

某金矿露天转地下开采境界顶柱合理厚度研究

梁源贵¹,周宗红^{2*},侯廷凯²,黄耀春³

(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;3.云南地矿建设工程有限责任公司)

摘要:某金矿自标高1385 m以下将由露天开采转为地下开采,拟采用上向进路充填采矿法进行开采,为了避免露天与地下同时开采造成的相互影响,实现矿山生产的平稳过渡,对境界顶柱的合理厚度进行了研究。在相关室内试验的基础上,应用K. B. 鲁别涅依特公式、“三带”理论和工程类比法计算出境界顶柱的合理厚度取值范围;采用Flac^{3D}软件对不同境界顶柱厚度进行数值模拟,确定该矿山露天转地下开采境界顶柱的合理厚度。结果表明:矿山原生矿和氧化矿区域进行地下开采时需分别留设20 m和25 m的境界顶柱厚度,此时地下开采对露天边坡的影响最小且采场整体趋于稳定,能满足矿山安全生产的要求。研究结果可为矿山设计提供理论依据。

关键词:露天转地下;开采境界;顶柱;数值模拟;Flac^{3D}软件;顶柱厚度

中图分类号:TD852

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)05-0019-06

doi:10.11792/hj20240505

引言

随着露天矿开采深度的不断增加,受开采难度及经济技术条件的限制,达到临界采深后需转入地下开采^[1-2],在此过程中露天采场已形成一定高度的边坡。但是,在露天转地下协同开采期间,地下采场与露天采场共成一体,二者相互影响,如若处理不当,会对露天转地下造成重大影响。例如:露天边坡的垮塌、地下采场的失稳、露天采场的汇水造成地下采场被淹等^[3]。为了避免此类安全事故的发生,一般在地下采场和露天采场之间预留一定厚度的境界顶柱来保证露天和地下的协同开采。境界顶柱厚度的确定受矿岩稳定性影响,如果预留过厚,会降低资源利用率和企业的生产效益;预留过薄,又严重影响矿山的生产安全^[4]。因此,境界顶柱厚度的确定在露天转地下开采设计中有着重要的地位。

研究人员采用多种方法对境界顶柱的合理厚度进行了确定,大致可以分为解析法、经验法、数值计算法三类。吕冠颖等^[5-6]通过理论计算和数值模拟手段,确定矿山露天转地下开采的境界顶柱安全厚度。王作鹏等^[7]采用Flac^{3D}软件分别对某露天矿山9种境界顶柱尺寸的组合方案进行了数值分析;杨明财等^[8]采用ANSYS有限元分析软件对不同跨度的境界顶柱进行数值分析,以此确定境界顶柱的合理厚度。

某金矿露天开采服务年限预计还有10 a,需对露天转地下开采境界顶柱厚度进行研究,为后续开采设

计奠定基础。本文首先开展室内岩石力学试验确定相关力学参数,然后通过理论计算与数值模拟相结合的方式,确定采用上向进路充填采矿法开采时境界顶柱需留设的合理厚度,以保证采场整体的稳定性^[9]。

1 工程概况

该金矿位于近南北向鹤庆—松桂复式向斜南段,区内构造活动强烈,次级褶皱、断层发育。该金矿床属于喜马拉雅中晚期富碱斑岩中高温热液交代充填矽卡岩型矿床和斑岩型铁铜金多金属矿床。目前,露天采场南北长约1858 m,东西宽约1308 m,露天开采最低标高为1385 m,预计露天开采服务年限还有10 a。地下开采拟采用上向进路充填采矿法等开采。该矿山万铜山矿段56勘探线剖面图见图1。针对该矿山万铜山矿段地下矿体产状复杂多变,断层、褶皱及节理裂隙发育等复杂难采条件,在现场结构面调查、岩石力学试验基础上,进行岩体质量评价、确定岩体力学参数,确定合理的境界顶柱厚度。

