崩落法出矿巷道眉线破坏尺度对放矿效果的影响*

赵江东，温彦良，张冰洁

（辽宁科技大学 矿业工程学院， 辽宁 鞍山市 114051）

摘要：为探究眉线破坏尺度对放矿效果的影响，基于随机介质放矿理论，采用物理相似试验方法，建立单分段端部放矿模型，从眉线破坏宽度和高度两个尺度开展眉线破坏下的放矿试验，通过达孔量法确定不同试验参数下放出体形态发育规律，并计算放矿损失贫化指标。结果表明：在相同截止品位放矿条件下，随着眉线破坏宽度的增加，回采进路方向放出体剖面宽度显著增加，而垂直回采进路方向的放出体剖面宽度无明显变化；眉线破坏宽度每增加0.5 m，正面废石占比平均增加1.2个百分点，顶部废石占比平均降低0.5个百分点，矿石回收率平均降低0.6个百分点；眉线破坏高度增加时，放出体的发育方向以垂直方向为主，放出体的形态更为瘦长；眉线破坏高度每增加0.5 m，正面废石占比平均降低0.2个百分点，顶部废石占比平均增加3.9个百分点，矿石回收率降低5.0个百分点；眉线破坏高度对于放矿效果的影响明显高于眉线破坏宽度。因此，在工程实际中，应优先采取措施避免和降低眉线在高度方向上发生破坏。

关键词：崩落法；眉线破坏尺度；放矿效果；放出体形态；废石放出量；矿石回收率

中图分类号：TD853.36 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)11-0046-06

Influences of Brow Line Damage Scale in Mining Roadway on Ore Drawing Effect Using Caving Mining Method

ZHAO Jiangdong, *WEN Yanliang*, *ZHANG Bingjie*

(School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: To investigate the influence of the brow line damage scale on the ore drawing effect, based on the random medium ore drawing theory, a single-segment end ore drawing model was established using the physical similarity test method. The ore drawing test under the brow line damage was carried out from the two scales of the brow line damage width and height. The development law of the draw-out body under different test parameters was determined by the hole-reach method, and the ore drawing loss and dilution index was calculated. The results show that under the same cut-off grade drawing conditions, with the increase of the brow line damage width, the profile width of the drawn body in the direction of the mining approach increases significantly, while the profile width of the drawn body in the direction perpendicular of the mining approach does not change significantly. For every 0.5 m increase in the brow line damage width, the proportion of front waste rock increases by an average of 1.2 percentage points, the proportion of top waste rock decreases by an average of 0.5 percentage points, and the ore recovery rate decreases by an average of 0.6 percentage points. When the brow line damage height increases, the development direction of the drawn body is mainly in the vertical direction, and the shape of the drawn body is more slender. For every 0.5 m increase in the brow line damage height, the proportion of front waste rock decreases by an average of 0.2 percentage points, the proportion of top waste rock increases by an average of 3.9 percentage points, and the ore recovery rate decreases by an average of 5.0 percentage points. The influence of the brow line damage height on the ore drawing effect is significantly higher than that of the brow line damage width. Therefore, in engineering practice, priority should be given to taking measures to avoid and reduce the damage of brow line in the height direction.

Key words: Caving mining method, Brow line damage scale, Ore drawing effect, Morphology of draw-out body, Amount of waste rock released, Ore recovery rate

0 引言

无底柱分段崩落法广泛应用于地下金属矿山。眉线作为崩落法作业中回采进路在每步距爆破后进路顶板所形成的边界线，受矿山自身地质条件及爆破作业影响，难免会遭受一定程度的破坏[1-3]。眉线破坏的实

* **收稿日期**：2024-11-11

基金项目：国家自然科学基金项目(51774176)

作者简介：赵江东(2001—)，男，四川达州人，硕士研究生，主要研究方向为崩落法采矿技术。E-mail：206967662@qq.com

通信作者：温彦良(1975—)，男，河北辛集人，硕士，副教授，主要研究方向为金属矿放矿理论与工艺。E-mail：Lnkdwyl@ustl.edu.cn

质是进路端部顶板在各种因素作用下发生的开裂、冒落等现象[4-5]。无论在何种岩体条件和作业环境下,眉线都会受到一定破坏[6-8]。作为采场结构的重要部分,眉线破坏对放矿效果有重要影响,不仅会改变放矿口尺寸[9],影响放出体的整体形态,还会使回采巷道形状发生改变,降低矿石流动性,进而影响放矿效果[10],严重时还会掩埋后排炮孔,增大装药作业难度等。

