露天转地下开采边坡境界矿柱破坏演化特征及稳定性研究*

李胜[1,2],陈彦亭[3],张成龙[1],张杰[4],李万涛[1],马强英[5],路增祥[5],李角群[5]

(1.河北钢铁集团矿业有限公司, 河北 唐山市 063009;
2.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
3.河北钢铁集团矿山设计有限公司, 河北 唐山市 063009;
4.中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
5.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051)

摘要:针对司家营铁矿不具备平面扩界条件,露天转地下开采后需留设边坡境界矿柱的情况,采用重度增加法研究了该矿露天转地下开采后边坡境界矿柱的稳定性问题,得出不同重力加速度下边坡境界矿柱的应力场、位移场及塑性区的演化特征与规律。结果表明:在初始重力加速度为1.0g的条件下,留设40 m厚的边坡境界矿柱能够保证地下开采安全,避免露天边坡产生垮塌、冒落、滑坡等失稳现象;随着重力加速度的增加,边坡境界矿柱的渐进失稳破坏可划分为稳定、轻微变形、严重变形和失稳破坏4个阶段。边坡境界矿柱受地下开采卸荷的影响,最大主应力基本在30 MPa以内,最小主应力及其分布范围增幅较大,拉应力达到3 MPa以上,易产生张拉破坏;边坡境界矿柱的位移场及塑性区扩展特征与拉应力呈现高度一致性,由露天坑西侧边坡的坡脚向坡顶扩展。研究结果对矿山露天转地下开采后防控边坡失稳具有一定的指导作用。

关键词:露天转地下开采;边坡境界矿柱;重度增加法;应力场;位移场;塑性区;失稳破坏

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)05-0110-10

Study on Failure Evolution Characteristics and Stability of Slope Boundary Pillar in Transition from Open-Pit to Underground Mining

Li Sheng[1,2], *Chen Yanting*[3], *Zhang Chenglong*[1], *Zhang Jie*[4],
Li Wantao[1], *Ma Qiangying*[5], *Lu Zengxiang*[5], *Li Jiaoqun*[5]

(1.Hebei Iron and Steel Group Mining Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063009, China;
2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
3.Hebei Iron and Steel Group Mining Design Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063009, China;
4.China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
5.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: In view of the fact that Sijiaying Iron Mine does not have the condition of plane boundary expansion, it is necessary to set up the slope boundary pillar after the transition from open-pit to underground mining. The gravity increase method was adopted to study the stability of the slope boundary pillar after the transition from open-pit to underground mining. The evolution characteristics and laws of the stress field, displacement field and plastic zone of the slope boundary pillar under different gravity accelerations were obtained. The results show that under the condition of initial gravity acceleration of 1.0g, the 40 m thick slope boundary pillar can ensure the safety of underground mining and avoid instability of open-pit slope, such as collapse, caving and landslide. With the increase of gravity acceleration, the progressive instability failure of the slope boundary pillar can be divided into four stages: stable, slight deformation, serious deformation and instability failure. Slope boundary pillar is affected by the unloading of underground mining. The maximum principal stress is basically within 30 MPa, and the

* **收稿日期**:2025-06-06
基金项目:河钢集团重点科技项目(HG2023215)
作者简介:李胜(1983—),男,河北唐山人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿床开采方面的技术研究工作。E-mail:15133447870@139.com
通信作者:路增祥(1965—),男,陕西富平人,博士,教授,主要从事金属矿床地下开采方面的教学与研究。E-mail:zengxiang_lu@sohu.com

minimum principal stress and its distribution range increase greatly. The tensile stress value reaches more than 3 MPa, which is prone to tensile failure. The displacement field and plastic zone expansion characteristics of the slope boundary pillar are highly consistent with the tensile stress, expanding from the slope toe to the slope top on the west slope of the open pit. The research results have a certain guiding role in preventing and controlling slope instability after the transition from open-pit to underground mining.

Key words: Transition from open-pit to underground mining, Slope boundary pillar, Gravity increase method, Stress field, Displacement field, Plastic zone, Instability failure

0 引言

金属矿露天转地下开采工艺中,为实现露天和地下两个开采系统在空间上的"隔离",根据地下采矿方法的不同,会形成不同形式的"隔离层",以确保地下开采的安全[1-2]。当地下采矿方法具有空场法特征时,通常采取留设一定厚度露天境界矿柱的方式,实现地下开采系统与露天开采系统的"隔离"[2]。随着"绿色矿山"理念的提出,空场嗣后充填采矿法在推进金属矿产资源开发向环保、安全和高效方向发展起到了至关重要的作用[3-5]。因此,在露天转地下开采过程中,露天境界矿柱的留设厚度及其稳定性研究引起了学者们的广泛关注[6-7]。

近年来,针对露天转地下开采过程中的关键技术问题,学者们进行了系统研究并取得了重要进展。在露天境界矿柱留设厚度研究方面,通常采用理论计算、工程类比法和数值模拟计算方法对矿柱厚度进行优化。刘泽洲等[8]针对某铁矿露天转地下开采的坑底境界矿柱留设厚度确定问题,在理论分析的基础上,采用数值模拟方法,研究了地下开采过程中境界矿柱的位移与应力变化特征,发现坑底境界矿柱厚度为 40 m 时能够满足该矿的安全生产要求。梁源贵等[9]为满足某金矿露天转地下开采安全生产的要求,采用多种方法研究确定了该矿地下开采对露天边坡影响最小的境界顶柱厚度。通过新桥硫铁矿露天转地下开采境界矿柱的安全厚度优化研究可以看出,数值模拟方法已成为研究此类问题的主要手段之一[6]。当露天与地下采用联合开采或地下开采实现空场采矿法向充填采矿法过渡时,通常需留设一定厚度的隔离层。李钢等[10]以某铜矿为例,在该矿露天转地下联合开采时隔离层厚度优化研究中,主要采用数值模拟方法分析地下开采对隔离层位移场和应力场的影响,得出了隔离层厚度为 57 m 时能够满足规范要求。王文军等[11]基于采空区下方隔离矿柱的承载机制,确定了某铅锌矿预留隔离矿柱的安全厚度为 25 m。于世波等[12]基于多重因素制约下的理论解析和数值模拟研究,得出甲玛矿地下采场的境界顶柱厚度不宜小于 32 m 的结论。某大型矿山露天转地下房柱采矿法开采时,采用 MatDEM 离散元软件研究了地下开采扰动对覆岩与露天边坡的位移与应力等的影响,得到了能够指导工程实践的有益结论[13]。张亚宾等[14]、姜安民等[15]研究了露天转地下开采过程中引起的露天边坡垮塌问题,为露天转地下开采工程实践提供了重要的理论依据和技术参考。