2 岩体力学参数确定

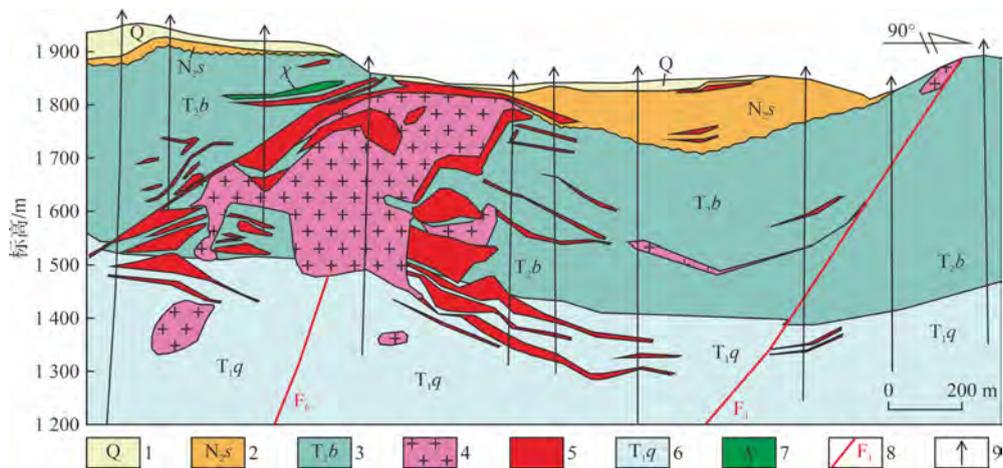
根据地质勘查资料,该矿山矿体上盘岩体主要为碳酸盐岩(灰岩),下盘主要为石英正长斑岩。为此,对相关区域进行了实地调查并取岩样,开展室内单轴抗压、抗剪及点荷载试验,最终确定碳酸盐岩(灰岩)岩体质量等级为IV—V级,原生矿和石英正长斑岩为Ⅲ级,氧化矿为V级。

收稿日期:2023-12-10;修回日期:2024-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52264019)

作者简介:梁源贵(1973—),男,高级工程师,从事采矿技术研究与管理工

*通信作者:周宗红(1967—),男,教授,博士,从事采矿与岩石力学教学和研究等方面工作;E-mail:zhou20051001@163.com



1—第四系沉积物 2—上新统三营组砂砾岩、含砂砾黏土岩 3—三叠系中统北衙组碳酸盐岩
4—石英正长斑岩 5—铁铜金多金属矿体及编号 6—三叠系下统青天堡组砂岩 7—煌斑岩 8—断层及编号 9—钻孔

图1 万洞山矿段56勘探线剖面图

Fig. 1 Profile of Exploration Line 56 in Wandongshan ore section

结合室内岩石力学试验结果,利用 Hoek - Brown 分级标准,经折减,得到了相关岩体的力学参数,结果经验公式得出岩体力学的相关参数。结合工程岩体 见表1。

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	密度/(g · cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
灰岩	2.68	3.04	0.33	0.04 ~ 0.13	0.5	38
石英正长斑岩	2.57	6.80	0.30	0.43	0.8	41
原生矿	3.80	11.17	0.25	0.32	1.3	42
氧化矿	3.69	1.20	0.36	0.01	0.1	26

3 境界顶柱厚度理论计算

3.1 K. B. 鲁别涅依特公式

K. B. 鲁别涅依特公式考虑了采空区跨度及顶柱岩体特性(强度及构造破坏特性)对安全顶柱厚度的影响,同时也考虑了采空区上方附加荷载的影响(见图2)。安全顶柱厚度计算公式^[10]:

$$h = \frac{K(0.25\rho l^2 + \sqrt{\rho^2 l^2 + 800\sigma_B F})}{98\sigma_B} \quad (1)$$

式中: h 为安全顶柱厚度(m); K 为安全系数; ρ 为顶板矿石密度,取 3.60 t/m^3 ; l 为采空区跨度(m); σ_B 为岩石单轴抗压强度(MPa), $\sigma_B = \frac{0.085\sigma_c}{K_0 K_3}$ (σ_c 为顶板强度极限,原生矿为 138.04 MPa ,氧化矿为 93.01 MPa ; K_0 为强度安全系数,2~3,取2.5; K_3 为结构削弱系数,7~10,取8),原生矿、氧化矿分别为 0.396 MPa 、 0.372 MPa ; F 为境界顶柱承受的压应力, $F = \frac{G}{2bc}$ (G 为露天采掘运输设备的重力, b 为设备宽度, c 为设备长度)。

