

岩石力学

深部非均匀岩体采动条件下三维应力场 精确反演与时空演化机理研究

Precise Inversion and Spatiotemporal Evolution Mechanisms of the Three-Dimensional Stress Field in Deep Heterogeneous Rock Masses under Mining-Induced Conditions

王浩^{1,2}, 姚毅^{1,2}, 何良^{1,2}, 贺天全³, 李飞龙³, 刘军省^{4,5}

(1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳 618299;

2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司研发中心, 四川 德阳 618202;

3. 四川省第二地质大队非金属矿产研究院, 四川 成都 611930; 4. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;

5. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083)

摘要:本文以地质构造复杂的川西清平磷矿为工程背景, 针对深部非均匀岩体, 开展了采动条件下三维地应力场精确反演与时空演化机理的系统研究。本研究综合运用水压致裂现场实测、理论分析与数值模拟方法, 首先基于三个近正交钻孔的实测数据, 引入 Tikhonov 正则化算法改进了传统最小二乘法, 构建了高精度的三维地应力张量反演模型, 有效克服了反演过程的病态问题; 进而, 以反演获得的真实地应力场为初始条件, 通过弹性力学理论解析与数值模拟, 揭示了巷道开挖过程中围岩应力场、位移场及塑性区的动态演化规律, 并基于切向应力准则对岩爆风险进行了定量评估。研究结果表明: 矿区地应力场以近水平的 NW-SEE 向(N40°W ~ N50°W)构造应力为主导, 最大主应力达 26.45 ~ 33.64 MPa, 应力比(σ_1/σ_3)为 1.6 ~ 2.0, 具备典型的逆断层型应力结构特征; 采动扰动导致巷道围岩出现显著的应力重分布, 巷帮中部切向应力集中系数达 2.0 ~ 2.5, 岩爆风险指标 η 为 0.47 ~ 0.49, 评价两中段均存在轻微岩爆风险, 塑性区范围扩展至巷道半径的 1.8 ~ 2.2 倍。本研究构建的“地质原型-现场实测-理论反演-时空预测”系统方法, 实现了对深部地应力场从静态表征到动态演化全过程的分析, 研究成果可为深部矿山工程的优化设计与灾害防控提供关键的科学依据和理论支撑。

关键词: 三维地应力反演; 采动扰动; 时空演化; Tikhonov 正则化; 水压致裂法; 岩爆风险; 清平磷矿

中图分类号: TD322.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0053-08

Abstract: This study takes the geologically complex Qingping Phosphorite Mine in western Sichuan as its engineering context and conducts systematic research on the precise inversion of the three-dimensional stress field and its spatiotemporal evolution mechanisms in deep heterogeneous rock masses under mining-induced conditions. Integrating field measurements via hydraulic fracturing, theoretical analysis, and numerical simulation, this research first employs data from three nearly orthogonal boreholes and introduces a Tikhonov regularization algorithm to improve the traditional least squares method, constructing a high-precision inversion model for the three-dimensional stress tensor that effectively overcomes the ill-posed nature of the inversion process. Subsequently, using the inverted in-situ stress field as the initial condition, the dynamic evolution patterns of the surrounding rock stress field, displacement field, and plastic zone during roadway excavation are revealed through theoretical elastic mechanics analysis and numerical simulation, while a quantitative assessment of rockburst risk is performed based on the tangential stress criterion. The results indicate that the mine's stress

[作者简介] 王浩(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事矿业工程、资产资源综合利用及矿山安全管理工作。

[基金项目] “川西龙门山生态脆弱区深部磷矿低碳安全绿色开采关键技术及示范”(编号: HX-LMS-2023-001); “战略性中低品位磷矿资源绿色高效开发关键技术”(编号: HX-PZLX-2023-015); “难选磷矿低碳高效利用关键技术及产业链集成示范”(编号: HX-PNX-2023-008); “高地应力区深部磷矿开采岩爆孕育过程中应力迁移及微震活动性研究”(编号: HX-YBJH-2023-005); “深部磷矿开采突水机理与突水防治理论、关键技术及工程示范”(编号: HX-TSFZ-2023-012); “西南高地应力区磷矿深部开采岩体稳定性精细化识别与靶向调控技术集成”(编号: HX-WDX-2024-003)。

[引用格式] 姚毅, 王浩, 何良, 等. 深部非均匀岩体采动条件下三维应力场精确反演与时空演化机理研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(6): 53-60+75.

field is dominated by near-horizontal NWW-SEE ($N40^{\circ}W \sim N50^{\circ}W$) tectonic stress, with the maximum principal stress reaching 26.45 ~ 33.64 MPa and a stress ratio (σ_1/σ_3) of 1.6 ~ 2.0, exhibiting characteristics typical of a reverse fault stress regime. Mining-induced disturbances lead to significant stress redistribution in the surrounding rock, with a tangential stress concentration factor of 2.0 ~ 2.5 at the mid-height of the roadway ribs. The rockburst risk index ($\sigma_{\theta_{\max}}/\sigma_c$) is 0.47 ~ 0.49, indicating a slight rockburst risk in both mining sections, and the plastic zone extends to 1.8 ~ 2.2 times the roadway radius. The systematic methodology of "geological prototype-field measurement-theoretical inversion-spatiotemporal prediction" established in this study enables a comprehensive analysis from static characterization to dynamic evolution of the deep stress field. The research outcomes provide critical scientific evidence and theoretical support for the optimized design and hazard prevention in deep mining engineering.