露天坑境界矿柱的留设关系到露天转地下开采时矿山能否实现安全生产[16],目前对露天境界矿柱的相关研究,主要聚焦于露天坑底境界矿柱的留设厚度及其稳定性研究[17-18],但有关边坡境界矿柱方面的研究却鲜见报道。由于某些特殊环境的约束(如地表地形条件),露天坑的平面境界不能继续扩大时,露天转地下开采需留设一定厚度的边坡境界矿柱,维持露天边坡在地下开采期间不发生较大的变形与破坏,以保护临近露天坑边坡的各种设施的安全。如河北钢铁集团矿业有限公司司家营铁矿露天坑东侧有滦河流经,西侧有平青乐公路通过,不具备露天开采的平面扩界条件,需转入地下开采。转入地下开采后,地下开采导致露天边坡垮塌和地表沉降变形破坏等问题,对平青乐公路及滦河造成影响[19]。因此,司家营铁矿露天转地下开采不仅需留设一定厚度的坑底境界矿柱,还需留设一定厚度的边坡境界矿柱,既要实现地下开采系统与露天开采系统的有效"隔离",又要确保地下开采期间露天边坡不发生垮塌、滑坡等,以确保地下开采安全和地表建、构筑物不受影响。本文基于司家营铁矿露天转地下开采需留设边坡境界矿柱这一现实,拟采用重度增加法[20-22],研究不同重力加速度下边坡境界矿柱的应力场、位移场和塑性区演化特征,以期为边坡境界矿柱的留设与后期矿山生产提供参考。

1 数值分析模型构建及模拟方案

1.1 工程背景

司家营铁矿经过十几年的露天开采,截至 2024 年 3 月,已形成了南北(矿床走向)长近 2 980 m、东西(倾向)宽约 1 600 m 的露天采坑,露天采场的最低标高已达-262 m。由于矿区不具备露天开采的平面扩界条件,需在露天开采至-487 m 标高时转入地下开采,回采其深部资源。矿区工程地质条件总体为中等类型,矿区本身为一单斜构造,仅 N21 线附近的Ⅲ号矿体有较大的向斜构造[19]。这种构造特征使得矿体的形态和应力分布较为复杂,开采难度进一步增加;向斜构造可能导致局部应力集中,进而影响边坡境界矿柱的稳定性,为地下开采时的工程支护和稳定性控制带来了挑战。

地质构造应力、断层、地下水虽对矿区影响较小,但矿区存在一些小型断层和节理裂隙,这些地质缺陷可能会成为潜在的薄弱面,降低矿柱的承载能力,在地下开采过程中容易引发矿柱的局部破坏和失稳。根据司家营铁矿露天转地下开采可行性研究初步方案和前期研究成果,露天坑边坡境界矿柱的留设厚度为 40 m,坑底境界矿柱厚度为 45 m。地下采矿采用空场嗣后充填采矿法,以盘区为回采单元,盘区垂直矿体走向布置,长 120 m,高 60 m,宽度为矿体厚度,盘区间柱宽 20 m。盘区内矿块宽 20 m,长 50 m,阶段高 60 m。一步骤回采矿房按“隔一采一”、二步骤回采矿房按“隔三采一”的顺序进行回采。

1.2 数值模型构建与模拟方案

1.2.1 数值模型构建

根据司家营铁矿露天开采现状和地下矿体模型,以及露天转地下开采可行性研究初步方案,采用 Rhino 和 FLAC3D 软件联合建模,构建露天转地下开采模型,主要包括露天采坑、矿体、露天开采境界矿柱(边坡境界矿柱和坑底境界矿柱)、地下采场、充填体等。

大规模采矿活动通常导致更广的采动影响范围,模型边界取至采动影响范围以外的位置,一般取 3~5 倍的开挖半径范围。边界条件的设置充分考虑矿山的实际工程地质条件和开采环境,模型的边界范围确定为矿体倾向方向(X 方向)长 3 153 m,矿体走向方向(Y 方向)宽 5 100 m,重力方向(Z 方向)为-1 250 m 至地表。模型在 X 和 Y 方向上限制其水平位移,以模拟矿山周边岩体对采场侧向的约束作用,能够对采场产生一定的侧向支承力,防止采场在侧向发生过大的变形和位移;模型底面边界施加竖直方向的位移约束,模拟深厚岩基对采场底部的支撑作用;模型顶面边界则采用自由边界条件,可以允许顶面节点在各个方向上的自由位移,从而更好地模拟地表的变形特征。对露天采坑、边坡境界矿柱、地下采场等关键部分进行网格划分,网格尺寸约为 1 m×1 m×1 m,以准确捕捉局部应力集中和变形较大的区域;对于远离关键区域的岩体部分,适当增大网格尺寸,以减少计算规模和提高计算效率,网格尺寸逐渐过渡到 5 m×5 m×5 m 左右。模型共划分为 1 596 496 个单元网格,1 758 874 个节点,建立的司家营铁矿露天转地下开采境界矿柱模型如图 1 所示。

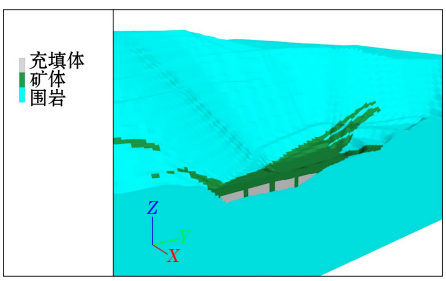


图 1 司家营铁矿露天转地下开采境界矿柱模型

Fig.1 Boundary pillar model of transition from open-pit to underground mining in Sijiaying Iron Mine