该矿山露天开采采用 SANY 750H 4.5 m^3 型电铲,

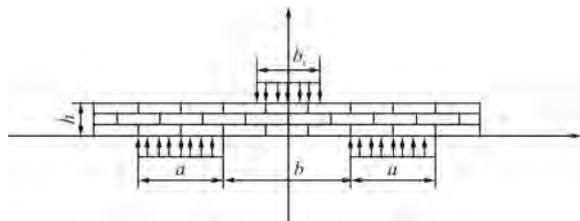


图2 K. B. 鲁别涅依特理论估算法计算模型

Fig. 2 Calculation model of K. B. Lu Peinie theoretical estimation method

其质量为 $76\ 200 \text{ kg}$,按履带接地长 4.65 m ,宽 0.65 m ,经计算可得到电铲对境界顶柱的压力为 0.252 MPa 。采空区跨度为 12 m 时,代入式(1)计算得到安全顶柱厚度为 9.53 m 。

3.2 “三带”理论

“三带”理论计算公式为:

$$h_m = \frac{h_q}{\gamma_0 - 1} \quad (2)$$

式中: h_m 为冒落带最大高度(m); h_q 为矿体铅直回采厚度(m); γ_0 为冒落矿岩平均松散系数,取 1.20 ^[11]。

回采巷道高度 4.0 m ,经计算得氧化矿等破碎带

矿体冒落带最大高度为20 m。

3.3 工程类比法

该方法是通过借鉴国内外露天转地下工程经验,综合比较工程条件的异同点后确定适宜的境界顶柱厚度取值。国内外部分露天转地下开采矿山境界顶柱厚度见表2。

表2 国内外部分露天转地下开采矿山境界顶柱厚度

Table 2 Thickness of boundary roof pillar for some domestic and foreign mines transitioning from open-pit to underground mining

序号	矿山名称	矿岩普氏硬度系数	境界顶柱厚度/m
1	蒙阴金刚石矿二矿区	4~8	20
2	石人沟铁矿	8~14	18
3	建龙铁矿	8~12	20
4	克里沃罗格铁矿	4~10	25
5	海达尔岗斯铁矿	8~12	18
6	姑山铁矿	6	22

