某铁矿露天转地下开采隔离层安全厚度确定研究*

曾庆隆[1]，雷秀文[1]，杨珏[1]，吴嘉骏[2]，李杰林[2]

（1.宏大爆破工程集团有限责任公司， 湖南 长沙 410011；
2.中南大学 资源与安全工程学院， 湖南 长沙 410083）

摘要：针对某铁矿露天转地下开采工程隔离层的安全厚度问题，采用理论计算与数值模拟相结合的技术手段，分析了不同厚度隔离层条件下地下矿体回采过程对地表沉降及岩层移动情况的影响。结果表明：基于理论计算方法确定的该铁矿隔离层安全厚度范围为11.25～24.41 m；采用数值模拟方法得出了隔离层厚度为15 m、20 m、25 m时，地表构筑物、露天边坡以及排土场地表沉降位移均较小，满足岩体的稳定性评判标准；考虑矿山安全开采同时避免矿产资源损失，推荐矿山采用隔离层安全厚度为20 m。该方案实施后，预计矿山综合生产能力提升20%，安全事故率下降53%，在安全可靠性、技术可行性和经济合理性方面均有优势，为类似矿山开展露天转地下开采提供了重要参考。

关键词：露天转地下开采；隔离层厚度；理论分析；数值模拟；地表位移

中图分类号：TD861.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)06-0050-09

Determination of Safety Thickness of Isolation Layer in an Iron Mine from Open-Pit to Underground Mining

ZENG Qinglong[1], *LEI Xiuwen*[1], *YANG Jue*[1], *WU Jiajun*[2], *LI Jielin*[2]

(1.Hongda Blasting Engineering Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410011, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Aiming at the problem of the safe thickness of the isolation layer in an iron mine from open-pit to underground mining, the technical means combining theoretical calculation and numerical simulation was adopted to analyze the influence characteristics of the underground ore body mining process on the surface settlement and rock movement under the condition of different thickness isolation layers. The results show that the safe thickness of the isolation layer of the iron ore is from 11.25 m to 24.41 m based on the theoretical calculation method. The numerical simulation results show that when the thickness of the isolation layer is 15 m, 20 m and 25 m, the surface settlement displacement of the surface structures, the open-pit slopes and the dump sites are all small, which can meet the stability evaluation standard of the rock mass. Considering the safety of mining and avoiding the loss of mineral resources, the safety thickness of the isolation layer is recommended as 20 m. After the implementation of the plan, it is expected that the comprehensive production capacity of the mine will increase by 20%, the safety accident rate will decrease by 53%, it has advantages in terms of safety reliability, technical feasibility and economic rationality. The study can provides an important reference for similar mines to conduct open-pit to underground mining.

Key words: Open-pit to underground mining, Thickness of isolation layer, Theoretical analysis, Numerical simulation, Surface displacement

0 引言

矿山露天转地下开采是一项复杂的系统工程[1-2]，随着开采的逐步推进，由于矿山剥采比过大、排土场容量不足、采矿权范围限制等诸多因素，不再适合露天开采。为保障矿山生产连续性，需在露天开采阶段同步开展地下开采基建工程施工及试生产准备，通过露天与地下开采系统的协同建设，有效保

* **收稿日期**：2025-03-18
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC3090401)；长沙市自然科学基金项目(kq2402209)
作者简介：曾庆隆(1982—)，福建上杭人，工程师，主要从事矿山工程施工与管理工作。E-mail：2541996374@qq.com
通信作者：李杰林(1982—)，湖南宁远人，博士，副教授，主要从事采矿工程与矿山安全研究。E-mail：lijielin@163.com

障露天转地下开采过渡期的产能衔接[3-7]。在露天转地下开采过程中,通常会在露天采坑的底部、地下开采的顶部区域预留一部分矿体作为隔离层,用于隔离露天与地下的生产。隔离层安全厚度设计是露天转地下开采工程的关键技术问题,若隔离层过薄,易造成隔离顶柱突然间垮落,威胁井下设施及人员安全,严重时会导致矿井报废;若隔离层过厚,则会造成矿产资源的浪费,同时矿山投资成本也会相应增加[8-10]。因此,隔离层安全厚度的确定及其采动影响分析对保障上下部采场稳定性、最大限度提高资源回收利用率、实现安全开采具有重要意义。

对于隔离层厚度确定问题,近年来学者们已做了大量研究。当前隔离层厚度确定方法可归纳为半定量解析计算法及数值模拟计算法。其中常用的半定量理论计算方法包括厚跨比法、普氏拱法、平板梁法、鲁别涅伊特公式等[11-15];常用的数值模拟分析手段主要为 ANSYS、ABQUES、FLAC3D、RFPA 等有限元数值模拟软件[16-18]。董秋平等[19]、赵怀军等[20]采用 Midas GTSNX 软件建立数值模型,重点分析地下开采中隔离层的位移和应力情况,为其厚度确定提供科学的研究思路。岩小明等[21]通过理论计算和有限元分析得出隔离层安全厚度与不同空区跨度之间的关系。李元辉等[22]通过 RFPA 数值模拟软件,全面分析了唐钢石人沟铁矿预留隔离层的稳定性,并确定了隔离层的厚度。张宝等[23]、许宏亮等[24]通过 FLAC3D 数值建模确定某矿山的隔离层厚度。

