

露天转地下边坡隔离矿柱合理厚度研究

李绍斌¹,周宗红^{2*},尹俊¹,赵言龙¹,殷燕林¹,杨海峰¹

(1. 鹤庆北衙矿业有限公司; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院)

摘要:某大型露天采场周围的挂帮矿,约占露采境界外采矿量的85.76%,拟采用上向进路充填采矿法回收该部分资源。为隔离露天开采与挂帮矿地下开采的相互影响,保证高陡边坡、地下采矿作业安全,需要研究确定合理的边坡隔离矿柱厚度。西北部边坡受交汇断层的影响,稳定性较差,以该区域为研究对象,开展了相关室内试验,基于经验公式和类似矿山实际,初步确定了隔离矿柱的厚度;采用数值模拟方法进行了优选,综合边坡稳定性需要,提出了该矿山合理的边坡隔离矿柱安全厚度。结果表明:通过Flac^{3D}软件模拟手段,结合经验公式计算结果,以及前期相关研究成果,西北部边坡隔离矿柱的合理厚度 ≥ 45 m。研究结果可为矿山设计、生产提供理论依据和参考。

关键词:露天转地下;边坡稳定性;挂帮矿开采;隔离矿柱厚度;数值模拟;Flac^{3D}软件

中图分类号:TD852

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)06-0012-06

doi:10.11792/hj20250603

引言

随着对矿产资源需求的增加和开采强度的不断加大,浅部资源日益减少,目前许多矿山都相继进入或即将进入由露天开采转入地下开采的状态。由于矿体赋存特性、开采技术及安全条件的限制,会在境界边坡位置形成大量挂帮矿^[1-2]。露天转地下开采过程中,挂帮矿的开采与露天采场互相影响,在过渡期内需留设边坡隔离(保安)矿柱,以隔离露天开采与挂帮矿地下开采的相互影响,保证露天转地下生产安全过渡。边坡隔离矿柱将露天采场和地下采场隔离开,使边坡隔离矿柱以外的矿体在进行地下开采时免受露天采场的不利影响;在回收挂帮矿资源的同时,保证高陡边坡、地下采矿作业的安全,避免影响地下开采和露天边坡的稳定。

为了高效回收挂帮矿,国内外学者进行了大量研究和现场实践,形成了以地下和露天为主的多种回采手段^[3]。大孤山铁矿^[4]设计采用产能较大的露天崩落采矿法开采挂帮矿;兰尖铁矿^[5]、石碌铁矿^[6]的挂帮矿均设计采用无底柱分段崩落采矿法进行开采,其回采方法生产效率高、工艺简单、安全且生产能力较大,在地下回采挂帮矿中占据主导地位。近年来,充填采矿法由于其安全性高的特点和独特的绿色矿山理念,逐渐成为矿山回采挂帮矿的主要手段。江铜银山矿业^[7]采用垂直走向的分段空场嗣后充填采矿法开采

挂帮矿;冬瓜山铜矿^[8]采用上向水平进路充填,同时胶结充填露天坑的手段联合回采挂帮矿。

云南某金矿受矿体赋存条件和地质因素的影响,拟采用上向进路充填采矿法回收挂帮矿资源。为了使挂帮矿在进行地下开采时免受露天采场的不利影响,需在露天和地下采场之间预留一定厚度的隔离矿柱,保证高陡边坡、地下采场作业安全;同时,由于矿山生产规模较大,露天开采服务年限相比计划大幅缩短,对隔离矿柱厚度的研究变得极为迫切。该矿地质条件极其复杂,其西北部边坡矿岩节理裂隙发育、断层交会,稳定性差,同时挂帮矿压覆矿量大。由于矿体及上下盘围岩节理裂隙发育,在爆破、降雨等作用下,边坡隔离矿柱稳定性差,需要研究确定合理的边坡隔离矿柱厚度。因此,本文对该区域展开研究,采用解析法、经验法、数值计算3种方法综合分析,优选最优边坡隔离矿柱厚度。运用经验公式计算、参考类似矿山经验,并采用Flac^{3D}软件对不同边坡隔离矿柱厚度进行数值模拟;综合分析理论计算和数值模拟结果,提出了西北部边坡隔离矿柱安全厚度。

