庙冲铁矿露天转地下开采过渡期协同开采顺序及稳定性研究①

蒋权[1]，李杰林[2]，叶永飞[1]，邱剑辉[2]
（1.中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410025；2.中南大学 资源与安全工程学院，湖南 长沙 410083）

摘　要：针对庙冲铁矿露天转地下开采 2 年过渡期的生产需求，开展产能接续分析与开采顺序及稳定性研究。通过矿体储量估算，确定过渡期首采方案为 370 m 中段南端的盘区①和盘区②，利用 FLAC^{3D}软件构建包含矿体、岩层、露天采坑及地下巷道的模型，分析过渡期露天采坑与 370 m 中段巷道的位移、应力及塑性区分布特征。结果表明，过渡期 370 m 中段盘区①和盘区②的矿量可满足产能需求且留有备采矿量；露天采坑及 370 m 中段巷道的整体位移均小于 5 mm，应力分布以压应力为主，且远低于岩体抗压能力，未出现大范围贯通塑性区，稳定性良好，开采扰动影响较小。实际生产中，建议采用分段微差爆破技术，实行露天与地下错开爆破作业模式；同时加强露天边坡及井下巷道的安全监测，确保矿山露天转地下开采过渡期安全生产。

关键词：露天转地下开采；过渡期；开采顺序；产能接续；协同开采；数值模拟；边坡稳定性
中图分类号：TD85　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.002
文章编号：0253-6099(2025)06-0008-06

Mining Sequence and Stability During Transition from Open-Pit to Underground Mining in Miaochong Iron Mine

JIANG Quan[1], LI Jielin[2], YE Yongfei[1], QIU Jianhui[2]
(1.*Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410025, *Hunan*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: To meet the requirements during a 2-year transition period from open-pit to underground mining in Miaochong Iron Mine, its productivity continuity and mining stability were analyzed. Based on ore reserve estimation, Panel ① and Panel ② at the southern end of the roadway at midsection (370 m) of ore body are decided to be an initial mining plan for the transition period. Then, a model including ore bodies, rock formation, open-pit mine and underground roadways is built with FLAC^{3D} software, which is then adopted to analyze the displacement, stress and plastic zone distribution characteristics of the open-pit and roadways at the midsection (370 m) during the transition period. The results show that the ore quantities in Panel ① and Panel ② at the midsection (370 m) during the transition period can ensure production capacity requirement, but also is sufficient for subsequent mining. It is found that the overall displacement of the open-pit and roadways at the midsection (370 m) is less than 5 mm, and compressive stress becomes dominant in the stress distribution, which is far lower than the stress resistance of the rock mass. There is no large-scale continuous plastic zone, indicating good stability and small impact by mining disturbance. In practical production, it is recommended that a segmented millisecond blasting should be adopted to achieve a staggered blasting operation between open-pit and underground mine. Besides, efforts should be intensified in monitoring open-pit slope and underground roadways to ensure safe production during the transition from open-pit to underground mining.

Key words: transition from open-pit to underground mining; transition period; mining sequence; productivity continuity; collaborative mining; numerical simulation; stope stability

① **收稿日期**：2025-07-12
基金项目：国家重点研发计划(2021YFC3090401)
作者简介：蒋权(1985—)，男，湖南东安人，高级工程师，从事采矿工程设计、管理及市场运营工作。E-mail:329157458@qq.com
通信作者：邱剑辉(1996—)，男，湖南浏阳人，博士研究生，主要研究方向为充填采矿、膏体充填。E-mail:215501020@csu.edu.cn

露天转地下开采是一项复杂的系统工程，地下阶段开采顺序的选择决定了矿山初期投入、基建时间、开采扰动影响等，不仅涉及技术和安全问题，而且对矿山开采的经济效益与可持续发展具有深远影响[1-3]，对露天转地下开采平稳过渡具有重要意义[4]。

在露天转地下开采过渡期，由于开拓系统和生产方式的转变，在地下开拓、采准等工程建设时，露天转地下开采会面临相互干扰、安全条件差、管理复杂等问题，容易造成露天转地下开采矿山产量下降[5-6]，严重影响矿山企业的经济效益[7]。国内外对露天转地下开采过渡期的研究主要关注过渡期间生产效益的最大化[8-10]，缺乏对露天转地下开采过渡期间的安全论证。近年来，我国对露天转地下开采矿山的安全生产要求越来越高[11]，相关规定明确要求，露天转地下开采矿山要按规定严格管控重大安全风险，重点对矿区地质情况、开采扰动特征及对开采范围有影响的边坡隐患灾害进行分析，明确灾害来源及危害因素，有效提升露天转地下开采矿山安全生产水平[12-14]。