现有的两类常用方法主要考虑了露天边坡稳定性、地下采场结构稳定性等采矿生产安全因素,从力学层面分析主要因素的影响,从而计算出隔离层的最小安全厚度。但实际生产中,还应考虑过渡期的产能平稳接替、地下开采工艺要求等因素对隔离层的厚度、布置形式的要求。本文综合考虑以上各种因素,采用多种理论计算方法和数值模拟法,对某铁矿露天转地下开采隔离层安全厚度进行分析,并给出了最终推荐值,对露天转地下开采隔离层安全厚度的确定具有一定的参考意义。

1 工程概况

某铁矿矿体全长 2.4 km,分 2 个采区单元,矿层埋深在 40 线以西标高均为 300 m 以上,38 线以东标高则在 300 m 以下。露天开采范围为 38～43W 勘探线、标高 452～620 m 之间的矿体,最低开采至标高 452 m,露天开采结束后转入地下开采。目前露天开采已经进入回采阶段末期。地下开采范围为东起 31W 勘探线,西至 43W 勘探线,标高 450～100 m 之间的矿体。地下矿体开采设计规模为 280 万 t/a,主要采用分段凿岩阶段出矿嗣后充填法进行开采,首采段为 370 m 阶段和 200 m 阶段。根据露天开采揭露的情况,矿层的直接顶板为含铁板岩。其浅部节理裂隙发育、松软较破碎;深部一般完整,为较坚硬的裂隙岩层。矿层的底板为斑点状角岩化板岩、绢云母板岩,岩石节理裂隙多由石英脉充填。据坑道调查资料,在无断裂构造破坏的条件下,矿层顶底板、岩层强度大、硬度高,完整性、稳固性较好。

该铁矿前期大规模的露天开采活动已经对露天边坡以及坑底岩体造成了应力扰动,并在坡体内部形成了潜在滑动面。进入地下开采后,地下开挖可能引起地表形变,进一步破坏原本稳定的应力场,给露天边坡稳定与地下采场安全带来了严峻的挑战。因此,开展露天转地下开采隔离层安全厚度研究,对开采影响范围内的边坡隐患灾害进行分析,可以为矿山设计提供基础数据,有效提升露天转地下开采矿山的安全生产水平。

2 隔离层厚度理论计算

现有隔离层稳定性分析方法涵盖荷载传递交汇线法、厚跨比法、结构力学简化梁法、K.B.鲁别涅依特公式法、普氏拱理论法等。结合该矿山实际情况,选取了以上 5 种理论计算方法,计算得到了该铁矿的隔离层厚度,见表 1。

由表 1 可知,基于多种理论方法计算得到的隔离层厚度范围在 11.25～24.41 m 之间。由于理论计算分析往往只针对单个采场或区域进行,并且对计算模型进行了简化处理,采用以上不同的理论计算方法所获得的隔离层厚度值差距较大。为进一步确定隔离层厚度的合理取值,将采用数值计算方法,综合考虑各种定量和定性影响因素,对隔离层进行数值分析,以便获取该铁矿露天转地下开采隔离层的合适厚度值。

表 1 隔离层厚度理论计算值

Table 1 Theoretical calculation values of isolation layer thickness

计算方法	计算公式	安全系数	隔离层厚度 H/m
荷载传递交汇线法	$H=\frac{KB}{2\tan\beta}$	1.5	17.32
厚跨比法	$\frac{H}{KB}=0.5$	1.5	11.25
结构力学简化梁法	$\sigma_{许}=\frac{M}{\omega}=\frac{(\gamma h+q)W^2}{2bh^2}$ $H=\frac{KB}{4}\times\frac{\gamma B+\sqrt{\gamma^2B^2+8\sigma_{许}q}}{\sigma_{许}}$	1.5	15.49
K.B.鲁别涅依特公式法	$\sigma_{nd}=\frac{\sigma_d}{K_1K_2}$ $H=K\times\frac{0.25\gamma B^2+(\gamma^2B^2+800\sigma_{nd}q)^{\frac{1}{2}}}{98\sigma_{nd}}$	1.5	24.41
普氏拱法	$f=\frac{\sigma_c}{10}$ $H=\frac{0.5W+h\tan\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)}{f}$	1.5	18.87

注：H 为隔离层厚度；K 为安全系数；B 为采场跨度；β 为顶板中心线与荷载传递线夹角，通常可选取为 30°～35°；此处计算时取 33°；M 为弯矩；ω 为抗弯截面系数；γ 为隔离层容重；h 为采场高度；$\sigma_{许}$ 为顶柱岩体的抗拉强度；q 为隔离层外载荷，露天采矿主要考虑设备的自重载荷；W 为力臂；σ_{nd} 为顶板强度在弯曲条件下的极限；K_1 为强度安全系数，取值范围一般为 2～3；K_2 为结构削弱系数，取值范围一般为 7～10，主要由岩石特性（坚固性、岩石裂隙特点等）所决定；σ_d 为弯曲条件下的岩石强度极限，取值范围为 7%σ_c～10% σ_c；由于该铁矿的岩体坚硬、致密，成层稳定，采用压力拱公式计算更为合适，φ 为内摩擦角；f 为普氏系数；σ_c 为单轴抗压强度。

