

# 自然崩落法放矿中覆盖层冰碛物穿流特征与控制试验研究\*

王少勇<sup>1</sup>,冯兴隆<sup>2</sup>,吴爱祥<sup>1</sup>,陈冲<sup>1</sup>,黄恒<sup>2</sup>,朱乾坤<sup>2</sup>,眭素刚<sup>3</sup>,孙熙宁<sup>3</sup>

(1.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2.云南迪庆有色金属有限公司, 云南 香格里拉市 674400;

3.中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

**摘要:**为解决自然崩落法放矿中覆盖层冰碛物细颗粒穿流混入带来的高贫化损失难题,采用室内放矿相似模拟试验,选取自然堆积与固结改性两种覆盖层冰碛物状态进行试验,对放矿过程中细颗粒的混入率进行统计分析。研究结果表明:自然堆积覆盖层冰碛物状态下,混入率随放矿高度增加呈幂指数增加,混入率与覆盖层细颗粒含量成正比,冰碛物覆盖层下放矿可划分为纯矿石放出、少量细颗粒快速穿流、细颗粒与矿石混合和细颗粒大量穿流放出4个阶段;固结改性覆盖层冰碛物状态下,细颗粒混入率可降低50%以上,放出矿量增加30%,固结改性是控制覆盖层冰碛物细颗粒穿流混入的有效手段。

**关键词:**自然崩落法;覆盖层冰碛物;细颗粒穿流;混入率;固结改性

**中图分类号:**TD853      **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)04-0040-06

## 0 引言

云南普朗铜矿采用的自然崩落法,是一种成本低、规模大的采矿方法<sup>[1-2]</sup>,矿体直接覆盖层为第四系冰碛物<sup>[3]</sup>,冰碛物粒级范围宽,由巨石、角砾、砾石、砂和黏土等混杂堆积而成<sup>[4]</sup>,矿体崩落至地表后,覆盖层冰碛物随矿石一起向出矿口运移,其中的砂、黏土等细颗粒在放矿过程中具有更快的流动速度,造成矿石的提前贫化与损失,同时也是井下泥石流形成的必要物源条件<sup>[5]</sup>。

探明放矿过程中覆盖层冰碛物细颗粒的穿流特征,制定合理的穿流控制措施,对于普朗铜矿降低贫化损失、优化放矿管理、预防井下泥石流有重要的现实需求和研究价值。关于覆盖层下放矿过程中矿岩流动特性与控制问题,国内外学者进行了大量研究,CASTRO等<sup>[6]</sup>采用室内三维物理模型研究粗细颗

粒粒径之比、数量之比以及细颗粒的位置等对细颗粒穿流速度的影响,指出粗细颗粒的粒径比影响最大,粗颗粒的均匀度越高将有效延迟细颗粒的穿流;吴爱祥等<sup>[7]</sup>将崩落矿岩放矿过程中的流动划分为整体流动与细小颗粒渗透流动两类,分析了矿岩颗粒级配对穿流贫化的影响规律;李昌宁<sup>[8]</sup>定义了崩落矿岩的非均匀度,建立了非均匀矿岩散体动态骨架下细小颗粒的穿流模型,得到了细小颗粒钻缝提前造成贫化的结论,并提出多分段放矿解决细小颗粒穿流贫化的方法;陶干强等<sup>[9]</sup>考虑放矿口大小、散体颗粒的粒径以及不同的散体材料,对矿岩散体的流动规律进行了总结;王洪江等<sup>[10]</sup>指出矿岩孔隙当量越大,覆盖层细小颗粒的穿流现象越明显,并给出了散体孔隙当量的计算方法;金爱兵等<sup>[11]</sup>基于矿石不均匀粒径分布探讨了细颗粒在其中的穿流特性,放矿前的矿石粒径分布的均匀性对细颗粒穿流影响显著;李涛等<sup>[12]</sup>基于颗粒离散元理论,通过细颗粒迁移过程的数值模拟,发现细颗粒物质迁移速率明显比粗颗粒物质快;侯克鹏等<sup>[13]</sup>在矿岩散体粒径组成的基础上分析细颗粒穿流变化规律,对比了注浆和造团两种控制方案的放矿指标;梁维<sup>[14]</sup>采用钢丝绳-混凝土柔性假顶进行矿废隔离,矿石回采率可提高20%。