1 工程概况

矿区位于近南北向鹤庆—松桂复式向斜南段,矿区构造与区域构造线方向一致,均呈近南北向展布。区内构造活动强烈,次级褶皱、断层发育。根据可行性研究,矿山露天开采结束后,形成大型露天坑,西帮

收稿日期:2025-01-30;修回日期:2025-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52264019)

作者简介:李绍斌(1990—),男,工程师,从事采矿工程的设计与管理工;E-mail:249135742@qq.com

*通信作者:周宗红(1967—),男,教授,博士,从事采矿工程的教学与科研工作;E-mail:zhou20051001@163.com

最大开采深度540 m(1 385 ~ 1 925 m),东帮最大开采深度465 m(1 385 ~ 1 850 m);随着露天开采逐渐进入末期,产能将下滑严重,而位于大型露天坑周围的挂帮矿,约占露天开采境界外地下开采矿量的85.76%。为保证矿山产能的接续,需要开采挂帮矿,拟采用上

向进路充填采矿法进行开采。本文针对矿床复杂开采技术条件,采用现场调研、室内试验、理论分析和数值模拟等方法,对矿山边坡隔离矿柱合理厚度展开研究,矿山54#勘探线剖面图见图1。

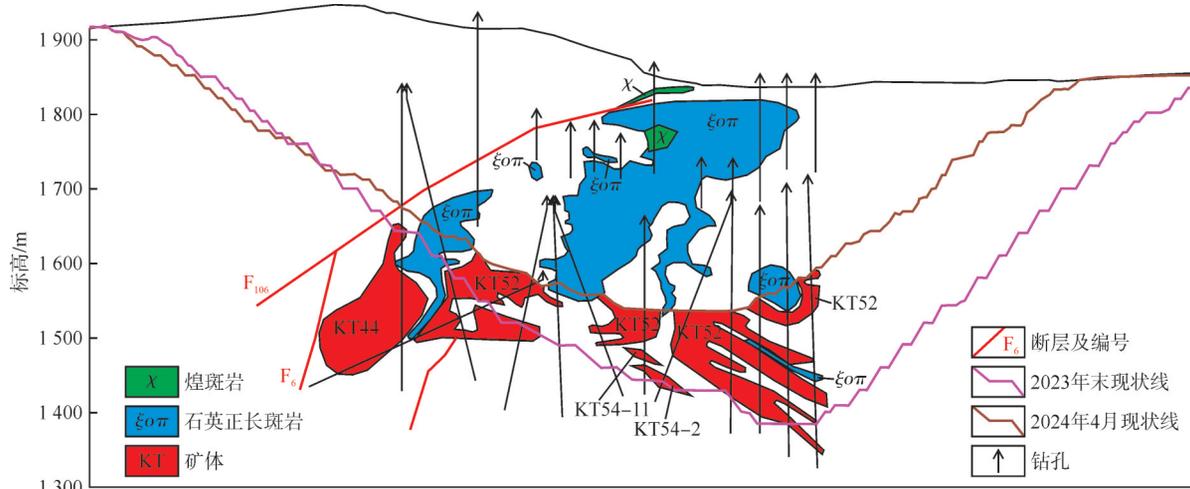


图1 54#勘探线剖面图

Fig. 1 54# Exploration Line profile

2 岩体力学参数确定

通过分析生产地质勘查资料和现场调研,从相关区域实地取岩样,进行了室内单轴抗压、抗剪及点荷载试验,利用Hoek-Brown经验公式^[9]给出岩体力学相关参数,经过初步折减,最终确定模拟所需的矿(岩)体及充填体物理力学参数,结果见表1。

表1 矿(岩)体及充填体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the ore (rock) bodies and filling bodies

岩性	弹性模量/ GPa	泊松 比	抗拉强度/ MPa	内聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
西北灰岩	3.04	0.33	0.04 ~ 0.13	0.5	38
石英正长斑岩	6.8	0.30	0.43	0.8	41
细砂岩	5.4	0.31	0.31	0.42	34
原生矿	11.17	0.25	0.32	1.3	42
氧化矿	1.20	0.36	0.01	0.1	26
胶结充填体	1.61	0.40	0.47	0.62	25
非胶结充填体	0.022	0.45	0.03	0.06	23