1.2.2 数值模拟方案

重度增加法通过不断增加重力加速度来模拟边坡境界矿柱所受荷载的逐渐增大,直至矿柱达到失稳状态,以此精准分析矿柱的稳定性及破坏特征,其与强度折减法的原理相反,更适用于研究因荷载增加导致的境界矿柱失稳问题。在类似研究中,不仅有通过重度增加法研究边坡在不同荷载下的失稳过程的案例[22],还有应用该方法揭示单层和多层水平采空区群在重力增加过程中的失稳规律的研究[23]。

司家营铁矿露天转地下开采后,边坡、矿柱和其他结构受到多种荷载的作用,包括静荷载(如岩石自身质量)和动荷载(如爆破振动、设备振动等)。重度增加法可以模拟不同重力加速度下的荷载变化,系统考虑各种荷载因素对边坡境界矿柱稳定性的影响,以便清晰地揭示边坡境界矿柱从稳定到失稳的渐进破坏过程,捕捉矿柱在不同阶段的应力、位移和塑性区演化特征。此外,重度增加法具有较好的收敛性,能够保证模拟结果的准确性和可靠性。

通过模拟试算,最终确定了重力加速度分别为 $1.0g$、$1.1g$、$1.2g$、$1.5g$、$1.8g$ 和 $2.0g$,其中,$g=9.806\ 65\ m/s^2$,选取的重力加速度范围能够涵盖岩体模型从稳定到失稳的渐进破坏全过程。

1.2.3 参数确定

模拟计算时,室内试验确定的岩石物理力学参数不能直接用于岩体工程数值模拟计算,通常需折减。依据矿区可行性研究报告,考虑到矿体赋存条件与开采环境等因素,采用基于 GSI 指标的 Hoek-Brow 经验强度折减方法计算数值模拟所用的岩体力学参数,结果见表 1。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

岩层类型	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
围岩	62	2.1	6.0	34.4	23 500	0.25
矿体	56	2.0	6.4	46.6	35 400	0.24

2 露天边坡境界矿柱的破坏特征

2.1 边坡境界矿柱的应力场演化特征

特定的工程地质条件下,露天坑边坡在不受采动影响时,边坡应力场主要受岩体自重、构造应力、地下水的作用以及边坡的几何形态等因素控制。转入地下开采后,地下开采的扰动[24],尤其是临近边坡矿柱的采矿行为,成为打破原始应力平衡状态并引起边坡失稳的最重要因素,且不同位置的围岩应力分布对边坡稳定性产生不同程度的影响[25-26]。因此,研究不同重力加速度下边坡境界矿柱的应力场演化特征,对于厘清边坡境界矿柱的失稳机理和制订有效的防范措施具有重要作用。

2.1.1 最大主应力随重力加速度变化特征

通过模拟计算,获得了不同重力加速度下边坡境界矿柱的最大主应力分布云图,如图 2 所示。

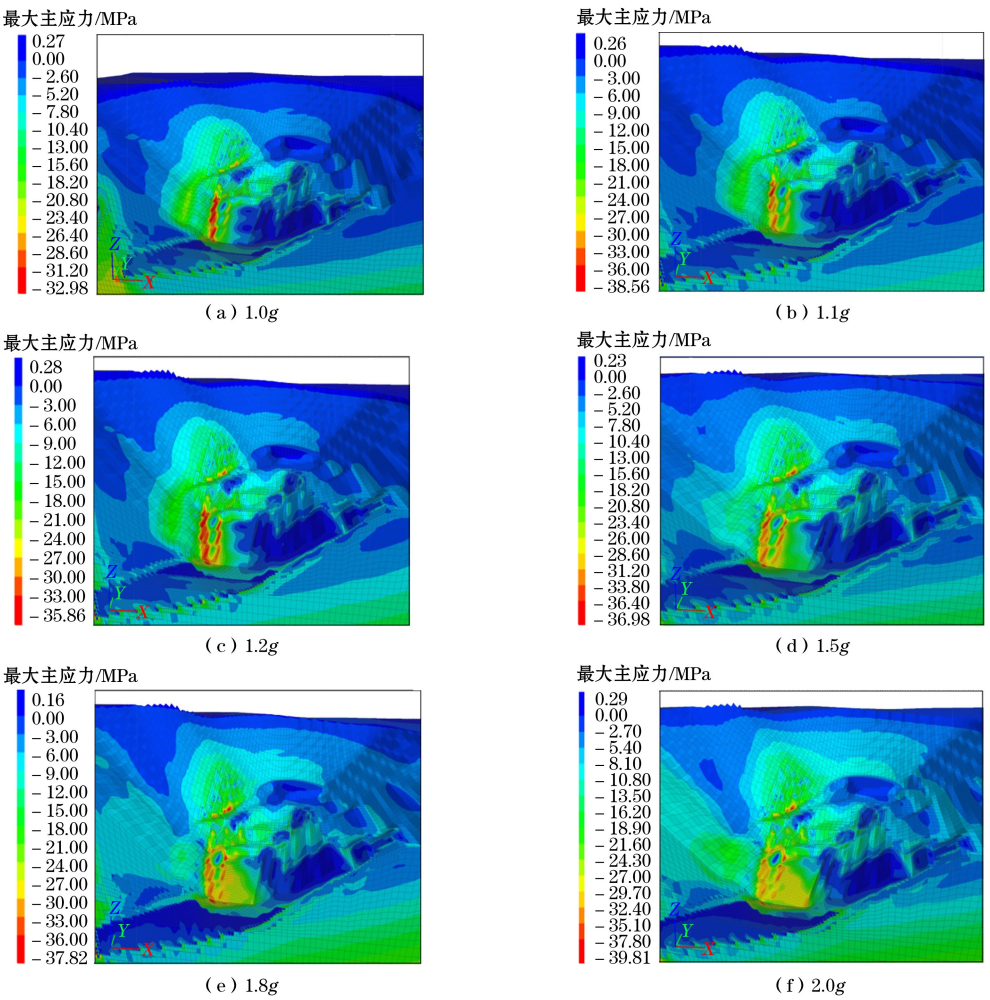


图 2 不同重力加速度下边坡境界矿柱的最大主应力分布云图

Fig.2 Maximum principal stress distribution cloud diagrams of slope boundary pillar under different gravity accelerations