本文结合普朗铜矿生产过程中遇到的细颗粒穿流贫化损失难题,采用室内放矿相似模拟试验的方法,探讨了细颗粒穿流运动特征与混入发展规律,验证了对覆盖层冰碛物注浆固结改性能够有效控制细颗粒穿流,研究可为此类矿山放矿生产提供理论支撑与经验借鉴。

\* 收稿日期:2023-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52130404);中国博士后科学基金资助项目(2021M691359).

作者简介:王少勇(1983—),男,山东烟台人,博士,高级工程师,主要从事膏体充填理论与技术研究,E-mail:wshy0226@163.com。

## 1 相似模型试验

### 1.1 试验模型与材料

本次相似模型试验以普朗铜矿首采区为原型,首采区出矿水平标高为+3720 m,回采高度为80~220 m,覆盖层冰碛物厚度为40~80 m,出矿口尺寸为4.2 m×4.0 m,聚矿槽间距为30 m,聚矿槽排距为14 m,底部结构高度为16 m。

相似比为1:100,试验模型长×宽×高为90 cm×60 cm×150 cm,矿石层高度为110 cm,覆盖层冰碛物高度为40 cm,放矿口为4 cm×4 cm,聚矿槽间距为30 cm,聚矿槽排距为14 cm,底部结构高度为16 cm。

试验矿石与冰碛物均取自普朗铜矿现场。试样材料经破碎、筛分后重构,矿石级配与矿山崩落矿石级配满足相似比,如图1所示。覆盖层冰碛物为典型的土石混合体,土石粒径差异较大,国内外对土石分界值一般定义在2~5 mm,本文采用2 mm作为粗细颗粒阈值,2 mm以下为细颗粒,2 mm以上为粗颗粒,研究覆盖层冰碛物不同细颗粒含量对放矿结果的影响,颗粒级配曲线如图2所示。

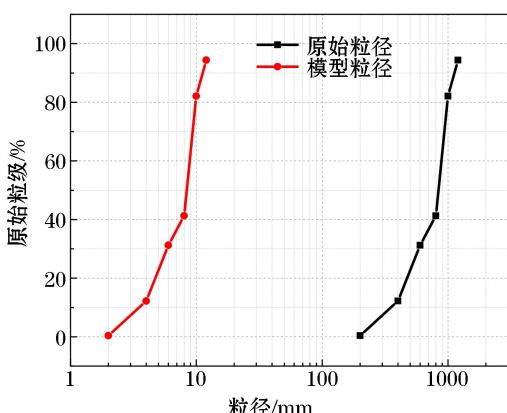


图1 矿石颗粒级配曲线

Fig.1 Gradation curves of ore particles

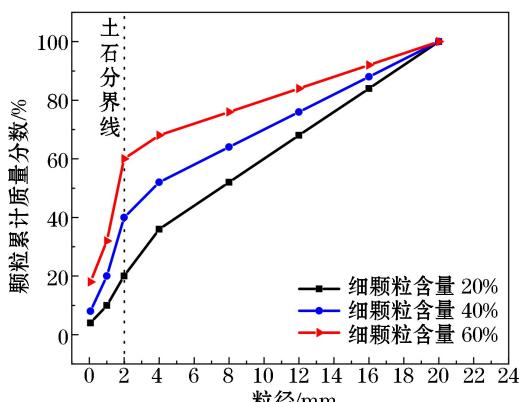


图2 冰碛物颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curves of moraine particles

### 1.2 试验条件假设

自然崩落法矿岩散体在放矿过程中的流动十分复杂,为避免试验结果与分析中不可控因素对试验结果造成影响,有必要对试验条件进行如下假设:

