

深部矿产开采中岩石力学特性变化的数值模拟分析

曹军伟

(成都理工大学地球与行星科学学院, 成都 610059)

摘要:深部矿产开采过程中岩石力学特性变化直接影响工程稳定性和安全性。为了分析高地应力环境下岩体的变形破坏规律,研究采用数值模拟方法,建立计算模型,选取合适的本构关系与边界条件,对不同开采条件下岩体的应力场分布、变形行为和破坏模式进行了数值模拟。结果表明深部岩体在开采扰动作用下围岩应力发生重新分布,局部区域可能出现应力集中,进而引发岩爆、冲击地压等安全隐患,岩体的稳定性受围岩性质、开采方式及支护结构等多重因素的影响。模拟分析为矿山开采设计的优化和提升矿山安全性提供了有效的参考依据。

关键词:深部开采;岩石力学特性;数值模拟;应力分布;稳定性

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)05-0056-8

0 引言

随着浅部矿产资源逐渐枯竭,深部开采已成为全球矿业发展的必然趋势。据测算,我国金属矿山开采深度正以每年 10-15m 的速度向深部延伸^[1]。然而,深部开采面临的“三高一扰动”(高地应力、高地温、高渗流及开采扰动)复杂环境显著改变了岩体力学行为特征。相较于浅部岩体,深部岩体表现出脆-延转换、强流变性和动力响应突变性等特殊力学行为,导致岩爆、冲击地压等动力灾害发生率提高 40% 以上。这一特殊力学环境使得基于浅部开采建立的 Mohr-Coulomb 等传统本构模型预测误差超过 30%,迫切需要发展适配深部条件的岩石力学理论与分析方法^[2]。

近年来,数值模拟技术在该领域取得显著进展:张旭通过真三轴试验揭示了深部岩体损伤演化的围压效应^[3];王海亮等基于 RHT 本构建立双孔爆破模型实现了采动应力场的动态重构^[4];马丹提出了一种断层破碎岩体迂曲度的数值计算方法,收敛性测试结果表明该方法具有较高的精度^[5]。然而,现有研究仍存在三方面局限:(1)多关注静态载荷响应,忽视爆破振动

等动态扰动耦合效应^[6];(2)本构模型选择缺乏系统性对比,霍克-布朗模型在高围压条件下的优势尚未充分验证;(3)支护体系与围岩动态相互作用机制研究不足,导致二次稳定性控制理论缺失^[7]。

本研究创新性地构建霍克-布朗模型与动态扰动耦合的数值模拟体系,重点解决三个关键问题:(1)高地应力环境下应力重分布与能量积聚机制;(2)开采方式对围岩破坏模式的影响规律;(3)支护时效性对稳定性控制的优化路径。通过建立考虑“应力-损伤-渗流”多场耦合的计算模型,系统揭示深部开采过程中岩体力学特性演化规律,为深部矿山动力灾害防控提供新方法。

1 深部岩石力学特性及影响因素

1.1 深部岩石的基本力学特性

深部岩体在高地应力、高温和渗流条件下长期演化,其力学特性与浅层岩石有显著不同。岩石在高围压条件下表现出较强的塑性特征,宏观上呈现应力-应变非线性关系,加载过程中,变形由弹性阶段逐步进入塑性阶段并在局部区域

形成塑性应变积累区,强度参数随着围压的增加而提高,脆性降低,表现出更明显的延性破坏特征^[8]。高围压环境下的岩石在加载过程中不再表现出明显的峰后应力下降,而是进入应力-应变曲线的平缓阶段,形成应变硬化或残余强度平台。高温作用会改变矿物成分、孔隙结构及内部微裂隙的分布,使岩石的力学性能发生演化,高温环境下矿物颗粒间的热胀冷缩效应增强,导致微裂隙扩展,降低抗拉强度和弹性模量,温度超过一定阈值后岩石的强度会显著下降,甚至发生热破裂现象。渗流作用同样对岩石力学特性产生影响,在高渗透压力作用下,孔隙水压力削弱颗粒间的有效应力,导致强度降低,局部区域可能发生软化甚至破坏。深部岩石通常具有明显的各向异性特征,矿物排列、层理发育程度及节理裂隙分布等因素影响其力学响应,导致变形与破坏模式具有方向性^[9]。

