

中文引用格式:程朱哲. 厚矿体采场跨度参数优化及稳定性研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(11): 107-113.

英文引用格式:CHENG Zhuzhe. Optimization and stability research of span parameters for thick orebody mining sites[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 107-113.

厚矿体采场跨度参数优化及稳定性研究*

程朱哲 工程师

(五矿勘查开发有限公司, 北京 100010)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.0167

【摘要】 为兼顾厚矿体采场稳定性和开采经济性,并为同类工程的采场跨度设计提供参考,以某铜矿-200 m中段为工程背景,系统开展采场跨度参数及其稳定性研究。采用 Mathews 图解法分析采场稳定性,通过计算岩体稳定性指数和水力半径,得出维持采场稳定的采场跨度范围。基于此结果,设计4种不同采场跨度的模拟方案,运用有限差分软件数值模拟研究采场稳定性,对比分析各方案的顶板位移量和围岩塑性区特征。结果表明:当采场跨度从12 m增至18 m时,顶板垂直位移呈缓慢增长趋势,围岩塑性区体积呈波动变化;而采场跨度增至20 m时,顶板垂直位移大幅增加,围岩塑性区体积突增并出现贯通现象,直接威胁顶板稳定性;18 m为该铜矿-200 m中段的最优采场跨度参数;采场跨度设计应考虑矿体赋存条件、安全和效益等因素的影响。

【关键词】 厚矿体; 采场跨度; 图解法; 数值模拟; 采场稳定性

Optimization and stability research of span parameters for thick orebody mining sites

CHENG Zhuzhe

(Minmetals Exploration & Development Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: To balance stope stability with mining economy and to inform stope span design in similar engineering projects, a comprehensive investigation was conducted on the stope span and its stability, using the -200 m level of a copper mine as a case study. The Mathews stability chart method was adopted to evaluate the stope stability by calculating the rock mass stability index and hydraulic radius, thereby defining a reasonable range of stable stope spans. Based on the analysis, four stope span scenarios were designed and numerically simulated using finite difference software to study the stope responses. Comparative analyses were performed on roof displacements and the characteristics of plastic zones in the surrounding rock. The results show that as the stope span increases from 12 m to 18 m, vertical displacement of the roof increases gradually, and the volume of the plastic zone fluctuates slightly. However, when the span reaches 20 m, a significant increase in roof displacement and a sudden expansion of the plastic zone which leads to through-going failure is observed, severely compromising roof stability. An optimal stope span of 18 m is recommended for the -200 m level of the copper mine. The stope span design of mining should consider the influence of factors such as orebody occurrence conditions, safety and efficiency.

Keywords: thick orebody; stope span; graphical method; numerical simulation; stope stability

0 引言

采场结构参数是影响地下采场稳定性的关键因素,对于分段采场法而言,采场跨度直接关系到矿山开采的安全与经济效益^[1],其合理确定是矿井经济性与安全性的平衡过程^[2]。跨度过小会提高矿石损失率和贫化率,降低回收率;跨度过大则易引发采场稳定性不足,显著增加回采过程中岩爆、顶板垮塌等地质灾害风险。厚矿体开采中,围岩应力集中更显著,顶板垮塌及冒落风险更高,因此,基于其具体地质条件开展采场稳定性研究,对保障矿井安全生产具有重要意义。