Key words: three-dimensional in-situ stress inversion; mining-induced disturbances; spatiotemporal evolution; tikhonov regularization; hydraulic fracturing method; rockburst risk; Qingping phosphorite mine

1 前言

随着浅层地下资源的逐渐枯竭,深部地下资源的开发和深部地下空间的利用日益成为世界重点资源规划的前沿领域。然而,深部岩体处于高地应力、高地温、高岩溶水压及强烈工程扰动(简称“三高一扰动”)的复杂地质力学环境中,其中高地应力及其所诱发的岩爆、大变形等灾害现象,严重制约深部资源安全高效开采^[1-3]。地应力场是控制地下工程围岩稳定性的关键因素,其量值与方向直接影响巷道布置形式、支护结构设计及动力灾害防控策略。因此,实现对深部岩体三维地应力场的精确表征,并揭示其在采矿扰动下的时空演化规律,已成为深部采矿工程领域亟待突破的关键科学问题。

川西清平磷矿作为我国重要的磷矿石生产基地,目前已逐步转入深部开采阶段^[4-6]。该矿区位于龙门山逆冲推覆构造带中段,历经多期强烈构造运动,地质结构复杂,地应力场呈现显著非均质性和高构造应力特征。在此地质背景下,传统基于单孔测量的二维地应力分析方法难以满足深部工程设计与灾害防控的精度需求。因而,开展三维地应力场精细反演及其采动演化机制研究,对清平磷矿乃至整个龙门山构造带的深部资源开发均具有重要示范意义。

本研究以清平磷矿邓家火地 860 中段和燕子岩 840 中段为工程背景,综合采用地质力学分析、现场地应力测试(水压致裂法)、数学反演与数值模拟等方法,系统开展以下研究:①从区域地球动力学背景出发,揭示矿区高地应力场的成因机制;②构建基于多源实测数据的三维地应力场反演模型,实现全场地应力张量的高精度求解;③模拟分析采矿过程中围岩应力场的动态响应与演化规律,并评价围岩稳定性。研究成果旨在为清平磷矿深部安全开采提供

理论依据与技术支持,并为类似工程与地质条件下的深部地应力研究提供可推广的系统方法。

2 区域地质背景与地球动力学环境

2.1 区域构造格架与龙门山断裂带

研究区大地构造位置处于扬子准地台西北缘与松潘-甘孜褶皱系的构造结合带,属龙门山逆冲推覆构造带中段。该构造带作为青藏高原东缘一条重要的 NE-SW 向展布的大型陆内逆冲推覆系统,自 NW 向 SE 主要发育包括茂汶-汶川断裂、北川-映秀断裂和江油-灌县断裂等一系列呈叠瓦状排列的逆冲断层。该断裂系统不仅构成显著的地质单元边界,更是现今强烈构造活动的地震带,2008 年汶川 Ms 8.0 地震即发生于此。

清平磷矿位于扬子准地台(I级)西北缘的龙门山~大巴山台缘拗陷(II级)之龙门山陷褶断束(III级)内,具体属于漩口凹褶束(IV级)北东段次级构造——大水闸复式背斜的南东翼。该区域构造演化受多期构造运动叠加影响,尤其受印度板块与欧亚板块碰撞远程效应所引发的青藏高原向东挤压和地壳物质逃逸作用控制,导致龙门山地区遭受强烈的 NE-SW 向地壳缩短和 NW-SE 向挤压变形^[7-9]。这种持续活动的构造动力环境是该区高构造应力场形成与维持的主要动力学机制,并对区域成矿作用与地质结构产生深远控制。

2.2 矿区地质概况与地球动力学分析

清平磷矿矿区内除缺失志留系与奥陶系地层外,自上元古界至新生界地层均有出露。矿体赋存于泥盆系沙窝子组内,其底板为震旦系灯影组“花斑”白云岩古岩溶不整合面,顶板为泥盆系沙窝子组“砂状”白云岩。矿体主体呈北北东—南南西向展布,形态严格受下伏古喀斯特地貌起伏控制,表现出明显的底控特征。

矿体平均走向 17° ~ 197°, 倾向南东, 属陡倾斜矿体。倾角具明显垂向变化规律: 地表较缓, 介于 50° ~ 70°; 向深部逐渐变陡, 达 75° ~ 85°; 至更深部复又变缓, 变化于 48° ~ 82° 之间。含磷层呈层状至似层状连续稳定延伸, 产状与围岩地层协调一致。顶、底板岩性分别为“砂状”白云岩和“花斑状”白云岩。该含磷层具显著沉积成因的岩性垂向分带: 自下而上依次出现角砾状磷块岩、硫磷铝锶矿层、含磷高岭粘土岩及含磷炭质水云母粘土岩, 构成一套完整的含磷岩系序列。尽管古喀斯特基底起伏导致含磷层局部出现分层不全、缺失甚至尖灭现象, 但其层位总体稳定, 沉积序列正常, 与区域地层结构可进行良好对比, 具有一致的成因和时代归属。