由图 2 可知,随着重力加速度的增加,边坡境界矿柱的最大主应力呈波动式变化,且其峰值始终维持在 30 MPa 以下。应力集中区域主要分布在边坡境界矿柱的坡脚和下表面位置,尤其是在坡脚位置,应力集中现象尤为显著,这表明坡脚区域在承受荷载时具有更高的力学响应敏感性。

地下开采过程中,随着重力加速度的增加,应力分布范围呈现出明显的扩展趋势。图 2(d)中露天坑处于严重变形阶段,应力集中区域主要向北侧坡脚部位扩展;图 2(f)中露天坑处于破坏阶段,应力分布范围进一步扩大,主要向西侧边坡面及顶部区域发展。研究表明,边坡境界矿柱的应力主要集中在下表面区域,当应力水平超过岩体抗拉强度阈值时,应力集中区域的力学平衡状态被打破,导致临近边坡位置的采区顶板覆岩先发生破坏,并逐渐引发更大范围的破坏,最终造成露天坑边坡的整体失稳。这一应力演化特征揭示了重力加速度变化对边坡稳定性的影响机制。

2.1.2 最小主应力随重力加速度变化特征

不同重力加速度下边坡境界矿柱的最小主应力分布云图如图 3 所示。

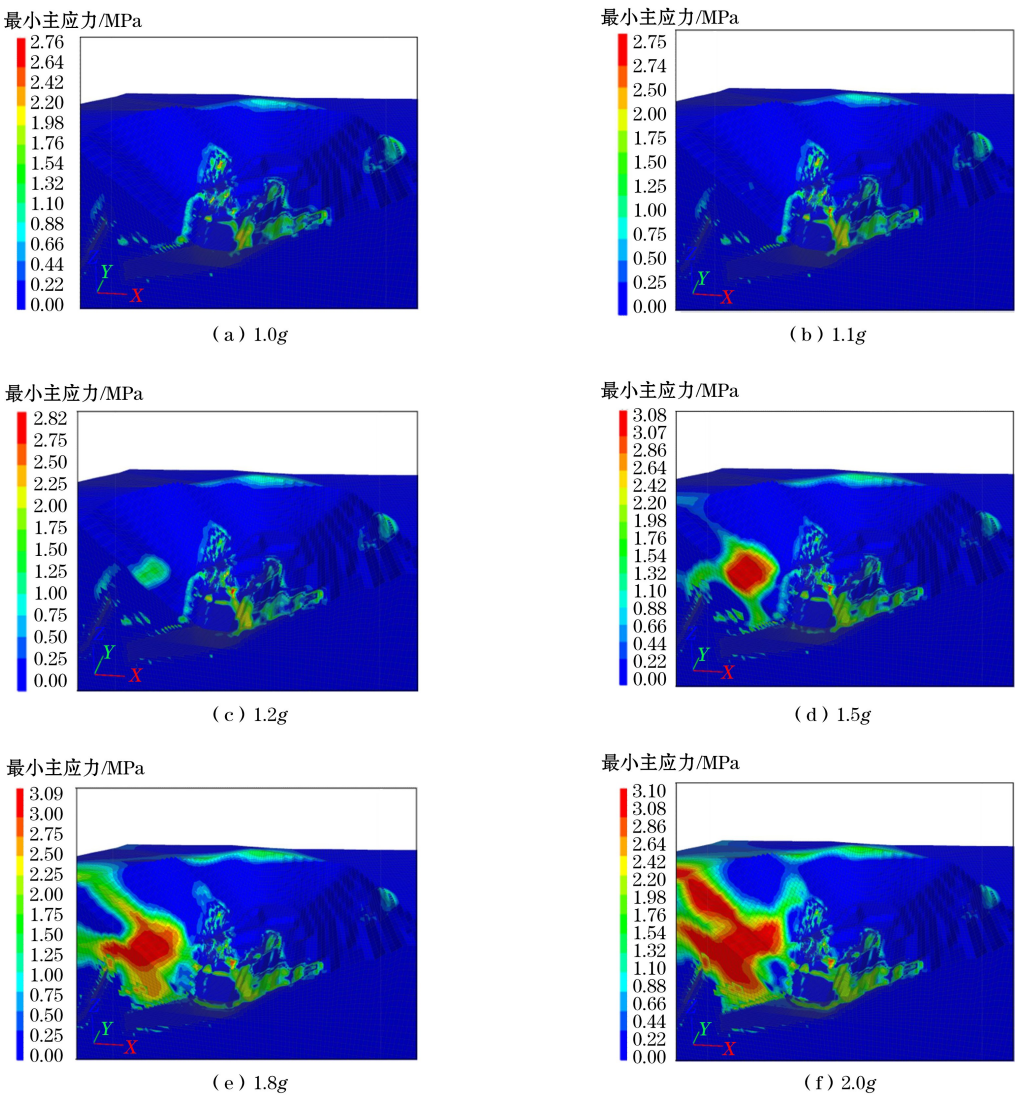


图 3 不同重力加速度下边坡境界矿柱的最小主应力分布云图

Fig.3 Minimum principal stress distribution cloud diagrams of slope boundary pillar under different gravity accelerations

由图 3 可知,在初始状态(重力加速度 1.0g)下,边坡境界矿柱的坡底和东侧边坡区域最先出现初始拉应力,但其应力值仅为 2 MPa,尚未达到岩体抗拉强度阈值,此时边坡境界矿柱整体处于稳定状态,表明在常规静态荷载条件下,边坡境界矿柱具有一定的稳定性,能够承受自身的重力及外部荷载的作用。随着重力加速度逐渐增加至 1.5g 时,拉应力分布范围开始呈扩展趋势,其范围向露天坑西侧边

坡(即上盘围岩)延伸,但应力集中区域仍局限于坡面中部的较小范围内,此时拉应力值达到了 3.07 MPa,已超出岩体抗拉强度,在中等强度的动态荷载作用下,边坡境界矿柱开始出现局部失稳破坏现象。当重力加速度进一步增加至 2.0g 时,露天坑西侧边坡的拉应力分布范围呈现显著扩展特征,其扩展方向主要向南侧和坡顶发展。此时拉应力峰值达到 3.09 MPa,且其影响范围已扩展至西侧边坡坡顶区域,导致边坡境界矿柱发生垮冒失稳破坏。这一破坏区域位于矿区 N20 至 N26 号勘探线范围内,具有明确的空间分布特征。在整个演化过程中,露天坑东侧边坡的拉应力分布范围并未发生显著变化,表明地下开采活动对东侧边坡的稳定性影响较小。