1.2 影响岩石力学特性的主要因素

深部岩体的力学特性受多种因素共同作用,其中地应力状态是决定岩石力学行为的关键因素之一。高地应力条件下,岩石的破坏模式从低围压下的脆性剪切破坏逐步转变为塑性流动或压溶破坏,应力水平较高时微裂隙在加载过程中难以扩展,导致岩石强度提高,而卸载过程中,能量的不断积累,可能引发岩爆、冲击地压等动力性灾害。高温环境影响岩石的热力学响应,使矿物颗粒产生膨胀或相变,导致内应力增大,从而影响强度和变形特征,温度超过 200℃ 后石英等矿物颗粒热膨胀不均匀,使内部结构发生重组,强度逐步降低^[10]。水化学作用在深部环境下同样对岩石力学性能产生影响,渗流作用改变孔隙水压力分布,使有效应力降低,进而影响岩石的抗压强度。对于膨胀性岩石,水分子进入矿物层间后,导致膨胀变形,使力学性质发生变化。岩石结构及微观缺陷的分布影响宏观力学特征,层状岩体、裂隙发育的岩体往往表现出较大的各向异性,强度和变形模量沿不同方向差异明显。围岩结构的完整性决定了其承载能力,结构面发育程度较高的岩体,在开采过程中易沿弱面发生滑

移或失稳,影响矿山围岩稳定性^[11]。

值得注意的是,动态扰动载荷对深部岩体稳定性具有显著影响。爆破振动、机械冲击等动态荷载会引起应力波传播,导致裂隙网络扩展和能量积聚。试验研究表明^[12],当动态扰动频率接近岩体固有频率时,会诱发共振效应,使损伤累积速度提高 30% 以上。因此,在数值模拟中需同时考虑静态地应力和动态扰动载荷的耦合作用。

1.3 深部开采中的力学响应特征

深部矿产开采过程中岩石在采动作用下发生复杂的力学响应,应力分布状态随开采推进发生调整,采场周围形成高应力集中区与卸荷松弛区。应力集中区域,岩体受到额外载荷作用,强度衰减速度加快,可能诱发局部破坏,卸荷松弛区,围岩失去原始约束,产生松弛变形,导致顶板下沉、巷道收敛等问题。岩爆和冲击地压是深部开采中常见的动力灾害类型,能量积累超过临界值时岩体内部发生剧烈破裂,导致岩块崩落甚至灾害性破坏。围岩稳定性受埋深、开采方式及支护措施等多种因素影响,埋深增加时初始地应力水平提高,采场围岩承受更大的载荷,破坏风险增加^[13]。不同开采方式对应力场的影响不同,房柱法、充填法、崩落法等方式在稳定性控制方面存在差异,合理选择开采方式可有效降低围岩失稳风险。针对深部开采条件采用先进的监测技术和数值模拟方法,分析不同工况下的应力演化及变形破坏机制,对提高矿山安全性具有重要意义。

2 数值模拟方法与计算模型

2.1 数值模拟方法概述

深部矿产开采中,数值模拟通过分析围岩应力、变形及破裂演化优化开采安全,常用方法包括:有限元法(FEM)基于变分原理离散连续介质,适用于弹塑性变形及断裂分析;离散元法(DEM)通过颗粒接触模拟破裂流变;有限差分法(FDM)采用时间步进求解动态非线性问题;边界元法(BEM)基于格林函数简化边界积分,适用于裂隙应力场计算。各类方法针对岩石力