3 数值模型构建及监测线布置

3.1 数值模型构建

根据矿山工程平面布置图，采用 FLAC3D 有限元数值模拟软件构建包括矿体、排土场、最终露天开采境界以及岩层模型，岩层根据实际地质地形图划分为板岩、硅质板岩以及花岗岩。矿体及主要分析区域网格尺寸设置为 4～24 m，为减轻边界对计算的影响，将边界扩大至原来的 3 倍，扩展区域为 40～60 m。模型底部采用三向位移固定约束，四周采用水平位移约束并固定轴向位移，顶部设置为自由面。在自重应力下平衡初始地应力，不考虑其他构造应力的作用。数值模型如图 1 所示。

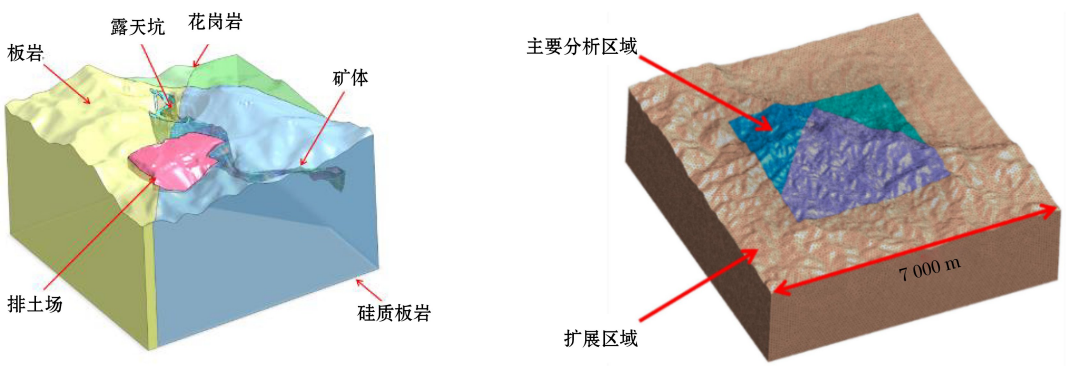


图 1 数值模型

Fig.1 Numerical model

根据隔离层厚度的理论计算结果，分别设计 15 m、20 m 以及 25 m 三种不同的隔离层厚度计算方案。对三种不同隔离层厚度条件下的地下矿体开采数值模拟结果进行分析，确定最优隔离层厚度，实现矿山安全经济开采。

3.2 数值计算参数确定

为了简化计算模型，在建立初始模型时仅考虑矿山岩体中的几种主要岩性，分别为矿山边坡、矿体、围岩及充填体等。将充填体、矿体及围岩看作理想弹塑性材料，因此本次模拟采用摩尔-库仑本构模型。对板岩、花岗岩、矿体等矿山典型岩性开展现场取样并结合室内岩石力学试验，对岩石力学参数进行了折减处理，获得了岩体物理力学参数，见表 2。

表 2 数值模型材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of numerical model materials

材料名称	容重/(g/cm³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
板岩	3.30	12.55	5.33	35.1	2.86	1.52	0.26
硅质板岩	2.64	14.26	6.13	36.2	2.88	1.21	0.26
花岗岩	2.57	15.61	6.21	37.2	2.86	1.48	0.26
矿体	2.80	12.16	6.51	35.4	3.25	1.62	0.27
充填体	1.96	0.26	0.16	29.8	0.61	0.26	0.21

3.3 地下开采方案设计

该铁矿地下采场设计宽度为 15 m,走向长度为 90 m,6 个采场为一个盘区,盘区间留设 15 m 间柱;阶段高度为 80～100 m,阶段标高分别为 370 m、280 m、200 m、100 m。370 m 阶段为首采段,最低生产运输中段为 100 m。地下矿体开采区域划分如图 2 所示。为了进一步确定隔离层的可靠性,计算过程中将不建立中段顶底柱以及间柱,以便分析得出最危险工况的开采扰动结果。计算过程对回采和充填过程进行适当简化,各回采步骤如下:

步骤 1,回采 200 m 中段(200～280 m)并充填;

步骤 2,回采 370 m 中段(370～432 m)并充填;

步骤 3,回采 280 m 中段(280～370 m)矿体并充填;

步骤 4,回采 100 m 中段(100～200 m)矿体并充填;

