龙首矿露天转地下开采边坡岩体稳定性研究①

刘吉祥[1], 赵钺[1], 沈彦丞[1], 赵尔丞[1], 张春阳[2], 邓志鹏[2]
(1.兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2.武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 针对金川龙首矿露天转地下开采过程中边坡稳定性与地压控制难题,采用数值模拟分析了地下回采-充填过程中露天边坡及矿体围岩应力演化与塑性区演变规律。结果表明:地下开采会导致露天坑地表形成椭圆形的沉降区域,沉降位移与开采深度正相关,最大沉降位移为 1.53 m;地下回采诱发了明显的次生应力场重分布,露天坑底区域压应力由 2.0 MPa 降至 0.1 MPa,形成贯穿至地表的低应力松弛区;塑性区主要分布在露天坑底部及南坡坡底,充填体有效限制了塑性区向边坡深部扩展,边坡坡体内无贯穿塑性区,表明边坡整体稳定。在后续深部开采过程中,建议加强塑性区发育区域的微震监测与多点位移观测,同时严格控制充填接顶率,防止局部围岩冒落诱发边坡失稳。

关键词: 龙首矿; 露天转地下开采; 边坡稳定性; 数值模拟; 沉降位移; 应力等值线; 塑性区
中图分类号: TD854;TD853 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.004
文章编号: 0253-6099(2026)02-0021-07

Stability of Slope Rock Mass During Transition from Open-Pit to Underground Mining in Longshou Mine

LIU Jixiang[1], ZHAO Yue[1], SHEN Yancheng[1], ZHAO Ercheng[1], ZHANG Chunyang[2], DENG Zhipeng[2]
(1.*Lanzhou Engineering & Research Institute of Nonferrous Metallurgy Co., Ltd.*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*; 2.*School of Resources and Environmental Engineering*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*)

Abstract: To address the challenges of slope stability and ground pressure control during the transition from open-pit to underground mining in Jinchuan Longshou Mine, the stress evolution and plastic zone variation laws of the open-pit slope and orebody surrounding rock during underground stoping and backfill process were analyzed with numerical simulation. The results show that: Underground mining leads to the formation of an elliptical subsidence area on the surface of the open pit, where the subsidence displacement is positively correlated with the mining depth, and the maximum subsidence displacement reaches 1.53 m; underground stoping induces a significant redistribution of the secondary stress field, with the compressive stress in the bottom area of the open pit decreasing from 2.0 MPa to 0.1 MPa, forming a low-stress relaxation zone penetrating to the surface; the plastic zones are mainly distributed at the bottom of the open pit and the toe of the south slope, while the backfill body effectively restricts the plastic zone from extending deep into the slope, and there is no penetrating plastic zone inside the slope body, indicating the overall stability of the slope. In the subsequent deep mining process, it is recommended that microseismic monitoring and multi-point displacement observation should be strengthened in areas with developed plastic zones. Meanwhile, the backfill roof-contact rate should be strictly controlled to prevent local surrounding rock caving from inducing slope instability.

Key words: Longshou Mine; transition from open-pit to underground mining; slope stability; numerical simulation; subsidence displacement; stress contour; plastic zone

许多露天矿山进入深部开采后转入地下开采,露天转地下开采作为一个复杂动态耦合系统,其内部应力演化与变形机理相较于单一开采模式具有显著差异性和复杂性[1],这种复合开采模式下的露天边坡稳定性研究已成为当前露天转地下开采领域的研究热点之一[2-6]。

针对露天转地下开采过程中露天边坡稳定性问

① **收稿日期**: 2025-10-23
基金项目: 国家自然科学基金(52474108,52174088)
作者简介: 刘吉祥(1989—),男,宁夏西吉人,硕士,高级工程师,主要从事矿山设计与开发方面的研究。E-mail:237755829@qq.com
通信作者: 赵钺(1989—),男,甘肃徽县人,高级工程师,主要从事矿山设计与开发方面的研究。E-mail:272666935@qq.com

题,国内外学者采用理论分析、几何模型分析、数值模拟和相似物理模型试验等[2-9],系统研究了地下开采过程中露天边坡岩体的位移场、应力场和破坏场的演化特征,揭示了露天转地下开采后露天边坡与地下开采耦合作用机理,取得了诸多成果。然而考虑到不同矿山地质条件、采矿方法、采场结构参数等差异性[10],以及不同开采阶段对边坡扰动的差别,地下开采诱发边坡非线性变形机制和岩体破坏规律的研究仍有待深入。本文以金川龙首矿西一采区1 460~1 428 m中段开采为背景,构建露天转地下采区三维数值模型,通过计算获取不同回采分层下边坡位移场、应力场演化特征和塑性区分布规律,揭示高应力地采下露天边坡岩体移动规律与破坏机制。

