露天转地下纵向分区开采的水平隔离矿柱厚度优化*

巩瑞杰[1],叶会师[2],张杰[3],马强英[4],路增祥[4],李角群[4]

(1.河北钢铁集团滦县司家营铁矿有限公司, 河北 唐山市 063009;
2. 河北钢铁集团司家营研山铁矿有限公司, 河北 唐山市 063009;
3.中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
4.辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山市 114051)

摘要:司家营铁矿露天转地下开采工程为实现1 500万t/a的采矿生产能力,采用了纵向分区开采方式,上、下采区之间需留设水平隔离矿柱。为提高矿区开采的整体稳定性,采用FLAC3D数值模拟方法,研究了5种不同厚度水平隔离矿柱内的应力场演化特征、变形破坏发展规律和隔离矿柱厚度对露天坑地表沉降变形的影响,最终确定了该矿水平隔离矿柱的安全厚度为18 m。结果表明:(1) 随水平隔离矿柱厚度的增大,矿柱内集中应力显著减小,最大主应力分布趋于均匀,拉应力分布范围显著减小,主要分布在开采盘区的采场部位;(2) 水平隔离矿柱内位移随着矿柱厚度的增加呈现出明显的非线性递减变化规律,较大位移产生于矿柱靠近矿体上盘的位置,当矿柱厚度为18 m时,最大位移为36.2 mm;(3) 矿柱内塑性区体积随着水平隔离矿柱厚度的增大呈非线性减小的趋势,当矿柱厚度为16 m时,塑性区不再连通,而当矿柱厚度达到18 m时,仅在局部出现少量塑性破坏,隔离矿柱处于安全状态;(4) 露天坑表面的变形沉降量随矿柱厚度的增大逐渐减小,最大位移产生的部位与隔离矿柱发生最大位移的部位一致,当矿柱厚度为18 m时,露天坑表面沉降量为10.8 mm,稳定性良好。

关键词:露天转地下开采;纵向分区开采;水平隔离矿柱;安全厚度;稳定性

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0060-09

Thickness Optimization of Horizontal Isolated Pillar in Vertical Zonal Mining from Open-Pit to Underground

GONG Ruijie[1], *YE Huishi*[2], *ZHANG Jie*[3], *MA Qiangying*[4], *LU Zengxiang*[4], *LI Jiaoqun*[4]

(1.Luanxian Sijiaying Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Tangshan, Hebei 063009, China;
2.Sijiaying Yanshan Iron Mine Co., Ltd., Hebei Iron and Steel Group, Tangshan, Hebei 063009, China;
3.China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
4.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, Liaoning 114051, China)

Abstract: To achieve the mining production capacity of 15 million tons per annum for the transition of open-pit to underground mining project of Sijiaying Iron Mine, the vertical zonal mining method was adopted, and a horizontal isolated pillar was required between the upper and lower mining areas. For improving the overall stability of the mining area, FLAC3D numerical simulation method was used to investigate the evolution characteristics of the stress field, the development law of deformation and failure, and the influence of the horizontal isolation pillar thickness on the surface settlement deformation of the open pit under five different thicknesses. Finally, the safety thickness of horizontal isolated pillar in this mine was determined to be 18 m. The results are concluded as follows. Firstly, with the increase of the thickness of the horizontal isolation pillar, the concentrated stress in the pillar decreases significantly, the distribution of the maximum principal stress tends to be uniform, and the distribution range of tensile stress decreases significantly, mainly in the stope part of the mining panel. Secondly, in the horizontal isolated pillar, the displacement presents an obvious nonlinear decreasing change law with the increase of the pillar thickness. The larger displacement occurs at the position where the pillar is close to the hanging wall of the orebody. When the pillar thickness is 18 m, the maximum displacement is 36.2 mm. Thirdly, the volume of the plastic zone in the pillar shows a

* **收稿日期**:2024-12-17
基金项目:河钢集团有限公司重点科技项目(HG2023215)
作者简介:巩瑞杰(1983—),男,河北霸州人,高级工程师,主要从事金属矿床开采方面的技术与管理。E-mail:425329952@qq.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

nonlinear decreasing trend as the thickness of the horizontal isolation pillar increases. When the pillar thickness is 16 m, the plastic zone is no longer connected. In comparison, when the pillar thickness reaches 18 m, only a small amount of plastic failure occurs locally, and the isolated pillar is in a safe state. Finally, the deformation and settlement amount of the open pit surface gradually decreases with the increase of the thickness of the horizontal isolated pillar, and the position where the maximum displacement occurs is the same as the one where the maximum displacement occurs in the isolated pillar. When the pillar thickness is 18 m, the surface settlement amount of the open pit is 10.8 mm, indicating a good stability.