(1) 试验用矿石与冰碛物颗粒均有良好的流动性,颗粒均为自然干燥状态,颗粒之间无黏结作用;

(2) 忽略自然崩落法矿岩运移过程中的碰撞破碎;

(3) 材料装填时,采用中心四分法装填<sup>[11]</sup>,除了铺设标志颗粒外,忽略人工装填影响,认为模型内试样状态为均匀分布状态。

### 1.3 试验方案

相似模型试验从探究覆盖层冰碛物细颗粒穿流特征和对细颗粒穿流控制两方面进行,将覆盖层冰碛物分为自然堆积与固结改性两种状态,共设置了4组放矿试验,自然堆积状态:覆盖层细颗粒含量20%,覆盖层细颗粒含量40%,覆盖层细颗粒含量60%;固结改性状态:固结改性覆盖层细颗粒含量40%。

覆盖层冰碛物采用注浆方式进行固结改性,试验采用与实际注浆相似的工艺进行,采用亚克力管制作的花管,人工推进注射器进行注浆,单孔注浆量为200 mL,注浆孔间距为10 cm×10 cm。本次注浆固结改性采用化学胶结材料,其在细颗粒冰碛物中具有更好的渗透性,通过试验得到其在冰碛物中的扩散半径约为4~7 cm,浆液扩散凝结后,将冰碛物散体颗粒材料凝结成块,实现覆盖层冰碛物的固结改性。

试验均在单漏斗放矿条件下进行,选择模型中间放矿口进行放矿。试验装填高度均为150 cm,竖向高度每间隔10 cm布置一层标志颗粒,标志颗粒间隔为5 cm×5 cm,每层布置187颗;放矿口闸门控制出矿量,每次放出矿量约为2 kg,当放矿口出现标志颗粒时,暂停放矿,对标志颗粒及放出量进行记录;出现冰碛物细颗粒后进行筛分并称重记录。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 冰碛物细颗粒混入率试验结果

放矿过程中覆盖层冰碛物细颗粒在矿石粗颗粒之间穿流,很快到达放矿口造成贫化。将混入矿石的冰碛物进行筛分,冰碛物的混入率可以通过试验中每次放出量中2 mm以下冰碛物细颗粒的占比进行计算,试验结果见表1。

## 2.2 放矿高度对冰碛物细颗粒穿流的影响

根据椭球体放矿理论,随着放矿高度增加,放出体与松动体的范围逐渐扩展,放出漏斗不断延伸扩大,矿石与覆盖层颗粒之间的相互运动增加,矿岩接触面由放矿之前的清晰可见逐步变为模糊的混合接触带,这是由于覆盖层细颗粒穿流运动造成的,直至细颗粒出现在放矿口。

表 1 细颗粒穿流试验结果

Table 1 Inflow experimental results of fine particles

| 放矿高度/cm | 细颗粒混入率    |           |           |               |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|         | 细颗粒含量 20% | 细颗粒含量 40% | 细颗粒含量 60% | 固结改性细颗粒含量 40% |
| 40      | 0         | 0         | 0         | 0             |
| 50      | 0.61      | 0.78      | 0.95      | 0             |
| 60      | 1.14      | 1.66      | 2.89      | 1.23          |
| 70      | 3.11      | 3.55      | 5.69      | 2.15          |
| 80      | 6.44      | 7.52      | 11.98     | 4.21          |
| 90      | 9.36      | 14.64     | 19.86     | 6.33          |
| 100     | 13.5      | 22.42     | 30.29     | 9.42          |
| 110     | 20.91     | 34.57     | 48.80     | 15.02         |

由图 3 可知,覆盖层自然堆积状态下的 3 组放矿试验均表现出细颗粒混入率随放矿高度增加成幂指数函数增长。放矿初期,细颗粒未运动至放矿口,混入率为 0,而后随着细颗粒穿流运动的进行,混入率先缓慢增加,后快速增长。以覆盖层细颗粒含量 40% 为例,放矿高度每增加 10 cm,冰碛物混入率分别增长 0.78, 0.88, 1.89, 3.97, 7.12, 7.78, 12.15 个百分点。细颗粒混入率的增长速度随放矿高度的增加快速增加,增幅可达 54%。放矿高度至 110 cm 时,3 组试验的细颗粒的混入率分别为 20.91%、34.57% 和 48.80%,表明细颗粒均已经充分穿过矿石层,造成出矿口矿石贫化。

