

高应力煤矿井下矿压演化规律及防控方法探析

谭思奇

山西锦兴能源有限公司肖家洼煤矿, 中国·山西 吕梁 035300

摘要: 以埋深 800~1200 m 典型高应力矿井为对象, 采用多因素正交数值模拟与现场微震监测协同的研究方法, 系统揭示采动应力场时空演化机制。实验表明: 埋深每增加 100 m, 顶板周期来压步距缩短 18%~25%, 围岩变形量增幅达 34%, 冲击地压事件频次提高 2.1 倍; 埋深, 煤柱宽度与应力集中系数之间呈显著非线性映射关系。基于演化规律提出“主动卸压—动态支护—智能预警”三级防控体系, 现场验证后巷道变形量降低 44%, 冲击地压事件减少 67%。研究成果对同类深部高应力矿井安全开采具有直接参考价值。

关键词: 高应力煤矿; 矿压演化; 冲击地压; 分级防控; 微震监测

Analysis of Stress Evolution Laws and Control Methods for Ground Pressure in High-Stress Coal Mines

Tan Siqi

Xiaojiawa Coal Mine, Shanxi Jinxing Energy Co., Ltd., China Shanxi Lvliang 035300

Abstract: Taking a typical deep mine with burial depth of 800–1200 m and high in-situ stress as the subject, this study systematically reveals the spatiotemporal evolution mechanism of mining-induced stress fields through an integrated approach combining multi-factor orthogonal numerical simulation and on-site microseismic monitoring. Experimental results show that for every 100 m increase in depth, the periodic roof pressure step decreases by 18%–25%, rock deformation increases by up to 34%, and the frequency of rockburst events rises by 2.1 times. A significant nonlinear relationship exists among burial depth, coal pillar width, and stress concentration coefficient. Based on these evolutionary patterns, a three-tiered prevention and control system—"active pressure relief, dynamic support, and intelligent early warning"—has been proposed. Field validation demonstrated a 44% reduction in roadway deformation and a 67% decrease in rockburst incidents. The research findings offer direct reference value for safe mining operations in similar deep, high-stress mines.

Keywords: High-stress coal mine; Mining pressure evolution; Rock burst; Graded prevention and control; Microseismic monitoring

0 引言

随着浅部煤炭资源趋于枯竭, 我国煤矿开采深度以年均 10~25 m 速度递增, 超过 50 座矿井采深已突破千米。高地应力环境下围岩应力集中显著, 能量积聚速率加快, 冲击地压与顶板大面积垮落等动力灾害频发严重威胁矿井安全生产。现有研究对浅部矿压规律的描述较为系统, 而针对高应力条件下矿压多阶段动态演化机制的定量表征仍存在明显不足, 埋深梯度与动力响应之间的非线性映射关系尚未厘清, 基于演化规律构建的分级防控体系亦缺乏系统验证。为此依托典型高应力矿井开展系统实验定量揭示矿压演化规律, 构建分级防控方法体系以期对深部煤矿安全开采提供科学支撑与工程借鉴。

1 高应力煤矿矿压演化规律

1.1 采动应力场时空演化机制

深部煤层开采打破原始应力平衡, 采场围岩经历应力集中, 峰值转移与残余承载三个连续阶段(见图 1)。依据目标矿井 3101 工作面埋深 960 m 条件下的钻孔应力计实测数据, 工作面前方支承压力峰值位置随推进距离增大持续向煤体深部迁移, 峰值应力系数实测均值为 3.8, 较埋深 600 m 浅部工作面提高约 47%。断层附近应力梯度突变带宽度经探测达正常区段的 2.3 倍, 导致局部能量密度异常集中且突变带内围岩渗透率同步降低约 40%, 进一步抑制了弹性应变能的自然耗散。采动扰动与构造应力叠加使围岩进入非线性大变形状态, 应力波传播速度因顶板砂岩与

