马坑铁矿破碎矿体采场结构参数优化研究*

陈小兵

(福建马坑矿业股份有限公司， 福建 龙岩市 364000)

摘要:为提高马坑铁矿61～65线采场的围岩稳定性,综合运用Mathews稳定性图解法与FLAC3D数值模拟,建立应力-位移分析模型,系统研究采场结构参数(长度、宽度、高度)对围岩稳定性的影响。结果表明,开采过程中顶板以拉应力集中为主,侧帮则表现为压应力集中;采场宽度对顶板应力分布起主导作用,采场长度显著影响侧帮的位移与应力释放,缩短采场长度可显著降低侧帮位移和跨冒风险,增强采场稳定性,20 m×10 m×54 m(长度×宽度×高度)参数组合在控制顶板应力集中和侧帮变形方面效果最优;降低采场高度至36 m在一定程度上可抑制水平位移,但在破碎岩体区域顶板垮塌风险依然较高,表明单一调整采场高度难以解决局部稳定性问题;基于岩体质量分区设计的分采方案,通过优化破碎带参数和缩短采场长度,有效缓解了63-1R段的侧帮跨冒问题。研究成果可为马坑铁矿采场结构优化与围岩稳定性控制提供理论依据。

关键词:破碎矿体;Mathews稳定性图解法;围岩稳定性;采场结构参数;分采方案;数值模拟

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0025-09

Optimization Research on Stope Structural Parameters of Fractured Orebody in Makeng Iron Mine

CHEN Xiaobing

(Fujian Makeng Mining Co., Ltd., Longyan, Fujian 364000, China)

Abstract: To improve the stability of the surrounding rock in the stopes of lines 61-65 in the Makeng Iron Mine, the Mathews stability graph method and FLAC3D numerical simulation were comprehensively used. A stress-displacement analysis model was established, and the effects of stope structural parameters (length, width, height) on the stability of the surrounding rock were systematically studied. The results show that during the mining process, the roof is dominated by tensile stress concentration, while the side walls exhibit compressive stress concentration. The stope width plays a dominant role in the stress distribution of the roof. The stope length significantly affects the displacement and stress release of the side walls. Shortening the stope length significantly reduces the displacement of the side walls and the risk of caving, which enhances the stope stability. The parameter combination of 20 m×10 m×54 m (length×width×height) has the best effect in controlling the stress concentration of the roof and the deformation of the side walls. Reducing the mining height to 36 m inhibits the horizontal displacement to a certain extent. However, the risk of roof caving remains high in the fractured rock mass area, indicating that solely adjusting the mining height is difficult to solve the local stability problem. Based on the zoning design of rock mass quality, a slicing scheme was proposed. By optimizing the parameters of the fracture zone and shortening the stope length, this scheme effectively mitigates the problem of side wall caving in the 63-1R section. The research results provide a theoretical basis for the structural optimization and surrounding rock stability control of stopes in the Makeng Iron Mine.

Key words: Fractured orebody, Mathews stability graph method, Surrounding rock stability, Stope structural parameter, Slicing scheme, Numerical simulation

0 引言

随着金属资源消耗持续攀升,矿山逐步向深部开发转型。然而,深部开采条件下,地应力增高、岩体结构复杂,诱发围岩破坏、应力集中和冲击地压等地质灾害的风险显著增加,对采场稳定性控制提出了更高的技术要求[1-3]。因此,开展采场结构参数的优化设计研究,已成为实现深部矿山安全高效开采

* **收稿日期**:2025-04-09
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374085)
作者简介:陈小兵(1988—),男,江西南昌人,硕士,高级工程师,主要从事矿山地质工作。E-mail:921017591@qq.com

的关键途径之一。合理的采场结构参数不仅有助于改善围岩应力分布与变形响应,还能有效抑制塑性区的发展,提升开采区域的整体稳定性[4-6]。

近年来,针对采场结构优化与稳定性分析,国内外学者开展了大量研究工作,逐步形成了以Mathews稳定性图解法和数值模拟为核心的综合评价体系。黄世顶等[7]通过Mathews稳定性图解法与数值模拟,分析了高峰矿深部采场在不同结构参数下的极限暴露面积、应力分布和塑性区特征,并提出了优化的采场宽度、分层高度及回采方式,以增强回采过程的安全性。宋宇峰[8]结合FLAC3D数值模拟和AHP、模糊数学法,最终确定下向分层进路充填采矿法为最优方案。王玉丁等[9]依托Mathews稳定性图解法、FLAC3D模拟与Critic赋权法,优化了安徽某铁矿的分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法,提出了一步骤采场跨度15 m、二步骤采场跨度17 m为最优采场跨度。邓良等[10]通过对采空区*RQD*值、节理特征等参数的分析,利用Mathews稳定性图解法评估了铅锌矿采空区稳定性,为矿山安全生产提供了参考。舒帆等[11]针对新城金矿-530 m中段岩层破碎与断裂构造特点,修正了Mathews稳定性图解法并提出岩石应力系数A',通过FLAC3D数值模拟验证其可靠性,为矿山安全开采提供了强有力的理论支持。尹修平等[12]则结合Mathews稳定性图解法与FLAC3D优化了采场结构,显著降低了采矿损失率与贫化率,提升了生产能力,且具有较好的推广前景。