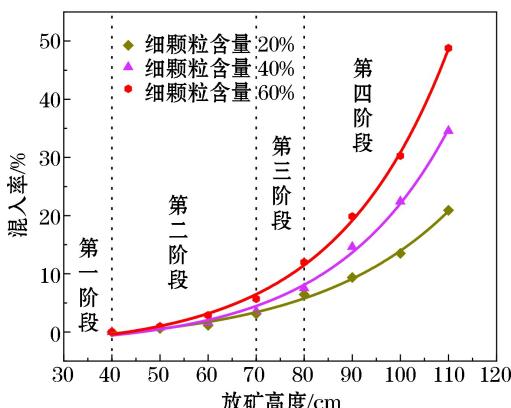


图 3 放矿高度对冰碛物细颗粒混入率影响

Fig.3 Effect of ore drawing height on the mixing rate of moraine fine particles

## 2.3 细颗粒含量对冰碛物穿流的影响

由图 4 可知,在各放矿高度时,随着覆盖层冰碛物细颗粒含量增多,放出矿石中细颗粒的混入率逐渐增加,且增量也随放出高度增加。以放矿高度 90 cm 为例,3 种细颗粒含量下的混入率分别为 9.36%、14.64% 和 19.86%,混入率的提升幅度约为 5.25 个百分点,在放矿高度为 100 cm 和 110 cm 时平均提升幅度分别为 8.40 个百分点和 13.94 个百分点。减少覆盖层冰碛物细颗粒含量可有效降低冰碛物细颗粒的混入,这为放矿中冰碛物细颗粒穿流控制提供了技术思路。

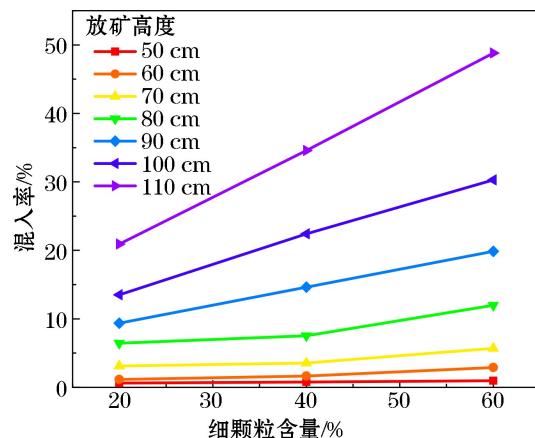


图 4 细颗粒含量对冰碛物混入率影响

Fig.4 Effect of fine particle content on mixing rate of moraine

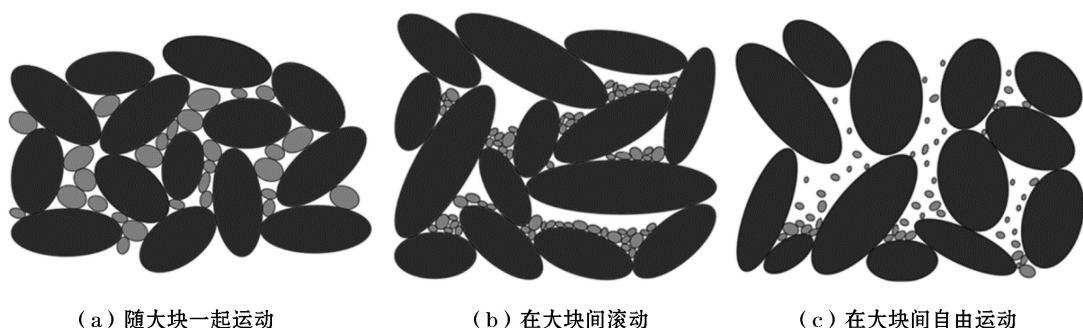
## 2.4 细颗粒穿流特征

已有研究表明,细颗粒在重力相互扰动下在粗颗粒间穿流运动,如图 5 所示,其在矿岩散体中的运动形式主要有 3 类<sup>[15]</sup>:

(1) 随大块一起运动,细颗粒与粗颗粒充分混合,矿岩散体内部间隙较小,运动产生的颗粒间隙立刻被粗细颗粒共同填充,细颗粒无穿流空间,细颗粒穿流量低;

(2) 在大块间滚动,粗颗粒占大部分,矿岩散体内部孔隙增多,且间隙空间较大,粗颗粒对细颗粒的约束减弱,间隙空间可以容纳细颗粒在其间自由滚动;

(3) 在大块间自由运动,细颗粒只占极少部分,粗颗粒形成骨架结构,内部空间出现,细颗粒在重力作用下穿流至间隙底部,此时细颗粒的运动速度明显大于粗颗粒的整体运动速度。

图 5 细颗粒运动模型示意<sup>[15]</sup>Fig.5 Percolation mode of fine particles<sup>[15]</sup>

可见,细颗粒的运动状态与速度与细颗粒在矿岩散体内的含量有重要联系,根据其运动形式与混入率关系,可将细颗粒穿流特征分为4个阶段(见图3):

第一阶段,纯矿石放出阶段,放矿高度小于40 cm,细颗粒混入率为0,细颗粒有运动,但未穿流至此区域,在大块间自由下落的细颗粒也未运动到此高度,覆盖层细颗粒未对此区域产生影响,矿岩接触面开始产生混合;

第二阶段,少量细颗粒快速穿流阶段,放矿高度为40~70 cm,混入率为0.61%~5.69%,少量细颗粒快速穿过矿石孔隙,其运动主要为在大块间自由运动,此部分细颗粒大多为放矿口轴线上快速穿流至放矿口,矿岩接触面混合不充分;

第三阶段,细颗粒与矿石混合阶段,放矿高度为70~80 cm,混入率为6.44%~11.98%,随着矿石放出高度的增加,经过充分运动,不仅从孔隙自由穿流的细颗粒到达放矿口,在矿石间滚动的细颗粒也到达了放矿口,细颗粒开始大量穿流混入矿石,此时矿岩接触面在不断变宽。

第四阶段,细颗粒大量穿流放出阶段,放矿高度为80~110 cm,混入率快速增长至20.91%~48.80%,细颗粒将粗颗粒间的孔隙填满,两者充分混合,随大块一起放出,造成严重的矿石贫化与损失。

认识放矿过程中细颗粒的混入状态,判断覆盖层细颗粒的放出阶段,合理调控放矿规划,可为现场生产规划提供依据。

## 2.5 固结细颗粒效果评价

由图6可知,注浆固结覆盖层后冰碛物的混入率明显降低,各个阶段的混入率均小于未固结情况下,特别是在细颗粒大量穿流阶段,混入率仅为固结前混入率的43.44%,减少细颗粒混入50%以上。截至混入率为15%的条件下,自然堆积状态的覆盖