3 隔离矿柱厚度理论计算

隔离矿柱厚度理论计算目前仍处于探索和不断完善阶段,国内外学者提出了许多经验公式,此次选用结构力学简化梁法、“三带”理论等方法计算隔离矿柱厚度。

3.1 结构力学简化梁法

对于采空区上部的安全隔离层,可将其简化为两端固定的厚梁^[10],依此力学模型,可得到隔离层最小

安全厚度的计算公式为:

$$\delta = 0.25Kl \frac{\gamma l + \sqrt{(\gamma l)^2 + 8b\sigma_1}}{\sigma_1} \quad (1)$$

式中: δ 为隔离层最小安全厚度(m); K 为安全系数,取1.4; l 为采场跨度,取矿体平均厚度13.15 ~ 17.71 m; γ 为上覆矿岩容重,为26.8 kN/m³; b 为梁宽,取1 m; σ_1 为允许拉应力(kPa),顶板允许拉应力为:

$$\sigma_1 \leq \frac{\sigma}{K_1 K_c} \quad (2)$$

式中: K_1 为安全系数,可取1.5 ~ 3.0; K_c 为结构削弱系数,7 ~ 10; σ 为极限抗拉强度,取1 840 kPa。

取安全系数 $K_1=2.5$, $K_c=8$,得到顶板允许拉应力为92 kPa。代入式(1),通过结构力学简化梁法计算得到矿柱最小隔离厚度为43.84 m。

3.2 巷道可能冒落高度计算

采用“三带”理论计算巷道可能冒落高度,计算公式^[11]为:

$$h = \frac{\delta_h}{\lambda - 1} \quad (3)$$

式中: h 为冒落带最大高度(m); δ_h 为矿体铅垂回采厚度(m); λ 为冒落矿岩平均松散系数,取1.20。

回采巷道高度4.0 ~ 4.5 m,计算得到西北灰岩等破碎带矿体冒落带最大高度为20 ~ 22.5 m。

3.3 工程类比法

该方法通过借鉴国内外露天转地下开采工程经验,综合比较工程条件的异同点后确定适宜境界顶柱厚度取值。国内外部分露天转地下开采矿山境界矿

柱厚度见表2。

表2 国内外部分露天转地下开采矿山境界矿柱厚度

Table 2 Thickness of boundary pillars in some open-pit to underground transition mines at home and abroad

矿山名称	矿岩普氏硬度系数	境界矿柱厚度/m
建龙铁矿	8~12	20
克里沃罗格铁矿	4~10	20~30
姑山铁矿	3~4	20
黑龙江铁矿		20
落函矿		20~25
锦丰金矿	2~6	20