目前,针对眉线破坏对放矿效果的影响,众多学者进行了大量研究。何荣兴等[11]指出眉线沿节理面呈三角形破坏,使得顶板抬高,放出体形态发生改变,从而使贫化率增加。刘娜等[12]根据随机介质放矿理论提出,眉线破坏会增大放矿口尺寸,使得出矿口呈三角形抬高,造成流动带宽度减小,限制了放出体的横向发育。刘全阳[13]、任凤玉等[14]针对北洺河铁矿的实际生产情况,分析了不同形式的眉线破坏对出矿作业的影响,并提出多种眉线保护措施。黄正全[15]结合工程实际,将被破坏的不规则眉线调整为宽大矩形眉线口,有效降低了出矿前期废石混入率,提高矿石回收率。

以上研究均基于理论分析,得出了眉线破坏对放矿效果造成的影响,但未能阐明眉线破坏尺度对放矿效果的影响。因此,基于随机介质放矿理论,采用物理相似试验方法,建立了端部放矿模型,对不同眉线破坏尺度条件下的矿石流动与废石混入情况进行了研究。深入分析眉线破坏尺度对放矿效果的影响,有助于更加科学地进行放矿管理,降低矿石损失率及贫化率,最大限度提高矿石回收率,降低单位矿石开采成本,为提高采矿生产的经济效益与社会效益提供技术保障。

1 物理相似试验

1.1 物理试验模型构建

本试验采用端部放矿模型,物理相似比为 1∶50,参照北洺河铁矿结构参数,模型进路间距为 360 mm,分段高度为 300 mm,边孔角为 45°。为满足物理相似原理,覆盖岩层的厚度应为 1.5～2.0 倍的分段高度,本试验覆盖岩层厚度取 450 mm。为便于观察放矿过程,使用透明亚克力板制作模型,模型如图 1 所示(眉线破坏高度线见电子版颜色标识)。

试验中的矿石采用磁铁矿,覆盖废石采用白云岩,按照北洺河铁矿现场崩矿粒径级配调配的矿岩颗粒级配见表 1。为区分正面废石与顶部废石,使用红色颜料将适量白云岩染色风干,在记录放矿数据时,正面废石与顶部废石质量分开记录。

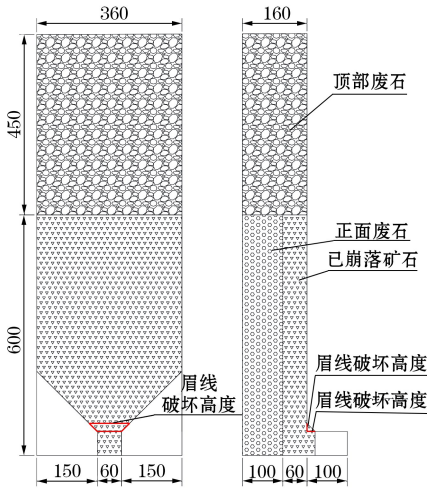


图 1 放矿试验模型(单位:mm)

Fig.1 Drawing test model (unit:mm)

表 1 颗粒级配组成

Table 1 Particle grading composition

散体类型	不同粒径颗粒占比/%				
	0～4 mm	4～8 mm	8～12 mm	12～16 mm	16～20 mm
矿石	50	30	15	5	0
废石	20	30	40	5	5

李明润等[16]通过对金川矿区西二采区进行现场观测,发现炮排爆破后眉线的破坏高度与宽度均为 1～2 m。何荣兴等[17]也提到,现场施工过程中眉线破坏情况严重,眉线崩落高度达 1.0～1.5 m。因此,眉线的破坏宽度与高度分别取 0 m、0.5 m、1 m、1.5 m、2 m 等 5 个变量开展试验。