层放矿高度仅为85 cm左右,固结改性状态的覆盖层放矿高度为110 cm左右,固结细颗粒可使矿石放出量提升30%左右。

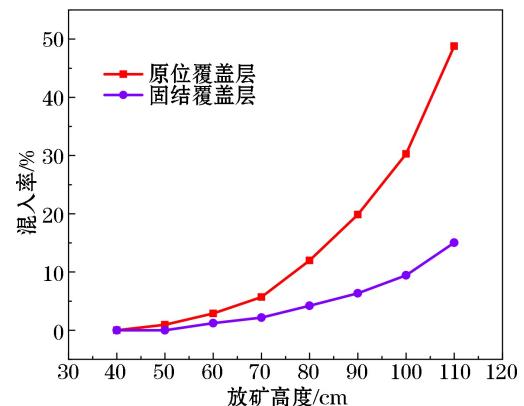


图 6 固结对冰碛物混入率的影响

Fig.6 Effect of consolidation on the mixing rate of moraine

由图7可知,将矿岩物料全部放出后,冰碛物注浆固结体仍能保持块状形态,少部分因碰撞而破碎,总体固结率约为70%。覆盖层固结块还能够极大提升覆盖层的渗透性,增加渗流通道,促进地下水及降雨的排出,大量细颗粒胶结起来降低了其保水性,可降低井下泥石流的发生概率。因此,对覆盖层进行注浆固结改性,不仅能够控制细颗粒穿流,还能降低井下泥石流发生概率,是自然崩落法矿山处置覆盖层的有效技术手段。



图 7 放矿后注浆固结体形态

Fig.7 Shape of consolidated body after ore drawing

### 3 结论

本文通过室内放矿试验对冰碛物覆盖层条件下细颗粒的穿流特征和控制手段进行了分析,得到以下结论。

(1) 覆盖层冰碛物细颗粒在放矿过程中具有明显的穿流现象,细颗粒混入率随放矿高度的增加成幂指数函数增加,放矿后期大量细颗粒混入;细颗粒混入率随覆盖层冰碛物细颗粒含量增高而增加,最高可造成混入率提升1倍以上。

(2) 冰碛物细颗粒穿流特征可划分为4个阶段:纯矿石放出阶段、少量细颗粒快速穿流阶段、细颗粒与矿石混合阶段和细颗粒大量穿流放出阶段,为现场观测冰碛物细颗粒混入状态、合理管控放矿强度提供依据。

(3) 通过注浆技术对覆盖层冰碛物进行固结改性,可将细颗粒粉状变为块状,有效降低细颗粒含量,注浆固结后混入率较固结前降低50%以上,矿石放出量增加30%,提高了矿石回收率,有效降低了矿石贫化率,给矿山生产带来经济效益与安全保障的双提升。