该矿山矿岩普氏硬度系数 f 为1~15,参照国内外露天转地下开采工程实例,结合矿山前期相关研究成果,边坡隔离矿柱厚度初步选择30~50 m。

4 边坡隔离矿柱最优厚度数值模拟

挂帮矿的开采与露天开采互相影响,需留设一定厚度的边坡隔离矿柱将地下采场与露天采场隔离开,在安全生产的同时保证高陡边坡和运输道路的安全。

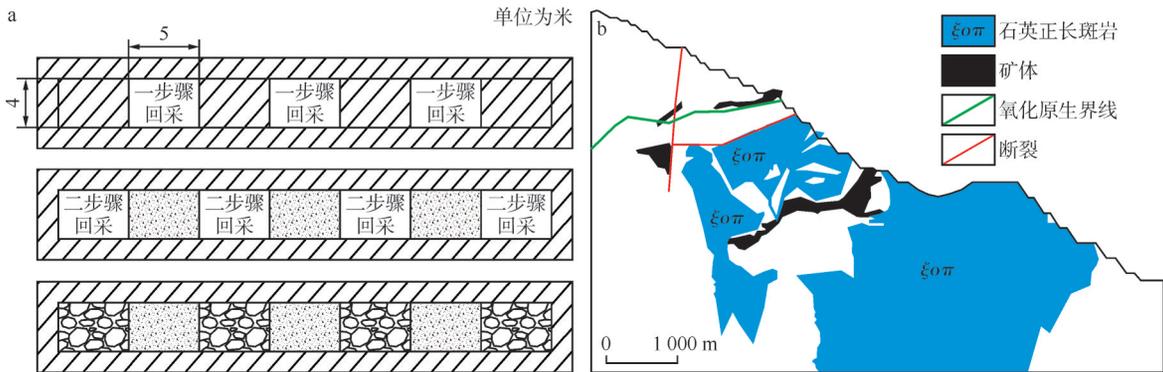


图2 开采方案和模拟方案示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of mining and simulation plans

通过模拟该矿山西北部边坡挂帮矿的开采与充填,研究原岩应力和次生应力作用下隔离矿柱与边坡采充结束后应变增量、塑性区和位移的变化规律,综合安全系数优选出西北部边坡隔离矿柱的合理厚度。在模拟开挖过程中,对采场及边坡位置生成的剪切应变增量、位移和塑性区变化进行重点监测。

4.2 计算模型建立

根据挂帮矿的分布特征,选取代表性强的 $B_1-B'_1$ 剖面进行分析,采用Surpac软件沿矿山三维矿体模型西北方向切斜剖面图,以此为基准,采用Flac^{3D}软件建立模型(见图3),模型 z 向最底部标高为1300 m,最高处标高为1924 m,高差为624 m。模型整体尺寸为1160 m×70 m×624 m($x \times y \times z$),对边坡隔离矿柱及相关位置进行重点监测。本构模型、边界条件约束及地应力的设置参照相关资料进行设置^[12]。

在经验公式计算基础上,结合前期研究成果,针对该矿山工程实际,综合考虑各种定量和定性影响因素,采用Flac^{3D}软件对挂帮矿开采隔离矿柱的厚度进行数值模拟研究,并与理论计算结果相结合,综合分析来获取挂帮矿开采时需预留隔离矿柱的最优厚度。

4.1 模拟方案

设计采用上向进路充填采矿法回采挂帮矿,矿块沿矿体走向连续布置,长度80~100 m,中段高度50 m,中段内划分为3个分段,分段高度18 m及16 m。每个分段又划分4个分层,分层回采高度4 m及4.5 m,进路宽度5 m。矿房矿柱平面交替布置,一步骤回采矿房,胶结充填一步骤采空区,之后进行二步骤矿柱回采,二步骤采空区非胶结(废石、尾砂)充填。

在理论计算的基础上,通过数值模拟手段分析预留隔离矿柱的厚度分别为30 m、40 m、45 m、50 m时采场和边坡的整体稳定性,以此来优选隔离矿柱的厚度。先选择40 m进行模拟,根据模拟结果调整模拟方案,以减少工作量,尽快确定合理厚度。开采方案和模拟方案见图2。

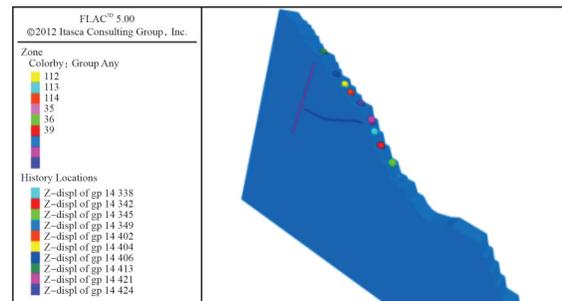


图3 西北部边坡三维主模型

Fig. 3 3D main model of NW slope

4.3 模拟结果及分析

4.3.1 剪切应变增量

不同隔离矿柱厚度下的采场剪切应变增量云图见图4。由图4可知:隔离矿柱厚度为30 m时,回采过程中和完成回采后,西北帮剪切应变增量明显集中,当KT52矿体采充结束后,受 F_{106} 和 F_{51} 断层交会的影