2.2 边坡境界矿柱的位移变化特征

不同重力加速度下边坡境界矿柱的位移分布云图如图 4 所示。

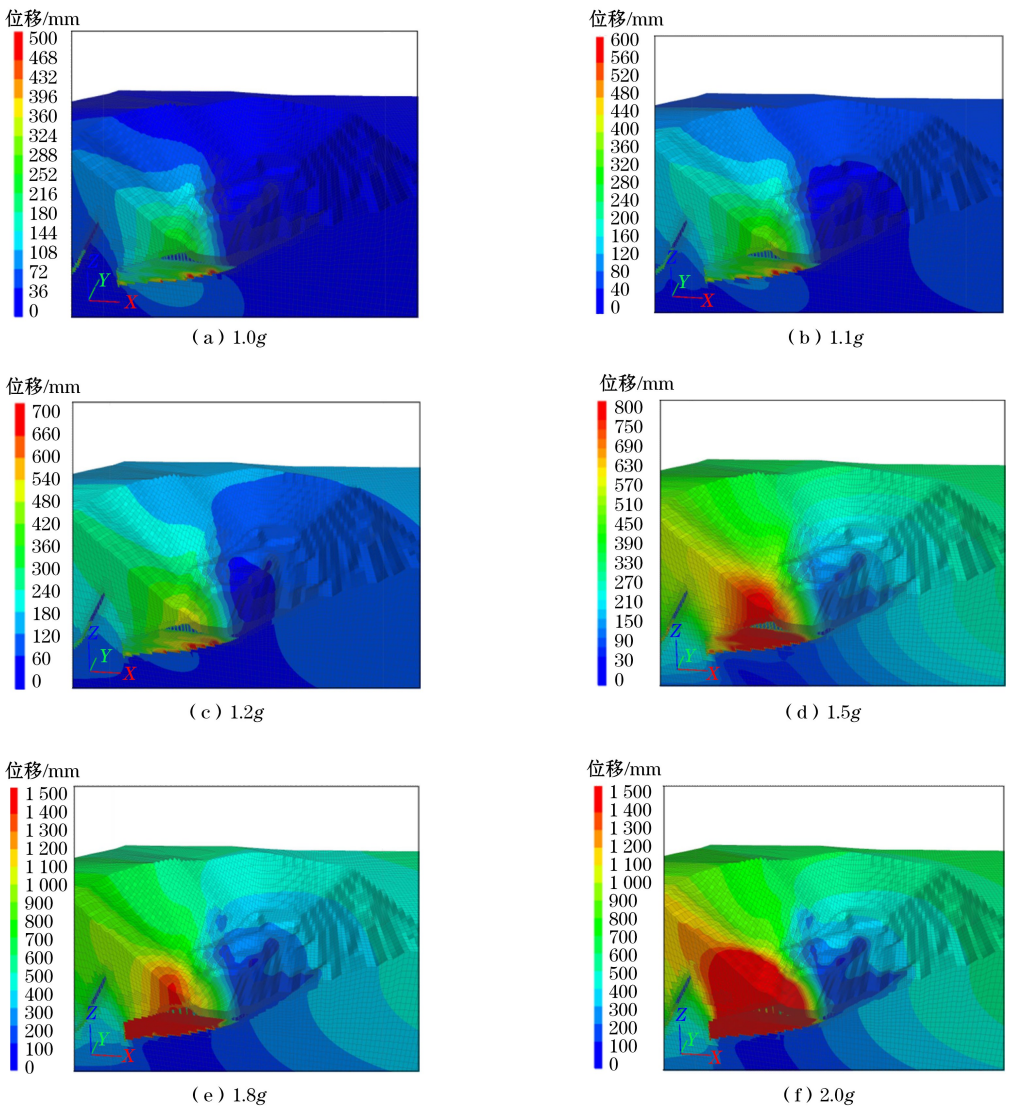


图 4 不同重力加速度下边坡境界矿柱的位移分布云图

Fig.4 Displacement distribution cloud diagrams of slope boundary pillar under different gravity accelerations

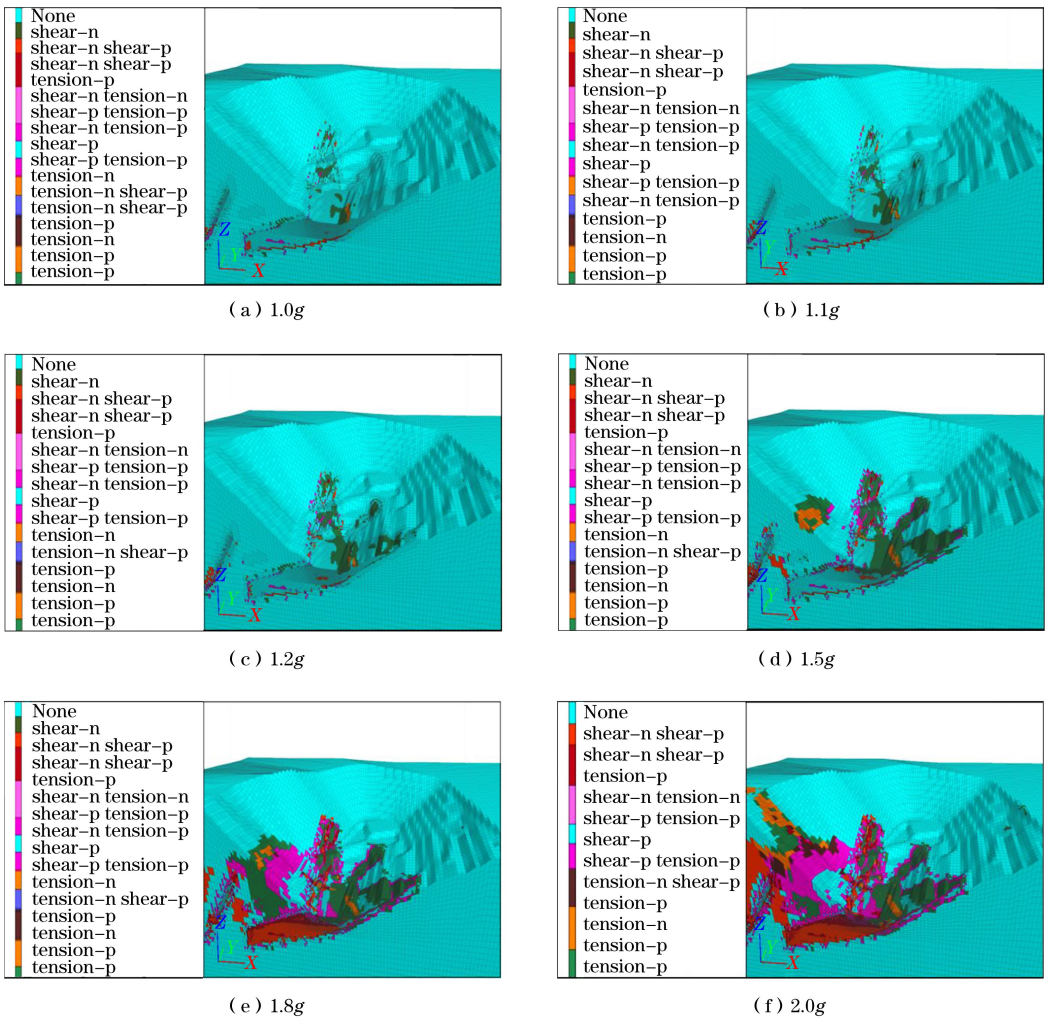
由图 4 可知,边坡境界矿柱的最大位移发生在露天坑的西侧边坡(即上盘围岩)。在初始重力加速度为 1.0g 时,边坡境界矿柱的最大位移在 180~216 mm 范围内,主要发生在采场下盘围岩区域。此时边坡境界矿柱整体处于稳定阶段,未表现出明显的失稳迹象。