庙冲铁矿目前正在进行的 38～43W 勘探线露天底部开采即将结束，然后转入地下开采。为了实现露天开采向地下开采平稳过渡，需要对庙冲铁矿露天转地下开采过程持续进行产能分析，在时空上协同优化开采顺序及稳定性，为露天转地下开采提供安全技术保障，保证矿山稳产过渡。

1　工程概况

庙冲铁矿露天开采已形成 44°～50°的边坡，开采台阶高度 12 m，露天底部标高 452 m，目前露天已采剥至 512 m 平台，正面临露天转地下开采的局面。根据产能要求和矿体储量，设计过渡期的开采方案为：开采时由最南端首采区域（370 m 中段）向中间推进，待露天开采结束后，南北两端同时向中间推进；190 m 中段由最东端向 36#线推进，推进到 36#线后转到另外一个中段。露天转地下开采过渡期首采段如图 1 所示。

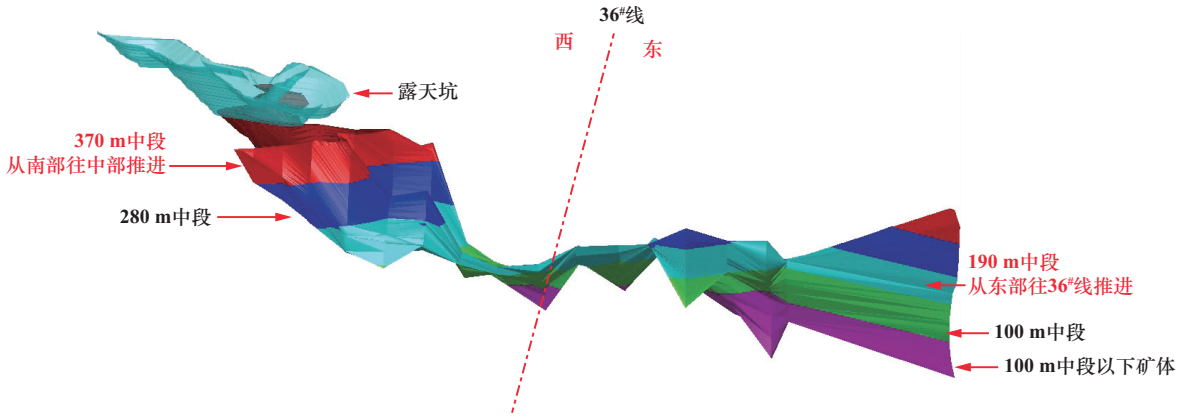


图 1　露天转地下开采过渡期首采段

Fig. 1　Initial mining section during transition from open-pit to underground mining

露天转地下开采过渡期的露天开采区域主要为露天坑底部的 464 m 以及 476 m 台阶开采区域，其开采范围与首采 370 m 中段在垂直空间上存在部分区域重叠交叉，露天采坑与 370 m 中段复合平面关系如图 2 所示。根据地下 370 m 中段的开拓系统设计方案，该中段矿体整体上划分为 7 个盘区进行回采，其中盘区④、盘区⑤、盘区⑥、盘区⑦部分区域与露天矿开采区域存在垂直空间上的重叠交叉关系，不能同时进行开采，而中段南部盘区①、盘区②、盘区③与露天坑底部相邻，但无垂直空间上的直接重叠。因此，开采 370 m 中段矿体时，可先从最南端向中间推进，待露天开采完全结束后，南北两端同时向中间推进。