马坑铁矿57～83勘探线区间采用大直径深孔阶段矿房嗣后充填采矿法开采,但在+0 m中段61～65线区域,受断裂构造发育、岩体破碎及应力集中等影响,采场局部应力异常、围岩失稳及片帮垮塌等问题频发。为揭示采场结构参数对围岩稳定性的影响机制,本文以该区破碎采场为研究对象,系统分析了采场长度、宽度与高度等结构参数对围岩应力、变形及塑性区分布的影响特征,并结合数值模拟评估优化方案的稳定效果,以期为矿山结构参数设计与安全管理提供理论依据与工程参考。

1 Mathews稳定性图解法分析采场稳定性

1.1 工程概况

目前,马坑铁矿+0 m中段采用大直径深孔阶段矿房嗣后充填采矿法进行回采,单个矿房设计高度为54 m,宽度为15 m,沿矿体走向或垂直矿体走向布置。61～65线局部区域受断裂构造强烈影响,岩体破碎、节理裂隙发育,围岩完整性较差,且存在构造应力与开采应力叠加现象,易出现应力集中和岩爆征兆。同时,该区段断层导水能力强,地下水活动频繁,进一步削弱了围岩稳固性。该区域63-1R采场失稳问题最为突出,其采场暴露面积约740 m^2,虽采取全孔侧崩挤压爆破、锚索注浆支护等措施改善了部分情况,但采场结构参数未调整,导致仍存在垮塌风险。在实际回采过程中,一步骤开采后局部围岩发生较大变形,相邻二步骤回采时,围岩及一步骤充填体局部出现垮塌、片帮等失稳现象,严重威胁采场稳定性与施工安全。

1.2 Mathews稳定性图解法计算过程

Mathews稳定性图解法基于稳定性系数N和形状因子S(或水力半径HR)来评估采场稳定性,其中稳定性系数N反映岩体在特定应力条件下的自稳能力,形状因子S考虑采场暴露面的尺寸和形状特征,如图1所示。Mathews稳定性系数的计算公式如下[13-15]:

$$N=Q'\times A\times B\times C \tag{1}$$

式中:N为Mathews稳定性系数;Q'为修正的Q值;A为岩石应力系数;B为节理方位系数;C为重力调整系数。

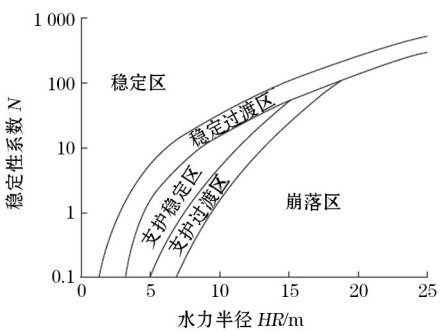


图1 Mathews稳定性系数与水力半径的相关关系

Fig.1 The relationship between Mathews stability coefficient and hydraulic radius

(1) Q'值。假设节理水影响系数(J_w)和应力折减系数(SRF)均为1。根据马坑铁矿61～65线破碎区域的地质调查结果,矿体顶板为灰岩和大理岩,底板为石英砂岩,矿石块状构造,主要矿物成分为磁铁矿。Q'值的计算公式为:

$$Q'=\frac{RQD}{J_n}\cdot\frac{J_r}{J_a} \tag{2}$$

式中:RQD为岩体质量指标;J_r为节理粗糙度;J_n为节理组数;J_a为节理蚀变系数。根据式(2)可计算得出Q'值,见表1。

表 1 Q'值计算参数及结果

Table 1 The calculated parameters and results of Q' value

岩性	*RQD*	节理组数 J_n	节理组粗糙度 J_r	节理蚀变系数 J_a	*Q* 值	Q'值
大理岩(顶板)	45	6	1.5	0.75	6.00	15.00
矿体	53	6	1.5	0.75	5.89	17.67
石英砂岩(底板)	73	12	1.5	0.75	4.06	12.17

(2) *A* 值。*A* 值用于衡量高应力对岩体稳定性的影响,是岩体单轴抗压强度与平行开挖面最大诱导应力之比,且与岩体稳定性呈线性关系,取值范围为 0.1～1.0。现场地应力测试显示,18 m 中段水平测点沿矿体走向最大主应力为 31.33 MPa,最小主应力为 18.04 MPa。结合采场岩体受力特征,本次以自重应力方向的最小主应力为开挖诱导应力 σ_i 进行计算。室内试验测得各岩性岩石的单轴抗压强度 σ_c:大理岩 76.45 MPa、矿体 131.43 MPa、石英砂岩 124.76 MPa。通过计算各岩性 σ_c/σ_i 比值,结合岩石应力系数图解查取 *A* 值,结果见表 2。

表 2 各岩性的强度-应力比计算结果及 *A* 值取值

Table 2 The calculation results of the strength-stress ratio and the value of *A* for each lithology

岩性	单轴抗压强度 σ_c/MPa	最小主应力 σ_i/MPa	σ_c/σ_i	*A*
大理岩	76.45	18.04	4.24	0.35
矿体	131.43	18.04	7.29	0.70
石英砂岩	124.76	18.04	6.92	0.65

(3) *B* 值。节理方位系数 *B* 根据控制性节理与采场表面的相对方位确定,根据现场调查结果,控制性节理与采场顶板暴露面的夹角为 60°～80°,结合经典 Mathews 稳定性图解法的推荐取值,本研究中 *B* 值取 0.8。