学行为的复杂性(静态/动态、连续/非连续)提供多尺度分析手段,为深部开采设计提供关键理论支撑。

2.2 计算模型的建立与参数选取

在深部矿产开采的数值模拟中,构建精确且适用的计算模型以及合理选取参数至关重要。本研究采用有限元法进行数值模拟,以分析深部岩体在开采过程中的力学响应。有限元法能将连续介质离散化,有效处理弹塑性变形和断裂行为,适用于复杂应力环境下的岩体力学分析。

2.2.1 本构模型的选择

本研究选用霍克-布朗(Hoek-Brown)本构模型来描述深部岩体的力学行为。霍克-布朗模型充分考虑了岩体的非线性特性以及岩体结构面的影响,相较于传统的 Mohr-Coulomb 模型,在高围压条件下更能准确反映深部岩体的力学响应。该模型表达式为:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_b \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (1)$$

其中, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, σ_c 为岩石单轴抗压强度, m_b 和 s 为与岩体性质相关的参数。

不同本构模型具有各自的适用性。Mohr-Coulomb 模型基于线性屈服准则,适用于描述浅部岩体的脆性破坏,但在深部高围压环境下,其线性假设与实际岩体力学行为偏差较大,预测误差超过 30%。Drucker-Prager(D-P)模型虽然考虑了中间主应力的影响,但在反映岩体的非线性特性和结构面效应方面存在不足,在深部复杂应力环境下精度受限。而霍克-布朗模型通过引入岩体质量指标,能够更真实地反映深部岩体在

高围压、复杂结构面条件下的力学特性,因此在本研究中被选为描述深部岩体力学行为的本构模型。

2.2.2 参数选取

模型中的关键参数包括岩石的基本力学参数以及霍克-布朗模型特有的参数。岩石的基本力学参数通过室内岩石力学试验确定,为深入了解关键参数对模拟结果的影响,进行参数敏感性分析。以单轴抗压强度 σ_c 、内聚力 c 和摩擦角 φ 为例,分析其在一定范围内波动时对应力分布和破坏模式的影响。参数敏感性分析的部分结果如图 1 所示,其中设定了不同的参数组合,此外,具体参数敏感性分析数据如表 1 所示。

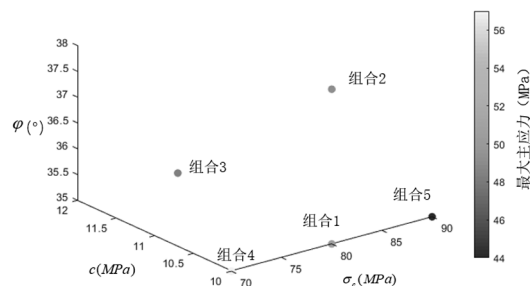


图 1 参数敏感性分析结果

从表 1 可以看出,当内聚力 c 增大时,采场中心最大主应力略有降低,这是因为内聚力的增加提高了岩体的抗剪强度,使得岩体在相同受力条件下应力集中程度有所缓解。而摩擦角 φ 的变化对最大主应力的影响相对较小,但会改变岩体的破坏模式倾向。当单轴抗压强度 σ_c 降低时,采场中心最大主应力显著增大,岩体更容易发生破坏。

表 1 具体参数敏感性分析数据

参数组合	单轴抗压强度 σ_c (MPa)	内聚力 c (MPa)	摩擦角 φ ($^\circ$)	采场中心最大 主应力 (MPa)
组合 1	80	10	35	50.2
组合 2	85	12	35.5	48.6
组合 3	75	11	36	49.1
组合 4	70	10	35	55.3
组合 5	90	10	35	45.1

表 2 岩芯取样统计特征

岩性	取样点数	样本数量	密度均值(g/cm ³)	纵波波速范围(m/s)	各向异性指数*
二长花岗岩	8	30	2.68±0.03	4,520-4,890	1.15
黑云母片岩	3	12	2.74±0.05	3,820-4,150	1.38
石英脉	1	5	2.60±0.02	5,120-5,340	1.08