按照露天转地下过渡期的产能规划，370 m 中段盘区①、盘区②的矿量可满足过渡期产能接续的需求，

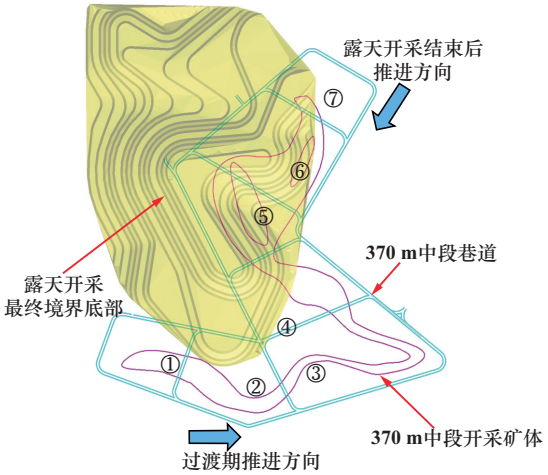


图 2　露天转地下开采过渡期协同区域

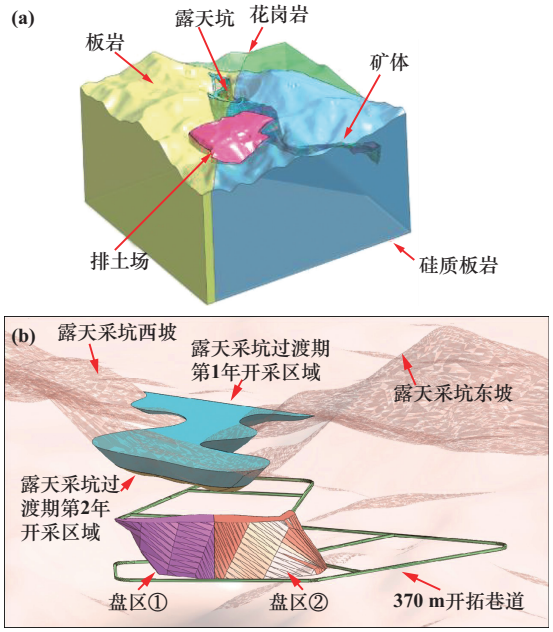
Fig. 2　Collaborative mining zone during transition from open-pit to underground mining

此时盘区①、盘区②作为地下矿体首采区域,与露天采坑底部相邻,是过渡期与露天开采形成的“上下协同”区域。露天采坑的爆破作业、边坡扰动会通过岩层传递至 370 m 中段,而 370 m 回采也可能反作用于露天边坡稳定性,两者的开采扰动相互叠加,成为过渡期安全风险最高的区域。370 m 中段作为盘区开采的主要运输通道,若忽略该巷道的稳定性,可能导致露天边坡滑坡、巷道坍塌等连锁灾害。为此,有必要对露天转地下过渡时期产能接续及衔接开采区域的稳定性进行分析,确保矿山产能接续与开采安全需求。

2 过渡期露天转地下开采模型建立

2.1 模型构建

选择有限差分法进行过渡期露天采坑与首采段时空扰动数值模拟研究,采用 AutoCAD-Madis GTS NX-FLAC^{3D}软件耦合建模、FLAC^{3D}运算分析[15]。考虑实际矿体地层分布,构建庙冲铁矿过渡期露天采坑与首采段时空扰动分析数值模型,如图 3 所示。模型包括矿体、排土场、最终露天境界线以及岩层。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。同时,设置隔离矿柱厚度 20 m,并根据庙冲铁矿过渡期开采设计,构建 370 m 阶段巷道、露天采坑过渡期第 1 年开采区域、第 2 年开采区域、370 m 中段盘区①区域、370 m 中段盘区②区域。



(a) 整体模型;(b) 区域模型

图 3 数值模型

Fig. 3 Numerical model

计算网格模型如图 4 所示,根据矿体尺寸与计算比例,为了减少网格过多造成模型计算困难的问题,矿体及主要分析区域网格尺寸设置为 4~24 m,扩展区域为 40~60 m。

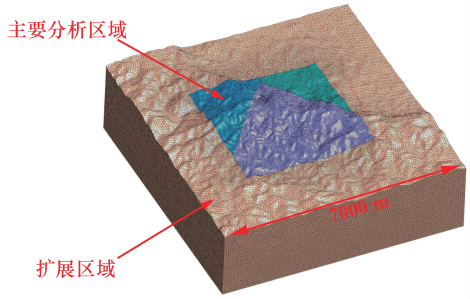


图 4 网格模型

Fig. 4 Grid model

模型底部采用固定约束,约束三向位移,四周采用水平位移约束,固定轴向位移,模型最上部为自由面;Z 轴负方向施加重力加速度,取 9.8 m/s^2;初始应力主要由岩体的自重应力和构造应力组成,由于无构造应力的实测值,这里只考虑重力的影响。

为分析不利情况,进一步增加爆破振动载荷,采用静力等效法将振动惯性力等效成静力荷载时,爆破振动的等效静力荷载加速度 e[16] 为:

$$e = 2\pi f k_2 K \left[\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right]^{k_1} \tag{1}$$

式中:f 为粒子振动频率,通常为 10~100 Hz;K 为爆破振动波的衰减系数;k_1 为爆破振动波的衰减指数;k_2 为爆炸动力折减系数。

参考四川攀枝花朱兰铁矿、安徽马山铁矿等类似铁矿的地下爆破振动特征[17],计算得到等效静力荷载约为 0.19g。因此,在计算过程中,除了 Z 轴负方向施加重力加速度外,还进一步施加了 0.19g 的爆破振动等效静力荷载。

2.2 开采方案确定

矿体开采顺序根据地下矿体开采逐年产量安排表确定。露天开采底部最终标高 452 m,过渡期露天主要开采 500~464 m 区段以及 464~452 m 台阶,地下主要开采 370 m 中段的盘区①及盘区②。同时,为了进一步确定隔离矿柱的可靠性,此次计算不建立盘区间柱,从而更好地分析最危险工况的开采扰动结果。具体回采步骤如下。