(4) *C* 值。重力调整系数 *C* 考虑了重力对采场顶板稳定性的影响,且与采场表面倾角呈相关关系,本研究中矿体倾角 θ 为 40°时,按照公式 $C=8-6\cos\theta$,*C* 值为 3.4。

根据式(1)及稳定性系数与水力半径的相关关系图,可得出稳定性系数 *N* 和允许水力半径 *HR*,进而得出采场的允许跨度和允许暴露面积[16],计算结果见表 3。

表 3 Mathews 稳定性计算结果

Table 3 Mathews stability calculation results

岩性	Q'	*A*	*B*	*C*	稳定性系数 *N*	允许水力半径 *HR*/m	允许跨度/m	允许暴露面积/m²
大理岩	15.00	0.35	0.80	3.4	13.87	6.55	5.73	230.2
矿体	17.67	0.79	0.80	3.4	16.34	15.82	12.66	506.4
石英砂岩	12.17	0.65	0.80	3.4	17.21	12.38	9.90	396.0

Mathews 稳定性计算结果表明,马坑铁矿当前采场顶板的跨度和暴露面积均超出理论允许范围,存在较高的稳定性风险,需采取适当的支护措施或优化采场结构参数以降低失稳隐患。此外,61～65 线破碎区域岩体质量变化较大,围岩力学特性差异明显,表明采场结构参数对稳定性的影响具有较强的空间差异性。因此,在实际应用中,应结合具体采场的地质条件,针对性地优化采场结构参数,以提升围岩稳定性并确保安全开采。

2 采场结构参数影响规律探究

2.1 数值模型建立

基于马坑铁矿大直径深孔阶段矿房嗣后充填采矿法的特点,本研究采用 Rhino3D 建模软件构建矿体三维模型,并结合 FLAC3D 数值模拟软件进行分析。模拟计算中,选取 Mohr-Coulomb 破坏准则作为判别标准。研究对象选取马坑铁矿 61～65 线之间的典型破碎区域。为确保数值模拟的边界条件合理并控制模型规模对计算精度的影响,在建模过程中依据矿体地质剖面图对矿体边界线进行标准化提取与几何重构。结合矿体赋存特征及开采实际,对模型进行适度简化与拓扑优化,最终建立了可用于后续数值分析的矿体三维结构模型,如图 2 所示。

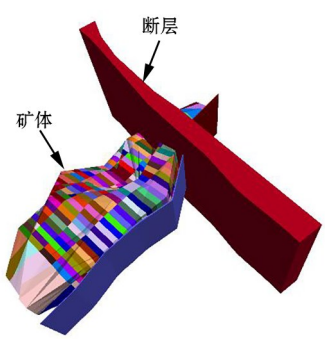


图 2 马坑铁矿矿体及断层破碎带三维模型

Fig.2 3D model of orebody and fault fracture zone of the Makeng Iron Mine

2.2 采场结构参数设计模拟方案

结合理论分析与现场调查结果,本研究针对马

坑铁矿破碎区域的采场结构参数进行优化分析。通过数值模拟,分别探讨不同采场长度、宽度和高度对围岩稳定性的影响,重点分析矿岩位移和应力分布的演化特征。不同结构参数的模拟方案见表 4,采场长度、宽度和高度的选择依据矿体的几何形态与实际开采需求,并结合现有采场的尺寸和地质特征进行设计。模拟过程中,模型沿矿体走向(X 轴)与垂直矿体走向(Y 轴)施加水平应力,考虑覆岩自重效应,施加垂向压应力外荷载,其他边界施加位移约束,以确保计算边界条件的合理性和模拟结果的稳定性。在采场破碎区域布置 6 个测点,监测围岩的变化情况,具体布置如图 3 所示。

表 4 破碎区域结构参数模拟方案

Table 4 Simulation schemes for structural parameter of fractured zone

方案	长度/m	宽度/m	高度/m
方案 1	40	15	54
方案 2	40	13	54
方案 3	40	10	54
方案 4	30	15	54
方案 5	20	15	54
方案 6	20	10	54
方案 7	40	15	36

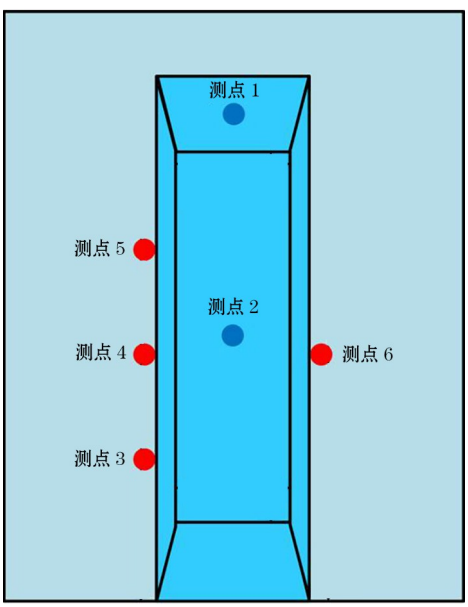


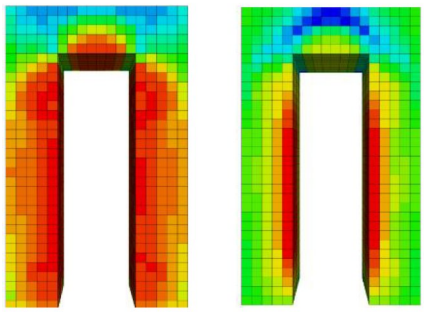
图 3 监测点布置

Fig.3 Layout of monitoring points

2.3 采场长度和宽度对围岩稳定性的影响

2.3.1 围岩应力分布特征

为研究采场开挖后围岩应力分布规律,提取 63～64 线间单一采场模型参数,选取高度为 54 m、宽度为 15 m 的采场,开挖后围岩最大主应力和最小主应力云图如图 4 所示。研究表明,围岩应力分布发生显著调整,顶板与侧帮均出现应力集中与释放现象。侧帮及顶板内部存在拉应力分布,而顶板上部形成拱形压应力集中区,表明局部区域承受较大应力调整,可能诱发围岩失稳。