步骤 5,回采 100 m 中段以下矿体并充填。

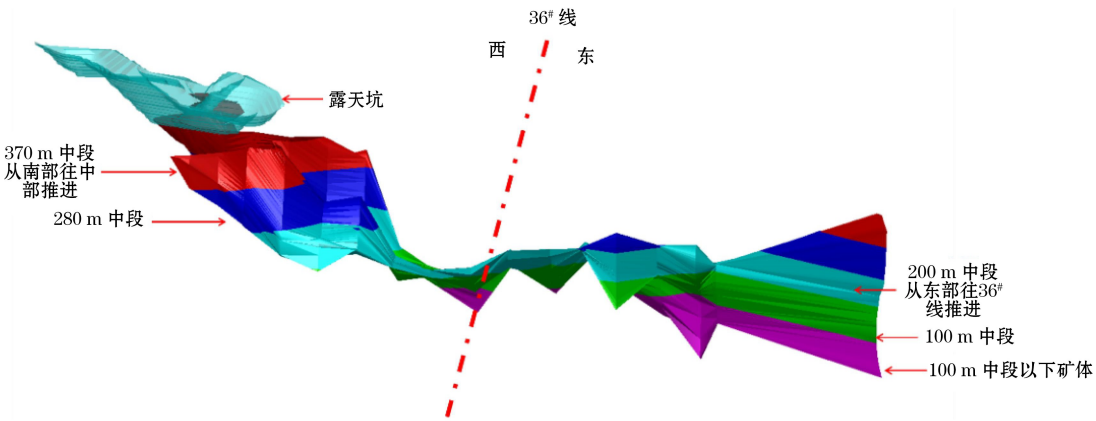


图 2 矿体开采区域划分

Fig.2 Division of mining area for ore body

3.4 监测线布置

考虑到该铁矿露天转地下开采隔离层主要保护的区域为露天边坡及其周边区域,根据矿区地形图设置了 3 条监测线,对不同隔离层厚度条件下开采的地表稳定性进行分析,分别为 1# 监测线、2# 监测线以及 3# 监测线,对露天坑底、南坡及北坡 X、Y、Z 三个方向的位移进行监测,监测线布置如图 3 所示。

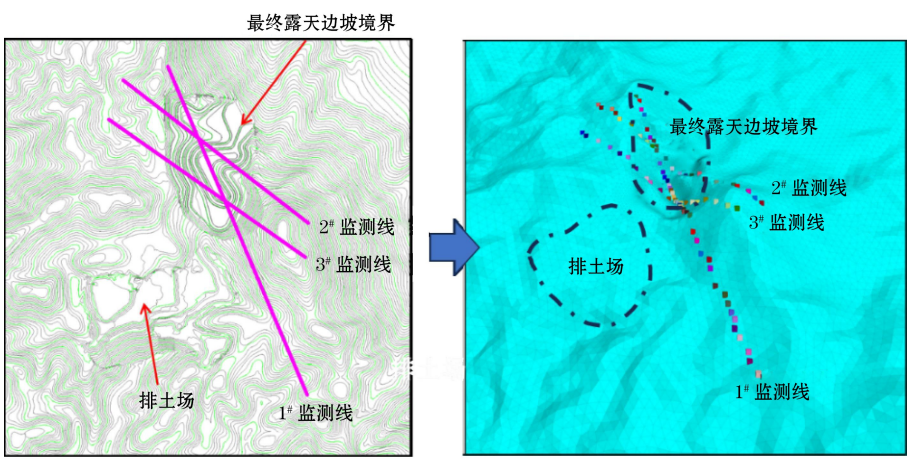


图 3 监测线布置

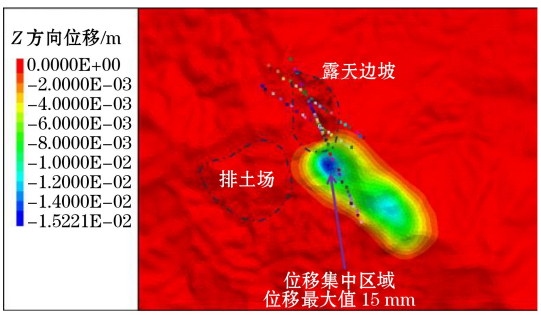
Fig.3 Layout of monitoring lines

4 数值模拟结果及分析

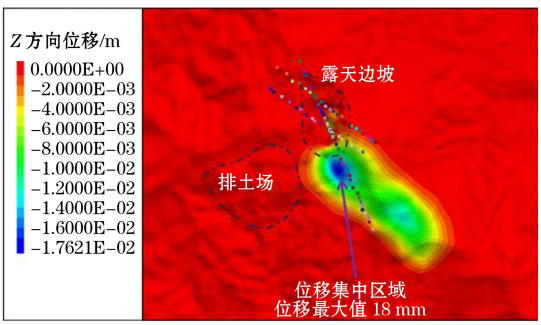
地下矿体开采引起的岩体和地表移动与变形一般采用的指标是:位移场变化、倾斜变形率、曲率、水平变形。根据设计规范将位于隔离层上方的地表边坡、构筑物设为Ⅰ级保护。Ⅰ级保护的岩移指标斜率、曲率以及水平变形分别为:斜率 $i=\pm 3$ mm/m、曲率 $k=\pm 0.2\times 10^{-3}$ m^{-1}、水平变形 $\varepsilon=\pm 2$ mm/m。

4.1 沉降位移分析

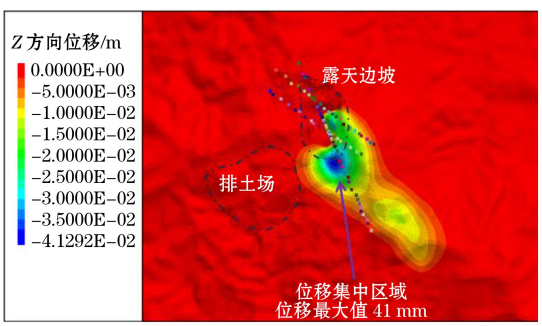
当隔离层厚度分别为 15 m、20 m、25 m 时,地表及 3 条监测线位移云图基本相似,故仅展示隔离层厚度为 15 m 时的地表沉降位移云图(如图 4 所示)。总结各工况下开采位移云图可以看出,开采引起的地表位移主要集中在露天边坡南部区域,而对露天坑底及排土场产生的开采扰动影响较小。



