

# 眼前山铁矿露天转地下开采岩体破坏规律研究<sup>①</sup>

王钟钰, 蒋永超, 贾若彤, 姜鹭鹏, 陈忠辉

(中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对鞍钢眼前山铁矿东帮区域露天转地下开采引起边坡岩体破坏及塌陷的问题, 采用数值模拟和基底摩擦模型试验分析其边坡破坏过程和破坏模式, 探究不同开采阶段塌陷角变化情况, 并从裂隙角度总结塌陷区形成过程。结果表明, 随着矿体开采深度不断延深, 受开采扰动塌陷角不断减小; 塌陷区域的形成分为四个时期: 裂隙富集时期、时效变形时期、滑移面贯穿时期和塌陷形成时期; 眼前山铁矿东帮边坡的破坏机制为滑移-拉裂破坏。

**关键词:** 眼前山铁矿; 露天转地下; 岩体破坏; 塌陷; 裂隙发展; 边坡失稳; 基底摩擦模型试验

中图分类号: TD852; TD327

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.003

文章编号: 0253-6099(2025)01-0014-07

## Failure Law of Rock Masses in Transition from Open-Pit to Underground Mining in Yanqianshan Iron Mine

WANG Zhongyu, JIANG Yongchao, JIA Ruotong, JIANG Aopeng, CHEN Zhonghui

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the east side of Yanqianshan Iron Mine of Anshan Iron and Steel Company, the transition from open-pit to underground mining causes failure and collapse of rock slope. In order to solve this problem, tests were performed by adopting numerical simulation and the base friction model to analyze the failure process and failure mode. The different collapse angles at different mining stages were explored, and development process of collapse area was summarized in terms of fissures. It is found that as mining operation proceeds, the collapse angle is reducing due to disturbance of mining activity; the collapse area undergoes four stages, including progressive fissure enrichment, deformation during aging, growth of slip surface, and collapse formation; and the slope failure in the east side of Yanqianshan Iron Mine is predominantly attributed to the sliding crack model of deformation.

**Key words:** Yanqianshan iron mine; transition from open-pit to underground mining; failure of rock mass; collapse; fissure propagation; slope instability; base friction model test

露天开采具有成本低、见矿快、劳动条件好、生产安全等优点, 在铁矿开采中一直占据重要位置。但是随着开采深度不断延深, 露天开采成本和开采风险越来越高, 其原有开采优势逐渐消失。因此, 越来越多的深凹露天矿山开始转入地下开采<sup>[1-5]</sup>。

露天转地下开采是一个复杂的系统工程, 并不是孤立的“转”的过程<sup>[6]</sup>, 需要把露天和地下作为一个整体来处理, 针对露天转地下开采边坡滑移破坏规律及岩层移动问题, 文献<sup>[7-13]</sup>采用理论分析、数值模拟及

现场监控量测, 从边坡的失稳机制、破坏特征以及稳定性评价等方面进行综合研究。然而上述文献对开采引发岩体破坏规律及岩移角度变化进行研究时, 局限于从边坡的安全系数、能量规律、开采引发的塌陷范围等宏观角度进行分析, 对于开采引发的塌陷过程鲜有研究。因此, 本文以鞍钢眼前山铁矿露天转地下工程为背景, 利用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟软件和基底摩擦模型试验对露天转地下开采过程中边坡岩体破坏规律和塌陷形成过程进行分析, 为矿山露天转地下开采安全提供依据。

① 收稿日期: 2024-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(52074292)

作者简介: 王钟钰(1999—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要研究方向为露天转地下开采。E-mail: w332089989@163.com

### 1 工程概况

鞍钢眼前山铁矿于 2012 年由露天开采转入地下开采,露天转地下过渡期开采目标为露天境界外的东侧挂帮矿和靠近正长斑岩岩脉的北侧挂帮矿。其中,东侧挂帮矿及其地下开采区域为本文主要研究区域,标高-51~-213 m,如图 1 所示。研究区域主要岩性为铁矿石和混合花岗岩,地下开采选用无底柱分段崩落法,分段高度 18 m,进路间距 20 m,其中首次开采分段巷道布置在-69 m 水平,向下依次分段布置。开采区域划分为 9 个分段、3 个时期进行开采。I 期标高-51~-69 m,为首采冒落时期;II 期标高-69~-123 m,为挂帮矿过渡前期开采时期;III 期标高-123~-213 m,为挂帮矿过渡后期及地下开采时期。

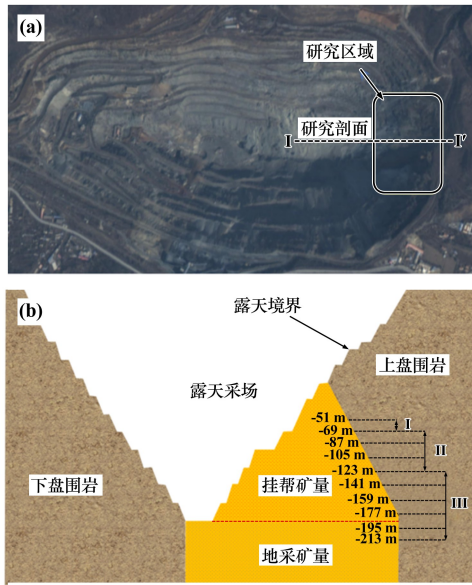


图 1 眼前山铁矿露天转地下开采示意图  
Fig.1 Schematic diagram of open-pit to underground mining in Yanqianshan Iron Mine

### 2 数值模拟方案

根据眼前山现场工程地质报告,眼前山铁矿露天转地下开采模型设置 2 种岩体,围岩为混合花岗岩,矿体为铁矿石,根据室内岩石力学试验相关资料并参考同类工程经验,岩石的宏观力学参数如表 1 所示。