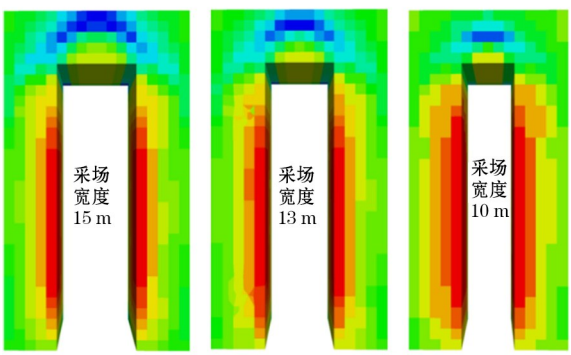


(a) 最大主应力 (b) 最小主应力

图 4 采场开挖后围岩主应力云图

Fig.4 Principal stress contour maps of the surrounding rock after stope excavation

为探讨采场宽度对围岩应力状态及稳定性的影响,分别对方案 1、方案 2、方案 3 的计算结果进行对比分析,如图 5 所示。结果表明,随着宽度增大,顶板上部应力集中范围扩大,局部应力梯度增大,主要由于较大的采场宽度削弱了顶板的整体承载能力,使局部区域应力进一步集中,增加了顶板失稳风险。当宽度为 10 m 时,应力分布最均匀,顶板稳定性最佳。因此,在顶板冒落风险较高的区域,建议适当减小采场宽度,以降低应力集中效应,提高围岩稳定性。



(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

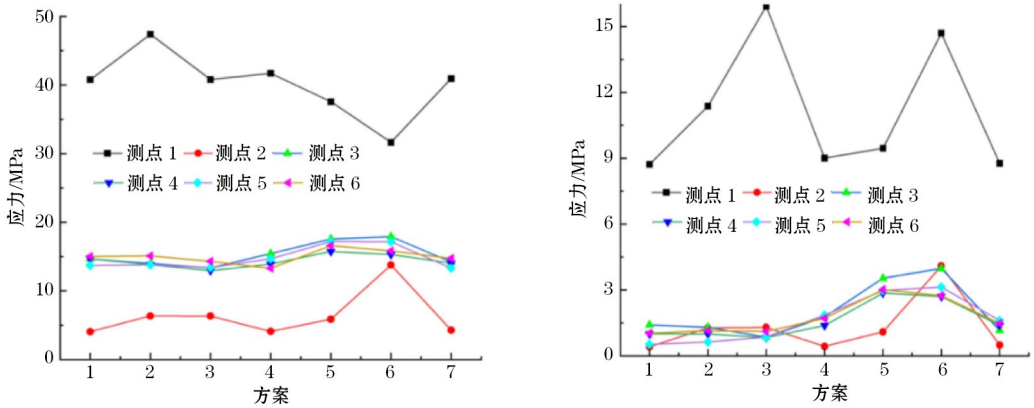
图 5 采场开挖后围岩最小主应力云图

Fig.5 Minimum principal stress contour maps of the surrounding rock after stope excavation

图 6 为各方案最大主应力和最小主应力监测数据。结果表明,61～65 线区域受构造影响,水平应力较高,测点 1 对应顶板上部的应力值,当采场开挖后,在采场顶板出现了较为严重的应力集中现象。

对比不同开采方案可知,采场尺寸为 20 m×10 m×54 m(方案 6)的顶板位置最大主应力和最小主应力差值最小,为 17.3 MPa,顶板应力集中程度最轻,应力水平最低,说明该参数组合有助于降低顶板应力集中,提高围岩稳定性。

测点 3、4、5、6 反映侧帮应力调整情况,监测数据显示,侧帮在开挖后发生了明显的应力释放。对比方案 1、方案 4 和方案 5 可知,随着采场长度的减小,主应力差值越小,表明缩小采场长度可有效缓解侧帮应力释放,降低失稳风险。单独减小采场宽度对侧帮主应力影响有限,但在缩小采场长度的基础上进一步减小宽度,有助于优化侧帮应力分布。综合来看,合理匹配采场长度与宽度对降低围岩应力集中、提升采场稳定性具有重要意义。



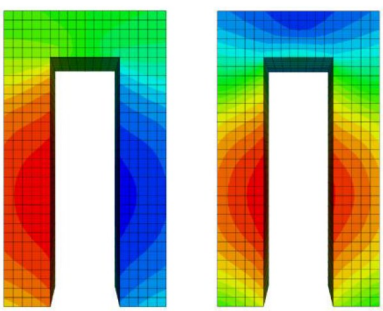
(a) 最大主应力 (b) 最小主应力

图 6 不同方案下各测点主应力值对比

Fig.6 Comparison of principal stress values at each monitoring point for different schemes