Key words: Transition from open-pit to underground mining, Vertical zonal mining, Horizontal isolated pillar, Safety thickness, Stability

0 引言

金属矿山深部资源开采过程中,地下开采引起的地表沉陷是采矿工程中具有挑战性的问题之一[1]。一方面,留设一定厚度的水平隔离矿柱,能够起到隔离矿山深部与浅部的开采、调节应力分布、减少或控制地表岩移的作用,提高矿区的整体稳定性[2];另一方面,留设水平隔离矿柱可以实现矿床纵向分区开采,通过增加矿山生产采场的数量来提高矿石产量。但是,隔离矿柱在采动影响下能否保持稳定,对矿山安全高效开采及资源的最大限度回收具有重要影响[3-4]。

对于隔离矿柱的厚度确定及其稳定性分析,国内外学者结合不同的安全稳定影响因素进行了大量研究,从不同角度建立了隔离矿柱厚度确定方法,提出了稳定性研究思路[5]。如 K.B.鲁别涅依塔公式、B.И.波哥留波夫公式、普氏拱理论、经验类比法等。近年来,围绕解决具体工程实践问题,李夕兵等[2]基于内蒙古某铅锌矿崩落法转充填法开采的水平隔离矿柱的留设,采用中厚板理论计算得到了该矿隔离矿柱的安全厚度为 20 m,并利用 FLAC3D 软件分析验证了隔离矿柱留设厚度的合理性。吕冠颖等[6]采用弹性小薄板理论分析方法,结合 Phase2 二维数值模拟验证,确定了某铁矿崩落法转充填法开采时,不同勘探线位置的水平隔离矿柱厚度为 12～26 m。程纬华[7]基于厚板理论,研究了露天与地下联合开采多应力场联合作用下,隔离矿柱的受力与稳定性问题,构建了双剪强度准则下隔离矿柱的安全系数表达式,为隔离矿柱最小厚度的确定提供了新方法。王文军等[8]采用理论分析、数值模拟和物理仿真试验相结合的方法,研究了某铅锌矿采空区下方预留隔离矿柱的承载机制,结果表明,预留隔离矿柱厚度为 25 m 时,其安全性较好。吕冠颖等[9]采用数值模拟方法,研究了某铁矿一、二期开采水平隔离矿柱的稳定性问题,并确定矿柱的厚度应不小于 20 m。王平等[10]研究了大冶铁矿崩落采场和充填采场之间,非均匀充填体上方设置的水平隔离矿柱在后期回采中引发的安全问题。任赛等[11]在研究某铀矿山上下分区同时开采的水平隔离矿柱留设厚度时,通过正交试验,发现隔离矿柱临界尺寸与矿柱抗拉强度、充填体高度、矿柱埋深和回采跨度之间存在较大的相关性,并得出了隔离矿柱安全厚度的计算公式。为实现在沙漠特厚风砂层下采用崩落法安全高效开采铁矿石资源,乔登攀等[12]提出了留设水平矿柱隔离风砂层与矿体的方案,结果表明,分段空场嗣后充填法开采跨度为 10 m 时,留设 20 m 厚的水平隔离矿柱能够保证矿柱的稳定性。张晋军[13]采用经验公式和工程类比法,研究了谦比希铜矿充填法转崩落法(－700 m 水平)开采时,水平隔离矿柱留设的安全稳定性,并结合生产实际提出了保障矿柱稳定性的措施和建议。董凯程等[14]采用数值模拟方法,研究了某矿山下中段大直径深孔阶段空场嗣后充填法开采扰动下,上部水平隔离矿柱的稳定性问题,认为首采中段留设厚度为 18 m 的隔离矿柱能够满足开采时的稳定性要求。张宝等[15]研究了采用高分段大直径深孔空场嗣后废石充填法开采群空区下厚矿体时的采场结构参数,及其对隔离矿柱和上部群空区稳定性的影响,认为在矿房长为 40 m、间柱宽为 10 m、阶段高为 75 m 时,25 m 厚的水平隔离矿柱能够保证采空区的稳定。苏成哲等[16]基于单元安全度理论,研究了某铜锌矿由崩落法开采向充填法过渡时,不同方案下隔离矿柱的顶板位移和单元安全度变化情况,发现隔离矿柱留设厚度大于 12 m 时,能够满足矿柱的稳定性要求。徐中华等[17]采用理论计算与数值模拟方法,确定了李官集铁矿－320 m 中段隔离矿柱厚度不低于 23 m 时,可保证隔离矿柱整体处于稳定状态。

上述研究成果为各种情形下的水平矿柱留设厚度确定及其稳定性研究,提供了良好的解决方案和借鉴经验。然而,由于矿山开采环境的特殊性、工程

地质体的多变性、采矿工程结构的复杂性和对安全高效开采的迫切性,水平隔离矿柱厚度的确定与稳定性分析仍是矿山地下开采急需解决的问题之一。隔离矿柱的留设对矿山安全生产具有重要影响,通过布置一定厚度的隔离矿柱可以保障露天与地下开采同时正常运行。若隔离矿柱过薄,会对井下生产带来极大安全隐患,隔离矿柱太厚,又会造成矿产资源的严重浪费[17-18]。司家营铁矿露天转地下工程受矿区开采环境限制,对地表沉降控制要求较高,因而选用了空场嗣后充填采矿。为满足 1 500 万 t/a 设计生产能力,通过在－480 m 标高以下留设一定厚度的水平隔离矿柱,将一期开采工程范围划分为上、下两个采区进行开采。因此,确定合理的水平隔离矿柱厚度,成为保证矿区安全高效开采和最大限度回收资源的难题之一。基于这一问题,本文拟采用数值模拟方法,确定该矿纵向分区回采方案水平隔离矿柱留设的最佳厚度,并研究其稳定性问题,以期为矿山的设计与生产提供指导。