采用离散元法分析边坡岩移塌陷规律及裂隙发展过程,需要将宏观的岩石力学参数标定为颗粒细观参数。参数标定采用单轴压缩试验和巴西劈裂试验,试样直径 50 mm,高 100 mm。通过反复调整平行黏结模型参数,得到混合花岗岩和铁矿石的细观参数见表 2。

采用 PFC<sup>2D</sup> 颗粒流数值模拟软件中的平行黏结模

表 1 岩石宏观力学参数

Table 1 Macro-mechanical parameters of rocks

岩石	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	弹性 模量/ MPa	抗压 强度/ kPa	抗拉 强度/ kPa	内聚 力/ kPa	内摩 擦角/ (°)	泊松 比
铁矿石	3.25	1.15×10 <sup>4</sup>	1.15×10 <sup>5</sup>	1.02×10 <sup>4</sup>	1×10 <sup>3</sup>	40~42	0.25
混合花岗岩	2.50	5.70×10 <sup>3</sup>	1.64×10 <sup>5</sup>	1.12×10 <sup>4</sup>	4.5×10 <sup>2</sup>	38~40	0.20

表 2 岩石细观参数

Table 2 Micro-mechanical parameters of rocks

类型	参数名称	混合花岗岩	铁矿石
颗粒细观参数	颗粒粒径级配比	1.66	1.66
	颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500	3 250
	颗粒弹性模量/Pa	4×10 <sup>9</sup>	5×10 <sup>9</sup>
	颗粒法/切向刚度比	1.6	3
平行黏结属性	摩擦因数	0.5	0.5
	静态弹性模量/Pa	4×10 <sup>9</sup>	1×10 <sup>10</sup>
	法/切向刚度比	1.6	6
	法向强度指标/Pa	3×10 <sup>6</sup>	3×10 <sup>6</sup>
	切向强度指标/Pa	6.5×10 <sup>6</sup>	3×10 <sup>6</sup>
	平行黏结半径乘子	1	1

型建立岩体颗粒模型。首先采用 CAD 软件建立眼前山东帮 I-I' 剖面模型,导入 PFC<sup>2D</sup> 软件生成颗粒,建模过程分为颗粒的生成、预压、切割、分组赋值 4 个阶段,岩体颗粒分为铁矿石、混合花岗岩 2 个部分,均采用颗粒平行黏结模型,最终得到离散元模型如图 2 所示。

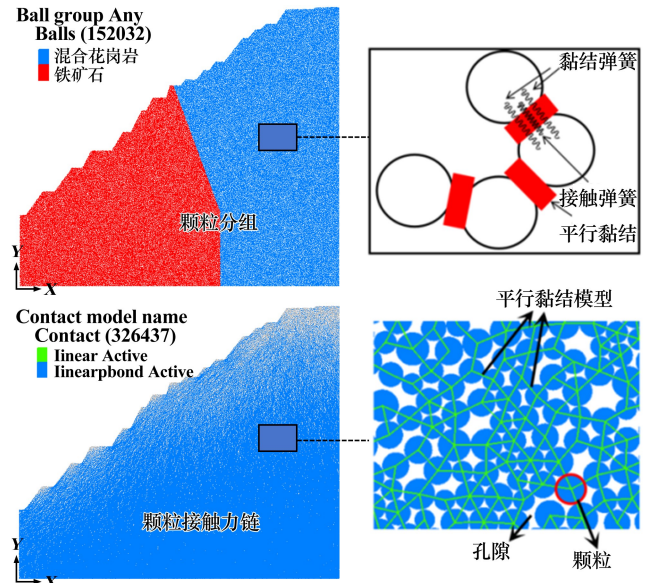
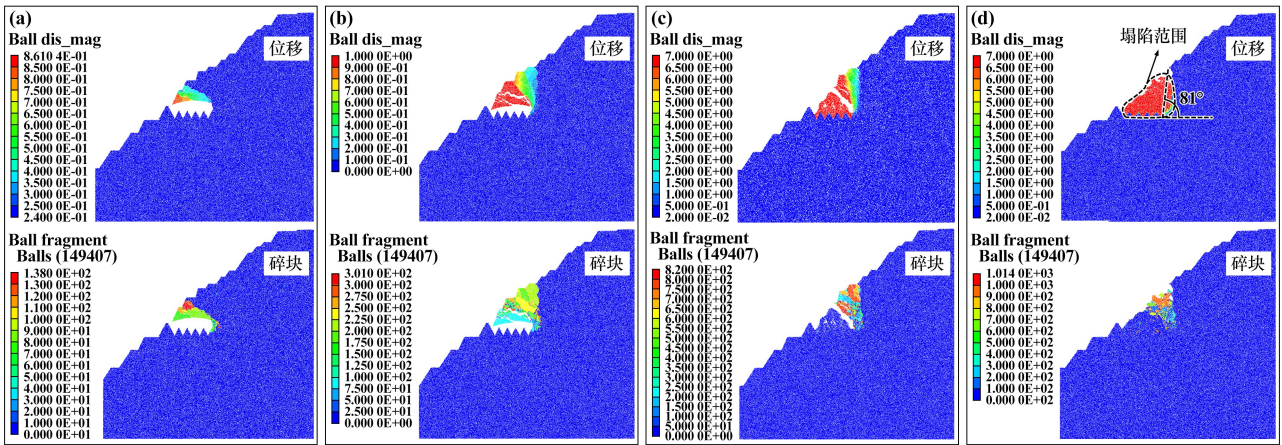