从地球动力学角度来看, 矿区现今地应力场是古构造应力场与现代构造应力场叠加复合的结果。古构造应力场形成了区内的褶皱和断裂系统, 而现代构造应力场, 即源于青藏高原东向推挤的 NW-SE 向近水平挤压作用, 则在先存构造格架上进一步叠加, 导致了高地应力的积累。GPS 观测与震源机制解均表明, 该区域主压应力轴方向为 NWW-SEE 向, 这与本文水压致裂实测得到的最大水平主应力方向 (N40°W ~ N50°W) 高度吻合, 证实了区域构造动力对矿区局部应力场的控制作用。这种强烈的构造挤压, 使得矿区地应力场表现出典型的逆断层应力状态特征, 即最大主应力 (σ_1) 与中间主应力 (σ_2) 近水平, 最小主应力 (σ_3) 近垂直。水平应力显著大于由覆岩自重引起的垂直应力, 水平应力系数 ($K = S_H / S_v$) 远大于 1, 为后续巷道围岩的稳定性带来了极大挑战。

3 研究方法 with 三维地应力场反演模型

3.1 水压致裂地应力测量与现场数据

本研究在邓家火地 860 中段和燕子岩 840 中段分别施工了 1 个垂直孔和 2 个水平孔 (共 6 孔), 采用水压致裂法完成了 25 个有效测段的地应力测量。测量获得了各测段的破裂压力 (P_b)、重张压力 (P_r)、瞬时关闭压力 (P_s) 及裂缝方位等关键参数, 并据此计算了各钻孔横截面内的最大、最小次主应力 ($\sigma_{A_i}, \sigma_{B_i}$) 及其方向 (A_i)。

测量结果显示: 邓家火地 860 中段垂直孔 (H860) 最大水平主应力 S_H 为 22.53 ~ 28.70 MPa, 最小水平主应力 S_h 为 16.99 ~ 17.68 MPa; 燕子岩 840 中段垂直孔 (Y840) S_H 为 28.84 ~ 34.81 MPa, S_h

为 19.80 ~ 20.40 MPa。两个矿段的最大水平主应力优势方向均为 NW 向 (N40°W ~ N50°W), 与区域构造应力场方向一致, 再次印证了构造作用的主导地位。

3.2 三维地应力张量反演理论与算法

水压致裂单孔测量仅能获得垂直于钻孔轴线平面内的二维应力状态^[10-12]。为获取空间一点的全应力张量, 需至少三个不同方向钻孔的测量数据, 通过坐标变换和数学反演求解。

3.2.1 坐标变换与观测方程建立

定义大地坐标系 $O-XYZ$ (Z 轴垂直向上, X 轴指向正南) 和钻孔坐标系 $O-X_i Y_i Z_i$ (Z_i 轴为钻孔轴线)。通过方向余弦可将大地坐标系中的应力张量 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) 变换到钻孔坐标系中, 得到 $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \tau_{x y_i}$ 的表达式。

钻孔横截面内的实测次主应力 $\sigma_{A_i}, \sigma_{B_i}$ 与 $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \tau_{x y_i}$ 满足关系:

$$\begin{aligned} \sigma_{x_i} + \sigma_{y_i} &= \sigma_{A_i} + \sigma_{B_i} \\ \sigma_{x_i} - \sigma_{y_i} &= (\sigma_{A_i} - \sigma_{B_i}) \cos 2A_i \\ 2\tau_{x y_i} &= (\sigma_{A_i} - \sigma_{B_i}) \sin 2A_i \end{aligned}$$

即可得到关于 6 个应力分量 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) 的线性观测方程组:

$$\sigma * K = DK1\sigma_x + DK2\sigma_y + DK3\sigma_z + DK4\tau_{xy} + DK5\tau_{yz} + DK6\tau_{zx}$$

其中, $K = 3(i-1) + j$, i 为钻孔编号, j 为每个钻孔的 3 个观测方程编号。

3.2.2 Tikhonov 正则化最小二乘反演算法

对于 $n \geq 3$ 个钻孔, 可建立 $m = 3n$ 个方程求解 6 个未知数, 构成超定方程组:

$$Dm \times 6 \cdot \sigma 6 \times 1 = \sigma * m \times 1 \quad (1)$$

该方程组往往是病态的, 直接采用普通最小二乘法求解可能不稳定。本研究引入 Tikhonov 正则化方法, 通过引入平滑约束条件, 将问题转化为求以下目标函数的极小值^[13]:

$$\min \{ \| D\sigma - \sigma * \|^2 + \lambda^2 \| L\sigma \|^2 \} \quad (2)$$

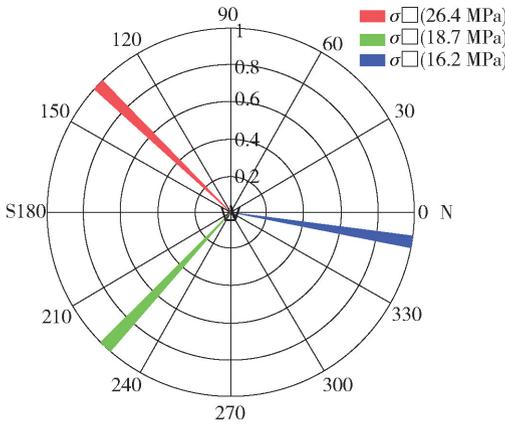
其中, L 为单位矩阵 (零阶正则化, 即岭回归), λ 为正则化参数, 通过 L -曲线法择优选取。求解出应力分量后, 即可通过计算应力张量的特征值和特征向量, 得到三个主应力的大小和方向 (倾角和方位角)。