1 露天转地下开采设计概况

司家营铁矿矿区东侧有滦河流经,西侧地表有平青乐公路通过,不具备平面扩界的条件,需转入地下开采方式以回收其深部资源。为减少露天转地下工程的初期基建投资和缩短基建时间,设计部门根据该矿的矿体赋存情况和矿体勘探的可靠程度,以充分考虑地下矿山达产的时间,实现产量合理衔接和优先开采高级别储量矿体为原则,从降低露天转地下工程初期开拓深度的角度出发,推荐了以－780 m 标高为界,将－780 m 以上矿体确定为一期开采范围,将－780～－960 m 之间矿体确定为二期开采范围。

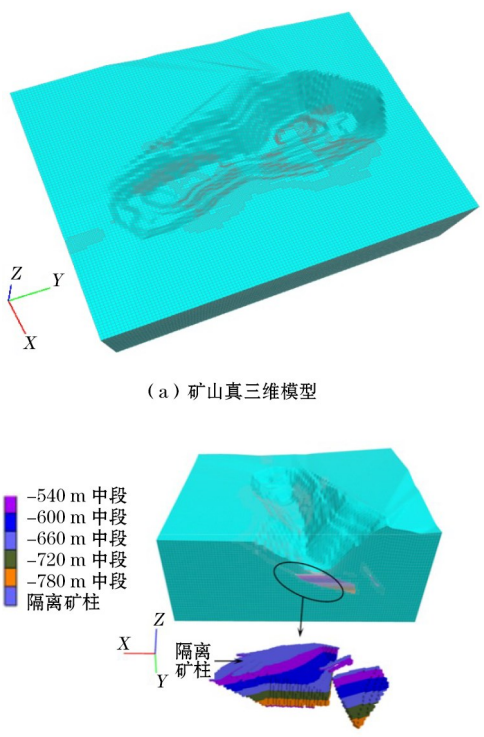
为确保开采地下矿石时地表建、构筑物不受破坏,对中厚以上矿体,采用了分段(或阶段)空场嗣后充填采矿法,即将矿体沿走向划分盘区,盘区长度 120 m,宽为矿体水平厚度,分段高 30 m(阶段高度 60 m),盘区间柱宽 20 m;矿块(采场)宽 20 m,采场长度为 50 m,垂直走向布置。回采时,以盘区为单元,一步采矿房按隔一采一、二步采矿房按隔三采一的顺序进行回采。

为实现 1 500 万 t/a 的采矿生产能力,设计对一期开采范围内的矿体,推荐采用上、下采区同时回采的方式。其中,上采区开采－120～－480 m 之间的矿体,下采区开采－480～－780 m 之间的矿体,中段高度 60 m,各采区均采用自下而上的开采顺序。考虑到开采的安全性问题,设计在上、下采区之间(－480～－490 m),设置高度为 10 m 的水平隔离矿柱。

2 真三维实体模型构建及开采方案

－480 m 以下留设的水平隔离矿柱是司家营铁矿地下开采上、下采区之间的关键衔接部分,隔离矿柱的留设厚度影响着地下开采的安全性和对矿产资源回收的有效性。因此,采用数值模拟分析方法,分析与优化上、下采区之间水平隔离矿柱的留设厚度,对司家营铁矿的安全高效采矿和控制地表沉降有重要意义。

采用 FLAC3D 软件建立矿山真三维模型,模型主要包括矿体、采场、间柱、隔离矿柱、围岩、充填体等。数值模拟计算模型在 X 方向上的长度为 3 150 m,Y 方向长度为 4 200 m,Z 方向高度为 1 500 m,共划分为 2 175 208 个单元,矿山真三维模型如图 1(a)所示,矿体三维模型如图 1(b)所示。



(a) 矿山真三维模型

(b) 矿体三维模型

图 1 数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation models

根据所建立模型的特点,结合司家营铁矿矿体和围岩的基本条件,矿体和围岩材料均采用摩尔-库仑模型作为本构模型。模型底部采用固定约束,约束三向位移,四周根据地应力分布特征施加应力

边界条件,模型顶部为地表(自由边界)。对模型施加梯度应力边界,并对模型整体施加重力场,即在 Z 轴负方向施加重力加速度,大小为 9.81 m/s^2。结合应力边界条件和重力加速度,利用程序自动解算达到平衡,从而形成初始应力场。

根据矿山前期岩体力学研究结果和充填体力学试验结果,模拟计算采用的矿岩和充填体力学性质参数见表 1。

表 1 矿岩和充填体的力学性质参数

Table 1 Parameters of mechanical properties of ore-rock mass and backfill

项目	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg/m^3)
矿体	12.80	23.0	2.00	12.00	46.68	3 163
围岩	9.40	15.7	2.10	6.00	34.48	2 700
充填体	0.23	0.3	0.23	0.27	36.87	1 450

数值模拟计算过程中对回采和充填过程作适当简化,矿体自下而上依次开采,盘区长度 120 m、间柱宽度 20 m,共计五步:第 1 步,回采和充填−780～−720 m 中段矿房;第 2 步,回采和充填−720～−660 m 中段矿房;第 3 步,回采和充填−660～−600 m 中段矿房;第 4 步,回采和充填−600～−540 m 中段矿房;第 5 步,分别回采−540 m 至−490 m、−492 m、−494 m、−496 m、−498 m(即水平隔离矿柱厚度依次为 10 m、12 m、14 m、16 m、18 m)中段矿房,最后进行充填,开采顺序如图 2 所示。