1) 过渡期第 1 年:露天坑 500~464 m 区段,矿量约 150 万 t;370 m 中段的盘区①矿体回采及充填。

2) 过渡期第 2 年:露天坑 464~452 m 台阶,矿量约 53.49 万 t;370 m 中段的盘区②矿体回采及充填。

在过渡期,370 m 中段巷道不仅是盘区①、②的回

采通道,更是矿石运输、通风排水、设备进出的主要路径。巷道的位移变形、应力集中或塑性破坏会直接导致回采作业中断。通过分析巷道的力学响应,可提前预判开采过程中的工程风险,确保产能接续。因此,主要分析对象为露天坑及 370 m 中段巷道,该区域的岩体力学参数如表 1 所示。

表 1　岩体力学参数

Table 1　Mechanical properties of rock mass

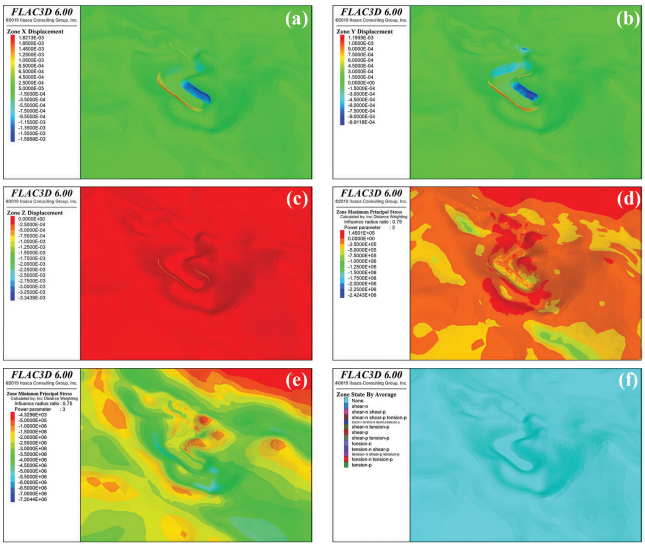
岩体名称	密度/(g·cm^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
板岩	3.30	12.55	5.33	35.1	2.86	1.52	0.26
硅质板岩	2.64	14.26	6.13	36.2	2.88	1.21	0.26
花岗岩	2.57	15.61	6.21	37.2	2.86	1.48	0.26
矿体	2.80	12.16	6.51	35.4	3.25	1.62	0.27
充填体	1.96	0.26	0.16	29.8	0.61	0.26	0.21

3　模拟结果分析

3.1　过渡期露天边坡扰动影响分析

3.1.1　过渡期第 1 年

过渡期第 1 年开采的露天边坡扰动影响结果如图 5 所示。



(a) X 方向位移;(b) Y 方向位移;(c) Z 方向位移;(d) 最大主应力;(e) 最小主应力;(f) 塑性区

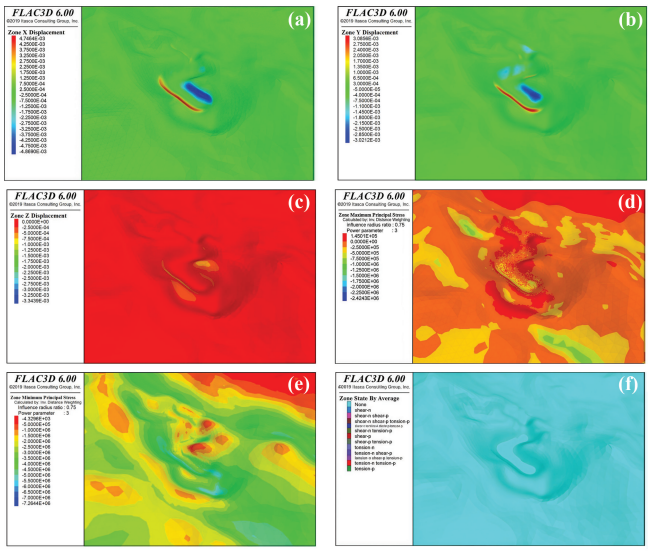
图 5　过渡期第 1 年开采的露天边坡扰动影响结果

Fig. 5　Mining disturbance to open-pit slope in the first-year of transition period

X、Y、Z 方向位移均集中在露天开采区域的坡脚处,其中,X 方向位移最大值为 1.45 mm,Y 方向位移最大值为 1.05 mm,Z 方向位移最大值为 0.40 mm,均小于 5 mm,说明露天采坑未出现大位移的安全风险。露天边坡最大主应力方向主要分布拉应力,最大值为 0.14 MPa;最小主应力方向主要分布压应力,最大值为 4.50 MPa;露天采坑区域的应力小于岩体最大抗拉、抗压强度。露天采坑未出现大范围贯通的塑性区分布,仅有零星区域出现塑性变形。