图 2 东帮边坡 PFC 颗粒流模型  
Fig.2 PFC particle flow model of eastern slope

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 变形破坏规律

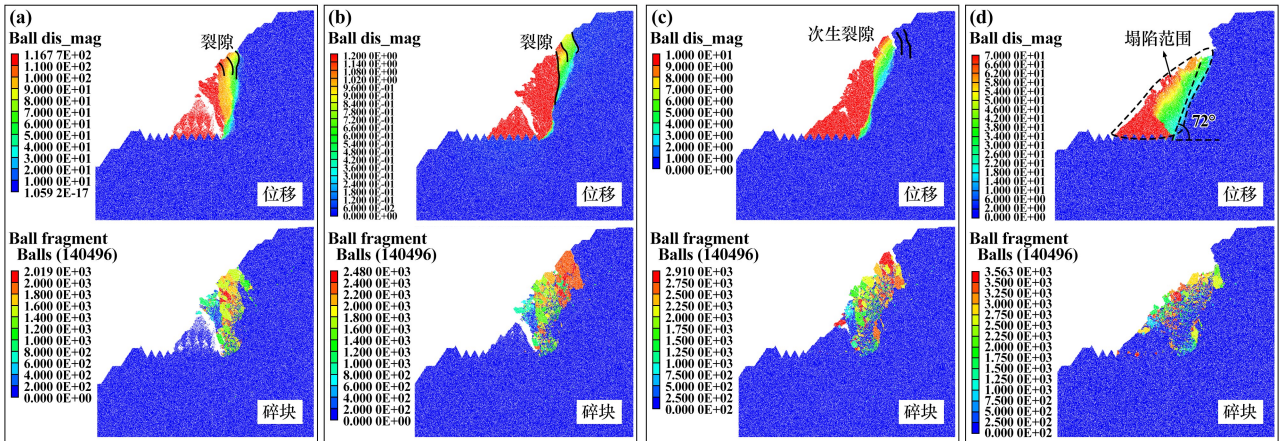
不同开挖时期露天东侧挂帮矿边坡变形破坏规律如图 3~5 所示。由图 3~5 可以看出, I 期开采首先影



(a) 时步  $7.4 \times 10^3$ ; (b) 时步  $2.4 \times 10^4$ ; (c) 时步  $1.5 \times 10^5$ ; (d) 时步  $9 \times 10^5$

图3 I期边坡变形破坏规律

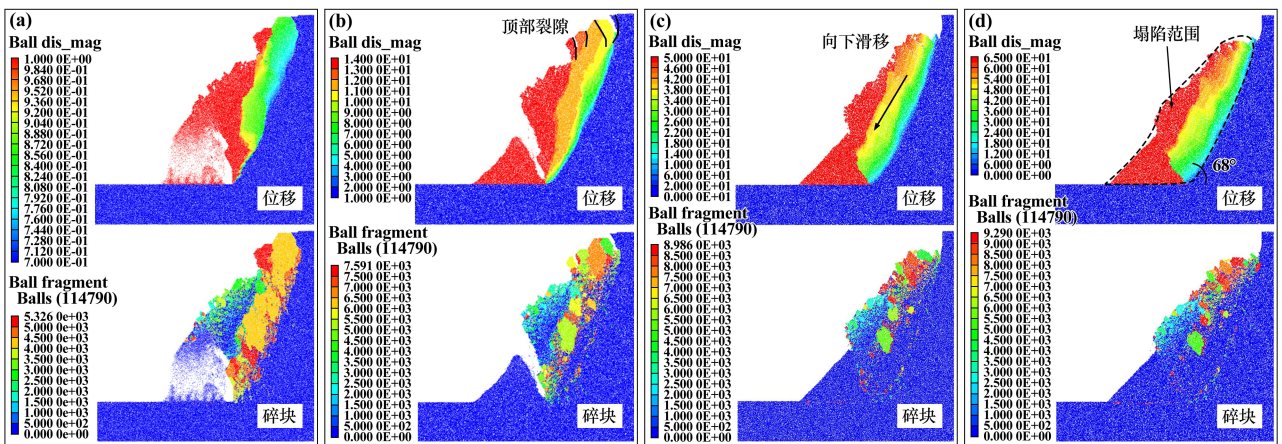
Fig.3 Deformation and failure law for slope in the first stage



(a) 时步  $1.5 \times 10^5$ ; (b) 时步  $3.8 \times 10^5$ ; (c) 时步  $7.8 \times 10^5$ ; (d) 时步  $3.5 \times 10^6$

图4 II期边坡变形破坏规律

Fig.4 Deformation and failure law for slope in the second stage



(a) 时步  $8 \times 10^4$ ; (b) 时步  $4.5 \times 10^5$ ; (c) 时步  $1.7 \times 10^6$ ; (d) 时步  $2.4 \times 10^6$