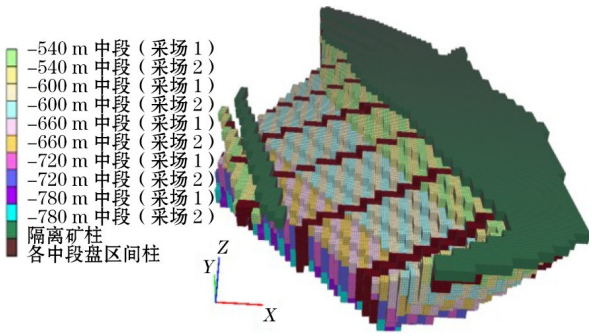


图 2 开采顺序

Fig.2 Mining sequence

根据标高位置对隔离矿柱进行划分,取隔离矿柱的中部水平剖面,分析地下矿体回采对隔离矿柱应力场、位移场的影响。

3 水平隔离矿柱的稳定状态分析

为研究水平隔离矿柱的稳定性,分别对 10 m、12 m、14 m、16 m 和 18 m 五种不同厚度的隔离矿柱进行数值模拟计算。

3.1 水平隔离矿柱应力场分析

3.1.1 最大主应力分布

图 3 为 5 个回采阶段开采完成后,不同厚度的隔离矿柱在水平剖面上的最大主应力分布情况。

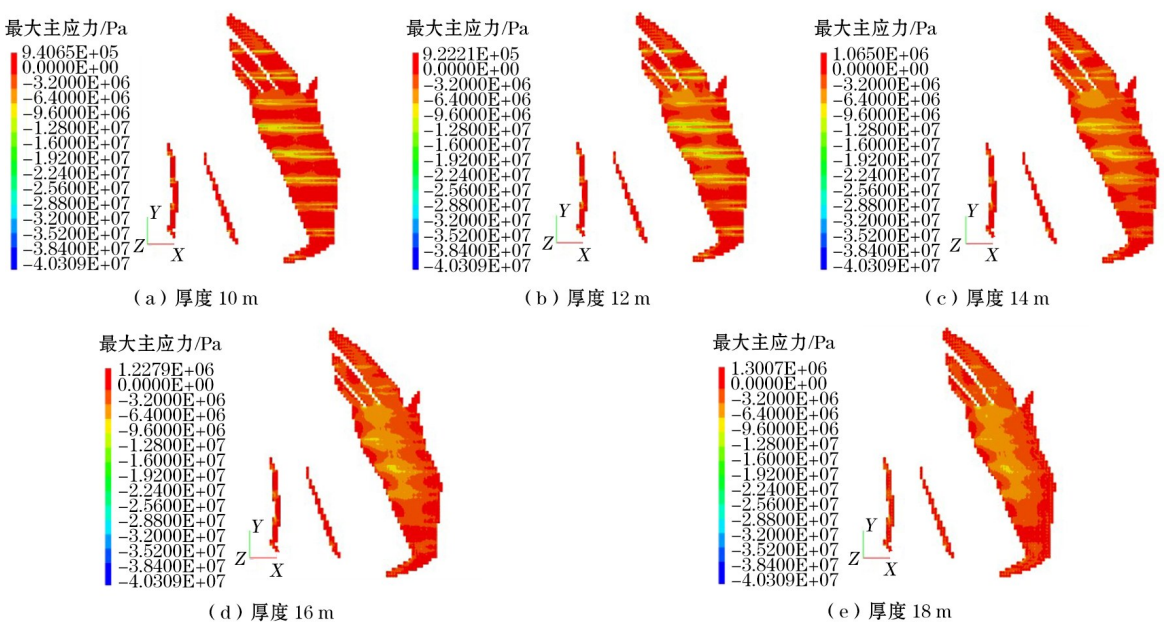


图 3 不同厚度隔离矿柱水平剖面的最大主应力分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of maximum principal stress in horizontal sections of isolated pillars with different thicknesses