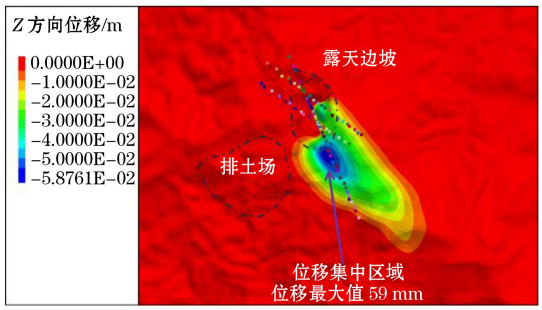
(a) 200 m 中段开采并充填



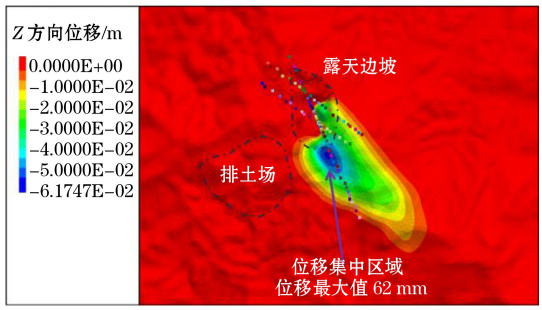
(b) 370 m 中段开采并充填



(c) 280 m 中段开采并充填



(d) 100 m 中段开采并充填



(e) 100 m 中段以下矿体开采并充填

图 4 隔离层厚度 15 m 时不同回采步骤的地表沉降位移

Fig.4 Surface settlement displacement at different mining steps when the thickness of the isolation layer is 15 m

由图 4 可知,当 200 m 中段开采并充填后,最大沉降位移为 15 mm,此时 3 种隔离层厚度下的 2# 监测线最大沉降位移均未影响至地表;当 370 m 中段开采并充填后,最大沉降位移为 18 mm;当 280 m 中段开采并充填后,最大沉降位移为 41 mm;当 100 m 中段开采并充填后,最大沉降位移为 59 mm;当 100 m 中段以下开采并充填后,最大沉降位移为 62 mm。

对开采后不同隔层厚度条件下的不同监测线位移进行统计,如图 5 所示。

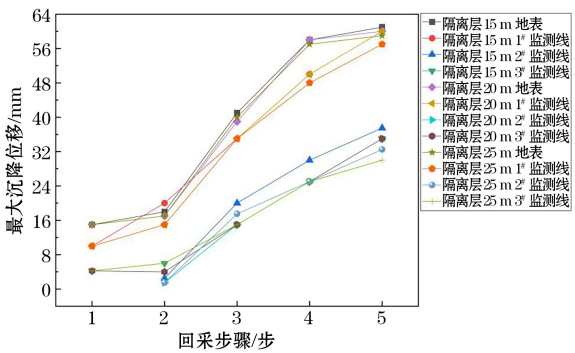


图 5 不同隔离层厚度条件下各监测线沉降位移

Fig.5 Settlement displacement of each monitoring line under different thicknesses of isolation layer

由图 5 可知，不同隔离层厚度条件下的各监测线沉降位移随开采矿房增多而增大，且隔离层厚度为 15 m 时，地表、1# 监测线、2# 监测线、3# 监测线沉降位移值均大于隔离层厚度 20 m、25 m 时各监测线的沉降位移。

4.2　岩层移动指标分析

以隔离层厚度为 15 m、1# 监测线的岩层移动指标计算结果（见图 6）为例进行分析。监测数据表明，X 方向（东西向）最大水平变形量为 0.120 mm/m，Y 方向（南北向）为 0.15 mm/m，地表变形斜率最大值为 0.308 mm/m，地表变形曲率最大值为 0.006 4×10^{-3} m^{-1}。根据稳定性判据标准，可认为地表岩层移动各项指标均符合规范要求，满足岩体的稳定性评判标准。