3.1.2　过渡期第 2 年

过渡期第 2 年开采的露天边坡扰动影响结果如图 6 所示。



(a) X 方向位移;(b) Y 方向位移;(c) Z 方向位移;(d) 最大主应力;(e) 最小主应力;(f) 塑性区

图 6　过渡期第 2 年开采的露天边坡扰动影响结果

Fig. 6　Mining disturbance to open-pit slope in the second year of transition period

X、Y、Z 方向位移均集中在露天开采区域的坡脚处,其中,X、Y、Z 方向位移最大值分别为 3.75、2.53、0.75 mm,露天采坑未出现大位移的安全风险。露天边坡最大主应力方向主要分布拉应力,最大值为 0.15 MPa;最小主应力方向主要分布压应力,最大值为 5.50 MPa;露天采坑区域的应力均小于岩体的抗拉、抗压强度。露天采坑未出现大范围贯通的塑性区分布,仅有零星区域出现塑性变形。

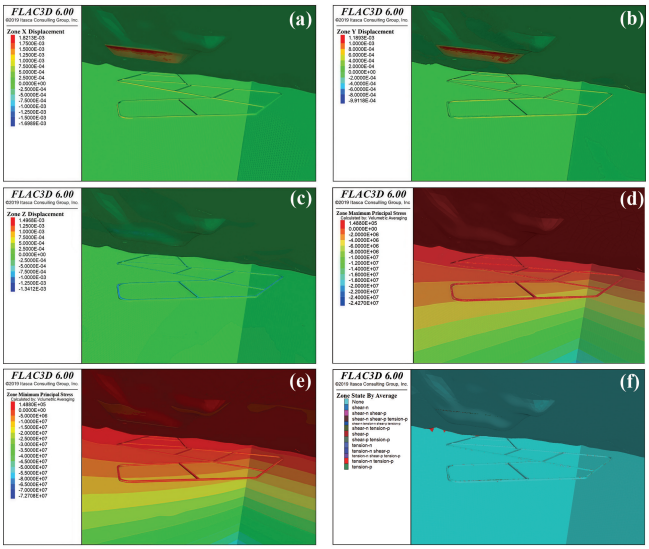
3.2　过渡期 370 m 中段巷道扰动影响分析

3.2.1　过渡期第 1 年

过渡期第 1 年开采 370 m 中段巷道扰动影响结果如图 7 所示。

X、Y 方向位移零星出现在巷道边帮处,其中,X 方向位移最大值为 0.75 mm,Y 方向位移最大值为 0.60 mm。Z 方向位移主要零星出现在巷道顶板处,最大值为 1.00 mm。在过渡期第 1 年开采过程中,370 m 中段巷道产生的整体位移比较小,说明 370 m 中段巷

道没有大位移的安全风险。370 m 中段巷道最大、最小主应力方向均主要分布压应力,压应力最大值为 0.5 MPa;370 m 中段巷道未出现大区域贯通的塑性区分布,仅有零星区域出现塑性变形。



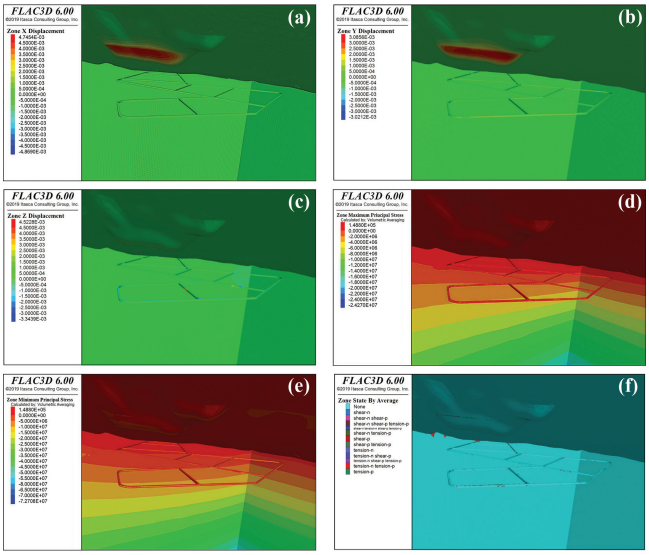
(a) X 方向位移;(b) Y 方向位移;(c) Z 方向位移;
(d) 最大主应力;(e) 最小主应力;(f) 塑性区

图 7 过渡期第 1 年开采 370 m 中段巷道扰动影响结果

Fig. 7 Mining disturbance to roadway at midsection (370 m) in the first year of transition period

