

# 石碌铁矿潜在滑坡冲击能量扰动地下巷道稳定研究

张东炜<sup>1</sup>,王培涛<sup>2,3\*</sup>,王献纲<sup>1</sup>,王艺<sup>4</sup>,陈益朝<sup>1</sup>,黄浩<sup>2,3</sup>,付翊林<sup>2,3</sup>

(1.海南矿业股份有限公司; 2.北京科技大学资源与安全工程学院;

3.北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室; 4.金诚信矿业管理股份有限公司)

**摘要:**针对石碌铁矿边坡滑坡及其冲击作用下地下巷道危险带预测问题,通过霍普金森压杆冲击试验,研究矿岩在等冲击气压下的动态力学性质,并结合颗粒流离散元PFC方法,开展了石碌铁矿边坡滑坡研究,分析滑坡冲击细观力学特征及其对地下巷道的影响。研究表明:岩性为均质时,矿岩破坏模式呈“V”字形;岩性为非均质且高径比 $\alpha=2$ 时,矿岩呈强脆性破坏模式且破坏后试件较完整,冲击长度与试件的破碎程度成正比。边坡滑坡由浅部岩层变形破坏诱导内部岩石颗粒破坏,主要沿着边坡坡顶至坡底方向滑移。滑坡表面光滑,滑移速度主要为4.5 m/s,边坡最终自然休止角为20°,滑坡体内部位移为100~200 m,最大位移达到310.6 m。-45 m水平巷道有垮塌风险,-60 m和-75 m水平巷道安全。该研究为矿区滑坡冲击对地下巷道稳定性的影响提供有益的参考。

**关键词:**露天边坡;滑坡冲击;能量扰动;巷道稳定性;PFC2D软件;SHPB试验

中图分类号:TD853

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)11-0015-08

doi:10.11792/hj20251103

## 引言

随着矿山开采深度增加,露天开采矿山形成了大量露天矿边坡。在降雨渗流、开采扰动等因素下边坡体强度降低<sup>[1-3]</sup>,土体、岩体及其混合体处于失稳状态,导致边坡滑坡。同时,形成的滑坡冲击能量对地下巷道围岩稳定性有着一定的影响,揭示滑坡冲击对地下巷道围岩的影响机制是保证地下高效开采的措施之一。为了解决滑坡冲击对工程施工的影响,众多学者采用室内试验的方式对滑坡冲击进行研究,得到了一系列成果。段钊等<sup>[4]</sup>对砂质粉土冲击液化机理进行探究,认为土体不排水导致内部孔压快速积累。周月等<sup>[5]</sup>开展了滑坡冲击破碎物理模型试验,得出冲撞破碎对岩质滑坡的能量耗散有着重要作用。纪虹等<sup>[6]</sup>发现滑块体积及测点位置均会对滑坡涌浪冲击压力产生影响。

上述研究结果通过室内试验角度分析边坡滑坡过程,滑坡内部细观力学破坏过程描述较少;随着计算机技术的发展,数值模拟方法在边坡工程领域应用广泛,得到了一系列研究成果。黄帅等<sup>[7]</sup>提出了一种基于改进SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)法的流固耦合分析模型,能够很好地模拟大坝变形的

整个受灾过程。王孟鸿等<sup>[8]</sup>对网架结构在山体滑坡冲击下的垮塌进行模拟,并加固塑性杆件使结构的抗倒塌能力提升。陈果等<sup>[9]</sup>以三溪村为例,结合PFC及室内试验,发现在滑坡堆积阶段,房屋主要受滑坡岩土体的静态堆积作用。陈鑫等<sup>[10]</sup>以勉县老道寺镇楼子沟为例,认为滑坡初期发生蠕滑变形,上部滑体沿着下部破裂面滑动程度随着滑坡变形量增大而增大。吴越等<sup>[11]</sup>采用离散元法进行模拟并以实际工程为例,发现在几何条件不变的情况下,冲击能对滑体内摩擦角最敏感,对滑体内聚力则不敏感。王升等<sup>[12]</sup>采用拉格朗日控制方程的物质点法建立模型,模拟获得的滑坡参数与实际观察结果吻合较好。王泽华等<sup>[13]</sup>对滑坡冲击单体建筑物进行数值模拟研究,分析了建筑物发生不同破坏形式的原因与破坏机理。黄瑞启等<sup>[14]</sup>建立三维模型,对水上滑坡冲击涌浪的远场传播进行了分析,得出滑坡涌浪相对波高与周期由滑坡体弗劳德数、相对下滑时间及滑坡体相对体积决定。陈兴等<sup>[15]</sup>对马边滑坡三维颗粒流数值模型进行重构,模拟并研究了滑坡的运动堆积和冲击过程,发现随着坡脚距增大,冲击力呈现指数衰减特征。王念秦等<sup>[16]</sup>以泾阳南塬西庙店滑坡为研究对象,运用颗粒流离散元法模拟其运动过程,发现滑体对阶地易侵蚀层的冲击刮