注: * 各向异性指数=垂直层理波速/平行层理波速

2.3 模拟方案设计与验证

数值模拟方案基于某金矿-850m 中段地质条件构建,该区域地层主要由中生代花岗岩和变质岩系组成。根据地质勘探资料,采场围岩主要为二长花岗岩(占比 62%)、黑云母片岩(28%)及石英脉(10%),岩体完整性系数 RQD 值介于 65%~85%。岩芯取样沿主采巷间隔 50m 布置取样点(共 12 组),采用金刚石钻头获取 Φ75mm 标准岩芯,取样深度范围为-845m 至-855m,涵盖三种主要岩性单元,具体如表 2 所示。

实验样本制备方法如下所示,对采集的 47 组标准试样(Φ50mm×100mm)进行均质性筛选:通过超声波检测(P 波速度变异系数<5%)和 CT 扫描(孔隙率差异<3%)剔除 3 组非均质样本。各向异性评估采用三轴加载系统,分别沿层理面 0°、45°、90°方向加载,结果表明黑云母片岩强度各向异性最显著(0°方向抗压强度比 90°方向高 18.7%),如图 2 所示。

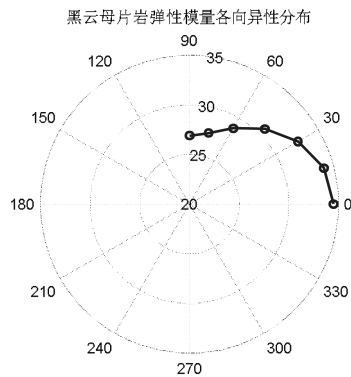


图 2 黑云母片岩弹性模量各向异性分布

模型验证采用三阶段对比法:首先通过原位地应力测试(水力压裂法)获取垂直应力梯度

26.5kPa/m,与模拟初始应力场误差<3.2%;其次开展实验室三轴试验(围压范围 5-40MPa),获取岩体非线性变形参数;最后进行巷道开挖相似模型试验(几何相似比 1:50),对比位移监测数据,如图 3 所示。

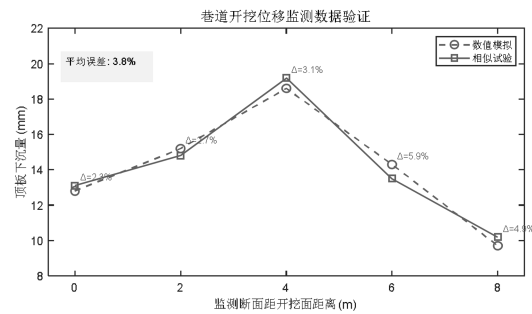


图 3 巷道开挖位移监测数据验证

关键参数验证结果如表 3 所示。

表 3 验证结果

验证项目	实验测定值	数值模拟值	误差 (%)
单轴抗压强度(MPa)	82.50	80.80	2.06
弹性模量(GPa)	35.20	34.90	0.85
泊松比	0.25	0.26	4.00
内聚力(MPa)	12.30	12.00	2.44
摩擦角(°)	38.50	37.90	1.56

表 3 可以看出各项验证项目的误差均在合理范围内,单轴抗压强度的误差为 2.06%,弹性模量的误差较小,仅为 0.85%,泊松比和内聚力的误差分别为 4%和 2.44%,摩擦角的误差为 1.56%,数值模拟与实验测定结果较为接近,验证了模型的有效性和可靠性。