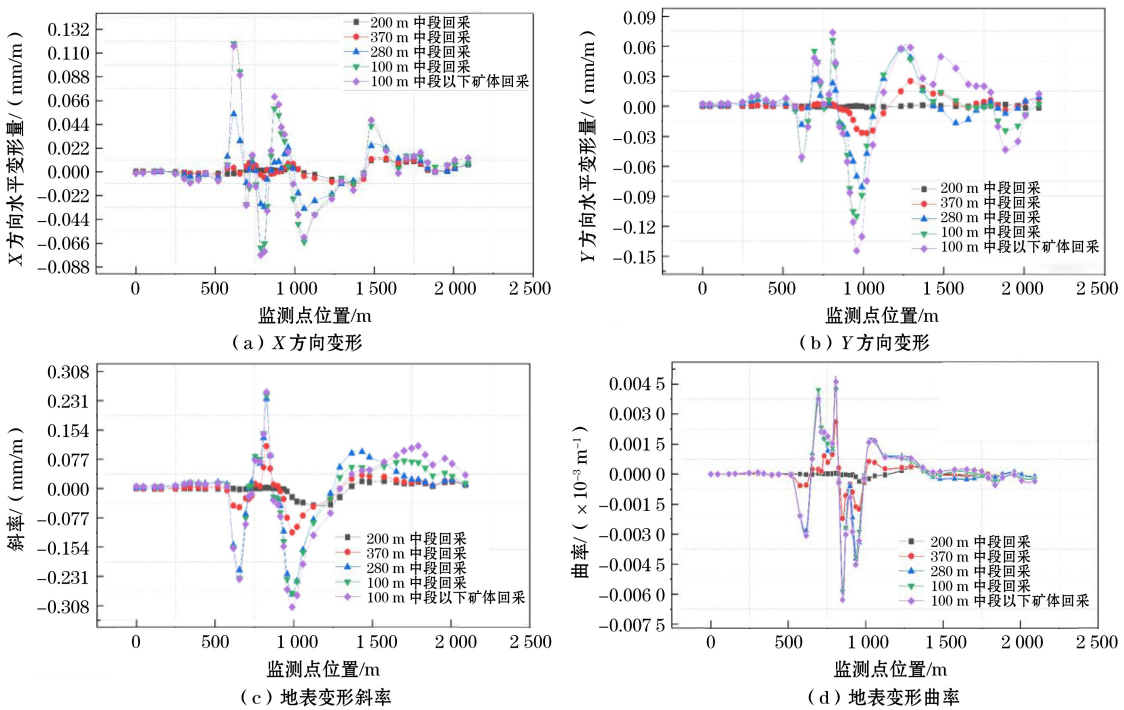
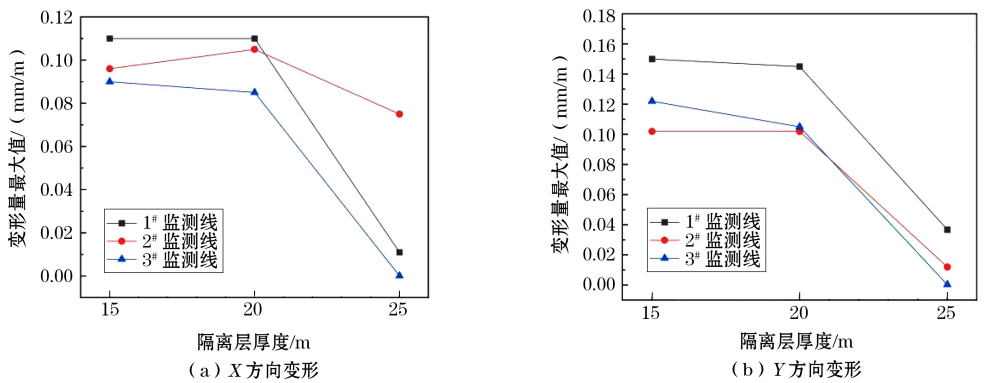


图 6　隔离层厚度 15 m 时 1# 监测线岩层移动指标

Fig.6　Rock mass movement index of 1# monitoring line when the isolation layer thickness is 15 m

对不同隔离层厚度下各监测线 X 方向（东西向）的水平变形量最大值、Y 方向（南北向）的水平变形量最大值、地表变形斜率最大值及地表变形曲率最大值进行统计，结果如图 7 所示。由图 7 可以看出，X 方向（东西向）与 Y 方向（南北向）最大水平变形量分别为 0.11 mm/m 和 0.15 mm/m，地表最大变形曲率达 0.006×10^{-3} m^{-1}，均出现在隔离层厚度 15 m 时 1# 监测线处。而在隔离层厚度 15 m 时 2# 监测线处的地表变形斜率值最大，为 0.348 mm/m。根据稳定性评判标准，可认为岩层移动各项指标均符合《有色金属采矿设计规范》（GB 50771—2012）要求，满足岩体的稳定性评判标准。综上所述，隔离层厚度为 15 m、20 m 和 25 m 时，地表岩层移动各项指标均符合规范要求。



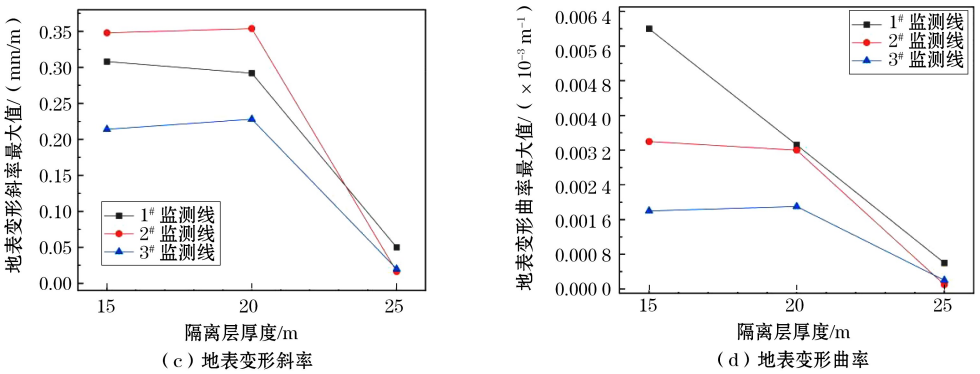


图 7 不同隔离层厚度岩层移动指标

Fig.7 Movement index of rock mass with different thicknesses of isolation layer

4.3 理论计算与数值计算结果综合分析

采用理论方法计算得出的隔离层厚度范围在11.25～24.41 m之间,而数值计算结果表明,隔离层厚度为15 m、20 m以及25 m时,地表变形指标均符合Ⅰ级保护规范需求。参照《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)要求,考虑地下开采后地表构筑物、露天边坡以及排土场等设施若发生破坏将造成严重的损失,Ⅰ级保护应设置不小于20 m的隔离层厚度,因此推荐该铁矿露天转地下开采的隔离层厚度设置为20 m。当隔离层厚度选取20 m时,矿山应重视和加强对露天边坡南部、露天坑底部的安全监测工作,必要时在地下开采过程中对露天坑实施封闭处理,确保矿山安全生产。