目前,国内外学者已提出多种采场跨度参数确定方法,如厚跨比法^[3-4]、KB 鲁别涅依他公式法^[5-6]、Mathews 图解法^[7-9]等。SUM Mingzhi 等^[10]基于爆破体标记技术,采用矿体形态定量识别方法,分析确定铁矿体最优采场结构参数。ZHAO Xingdong 等^[11]基于岩石质量分类和改进的稳定性图,提出考虑节理特征与围岩应力的采场结构参数设计方法。为适应复杂地质与工程条件。刘培正等^[12]以吴庄铁矿为工程背景,模拟研究发现采场暴露面积及其形状均会影响其稳定性,采用长条形顶板暴露面能提高稳定性。蔡春林^[13]采用数值模拟软件对软弱直接顶条件下的磷矿采场参数开展研究,通过评估顶板塑性、底板和矿柱位移量,确定最优采场跨度。段泽锋等^[14]模拟不同阶段高度与顶板厚度组合下的铅锌矿采场稳定性,得出最优顶板厚度为 7 m、阶段高度 40 m 的结论。付士根等^[15]模拟大理石矿采场结构参数,发现采场跨度 12 m、矿柱宽度 8 m 为最优方案,此时回采率可达 81%。DU Han 等^[16]在模拟不同采场结构参数陡斜矿体力学响应的基础上,构建了最大拉应力、压应力和垂直位移的回归模型,结合模拟退火算法实现多目标优化,最终获得兼顾安全和经济效益的最佳结构参数。综上,现有成果多聚焦于厚度较小的常规矿体,针对厚矿体赋存条件的采场跨度优化研究仍较薄弱。

鉴于此,笔者拟针对某铜矿-200 m 中段厚矿体分段采场开采中的围岩稳定问题,采用 Mathews 图解法分析采场稳定性,并估算跨度范围,据此拟定 4 种不同跨度的模拟方案,进而通过数值模拟分析各方案的稳定性差异,最终确定最优采场跨度,以兼顾采场稳定性和开采经济性,并为类似工程的采场跨度设计提供参考。

1 某铜矿概况

某铜矿矿体走向延伸 853 m,平均开采深度近千米,其中-200 m 中段开采深度达 1 200 m。矿体东翼平均厚度为 45 m,属厚矿体,西翼 20 m,倾角 55~85°,呈现走向较短、埋藏较深、储量丰富及水平厚度大等特征。该矿体主要赋存于某组第 2 岩性段中亚段,岩性为英安质沉凝灰岩及含砾沉凝灰岩的上部,其形态受地层及向斜构造严格控制,横断面呈鱼钩状,水平断面呈镰刀状;顶板主要为下亚段玄武熔岩层,底板为上亚段英安质沉凝灰岩和含砾沉凝灰岩。

该铜矿-200 m 中段存在 IV 级和 V 级节理裂隙,显著破坏岩体完整性,使其呈现块状、散体状和碎裂状结构特征,导致岩体整体强度降低。此外,在高地应力作用下,采场围岩易发生蠕变破坏,甚至出现岩石弹射、岩爆等现象。

2 基于 Mathews 法的采场稳定性研究及跨度估算

2.1 Mathews 法

Mathews 稳定性图解法是由 Mathews 等人于 1980 年首次提出的采场稳定性经验评估工具,因实用性强而被广泛应用于采场稳定性分析^[17]。该方法通过图表形式揭示岩体稳定性指数 N 与水力半径 S 之间的线性关系,Mathews 稳定性标准如图 1 所示,其工程分区意义如下:

- 1) 稳定区。无需支护或仅需局部支护,工作面可自然保持稳定。
- 2) 不稳定区。局部可能发生冒落,但整体工作面仍能维持平衡,通过调整工作面暴露面积或采用锚杆支护可减小破坏范围。
- 3) 崩落区。工作面暴露后立即发生破坏,直至采空区被垮落的矿石及围岩填满。

计算岩体稳定性指数 N 和水力半径 S ,对照 Mathews 稳定性标准,初步判断采场稳定性程度。

$$N = Q \times A \times B \times C \quad (1)$$

式中: Q 为修正的挪威地质研究所 (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) 岩体质量指数; A 为应力系数; B 为岩体缺陷方位修正系数; C 为设计采场暴露面方位修正系数。其中, Q 计算如下^[18]:

$$Q = RJ_r J_w / (J_n J_a S_f) \quad (2)$$

式中: R 为岩体质量指标; J_r 为节理粗糙度; J_w 为节

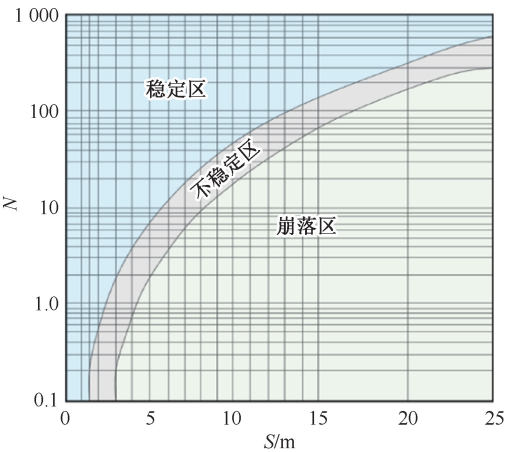


图 1 Mathews 稳定性标准

Fig.1 Mathews stability criteria

理裂隙水折减系数; J_n 为节理组数; J_a 为节理蚀变、充填及胶结程度; S_f 为应力折减系数。

$$A = \begin{cases} 0 & \sigma_c / \sigma_d \leq 2 \\ 0.1 \sigma_c / \sigma_d & 2 < \sigma_c / \sigma_d \leq 10 \\ 1 & \sigma_c / \sigma_d > 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_c 为完整岩石的单轴抗压强度,MPa; σ_d 为平行于暴露面方向的采矿诱导应力,MPa。

岩体缺陷方位修正系数 B 的确定主要取决于采场暴露面与主要节理组的倾角差。工程实践中,当主节理与暴露面夹角为 10、20、30、45、60° 时, B 值依次取 0.2、0.3、0.35、0.4、0.8。

采场暴露面方位修正系数 C 是判断重力对采场稳定性影响的重要参数,其取值规则为:水平暴露面时, $C = 1$; 当暴露面与水平面存在夹角 α 时, $C = 8 - 6\cos\alpha$ 。

采场暴露面形状系数(即水力半径) S 用于表征采场的尺寸和形状。暴露面由 2 个方向的跨度构成,可近似为长方形。

$$S = \frac{L \cdot L_1}{2 \cdot (L + L_1)} \quad (4)$$

式中: L 为采场跨度,m; L_1 为采场长度,m。

2.2 采场跨度 Mathews 法估算

结合矿区-200 m 中段岩体质量调查结果可知:该区域岩体节理裂隙以 IV 级和 V 级为主,参考系统围岩分类描述,确定 Q 值;依据岩石力学试验确定矿体 σ_c ,并结合暴露面附近岩石受力情况确定 A 值。在暴露面稳定性分析中,若主节理组方位有利于暴露面稳定,则分析最不利于稳定性的其他节理组,此时 B 的取值范围为 0.2~0.8。算例中顶板暴露面为水平方向,故 $C = 1$ 。最终计算可得岩体稳定

性指数 N 的取值范围为 7.2~11.4,结合图 1 估算采场暴露面形状系数 S 的取值范围为 5.2~7.8。

鉴于该铜矿-200 m 中段采用分段采场法,采场沿矿体走向布置,其长度通常为 65~75 m,采场长度固定设定为 70 m,代入式(4),计算得到采场跨度 L 的取值范围为 12~20 m。

3 采场跨度参数优化数值模拟

3.1 FLAC^{3D} 计算原理

FLAC^{3D} 软件的基本原理是采用混合离散方法、动态松弛方法和显式有限差分法 3 种技术,将连续介质动态演化过程转化为离散节点的运动方程和离散单元体的本构方程求解,广泛用于岩土及部分连续介质材料的力学计算。在模拟采矿活动时,FLAC^{3D} 通常采用摩尔—库仑准则和应变软化准则作为岩体破坏的判定准则,同时支持自行定义岩体破坏的强度准则,以增强其适用性^[19]。

FLAC^{3D} 的建模基本单元可采用四面体、楔形体、块体等多种几何形状。在求解三维模型时,软件根据各节点的应力、外力变化(或速度变化)和时间步长,利用虚功原理求解各节点的不平衡力和速度;随后依据单元体的本构方程,通过节点速度计算单元的应变增量、应力增量、位移增量及总应力,进而进入新的计算循环。在采矿工程模拟中,FLAC^{3D} 常用的本构模型为带拉伸截断的 Mohr-Coulomb 破坏准则,其规定压应力为负,各主应力满足:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (5)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力,MPa。

Mohr-Coulomb 破坏准则 f^s 的计算如下:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} \quad (6)$$