3.2.2 过渡期第 2 年

过渡期第 2 年开采 370 m 中段巷道扰动影响结果如图 8 所示。



(a) X 方向位移;(b) Y 方向位移;(c) Z 方向位移;
(d) 最大主应力;(e) 最小主应力;(f) 塑性区

图 8 过渡期第 2 年开采 370 m 中段巷道扰动影响结果

Fig. 8 Mining disturbance to roadway at midsection (370 m) in the second year of transition period

X、Y 方向位移主要零星出现在巷道边帮处,最大值分别为 1.25、1.50 mm。Z 方向位移主要零星出现在巷道的顶板处,最大值为 2.50 mm;过渡期第 2 年开采,370 m 中段巷道没有大位移的安全风险。370 m 中段巷道最大、最小主应力均主要分布压应力,压应力最大值为 0.90 MPa。370 m 中段巷道未出现大区域贯通的塑性区分布,仅有零星区域出现塑性变形。

3.3 综合分析

根据相关规范要求[18],采矿工程所在的支护体和围岩承受的应力未出现过大的应力集中,则认为巷道是稳定的;巷道顶底板和两帮位移相对收敛值不超过 12~36 mm,则认为巷道是稳定的;数值计算结果中巷道围岩未出现贯通性的塑性区,则认为巷道是稳定的。当上述指标有某一项不满足时,可进一步使用岩移指标(倾斜、曲率以及水平变形)判断采矿工程的稳定性[19]。

从整体模拟结果来看,过渡期 2 年开采过程中,露天采坑与 370 m 中段巷道的力学响应均处于安全可控范围。露天采坑各方向最大位移均小于 5 mm,应力以压应力为主,且远低于岩体抗压强度,仅零星区域出现塑性变形,无大范围贯通塑性区;370 m 中段巷道整体位移最大值为 2.5 mm,远低于规范允许的收敛值标准,应力分布均匀且无异常集中,塑性区未形成贯通破坏,两类关键工程均表现出良好稳定性,开采扰动影响较小,可满足矿山回采安全要求。

需要注意的是,尽管数值模拟结果表明所采用的过渡期回采顺序方案是安全可行的,但在实际生产中,频繁的爆破振动和降雨等因素也会对开采范围内的边坡、巷道稳定性产生较大影响。因此,在实际生产过程中,建议采用分段微差爆破方式,实行露天与地下错开爆破作业模式,以减少爆破振动对边坡和地下巷道稳定性的影响,同时加强露天边坡及地下安全监测手段,以确保矿山安全生产。

4 结论

1) 针对庙冲铁矿 2 年露天转地下开采过渡期的生产需求,经矿体储量估算与产能分析,确定首采方案为 370 m 中段南端的盘区①和盘区②。过渡期内,露天开采第 1 年为 500~464 m 台阶,第 2 年推进至464~452 m 台阶;地下 370 m 中段盘区①、②的矿量可完全匹配过渡期产能需求,为矿山平稳过渡提供了资源保障。

2) 通过 FLAC^{3D}数值模拟分析,过渡期 2 年的开采对露天采坑扰动较小,整体稳定性良好。过渡期第 1 年露天采坑 X、Y、Z 方向最大位移分别为 1.45、

1.05、0.40 mm,最大拉应力 0.14 MPa、最大压应力 4.50 MPa;第 2 年 X、Y、Z 方向最大位移分别为 3.75、2.53、0.75 mm,最大拉应力 0.15 MPa、最大压应力 5.50 MPa。所有位移值均小于 5 mm,应力值远低于岩体抗拉、抗压强度,且仅零星区域出现塑性变形,无大范围贯通塑性区。

3) 370 m 中段巷道作为核心运输与作业通道,过渡期内力学响应平稳。过渡期第 1 年巷道 X、Y、Z 方向最大位移分别为 0.75、0.60、1.00 mm,最大压应力 0.50 MPa;过渡期第 2 年 X、Y、Z 方向最大位移分别为 1.25、1.50、2.50 mm,最大压应力 0.90 MPa。整体位移远低于《采矿设计手册》规定的"顶底板及两帮相对收敛值不高于 36 mm"标准,且无贯通性塑性区,满足安全生产要求。

4) 结合数值模拟的分析结果,为进一步降低开采扰动,建议实际生产中采用分段微差爆破技术,实行露天与地下错开爆破作业模式;同时加强露天边坡及井下巷道的安全监测,确保矿山露天转地下过渡期安全生产。

参考文献(References):

[1] 任凤玉,李海英,周胜利,等. 露天转地下过渡期协同开采方法研究[J]. 金属矿山, 2014(11):7-10.
REN Fengyu, LI Haiying, ZHOU Shengli, et al. Research on synergetic mining during transition period from open pit to underground[J]. Metal Mine, 2014(11):7-10.