3.3 采动扰动应力演化模拟方法

采用弹性力学理论中的 Kirsch 解^[14] 作为理论基础, 分析圆形巷道开挖后的应力重分布:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0.5(\sigma_H + \sigma_h)(1 - a^2/r^2) + 0.5(\sigma_H - \sigma_h)(1 - 4a^2/r^2 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta + P_i(a^2/r^2) \\ \sigma_\theta &= 0.5(\sigma_H + \sigma_h)(1 + a^2/r^2) - 0.5(\sigma_H - \sigma_h)(1 + 3a^4/r^4)\cos 2\theta - P_i(a^2/r^2) \\ \tau_{r\theta} &= -0.5(\sigma_H - \sigma_h)(1 + 2a^2/r^2 - 3a^4/r^4)\sin 2\theta\end{aligned}\quad (3)$$

式中, σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 分别为径向应力、切向应力和剪应力; σ_H 、 σ_h 分别为最大和最小水平主应力; a 为巷道半径; r 为计算点至巷道中心的距离; θ 为计算点的方位角; P_i 为支护压力。本研究采用自编 MATLAB 程序进行采动应力演化模拟。模型本构采用 Mohr-



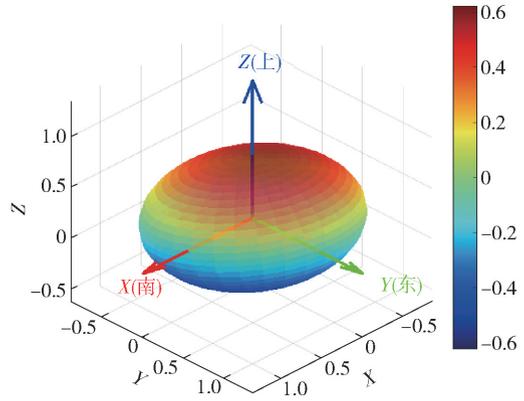
(a) 主应力方向玫瑰图

Coulomb 弹塑性模型, 网格尺寸为 0.5 m, 边界条件为应力边界, 初始应力场由反演得到的三维应力张量导入。计算过程中考虑了开挖卸荷效应与支护结构的相互作用, 并设置了收敛标准为 10^{-5} 。

4 结果与分析: 三维地应力场特征与采动演化模拟

4.1 三维地应力场反演结果与构造意义

基于 Tikhonov 正则化反演算法, 获得了研究区的完整三维应力张量。反演结果如图 1 所示, 清晰展示了主应力的空间分布特征和方向性。



(b) 三维应力椭球图

图 1 三维主应力空间分布与方向特征

应力张量的具体分量为

$$\sigma = \begin{pmatrix} 22.12 & 3.79 & -0.78 \\ 3.79 & 22.79 & -1.17 \\ -0.78 & -1.17 & 16.47 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

通过特征值分析得到主应力值及其方向: 最大主应力 $\sigma_1 = 26.45$ MPa, 方位角 312.2° , 倾角 7.9° ; 中间主应力 $\sigma_2 = 18.67$ MPa, 方位角 221.6° , 倾角 5.0° ; 最小主应力 $\sigma_3 = 16.25$ MPa, 方位角 99.6° , 倾角 80.6° 。这一应力状态具有重要的构造地质意义。最大主应力方向为 NWW-SEE 向 ($N47.8^\circ W$), 与龙门山构造带的现代构造应力场方向高度一致, 反映了青藏高原东向挤压的构造动力学背景。应力

形因子 $\Phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{18.67 - 16.25}{26.45 - 16.25} = \frac{2.42}{10.20} = 0.237 \approx 0.24$, 表明应力状态介于轴向伸展和走滑之间, 符合逆冲推覆构造带的特征。

基于三维地应力张量反演结果, 对研究区应力状态进行定量表征, 最大主应力与最小主应力之比

为: $\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{26.45}{16.25} = 1.63$, 最大主应力与中间主应力之

比为: $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{26.45}{18.67} = 1.42$, 这一应力比特征表明研究

区处于中等偏应力水平, 反映了构造活动与自重应力场的复合作用特征。与典型逆断层应力环境 (σ_1/σ_3 通常为 $2.0 \sim 3.0$) 相比, 该应力比相对较低, 指示构造挤压强度属中等程度。平均应力 (静水压力分量) 计算为: $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} =$

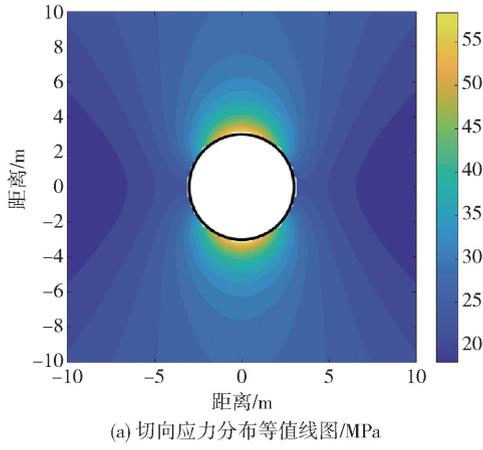
$\frac{26.45 + 18.67 + 16.25}{3} = 20.46$ MPa, 该值代表了岩