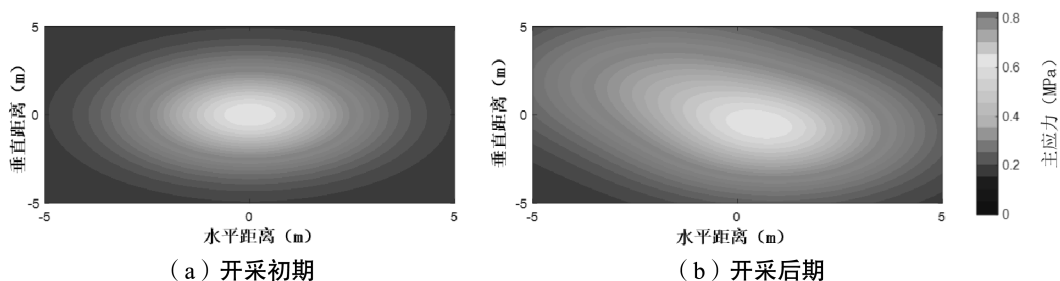


图 4 不同开采阶段的应力场分布

3 岩石力学特性变化的模拟分析

3.1 应力场与变形特征分析

深部矿产开采过程中岩体受采动作用产生的应力场变化是研究岩石力学特性变化的关键, 开采扰动引起的应力场变化呈现明显的空间不均匀性, 高地应力环境下局部应力的集中可能导致岩体发生脆性破坏。岩石在不同开采阶段的应力分布和变形响应特征有所不同, 初期围岩表现出弹性变形^[14], 开采对应力场的影响较小, 主要表现为局部应力重分布, 随着开采的深入, 岩体的应力集中区逐渐扩大, 在开采面前方产生了明显的应力提升现象, 应力提升区域会加剧岩体的变形, 还会导致破坏风险的增大。模拟结果(图 4a)显示在开采初期, 岩体的应力状态主要受到原始地应力的控制, 主要表现为均匀的应力场分布, 随着开采的推进, 围岩失去原有约束后开采扰动导致应力重新分布, 局部区域的应力集中进而引发围岩的塑性变形。根据数值模拟结果(图 4b), 采场两侧的应力逐渐增加, 中部区域的应力则随着开采进程逐步降低。变形分析表明在采场区域内岩体的变形主要表现为弯曲和屈服, 开采面附近围岩变形较为剧烈, 地表沉降和巷道收敛是常见的现象。岩石在深部高压环境下的变形行为往往呈现塑性流动特征。模拟结果中随着围压增大, 岩体在受力下变形的能力显著增强, 变形量较大, 但应力水平和破坏面相对较小。岩体的屈服强度随开采深入而不断改变, 最终表现为软化区的形成, 局部区域可能发生岩爆或冲击地压等灾害。

3.2 岩体破坏模式及稳定性评价

岩体破坏模式分析是深部开采过程中预测灾害风险的关键。基于断裂力学理论, 岩体破坏本质上是微裂纹在应力场作用下的扩展贯通过程。脆性剪切破坏源于高应力集中区的能量突变, 当裂纹尖端应力强度因子 K_I 超过岩石断裂韧度 K_{Ic} 时(式 2), 裂纹将发生失稳扩展并伴随弹性应变能的突然释放:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \geq K_{Ic} \quad (2)$$

式中, σ 为远场应力, a 为裂纹半长。这种能量释放过程易引发岩爆等动力灾害。

层理面滑移破坏受控于结构面的摩擦能量耗散机制, 遵循库仑摩擦准则(式 3)。当剪应力 τ 达到临界摩擦强度时, 系统摩擦能量释放率 G 达到材料界面能 γ 时将发生滑移失稳:

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (3)$$

$$G = (\tau - \sigma_n \tan \varphi)^2 / 2E \geq 2\gamma \quad (4)$$

式中, σ_n 为正应力, φ 为摩擦角, c 为粘聚力, E 为弹性模量。图 5 展示了层理面应力状态的临界转换过程。

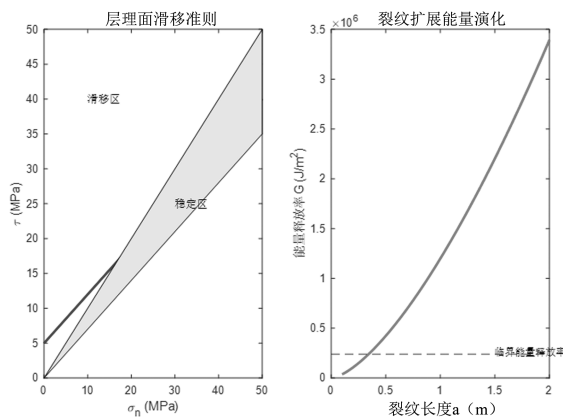


图 5 临界转换过程

塑性变形破坏表现为低应力区的能量渐进耗散,其损伤演化符合:

$$D = 1 - \exp(-\varepsilon_p/\varepsilon_0) \quad (5)$$

其中, ε_p 为塑性应变, ε_0 为特征应变阈值。

数值模拟结果显示,高应力区(>85MPa)主要发生脆性破坏,安全系数低于 1.2;层理面区域呈现明显的摩擦滑移特征;低应力区(<45MPa)则表现为塑性应变累积。

3.3 不同工况下的模拟结果对比

为分析不同工况下岩石力学特性的变化选取了两种开采工况进行数值模拟,如房柱法和充填法,包括不同开采深度、开采方式及支护措施等因素对岩体行为的影响,对比不同开采条件下的岩石应力场、地表位移特征及破坏模式来分析开采深度、方式和支护措施对岩体稳定性的影响,模拟结果有助于优化矿山设计,提供理论依

据以减少围岩失稳和灾害发生的风险。两种开采工况下的数值模拟结果如图 6 所示,包括不同开采深度下的应力分布、地表位移。

基于上述数值模拟结果,两种开采工况下的数值模拟结果具体数据如表 4 所示,呈现不同开采深度下的围岩变形、应力分布及岩体破坏模式等信息。

从表 4 中可以看出不同开采方式和开采深度对岩体的影响差异,工况一采用房柱法,深度为 500m 时,地表最大位移较小,破坏模式主要为脆性剪切破坏,安全系数为 1.25,说明该工况下围岩稳定性较好;工况二采用充填法,在 600m 深度下,地表最大位移较小,破坏模式为塑性变形破坏,安全系数为 1.42,表明充填法在该深度下能有效控制围岩稳定性。在不同开采方式和开采深度下,岩体的应力分布和地表位移特征表