1 矿山概况

甘肃金川龙首矿位于龙首山东段北麓、潮水盆地南缘。矿区断裂极为发育,多为与区域构造线相一致的逆断层,规模较大且对开采有影响的断层主要有F_1、F_8和F_{16}。矿体走向北西50°~60°,向南西倾斜,倾角较陡,70°以上,含矿超基性岩体全长约6 500 m,宽数十米至五百余米。矿区水平地应力较高,岩体稳定性较差。

龙首矿包含东、中、西3个采区,从20世纪60年代开始开采,经近30年露天开采后转入地下开采,在地表留下一个长约1 300 m、宽约700 m、深约300 m的露天坑。矿山2007年开启西一采区贫矿建设项目,开采范围为露天坑底保安矿柱(1 520~1 424 m水平)和上盘遗留贫矿(1 424~1 100 m水平)。地下开采采用盘区机械化下向六角形进路胶结充填采矿法,回采顺序为两翼向中间后退式回采。阶段高度60 m,共3个分段,每个分段划分为8层,每层设7个采场,采场垂直矿体走向布置,采场长100 m,宽度为矿体的水平厚度。工程地质调查与监测数据[11]表明,龙首矿地下开采已经引起地表大范围岩体移动和变形,对露天边坡稳定性产生了不利影响。开采1 460~1 428 m水平处矿体,距离地表更近,受露天边坡与地下采场的耦合影响,可能引发露天边坡与地下采场结构失稳。

2 三维数值建模

2.1 数值计算模型建立

为突出研究重点和节约计算资源,本文在模型建立和计算中作出如下假设和简化:① 假设围岩、矿体和充填体为各向同性连续介质;② 将地质体简化为围岩、矿体、采空区和充填体四类;③ 对矿体的不规则形态和不连续性进行一定简化,并将露天边坡进行合理简化[9,12];④ 假设采场开挖和充填瞬时完成,不考虑时间效应。

基于矿区地表等高线图、中段平面图等基础设计资料,采用Rhino三维建模平台构建了包含露天采坑、围岩体及矿体等地质要素的三维地质模型。通过Griddle插件进行渐变式网格划分,在确保关键区域网格密度的同时优化整体计算效率,最终生成可导入FLAC^{3D}平台的三维数值计算模型,如图1所示。

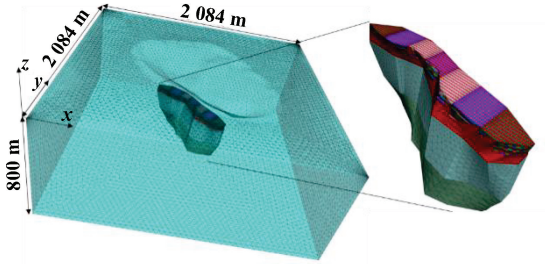


图1 三维数值计算模型

Fig.1 3D numerical calculation model

考虑边界效应,建立的模型东西长2 084 m、南北宽2 084 m,标高920~1 720 m,露天坑底最低标高为1 520 m。模型共包含约120万个四面体单元,17万个网格节点。矿体模型分为1 220~1 280 m、1 280~1 400 m和1 400~1 460 m三个阶段,并根据龙首矿西一采区采场参数对1 428~1 460 m水平的阶段区域进行网格划分,根据现场实际情况,最后2层没有开采,本次只模拟14个分层,每个分层上下交错布置。

模型边界采用位移边界条件固定,固定模型四周x、y方向的位移,固定模型底面x、y和z方向的位移,模型上表面为自由边界条件。研究区域岩土体和充填体符合弹塑性材料的一般规律,数值计算采用莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则,采用空模型模拟被开挖的矿体。参照工程实际,采用Hoek-Brown强度准则[13]对矿岩体的室内岩石力学参数进行强度折减,得到矿岩及充填体力学参数,如表1所示。

表1 矿岩及充填体力学参数

Table 1. Mechanical parameters of ore rock and backfill body

岩性	容重/(kN·m^{-3})	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
矿体	29.3	0.8	2.5	0.23	1.0	40
围岩	30.0	2.0	2.2	0.25	2.0	39
充填体	20.0	0.1	0.2	0.28	0.1	38