2.3.2 围岩变形特征

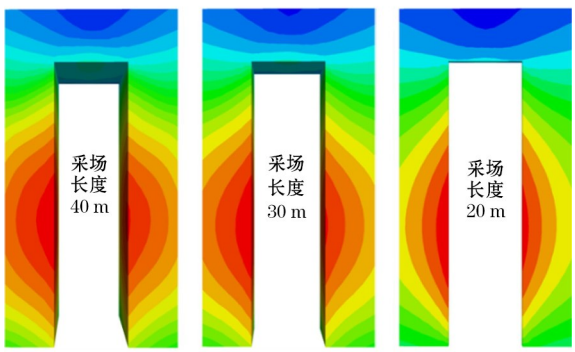
图 7 显示了高度为 54 m、宽度为 15 m 的采场围岩的位移情况。研究表明,顶板主要发生竖向位移,侧帮则以水平位移为主,其中侧帮中部变形最为显著。为探究采场长度对围岩变形的影响,对比分析了方案 1、方案 4 和方案 5 采场开挖后围岩的位移情况,如图 8 所示。分析表明,随着长度的增加,侧帮位移显著增大,围岩变形加剧可能加速两帮垮塌。数值模拟结果表明,当采场长度为 20 m 时,侧帮位移最小,围岩稳定性最佳。因此,在下盘岩体破碎严重区域,建议在 40 m 采场长度的基础上进一步缩短,以降低侧帮变形和失稳风险。



(a) X 向位移 (b) 合位移

图 7 采场开挖后围岩 X 向位移和合位移云图

Fig.7 Contour maps of X-direction displacement and total displacement of surrounding rock after stope excavation



(a) 方案 1 (b) 方案 4 (c) 方案 5

图 8 采场开挖后围岩合位移云图

Fig.8 Contour maps of total displacement of surrounding rock after stope excavation

图 9 为不同方案下各测点的位移值对比曲线。由不同采场结构参数对位移分布的影响结果可知,减小采场宽度可有效降低顶板(测点 1)及后采单元矿体(测点 2)的位移量,且当宽度为 10 m 时,顶板位移最小,表明该宽度条件下顶板结构稳定性最佳。侧帮变形方面(测点 3、4、5、6),虽然缩小采场长度和宽度均有助于减少侧帮位移,但采场长度的影响更为显著。图 9 表明,综合对比各方案,当采场尺寸为 20 m×10 m×54 m(方案 6)时,侧帮位移最小,表明该参数组合更有利于抑制侧帮变形,提升采场稳定性,为采场结构参数优化提供了重要依据。

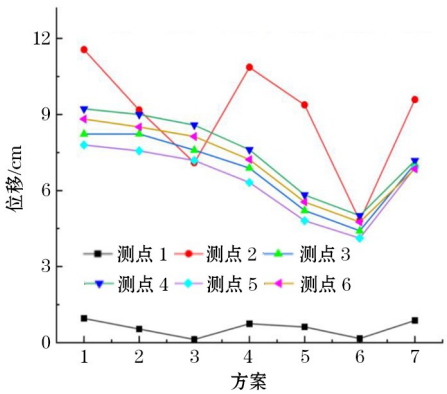


图 9 不同方案下各测点位移值对比

Fig.9 Comparison of displacement values at each monitoring point for different schemes

2.4 采场高度对围岩稳定性影响

马坑铁矿 61～65 线区域矿石出矿水平设于＋18 m,钻孔凿岩水平位于＋72 m,采场回采高度为 54 m。鉴于区域内岩体较为破碎,围岩稳定性问题尤为突出,本节基于设置副中段的思路,探讨采场高度对采场稳定性的影响。拟在＋54 m 水平增设副中段,并建立相应的数值模拟模型,模型宽度为采场实际宽度 15 m,长度为 40 m,将采场高度由 54 m(方案 1)降至 36 m(方案 7),如图 10 所示。通过对比分析两种采场高度条件下的围岩位移、应力分布及塑性区演化特征,系统评估副中段方案对采场稳定性的影响,为优化采场结构设计提供了科学依据。

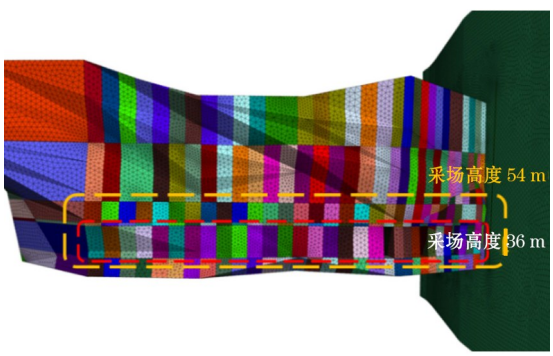
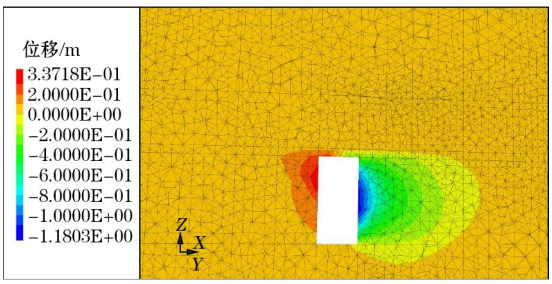