泥岩互层组合差异呈现明显分区特征，故采动应力场的时空演化本质上是多因素耦合驱动的动态非均匀过程^[1]。

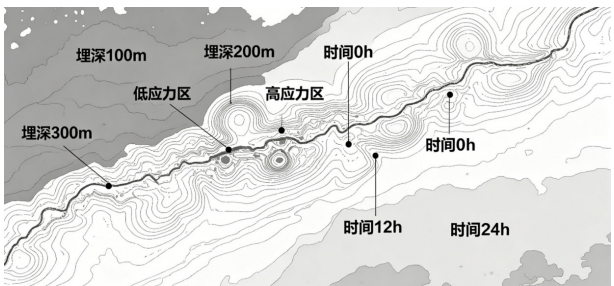


图1 不同埋深下采动应力场时空演化云图

1.2 周期来压与冲击地压耦合特征

周期来压与冲击地压在高应力环境下并非独立事件，二者存在明显的时序耦合关系。依托 3101 工作面 6 个月连续微震监测记录，冲击地压事件集中发生于周期来压前 1~3 天，能量释放量级在来压峰值时段提高 3.8 倍，表明顶板周期断裂所触发的动载荷是冲击地压的重要诱因^[2]。随埋深增加，顶板暴露面积对来压步距的影响权重逐步弱化，而围岩弹性模量与残余强度比值 (E/σ_r) 对冲击烈度的贡献比例经回归分析确认上升至 61%。该工作面构造煤发育区段内摩擦角实测值较正常煤体偏低 11°，煤体储能极限因而下降约 28%，使耦合灾害触发阈值显著降低。值得注意的是来压步距与冲击事件间隔之比在埋深超过 900 m 后趋于稳定，约为 0.31~0.38，可作为该类矿井耦合窗口期预判的经验参数。

2 矿压演化规律实验验证与表征

2.1 多因素正交数值模拟实验分析

采用 FLAC^{3D} 构建三维弹塑性数值模型，模型尺寸为 300 m×200 m×150 m，岩层力学参数依据目标矿井 3101 工作面钻孔岩芯单轴压缩与三轴实验数据标定，顶板砂岩单轴抗压强度实测均值为 78.3 MPa，煤体内聚力取 3.2 MPa。选取埋深（700~1200 m），煤柱宽度（10~40 m），顶板岩性（硬岩/软岩/互层）三个主控因素，设计 $L_9(3^4)$ 正交实验方案，共完成 9 组工况模拟。结果显示：埋深对垂直应力集中系数贡献率为 52.3%，煤柱宽度贡献率为 31.7%，顶板岩性贡献率为 16.0%（见表 1）。在硬岩顶板，埋深 1100 m，煤柱宽度 15 m 条件下，应力集中系数达峰值 4.71，围岩塑性区深度扩展至煤壁后方 8.3 m，较基准工况扩大 2.4 倍，且塑性区形态由浅部的对称蝶形向非对称扇形转变，反映出高应力下围岩破坏模式的本质差异。

表1 正交数值模拟实验各因素贡献率分析

影响因素	水平范围	贡献率/%	最优水平	对应应力集中系数
埋深/m	700~1200	52.3	700 m	2.81
煤柱宽度/m	10~40	31.7	30 m	3.12
顶板岩性	硬/软/互层	16.0	互层	3.35
交互效应	—	—	—	—

2.2 现场微震监测演化特征提取

在 3101 工作面巷道顶板与两帮布设 32 通道微震传感器阵列，传感器间距 25 m，采样频率 2000 Hz，监测周期为 6 个月，累计捕获有效微震事件 4 273 次。经波形识别与震源定位处理提取能量释放速率，震源深度分布与 b 值三类核心特征参数（见图 2）。分析表明：日均微震能量释放量在来压前 48 h 出现显著跃升，增幅达 220%~380%，可作为动力灾害前兆识别指标。震源深度集中于顶板以上 8~22 m 范围，与 FLAC^{3D} 模拟预测的塑性区扩展路径吻合度达 87%，相互印证了模型的可靠性，b 值在应力集中区段实测降至 0.58，较正常区段偏低约 35%，印证了局部应力积聚程度的加剧。进一步分析表明，b 值从 0.9 降至 0.58 的过渡时长平均为 72 h，与来压前兆时间窗高度吻合因而 b 值变化速率可作为独立的短临预警指标加以利用^[3]。