分析图 3 可知,随着水平隔离矿柱厚度的逐渐增大,隔离矿柱内部集中应力显著减小,应力分布更为均匀,矿柱内部集中应力均在 40 MPa 以内。

3.1.2 最小主应力分布

图 4 为开采完成后,不同厚度的隔离矿柱在水平剖面上的最小主应力分布情况。

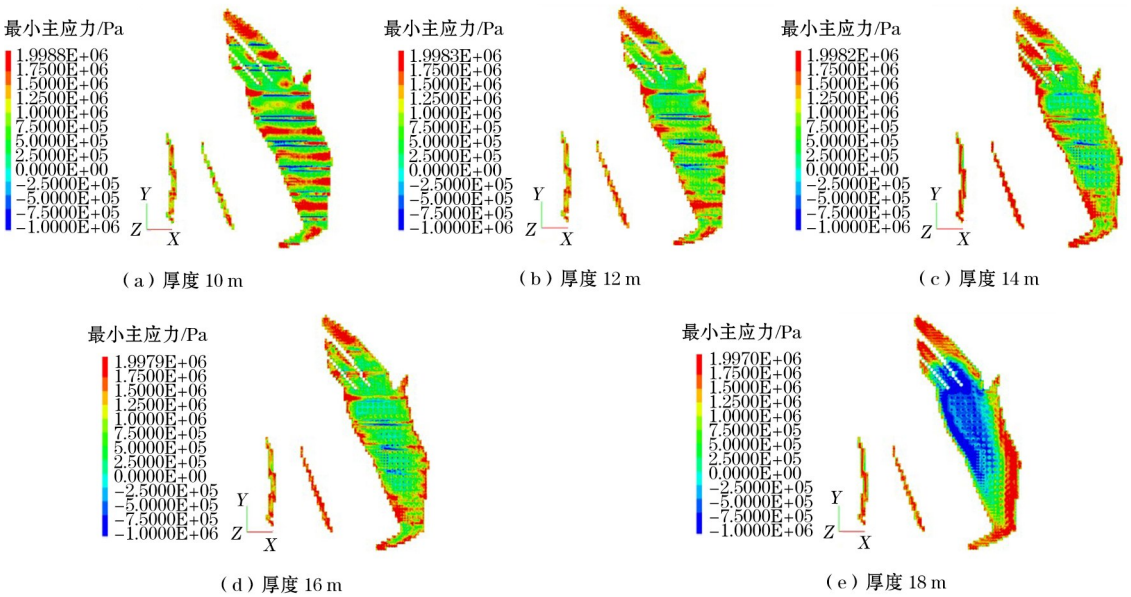


图 4 不同厚度隔离矿柱水平剖面的最小主应力分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of minimum principal stress in horizontal sections of isolated pillars with different thicknesses

分析图 4 可知,不同厚度的水平隔离矿柱内,拉应力的最大值主要分布在开采盘区的采场区域,且均未超过 2 MPa。由于盘区间柱为主要的承载结构,其上部岩层受力多为压应力,拉应力值随着隔离矿柱厚度的增大具有微弱减小的趋势,且拉应力值分布范围显著减小,隔离矿柱水平剖面中的拉应力向压应力转变。因此,开采盘区采场上部岩层拉应力减小甚至消失,并与盘区间柱一同承担着上部的岩层荷载。

3.2 水平隔离矿柱变形破坏特征分析

3.2.1 水平隔离矿柱的位移变化特征

为研究上、下采区回采结束后,不同厚度水平隔离矿柱的变形破坏特征,通过数值模拟,得到了厚度分别为 10 m、12 m、14 m、16 m 和 18 m 的水平隔离矿柱内岩层的位移变化情况,如图 5 所示。

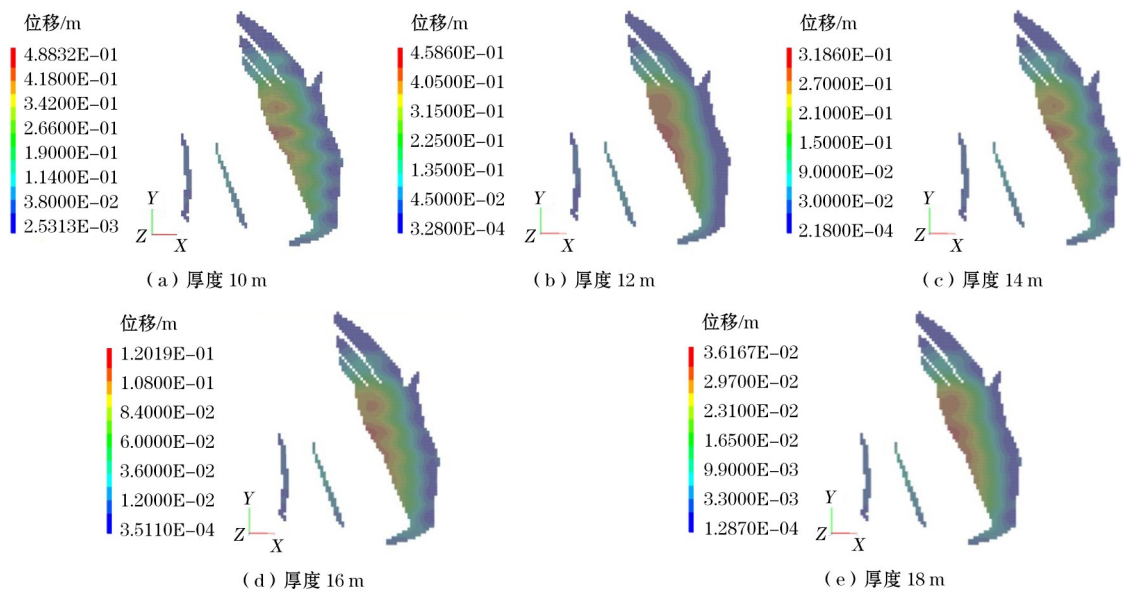


图 5 不同厚度隔离矿柱的位移变化特征

Fig.5 Variation characteristics of displacement of isolated pillars with different thicknesses

分析图 5 可知，水平隔离矿柱位移较大的区域均发生在水平矿柱靠近矿体上盘的位置，且随着上、下采区水平隔离矿柱厚度的增加，矿柱的位移呈现出明显的递减变化规律。当隔离矿柱的厚度为 10 m 时，矿柱的最大位移达到了 488.3 mm；当隔离矿柱的厚度为 12 m 时，其最大位移为 458.6 mm；当隔离矿柱的厚度为 14 m 时，最大位移为 318.6 mm；当隔离矿柱的厚度为 16 m 时，其最大位移下降到了 120.2 mm；而当水平隔离矿柱的厚度增加到 18 m 时，其最大位移减小到了 36.2 mm。