2.2 计算过程

根据矿山实测地应力经验公式[见式(1)]反演地

应力场，进行模型的平衡计算，得到开挖前模型的初始应力状态，初始化模型的速度、位移和塑性区状态，确保后续结果的可靠性。

$$\begin{cases}\sigma_{\mathrm{H}} = 6.843 + 0.019H \\ \sigma_{\mathrm{h}} = 2.407 + 0.012H \\ \sigma_{\mathrm{v}} = 2.589 + 0.022H\end{cases} \tag{1}$$

式中：σ_{H} 为模型的最大水平应力，方向与矿体走向垂直且近水平，MPa；σ_{h} 为模型的最小水平主应力，平行于矿体走向，MPa；σ_{v} 为模型的垂直应力，沿竖直方向；H 为深度，m。

按照实际情况，现场将各分层矿体划分为多个六边形回采单元。模拟开采按照从两端往中间、自上而下顺序分层、分步充填，回采模拟如图 2 所示。每一分层含有 7 个采场，分 4 次回采，每个采场的回采和充填作业简化为一次完成。

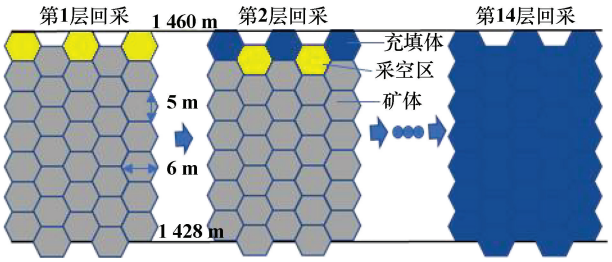


图 2　回采模拟

Fig. 2　Stoping simulation

3　计算结果分析

3.1　位移场分析

3.1.1　地表位移特征分析

地下矿体回采后围岩中原有的应力平衡被破坏，导致上覆岩体发生移动和变形，当影响扩展至地表时可能导致地表产生渐进式沉降、开裂甚至塌陷等[14]。为研究地下开采影响下的矿区地表移动规律和岩体应力演化过程，根据露天矿边坡分区（见图 3），在地表布置剖面Ⅰ-Ⅰ和剖面Ⅱ-Ⅱ，并在地表与剖面Ⅰ-Ⅰ的交线上在南、北坡的坡顶、坡肩和坡底设置监测点（A、B、C 和 A*、B*、C*）。模拟剖面图如图 4 所示。图 5 为最后一层回采充填结束后的地表位移分布云图。由图 5(a)可知，地下矿体回采后，露天坑的底部以及整个南坡、北坡和西坡的坡底和部分坡面位置产生了大面积的位移，形状类似不规则椭圆，位移大小以坑底为中心沿坡面方向呈递减趋势，坑底最大位移为 1.53 m。根据位移大小和影响范围，判断坑底受到地下开采的影响最大，其次是位于矿体上下盘的南坡和北坡，位于矿体走向方向的东坡和西坡受到的地下开采影响相对较小。文献[5]利用 SBAS-InSAR 技术获取 2014—2023 年矿区地表垂直方向的形变，结果表明南坡以沉降为主，累计最大沉降值为 1.489 m，最大沉降位移数值的现场监测结果与数值模拟结果较为接近，表明数值计算模型具有一定的可靠性和有效性。

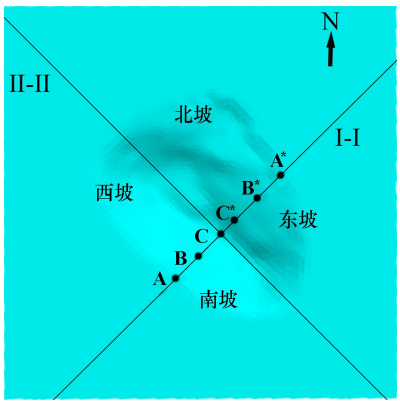
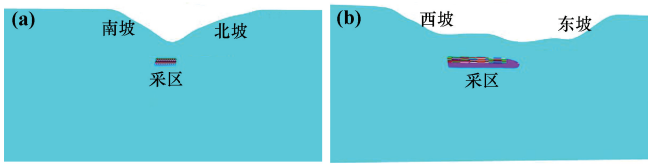