5 工程应用效果分析

为评估隔离层安全厚度推荐值的可靠性,对国内外类似矿山的隔离层厚度设置情况进行统计分析[25-26],以评估本研究结果的合理性,结果见表3。

表 3 国内外类似矿山隔离层厚度设计情况

Table 3 Design of isolation layer thickness in similar mines at home and abroad

矿山名称	矿岩普氏系数	采空区跨度/m	隔离层厚度/m
姑山铁矿	—	—	18
凤凰山铁矿	8～12	—	7～10
霍各庄矿	7～12	—	36.2
金山店铁矿	—	12～21	30
石人沟铁矿	8～14	—	16～22
铜山铜矿	6～12	—	10
归来庄金矿	6～12	—	10
攀钢朱兰铁矿	8～16	15～18	30
维什涅沃戈尔矿山	12～14	—	10～15
依也尔多雅克夫斯基矿山	14～16	—	10
海达尔岗斯基矿山	—	25～30	15～30
依叶尔雅可夫斯基矿山	—	15～20	15～25
克里沃罗格铁矿	—	15～25	20～30
柴亮诺夫斯基矿区	—	25～30	15～20

通过表3可以看出,采空区跨度多数处于15～30 m,隔离层厚度设置普遍大于15 m。前苏联学者在关于隔离层厚度确定上总结得出结论[26]:当矿岩普氏系数介于5～12时,隔离层的厚度必须等于或者大于矿房的净跨度。根据地质资料可知,该铁矿的矿岩普氏系数为7～12,设计采场宽度为15～20 m,因此通过类似矿山的统计结果分析,可以认为该铁矿设计的隔离层厚度值在合理范围内。推荐该铁矿露天转地下开采的隔离层厚度设置为20 m,并在露天边坡南部、露天坑底部进行了安全监测工作,有效保障了露天转地下开采的安全稳定性,可实现露天转地下两种采矿工艺的产能衔接与互补,为矿山露天转地下开采提供了可靠技术支撑。该方案实施后,预计矿山综合生产能力提升20%,安全事故率下降53%,在安全可靠性、技术可行性和经济合理性方面均有优势。

6 结论

(1) 采用荷载传递交汇线法、厚跨比法、结构力学简化梁法、鲁别涅伊特公式、普氏拱理论法5种半定量研究方法,计算得出隔离层厚度分别为17.32 m、11.25 m、15.49 m、24.41 m、18.87 m。

(2) 采用FLAC3D数值模拟软件对15 m、20 m、25 m不同隔离层厚度下的开采过程进行了分析,对比不同隔离层厚度下地表沉降及岩层移动情况,结果表明:隔离层厚度为15 m、20 m以及25 m时,地表变形指标均符合Ⅰ级保护规范要求。

(3) 考虑到开采后地表构筑物、露天边坡以及排土场等设施若发生破坏将造成严重的损失,Ⅰ级保护应设置不小于20 m的隔离层厚度,推荐该铁矿露天转地下开采的隔离层安全厚度为20 m。该铁矿的矿岩普氏系数为7～12,设计采场宽度为15～

20 m,通过分析国内外类似矿山露天转地下隔离层厚度值,论证了该推荐值的可靠性。该方案实施后,预计矿山综合生产能力提升 20%,安全事故率下降 53%,在安全可靠性、技术可行性和经济合理性方面均有优势。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 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.

[3] 岩小明,李夕兵,李地元,等.露天开采地下矿室隔离层安全厚度的确定[J].地下空间与工程学报,2006(4):666-671.
YAN Xiaoming, LI Xibing, LI Diyuan, et al. Determination of boundary pillar's safety thickness of open pit mining with underground goaf[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006(4):666-671.

[4] 卢宏建,高永涛,吴顺川,等.石人沟铁矿露天转地下开采生产规模优化[J].北京科技大学学报,2008(9):967-971.
LU Hongjian, GAO Yongtao, WU Shunchuan, et al. Production capacity optimization of Shirenqou Iron Mine during turning open pitinto underground mining[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2008(9):967-971.

[5] 陆广,罗周全,刘晓明,等.露天转地下开采隔层厚度安全分析[J].采矿与安全工程学报,2011,28(1):132-137.
LU Guang, LUO Zhouquan, LIU Xiaoming, et al. Safety analysis of interlayer thickness from open pit to underground mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2011,28(1):132-137.

[6] 卢萍,张金梁,杨泽,等.某铜矿露天转地下隔离矿柱的确定研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(6):11-14+19.
LU Ping, ZHANG Jinliang, YANG Ze, et al. Study on determination of isolated pillars during transition from open pit to underground mining in a copper mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2020,72(6):11-14+19.

[7] 路增祥,孟凡明,蔡美峰.露天转地下开采的平稳过渡方案与技术措施[J].中国矿业,2012,21(11):91-94.
LU Zengxiang, MENG Fanming, CAI Meifeng. Research on schemes and technical measures for steady transition of mining from open-pit to underground mine[J]. China Mining Magazine,2012,21(11):91-94.

[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-pit to underground mining of an iron mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(7):1-6.

[9] 徐帅,安龙,李元辉,等.基于多方法联合的露天转地下境界矿柱厚度优化[J].东北大学学报(自然科学版),2018,39(8):1181-1186.
XU Shuai, AN Long, LI Yuanhui, et al. Multi-method based optimization of crown pillar thickness from open pit to underground [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2018,39(8):1181-1186.