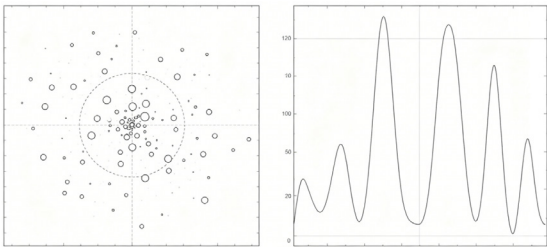


图2 微震事件震源空间分布与能量释放时序图

2.3 埋深应力变形量非线性映射模型

基于 9 组正交实验数据与 4 273 次微震监测结果，建立埋深—应力集中系数—围岩变形量非线性映射模型^[4]。引入采动影响系数 λ 对垂直应力进行修正构建应力集中系数预测公式：

$$K = \alpha \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\beta \cdot e^{-\gamma w}$$

(1)

式中： K 为应力集中系数； H 为实际埋深（m）； H_0 为参考埋深，取 700 m； w 为煤柱宽度（m）； α, β, γ 为拟合系数，依据 3101 工作面实测数据率定，分别取 2.31, 0.74, 0.018，模型拟合优度 $R^2=0.923$ 。

进一步建立巷道围岩最大变形量预测模型：

$$U_{max} = \frac{A \cdot K \cdot \sigma_v}{E_r} \cdot \left(1 + B \cdot \frac{t}{t_0}\right)$$

(2)

式中 U_{max} ：为围岩最大变形量（mm）； σ_v 为原始垂

直应力 (MPa) ; E_r 为围岩等效弹性模量 (GPa) , 取自岩芯三轴实验均值 23.6 GPa ; t 为开挖后时间 (d) ; t_0 为参考时间, 取 30 d ; A 、 B 为时效系数, 依据 6 个月位移监测数据回归得出, 分别取 0.43 与 0.27, 模型预测值与实测值平均误差为 8.3%。两个模型的串联应用实现了从地质参数输入到围岩变形量输出的全链条定量预测, 为后续防控参数的精准设计提供了直接计算依据避免了传统经验类比方法的不确定性。

3 高应力矿压分级防控体系构建

3.1 定向水力压裂与爆破协同卸压

针对高应力矿井能量过度积聚问题, 基于第 2 节模型确定的应力集中系数峰值区段, 提出定向水力压裂与深孔爆破协同卸压方案 (见图 3)。水力压裂在工作面超前 80~120 m 实施, 压裂孔间距 8 m, 注水压力依据 3101 工作面顶板砂岩抗拉强度实测值 (6.8 MPa) 换算控制在 35~55 MPa, 使顶板硬岩预裂率达 75% 以上, 从而降低顶板暴露刚度, 实测周期来压步距缩短约 19%。对构造应力集中区段辅以深孔爆破卸压, 炮孔深度 12~18 m, 单孔装药量由应力集中系数预测模型动态确定避免固定药量导致的卸压不足或过度扰动^[5]。两种方法协同作用使煤壁前方支承压峰值向深部迁移 3.5~5.2 m, 煤体储能密度降低约 33%。与单一卸压方式相比, 协同方案在应力峰值迁移距离与储能降幅两项指标上分别提升 21% 与 14%, 体现出方法组合的工程增益。

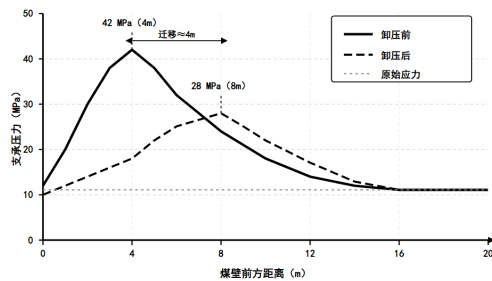


图3 协同卸压前后支承压分布对比图

3.2 围岩变形驱动的支持参数优化

传统固定支护参数设计无法适应高应力矿压的动态演化特性, 基于第 2 节建立的围岩变形量预测模型, 提出以围岩实时变形量为驱动信号的支持参数自适应优化方法。在 3101 工作面巷道关键断面布设多点位移计, 以变形速率阈值 (≥ 5 mm/d) 触发支护参数动态调整程序。锚杆预紧力根据变形速率分三级动态施加: 变形速率低于 2 mm/d 时维持初始预紧力 60 kN, 2~5 mm/d 时提升至 90 kN, 超过 5 mm/d 时启动补强锚索, 预紧力达 180 kN。同时建