响,易形成整体滑移;当KT46矿体采充结束后,与西部坡顶也形成纵跨9个台阶的圆弧形滑移面,对西北

部边坡的稳定造成严重威胁。

相较于30 m隔离矿柱,隔离矿柱厚度为40 m时,

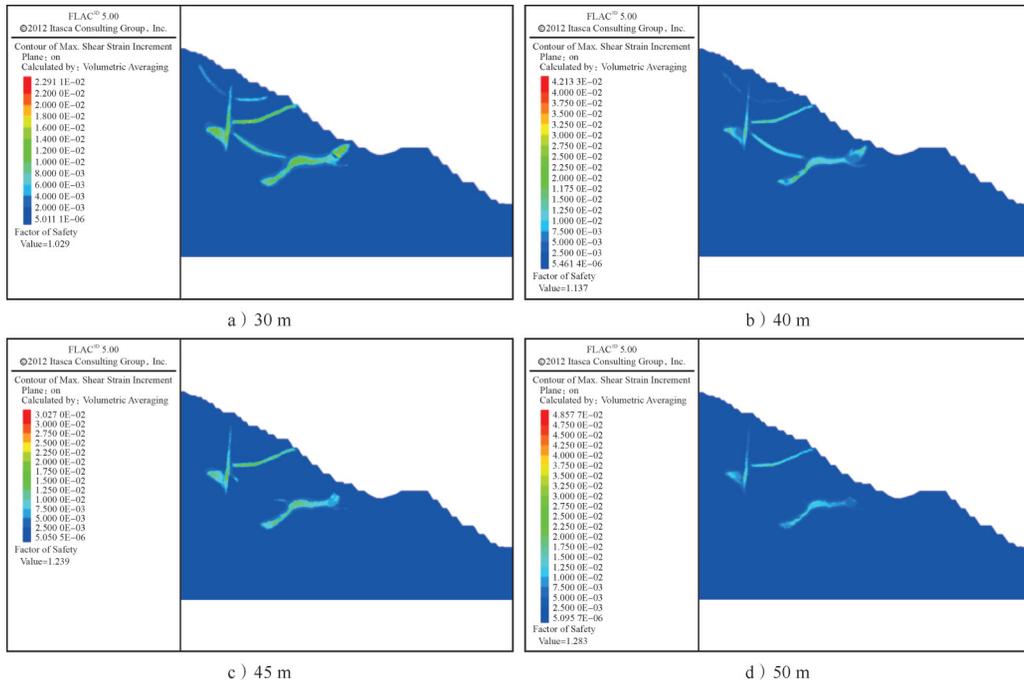


图4 各隔离矿柱厚度下采场剪切应变增量云图

Fig. 4 Cloud charts of shear strain increment in the slope for each isolation pillar thickness

剪切应变增量集中现象相对减弱,当KT46矿体采充结束后,与西部坡顶形成的剪切圆弧形滑移现象不明显;当KT52矿体采充结束后,受2条断层交会的影响,仍然形成与西北部边坡贯通的圆弧形滑移面,边坡整体稳定性急剧下降,可能诱发边坡整体失稳。

随着隔离矿柱厚度的增加,会逐渐限制滑移面的形成。矿柱厚度为45 m时,在充填体、矿岩分界位置及隔离矿柱位置形成了局部剪切应变集中现象,但会发生扩散贯通,不影响边坡的整体稳定;50 m隔离矿柱进一步限制了滑移面的产生,仅在充填体和原岩交界位置形成少量剪切应变集中。

从剪切应变增量的角度分析,隔离矿柱厚度为30 m和40 m时;边坡极易沿圆弧形滑移面发生失稳,严重威胁矿山的生产安全;隔离矿柱达到并大于45 m时,可以保持整体的稳定。因此,建议西北部边坡隔离矿柱的留设厚度应不小于45 m。

4.3.2 强度折减法的安全系数分析

在边坡稳定性分析中,最常见的一个指标是安全系数^[13]。安全系数是指一个滑面能够提供的抗滑力(力矩)与沿着这个面的实际下滑力(力矩)的比^[14]。根据GB 51016—2014《非煤露天矿边坡工程技术规范》^[15]中的相关规定,对非煤露天矿边坡安全进行分级。不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数应不小于相关工况下的规定值(见表3)。