由此可知，当上、下采区的水平隔离矿柱厚度从 10 m 增加到 18 m 时，位移的下降幅度达到了 92.59%，表明隔离矿柱厚度的变化对其位移具有重大影响。

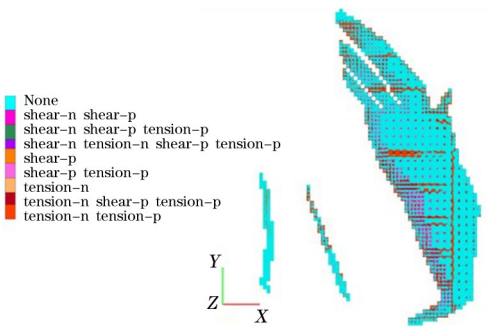
对不同厚度的水平隔离矿柱的位移变化情况进行拟合，得到了司家营铁矿上、下分区开采情况下，水平隔离矿柱位移随其厚度变化的规律：

$$D=593.54+21.37H-2.98H^2 \qquad (1)$$

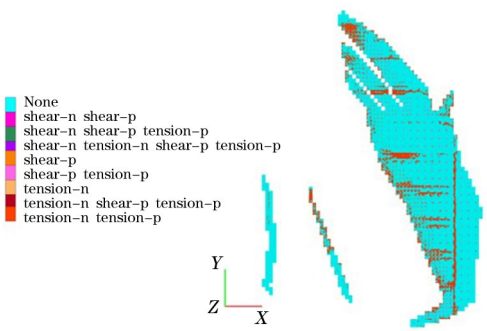
式中：D 为水平隔离矿柱内的最大位移，m；H 为隔离矿柱的厚度，m。

3.2.2　水平隔离矿柱的塑性区变化特征

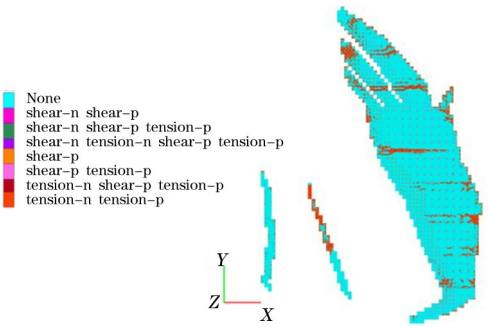
上、下采区回采完成后，隔离矿柱水平剖面的塑性区分布如图 6 所示。



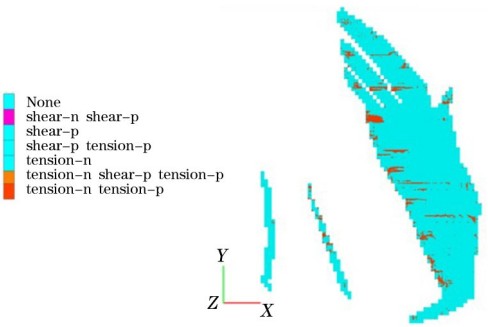
(a) 厚度 10 m



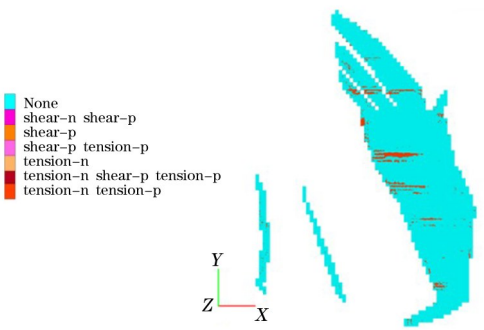
(b) 厚度 12 m



(c) 厚度 14 m



(d) 厚度 16 m



(e) 厚度 18 m

图 6　不同厚度隔离矿柱的塑性区变化特征

Fig.6　Variation characteristics of plastic zone of isolated pillars with different thicknesses

分析图 6 可知，当隔离矿柱厚度为 10 m 时，矿柱内部大部分区域为塑性破坏，并以张拉塑性区为主，塑性区连通表明矿柱已经发生破坏；矿柱厚度为 12 m 时，矿柱内部塑性破坏区有一定程度减小，且仍以张拉塑性区为主，塑性区相互连通；当矿柱厚度为 14 m 时，张拉塑性区显著减小，塑性破坏区域进一步减小；当矿柱厚度为 16 m 时，围岩应力由剪切和张拉应力共同主导，塑性区不再连通，隔离矿柱处于基本安全状态；而当厚度为 18 m 时，矿柱仅在局部出现少量塑性破坏，可以认为隔离矿柱处于安全状态。