图 3　露天矿边坡分区

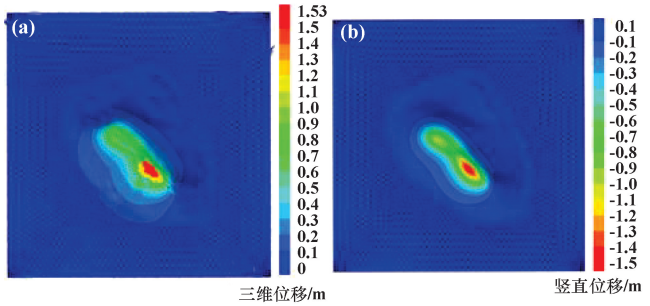
Fig. 3　Slope zoning of open-pit mine



（a）I-I 剖面；（b）Ⅱ-Ⅱ剖面

图 4　模拟剖面图

Fig. 4　Simulation profile



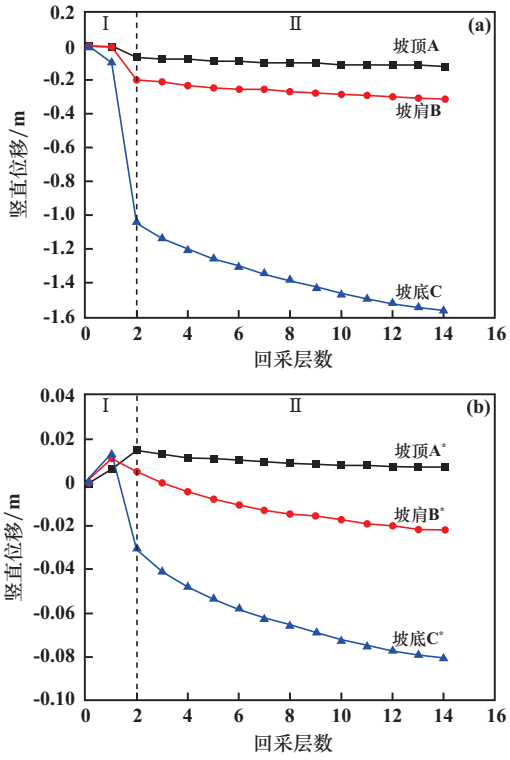
（a）三维位移；（b）竖直位移

图 5　地表位移分布云图

Fig. 5　Surface displacement distribution nephogram

为研究地下开采影响下的矿区地表移动规律和岩体应力演化过程，各监测点竖直位移如图 6 所示。由图 6 可知，南坡、北坡的竖直位移曲线大致可分为 2 个阶段：第一阶段为开始回采至第 2 层回采结束，第二阶段为第 2 层回采结束至第 14 层回采结束。第一阶段，北坡坡底和坡肩位移由上升转为下沉，坡顶上升至最大位移 0.015 m，这是因为北坡位于矿体下盘，在开采

前期受上盘的挤压作用而轻微隆起,而后由于地下开采对地表的影响增强,坡底和坡肩转为下沉;南坡整体位移呈缓慢下沉到急剧下沉的变化,其中坡底受开采影响较大,最大下沉位移达 1.04 m。第二阶段,南坡、北坡下沉量均随着回采层数增加而增大,且下沉速度逐渐变慢,这说明随着开采深度的增加,采矿活动对地表的影响逐渐降低。