图 10 副中段模拟方案示意

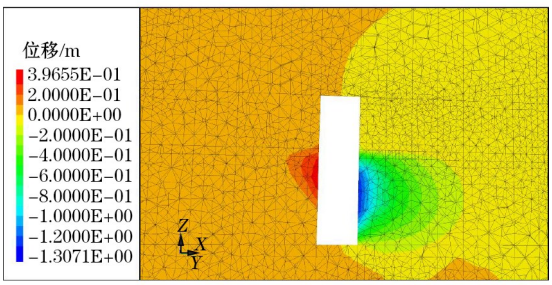
Fig.10 Schematic of the sub-middle section simulation scheme

2.4.1 位移分析

位移分布是衡量采场稳定性的重要指标,图 11 展示了不同采场高度下采场 Y 方向位移分布云图。结果表明,当采场高度为 36 m 时,采场两帮的最大水平位移约为 1.18 m;而当采场高度增加到 54 m 时,最大水平位移也随之增大至约 1.31 m。这表明,采场高度越大,采场周围岩体的水平移动范围和幅度越明显。此外,尽管采场高度有所变化,位移集中区域的空间分布始终与破碎岩体区域高度吻合,进一步证明了破碎岩体的赋存特征在采场围岩变形中起主导作用。因此,适当降低采场高度可有效抑制水平位移的扩展,从而提高采场整体稳定性,为工程实践提供了重要的理论依据。



(a) 采场高度 36 m



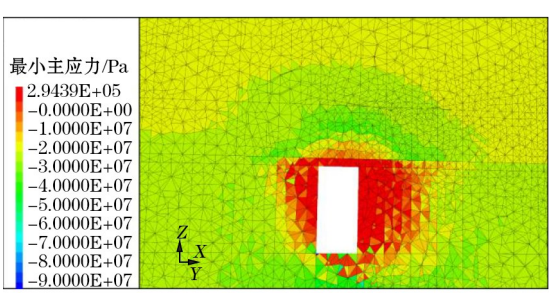
(b) 采场高度 54 m

图 11 不同采场高度下采场 *Y* 方向位移分布云图

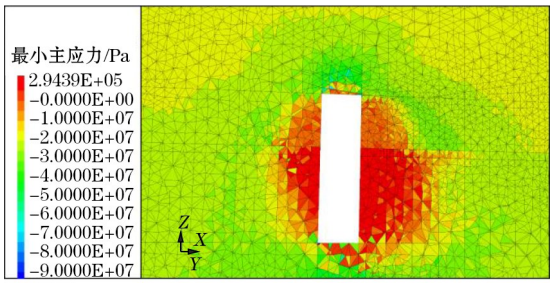
Fig.11 *Y*-direction displacement contour maps of stopes under different mining heights

2.4.2 应力分析

矿体开采后,原始应力平衡状态遭到破坏,围岩应力重分布,直至达到新的平衡状态。图 12 展示了在采场高度为 36 m 和 54 m 条件下的最小主应力分布情况。对比分析结果表明,采场开挖后,围岩内部形成了明显的应力释放区,并且采场周围大范围区域表现出拉应力特征。与采场高度为 36 m 的情况相比,采场高度为 54 m 时,采场中下部的应力释放程度更为显著,但两者的应力释放区高度一致,并与破碎岩体分布区相吻合。该结果表明,破碎岩体的赋存位置对采场应力分布具有重要影响,且适当降低采场高度可有效减小应力释放强度,从而有助于提升围岩稳定性。



(a) 采场高度 36 m



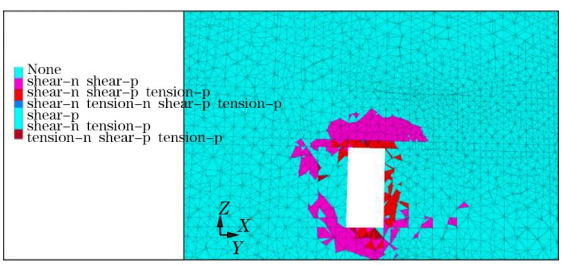
(b) 采场高度 54 m

图 12 不同采场高度下采场最小主应力分布云图

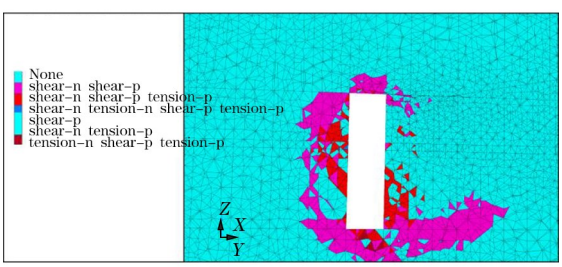
Fig.12 Minimum principal stress distribution contour maps of stopes under different mining heights

2.4.3 塑性区分布

塑性区的分布特征能够直观反映围岩稳定性,主要表现为在应力作用下的剪切或拉伸破坏状态。图 13 和图 14 分别展示了采场高度为 36 m 和 54 m 时沿矿体走向和垂直矿体走向剖面的塑性区分布,分析结果表明,降低采场高度后,采场整体的塑性破坏范围有所收缩,但顶板依然存在大面积的剪切破坏区域,尤其是在副中段下方矿体开采后,上部中段底部巷道仍可能受影响,存在垮塌风险。此外,图 14 显示,副中段的设立未改变顶板暴露面积,在破碎岩体区域,顶板仍可能发生垮落。因此,尽管副中段的设立有助于缩小塑性破坏范围,但其对围岩稳定性的改善作用有限,且需配合加强支护与加固措施以确保采场安全。



