多带结构”^[1]。

【作者简介】刘学化（1969-），男，中国江苏徐州人，本科，高级工程师，从事煤矿安全生产管理研究。

拱顶和两帮是应力集中最明显的部位，底板则易受剪应力与渗流叠加影响而发生鼓起或剪切错动。精确掌握应力分布规律，可为支护参数设计及支护时机优化提供关键依据。

2.2 围岩变形特征与失稳机理

受采动应力扰动与地质条件共同作用，围岩表现出明显的阶段性与非线性变形特征。初采阶段为弹性压缩期，应力迅速释放；进入稳定阶段后，塑性区范围扩大，变形速率趋缓；在持续采动与蠕变作用下，巷道最终进入加速失稳阶段。现场监测表明，采动期间拱顶下沉速率约为 $10\sim15\text{ mm/d}$ ，帮壁收敛速率 $15\sim20\text{ mm/d}$ 。围岩破坏机理主要包括三类：一是高应力诱发的剪切破坏，使拱肩区域产生塑性滑移；二是层理弱化导致的分层剥落与滑移破坏；三是地下水作用下岩体水化软化引起的强度衰减与体积膨胀。

2.3 地质构造与应力耦合影响

地质构造对围岩稳定性具有决定性影响。断层、褶皱、节理密集区是应力重分布与集中峰值形成的主要地段，其应力方向变化复杂，常导致顶板离层及局部破坏。构造应力与采动应力叠加后，会在构造两侧或交汇处形成“叠加峰值区”，使围岩受力体系失衡，极易引发局部坍塌等。断层滑移面及节理裂隙不仅提供了潜在的变形通道，也削弱了围岩整体刚度与粘聚力。现场监测数据表明，距断层 30 m 范围内拱顶下沉量较非构造区增大约40%，裂隙张开度提升近50%。因此，地质构造信息应纳入回采设计的前期勘查与模型预测环节，通过地质力学分区、应力场反演及构造避让，实现“构造识别—风险分区—区域化控制”的全过程管理，从源头上降低构造应力叠加带来的失稳风险。

3 回采围岩失稳模式与动力灾害耦合机理

3.1 顶板垮落与分层离层机制

回采扰动使原岩应力体系破坏，顶板承载结构由连续受力转为多层分布受力体系。随着采空区的形成，上覆岩层在自重与卸压双重作用下弯曲下垂，形成裂隙带、离层带及垮落带三级结构。当离层厚度超过极限拉伸位移时，岩层块体沿层面失稳垮落。微震与钻孔监测结果表明，离层厚度多在 $0.8\sim1.2\text{ m}$ 之间，与采高及推进速度呈正相关^[2]。推进速度大于 6 m/d 时，顶板下沉速率成倍增长，支架载荷突增 $30\%\sim40\%$ ，易导致液压支架失稳或顶板冒落。防控关键在于采动早期局部实施高强锚索和注浆分层加固，通过及时支护限制离层向深部发展，并在采空区边界布置能量释放孔，实现卸压与稳控并举。

3.2 煤岩动力灾害的应力诱发特征

在深部高应力与高采动强度条件下，煤岩体内积聚的弹性能量不断增长，当卸载速率超过能量释放速率时，发生能量突释现象，形成冲击地压或冒顶等动力灾害。煤岩体能量演化可分为积聚、临界、突释三阶段。监测结果显示，当应力集中系数超过3.0、弹性能密度大于 15 kJ/m^3 时，冲击

事件概率显著上升。岩体结构越完整、煤层越厚，越易形成高能储存区；而支护延迟、采高过大、推进不均均会强化能量积聚。防控策略需通过区域卸压、预裂爆破及充填采矿等方式分散应力集中，同时利用微震监测与能量分布反演动态调整推进节奏，实现应力的分阶段释放与能量耗散。