(a) 南坡;(b) 北坡

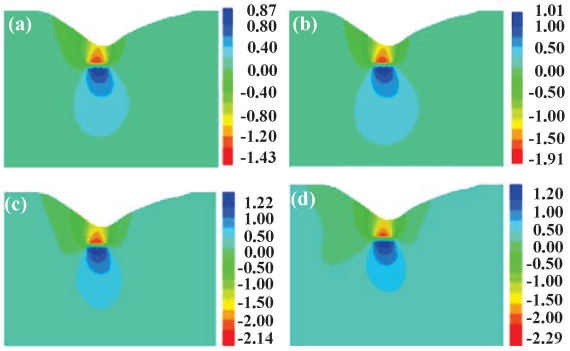
图 6 监测点竖直位移

Fig. 6 Vertical displacement of monitoring points

3.1.2 岩体位移特征分析

由于篇幅限制,仅列出第 2、6、10、14 层回采充填结束后的Ⅰ-Ⅰ剖面和Ⅱ-Ⅱ剖面的竖直位移云图,分别如图 7 和图 8 所示。

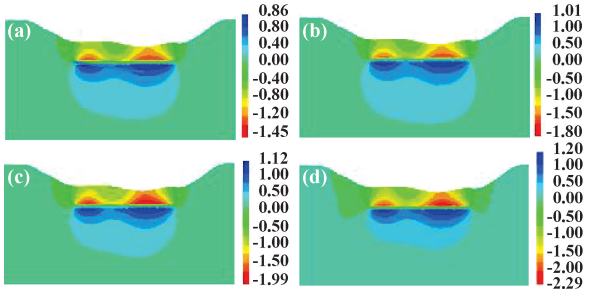
图 7 表明,在第 2 层开采结束后,开挖卸荷作用使围岩中初始应力平衡被打破,应力重新分布,引起采场上覆岩体沉降并延至地表,最终形成以采场为中心的沉降漏斗,最大沉降位移为 1.43 m;采场下方岩体在地应力作用下向上隆起,形成以底板为中心向外扩散的椭圆形移动区域,最大隆起位移为 0.87 m。上覆岩体和边坡岩体位移随着回采层数增加不断增大,位移区域由大部分南坡坡面扩展至南坡坡顶,北坡由坡底扩展至近半坡面;位移变化速度随着回采层数增加而逐渐减小,说明回采层数增加对上覆岩体的影响逐渐减小。采场顶板位移变化速度大于采场底板位移变化速度,顶板位移由1.43 m增至 2.29 m,而底板位移仅从 0.87 m 增至1.20 m。



(a) 第 2 层回采;(b) 第 6 层回采;
(c) 第 10 层回采;(d) 第 14 层回采

图 7 Ⅰ-Ⅰ剖面竖直位移云图(单位:m)

Fig. 7 Vertical displacement nephogram of Ⅰ-Ⅰ profile



(a) 第 2 层回采;(b) 第 6 层回采;
(c) 第 10 层回采;(d) 第 14 层回采

图 8 Ⅱ-Ⅱ剖面竖直位移云图(单位:m)

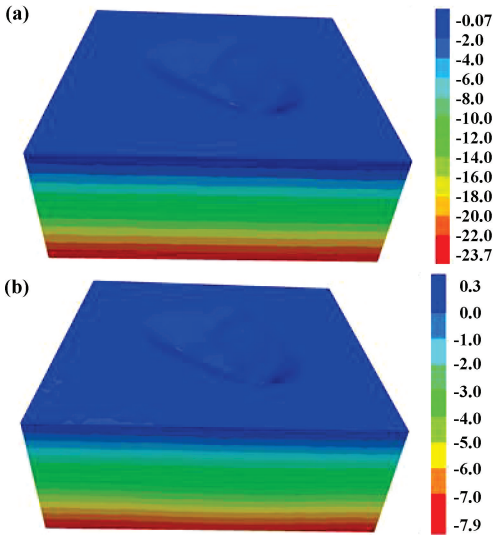
Fig. 8 Vertical displacement nephogram of Ⅱ-Ⅱ profile

图 8 表明,第 2 层开采后Ⅱ-Ⅱ剖面中岩体移动特征受矿体走向长度及开采顺序的影响,在采动应力重分布影响下形成东西向双位移集中区,由于东翼采区顶板距离地表更近,东翼位移场呈现更大规模的变形区域,最大沉降位移为 1.45 m。上覆岩体向下沉降形成了大于开采区域的沉降漏斗,采场底板最大隆起位移 0.86 m。随着回采深度增加,西坡受影响范围由坡底扩展至接近坡顶,而东坡受影响范围仅扩大至坡底位置。

3.2 应力场变化规律

地下开采结束后的主应力云图如图 9 所示。开采活动终止后的主应力场以压应力为主,压力等值线近似水平,应力值随着延深呈现出梯度递增的趋势。最大主应力 0~23.7 MPa,为压应力,方向与矿体走向垂直且呈近似水平分布;最小主应力 0~7.9 MPa,该应力分量主要源自矿体自重应力场的垂向分量作用。

图 10 为回采前和第 2、6、10、14 层回采充填结束后Ⅰ-Ⅰ剖面和Ⅱ-Ⅱ剖面的主应力云图。



(a) 最大主应力;(b) 最小主应力

图 9　主应力云图(单位:MPa)