该矿山矿岩普氏硬度系数为1~15,参照国内外

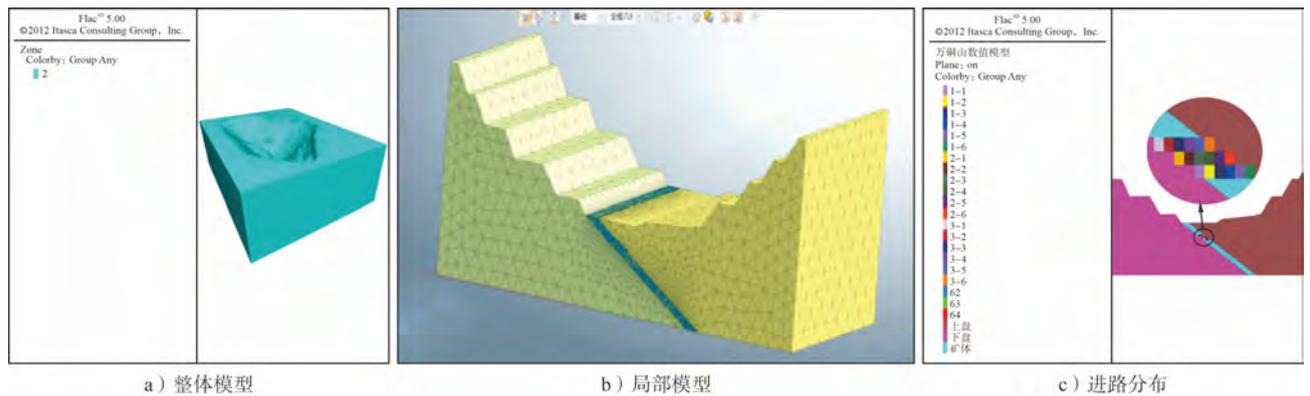


图3 采用 Flac^{3D} 软件建立的数值模型

Fig. 3 Numerical model established by the use of Flac^{3D} software

针对原生矿和氧化矿2种不同岩体质量的岩体,设计模拟方案时将二者进行区分。结合理论分析结果,设定模拟境界顶柱厚度分别为15 m、20 m、25 m、30 m时采场的稳定性,并进行优选,以达到矿山安全、经济开采的目的。进路断面尺寸遵照前期研究成果,按照隔一采一的回采顺序进行开挖,自下而上进行回采,具体断面尺寸为:氧化矿3.5 m×4.0 m,原生矿4.5 m×4.0 m。

4.2 模型属性及边界条件的设定

网格中的所有区域均定义为 Mohr - Coulomb 弹性模型^[12],模型边界采用位移约束进行限定,沿着x、y方向的位移约束均为0,z方向模型底部位移约束为0,顶部为自由边界^[13]。

4.3 地应力及初始应力场生成

同步施加重力应力和构造应力形成最终的初始应力场,采用的加载方式为梯度加载。重力应力(S_{zz})为上覆岩层及设备的自重,即:

露天转地下工程实例,其境界顶柱厚度应以20~25 m为宜。

4 境界顶柱合理厚度数值模拟

综合考虑各种定量和定性影响因素,针对该矿山的工程实际,在理论计算的基础上,采用 Flac^{3D} 软件对露天转地下开采境界顶柱厚度进行数值模拟研究,并与理论计算结果相结合,综合分析获得该矿山露天转地下开采最优的境界顶柱厚度。

4.1 计算模型的建立及模拟方案

设计地下开采采用上向进路充填采矿法,结合地质条件,该矿山地下矿体的平均水平厚度为17.1 m,倾角约30°,进路沿走向布置,长50 m。参照矿山露天采场特征,按照开挖范围的3~5倍建立模型(见图3)。其中,模型x轴垂直矿体走向,y轴沿矿体走向,z轴为竖直方向,整体尺寸为550 m×300 m×250 m。

$$S_{zz} = \rho gh_B \quad (3)$$

式中: ρ 为上覆岩层的密度(g/cm^3); h_B 为模型底部距离地表的距离(m)。

构造应力参考附近矿山的地应力测量等资料,按照式(4)进行计算:

$$\sigma_1 = 1.33 + 0.047h_B \quad (4)$$

$$\sigma_{h,max} = 0.040 1h_B + 4.236 4 \quad (5)$$

经计算,三向应力及梯度值见表3。

表3 三向应力及梯度值

三向应力	S_{XX}		S_{YY}		S_{ZZ}	
	初始/MPa	梯度/Pa	初始/MPa	梯度/Pa	初始/MPa	梯度/Pa
数值	24.286	8.06×10^4	24.286	8.06×10^4	13.4	5.36×10^4

4.4 模拟结果及分析

通过模拟该矿山深部矿体的开挖与充填,研究露天与地下采场最大主应力、最小主应力、塑性区和竖

向位移的变化规律,综合分析优选出最佳的境界顶柱厚度。

由于文本篇幅限制,本文只罗列原生矿境界顶柱厚度为 15 m、20 m 的相关云图,其余云图在此不做赘述。

1) 原生矿最大主应力云图见图 4。由图 4 可知:

各分层采充结束后,应力集中区域主要分布在临近采场的上、下盘两侧,随着分层高度的增加越来越明显。不同境界顶柱厚度下形成的最大压应力均未超出岩体的抗压强度。这表明境界顶柱及采场内未发生压裂破坏。