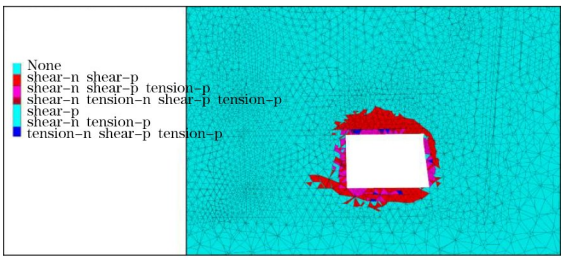
(a) 采场高度 36 m



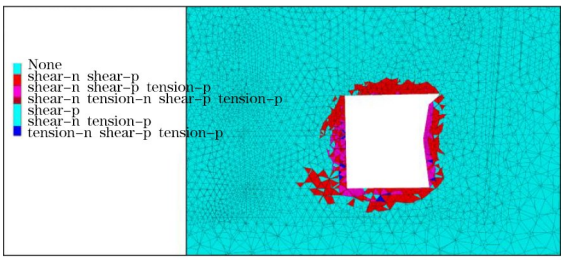
(b) 采场高度 54 m

图 13 不同采场高度下沿矿体走向剖面塑性区分布云图

Fig.13 Contour maps of plastic zone distribution along the orebody strike profile at different mining heights



(a) 采场高度 36 m



(b) 采场高度 54 m

图 14 不同采场高度下垂直矿体走向剖面塑性区分布云图

Fig.14 Contour maps of plastic zone distribution of vertical orebody strike profile at different mining heights

3 采场结构参数优化及现场应用

为了验证最佳采场结构参数的实际效果,本研究以马坑铁矿 61～65 线采场为例,结合数值模拟与现场经验,提出并实施了结构参数优化方案。通过数值模拟,方案 6(20 m×10 m×54 m)在侧帮位移和顶板应力集中方面表现最佳,因此在现场应用中,针对 63-1R 采场的侧帮跨冒问题,优先通过减小垂直矿体走向的采场长度来优化结构,以降低侧帮受力和减少位移。现场实际生产中,锚索护顶措施在 63-1R 采场取得了良好效果。缩短采场长度有助于减小侧向暴露面积,缓解侧帮受压现象,并降低垮塌风险,相比其他方案,这一优化措施不仅未增加额外掘进量,也不需调整底部结构,能够在现有基础设施下优先实施。

针对 61～65 线采场的具体情况,结合破碎岩体的分布,设计了基于岩体质量差异的分采方案,如图 15 所示。在岩体质量差的区域,选用较小的结构参数;在岩体质量好的区域,采用较大的结构参数。基于破碎带的影响范围及区域岩体的物理力学参数,提出了 4 种采场结构参数组合(20 m×10 m×54 m、40 m×10 m×54 m、20 m×15 m×54 m、40 m×15 m×54 m)方案,并根据断层位置和岩体特征调整采场参数。图 16 展示了上述采场参数在 61～65 线区

域内的具体分布情况,为该破碎区域的开采提供了工程应用参考。

通过现场反馈,验证了优化方案在提升采场稳定性、降低风险方面的有效性,为深部矿山的安全高效开采提供了实践支持。

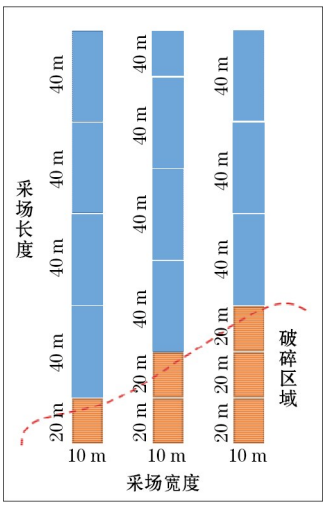


图 15 破碎区域分布的上下盘分采方案示意

Fig.15 Schematic of the upper and lower slicing scheme for the fractured zone

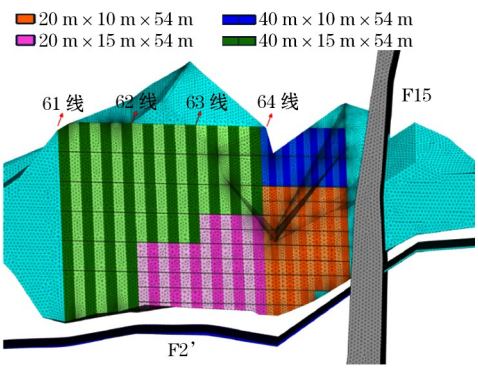


图 16 61～65 线区域不同采场结构参数组合布置

Fig.16 Layout of different stope structural parameter combinations in the 61－65 line area

4 结论

为确保深部矿山安全高效开采,本文以马坑铁矿某采场破碎区为工程背景,基于 Mathews 稳定性图解法与 FLAC3D 数值模拟,系统研究了采场结构参数(长度、宽度、高度)对围岩稳定性的影响,主要结论如下。

(1) 采场宽度对顶板应力集中区域有显著影响,而采场长度对侧帮的应力释放与位移控制起到了更为关键的作用。缩短采场长度能够有效减小侧帮位移与应力集中,从而提升围岩稳定性。其中,方案 6(20 m×10 m×54 m)在侧帮位移和顶板应力集中方面表现最佳。

(2) 虽然通过降低采场高度至 36 m 能够在一定程度上抑制水平位移,但在破碎岩体区域,顶板仍面临较高的垮塌风险,表明单纯调整采场高度难以显著改善局部稳定性,因此应综合优化其他采场结构参数。