Fig. 9　Nephogram of principal stress

由图 10 可知,回采前模型初始应力场整体呈层状分布,远离露天坑时垂直应力等值线基本保持水平,受露天开采影响,边坡体内应力等值线与坡面保持平行,且在边坡坡脚处存在应力场畸变现象。Ⅰ-Ⅰ剖面中,矿体回采与充填后,采区上方区域岩体压应力值由 2.0 MPa 降至0.1 MPa,形成贯穿至地表的低应力区域。充填体内部压应力均匀分布。值得注意的是,受开采扰动效应影响,充填体-围岩接触带的顶底板端部出现了显著的局部应力集中现象,主应力等值线明显加密与偏转。在开采区域下方,应力影响区域以充填体底板为中心向深部岩体扩展;随着与充填体距离增加,开采扰动效应逐渐减弱,应力场逐渐恢复至初始状态(等值线恢复水平分布)。这说明充填体具有显著的地压调控能力,能够有效维持围岩应力平衡状态。

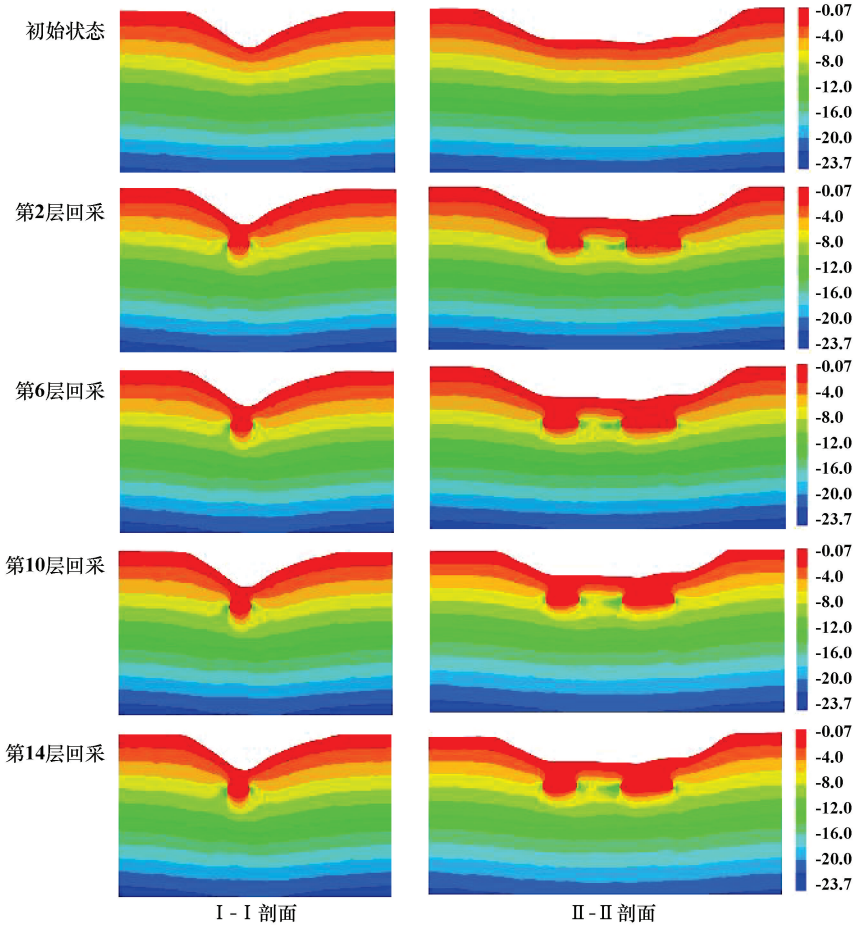


图 10　回采前及不同分层回采后主应力云图(单位:MPa)

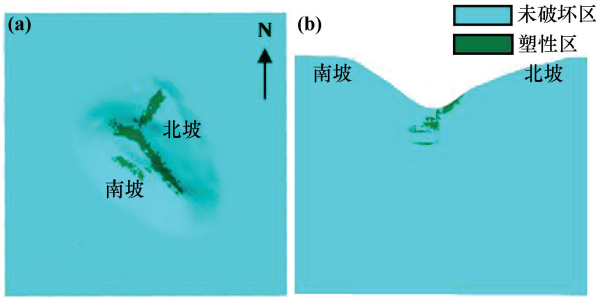
Fig. 10　Nephograms of principal stress before stoping and after different slice stoping

Ⅱ-Ⅱ剖面整体应力分布与Ⅰ-Ⅰ剖面类似,但充填体呈现出中间高、两边低的应力分布状态。该现象源于分步开采引起的荷载传递机制:当采用两翼向中间回采时,回采区域前方应力高于已采区,致使该区域矿体垂直应力产生一定的应力梯度,最终形成典型应力拱结构[15]。