式中: ϕ 为内摩擦角,(°); c 为黏聚力,MPa; 当 $f^s > 0$ 时,单元的应力状态超过剪切屈服面,发生剪切破坏; 当 $\sigma_3 > \sigma'_t$ (σ'_t 为抗拉强度,MPa),单元的应力状态超过拉伸屈服面,发生拉伸破坏。

3.2 参数优化模型建立及参数确定

基于矿区勘探线地质剖面图及采矿方法图,采用 Rhino 软件构建某铜矿-200 m 中段模型,模型走向长度 172 m,阶段高度 50 m。从采场和矿柱到外边界按一定比例划分网格,其中采场跨度为 12 m,模型单元总数为 108 634,网格尺寸均小于 4 m,初始 Mohr-Coulomb 模型如图 2 所示。

跨度增大会增加应力集中程度,导致围岩塑性破坏范围显著扩大。

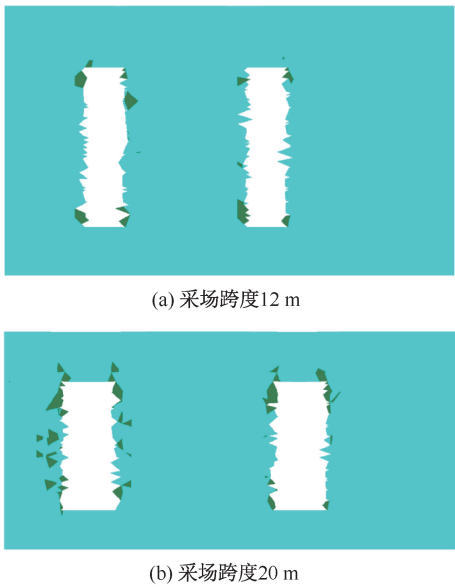


图 4 不同采场跨度的围岩塑性区
Fig. 4 Surrounding rock plastic zone with different stope spans

采用 Fish 函数统计不同采场跨度下的围岩塑性区体积及顶板最大垂直位移(图 5)。由图 5 可知:方案 1 顶板最大垂直位移约为 17.3 mm,方案 2 约为 18.2 mm,方案 3 约为 18.48 mm,方案 4 约为 19.71 mm。随采场跨度的增加,顶板垂直位移逐渐增大,其中,采场跨度为 12、15、18 m 时,顶板最大垂直位移随采场跨度的增加而缓慢增长,当采场跨度增至 20 m 时,位移出现大幅增长。对比不同采场跨度下的塑性区体积可知:方案 2 较方案 1 出现突增,方案 4 较方案 3 也出现突增,而方案 3 的塑性区体积略小于方案 2;结合方案 4 塑性区贯穿的情况,从围岩稳定性角度确定最优采场跨度为 18 m。

现场工程验证表明:−200 m 中段矿房宽度优化为 18 m 后,回采过程中围岩变形比优化前明显减小,塑性区破坏范围显著降低,保障采场围岩的稳定性,验证了图解法与数值模拟研究结论的可靠性。

4 采场跨度优化设计原则探讨

采场跨度对矿山的安全和高效生产有显著影响,如图 6 所示。采场跨度偏大可能导致围岩不稳定甚至坍塌,直接威胁开采安全。同时,大范围坍塌会导致废石与矿石的大量混杂,增加选矿成本。反之,采场跨度偏小可能导致掘进作业频繁、矿石回采率降低,既推高生产成本,又削弱经济效益。此外,

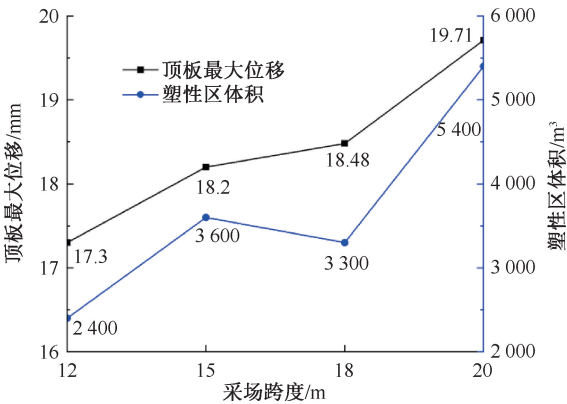


图 5 不同方案采场顶板最大垂直位移及围岩塑性区
Fig. 5 Maximum vertical displacement of roof and plastic zone of surrounding rock in different schemes