(3) 通过数值模拟与现场反馈,针对 63-1R 采场的侧帮跨冒问题,优化方案通过减小垂直矿体走向长度,成功减轻了侧帮受力,降低了位移与垮塌风险。此优化措施无需增加额外掘进量或调整底部结构,能够在现有基础设施下实施。此外,基于岩体质量差异的分采方案为破碎区域的开采提供了有效的参数选择。

参考文献(References):

[1] 吴钦正,刘兴全,李桂林,等.我国金属矿山深部开采发展现状及对策研究[J].采矿技术,2021,21(5):23-27.
WU Qinzheng, LIU Xingquan, LI Guilin, et al. Research on the current development status and countermeasures of deep metal mining in China[J]. Mining Technology,2021,21(5):23-27.

[2] 赵兴东,周鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, ZHAO Yifan, et al. Research status and progress of prevention and control of mining disasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(8):2522-2538.

[3] 朱万成,任敏,代风,等.现场监测与数值模拟相结合的矿山灾害预测预警方法[J].金属矿山,2020(1):151-162.
ZHU Wancheng, REN Min, DAI Feng, et al. Prediction and early warning of mining-induced disasters based on combined in-situ monitoring and numerical simulation[J]. Metal Mine,2020(1):151-162.

[4] 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(6):1043-1051.
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, et al. Research progress of strata control theory and method in deep back filling mining [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China,2024,38(6):1043-1051.

[5] 罗淦华,吴爱祥,王贻明.软弱破碎矿体采场稳定性分析及结构参数优化[J].中国钨业,2016,31(5):13-18.
LUO Ganhua, WU Aixiang, WANG Yiming. Optimization of stope structure parameters and stability analysis for weak-broken orebody[J].China Tungsten Industry,2016,31(5):13-18.

[6] 刘焕新,王剑波,赵杰,等.近海黄金矿床深部开采科技难题及研究展望[J].金属矿山,2018(2):14-18.

LIU Huanxin, WANG Jianbo, ZHAO Jie, et al. Scientific difficulties and research prospects in deep mining of offshore gold deposit[J]. Metal Mine,2018(2):14-18.

[7] 黄世顶,刘尧,邓红卫,等.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):10-18.
HUANG Shiding, LIU Yao, DENG Hongwei, et al. Optimization of stope structure parameters based on modified Mathews stability diagram method and FLAC3D [J].Mining Research and Development,2024,44(4):10-18.

[8] 宋宇峰.极破碎厚大矿体采场稳定性分析及结构参数优化研究[D].赣州:江西理工大学,2022.
SONG Yufeng. Study on stability analysis and structural parameter optimization of extremely broken thick ore body [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2022.

[9] 王玉丁,林卫星,欧任泽,等.分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法采场跨度的优化[J].矿业研究与开发,2024,44(6):19-25.
WANG Yuding, LIN Weixing, OU Renze, et al. Optimization of stope span for sublevel drilling stage open stope with subsequent filling mining method[J]. Mining Research and Development,2024,44(6):19-25.

[10] 邓良,杨泽,李超相.基于 Mathews 稳定图法的采空区稳定性分析[J].世界有色金属,2024(12):29-31.
DENG Liang, YANG Ze, LI Chaoxiang. Stability analysis of goaf based on Mathews stability diagram method[J]. World Nonferrous Metals,2024(12):29-31.

[11] 舒帆,张敏思,林才泽,等.改进的 Mathews 稳定图法在新城金矿－530 m 中段采场设计中的应用[J].中国矿业,2024,33(10):185-192.
SHU Fan, ZHANG Minsi, LIN Caize, et al. Application of improved Mathews stability diagram method in stope design of －530 m middle section of Xincheng Gold Mine[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10):185-192.

[12] 尹修平,冯家宁,吉豫庆,等.基于 Mathews 稳定性图解法的某矿山空场采矿法优化[J].黄金,2023,44(11):28-31.
YIN Xiuping, FENG Jianing, JI Yuqing, et al. Optimization of open stope mining method in a mine based on Mathews stability graphic method[J].Gold,2023,44(11):28-31.

[13] 王磊,张琳琳.基于 Mathews 法与数值模拟的采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2025,25(1):16-22.
WANG Lei, ZHANG Linlin. Research on the optimization of stope structure parameters based on Mathews method and numerical simulation[J]. Mining Technology,2025,25(1):16-22.

[14] 李翠,张良兵,陈涛,等.基于 Mathews 和 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].钢铁钒钛,2023,44(5):41-47.
LI Cui, ZHANG Liangbing, CHEN Tao, et al. Optimization of stope structure parameters based on Mathews and FLAC3D[J].IRON Steel Vanadium Titanium,2023,44(5):41-47.

[15] 谢伟,倪彬,李乾龙,等.基于 Mathews 图解法的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2022(6):40-45.
XIE Wei, NI Bin, LI Qianlong, et al. Stability analysis of goaf based on Mathews graphic method[J]. Metal Mine,2022(6):40-45.

[16] 孔德阔,李长洪,魏晓明.基于 Mathews 稳定图的采场暴露面积计算[J].现代矿业,2015,31(5):6-8.
KONG Dekuo, LI Changhong, WEI Xiaoming. Computation of stope exposure area based on Mathews stability diagram[J]. Modern Mining,2015,31(5):6-8.