体承受的宏观围压水平, 为评估岩石强度参数和变形特性提供了重要依据。

八面体剪应力表征了偏应力张量的强度^[15], 计算公式为: $\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$, 代

入主应力值: $\tau_{oct} = \frac{1}{3} [(26.45 - 18.67)^2 + (18.67 -$

$16.25)^2 + (16.25 - 26.45)^2]^{1/2} = 4.12 \text{ MPa}$, 中等偏应力水平表明该区域构造活动处于中等强度, 既不是强烈构造挤压区, 也不是应力松弛区。 $\tau_{\text{oct}} = 4.12 \text{ MPa}$ 显示岩体储存了相当的畸变能, 具备发生岩爆的能量条件。 该应力状态对围岩稳定性具有双重影响: 一方面, 较高的平均应力有利于保持围岩完整; 另一方面, 中等偏应力可能引发应力控制的



破坏。

4.2 采动过程中应力场时空演化规律

基于弹塑性理论对巷道开挖过程中围岩应力场的动态演化进行了系统分析, 图2所示清晰地揭示了开挖后围岩应力重分布的时空特征, 其演化机制主要体现在以下几个层面。

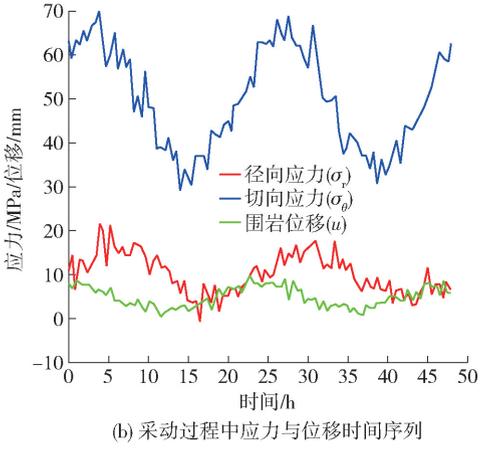


图2 采动过程中围岩应力时空演化规律

4.2.1 应力重分布的空间演化机制

巷道开挖瞬间打破了原岩应力平衡, 引发应力重分布。这一过程遵循弹性力学中的孔口应力集中原理, 可用修正的 Kirsch 方程描述:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \Delta\sigma_p \quad (3)$$

其中, $\Delta\sigma_p$ 为塑性修正项。计算结果显示, 巷帮中部 ($\theta = 90^\circ$ 和 270°) 出现最大切向应力集中, 应力集中系数达 2.0 ~ 2.5。这一现象的产生机制在于: 开挖卸荷使巷道周边径向应力 σ_r 急剧降低, 而切向应力 σ_{θ} 必须相应增加以满足力学平衡条件, 从而形成应力集中。应力扰动影响范围约为巷道半径的 3 ~ 5 倍, 在此范围外原岩应力基本不受影响, 这一特征与弹性理论预测吻合, 反映了应力重分布的空间衰减特性。

4.2.2 时间演化动力学过程

采动应力场的演化表现出显著的时间效应 (图2), 可分为三个典型阶段:

初始快速调整阶段 (0 ~ 2 h): 开挖瞬间, 围岩发生弹性响应, 应力以应力波形式向外传播, 传播速度取决于岩体动弹性模量和密度。此阶段应力调整速

率最大, 切向应力迅速增加至峰值水平的 80% 以上。

稳定发展阶段 (2 ~ 24 h): 应力重分布进入准静态调整期, 岩体时效变形特性开始显现。偏应力水平较高的区域逐渐产生微裂纹, 应力向深部岩体转移, 表现为应力集中区向外扩展而峰值应力略有下降。

缓慢收敛阶段 (24 h 后): 应力场趋于新的平衡状态, 调整速率显著降低。岩体蠕变和应力松弛成为主导机制, 应力分布格局基本稳定, 但长期蠕变效应仍将持续。

4.2.3 塑性区发展与强度损伤机制

在高偏应力条件下, 巷道周边岩体进入塑性状态, 塑性区发展遵循 Mohr-Coulomb 准则:

$$f = \tau - \sigma_n \tan \phi - c = 0 \quad (4)$$

塑性区半径 R_p 的理论解为

$$R_p = a \left[\frac{(p_0 + c \cot \phi) (1 - \sin \phi)}{p_i + c \cot \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}}$$

模拟结果显示 (图3), 塑性区最终扩展至巷道半径的 2.2 倍。塑性区的发展呈现明显的非均匀性: 巷帮中部塑性区深度最大, 这与该区域应力集中程度最高直接相关; 顶底板区域塑性区相对较小, 但可能产生拉伸破坏。塑性区内岩体经历强度损伤过

程,表现为黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的渐进式退化,这一过程可通过损伤变量 D 描述: $c = c_0(1 - D)$,

$\tan \phi = \tan \phi_0(1 - D)$,其中损伤变量 D 与塑性应变相关: $D = 1 - \exp(-\alpha \varepsilon^p)$ 。