表3 不同荷载组合下总体边坡的设计安全系数

Table 3 Designed safety coefficients of overall slopes under different load combinations

边坡工程安全等级	边坡工程设计安全系数		
	荷载组合 III	荷载组合 II	荷载组合 I
III	1.10 ~ 1.05	1.13 ~ 1.08	1.15 ~ 1.10
II	1.15 ~ 1.10	1.18 ~ 1.13	1.20 ~ 1.15
I	1.20 ~ 1.15	1.23 ~ 1.18	1.25 ~ 1.20

注:荷载组合 I 为自重+地下水;荷载组合 II 为自重+地下水+爆破振动动力;荷载组合 III 为自重+地下水+地震力。对台阶边坡和临时性工作帮,允许有一定程度的破坏,设计安全系数可适当降低。

根据图4结果,通过强度折减法计算得出安全系数,结果见表4。

表4 各隔离矿柱厚度下边坡安全系数

Table 4 Slope safety coefficients for each isolation pillar thickness

隔离矿柱厚度/m	30	40	45	50
安全系数	1.029	1.137	1.239	1.283

本文模拟分析边坡在荷载组合 I 时的稳定情况,比较不同隔离矿柱厚度下安全系数的变化规律发现:当隔离矿柱厚度为30 m、40 m时,在荷载组合 I 工况下,安全系数未达到GB 51016—2014《非煤露天矿边坡工程技术规范》要求;当隔离矿柱厚度达到并大于45 m时,安全系数处于允许范围,可以满足要求。因此,建议将隔离矿柱的厚度设计为45 m及以上。

4.3.3 塑性区分析

不同隔离矿柱厚度下采场塑性区云图见图5。由图5可知:当隔离矿柱厚度为30 m时,随着挂帮矿KT46和KT52矿体的回采,在重力应力和构造应力的作用下,受断层交会的影响,西北部边坡形成2条圆

弧形剪切破坏塑性区。一条与坡顶发生贯通,纵跨9个台阶;另一条与2条交会断层斜交,并与边坡发生贯通,坡顶区域局部发生拉伸破坏,隔离矿柱位置发生大片剪切破坏区,此时边坡及采场发生失稳。

当隔离矿柱厚度为40 m时,相较于30 m厚的隔

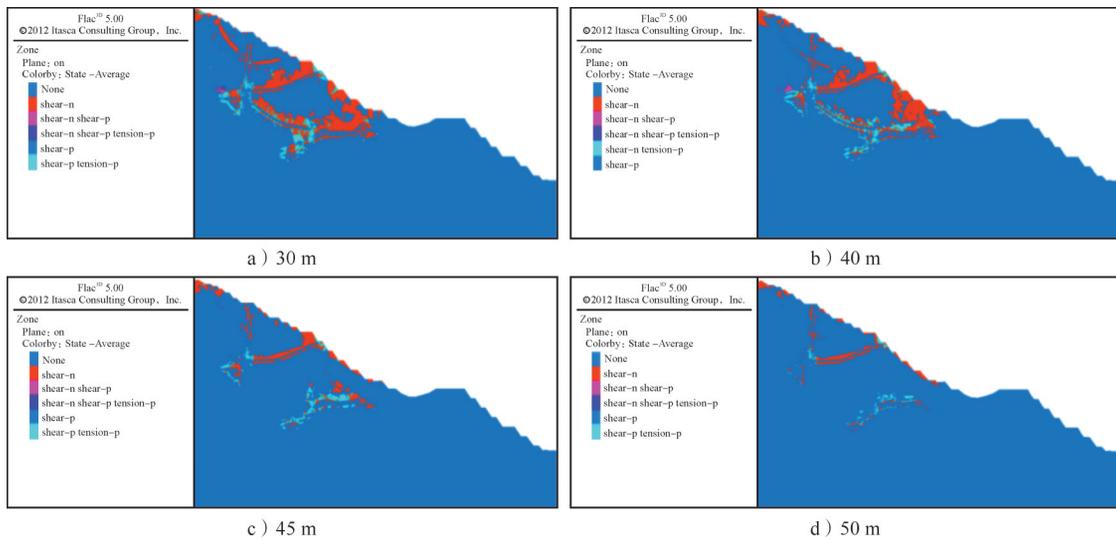


图5 不同隔离矿柱厚度下采场塑性区云图

Fig. 5 Cloud charts of plastic zones in the slope for different isolation pillar thicknesses