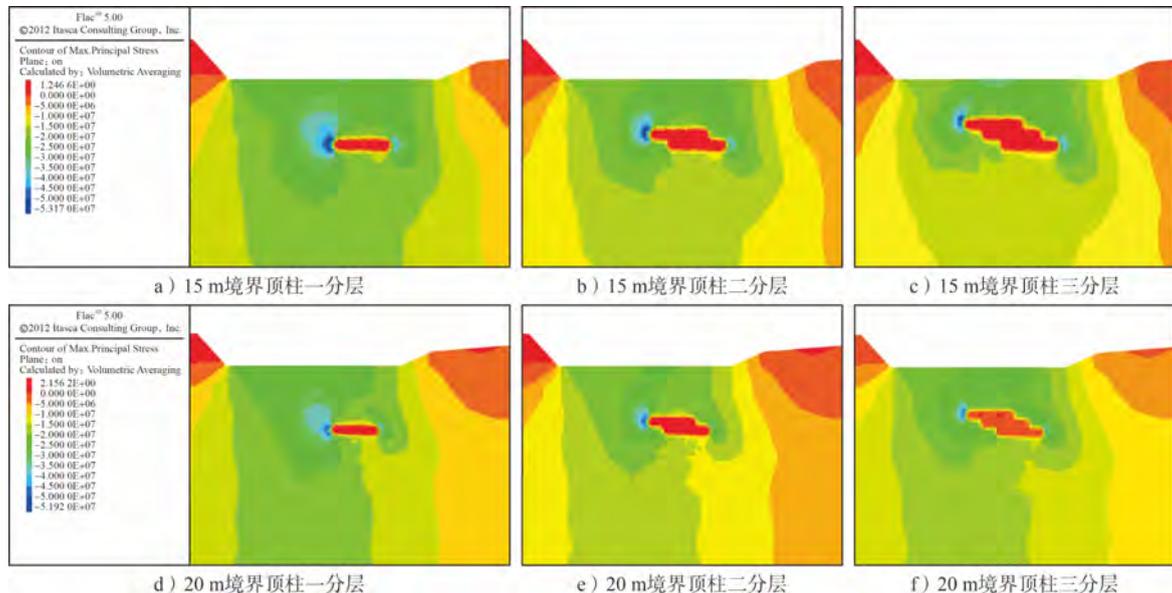


图 4 采场最大主应力云图

Fig. 4 Cloud chart of maximum principal stress in the slope

2) 原生矿最小主应力云图见图 5。将不同境界顶柱厚度下,各分层采充结束后对应的最小主应力进

行统计,结果见表 4。

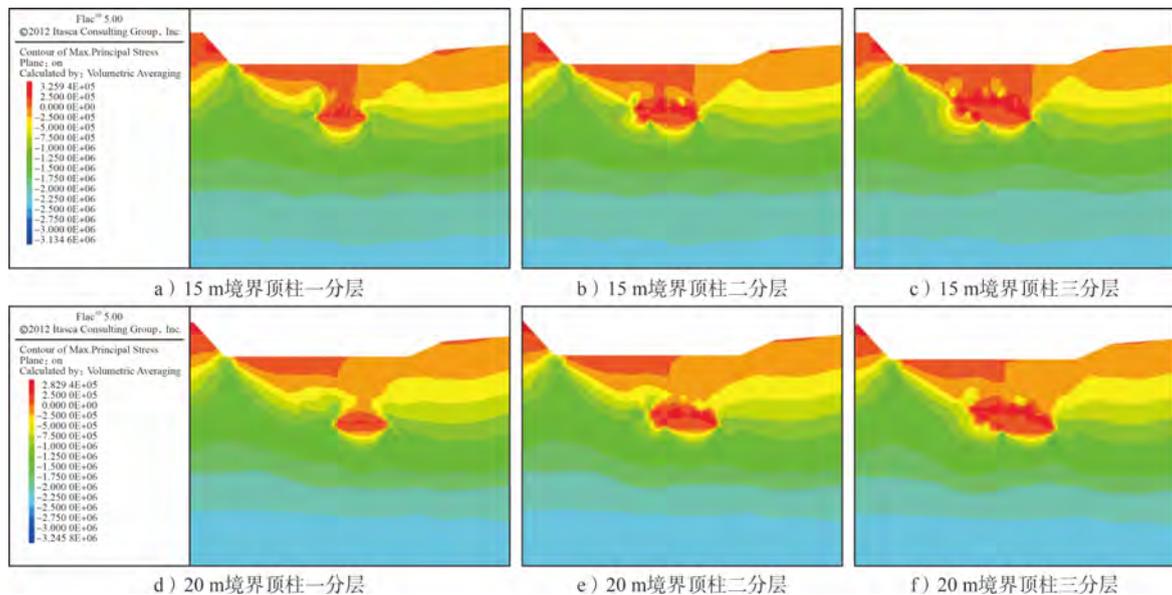


图 5 采场最小主应力云图

Fig. 5 Cloud chart of minimum principal stress in the slope

表 4 采充结束采场内最小主应力值统计结果

Table 4 Statistics of the minimum principal stress values within the slope at the end of mining and filling