收稿日期:2025-06-10; 修回日期:2025-07-25

基金项目:海南省科技专项资助项目(ZDYF2024GXJS307);国家重点研发计划项目(2023YFC2907400,2021YFC2900500);国家自然科学基金项目(52074020,52574101)

作者简介:张东炜(1985—),男,工程师,硕士,从事金属矿山采矿技术及管理工作;E-mail:zdw450674870@163.com

\*通信作者:王培涛(1987—),男,教授,博士,从事矿山岩体力学与工程稳定性等方面的研究工作;E-mail:wangpeitao@ustb.edu.cn

铲作用显著。

部分学者对工程中的问题提出了新的计算方法。高杨等<sup>[17]</sup>提出了地表可铲刮层在附加冲击荷载作用下铲刮变量的理论计算方法,实现了铲刮变量的定量计算。程谦恭等<sup>[18]</sup>提出了一种剧冲式高速岩质滑坡碰撞解体及冲击成坝阶段滑坡坝冲击夯实力学机理,推导出滑坡坝土石体压实密度的计算公式及方程。吴越等<sup>[19]</sup>基于滑体与受灾体冲击过程的能耗机制,提出了冲击能计算方程组,并推导出滑体冲击能简化计算模型。王占彬等<sup>[20]</sup>提出了一种地震作用边坡滑坡冲击桥桩结构的光滑粒子流体动力学算法,大幅提高计算效率。柴利蒙等<sup>[21]</sup>利用数值模拟方法验证金宝铁矿边坡加固措施的稳定性,发现该边坡呈下部剪切-上部张拉的滑移模式。

滑坡-碎屑流是一种突发性地质灾害,具有体积大、速度快和运移距离大等特点,往往会造成灾难性事故<sup>[22]</sup>。许多学者针对滑坡-碎屑流带来的滑坡冲击问题开展了一系列研究。陆鹏源等<sup>[23]</sup>开展了滑坡物质大小及基底物质粒径和堆积厚度对铲刮效应的影响研究,发现滑坡-碎屑流的冲击铲刮作用在前部主要表现为冲切破坏,在中后部主要表现为运动剪切作用。张贝等<sup>[24]</sup>针对高速滑坡碎屑流冲击效应开展了物理离心试验与数值模拟试验,揭示了科氏加速度对高速滑坡碎屑流的影响。严彬彬等<sup>[25]</sup>开展了三维离散元数值模拟研究,发现碎屑流体积与碎屑流运动能力成正比。袁锦涛等<sup>[26]</sup>研究不同地形偏转和颗粒级配对滑坡碎屑流运动堆积过程的影响,发现颗粒级配的影响程度较小,地形偏转度影响程度较大。张睿骁等<sup>[27]</sup>运用三维离散元模拟软件,得到凹形圆弧导引结构对颗粒的导引作用最优。王忠福等<sup>[28]</sup>以贵州省纳雍滑坡-碎屑流为研究对象,通过室内模型试验和PFC3D数值模拟,发现挡墙越高,对碎屑流运动产生的阻碍作用越明显。