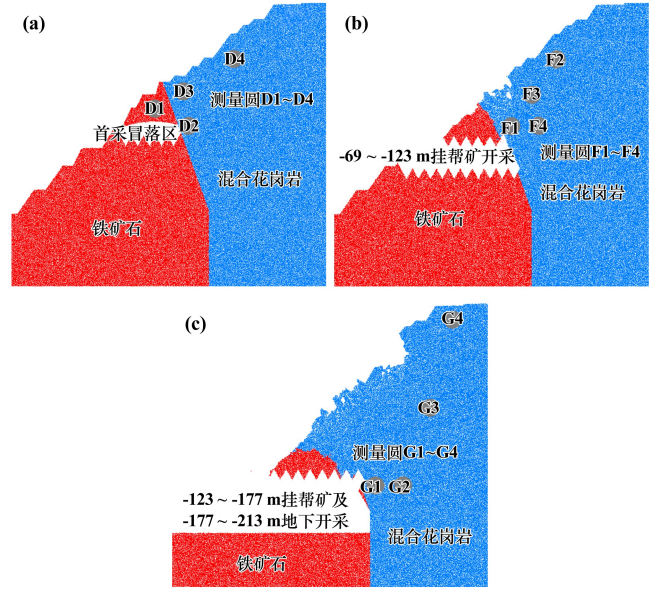
图5 III期边坡变形破坏规律

Fig.5 Deformation and failure law for slope in the third stage

响采空区顶板位置,顶板围岩在自重作用下发生断裂垮落且发生向下位移直至全部垮落;东部围岩受开采影响发生位移并逐渐向东部扩展。顶板围岩全部垮落到底部后,东部受开采影响的围岩也初步发生塌陷滑移。运算至  $9 \times 10^5$  时步时,边坡位移基本不发生变化,塌陷区范围仅局限于采空区顶板及东部区域,边坡塌陷角约  $81^\circ$ 。II 期、III 期开采边坡破坏过程基本相同。首先上一分段的塌陷区岩石松散颗粒在重力作用下滑落,随后采空区附近围岩受到二次扰动,岩石颗粒间平行黏结键发生断裂,受采空区影响,边坡坡面出现了不同程度受拉裂隙,在重力作用下裂隙范围内岩石颗粒发生大规模向下滑移。开挖至  $-213$  m 时边坡塌陷角为  $68^\circ$ 。

### 3.2 应力变化规律

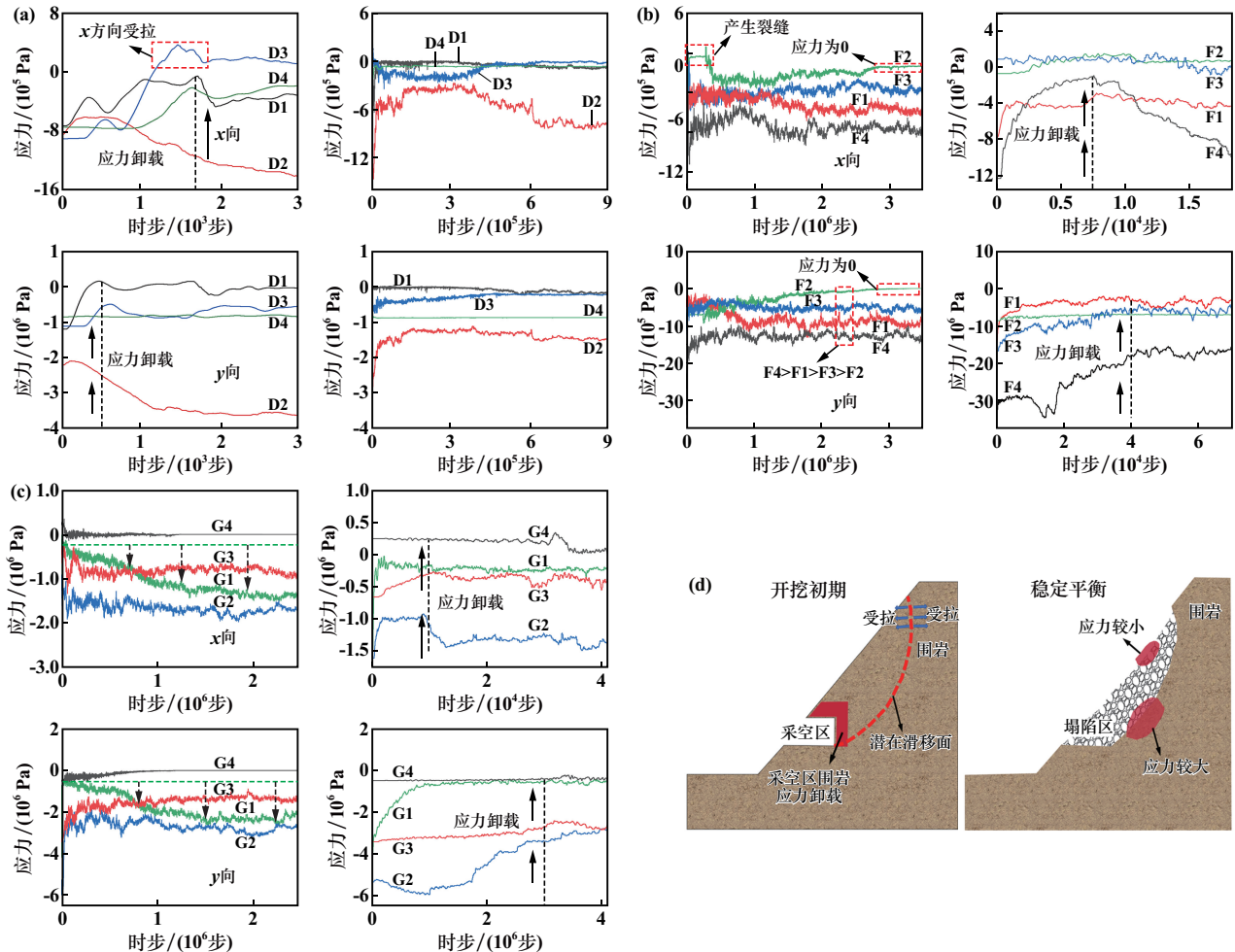
在边坡模型中布置测量圆进行应力监测,如图 6 所示,测量圆半径大于颗粒半径 10 倍以上时监测数据较为准确,因此测量圆半径设计为 15 m。监测得到不同开挖时期测量圆内  $x$  向(水平)和  $y$  向(垂直)的应力随时步变化曲线如图 7 所示。