境界顶柱厚度/m	15	20	25	30
最小主应力(拉应力)/MPa	0.325 9	0.282 9	0.214 7	0.143 9

由图 5 可知:当境界顶柱厚度为 15 m 时,随着工程开挖,连续 3 个分层采充结束,在进路周围及顶柱靠近地表的位置分别形成 0.325 9 MPa 的拉应力,其余位置均表现为压应力,且拉应力集中区域与地表贯通,超出岩体的抗拉强度,承压能力急剧下降,发生失

稳;境界顶柱为20 m时,采场内形成的拉应力未超出岩体的抗拉强度。从最小主应力的角度分析,建议地下开采原生矿区域时的境界顶柱厚度设置为20 m。

3)原生矿竖向位移云图见图6。由图6可知:境界顶柱厚度为20 m时,垂直走向方向进路内及顶柱

整体的位移量达到6.0~7.0 mm;境界顶柱厚度为15 m时,垂直走向方向进路内及顶柱整体的位移量达到13.6~17.2 mm;竖向位移云图显示的位移中尤以顶板的下沉为主。统计不同境界顶柱厚度下,各分层采充结束后采场内生成的竖向最大位移,结果见表5。

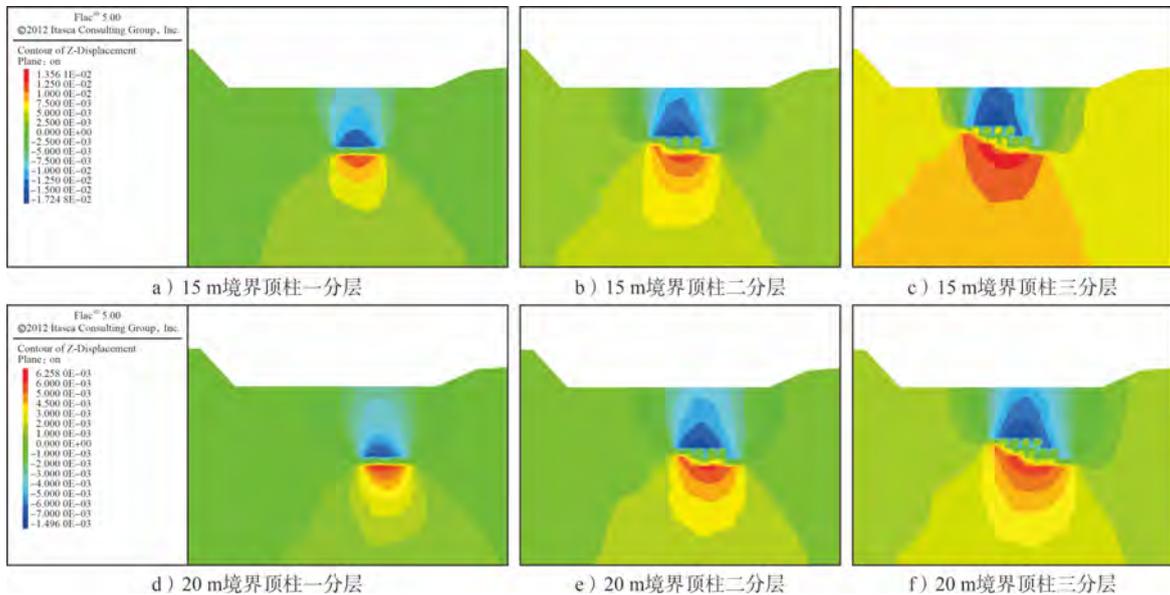


图6 采场竖向位移云图

Fig. 6 Cloud chart of vertical displacement of the stope

表5 采充结束采场内竖向位移最大值统计结果

Table 5 Statistics of the maximum vertical displacement values within the stope at the end of mining and filling