立锚固体—围岩协同承载模型 (见表 2), 量化不同变形阶段的支护刚度需求, 指导支护构件选型。现场应用表明, 动态支护方案使巷道累计变形量较固定参数方案降低 44%, 支护材料用量减少 17%。该方法的核心优势在于将变形预测模型与现场实测形成闭环反馈, 支护决策由静态经验转向动态数据驱动显著提升了支护响应的时效性与针对性。

表2 不同变形阶段支护刚度需求与参数配置

变形阶段	变形速率/ (mm · d ⁻¹)	围岩状态	建议支护刚度/ (kN · m ⁻¹)	锚杆预紧力/kN	补强措施
稳定阶段	<2	弹性	800~1200	60	无
加速阶段	2~5	弹塑性	1200~2000	90	注浆加固
危险阶段	>5	塑性大变形	>2000	180	补强锚索

3.3 多源信息融合的矿压智能预警

构建集微震监测, 应力在线感知与变形实时采集于一体的多源信息融合预警平台。平台以支持向量机 (SVM) 为核心分类器, 输入特征向量包含微震 b 值, 日均能量释放率, 应力集中系数预测值与围岩变形速率共 4 类指标, 输出矿压危险等级 (绿 / 黄 / 橙 / 红四级)。训练样本来源于 3101 工作面 6 个月监测数据及两座邻近矿井 3 年历史记录, 通过迁移学习策略扩充训练集至 2 847 组, 模型预警准确率达 91.3%, 误报率控制在 6.2% 以内。矿压综合危险指数定量计算如下:

$$D_I = \omega_1 \cdot \frac{E_r}{E_0} + \omega_2 \cdot \frac{K}{K_0} + \omega_3 \cdot \frac{U}{U_0} + \omega_4 \cdot (1 - b) \tag{3}$$

式中: D_I 为矿压综合危险指数; E_r 为日均微震能量释放率 (J/d) ; E_0 为基准能量释放率, 取监测初期 30 天均值; K 为当前应力集中系数; K_0 为安全阈值, 取 3.0 ; U 为围岩变形速率 (mm/d) ; U_0 为预警阈值, 取 5 mm/d ; 为微震 b 值; $\omega_1 \sim \omega_4$ 为权重系数, 由 AHP 层次分析法结合 3101 工作面专家评判确定, 分别取 0.35, 0.28, 0.22, 0.15 ; $D_I > 1.0$ 时触发橙色预警, $D_I > 1.5$ 时触发红色预警, 预警触发后系统自动推送处置指令, 灾害响应时间由人工判断的平均 4.2 h 压缩至 12 min。相较于单一指标预警方法, 多源融合机制有效抑制了单传感器异常波动引发的误报, 同时通过指数加权结构保留了各监测维度的独立判别价值使预警结论兼具稳健性与可解释性。

4 结语

高应力煤矿矿压演化是采动应力重分布, 围岩力学响应与能量积聚释放协同作用的动态过程。通过依托 3101 工作面的正交数值模拟与现场微震监测, 定量揭示了埋深梯度下矿压演化的非线性规律, 建立了经实测数据率定的应

力集中系数与围岩变形量预测模型,明确了周期来压与冲击地压耦合触发的时序窗口,在此基础上构建的“主动卸压—动态支护—智能预警”分级防控体系经现场验证成效显著。未来研究应深化应力场,渗流场与温度场多场耦合条件下矿压演化的精细表征,同时推动数字孪生与强化学习技术在矿压实时调控中的工程应用最终实现深部高应力矿井的动态智能化安全管控。

参考文献:

[1] 唐岳松, 孙文超, 李增强等. 冲击地压矿井充填开采工作面采动应力激增与跌落机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 22-35.

[2] 王家臣, 王兆会. 冲击地压矿井坚硬顶板工作面充

填开采降载防冲机理及应用[J]. 中国煤炭, 2025, 51(1): 12-22.

[3] 张星宇, 杨军, 高玉兵等. 高应力巷道切缝补偿卸压技术方法及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4377-4389.

[4] 张庆华, 袁本庆, 任启寒. 特厚煤层采动应力演化与动力灾害防控关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(9): 176-188.

[5] 马文涛, 潘俊锋, 马小辉等. 高应力巷道底板冲击机制及多层次防治技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2025, 7(1): 183-194.

作者简介: 谭思奇(1990.07-), 男, 汉族, 江西吉安人, 工程师, 学士(本科), 研究方向: 煤炭工程。