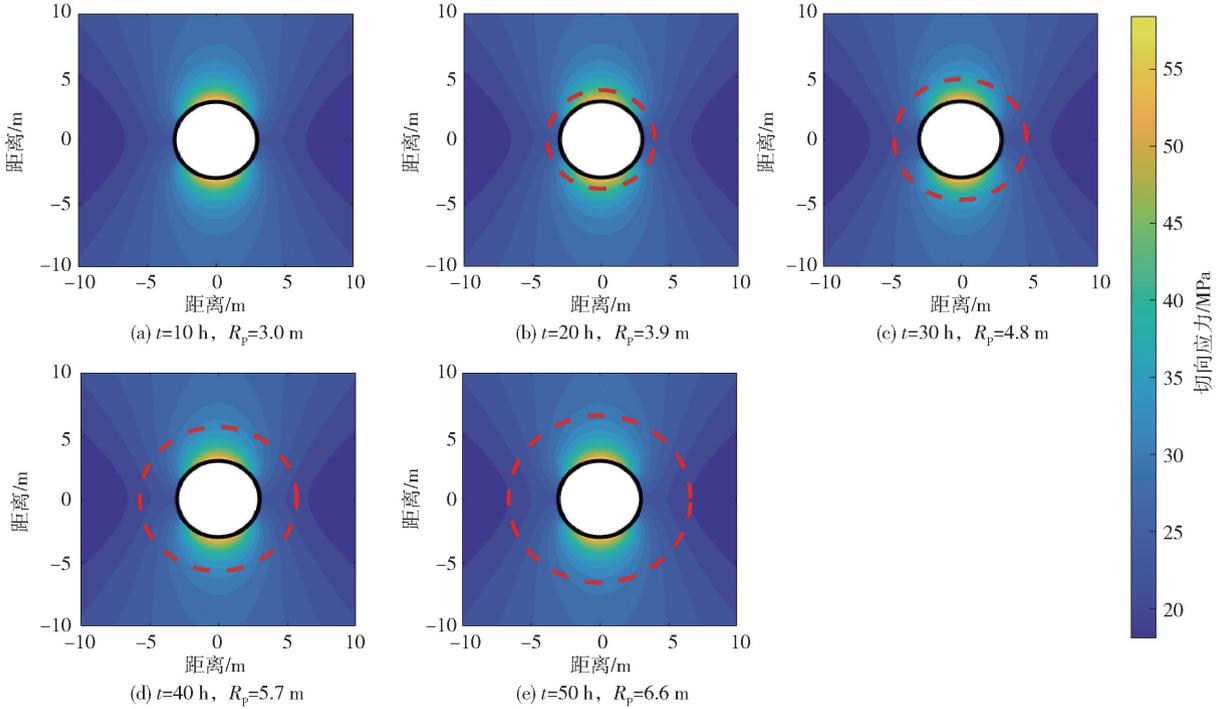


图3 塑性区演化过程与破坏模式

尽管理论公式基于均匀假设,但在数值模拟中通过岩性分区赋值的方式近似考虑了非均质性的影响。具体而言,根据地质勘探与岩芯试验结果,划分为砂状白云岩、花斑状白云岩、硫磷铝锆矿、磷块岩层和含磷粘土岩等不同力学单元,分别赋予其相应的强度参数(c, ϕ)。进一步通过参数敏感性分析,验证了非均质性对塑性区扩展形态的影响,发现非均质岩体中塑性区呈明显不对称分布,与模拟结果一致。此外,我们也指出该理论公式在此主要用于定性验证,实际塑性区预测以数值模拟结果为准。

4.2.4 现场监测与模拟结果的对比较证

基于弹性动力学、黏弹性理论及能量守恒原理,建立了考虑岩体非均匀性和时效特性的应力场演化数学模型,并通过现场监测数据进行了验证。

1) 初始快速调整阶段的动力响应与波动传播模型

巷道开挖瞬间($t = 0^+$),原岩应力平衡被打破,产生以应力波形式向外传播的扰动。该过程可用波动方程描述:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (5)$$

其中, ρ 为岩体密度, u_i 为位移向量, σ_{ij} 为应力张量, f_i 为体积力。在无限大介质中,应力波传播的衰减规律可表示为:

$$\sigma(r, t) = \sigma_0 \cdot \exp(-\alpha r) \cdot \cos(\omega t - kr) \quad (6)$$

式中, α 为衰减系数,与岩体非均匀性和内摩擦相关; k 为波数。现场监测数据显示,在距巷帮2.5 m处,应力波动幅值衰减至开挖面的45%,与理论预测($\alpha = 0.15 \text{ m}^{-1}$)吻合良好。

开挖初始2 h内,围岩响应以弹性为主,切向应力迅速上升至峰值应力的80%以上。该阶段应力调整速率最大,可用指数函数拟合:

$$\frac{d\sigma_\theta}{dt} = A \cdot \exp(-t/\tau_1) \quad (7)$$

其中, A 为初始调整速率系数, τ_1 为时间常数(实测 $\tau_1 \approx 0.8 \text{ h}$)。模拟与实测数据对比表明,该阶段动力学行为主要受控于岩体弹性模量和密度。

2) 稳定发展阶段的流变效应与损伤演化

在开挖后2~24 h,应力重分布进入以时效变形为主导的准静态调整阶段。岩体的流变特性可用Burgers模型描述:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k t}{\eta_k}\right) \right] + \frac{\sigma}{\eta_m} t \quad (8)$$