[10] 闭进忠,王平,陈聪.某矿露天转地下顶柱安全厚度研究[J].有色金属(矿山部分),2013,65(4):8-11.
BI Jinzhong, WANG Ping, CHEN Cong. Study on safety thickness of top pillar in transferring from open pit to underground mining [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2013,65(4):8-11.

[11] 周科平,苏家红,古德生,等.复杂充填体下矿体开采安全顶板厚度非线性预测方法[J].中南大学学报(自然科学版),2005(6):1094-1099.
ZHOU Keping, SU Jiahong, GU Desheng, et al. The nonlinear forecasting method of the least security coping the ickness when mining under complex filling body[J]. Journal of Central South University,2005(6):1094-1099.

[12] 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 duringthe transition from open pit to underground mining[J]. Metal Mine,2015(10):41-45.

[13] 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.
TIAN Min, CHEN Yin. Confirmation on theoretical algorithms of isolation layer thickness of top pillar for underground mining realm transferred from open-pit[J].Yun Nan Metallurgy,2023,52(4):26-32.

[14] 陈尚桥,黄润秋.基础下浅埋洞室安全顶板厚度研究[J].岩石力学与工程学报,2000(增刊 1):961-966.
CHEN Shangqiao, HUANG Runqiu. A study on safety thickness of shallow buried cavities under foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000(Suppl.1):961-966.

[15] 李九红,杨菊生.岩体损伤-弹塑性非线性有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2000(6):707-711.
LI Jiuhong, YANG Jusheng. The elasto-piastical nonlinear fem analysis on rock damage[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2000(6):707-711.

[16] 梁立腾.铁多金属矿露天转地下开采隔离矿柱参数优化[J].世界有色金属,2024(13):88-90.

LIANG Liteng. Optimization of parameters for isolation pillars in a certain iron mine converted from open-pit to underground mining[J]. Nonferrous Metals,2024(13):88-90.

[17] 张良兵,毛德华,李杰林,等.朱兰铁矿深部急倾斜厚大矿体回采顺序优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):26-31.
ZHANG Liangbing, MAO Dehua, LI Jielin, et al. Study on mining sequence optimization of deep steeply inclined large and thick ore body in Zhulan Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2023,43(3):26-31.

[18] 陈涛,冷建勇,罗少琛,等.露天转地下矿山崩落法转充填法开采隔离矿柱优化[J].采矿技术,2024,24(3):77-82.
CHEN Tao, LENG Jianyong, LUO Shaochen, et al. Optimization of mining isolation pillars from open-pit to underground mine collapse method to filling method[J]. Mining Technology,2024,24(3):77-82.

[19] 董秋平,徐浩,周科平,等.攀枝花铁矿尖山地采保安矿柱回采结构参数优化[J].采矿技术,2022,22(5):9-14.
DONG Qiuping, XU Hao, ZHOU Keping, et al. Optimization of mining structure parameters of Jianshan mining security pillar in Panzhihua Iron Mine[J]. Mining Technology,2022,22(5):9-14.

[20] 赵怀军,林逸晖,蔡君.落凼矿露井联采境界矿柱合理厚度研究[J].采矿技术,2023,23(3):98-105.
ZHAO Huaijun, LIN Yihui, CAI Jun. Study on reasonable thickness of boundary pillar in open-pit combined mining of Luodang Mine[J].Mining Technology,2023,23(3):98-105.

[21] 岩小明,李夕兵,郭雷,等.露天地下开采隔离层稳定性研究[J].岩土力学,2007(8):1682-1686+1690.
YAN Xiaoming, LI Xibing, GUO Lei, et al. Stability of boundary pillar of open pit and underground mine.[J]. Rock and Soil Mechanics,2007(8):1682-1686+1690.

[22] 李元辉,南世卿,赵兴东,等.露天转地下境界矿柱稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2005(2):278-283.
LI Yuanhui, NAN Shiqing, ZHAO Xingdong, et al. Stability of boundary pillars for transition from open pit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005(2):278-283.

[23] 张宝,陈绍民,皇甫风成,等.群空区下厚矿体高阶段空场嗣后废石充填法回采应用研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):38-47.
ZHANG Bao, CHEN Shaomin, HUANGFU Fengcheng, et al. Application of high-level open stoping with subsequent waste rock filling mining method for thick ore body under group goaf[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):38-47.

[24] 许宏亮,杨天鸿,朱立凯.司家营铁矿Ⅲ采场露天转地下境界顶柱合理厚度研究[J].中国矿业,2007(4):74-76+80.
XU Hongliang, YANG Tianhong, ZHU Likai. The studying on reasonable thickness of the boundary pillar during transferring open-pit into underground mining in Ⅲ stope of Sijiaying Mine[J]. China Mining Magazine,2007(4):74-76+80.

[25] 范富泉.露天转地下自然隔离矿柱厚度的优化研究[D].沈阳:东北大学,2020.
FAN Fuquan. Optimization study on thickness of natural isolation pillar from open pit to underground pit[D]. Shenyang:Northeastern University,2020.

[26] 孙明伟,金海春,朱晨迪,等.崩落法转充填法隔离层安全厚度研究[J].采矿技术,2024,24(6):71-76.
SUN Mingwei, JIN Haichun, ZHU Chendi, et al.Study on safety thickness of isolation layer from caving method to filling method[J].Mining Technology,2024,24(6):71-76.