(a) I 期; (b) II 期; (c) III 期

图 6 测量圆监测点布置

Fig. 6 Layout of monitoring points on a circle for measurement



(a) D1~D4; (b) F1~F4; (c) G1~G4; (d) 边坡破坏形式

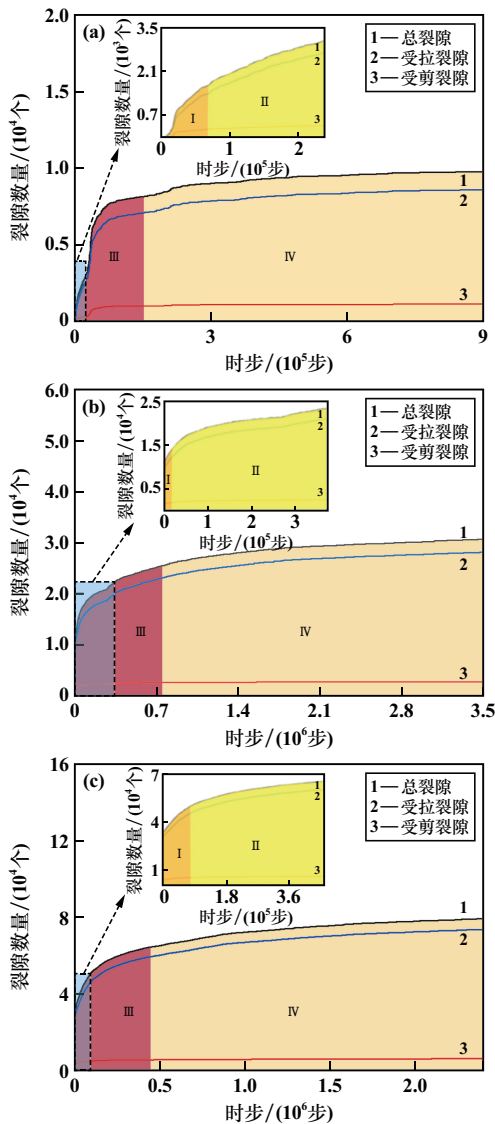
图 7 测量圆应力变化及边坡破坏形式

Fig. 7 Stress changes in measuring circle and slope failure mode

由图7可知,在开挖初期,采空区围岩发生应力卸载,无论是 $x$ 向还是 $y$ 向的应力都发生了明显降低,随后位于坡顶位置的潜在滑移面测量圆在 $x$ 向上受到拉应力,这也表明边坡因开挖引发的破坏形式主要是受拉破坏。计算收敛之后,位于坡内的围岩受到较大应力,位于坡面的围岩受到较小应力,因此判断应力主要来自上覆围岩的压力。

### 3.3 裂隙演化规律

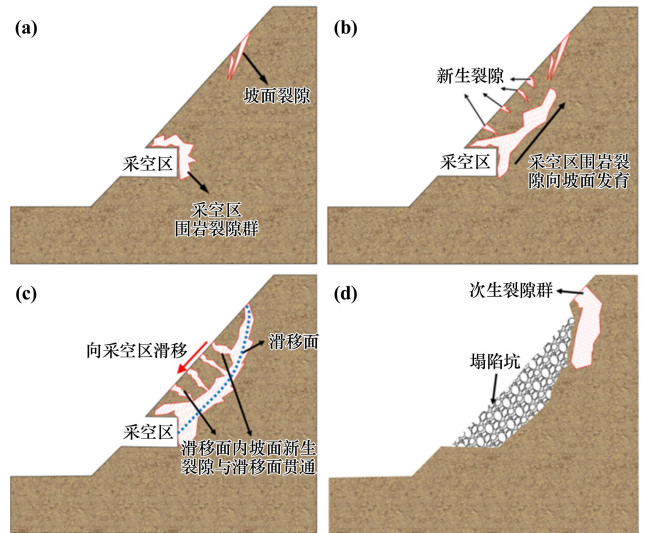
为了更好地从细观角度探究3个开采时期的裂隙全过程演化规律,将颗粒之间平行黏结力链的破坏模式分为剪切破坏(包括拉剪和压剪)和拉伸破坏,对受采空区影响的裂隙发展区域进行重点分析。东帮区域裂隙数量随时步变化情况如图8所示,由此总结崩落法开挖引发的边坡破坏规律如图9所示。



(a) 第一开挖阶段; (b) 第二开挖阶段; (c) 第三开挖阶段

图8 开挖后裂隙数量随时步变化

Fig. 8 Variation of fissure numbers with time step after excavation



(a) 裂隙富集阶段; (b) 时效变形阶段;  
(c) 滑移面贯穿阶段; (d) 塌陷形成阶段

图9 开挖后裂隙发展情况

Fig.9 Fissure development after excavation

综合分析图8和图9可知,东侧挂帮矿开挖后裂隙发展情况可分为4个阶段:裂隙富集阶段、时效变形阶段、滑移面贯穿阶段和塌陷形成阶段。

裂隙富集阶段通常发生在开挖初期,此时临近采空区的围岩由于矿体开采发生了应力卸载现象,在应力释放的驱动作用下,紧靠采空区的围岩产生裂隙群,且在坡面位置出现裂隙。随着时间的推移,围岩在重力作用下发生位移,临近采空区的围岩裂隙不断向坡面延伸,且在靠近采空区的坡面位置产生新裂隙。随着采空区围岩裂隙群不断向坡顶发展,最终与坡顶的裂隙贯通,形成边坡滑移面,滑移面上部围岩将沿着滑移面发生累进性破坏,整个塌陷范围基本在滑移面内;处于滑移面内的坡面裂隙会与滑移面裂隙群发育贯通,此时边坡处于滑移面贯穿阶段。随着滑移面的贯穿,在重力作用下,受开挖扰动的围岩不断向采空区移动,从而形成新的塌陷坑,同时临近塌陷坑外围的坡顶位置出现次生裂隙群,次生裂隙群暂时不会对边坡稳定性造成影响,但随着下一阶段地下开采的进行,此阶段形成的次生裂隙群可能发生贯通从而形成新的潜在滑移面,影响地下开采,此时边坡处于塌陷形成阶段。由以上分析可知,裂隙富集阶段的形成受到采空区围岩卸压、应力驱动作用的影响;时效变形阶段、滑移面贯穿阶段、塌陷形成阶段的形成主要受到重力作用的影响。