小跨度采场还会限制大型采矿设备的使用,进一步降低生产效率。

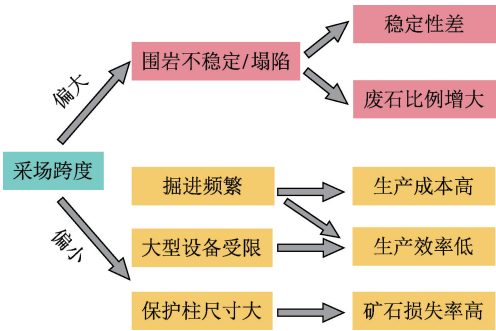


图 6 采场跨度对生产的影响
Fig. 6 Impact of stope span on production

采场跨度优化需以采矿安全性与经济性为核心目标。通常情况下,在满足安全要求的前提下,应尽可能增大采场跨度以提高经济效益。鉴于二者存在一定程度的矛盾性,应建立兼顾安全生产和经济效益的标准化设计方法,以确定最优采场参数^[21]。

采场跨度设计受多因素影响,可分为客观和主观 2 类。客观因素包括矿体尺寸与形态、生产地质条件、岩体质量、应力环境等;主观因素包括采矿方法、经济效益、施工组织状况等。采场跨度设计属于多因素优化问题,多因素的综合作用增加了设计难度,另一主要难点在于不同条件下各因素的相对重要性难以量化考量。例如:深部开采中,原岩应力是影响采矿安全的主要因素,设计时需重点关注;而在生态环境脆弱、环保要求较高的开采区域,设计则需侧重环境保护、节能减排等方面。因此,结合具体工程背景,考虑多因素影响的相对重要性,开展特定条件下的采场跨度研究十分必要。

5 结 论

- 1) 采用 Mathews 图解法分析某铜矿-200 m 中段厚矿体开采的采场跨度,结果表明:在采场开挖后围岩稳定的前提下,采场跨度取 12 ~ 20 m 较为合理。
- 2) 随采场跨度增大,顶板位移量逐渐增加,采

场失稳风险同步上升;围岩塑性区体积则呈现波动变化。综合多因素评估,确定该中段最优采场跨度为 18 m。

3) 采场跨度设计受矿体赋存条件、安全生产和经济效益等多因素影响,且不同工程条件下各因素的相对重要性存在显著差异,基于具体工程背景开展针对性的采场跨度研究具有重要的实践意义。

参 考 文 献

[1] 郭文兵,刘玄,杨伟强,等. 断层影响下采动覆岩与地表移动特征[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(12): 38-46.

GUO Wenbing, LIU Xuan, YANG Weiqiang, et al. Characteristics of mining overburden and surface movement under influence of faults[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 38-46.

[2] 聂培强,郑永升,姜千山,等. 金青顶矿区采场稳定性分析[J]. 黄金, 2025, 46(5): 28-32, 57.

NIE Peiqiang, ZHENG Yongsheng, JIANG Qianshan, et al. Stope stability analysis in the Jinqingding mining district[J]. Gold, 2025, 46(5): 28-32, 57.

[3] SWIFT G, REDDISH D. Stability problems associated with an abandoned ironstone mine[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(3): 227-239.

[4] 朱志岗,侯克鹏,孙华芬,等. 基于 3 种计算方法的采空区顶板稳定性综合分析[J]. 化工矿物与加工, 2020(5): 11-14, 17.

ZHU Zhigang, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Comprehensive analysis of roof stability in goaf based on three calculation methods[J]. Industrial Minerals & Processing, 2020(5): 11-14, 17.

[5] NOMIKOS P P, SOFIANOS A I, TSOUTRELIS C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(1): 79-94.

[6] 杨勇,张敏思,张飞,等. 红岭多金属矿复杂采空区稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14 982-14 987.