境界顶柱厚度/m	15	20	25	30
竖向最大位移/mm	17.248 0	7.049 6	6.331 9	3.962 8

4)原生矿塑性区云图见图7。通过fish语言监测塑性区体积,统计结果见表6。

将位移和塑性区体积随境界顶柱厚度的变化绘制成折线图,见图8。

原生矿进行地下开采,当境界顶柱厚度由20 m

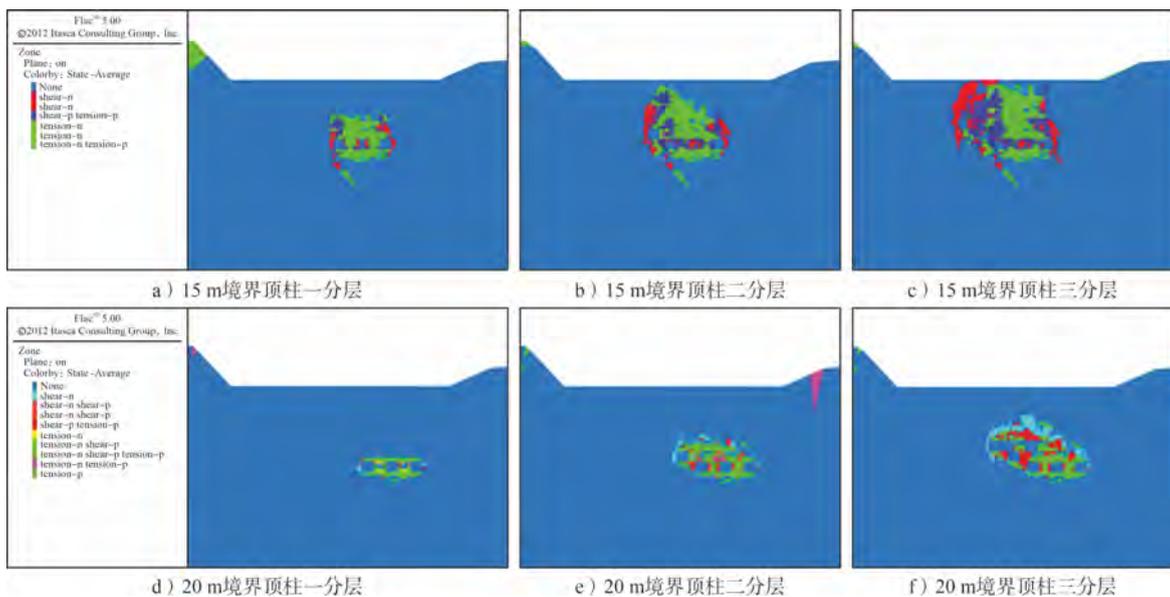


图7 各境界顶柱厚度下分步开挖采场塑性区云图

Fig. 7 Cloud chart of the plastic zone in the stope with stepwise excavation under various boundary roof pillar thicknesses

减小为15 m时,境界顶柱的塑性区和最大位移已经贯通至地表。由图8可知:随着开采工作的进行,地

下采场的塑性区体积和进路内的竖向位移均激增,从该角度分析,受重力应力及构造应力的影响,在日常

表6 垂直走向进路塑性区体积

Table 6 Volume of plastic zone in vertical approach

境界顶柱厚度/m	15	20	25	30
塑性区体积(累计)/m ³	2 749	329	529	263

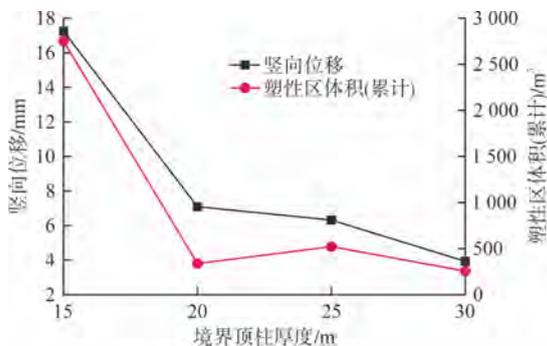


图8 竖向位移和塑性区体积随境界顶柱厚度的变化曲线

Fig. 8 Variation of vertical displacement and volume of plastic zone with boundary roof pillar thickness