1.2 试验过程

采用达孔量法测定放出体形态。选取一定数量的磁铁矿作为标志颗粒,根据标志颗粒信息,绘制垂直进路方向剖面与沿进路方向剖面的达孔量曲线。以原点距离为横坐标,标志颗粒的达孔量为纵坐标,将放出体剖面的达孔量数据绘制在坐标系中,按照不同高度分别以光滑曲线连结,形成达孔量曲线[18]。取特定达孔量值作横线,与各高度曲线的交点即为不同高度对应的放出体边界点的径向坐标。依据随机介质放矿理论中垂直进路方向放出体剖面方程和沿进路方向放出体剖面方程,结合不同剖面上各个高度达孔量,拟合出沿进路和垂直进路方向的放出体剖面形状。

在填装过程中,每隔 60 mm 高度布置一层标志颗粒,共布置 9 层,每一层的标志颗粒从放矿口正上方的原点出发,向 5 个方向以 20 mm 的间距进行发散,分别与端壁成 0°、45°、90°、135°、180°的夹角,每个方

向上布置 9 颗标志颗粒,标志颗粒的摆放如图 2 所示(颜色辨识见电子版)。

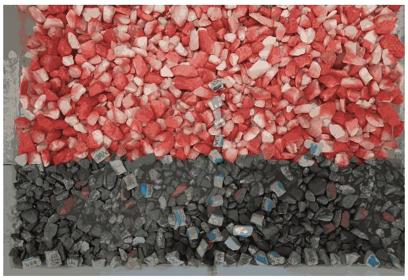


图 2 标志颗粒的摆放

Fig.2 Placement of marker particles

矿石与正面废石的装填高度达到 600 mm 后,开始装填顶部废石,直至装填高度达到 1 050 mm。在放矿过程中,需保证每次铲出的矿岩质量相同,记录当次放出的矿石、正面废石与顶部废石的质量,以及标志颗粒的位置信息。出矿截止品位为 70%,当矿石与废石的比例连续 3 次达到该截止品位时,即结束放矿。

2 眉线破坏尺度对放出体形态的影响

2.1 眉线破坏高度对放出体形态的影响

眉线破坏高度对放出体发育形态的影响如图 3 所示。由图 3 可知,在相同放矿截止条件下,沿进路方向,随着眉线破坏高度的增加,放出体剖面高度增加,而宽度略微减小。垂直进路方向,随眉线破坏高度增加,纵剖面放出体的宽度减小,高度增加。

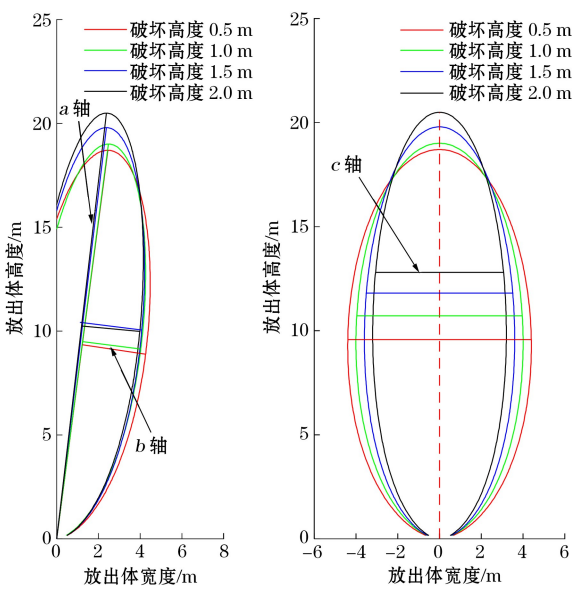


图 3 眉线破坏高度对放出体发育形态的影响

Fig.3 Effect of brow line damage height to the development morphology of the draw-out body

为了更好地量化放出体形态的变化情况,引用放矿理论基础中椭球体形态参数,对放出体形态进行对比分析。在图 3 中,眉线破坏高度每增加 0.5 m,a 轴长度随之增加,增加量约为 0.26 m;b 轴长度则呈现减小趋势,减小量约为 0.16 m;c 轴长度大幅度减小,平均减小量约为 0.77 m。

产生该现象的原因是:眉线破坏高度增加时,放矿口的高度增大,使得靠近端壁的散体流动系数增大,顶部废石与放矿口的距离变短,顶部废石可沿着被破坏的巷道顶板直接流入回采巷道,导致顶部废石被较早放出,正面废石放出量减少,放出体宽度降低,而放出体高度增加。