随着重力加速度逐渐增加至 1.5g,边坡境界矿柱的最大位移增大至 800 mm,位移主要集中在充填采场及边坡坡脚位置,位移的显著增加表明边坡境界矿柱开始出现明显的变形,并伴随局部失稳现象发生。当重力加速度逐渐增加至 1.8g~2.0g 时,边坡境界矿柱的最大位移超过了 1.5 m,主要集中在

露天坑西侧边坡的特定区域,即矿区 N20 至 N26 号勘探线范围内。此时,边坡境界矿柱处于失稳破坏阶段,出现严重的垮落和滑移现象。研究发现,重力加速度的变化对边坡境界矿柱的位移演化具有显著影响,且位移分布特征与拉应力演化规律之间存在密切的关联性。随着重力加速度的增加,边坡境界矿柱的稳定状态呈现出从稳定到局部失稳,直至整体破坏的演化过程。

2.3 边坡境界矿柱的塑性区扩展规律

为进一步厘清边坡境界矿柱的变形破坏特征,通过数值模拟,得到了不同重力加速度下边坡境界矿柱的塑性区分布云图,如图 5 所示。



(a) 1.0g (b) 1.1g

(c) 1.2g (d) 1.5g

(e) 1.8g (f) 2.0g

图 5 不同重力加速度下边坡境界矿柱的塑性区分布云图

Fig.5 Plastic zone distribution cloud diagrams of slope boundary pillar under different gravity accelerations

由图 5 可知,在初始重力加速度为 1.0g 时,边坡境界矿柱的塑性区分布范围较小,主要集中在露天坑北侧边坡的坡面及坡脚位置,剪切塑性区的分布较为局限,此时边坡境界矿柱整体处于稳定状态。当重力加速度逐渐增加至 1.2g 时,塑性区的分布位置基本保持不变,但其扩展范围出现一定程度的增大,边坡境界矿柱尚未出现显著的塑性区扩展特征,矿柱处于轻微变形状态。随着重力加速度进一步增加至 1.5g,边坡境界矿柱的塑性区分布呈现出显著的扩展特征。此时,露天坑的东侧和西侧边坡均开始出现大量塑性区,其中东侧边坡出现较多张拉塑性区,而矿柱上表面和下表面的张拉塑性区在局部位置开始连通,表明矿柱已进入严重变形阶段。当重力加速度增加至 2.0g 时,边坡境界矿柱的塑性区扩展至最大范围。露天坑西侧边坡(即上盘围岩)的塑性区发生连通并延伸至坡顶位置,同时矿柱的塑性区完全连通,表明边坡境界矿柱已进入失稳破坏阶段。重力加速度的增加显著影响边坡境界矿柱的塑性区扩展规律,塑性区从局部到整体的连通过程反映了边坡失稳破坏的力学演化机制。

3 边坡境界矿柱稳定性演变规律

边坡境界矿柱失稳模式主要涉及多矿柱系统在矿山开采过程中由于荷载传递和应力重分布导致的连锁性失稳破坏[27]。基于本文第2节的分析可以发现,司家营铁矿露天边坡境界矿柱失稳破坏多为渐进式"挤压-弯垮"的失稳模式,随着边坡矿柱围岩应力状态的改变,坡脚位置发生挤压,坡面位置的境界矿柱下表面在弯矩作用下发生垮塌,当坡面与坡脚的破坏范围连通后,边坡境界矿柱则出现整体失稳破坏。

基于司家营铁矿边坡境界矿柱稳定性分析,结合力学响应特征,可将边坡境界矿柱随重力加速度增加而发生的渐进破坏过程划分为稳定、轻微变形、严重变形和失稳破坏4个阶段。

(1) 稳定状态。边坡境界矿柱围岩的集中应力主要分布在矿柱的下表面区域,最大集中应力值在30 MPa以内,未超出岩体抗拉强度阈值。此时围岩的最大位移不足200 mm,仅在露天坑北侧边坡的坡面及坡脚位置分布有少量剪切塑性区,边坡整体处于力学平衡状态。

(2) 轻微变形状态。随着重力加速度的增加,矿柱上表面的拉应力分布区域开始向西侧扩展,最大位移值超过300 mm;集中应力的分布范围向北侧边坡坡脚部位延伸,而塑性区的分布位置基本保持不变,仅出现一定程度的扩展。在这一阶段,边坡境界矿柱的力学行为仍处于可控范围,未发生显著破坏。