离矿柱,塑性区略有减少,由KT46矿体开挖引起的圆弧形塑性区不明显,但由于KT52矿体的回采仍形成贯通 F_{106} 、 F_{51} 断层和西北部边坡的剪切塑性区,边坡及隔离矿柱发生失稳;当隔离矿柱厚度为45 m、50 m时,剪切塑性区仍有向上发展的趋势,但由于受到矿柱的隔离作用,未发生贯通,周边区域的围岩仍处于弹性状态,限制了塑性区的进一步发展,采场及边坡整体稳定性良好。

从塑性区的角度分析,隔离矿柱厚度达到并大于45 m时,可以保持边坡整体的稳定。建议隔离矿柱的留设厚度 ≥ 45 m。

4.3.4 位移分析

各隔离矿柱厚度下采场位移云图见图6。由图6可知:采场位移以边坡的滑移和顶板的下沉为主。当隔离矿柱厚度为30 m时,随着挂帮矿的回采,边坡靠近隔离矿柱和顶板位置分别产生了97 mm、84 mm的位移;当隔离矿柱厚度为40 m时,边坡靠近隔离矿柱和坡顶位置产生了89 mm、80 mm的位移,远远超出岩质边坡允许的位移极限;当隔离矿柱厚度达到45 m和50 m时,受隔离矿柱的限制,边坡产生的位移骤减,最大位移为6.42 mm和3.32 mm,处于安全允许范围。

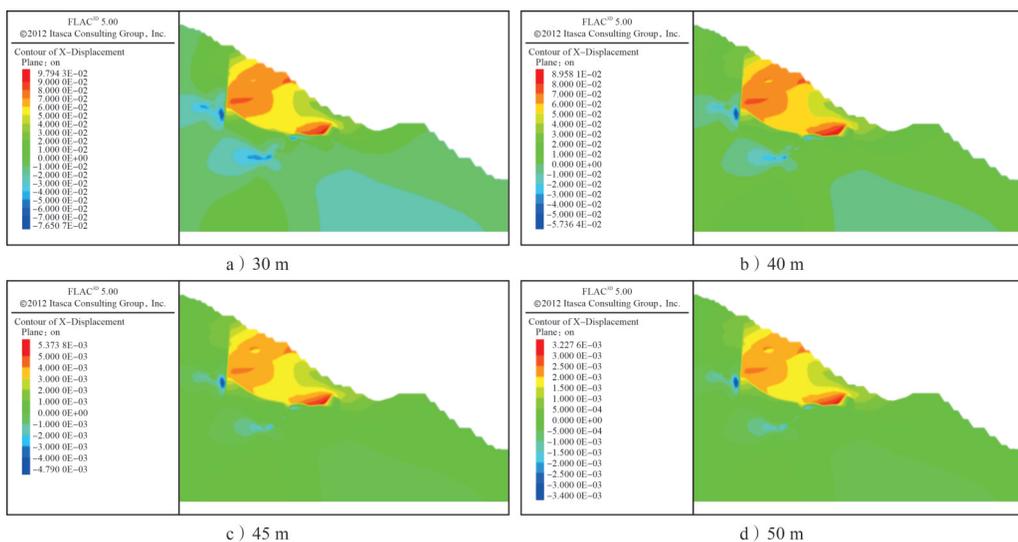


图6 各隔离矿柱厚度下采场位移云图

Fig. 6 Cloud charts of displacement in the slope for different isolation pillar thicknesses