#### 参考文献(References):

- [1] 沈南山,顾晓春,尹升华.国内外自然崩落采矿法技术现状[J].采矿技术,2009,9(4):1-4+15.  
SHEN Nanshan, GU Xiaochun, YIN Shenghua. Technical status of natural caving mining method at home and abroad [J]. Mining Technology, 2009, 9(4):1-4+15.
- [2] 冯兴隆.自然崩落法矿岩工程质量数字化评价及模拟技术研究[D].长沙:中南大学,2010.  
FENG Xinglong. Research on digital evaluation and simulation technology of natural caving mining and rock engineering quality [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [3] 任崇阁,张治强,林洪叶,等.远场条件下崩落法放出体形态分析[J].矿业研究与开发,2022,42(2):11-17.  
REN Chongge, ZHANG Zhiqiang, LIN Hongye, et al. Morphology analysis on draw-out body of caving mining method under far-field condition [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(2):11-17.
- [4] 刘权威,汪龙,甄利兵,等.端部放矿覆岩提前混入研究[J].矿业研究与开发,2020,40(11):10-15.  
LIU Quanwei, WANG Long, ZHEN Libing, et al. Study on overburden pre-mixing in side ore drawing [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(11):10-15.
- [5] 欧阳治华,王胜开,全中学.矿山井下泥石流形成机理与固液耦合数值模拟研究[J].金属矿山,2008(10):21-24+31.  
OUYANG Zhihua, WANG Shengkai, QUAN Zhongxue. Investigation on the formation mechanism of mine underground mud-ston flow and numerical simulation with coipled solid-liquid model [J]. Metal Mine, 2008(10):21-24+31.
- [6] CASTRO Raúl , ARANCIBIA Lenin, GOMEZ René. Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2022(151):105033.
- [7] 吴爱祥,朱志根,习泳,等.崩落矿岩散体流动规律研究[J].金属矿山,2006(5):4-6+45.  
WU Aixiang, ZHU Zhigen, XI Yong, et al. Study on flow law of caved ore-rock bulk [J]. Metal Mine, 2006(5):4-6+45.
- [8] 李昌宁.非均匀度与矿石损失贫化率关系的实验研究[J].化工矿物与加工,2002(2):13-15.  
LI Changning. Study on the relationship between heterogeneous degree of loose body and the rate of ore dissipation and dilution [J]. Industrial Minerals & Processing, 2002(2):13-15.
- [9] 陶干强,杨仕教,任凤玉.崩落矿岩散粒体流动性能试验研究[J].岩土力学,2009,30(10):2950-2954.  
TAO Ganqiang, YANG Shijiao, REN Fengyu. Experimental research on granular flow characters of caved ore and rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10):2950-2954.
- [10] 王洪江,尹升华,吴爱祥,等.崩落矿岩流动特性及影响因素实验研究[J].中国矿业大学学报,2010,39(5):693-698+715.  
WANG Hongjiang, YIN Shenghua, WU Aixiang, et al. Experimental study of the factors affecting the ore flow mechanism during block caving [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(5):693-698+715.
- [11] 金爱兵,陈帅军,孙浩,等.基于不均匀粒径分布的颗粒穿流特性[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(6):1673-1681.  
JIN Aibing, CHEN Shuaijun, SUN Hao, et al. Characteristics of particle percolation based on inhomogeneous particle size distribution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(6):1673-1681.
- [12] 李涛,吴爱祥,韩斌,等.基于离散元理论的自然崩落法放矿细颗粒渗移过程研究[J].工程科学学报,2016,38(11):1509-1514.  
LI Tao, WU Aixiang, HAN Bin, et al. Discrete element method study on the percolation process of fine particles in ore drawing by the block caving method [J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(11):1509-1514.
- [13] 侯克鹏,梁维,文文明.覆盖层细小颗粒穿流控制室内相似模拟研究[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2016,41(1):25-30.  
HOU Kepeng, LIANG Wei, WEN Yiming. Simulation experimental study on fine particles percolation in process of ore drawing [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 41(1):25-30.
- [14] 梁维.急倾斜矿体覆岩放矿钢丝绳-混凝土柔性假顶作用机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.  
LIANG Wei. Study on the mechanism of wire rope-concrete flexible false top action in overburden rock release of sharply inclined ore body [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [15] 文文明.小粒径废石覆盖层下放矿贫化控制方法研究[D].昆明:昆明理工大学,2012.  
WEN Yiming. Study on the control method of ore dilution in the small size waste rock overburden [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.

**Experimental Study on Inflow Characteristics and Control of Overburden Moraine During Ore Drawing by Natural Caving Method**WANG Shaoyong<sup>1</sup>, FENG Xinglong<sup>2</sup>, WU Aixiang<sup>1</sup>, CHEN Chong<sup>1</sup>,HUANG Heng<sup>2</sup>, ZHU Qiankun<sup>2</sup>, SUI Sugang<sup>3</sup>, SUN Xining<sup>3</sup>

(1.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2.Yunnan Diqing Nonferrous Metal Co., Ltd., Shangri-La, Yunnan 674400, China;

3.Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650051, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high depletion loss caused by the inflow of fine particles of overburden moraine during ore drawing by natural caving method, the similar simulation test of indoor ore drawing was adopted, and two overburden moraine states of natural accumulation and consolidation modification were selected for test, and the mixing rate of fine particles during ore drawing was statistically analyzed. The research results show that under the overburden moraine state of natural accumulation, the mixing rate increases exponentially with the increase of ore drawing height, and the mixing rate is proportional to the content of fine particles in the overburden. The ore drawing under the moraine overburden can be divided into four stages, including pure ore discharge, rapid inflow of a small amount of fine particles, mixing of fine particles with ore and large inflow of fine particles. Under the overburden moraine state of consolidation modification, the mixing rate of fine particles can be reduced by more than 50%, and the amount of ore drawing can be increased by 30%. Consolidation modification is an effective means to control the inflow mixing of fine particles of overburden moraine.

**Key words:** Natural caving method, Overburden moraine, Inflow of fine particles, Mixing rate, Consolidation modification