开挖过程中裂隙数量增长情况见图10。裂隙数量在富集阶段和时效变形阶段增长速度快,且裂隙增长持续时间短;滑移面贯穿阶段裂隙数量增长较快且时间持

续不久,处于裂隙增长速度由较快增长到平稳增长的过渡阶段;塌陷形成阶段持续时间久,且由于围岩在塌陷形成阶段前已经基本破坏,裂隙数量增长也较为缓慢。

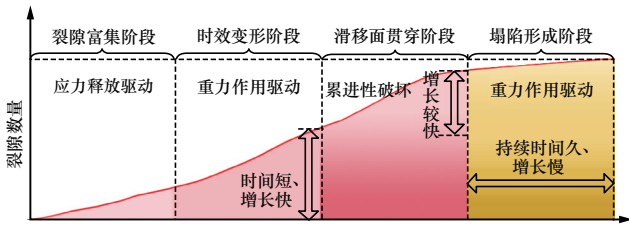


图 10 开挖过程中裂隙数量增长情况

Fig. 10 Increase of fissure number during excavation

### 4 基底摩擦模型试验研究

基底摩擦模型主要用于研究岩体等材料在重力作用下的变形稳定性等问题,目前这种研究方法在岩石力学等领域已经得到了广泛应用。为了验证数值模拟中边坡岩移角的准确性,并进一步探究露天转地下开采边坡破坏规律,采用基底摩擦模型试验探究眼前山铁矿东帮边坡开采至地下-213 m 过程中岩体破坏规律及塌陷范围。

#### 4.1 基底摩擦模型试验铺设

眼前山铁矿东帮剖面概化后的模型如图 11 所示,原型(长 710 m、高 548 m)概化后的剖面模型长 1 000 mm、高 772 mm,试验的几何相似比为 710:1。为了满足圣维南原理中的“模型足够薄”的试验条件,模型的厚度设计为 30 mm。摩擦力加载方向为从上到下,这与实际排土场所受到的重力方向相同。

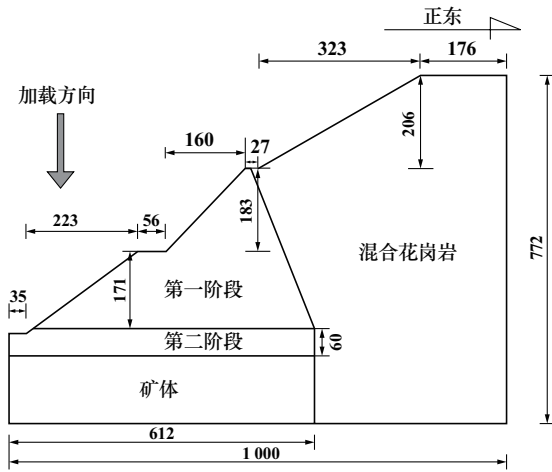


图 11 东帮剖面相似模型 (单位: mm)

Fig. 11 Similar model of eastern slope profile

基底摩擦试验机的动摩擦系数  $\mu$  为 0.75,根据眼前山铁矿东帮边坡岩体的物理力学性质,本次基底摩

擦模型试验选用的材料为砂子、黏土、石膏,材料具体配比见表 3。

表 3 东帮边坡相似材料配比

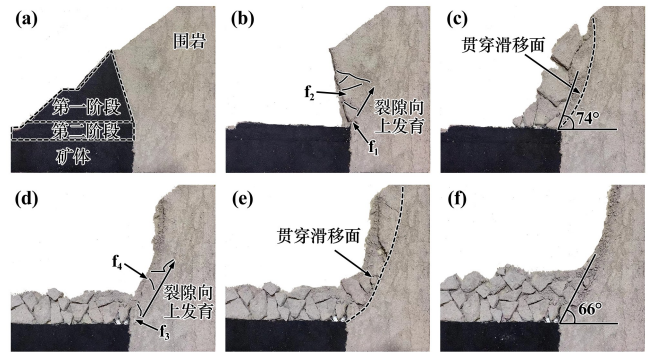
Table 3 Similar material ratios for eastern slopes

岩土类型	相似材料质量分数/%			
	砂子	黏土	石膏	水
混合围岩	77	6.4	6.4	10
铁矿体	78.75	7.875	3.375	10

按照表 3 所示材料配比,用电子秤称好材料,在钢化盆里搅拌均匀,利用木条和铁块在试验台上按照设计好的模型尺寸固定好框架,将搅拌均匀的模型材料倒入模型框架内,利用平整的铁板夯实模型,夯实完毕,用尖刀切割修整出边坡形状。模型铺设完毕后,将模型放置一段时间,待其风干后开始试验。

#### 4.2 基底摩擦模型试验结果及分析

东帮边坡模型不同开采时刻的破坏图像如图 12 所示。图中铁矿体用黑色油墨涂抹表层以达到观察清晰的效果,试验时间  $t$  是试验机启动后的累计时间。由图 12 可知: $t=0$  时机器启动并对第一阶段开挖区进行开挖处理;在第一阶段挂帮矿开挖完毕后, $t=28$  s 时,在边坡坡脚临近采空区位置首先出现了大裂缝  $f_1$ ,且有向上发育的趋势,其他临近采空区位置出现大量与潜在滑移面贯通的次生裂隙  $f_2$ ;  $t=55$  s 时,裂隙  $f_1$  不断向上发展,最终与坡面位置裂隙贯通,且受重力影响,次生裂隙  $f_2$  不断增长发育,并与潜在滑移面贯通,边坡在第一阶段发生拉伸剪切破坏,测得此时的边坡塌陷角为  $74^\circ$ ,此时边坡挂帮矿部分开采完毕,边坡进入地下开采阶段。第二开采阶段初始状态由第一阶段的滑落岩体和新加的碎石体作为地下开采的覆盖层,第二阶段开采的裂隙出现在  $t=70$  s 时,此时靠近采空区的坡脚首先出现小范围的多条裂隙,有临近采空区