对比不同回采分层数目下的主应力云图发现,初始状态至第 2 层回采结束时,Ⅰ-Ⅰ与Ⅱ-Ⅱ剖面的应力场以开采区域为中心发生大规模的应力重分布现象;后续回采过程中,Ⅰ-Ⅰ与Ⅱ-Ⅱ剖面的整体应力分布特征差异较小,应力场呈现良好的空间稳定性特征。在整个回采过程中边坡岩体始终维持低压应力状态,压应力约为 0.1 MPa,远低于边坡岩体的抗压强度。

3.3 塑性区分布规律

当岩体所受应力超过极限后会发生不可逆变化,造成岩体屈服破坏。图 11 为塑性区分布图。地表塑性区主要分布在露天坑底部和南坡坡底,部分分布在北坡西部;Ⅰ-Ⅰ剖面塑性区主要分布在北坡坡脚和坑底下方的保安矿柱中,充填体的上下顶板存在小面积的塑性区。整体而言,地下回采会导致坑底发生大面积沉降,坑底岩石在高水平地应力和岩体自重应力的作用下发生压剪破坏,但在充填体的支护作用下岩体破坏局限在坡底及坑底下方部分区域内,边坡坡体内未出现大规模塑性区,边坡的整体稳定性良好。



(a) 地表;(b) Ⅰ-Ⅰ剖面

图 11 塑性区分布图

Fig. 11 Distribution of plastic zones

3.4 建议

1) 分区分类支护。模拟显示充填体-围岩接触带端部存在明显的应力集中,建议在实际施工中加强采场顶底板交界处的锚杆支护强度,并增加金属网以防止局部剥离破坏。

2) 地压协同调控。鉴于充填体表现出显著的地压平衡能力,应严格控制充填质量和接顶率。尤其在第 6~10分层回采期间,应加密坑底沉降监测频次,确保地下回采不触发边坡大规模失稳。

3) 动态监测重点。鉴于地表塑性区主要分布在南坡坡底及露天坑底部,建议在这些区域布置深部位移计。若实测压剪应力趋近屈服极限,应及时调整回采时序,利用充填体的支撑刚度延缓围岩应力释放,实现安全高效回采。

4 结论

1) 露天转地下开采诱发的岩体变形主要表现为坑底的竖向沉降,沉降中心位于回采区域上方。随着回采分层下移,坑底累计位移量有所增加,最大位移 1.53 m,但由于充填体的作用,单位深度的位移增量显著递减,说明下向分层充填工艺对控制深部岩体大变形具有良好的时效性。

2) 地下开采打破了露天坑底原有的应力平衡,引导主应力轴发生偏转。充填体不仅承担了覆岩载荷,更通过改变应力传递路径,在坡脚与回采区之间形成了明显的低应力缓冲带(约 0.1 MPa)。这种“应力屏蔽效应”有效降低了坡脚处的剪应力集中程度,是维持边坡整体稳定的核心力学因素。

3) 塑性区主要分布于坑底回采边缘及南坡坡底局部岩体,呈散点状分布,并未形成贯穿至坡面的连续剪切滑动面。充填体与围岩形成的协同承载体系有效抑制了屈服范围向边坡深部扩展。综合位移场与应力场分析,龙首矿在当前开采时序与充填方案下,边坡岩体处于整体稳定状态。

4) 虽然边坡整体稳定,但考虑到塑性区在露天坑底部及南坡底部仍有局部发育,建议在后续深部开采过程中,加强对上述敏感区域的微震监测与多点位移观测。同时,应严格控制充填接顶率,以确保充填体对围岩的径向约束力,防止局部冒落诱发的边坡连锁失稳。

参考文献(References):

[1] 孙世国,蔡美峰,王思敬. 露天转地下开采边坡岩体滑移机制的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(1):126-129.
SUN Shiguo, CAI Meifeng, WANG Sijing. Discussion on sliding mechanism of slope rock mass from open pit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(1):126-129.

[2] 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(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(10):105-117.

[3] 韩文斌,高琨鹏,王汉斌. 露天铁矿端帮开采诱发的地表及岩层移动规律[J]. 科学技术与工程, 2020,20(19):7596-7601.
HAN Wenbin, GAO Kunpeng, WANG Hanbin. The law of surface and rock strata movement induced by open-pit highwall mining in opencast iron mine[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19):7596-7601.