根据图 6 所示的不同厚度水平隔离矿柱的塑性

区分布情况,采用 FLAC3D 内置的 FISH 语言编制塑性破坏区域统计代码,绘制不同隔离矿柱厚度下,岩层的塑性区体积占比曲线,如图 7 所示。

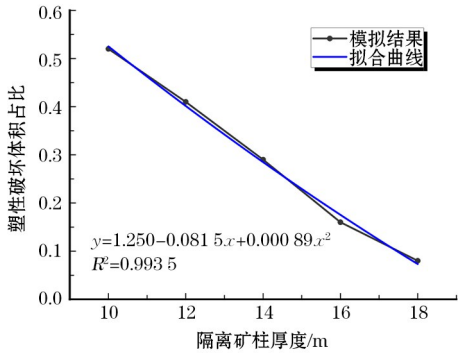


图 7 不同厚度隔离矿柱的塑性破坏区体积占比

Fig.7 Plastic failure volume ratio of isolated pillar with different thicknesses

分析图 7 可知,水平隔离矿柱的塑性破坏区体积占比随着矿柱厚度的增加呈非线性减小,表明水平隔离矿柱的厚度越大,矿柱的稳定性越高。

综上,根据不同厚度下水平隔离矿柱的应力场与位移的演变特征和塑性区扩展规律,确定水平隔离矿柱的安全厚度为 18 m。

4 水平隔离矿柱厚度对地表变形沉降的影响

水平隔离矿柱留设厚度过大,会对矿产资源的有效回收带来不利影响;若留设厚度过小,地下开采扰动使隔离矿柱产生较大塑性变形,很可能导致露天边坡滑坡和地表大规模塌陷。因此,为进一步验证水平隔离矿柱厚度的合理性与可靠性,在对水平隔离矿柱应力分布规律、变形破坏特征分析的基础上,分析水平隔离矿柱留设厚度对露天坑及地面沉降的控制效果。

通过数值模拟,得到了水平隔离矿柱厚度分别为 10 m、12 m、14 m、16 m 和 18 m 时,上、下采区回采完成后引起的露天坑表面总位移变化云图,如图 8 所示。

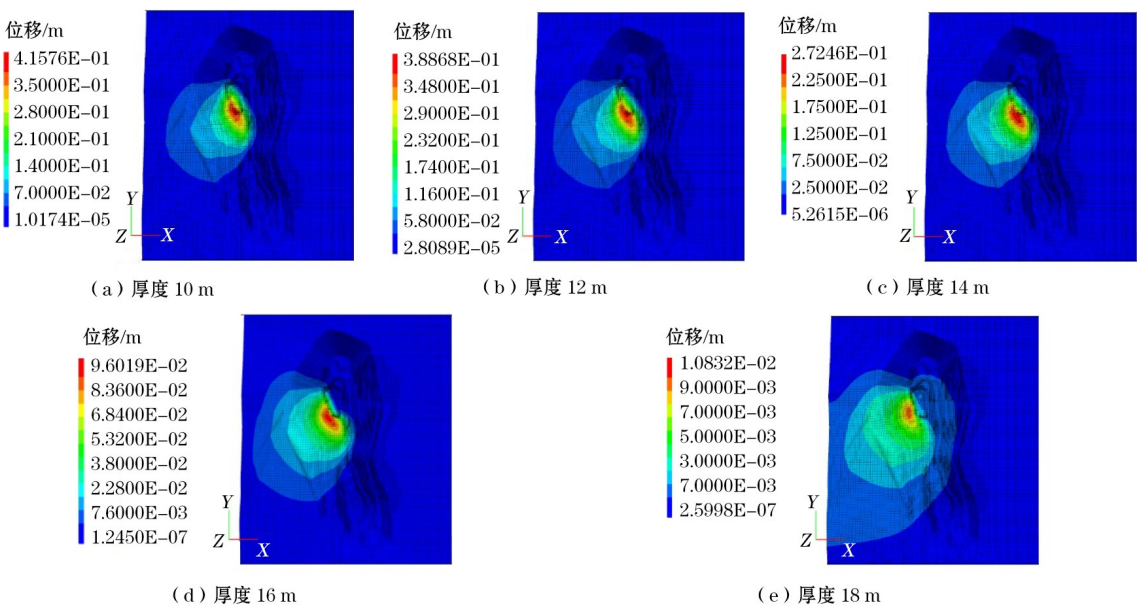


图 8 不同厚度隔离矿柱的露天坑表面总位移变化特征

Fig.8 Variation characteristics of total surface displacement of open-pit mine under isolated pillars with different thicknesses

分析图 8 可知,露天坑表面发生的最大位移均分布在矿体上盘围岩所对应的部位,并与图 5 中隔离矿柱发生的最大位移部位相一致。露天坑表面沉降位移随着隔离矿柱厚度的增大逐渐减小。当水平隔离矿柱厚度为 10 m 时,露天坑表面沉降位移量达到了 415.8 mm;矿柱厚度增加到 18 m 时,露天坑表面沉降位移量减小到了 10.8 mm,下降幅度达到了 97.4%。不同隔离矿柱厚度下的最大沉降量均位于 N20～N24 线露天坑的西侧边坡底角区域,该区域正下方为地下开采区域。表明隔离矿柱厚度的增加,对露天坑表面沉降起到了良好的控制作用。

因此,从严格控制矿区转地下开采后的地表变形量的角度,确定水平隔离矿柱的安全厚度为 18 m。

5 结论

(1) 针对司家营铁矿露天转地下开采纵向分区、上、下采区同时回采条件下,上、下采区之间水平隔离矿柱的留设厚度进行了优化研究,得到了不同厚度水平隔离矿柱的应力场演化特征、变形破坏发展规律和矿柱厚度对露天坑表面沉降变形的影响规律,最终确定水平隔离矿柱的安全厚度为 18 m。

(2) 随水平隔离矿柱厚度的增大,矿柱内集中应力显著减小,最大主应力分布趋于均匀,不同厚度的矿柱内部最大主应力值均在 40 MPa 以内;拉应力最大值主要分布在开采盘区的采场部位,并随着水平隔离矿柱厚度的增大,其分布范围显著减小,不同厚度的矿柱内部拉应力值呈微弱减小的趋势,但均未超过 2 MPa。