(3) 严重变形状态。边坡境界矿柱的力学响应呈现显著变化,集中应力的分布范围进一步扩展至西侧边坡(即上盘围岩)坡面及坡顶区域,拉应力分布范围向西侧边坡扩展,此时矿柱的最大位移超过800 mm,边坡变形程度加剧;东侧、西侧边坡均出现大量塑性区,其中东侧边坡开始出现较多张拉塑性区;边坡境界矿柱上表面和下表面出现的张拉塑性区在局部位置连通,裂隙发育至地表,显著增加了边坡失稳风险,容易诱发连锁破坏。

(4) 失稳破坏状态。当重力加速度达到临界值时,矿区N22至N26号勘探线范围内的边坡境界矿柱(即露天坑上盘区域)发生极大变形,最大拉应力值超过3 MPa,超出岩体抗拉强度阈值,边坡境界矿柱的塑性区完全连通并扩展至坡顶位置,导致边坡整体失稳破坏。

针对边坡境界矿柱的危险区域,采取监测和加固措施以保障矿山安全生产。在露天坑西侧边坡的坡顶、坡面及坡脚等关键位置布置多个全球卫星导航系统(GNSS)位移监测站,实时监测边坡的水平位移和竖向位移;在边坡境界矿柱内部不同深度和位置埋设应力传感器,监测岩体内的应力变化情况,这些措施能够及时发现应力集中区域和潜在失稳风险,为采取相应的支护措施提供依据。

4 结论

边坡境界矿柱留设是露天开采不具备平面扩界条件而转地下开采时,确保矿山安全生产的重要保障措施。本文针对司家营铁矿露天转地下开采必须留设边坡境界矿柱的情况,采用重度增加法研究了该矿露天转地下开采后,边坡境界矿柱的稳定性问题,得出的主要结论如下。

(1) 根据地下开采完成后边坡境界矿柱的应力场、位移场和塑性区的数值模拟结果,司家营铁矿边坡境界矿柱留设厚度为40 m,在初始重力加速度为1.0g的条件下,矿柱(即边坡)处于稳定状态,能够保证地下开采安全和避免露天边坡产生垮塌、冒落、滑坡等失稳现象。

(2) 随着重力加速度的增加,边坡境界矿柱的渐进失稳破坏过程可划分为稳定、轻微变形、严重变形和失稳破坏4个阶段;最大主应力受地下开采卸荷作用的影响变化不大,基本不超过30 MPa,而最小主应力及其分布范围增加幅度较大,在矿区N22至N26号勘探线范围内的露天坑西侧边坡,拉应力达到3 MPa以上,且其分布范围不断向坡顶扩展。该区域是露天转地下开采后,边坡发生垮塌、冒落、滑坡等失稳现象的最危险区域。

(3) 位移场及塑性区的分布特征及变化规律与拉应力呈现高度一致性。重力加速度增加至2.0g时,在矿区N22至N26号勘探线范围西侧边坡的境界矿柱内,塑性区向上扩展至边坡坡顶,最大位移量达到1.5 m,露天边坡产生整体失稳破坏。

(4) 在矿山实际生产中,建议加强对边坡境界矿柱的监测和分析,不断探索地下开采扰动下边坡境界矿柱应力演化特征与变形破坏规律,预防大规模边坡失稳破坏事故发生。

参考文献(References):

[1] 路增祥,蔡美峰.金属矿露天转地下开采关键技术[M].北京:冶金工业出版社,2019.
Lu Zengxiang, Cai Meifeng. Key technologies of transition from open-pit to undergroud mining in metal mines transition from open pit to underground mining [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.

[2] 王运敏.露天地下联合开采关键问题及技术方向[J].金属矿山,2009(增刊1):127-131+135.
Wang Yunmin. Technological directions and key problems of transition from open pit to underground combined mining [J]. Metal Mine,2009(Suppl.1):127-131+135.

[3] 路增祥,李角群,马强英.我国空场嗣后充填采矿法研究进展与展望[J/OL].金属矿山:1-25[2025-03-19].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250319.1040.002.html.
Lu Zengxiang, Li Jiaoqun, Ma Qiangying. Research progress and prospects of open stope mining with subsequent filling method in China[J/OL]. Metal Mine:1-25[2025-03-19]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250319.1040.002.html.

[4] 鲍敏,常德才,刘鹏鹏,等.丰山铜矿分段空场嗣后充填采矿法采场充填体稳定性研究[J].采矿技术,2025,25(2):69-73.
Bao Min, Chang Decai, Liu Pengpeng, et al. Stability study of backfill body of sublevel open stope with subsequent backfill mining method in Fengshan Copper Mine [J]. Mining Technology,2025,25(2):69-73.

[5] 巩瑞杰,叶会师,张杰,等.充填接顶率对空场嗣后充填法开采围岩变形规律的影响[J/OL].金属矿山:1-11[2025-04-03].http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250213.0915.002.html.
Gong Ruijie, Ye Huishi, Zhang Jie, et al. Effect of backfill quality on deformation low of surrounding rock in open stoping with subsequent backfill mining [J/OL]. Metal Mine:1-11[2025-04-03]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.TD.20250213.0915.002.html.

[6] 刘恒亮,张钦礼,卞继伟.露天转地下开采境界顶柱安全厚度研究[J].金属矿山,2015(10):41-45.
Liu Hengliang, Zhang Qinli, Bian Jiwei. Research on safety thickness of boundary pillar during the transition from open pit to underground mining[J]. Metal Mine,2015(10):41-45.

[7] 程纬华.基于厚板理论的露地联合开采隔离矿柱力学分析与安全厚度模型研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
Cheng Weihua. Mechanical analysis and safety thickness model of isolated pillar in open-pit and underground combined mining based on thick plate theory[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2023.

[8] 刘泽洲,熊鹏,雷明,等.某铁矿露天转地下开采的境界矿柱厚度确定及稳定性分析[J].矿业研究与开发,2024,44(7):1-6.
Liu Zezhou, Xiong Peng, Lei Ming, et al. Thickness determination and stability analysis of boundary pillar in transition from open-pitto underground mining of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):1-6.