2.2 眉线破坏宽度对放出体形态的影响

眉线破坏宽度对放出体形态的影响如图 4 所示。在相同放矿截止条件下,随着眉线破坏宽度的增加,沿进路方向放出体宽度逐渐增加,而高度略微降低;对于垂直进路方向,随着眉线破坏宽度的增加,纵剖面放出体高度略微降低,而放出体宽度基本保持不变。

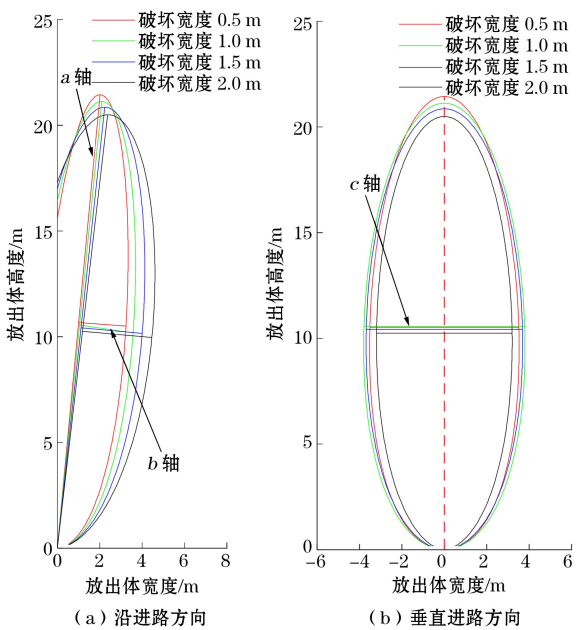


图 4 眉线破坏宽度对放出体发育形态的影响

Fig.4 Effect of brow line damage width to the development morphology of the draw-out body

随着眉线破坏宽度增加,放出体形态也随之改变,眉线破坏宽度每增加 0.5 m,a 轴长度略微减小,平均减少量约为 0.18 m;b 轴长度则明显增长,平均增加量约为 0.88 m;c 轴长度基本保持不变。

眉线破坏宽度增加会增长低处矿岩颗粒的流动

性，使其放出量增加。这一变化会导致放出体高度减小、宽度增加，促使放出体向水平方向发育，放出体剖面形态宽度增加、高度降低。

综上可知，随着眉线破坏宽度与破坏高度的增加，放出体形态均产生了不同程度的改变。眉线破坏高度主要影响了垂直进路方向放出体剖面形态，造成了放出体剖面高度增加、宽度降低，使得顶部废石放出量增加，矿石放出量减少；而眉线破坏宽度主要影响进路方向放出体剖面形态，造成了放出体剖面高度降低、宽度增加，使得正面废石放出量增加，顶部废石放出量减少，矿石放出量略微减少。

3　眉线破坏对放矿效果的影响

为探究不同眉线破坏尺度下，不同类型废石放出量的变化，分别计算各组试验放出矿岩颗粒中，正面废石与顶部废石的占比，对比分析不同眉线破坏高度与宽度下正面废石与顶部废石占比的变化趋势。

3.1　眉线破坏尺度对正面废石放出量的影响

眉线破坏尺度对正面废石占比的影响如图 5 所示。由图 5 可知，在相同放矿截止条件下，随着眉线破坏宽度的增加，正面废石占比大体呈现出增加的趋势。破坏宽度每增加 0.5 m，正面废石占比平均增加约 1.2 个百分点。这是因为眉线破坏宽度的增加，使得位置较低处的矿岩颗粒流动性增加，正面废石更容易流入出矿巷道，废石混入率中正面废石占比提升。

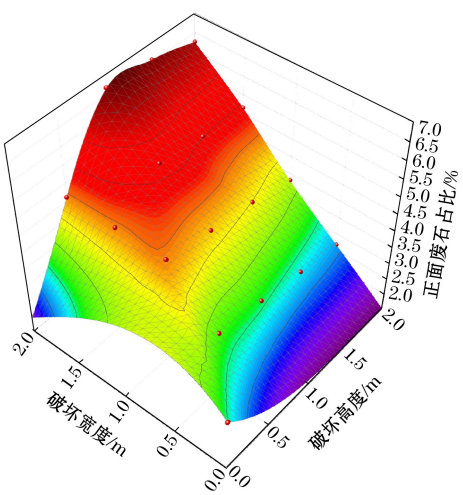


图 5　眉线破坏尺度对正面废石占比的影响

Fig.5　Effect of brow line damage scale on the proportion of front waste rock

随着眉线破坏高度的增加，废石混入率中正面废石占比呈现出略微下降的趋势，眉线破坏高度每增加 0.5 m，正面废石占比平均降低约 0.2 个百分点。随着眉线破坏高度增加，放出体形态变得细长，宽度减小而高度明显增加，导致顶部废石放出量增加较多，正面废石放出量减少。