(3) 不同厚度的水平隔离矿柱内,产生较大位移的区域均位于矿柱靠近矿体上盘的位置,且随着矿柱厚度的增加,位移呈现出明显的非线性递减变化规律,当水平隔离矿柱厚度为 18 m 时,最大位移为 36.2 mm。

(4) 随着水平隔离矿柱厚度的增大,矿柱内的塑性区体积呈非线性减小的趋势,当矿柱厚度为 16 m 时,塑性区不再连通,隔离矿柱处于基本稳定状态;而当矿柱的厚度达到 18 m 时,仅在局部出现少量塑性破坏,隔离矿柱处于安全状态。

(5) 不同厚度水平隔离矿柱下,露天坑表面的变形沉降量随矿柱厚度的增大逐渐减小,最大位移产生的部位与隔离矿柱发生最大位移的部位一致,分布在矿体上盘围岩所对应的部位。当矿柱厚度为 18 m 时,露天坑表面沉降量为 10.8 mm,表明露天坑表面的稳定性良好。

参考文献(References):

[1] LI Xibing, WANG Dongyi, LI Chongjin, et al. Numerical simulation of surface subsidence and backfill material movement induced by underground mining[J]. Advances in Civil Engineering,2019,7:2724370.

[2] 李夕兵,彭定潇,冯帆,等.基于中厚板理论的深部崩落转充填隔离矿柱稳定性分析[J].中国矿业大学学报,2019,48(3):484-494.
LI Xibing, PENG Dingxiao, FENG Fan, et al. Stability analysis of horizontal insulating pillar in deep mining from caving to filling method on basis of refined plate theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2019,48(3):484-494.

[3] 曾凌方,张帅帅,李华华.某矿梭形隔离矿柱的回采方案优化[J].矿业研究与开发,2020,40(8):5-9.
ZENG Lingfang, ZHANG Shuaishuai, LI Huahua. Mining scheme optimization of spindle-shaped isolated pillars in a mine[J]. Mining Research and Development,2020,40(8):5-9.

[4] QIN Xiushan, CAO Hui, WANG Zhixiu,et al. Analysis on safe thickness of the horizontal separation pillar in the upward horizontal slicing and filling method [J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2021,861(5):052051.

[5] 王贺,刘立顺,周玉成.露天地下协同开采全生命周期回采结构稳定性分析[J].矿业研究与开发,2022,42(6):54-59.
WANG He, LIU Lishun, ZHOU Yucheng. Stability analysis on stoping structure in whole life cycle of open-pit and underground collaborative mining[J]. Mining Research and Development,2022,42(6):54-59.

[6] 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.
LYU Guanying, HE Huansha, QIN Min, et al. Study on reasonable thickness of isolation pillarin stope from caving method to filling method[J]. China Mining Magazine,2022,31(9):95-101.

[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] 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.

[9] 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.
LYU Guanying, WANG Qian, WANG Xiang, et al. Study on thickness optimization of horizontal isolating pillar in deep mining of an iron mine [J]. Mining Research and Development,2023,43(8):13-18.

[10] 王平,任艺,陈国兴,等.非均匀充填采场上隔离矿柱安全回采关键参数研究[J].金属矿山,2024(10):13-23.
WANG Ping, REN Yi, CHEN Guoxing, et al. Study of key parameters for safe recovery of isolated pillars in non-uniformly filled quarries[J]. Metal Mine,2024(10):13-23.

[11] 任赛,程光华.某铀矿山分区开采隔离矿柱留设尺寸研究[J].铀矿冶,2017,36(4):261-266+272.

REN Sai, CHENG Guanghua. Study on the size of isolated pillars mining by areas in a uranium mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy,2017,36(4):261-266+272.

[12] 乔登攀,侯国权.沙漠特厚风砂层下某铁矿水平隔离矿柱厚度的确定[J].金属矿山,2013(2):7-9+17.
QIAO Dengpan, HOU Guoquan. Thickness determination of an iron mine's horizontal barrier pillar under the desert's extra aeolian sand layer[J]. Metal Mine,2013(2):7-9+17.

[13] 张晋军.谦比希深部开拓-693 m水平隔离矿柱的稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2009,61(6):48-50+64.
ZHANG Jinjun. Stability analysis on -693 m level insulating pillar of deep excavation of Chambishi Copper Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2009,61(6):48-50+64.

[14] 董凯程,于世波,崔松.开采扰动下水平矿柱稳定性数值分析研究[J].矿冶,2015,24(4):1-4.
DONG Kaicheng, YU Shibo, CUI Song. Numerical analysis research on horizontal pillar stability under mining disturbance[J]. Mining and Metallurgy,2015,24(4):1-4.

[15] 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. 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.

[16] 苏成哲,纪帅杰,张殿明.基于单元安全度理论的采场隔离矿柱厚度优化[J].矿冶工程,2024,44(4):155-158+163.
SU Chengzhe, JI Shuaijie, ZHANG Dianming. Optimization of barrier pillar thickness in stope mining based on zone safety[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(4):155-158+163.

[17] 徐中华,李金星,付信凯,等.隔离矿柱参数优化与监测分析[J].中国矿业,2023,32(增刊2):87-91.
XU Zhonghua, LI Jinxing, FU Xinkai, et al. Parameter optimization and monitoring analysis of isolated pillar[J]. China Mining Magazine,2023,32(Suppl.2):87-91.

[18] 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.