3.3 底板变形与渗流影响

底板在采动作用下承受剪切应力、拉张应力的综合影响，其主要破坏形式包括鼓起、滑移及剪切错动。采动后应力重新分布使底板应力集中于煤壁脚部，当软弱夹层存在时，剪切变形沿层面扩展，形成隆起破坏。工程控制需采取综合措施：采用高强灌浆加固软弱夹层，提高抗剪强度；在应力集中区增设底鼓锚索，形成“约束—卸压—防渗”联合体系，从而有效防止渗流诱发的次生失稳。

4 围岩控制的动态支护与分区策略

4.1 分区支护理念与可调参数体系

针对深部回采工作面围岩在高静载与采动扰动叠加条件下呈现的非均匀应力重分布与变形阶段突变特征，本研究重新构建“扰动前缘区—能量缓释区—稳定承载区”三分区动态支护体系，实现围岩控制由静态设计向响应式调节转变。在扰动前缘区内，巷道围岩裂隙扩展速率与能量积聚速率显著增大，采用可让压型高强锚杆与高预应力锚索组成的复合支护结构，通过在锚杆体中引入屈服段（屈服荷载 $120\sim180\text{ kN}$ ）和传力段（ $\geq300\text{ kN}$ ），使围岩在采前应力扰动阶段能够进行受控让压与有限塑性变形，避免因过早锁固导致的后期脆性应力集中破坏；锚索预紧力提升至 $220\sim260\text{ kN}$ ，确保承压拱提前形成并具备力链连续性。能量缓释区则强调支护体系的延性吸能能力，通过屈服型托盘、可滑移钢带与能量吸收装置构建“可让压—耗能—再约束”调控机制，使围岩在 $50\sim90\text{ mm}$ 的弹塑性收敛范围内完成能量释放和应力转移，形成受控变形稳定区。为实现参数可变与支护响应优化，引入围岩响应指数RCI（由变形速率 ε 、微震能级 E_s 、裂隙扩展系数 C_f 加权构成）作为支护参数动态修正依据，支护体系可根据RCI变化进行预应力调节、屈服段启用与喷层补强，实现“可调整、可反馈、可预判”的智能化分区支护调控模式，从而更好适应深部采动下围岩应力—变形的时空差异性。

4.2 可让压与高强支护的协同应用

传统高强度刚性锁固型支护在深部高地应力条件下常因约束过强而诱发围岩脆性破断、顶部岩层断裂贯通或两帮加速收敛等失稳模式。为解决“早期变形不可控”与“后期刚性过约束”之间的矛盾，本研究构建“可让压—高强承载—整体壳化”三阶段协同支护体系。工程应用中，在围岩变形敏感阶段保持支护体系具备一定延性，使能量释放过程平稳而非突发；在可控收敛稳定后再施加高强度二次张拉，并辅以高强喷层增强封闭效应，从而建立完整的稳定承载拱

结构。现场试验结果显示，在拱顶和两帮布置可让压锚杆与高承载锚索，并配合吸能装置及同步收敛监测控制后，围岩塑性区扩展速度明显降低，顶板下沉减少约51%，侧帮收敛降低约43%，支护构件破损率减少超过75%。巷道变形曲线由扰动初期的“突峰型加速收敛”转变为“缓增—平台型渐稳”，表明围岩与支护体系之间应力与位移关系实现了动态匹配，避免了强约束条件下的破断失稳，显著提升了支护体系的耐久性与动力灾害抑制能力，体现出“柔性耗能—刚性锁固—整体承载”的协同优势。