3.2　眉线破坏尺度对顶部废石放出量的影响

在顶部废石混入之前，正面废石的放出是导致矿石贫化的主要原因，而顶部废石的大量放出，则是矿石贫化至截止品位的主要原因。顶部废石放出量的变化，对废石混入率与矿石回收率有着更为显著的影响。

眉线破坏尺度对顶部废石占比的影响如图 6 所示。由图 6 可知，在相同放矿截止条件下，随着眉线破坏高度增加，顶部废石占比也随之增加，眉线破坏高度每增加 0.5 m，顶部废石占比平均提高约 3.9 个百分点。这是因为眉线破坏高度的增加导致放矿口尺寸增大，流动带宽度减小，顶部废石被较早放出。同时，顶部废石可沿着被破坏的巷道顶板直接流入回采巷道，使得顶部废石占比呈现出明显的上升趋势。

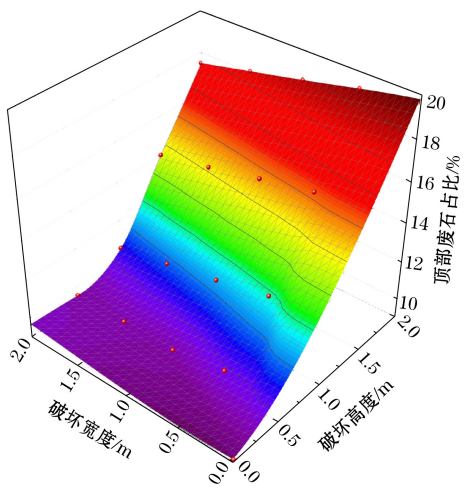


图 6　眉线破坏尺度对顶部废石占比的影响

Fig.6　Effect of brow line damage scale on the proportion of top waste rock

随着眉线破坏宽度的增加，顶部废石占比呈现下降的趋势，破坏宽度每增加 0.5 m，顶部废石占比平均减少约 0.5 个百分点。这是因为每次出矿量基本保持不变，较少的顶部废石放出量即可达到截止品位。

3.3　眉线破坏尺度对矿石回收率的影响

不同的眉线破坏尺度会在不同程度上改变正面废石与顶部废石的放出量，因此对矿石回收率也存在一定影响。眉线破坏尺度对矿石回收率的影响如图 7 所示，由图 7 可知，随着眉线破坏宽度的增加，

矿石回收率呈现较为平缓的降低趋势,眉线破坏宽度每增加 0.5 m,矿石回收率平均降低 0.6 个百分点。这是因为眉线破坏宽度的增加导致正面废石放出量增大,而正面废石占废石总量较少,不是贫化的主要原因。因此,矿石回收率下降较少。

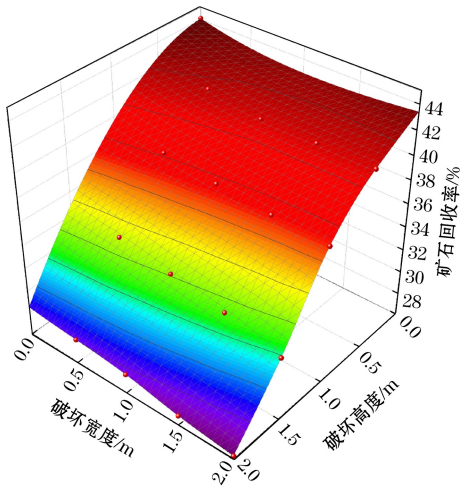


图 7 眉线破坏尺度对矿石回收率的影响

Fig.7 Effect of brow line damage scale on recovery ratio of ore

此外,眉线破坏高度增加会降低矿石回收率,且降低趋势更为明显。眉线破坏高度每增加 0.5 m,矿石回收率平均降低 5.0 个百分点。眉线破坏高度的增加会导致顶部废石放出量大幅增加,废石总量也会增加,放矿提前结束,导致矿石回收率下降较多。