生产扰动下境界顶柱的厚度达到岩体允许的极限值,发生了失稳。由此判断,顶柱承压能力急剧下降,发生了整体垮塌。

从最大主应力、最小主应力、塑性区和竖向位移的角度分析,并考虑安全系数,确定了该矿山原生矿进行地下开采时需留设的境界顶柱厚度为20 m。氧化矿区域采用数值模拟的方式,确定了留设的境界顶柱厚度为25 m。

5 结论

1) 在室内试验和现场调研基础上,采用经验公式计算得到该矿山露天转地下开采境界顶柱厚度,参

考国内外相关矿山经验,提出了合理的境界顶柱厚度。

2) 采用数值模拟方法,综合分析各境界顶柱厚度下采充结束采场形成的最大主应力、最小主应力、竖向位移、塑性区,结合理论分析最终得到该矿山境界顶柱合理厚度:原生矿20 m,氧化矿25 m。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 王静,李茂,郑树衡.某铁矿露天转地下开采技术研究[J].矿业工程,2023,21(4):16-19.
- [3] 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.
- [4] 杨洪宝,温超,姜赫名.庙沟铁矿露天转地下安全开采技术研究[J].矿业工程,2022,20(1):15-19.
- [5] 吕冠颖,何环莎,覃敏,等.崩落法转充填法采场隔离矿柱合理厚度研究[J].中国矿业,2022,31(9):95-101.
- [6] 韩新潮.露天转地下境界顶柱厚度研究[J].四川有色金属,2016(4):17-20,57.
- [7] 王作鹏,金爱兵,孙文斌,等.水砂-胶结充填隔离矿柱稳定性及宽度研究[J].金属矿山,2024(3):19-28.
- [8] 杨明财,盛建龙,刘艳章,等.基于有限元分析的露天转地下开采隔离矿柱尺寸研究[J].化工矿物与加工,2017,46(1):38-40.
- [9] 朱获天.瓮福磷矿英坪矿露天转地下境界矿柱稳定性分析[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [10] 陈印.滇西贵金属矿露天转地下开采境界顶柱厚度的研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.
- [11] 童大志,王冠男,张驰.红岭铅锌矿崩落法转充填法隔离顶柱厚度研究[J].矿冶工程,2022,42(5):5-9.
- [12] 吕冠颖,王阡,王翔,等.某铁矿深部开采水平隔离矿柱厚度优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(8):13-18.
- [13] 吴丹,王志修,于世波.甲玛多金属矿露井联采条件下露天边坡稳定性评价[J].有色金属(矿山部分),2020,72(4):7-12.

Study on the reasonable thickness of boundary roof pillars in the transition from open-pit to underground mining in a gold mine

Liang Yuanguai¹, Zhou Zonghong², Hou Tingkai², Huang Yaochun³

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

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

3. Yunnan Geological and Mineral Construction Engineering Co., Ltd.)

Abstract: A gold mine, from below 1 385 m elevation, will transition from open-pit to underground mining, intending to use the upward approach and filling mining method. In order to avoid mutual interference caused by simultaneous open-pit and underground mining and achieve a smooth transition of mine production, it is necessary to study the reasonable thickness of boundary roof pillars. Based on relevant laboratory experiments, the reasonable range of boundary roof pillar thickness was calculated using the K. B. Lu Peinie equation, three-zone theory, and engineering analogy method. Flac^{3D} software was used to numerically simulate different thicknesses of boundary roof pillars to determine the reasonable thickness for the transition from open-pit to underground mining in the mine. The results show that when underground mining is conducted in primary ore and oxide ore areas, boundary roof pillars of 20 m and 25 m respectively need to be reserved, at which point the impact of underground mining on open-pit slopes is minimized and the overall mining area tends to be stable, meeting the requirements for safe mine production. The research results can provide a theoretical basis for mine design.

Keywords: transition from open-pit to underground; mining boundary; roof pillars; numerical simulation; Flac^{3D} software; roof pillar thickness