[9] 梁源贵,周宗红,侯廷凯,等.某金矿露天转地下开采境界顶柱合理厚度研究[J].黄金,2024,45(5):19-24.
Liang Yuangui, Zhou Zonghong, Hou Tingkai, et al. Study on the reasonable thickness of boundary roof pillars in the transition from open-pit to underground mining in a gold mine[J]. Gold,2024,45(5):19-24.

[10] 李钢,王雷,张红.露天矿山转地下开采隔离层安全厚度及采动稳定性研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(12):110-115.
Li Gang, Wang Lei, Zhang Hong. Investigation on safety thickness of isolation layer and mining stability for mine from open-pit to underground mining[J]. Journal of Safety Science and Technology,2022,18(12):110-115.

[11] 王文军,李家树,徐帅,等.深部开采过程中隔离矿柱承载机理及厚度优化[J].金属矿山,2020(8):38-43.
Wang Wenjun, Li Jiashu, Xu Shuai, et al. Working mechanism and thickness optimization of the original rock isolating pillars in deep mining[J]. Metal Mine,2020(8):38-43.

[12] 于世波,解联库,王贺.复杂条件下大规模开采采场结构参数优化研究[J].有色金属工程,2015,5(增刊1):13-16.
Yu Shibo, Xie Lianku, Wang He. Research on optimization of stope structure parameters about massive mining based on complex exploitation conditions [J]. Nonferrous Metals Engineering,2015,5(Suppl.1):13-16.

[13] 耿加波,兰祥,李小双,等.基于MatDEM的露天转地下房柱法开采覆岩与边坡失稳规律研究[J].金属矿山,2024(8):177-182.
Geng Jiabo, Lan Xiang, Li Xiaoshuang, et al. Study on the law of overlying rock and slope instability in open-pit to underground room-pillar mining based on MatDEM [J]. Metal Mine,2024(8):177-182.

[14] 张亚宾,王鑫,艾蕊,等.三友石矿露天转地下开采边坡稳定性研究[J].华北理工大学学报(自然科学版),2024,46(1):18-25.
Zhang Yabin, Wang Xin, Ai Rui, et al. Study on slope stability from open-pit to underground mining in quarry of Tangshan Sanyou Company [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition),2024,46(1):18-25.

[15] 姜安民,董彦辰,江学良,等.露天转地下开采引起露天采场边坡垮塌数值模拟研究[J].矿冶工程,2022,42(3):14-17.
Jiang Anmin, Dong Yanchen, Jiang Xueliang, et al. Numerical simulation of open pit slope collapse caused by transition from open pit to underground mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(3):14-17.

[16] 陆大丞,邓云腾,傅峥,等.金属矿山露转地开采岩体移动及安全防控研究进展[J].有色金属(矿山部分),2025(1):13-30.
Lu Dacheng, Deng Yunteng, Fu Zheng, et al. Research progress of rock mass movement and safety prevention and control in open pit to underground mining of metal mines [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2025(1):13-30.

[17] 徐恒,王贻明,吴爱祥,等.基于综合指数法的深部开采隔离矿柱失稳危险性评价[J].有色金属工程,2018,8(1):98-104.
Xu Heng, Wang Yiming, Wu Aixiang, et al. Instability risk evaluation of insulating pillar of excavation in depth based on comprehensive index method [J]. Nonferrous Metals Engineering,2018,8(1):98-104.

[18] 程海勇,吴爱祥,韩斌,等.露天-地下联合开采保安矿柱稳定性[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3183-3192.
Cheng Haiyong, Wu Aixiang, Han Bin, et al. Stability of safety pillars in opencast-underground combined mining[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(9):3183-3192.

[19] 李华,田益琳,秦敬武,等.司家营铁矿露天转地下采矿方法设计与优化[J].矿业研究与开发,2025,45(5):34-41.
Li Hua, Tian Yilin, Qin Jingwu, et al. Design and optimization of open-pit to underground mining method in Sijiaying Iron Mine[J]. Mining Research and Development, 2025,45(5):34-41.

[20] Swan C C, Seo Y K. Limit state analysis of earthen slopes using dual continuum/FEM approaches[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1999,23(12):1359-1371.

[21] 王述红,高红岩,张紫杉.基于重度增加法的岩坡破坏过程流形元分析[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(3):403-407.
Wang Shuhong, Gao Hongyan, Zhang Zishan. Manifold analysis of the rock slope failure process based on the gravity increase method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2016,37(3):403-407.

[22] 周健,王家全,曾远,等.颗粒流强度折减法和重力增加法的边坡安全系数研究[J].岩土力学,2009,30(6):1549-1554.
Zhou Jian, Wang Jiaquan, Zeng Yuan, et al. Slope safety factor by methods of particle flow code strength reduction and gravity increase[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(6):1549-1554.

[23] 姜立春,曾俊佳,贾晓川.水平采空区群动态失稳演化过程及工程控制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(8):821-825.
Jiang Lichun, Zeng Junjia, Jia Xiaochuan. Dynamic failure process and engineering control of horizontal goaf group[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2016,35(8):821-825.

[24] 兰舟,王培涛,王春贤,等.石碌铁矿北一采区露天转地下开采沉陷机理研究[J].有色金属工程,2023,13(10):105-117.
Lan Zhou, Wang Peitao, Wang Chunxian, et al. Study on the subsidence mechanism of open pit underground mining in the Beiyi mining area of Shilu Iron Mine[J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,13(10):105-117.

[25] 周群.基于灰色多层次的露天转地下开采边坡稳定性评价模型[J].矿冶,2018,27(3):35-40.
Zhou Qun. Stability evaluation model of slope in transition from open-pit to underground mining based on grey multi-level analysis[J]. Mining and Metallurgy,2018,27(3):35-40.

[26] 孙世国,张玉娟,张英海,等.露天地下同期开采对边坡变形影响机制研究[J].金属矿山,2016(11):58-62.
Sun Shiguo, Zhang Yujuan, Zhang Yinghai, et al. Research on influencing mechanism of the synchronous mining of open-pit and underground on slope deformation[J]. Metal Mine,2016(11):58-62.

[27] 朱万成,董航宇,刘溪鸽,等.金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(4):5-31.
Zhu Wancheng, Dong Hangyu, Liu Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022,4(4):5-31.