(a)  $t=0$ ; (b)  $t=28$  s; (c)  $t=55$  s;  
(d)  $t=70$  s; (e)  $t=96$  s; (f)  $t=128$  s

图 12 模型开挖破坏图像

Fig. 12 Images of failure development during excavation

围岩坡脚位置的大裂隙 $f_3$ ,也有方向近乎水平的微小裂隙 $f_4$ ,这些微小裂隙又在竖直方向上重新组成了新的滑移面; $t=96\text{ s}$ 时,坡顶裂隙在重力作用下和底部的大裂隙 $f_3$ 相互贯通并形成了新的贯通滑移面; $t=128\text{ s}$ 时,边坡的滑移基本趋于稳定,此时试验模拟边坡开采至 $-213\text{ m}$ 处,最终试验模拟塌陷角为 $66^\circ$ ,较数值模拟的结果偏小,但差距不大。东帮边坡模型的破坏机制表现为滑移-拉裂破坏。

## 5 东帮地表岩移塌陷勘查

2023年3月27日至29日,对眼前山铁矿东侧边帮(包括东帮和东南帮)进行了实地地质调查,截至地下开采至 $-213\text{ m}$ 时,实地勘探剖面下沉位置位于矿坑东侧周边标高 $+125\text{ m}$ 的平台上(如图13(a)、(b)所示),虚线以西位置为划定的东帮塌陷区。

结合现场调研和地表模型分析,在地表正射影像上绘制了地表塌陷界限,如图13(c)所示,通过实地考察后在CAD软件中进行反演得到东帮分析剖面区域的塌陷角为 $75^\circ$ ,但由于岩体是一个流变体,需要对得到的移动角进行修正。根据统计数据并结合眼前山矿山工程概况,采用修正系数0.90,得到修正后的眼前山铁矿东帮岩体塌陷角为 $67.5^\circ$ ,数值模拟中开挖至 $-213\text{ m}$ 时边坡塌陷角为 $68^\circ$ ,基底摩擦模型试验中开挖至 $-213\text{ m}$ 时边坡的塌陷角为 $66^\circ$ ,模型试验、数值模拟计算和现场观测勘查的塌陷角结果基本吻合。

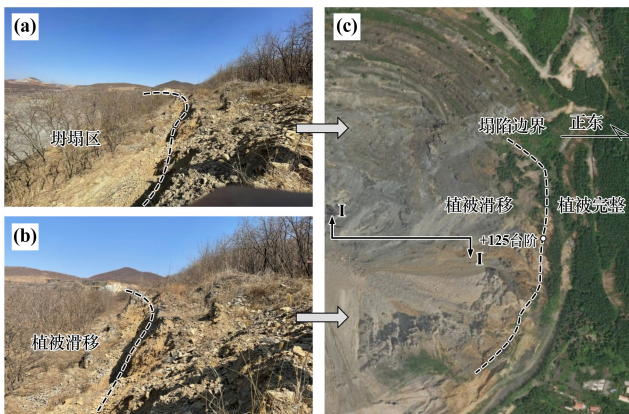


图13 眼前山铁矿实地勘查结果

Fig. 13 Field survey result of Yanqianshan Iron Mine

## 6 结论

1) 利用PFC<sup>2D</sup>软件模拟眼前山铁矿东帮区域崩落法开采导致的塌陷规律,将 $-51\sim-213\text{ m}$ 矿体的开采区域分为三个阶段,随着矿体开采不断深入,受开采扰动塌陷角不断减小。

2) 基底摩擦模型试验和现场勘查结果表明,眼前山铁矿东帮边坡的破坏机制为滑移-拉裂破坏,崩落法开采对边坡稳定性影响较大,通常会造成大规模边坡崩落滑移现象。

3) 从裂隙角度总结塌陷区形成过程,可将塌陷区形成过程划分为四个时期:裂隙富集时期、时效变形时期、滑移面贯穿时期和塌陷形成时期。

## 参考文献(References):

- [1] 郜卓. 眼前山铁矿西端帮开采诱发岩层移动模型试验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018.  
GAO Zhuo. Experimental study on modelling of rock movement induced by mining in the west end gang of Yanqianshan iron ore mine[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2018.
- [2] 马振翰,张治强. 大孤山铁矿楔形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.
- [3] 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, 2018,47(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, 2018,47(8):19-22.
- [4] 张亚民,马凤山,徐嘉谟,等. 高应力区露天转地下开采岩体移动规律[J]. 岩土力学, 2011,32(增刊1):590-595.  
ZHANG Yamin, MA Fengshan, XU Jiamo, et al. Deformation laws of rock mass due to transform from open pit to underground mining in high stress area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(S1):590-595.
- [5] 王孟来,李小双,王运敏,等. 露天转地下房柱法开采扰动下采场稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(2):32-37.  
WANG Menglai, LI Xiaoshuang, WANG Yunmin, et al. Slope stability under disturbance in transition of open-pit to underground room and pillar mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(2):32-37.
- [6] 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, 2019,48(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, 2019,48(12):12-20.
- [7] 孙世国,蔡美峰,王思敬. 露天转地下开采边坡岩体滑移机制的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(1):126-129.  
SUN Shiguo, CAI Meifeng, WANG Sijing. Study of sliding mechanism for slope due to the excavation from open pit into underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(1):126-129.
- [8] 孙世国,郭炜晨,刘文波,等. 露天转地下开采诱发高边坡滑移机制研究[J]. 金属矿山, 2015,44(5):162-165.  
SUN Shiguo, GUO Weichen, LIU Wenbo, et al. Study on high slope sliding deformation mechanism induced by transiting from open-pit into underground mining[J]. Metal Mine, 2015,44(5):162-165.