因此,随着眉线整体破坏尺度增加,矿石回收率会呈现出更为显著的降低趋势。从无眉线破坏到眉线破坏高度与宽度皆为 2 m 时,矿石回收率减少了 17.8 个百分点,对放矿效果产生了显著影响。

物理相似模拟试验结果表明,眉线破坏会对放矿指标产生较大的影响。在相同的放矿截止条件下,眉线破坏会造成矿石回收率降低和废石混入率增加,且不同形式的眉线破坏对放矿指标的影响不同,眉线破坏高度对于放矿指标的影响效果明显大于眉线破坏宽度。

4 结论

(1) 在端部放矿过程中,眉线破坏宽度与高度的增加对放出体的形态产生了不同程度的影响。随着眉线破坏高度的增加,放出体的发育方向偏向垂直沿进路方向上,放出体剖面高度显著增加,宽度略微减小,垂直进路方向上,放出体剖面的宽度显著降低,放出体变得细长。随着眉线破坏宽度的增加,放出体的发育方向更偏向水平,沿进路方向上,放出体剖面高度稍微降低,宽度则明显增加,沿垂直进路方向,放出体剖面宽度基本不变。

(2) 眉线破坏尺度的变化对放矿指标也产生了显著的影响。眉线破坏宽度每增加 0.5 m,正面废石占比平均增加约 1.2 个百分点,顶部废石占比平均降低约 0.5 个百分点,矿石回收率平均降低约 0.6 个百分点;眉线破坏高度每增加 0.5 m,正面废石占比平均减低约 0.2 个百分点,顶部废石占比平均增加约 3.9 个百分点,矿石回收率平均降低 5.0 个百分点。

(3) 在相同放矿条件下,眉线破坏高度的增加对放矿效果的影响明显大于眉线破坏宽度。因此,在工程实际中,对眉线破坏采取控制措施时,应优先考虑降低眉线破坏高度,充分控制端壁在竖直方向上的破坏,以形成良好的放矿条件,降低矿石的损失与贫化。

参考文献(References):

[1] 孟航,刘文清.上向扇形中深孔爆破工艺优化[J].采矿技术,2019,19(6):155-156.
MENG Hang, LIU Wenqing. Optimization of the deep hole blasting technique in upward fan-shaped pattern mining technology[J]. Mining Technology,2019,19(6):155-156.

[2] 谷亚州,史秀志,霍晓锋,等.地下矿山上向中深孔爆破回采眉线保护技术研究[J].爆破,2022,39(4):62-70.
GU Yazhou, SHI Xiuzhi, HUO Xiaofeng, et al. Study on brow protection technology for upward medium-length hole blasting in underground mines[J]. Blasting, 2022, 39(4): 62-70.

[3] 吴爱祥,武力聪,刘晓辉,等.无底柱分段崩落法结构参数研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1845-1850.
WU Aixiang, WU Licong, LIU Xiaohui, et al. Study on structural parameters of sublevel caving [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(5):1845-1850.

[4] 马国虎,李明润,贾凯跃,等.破碎矿体下崩落法采场眉线破坏原因分析及保护措施[J].采矿技术,2024,24(1):45-49.
MA Guohu, LI Mingrun, JIA Kaiyue, et al. Analysis of causes of eyebrow line damage and protective measures in caving method mining of fragmented ore bodies[J]. Mining Technology,2024,24(1):45-49.

[5] 李宏业,龚臻,谭宝会,等.预装药技术在龙首矿西二采区崩落法采场的应用[J].矿业研究与开发,2022,42(7):14-18.
LI Hongye, GONG Zhen, TAN Baohui, et al. Application of pre-charge explosive technology in west No.2 mining area of Longshou Mine[J]. Mining Research and Development, 2022,42(7):14-18.

[6] 涂旭东,潘健,曲岩,等.四方金矿回采巷道眉线破坏控制技术措施[J].现代矿业,2018,34(9):194-196.
TU Xudong, PAN Jian, QU Yan, et al. Control technical measures of the destruction of mining roadway brow line in Sifang Gold Mine[J]. Modern Mining, 2018, 34(9): 194-196.