YANG Yong, ZHANG Minsi, ZHANG Fei, et al. Stability of complex lead mined-out area of an polymetallic mine in Hongling[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14 982-14 987.

[7] ZHANG Long, HU Jianhua, WANG Xueliang, et al. Optimization of stope structural parameters based on Mathews stability graph probability model[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): DOI: 10.1155/2018/1754328.

[8] 胡高建,杨天鸿,胡忠强,等. 基于 Mathews 稳定图等方法的多角度采空区群稳定性分析评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 348-354.

HU Gaojian, YANG Tianhong, HU Zhongqiang, et al. Mathews-stability-method-based multi-angle analysis and evaluation of mined-out zones stability[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 348-354.

[9] 王登华,彭府华,张智博,等. 基于微震监测多方法的采空区群稳定性分析[J]. 有色金属:矿山部分, 2023, 75(6): 37-45.

WANG Denghua, PENG Fuhua, ZHANG Zhibo, et al. Multi-method stability analysis on large-area goaf group based on micro-seismic monitoring[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2023, 75(6): 37-45.

[10] SUM Mingzhi, REN Fengyu, DING Hangxing. Optimization of stope structure parameters based on the mined orebody at the Meishan iron mine[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): DOI: 10.1155/2021/8052827.

[11] ZHAO Xingdong, ZHOU Xin. Design method and application of stope structure parameters in deep metal mines based on an improved stability graph[J]. Minerals, 2022, 13(1): DOI: 10.3390/min13010002.

[12] 刘培正,张传信,胡永泉,等. 厚大矿体分段空场嗣后充填采场结构参数优化研究[J]. 金属矿山, 2009(11): 10-13, 123.

LIU Peizheng, ZHANG Chuanxin, HU Yongquan, et al. Research on the optimization of structural parameters for heavy

ore-body by sublevel open-stope with subsequent filling[J]. Metal Mine, 2009(11): 10-13, 123.

[13] 蔡春林. 软弱直接顶磷矿采场结构参数优化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.
CAI Chunlin. Research on optimization of structural parameters of weak direct top phosphate mine stopes[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.

[14] 段泽锋, 黄德镛, 贾子月, 等. 某铅锌矿分段凿岩阶段采场法采场稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(1): 71-78.
DUAN Zefeng, HUANG Deyong, JIA Ziyue, et al. Study on stope stability in a lead-zinc mine mined by sublevel rock-cutting stage room method[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(1): 71-78.

[15] 付士根, 刘岩, 魏杰, 等. 大理石矿采场结构参数的模拟优化研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2020, 43(1): 108-112.
FU Shigen, LIU Yan, WEI Jie, et al. Research on simulation and optimization of structural parameters of marble mining stope[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2020, 43(1): 108-112.

[16] DU Han, LI Xuefeng, HUANG Xuxing, et al. Optimization of stope structural parameters for steeply dipping thick ore bodies: based on the simulated annealing algorithm[J]. Applied Sciences, 2024, 14(24): DOI: 10.3390/app142411597.

[17] 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.

[18] 杨学武. 昆钢马鞍山铁矿 2 号矿体中厚部分采矿方法优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
YANG Xuewu. Research on optimization of mining methods for the medium-thick part of No. 2 ore body of Kungang Maanshan iron mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[19] HEIDARZADEH S, SAEIDI A, ROULEAU A. Evaluation of the effect of geometrical parameters on stope probability of failure in the open stoping method using numerical modeling[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(3): 399-408.

[20] ZHOU Kunyou, DOU Linming, LI Xuwei, et al. Coal burst and mining-induced stress evolution in a deep isolated main entry area: a case study [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106289.

[21] 曹英莉. 基于 CRITIC 赋权法的采场结构参数优选模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(3): 5-9.
CAO Yingli. Simulation study on optimization of stope structure parameters based on CRITIC weighting method[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(3): 5-9.

作者简介：程朱哲（1989—），男，江苏宜兴人，工程师，主要从事矿山安全技术及安全管理等方面的工作。E-mail: 18311018168@163.com。