4.3 支护优化与监测验证

为验证分区支护参数的合理性与其在不同地质条件下的适应性，本研究采用多场耦合数值模型与现场多参量监测反演相结合的验证体系。数值模拟采用基于GeoFEM的弹塑性-能量耦合模型，并引入结构面相对位移与裂隙扩展动态演化参数，以真实反映高地应力围岩裂隙萌生、扩展及失稳转化过程。模型在关键应力集中区域进行网格局部加密，分辨率控制至 $0.20 \sim 0.25\text{ m}$ ，准确捕捉围岩塑性演化边界。通过参数灵敏度分析与强度折减法得到优化支护参数组合：锚索间距 $0.8 \sim 1.0\text{m}$ 、可让压锚杆屈服段长度 $0.6 \sim 0.8\text{m}$ 时，围岩塑性区体积减少约55%，巷道整体安全系数提升至2.1。现场监测采用光纤FBG锚索轴力监测、分布式声发射裂隙扩展监测与微震能量定位联合系统，监测结果与模型反演误差控制在 $\pm 8\%$ 以内，验证参数配置的稳定性与支护体系的应力—变形协调特征。巷道运行三个月后，变形速率长期稳定低于 2.0mm/d ，支护构件始终处于弹性工作区，证明该支护体系在深部复杂地质条件下具有良好的推广价值。

5 安全高效协同控制与信息化管理体系

5.1 采动扰动的实时感知与预警

为实现对采动扰动的连续可视化感知，构建“多源异构—边缘融合—云端建模”的监测体系：在工作面前方、拱肩与底角布设应力计、收敛计、孔压计、微震与声发射阵列，并以分布式光纤(DAS/FBG)构建米级分辨率的连续监测带；边缘网关完成去噪、时钟同步与特征压缩，上传至平台后由小波包分解、扩展卡尔曼滤波与变点检测识别异常；结合LSTM与GBDT建立“离层—变形—载荷”耦合判识模型，并以ROC曲线与F1值优化阈值与提前量。系统将预警分级与处置清单绑定，实现对离层扩展、支护超载与动力事件的48h级前瞻预警与闭环追踪，贯通“采动—响应—控制”全流程。

5.2 信息反馈驱动的动态支护调整

建立“监测—判识—决策—执行—评估”的五环闭环，将关键监测量与支护参数建立可追溯映射：当拱顶下沉速率、侧帮收敛增量、锚索轴力或微震能量密度超阈值时，触发规则库与模型预测控制(MPC)协同决策，按“先稳控、后加固、再优化”的序列自动下发锚索再张拉、局部二次喷层、选择性注浆、定向卸压孔与让压构件启用等动作，并可联动调整支架初撑力与推进节奏。处置后以贝叶斯更新修正参数先验，评估指标覆盖变形速率回落幅度、载荷峰值抑制、稳定时滞与材料单耗。实证表明，该反馈机制有效抑制突变性变形，维持围岩—支护的受控协同区间。

5.3 安全高效生产协同机制构建

以“控制—协调—优化”为主线，构建围岩稳定与生产组织一体化框架：采前以地质—力学分区匹配支护型式与推进策略；采中在数字孪生体内实时耦合应力演化、设备工况与人员节拍，按预警等级实施差异化推进与班组作业窗口管理，兼顾安全冗余与产能目标；采后以事故率、停工时长、材料单耗与单进尺产量为双域指标闭环改进。调度系统与监测平台互联互通，形成“计划—执行—验证—重构”的滚动迭代。典型矿区试验显示，协同机制实施后支护工效提升约25%，单进尺生产率提高约18%，事故率下降约40%，在安全约束下实现稳定高效回采与成本优化。

6 结语

煤矿回采过程中围岩控制与安全生产具有高度耦合性，必须实现从静态设计向动态协同的理念转变。研究表明，围岩失稳源于采动应力、构造作用及支护响应的综合影响，其控制需依托分区支护、可让压技术及信息化反馈系统。通过建立“分区—动态—智能”一体化控制体系，可实现围岩与支护的协调变形，降低灾害风险，提高生产效率。未来应在深部强扰动环境下进一步完善多场耦合模型，推动智能感知与自动化调控技术融合，为煤矿开采的高效、安全与可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 赵泽博.高阳煤矿3203工作面回采巷道超前支护段围岩控制策略[J].煤,2024,33(12):78-80+88.
- [2] 任超.麦捷煤矿回采巷道围岩控制技术研究与应用[J].煤矿现代化,2023,32(04):42-46+51.
- [3] 李玉朋.试析煤矿回采巷道围岩控制理论[J].能源与节能,2021,(02):25-26.