[7] 许敏捷,周宗红,高旭辉,等.长安金矿 1201-1205 采场中深孔落矿工艺及参数优化试验[J].现代矿业,2021,37(2):37-39+43.
XU Minjie, ZHOU Zonghong, GAO Xuhui, et al. Optimization test of medium deep hole caving parameters in 1201-1205 stope of Chang'an Gold Mine [J]. Modern Mining, 2021, 37(2): 37-39+43.

[8] 陆克勤,范子儀,杨阳,等.破碎矿体扇形深孔双点起爆位置优化研究[J].工程爆破,2024,30(4):58-66.
LU Keqin, FAN Ziyi, YANG Yang, et al. Research on optimization of dual-point detonation positions in fan-shaped deep holes in broken ore bodies[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(4): 58-66.

[9] 闫振雄,郭奇峰,陈继宏.无底柱分段崩落法放矿口尺寸优化途径探索[J].矿业研究与开发,2019,39(9):12-15.
YAN Zhenxiong, GUO Qifeng, CHEN Jihong. Insight into optimization of ore-drawing hole size for non-pillar sublevel caving method [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(9): 12-15.

[10] 陶发玉,李明润,范永亮,等.破碎矿体无底柱分段崩落法开采过早贫化原因分析及对策[J].采矿技术,2023,23(4):24-28.
TAO Fayu, LI Mingrun, FAN Yongliang, et al. Cause analysis and countermeasure of premature depletion of broken ore body by sublevel caving without bottom pillar [J]. Mining Technology, 2023, 23(4): 24-28.

[11] 何荣兴,任凤玉.无底柱分段崩落法爆破效果对矿石损失贫化的影响[J].矿业研究与开发,2012(6):17-19+100.
HE Rongxing, REN Fengyu. Influences of blasting effect on ore loss and dilution in nonpillar sublevel caving[J]. Mining Research and Development, 2012(6): 17-19+100.

[12] 刘娜,任凤玉,何荣兴,等.无底柱分段崩落法损失贫化细部控制方法研究[J].金属矿山,2016(11):10-15.
LIU Na, REN Fengyu, HE Rongxing, et al. Approach of ore loss and dilution control in sublevel caving method[J]. Metal Mine, 2016(11): 10-15.

[13] 刘全阳.北洺河铁矿眉线保护综合措施[J].现代矿业,2012(7):65-66+94.
LIU Quanyang. Comprehensive measures for eyebrow line protection at Beiminghe Iron Mine[J]. Modern Mining, 2012(7): 65-66+94.

[14] 任凤玉,何荣兴,THIERNO Amadou Mouctar Sow,等.北洺河铁矿改进装药结构实验研究[J].金属矿山,2011(2):9-12.
Ren Fengyu, He Rongxing, THIERNO Amadou Mouctar Sow, et al. Experimental research on improved explosive charge structure at Beiminghe Iron Mine[J]. Metal Mine, 2011(2): 9-12.

[15] 黄正全.无底柱分段崩落法采场出矿贫化控制的研究与实践[J].矿业研究与开发,2017,37(11):13-16.
HUANG Zhengquan. Research and application on dilution control of ore drawing from stope mined by non-pillar sublevel caving method [J]. Mining Research and Development, 2017, 37(11): 13-16.

[16] 李明润,贾凯跃,谭宝会,等.层状岩体巷道断面形状优选及支护方式研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):101-107.
LI Mingrun, JIA Kaiyue, TAN Baohui, et al. Study on the preferred section shape and support method for roadway in layered rock mass[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10): 101-107.

[17] 何荣兴,任凤玉.北洺河铁矿深部矿体采场结构参数优化[J].金属矿山,2012(6):16-18.
HE Rongxing, REN Fengyu. Stop structure parameters optimization of deep ore body in Beiminghe Iron Mine[J]. Metal Mine, 2012(6): 16-18.

[18] 杨宫印,陈玉明,王小勇.马鞍山 2# 矿体无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J].矿冶工程,2017,37(2):24-27.
YANG Gongyin, CHEN Yuming, WANG Xiaoyong. Structure parameters optimization for non-pillar sublevel caving in Maanshan 2# ore body[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(2): 24-27.