[2] 武会强,任凤玉. 深凹露天矿转地下过渡期挂帮矿安全高效开采方法研究[J]. 中国矿业, 2020,29(10):122-127.
WU Huiqiang, REN Fengyu. Study on safe and efficient mining method of deep open pit mine during the transition from open pit to underground mining[J]. China Mining Magazine, 2020,29(10):122-127.

[3] 马振翰,张治强. 大孤山铁矿楔形转接过渡露天地下协同开采模式研究[J]. 矿业研究与开发, 2021,41(9):12-16.
MA Zhenhan, ZHANG Zhiqiang. Study on wedge transition of open-pit and underground collaborative mining mode in Dagushan iron mine[J]. Mining Research and Development, 2021,41(9):12-16.

[4] 李海英,任凤玉,严国富,等. 露天转地下过渡期岩移危害控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015,36(3):419-422.
LI Haiying, REN Fengyu, YAN Guofu, et al. Control method of rock caving hazard during transition from open pit to underground mining[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015,36(3):419-422.

[5] 张子祥,何荣兴,许雁超,等. 金属矿床露天转地下过渡方式现状及关键技术讨论[J]. 现代矿业, 2023,39(9):125-129.
ZHANG Zixiang, HE Rongxing, XU Yanchao, et al. Key technology of transition mode from open-pit to underground in metal mines[J]. Modern Mining, 2023,39(9):125-129.

[6] SOLTANI KHABOUSHAN A, OSANLOO M. A set of classified integer programming (IP) models for optimum transition from open pit to underground mining methods[J]. Natural Resources Research, 2020,29(3):1543-1559.

[7] 裴文田,吴志波. 露天转地下安全开采研究[J]. 中国矿山工程, 2016,45(2):61-63.
PEI Wentian, WU Zhibo. Safe mining study of transition from open-pit to underground[J]. China Mine Engineering, 2016,45(2):61-63.

[8] 高岚岚. 浅析庙沟铁矿露天转地下过渡期配矿方案的优化[J]. 矿业工程, 2019,17(1):12-13.
GAO Lanlan. Optimization of ore blending scheme for transitioning from open-pit mining to underground mining of Miaogou iron ore mine[J]. Mining Engineering, 2019,17(1):12-13.

[9] CHUNG J, ALI ASAD M W, TOPAL E. Timing of transition from open-pit to underground mining: A simultaneous optimisation model for open-pit and underground mine production schedules[J]. Resources Policy, 2022,77:102632.

[10] BAKHTAVAR E, SHAHRIAR K, MIRHASSANI A. Optimization of the transition from open-pit to underground operation in combined mining using (0-1) integer programming[J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2012,112(12):1059-1064.

[11] 高垒. 庙沟铁矿露天转地下过渡方案优化研究[J]. 矿业工程, 2019,17(5):19-20.
GAO Lei. Optimization study of transitional option from open-pit mine to underground mine of Miaogou iron ore[J]. Mining Engineering, 2019,17(5):19-20.

[12] 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.

[13] 陈丽媛,席江伟,高磊. 庙沟铁矿露天转地下开采衔接期贫化矿石的回收研究与实践[J]. 现代矿业, 2021,37(4):246-247.
CHEN Liyuan, XI Jiangwei, GAO Lei. Research and practice on recovery of depleted ore in transition period from open-pit mining to underground mining in Miaogou iron mine[J]. Modern Mining, 2021,37(4):246-247.

[14] 刘杨,李京,张长锁,等. 露天矿并段台阶边坡崩塌诱因分析及治理方案研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):29-34.
LIU Yang, LI Jing, ZHANG Changsuo, et al. Causes and management scheme of slope collapse at bench merging section in open-pit mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):29-34.

[15] 齐栋梁,高重阳. 海南露天铁矿开采地表移动及其对环境的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):27-30.
QI Dongliang, GAO Chongyang. Ground surface displacement and its influence on environment during open-pit mining in Hainan iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):27-30.

[16] 范晓明,任凤玉,肖冬,等. 大孤山铁矿露天转地下过渡期开采境界细部优化[J]. 金属矿山, 2018(8):19-22.
FAN Xiaoming, REN Fengyu, XIAO Dong, et al. Detail optimization of the mining limit during transition from open-pit to underground mining in Dagushan iron mine[J]. Metal Mine, 2018(8):19-22.

(下转第 18 页)

可靠的检测手段。同时,本文实验研究的变量较为单一,样本数量较少,今后可以研究炸药不耦合系数、殉爆惰性介质等其他影响炸药殉爆距离的因素,并结合数值模拟的方法进行研究。

参考文献(References):

[1] 汪旭光,吴春平. 我国爆破行业发展成就、挑战与机遇[J]. 中国矿业, 2024,33(12):1-9.
WANG Xuguang,WU Chunping. Blasting industry in China: Achievements, challenges and opportunities[J]. China Mining Magazine, 2024,33(12):1-9.