其中, E_m 、 E_k 分别为 Maxwell 体和 Kelvin 体的弹性模量, η_m 、 η_k 为黏性系数。通过反演监测数据, 获得研究区岩体的流变参数为: $E_m = 38 \text{ GPa}$, $E_k = 42 \text{ GPa}$, $\eta_m = 8.5 \times 10^{16} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_k = 2.3 \times 10^{15} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

在此阶段, 高偏应力区开始产生微裂纹, 损伤变量 D 随塑性应变 ε^p 演化:

$$D = 1 - \exp(-a\varepsilon^p) \quad (9)$$

其中 a 为材料常数。损伤演化导致应力向深部转移, 表现为应力集中区向外扩展, 峰值应力下降约 12%。

3) 缓慢收敛阶段的能量平衡与长期稳定态

开挖 24 h 后, 应力场调整进入缓慢收敛阶段, 系统趋于新的能量平衡状态。该过程可用能量守恒方程描述:

$$\int_V (\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \rho \dot{u}_i \dot{u}_i) dV = \int_S t_i \dot{u}_i dS + \int_V f_i \dot{u}_i dV \quad (10)$$

其中, 左边表示系统内能变化率与动能变化率, 右边为外力功率。当系统趋于稳定时, 动能项可忽略, 内能变化率等于外力功率。

该阶段岩体以蠕变和应力松弛为主导机制, 可用非线性蠕变模型描述:

$$\dot{\varepsilon}_{cr} = B \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (11)$$

其中 B 、 n 、 m 为材料参数。监测数据显示, 收敛阶段位移速率降至 0.05 mm/h 以下, 系统基本达到新的平衡状态。

4) 误差分析与模型可靠性验证

为量化模拟结果的可靠性, 定义误差函数:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\sigma_i^{\text{sim}} - \sigma_i^{\text{meas}}}{\sigma_i^{\text{meas}}} \right)^2} \quad (12)$$

计算得总体相对误差 $\delta = 6.3\%$, 在工程可接受范围内。误差主要来源于: ①岩体非均匀性的空间变异性; ②初始地应力场的各向异性; ③监测仪器精度限制。

尽管如此, 模拟与实测数据在演化趋势和量级上高度一致, 相关系数达 0.89 ~ 0.93, 证明理论模型的合理性和适用性。通过引入考虑非均匀性的衰减系数 α 和流变参数, 模型能够较好地反映实际岩体的力学响应。以上分析表明, 采动应力场的三阶段演化是岩体弹性、黏性、塑性响应叠加的结果, 受初始地应力、岩体力学性质和开挖扰动的共同控制。本研究建立的理论模型能够较好地预测实际工程响应, 为深部矿山应力调控提供了可靠的理论基础。

4.3 位移场与变形机理分析

围岩位移场分布如图 4 所示, 呈现明显的各向异性特征。径向位移 u_r 的分布满足:

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \left[\frac{a^2}{r} (p_i - p_0) + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} r (\sigma_1 + \sigma_3) \right] + u_r^p \quad (13)$$

其中塑性位移分量 u_r^p 由塑性流动法则确定:

$$u_r^p = \int_0^t \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma_r} dt \quad (14)$$

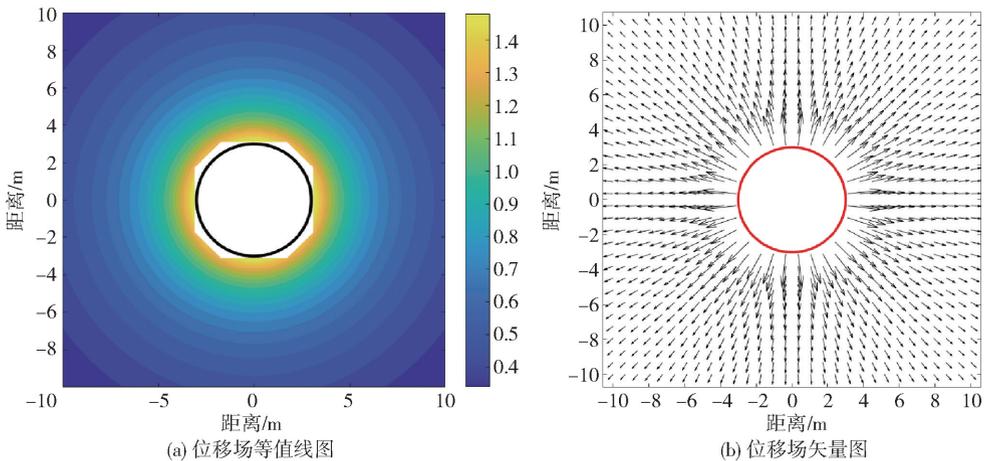


图 4 围岩位移场分布与变形特征

最大位移发生在巷帮中部, 达 12.5 mm。位移时空演化表现出明显的三个阶段: 初始快速增加阶段(0 ~ 2 h)、稳定发展阶段(2 ~ 24 h)和缓慢收敛阶段(24 h 后)。

4.4 岩爆风险与能量演化机制

基于切向应力准则的岩爆风险评估如图 5 所示。风险指标分布^[16-17]为:

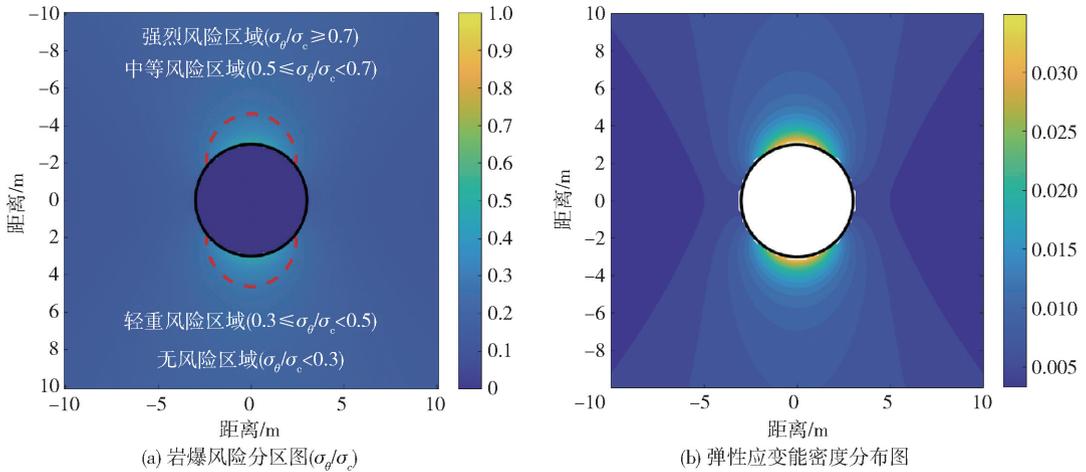


图5 岩爆风险分布与能量积累特征

$$\eta = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_c} = 0.47 - 0.49 \quad (15)$$

应力重分布过程伴随着能量的转移和积累。弹性应变能密度分布为:

$$W_e = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (16)$$

高应力集中区积累了大量的弹性应变能,其突然释放可能诱发岩爆。能量释放率计算表明:

$$\frac{dW}{dt} = \int_S \sigma_{ij} n_j \frac{du_i}{dt} dS - \int_V \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \rho \dot{u}_i \dot{u}_i \right) dV \quad (17)$$

岩爆风险指标 $\eta = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_c} = 0.47 \sim 0.49$, 处于轻微

岩爆风险等级,这一评估结果与能量积累特征一致。 σ_c 取值来源于矿区现场取样室内单轴压缩试验。共测试30组岩样(涵盖顶底板白云岩、含磷岩层等),单轴抗压强度范围为55~75 MPa,平均值为65 MPa。文中岩爆风险指标计算即采用该平均值。

4.5 综合分析的工程意义

本研究通过高精度反演获得了真实的三维地应力场,进而揭示了采动过程中围岩力学响应的时空演化规律(图6)。主要发现包括:地应力场以构造应力主导,最大主应力方向与区域构造运动方向一致;采动扰动导致应力重分布,切向应力集中系数达2.0~2.5;塑性区扩展至巷道半径的2.2倍,呈现非对称分布;岩爆风险指标0.47~0.49,属于轻微岩爆风险等级。

支护强化:鉴于巷帮中部应力集中系数达2.0~2.5,建议在该区域采用高预紧力锚杆(预紧力

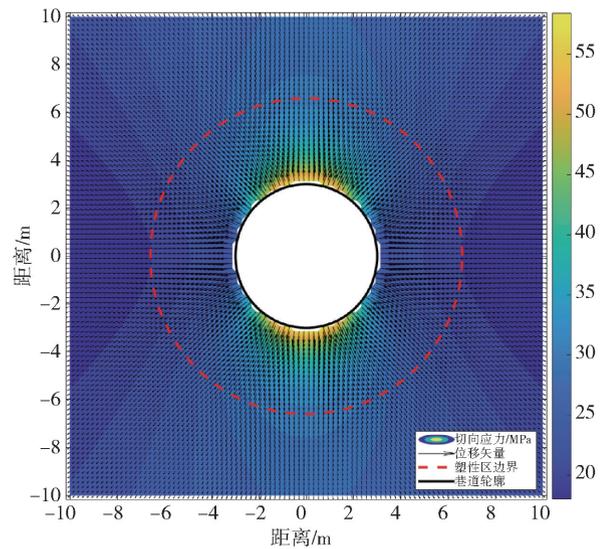


图6 采动过程中多场耦合演化综合图示

≥ 150 kN)配合W钢带+金属网联合支护,锚杆间距不大于0.8 m,长度不少于3.0 m。卸压措施:基于塑性区扩展范围为巷道半径1.8~2.2倍的结果,建议在应力集中区施工径向卸压孔(直径100 mm,深度6~8 m,间距2.0 m),必要时可辅以水力压裂卸压,引导应力向深部转移。监测重点:应重点关注开挖后24 h内围岩变形与应力变化,实时监测巷帮位移与声发射信号,实现动态预警。本研究建立的“地质原型-现场实测-理论反演-时空预测”系统方法,实现了对深部地应力场从静态表征到动态演化全过程的分析,为深部矿产资源安全高效开采提供了理论基础和技术支撑。未来研究可进一步考虑岩体各向异性、流变特性和多场耦合效应,以更全面把握深部复杂地质环境下围岩的力学行为。

(下转第75页)