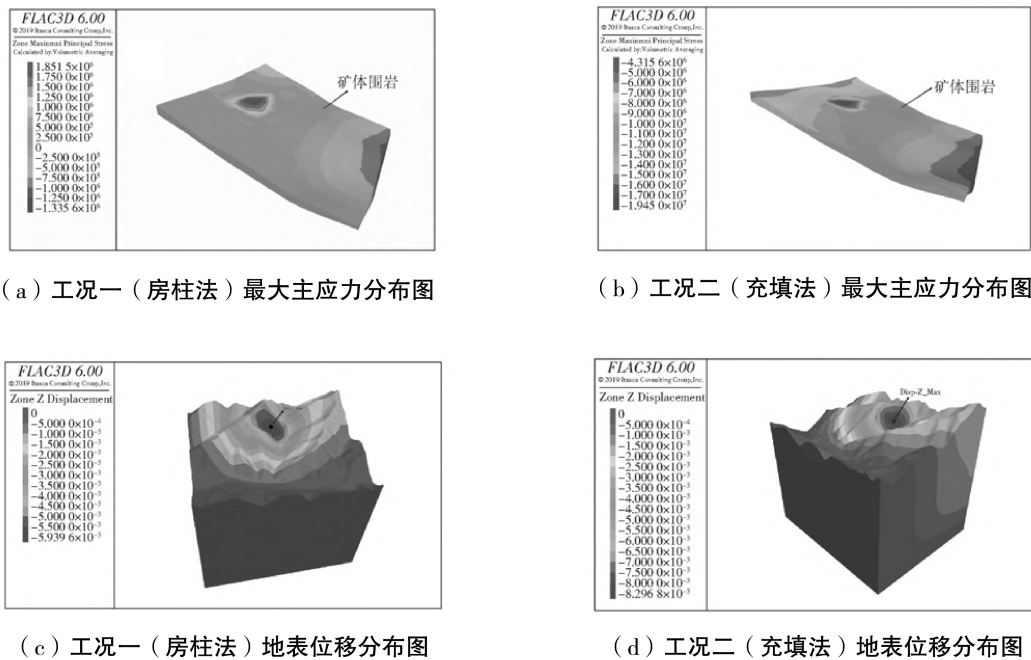


图 6 数值模拟结果

表 4 两种开采工况下的数值模拟结果

开采工况	开采深度 (m)	最大主应力 (Pa)	地表最大位移 (m)	破坏模式	安全系数
工况一(房柱法)	500	30.5×10^6	0.0128	脆性剪切破坏	1.25
工况二(充填法)	600	35.7×10^6	0.0103	塑性变形破坏	1.42

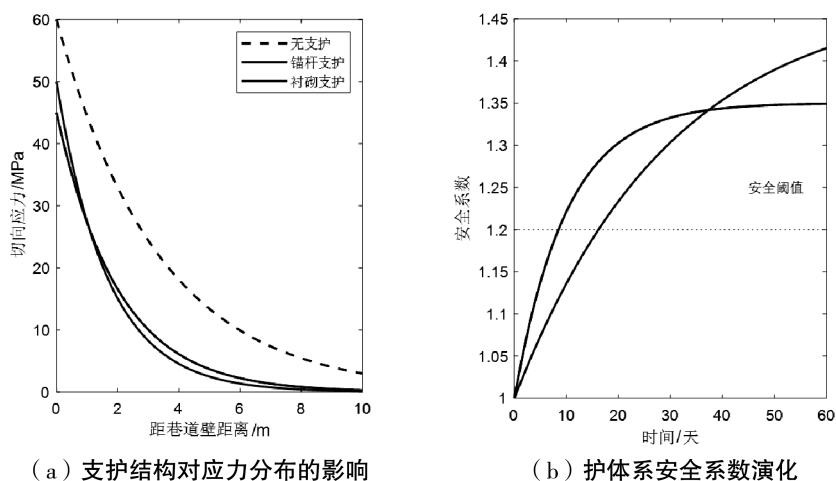


图 7 支护结构对围岩稳定性分析结果

现出明显差异,开采方式的选择对围岩稳定性有着重要影响^[15]。

3.4 支护结构对围岩稳定性的影响分析

为探究不同支护方案对围岩应力重分布的影响,本研究针对锚杆支护与混凝土衬砌两种典型方案开展对比模拟。锚杆支护采用全长粘结式模型,参数为:直径 25mm、间距 1.2m、长度 3m、预紧力 80kN;衬砌支护采用弹塑性壳体单元,厚度 300mm、弹性模量 30GPa。数值模拟结果显示(如图 7a),锚杆支护通过轴向应力传递使采场顶板最大主应力降低 21.3% (从 58.4MPa 降至 45.9MPa),塑性区范围缩减 40%;而衬砌支护则通过环向约束使巷道收敛量减少 62%(从 0.15m 降至 0.057m)。安全系数演化曲线表明(如图 7b),锚杆支护体系在开挖后 10 天内快速提升安全系数至 1.35,具有即时加固效果;衬砌支护则呈现渐进强化特征,60 天后安全系数达 1.48。值得注意的是,复合支护(锚杆+衬砌)可使能量释放率降低至单一支护的 54%,有效抑制脆性破坏发展。研究证实,支护刚度与施作时序显著影响应力调整路径:高刚度支护过早施作会加剧能量积聚,延迟施作则无法控制初期变形,建议采用“锚杆先行+柔性衬砌跟进”的协同支护策略。

4 结论

本文利用数值模拟分析了深部矿产开采中

岩石力学特性的变化,探讨了不同开采工况下岩体的应力场、变形特征和破坏模式。结果显示岩体在开采过程中应力分布不均,开采面附近的应力集中明显,导致不同破坏模式的发生,包括脆性剪切破坏、塑性变形破坏和层理面滑移破坏。模拟结果与实验数据对比表明岩体的破坏模式和变形特征受开采深度及方式影响显著。合理选择开采方式和支护措施对于确保矿山安全至关重要,数值模拟为矿山安全设计和开采方案优化提供了可靠依据。