[4] 王钟钰,蒋永超,贾若彤,等. 眼前山铁矿露天转地下开采岩体破坏规律研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):14-20.

WANG Zhongyu, JIANG Yongchao, JIA Ruotong, et al. Failure law of rock masses in transition from open-pit to underground mining in Yanqianshan iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):14-20.

[5] 蒙齐,吴彩燕,曾特林,等. 融合时序 InSAR 与 MIDAS 的露天边坡稳定性分析及预测[J]. 金属矿山, 2024(10):216-223.
MENG Qi, WU Caiyan, ZENG Telin, et al. Analysis and prediction of slope stability in open-pit mines by integrating time series InSAR technique and MIDAS[J]. Metal Mine, 2024(10):216-223.

[6] 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.

[7] 孙书伟,杨肇熙,贾培智,等. 煤矿地下采空区沉陷诱发边坡破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025,44(6):1405-1419.
SUN Shuwei, YANG Zhaoxi, JIA Peizhi, et al. Study on failure mechanism of slopes induced by the underground coal mining subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(6):1405-1419.

[8] 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.

[9] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):150-154.

[10] 李小双,王运敏,赵奎,等. 金属矿山露天转地下开采的关键问题研究进展[J]. 金属矿山, 2019(12):12-20.
LI Xiaoshuang, WANG Yunmin, ZHAO Kui, et al. Research progress on the key problems in transition from open-pit to underground mining for metal mines[J]. Metal Mine, 2019(12):12-20.

[11] 赵海军,马凤山,郭捷,等. 龙首矿露天转地下开采对边坡岩体稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2011,36(10):1635-1641.
ZHAO Haijun, MA Fengshan, GUO Jie, et al. Effect of open-pit to underground mining on slope stability in Longshou Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(10):1635-1641.

[12] 陈金龙,饶运章,郑越,等. 基于 Rhino 的大型复杂地质体计算模型建模方法[J]. 矿业研究与开发, 2019,39(11):151-154.
CHEN Jinlong, RAO Yunzhang, ZHENG Yue, et al. A calculation model construction method of large complex geological body based on Rhino[J]. Mining Research and Development, 2019,39(11):151-154.

[13] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8):1165-1186.

[14] 张姝婧. 露天转地下连续干式充填开采及其对地表岩移影响[D]. 沈阳:东北大学, 2022.
ZHANG Shujing. Continuous dry filling mining from open pit to underground and its influence on surface rock movement[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[15] 杜晓丽,马芹永,宋宏伟,等. 煤矿层状岩体压力拱演化规律的相似模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2017,13(2):381-386.
DU Xiaoli, MA Qinyong, SONG Hongwei, et al. Simulation on evolution characteristics of the pressure arch in bedded rock at coal mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(2):381-386.

引用本文:刘吉祥,赵钺,沈彦丞,等. 龙首矿露天转地下开采边坡岩体稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):21-27.
LIU Jixiang, ZHAO Yue, SHEN Yancheng, et al. Stability of slope rock mass during transition from open-pit to underground mining in Longshou Mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):21-27.

(上接第 20 页)

[10] JABER J, CONIN M, DECK O, et al. Investigation of themechanical behavior of 3D printed polyamide-12 joints for reduced scale models of rock mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020,53(6):2687-2705.

[11] MENEGONI N, GIORDAN D, PEROTTI C. Anopen-source algorithm for 3D rock slope kinematic analysis (ROKA)[J]. Applied Sciences, 2021,11(4):1698.

[12] KULATILAKE P H S W, WANG L Q, TANG H M, et al. Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(6):846-860.

[13] 熊爽,胡斌,姚文敏. 露天石灰石矿山岩质边坡坡角优化设计研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(4):32-35.
XIONG Shuang, HU Bin, YAO Wenmin. Optimization design for rock slope angle in open-pit limestone mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(4):32-35.

[14] 韩光. 露天矿顺层岩质高边坡稳定性及安全控制关键技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.
HAN Guang. Study on key technologies of stability and safety control of bedding rock high slope in open pit mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.

引用本文:李家东,赵旭阳,杜坤,等. 基于点云识别技术的露天矿边坡岩体结构面产状与破坏模式研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):15-20.
LI Jiadong, ZHAO Xuyang, DU Kun, et al. Research on occurrence and failure modes of rock mass structural planes in open-pit slopes based on point cloud recognition technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):15-20.