[2] 薛斌,徐恒阳,魏快快,等. 新型光面爆破技术在边坡开挖中的应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):28-31.
XUE Bin, XU Hengyang, WEI Kuaikuai, et al. Application of new smooth blasting technology in slope excavation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):28-31.

[3] 赵文奎,黄海仙,李启月,等. 基于孔壁压力的边坡预裂爆破参数设计与试验[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):1-5.
ZHAO Wenkui, HUANG Haixian, LI Qiyue,et al. Design and experiment of slope presplit blasting parameters based on borehole wall pressure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):1-5.

[4] 陈帮洪,陈星明,武尚荣, 等. 基于LS-DYNA的楔形切割拉槽爆破数值模拟研究及应用[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):47-53.
CHEN Banghong, CHEN Xingming, WU Shangrong,et al. Numerical simulation of blasting with wedge cut based on LS-DYNA software and its application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):47-53.

[5] 李夕兵. 凿岩爆破工程[M]. 长沙:中南大学出版社, 2011.
LI Xibing. Rock drilling and blasting engineering[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.

[6] 王泽溥,郑志良. 爆炸及其防护[M]. 北京:兵器工业出版社, 2008.
WANG Zepu, ZHENG Zhiliang. Explosion and its protection[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2008.

[7] 汪成运,魏志丰,何鹏鹏. 炸药殉爆的研究进展与展望[J]. 爆破器材, 2022,51(6):1-8.
WANG Chengyun, WEI Zhifeng, HE Pengpeng. Research progress of sympathetic detonation of explosives[J]. Explosive Materials, 2022,51(6):1-8.

[8] 刘晓文,高玉刚. 炸药在水介质中殉爆特性分析[J]. 工程爆破, 2022,28(4):102-107.
LIU Xiaowen, GAO Yugang. Analysis of explosive martyrdom in water medium[J]. Engineering Blasting, 2022,28(4):102-107.

[9] 李波. 孔内不耦合装药殉爆距离研究[D]. 长沙:中南大学, 2024.
LI Bo. Study of sympathetic distance of uncoupled charges in holes[D]. Changsha: Central South University, 2024.

[10] 李启月,曾海登,赵新浩,等. 炮孔约束下双槽聚能管对乳化炸药殉爆距离影响的研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):1-4.
LI Qiyue, ZENG Haideng, ZHAO Xinhao, et al. Influence of double groove energy gathering tubes on the denotation distance of emulsion explosives under constraint of blast hole[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):1-4.

[11] XIAO Y C, XIAO X D, FAN C Y, et al. Study of the sympathetic detonation reaction behavior of a fuze explosive train under the impact of blast fragments[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021,35(6):2575-2584.

[12] WU X D,GONG M, WU Y F, et al. Experimental and numerical study on the cumulative-deck charging structure based on explosive sympathetic detonation in tunnel smooth blasting[J]. Alexandria Engineering Journal, 2025,116:561-573.

引用本文:李波,史秀志,胡青华,等. 乳化炸药殉爆实验及应用研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):14-18.
LI Bo, SHI Xiuzhi, HU Qinghua, et al. Experimental study and application of sympathetic detonation of emulsion explosives[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):14-18.

(上接第13页)

[17] 卢宏建,南世卿,甘德清,等. 大型铁矿山露天转地下开采过渡方案优化[J]. 金属矿山, 2014(11):1-6.
LU Hongjian, NAN Shiqing, GAN Deqing, et al. Optimization of transitional scheme from open-pit to underground mining for large-scale iron mine[J]. Metal Mine, 2014(11):1-6.

[18] 卢宏建,甘德清,杨中建. 庙沟铁矿露天转地下过渡期稳产措施与边坡稳定性[J]. 金属矿山, 2013(1):7-10.
LU Hongjian, GAN Deqing, YANG Zhongjian. Production steady and slope stability analysis during the transition period of open pit to underground in Miaogou iron mine[J]. Metal Mine, 2013(1):7-10.

[19] 胡颖鹏. 露天转地下楔形过渡开采诱导塌陷坑控制滑坡危害技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2021.
HU Yingpeng. Study on the technology of controlling landslide hazard by inducing the collapse crater during the wedge-shaped transition from open-pit to underground mining[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.

引用本文:蒋权,李杰林,叶永飞,等. 庙冲铁矿露天转地下开采过渡期协同开采顺序及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):8-13.
JIANG Quan, LI Jielin, YE Yongfei, et al. Mining sequence and stability during transition from open-pit to underground mining in Miaochong iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):8-13.