参考文献(References):

- [1] 王荣芳. 煤矿深部开采巷道围岩协同支护技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2025, 42(05): 10-12.
- [2] 王连成, 邵安林, 曲福明, 等. 金属矿山开采技术发展现状与展望[J]. 工程科学学报, 2025, 47(05): 971-983.
- [3] 张旭. 加卸载条件下深部岩体裂纹扩展机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- [4] 王海亮, 高尚, 张海义. 高地应力岩石双孔爆破损伤演化研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(02): 1-6.
- [5] 马丹, 李樯, 蔡克川, 等. 深部采矿工程软弱地质构造突水灾害的认识: 考虑迂曲度的渗流冲蚀模型[J]. 中南大学学报(英文版), 2023, 30(02): 517-529.
- [6] 张袁娟, 王凤凰, 石晓侠. 缓冲爆破减震沟组合降振效果研究[J]. 煤, 2025, 34(04): 6-8.

- [7] 徐鹏祖, 徐海峰, 郭敬. 软岩变形地层敞开式 TBM 支护体系优化研究[J]. 水利建设与管理, 2025, 45(02): 15-25.
- [8] 张泽州. 深部开采作用下地表变形规律研究[J]. 江西煤炭科技, 2025, 46(01): 122-124+129.
- [9] 杜涛涛, 鞠文君, 卢志国, 等. 岩石水力压裂力学特性劣化实验研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 1-10 [2025-06-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20250115.1625.034.html>.
- [10] 王平, 齐梦寒, 骆正杰, 等. 程潮矿深部矿体分区开采地表沉降规律相似模拟研究[J]. 金属矿山, 2025, 59(01): 250-258.
- [11] 张吉雄, 巨峰, 李猛, 等. 深部充填开采岩层控制理论与方法研究进展[J]. 中国科学基金, 2024, 38(06): 1043-1051.
- [12] 乔雄, 黄锦聪, 杨鑫, 等. 爆破振动传播规律及控制技术研究进展[J]. 地震工程学报, 2025, 46(04): 751-766.
- [13] 王万禄, 王孟来, 付学会, 等. 昆阳磷矿二矿巷道围岩爆破振动监测与分析[J]. 采矿技术, 2025, 25(02): 86-91.
- [14] 郭玉豹, 张苏闯, 杨凯. 深部开采地压活动特征分析及采场结构参数优化研究[J]. 采矿技术, 2024, 24(06): 43-47.
- [15] 向用发, 卢玺, 徐宇浩, 等. 有限元数值模拟法基本原理及其在地质构造变形研究中的应用综述[J]. 四川地质学报, 2019, 39(04): 589-596.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 曹军伟, 2001 年生, 男, 湖北十堰人, 硕士, 成都理工大学, 主要研究方向为地质学。
Email:3242771657@qq.com

Numerical Simulation Analysis of Changes in Rock Mechanical Properties during Deep Mineral Mining

CAO Junwei

(College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The changes of rock mechanical properties directly affect the stability and safety of engineering during deep mineral mining. In order to analyze the deformation and failure laws of rock masses under high stress environments, numerical simulation methods are used to establish a computational model. Appropriate constitutive relationships and boundary conditions are selected to numerically simulate the stress field distribution, deformation behavior, and failure modes of rock masses under different mining conditions. The results indicate that under mining disturbance, the stress of the surrounding rock in deep rock mass is redistributed, and stress concentration may occur in local areas, leading to safety hazards, such as rock burst and impact ground pressure. The stability of the rock mass is affected by multiple factors, such as the properties of the surrounding rock, mining methods, and support structures. Simulation analysis provides effective reference for optimizing mining design and improving mine safety.

Key words: deep mining; rock mechanics properties; numerical simulation; stress distribution; stability