(下转第26页)

- and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):32-34.
- [4] 李攀云,高文学,张小军,等. 基于 SSA-BP 的爆破振动峰值速度预测研究[J]. 爆破, 2024,41(3):205-211.  
LI Panyun, GAO Wenxue, ZHANG Xiaojun, et al. Prediction of peak velocity of blasting vibration based on SSA-BP[J]. Blasting, 2024,41(3):205-211.
- [5] 范勇,胡名东,杨广栋,等. PCA-GWO-SVR 机器学习用于边坡爆破振动速度峰值预测研究[J]. 振动工程学报, 2024,37(8):1431-1441.  
FAN Yong, HU Mingdong, YANG Guangdong, et al. PCA-GWO-SVR machine learning applied to prediction of peak vibration velocity of slope blasting[J]. Journal of Vibration Engineering, 2024,37(8):1431-1441.
- [6] 何理,刘易和,李琳娜,等. 基于粒子群-最小二乘支持向量机模型的矿山爆破振动速度预测[J]. 金属矿山, 2022(7):145-150.  
HE Li, LIU Yihe, LI Linna, et al. Prediction of blasting vibration velocity of mines based on particle swarm-least squares support vector machine model[J]. Metal Mine, 2022(7):145-150.
- [7] 梁娟. 基于粒子群算法的爆破振动速度智能预测方法[J]. 工程爆破, 2022,28(3):117-121.  
LIANG Juan. An intelligent method of blasting vibration velocity prediction based on particle swarm algorithm[J]. Engineering Blasting, 2022,28(3):117-121.
- [8] 岳中文,吴羽霄,魏正,等. 基于 PCA-GA-SVM 的露天矿爆破振动速度预测模型研究[J]. 工程爆破, 2021,27(4):22-28.  
YUE Zhongwen, WU Yuxiao, WEI Zheng, et al. Research on a prediction model of blasting vibration velocity in an open-pit mine based on PCA-GA-SVM[J]. Engineering Blasting, 2021,27(4):22-28.
- [9] 王志坚,童建军. 钻爆法隧道智能建造技术研究综述与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2023,43(4):529-548.  
WANG Zhijian, TONG Jianjun. Overview and prospect of researches on intelligent engineering technologies for tunnels constructed by drilling-and-blasting method[J]. Tunnel Construction, 2023,43(4):529-548.
- [10] 田宵,汪明军,张雄,等. 基于多输入卷积神经网络的天然地震和爆破事件识别[J]. 地球物理学报, 2022,65(5):1802-1812.  
TIAN Xiao, WANG Mingjun, ZHANG Xiong, et al. Discrimination of earthquake and quarry blast based on multi-input convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022,65(5):1802-1812.
- [11] 高永国,尹欣欣,李少华. 基于深度学习的地震与爆破事件自动识别研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2022,42(4):426-430.  
GAO Yongguo, YIN Xinxin, LI Shaohua. Automatic recognition of earthquake and blasting events based on deep learning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022,42(4):426-430.
- [12] 鲁帆,范占春,马超,等. 基于 Bi-LSTM 的同时同频全双工数字域自干扰抑制方法[J]. 中国科学:信息科学, 2023,53(10):1982-1993.  
LU Fan, FAN Zhanchun, MA Chao, et al. A CCFD digital domain self-interference suppression approach based on Bi-LSTM[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2023,53(10):1982-1993.
- [13] 杨茜. 基于 Bi-LSTM 和图注意力网络的多标签文本分类算法[J]. 计算机应用与软件, 2023,40(9):145-150.  
YANG Xi. Multi label text classification algorithm based on Bi-LSTM and graph attention network[J]. Computer Applications and Software, 2023,40(9):145-150.
- [14] 方佳物,黄天立,李苗,等. 基于迁移学习和 Bi-LSTM 神经网络的桥梁温度-应变映射建模方法[J]. 振动与冲击, 2023,42(12):126-134.  
FANG Jiachang, HUANG Tianli, LI Miao, et al. A method of modeling temperature-strain mapping relationship for long-span cable-stayed bridges using transfer learning and bi-direction along short-term memory neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023,42(12):126-134.
- 引用本文: 张伟,倪彬,王立,等. 基于 Bi-LSTM 算法的露天矿山爆破振动速度预测[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):21-26.  
ZHANG Wei, NI Bin, WANG Li, et al. Velocity prediction for blast-induced vibration in open-pit mine based on Bi-LSTM algorithm[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):21-26.

(上接第 20 页)

- [9] 王栋毅,李夕兵,黎崇金,等. 地下采矿引起地表塌陷机理研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):16-21.  
WANG Dongyi, LI Xibing, LI Congjin, et al. Mechanism of surface-subsidence caused by underground mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):16-21.
- [10] HU Y P, REN F Y, DING H X, et al. Study on the process and mechanism of slope failure induced by mining under open pit slope: A case study from Yanqianshan iron mine, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2019,19:1-27.
- [11] 马凯,杨天鸿,赵永,等. 金属矿急倾斜矿体开采地表移动范围理论分析初探[J]. 煤炭学报, 2024,49(增刊1):1-11.  
MA Kai, YANG Tianhong, ZHAO Yong, et al. A preliminary theoretical analysis of the range of surface movement for mining sharply inclined ore bodies in metal ores[J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(S1):1-11.
- [12] ZHANG L F, CHEN Z H, BAO M, et al. Stability analysis and movement process determination of rock masses under open-pit to underground mining conditions[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2022,8(5):148.
- [13] 李海英,任凤玉,陈晓云,等. 深部开采陷落范围的预测与控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012,33(11):1624-1627.  
LI Haiying, REN Fengyu, CHEN Xiaoyun, et al. The method for predicting and controlling the range of surface subsidence during deep ore-body mining[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2012,33(11):1624-1627.
- 引用本文: 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.