因此,从位移的角度分析,隔离矿柱厚度达到并大于45 m时,边坡位移处于安全范围。建议隔离矿柱留设厚度 ≥ 45 m。

5 结论

1) 边坡隔离矿柱顶部为边坡斜面,基于结构力学简化梁法和类似矿山实际,提出了挂帮矿隔离矿柱的厚度,采用数值模拟方法对不同隔离矿柱厚度进行了优选。

2) 通过Flac^{3D}软件数值模拟手段,综合分析西部和西北部边坡挂帮矿回收过程中剪切应变增量、塑性区、安全系数和位移4个因素的变化情况,结合经验公式计算结果,以及前期相关研究成果,边坡隔离矿柱的合理厚度 ≥ 45 m。

[参考文献]

- [1] 王春光,吴锋,彭剑平,等.夏甸金矿隔离矿柱回采的相似材料模拟试验[J].黄金,2018,39(11):30-34.
- [2] 阚晓平,席世强,钱京.露天采场边坡下伏挂帮矿开采稳定性研究[J].采矿技术,2023,23(6):54-58.
- [3] 李得,李翠,刘磊,等.深凹露天矿山挂帮矿安全回采工艺研究及实践[J].金属矿山,2024(4):7-13.
- [4] 官长亮,孙哲申,许译心,等.露天转地下挂帮矿崩落法开采边坡安全防控技术研究[J].现代矿业,2024,40(1):115-118.
- [5] 魏大恩.露天转地下回采巷道支护形式的选择[J].采矿技术,2017,17(5):53-54.
- [6] 段永祥.石碌铁矿露天挂帮矿开采技术及工程实践[J].黄金,2020,41(12):44-48.
- [7] 谭伟,黄明清,王明.挂帮矿分段空场嗣后充填法开采及其数值模拟研究[J].采矿技术,2021,21(2):1-5.
- [8] 刘形林,陈秋松,王道林.露天坑胶结充填对挂帮矿开采稳定性影响分析[J].黄金,2022,43(2):37-43.
- [9] 尹胜,周宗红,张晶,等.地下掘进巷道富水破碎围岩锚杆支护参数优化[J].有色金属工程,2024,14(2):119-127.
- [10] 田敏,陈印.露天转地下开采境界顶柱隔离层厚度理论算法的确定[J].云南冶金,2023,52(4):26-32.
- [11] 李仲勋,安琴方,陈伟.毕节某矿采空区煤炭自燃“三带”研究[J].现代矿业,2019,35(9):75-77.
- [12] 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.
- [13] 杜昌华,宋景辉,李蕊,等.露天煤矿含断层顺倾边坡渗流与稳定性分析[J].露天采矿技术,2024,39(2):51-55.
- [14] 谢仁青,刘明淳,姜海涛,等.地震作用下露天矿节理岩质边坡稳定性数值模拟研究[J].黄金,2024,45(7):6-10.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

Study on the reasonable thickness of slope isolation pillars for transition from open-pit to underground mining

Li Shaobin¹, Zhou Zonghong², Yin Jun¹, Zhao Yanlong¹, Yin Yanlin¹, Yang Haifeng¹

(1. Heqing Beiya Mining Co., Ltd.;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology)

Abstract: A significant portion of the hanging ore surrounding a large open-pit mine, accounting for approximately 85.76% of the resource beyond the open-pit boundary, is planned to be recovered using an upward drift mining and filling method. To isolate the mutual influence between open-pit and underground mining and ensure the safety of both the steep high slopes and underground operations, it is necessary to determine a reasonable thickness for the isolation pillars between the slope and underground stopes. Due to the influence of intersecting faults, the northwestern slope area has relatively poor stability and was selected as the study area. Laboratory tests were conducted, and initial pillar thicknesses were estimated based on empirical formulas and references from similar mines. Numerical simulation was then employed for optimization. Considering overall slope stability, a reasonable and safe thickness for the slope isolation pillar was proposed. The results show that, based on simulations using the Flac^{3D} software, in combination with empirical calculations and previous research, the optimal thickness of the isolation pillar in the northwestern slope area is ≥ 45 m. These findings provide a theoretical basis and practical reference for mine design and production.

Keywords: transition from open-pit to underground; slope stability; hanging ore mining; isolation pillar thickness; numerical simulation; Flac^{3D} software