基于上述研究,针对石碌铁矿滑坡冲击问题,开展矿岩霍普金森压杆冲击试验,研究等冲击作用下矿岩的破坏特征。根据现场调研结果,结合颗粒流离散元PFC2D软件建立边坡力学分析模型,分析石碌铁矿边坡滑坡过程及其对地下巷道的影响,揭示滑坡冲击下地下巷道的稳定状态。

## 1 工程概况

石碌铁矿位于海南省西部的昌江黎族自治县石碌镇。北一采区所在区域属于低山地貌,地表已经形成较大范围的露天采坑,露天矿东帮边坡岩体实际为小英山山体,在露天开采阶段就已经出现滑坡问题。矿区地层经长期剥蚀,呈现出复杂的岩性和构造。矿

体及上下盘围岩稳定性一般较好,但矿区皱褶、断裂发育且具多期性活动特点,导致岩石强度明显降低。石碌铁矿床为多金属矿床,以铁矿为主,伴有钴铜矿,成因受构造控制。矿区以地表及浅部的双透岩与赋存的赤铁矿为主,且受采矿开挖工艺扰动,有大规模较大块的碎石和岩块在部分矿区堆积,形成松散岩层。

矿区位于热带,属于热带海洋性气候,全年无霜冻。5—10月降水集中,区域内水系较发育,有多个水库,流量随季节变化。地下水主要为构造裂隙水和风化裂隙水,水量变化与大气降雨关系密切,地下水主要承受大气降水补给。

石碌铁矿山体裂缝发育明显且已经存在滑落的软弱岩体,随时可能由于山体滑坡的地表冲击作用造成地下采区极大破坏,因此亟须开展滑坡冲击对地下矿井潜在危害的研究。

## 2 霍普金森压杆冲击试验

### 2.1 试验过程

试验设备采用中国矿业大学(北京)的霍普金森压杆(SHPB)试验系统(如图1所示),矿岩样采用高度与直径为50 mm×50 mm(高径比 $\alpha=1$ )、100 mm×50 mm(高径比 $\alpha=2$ )2种规格的试件,且内部主要组分为赤铁矿石。试验具体步骤为:①试件表面均匀喷上白漆且贴上DIC散斑纸;②检查压杆的应变片安装情况,完成1次空载冲击;③波形整波片表面均匀涂抹凡士林且粘贴至入射杆撞击处;④装入试件,在试件两端均匀涂抹凡士林,并固定压杆和试件的接触端,同时连接高速摄影采集系统与激光测速系统;⑤加载0.25 MPa冲击气压开始试验。

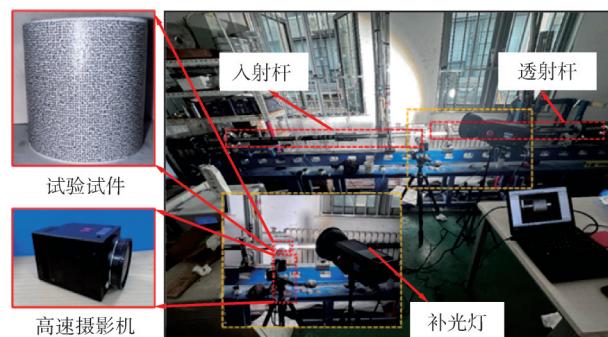


图1 SHPB试验系统

Fig. 1 SHPB experimental system

### 2.2 试验结果及分析

#### 2.2.1 破坏特征

试件破坏分布特征如图2所示。由图2可知:在冲击作用下,岩性为均质时,试件破坏均由一条两端面贯穿裂隙所导致,同时破坏裂隙均由试件的冲击端

面萌发及扩展至试件底部,形成主裂隙且呈“V”字形破坏特征;在岩石破坏过程中,次生裂隙发育显著,导致试件表面有局部剥落。随着试件高度增大,其中心部分出现碎屑化现象且表面剥落的面积较大,这是试件高度增大导致冲击力在试件中心集中程度相对较小。

在岩性为非均质且高径比为2时,发现试件中部位置形成贯通端面且其表面光滑平整和局部有剥落现象。破坏后试件相对完整,呈强脆性破坏模式。冲击长度的减少使得试件破碎程度降低,试件破坏形态相对完整,强度提高显著。

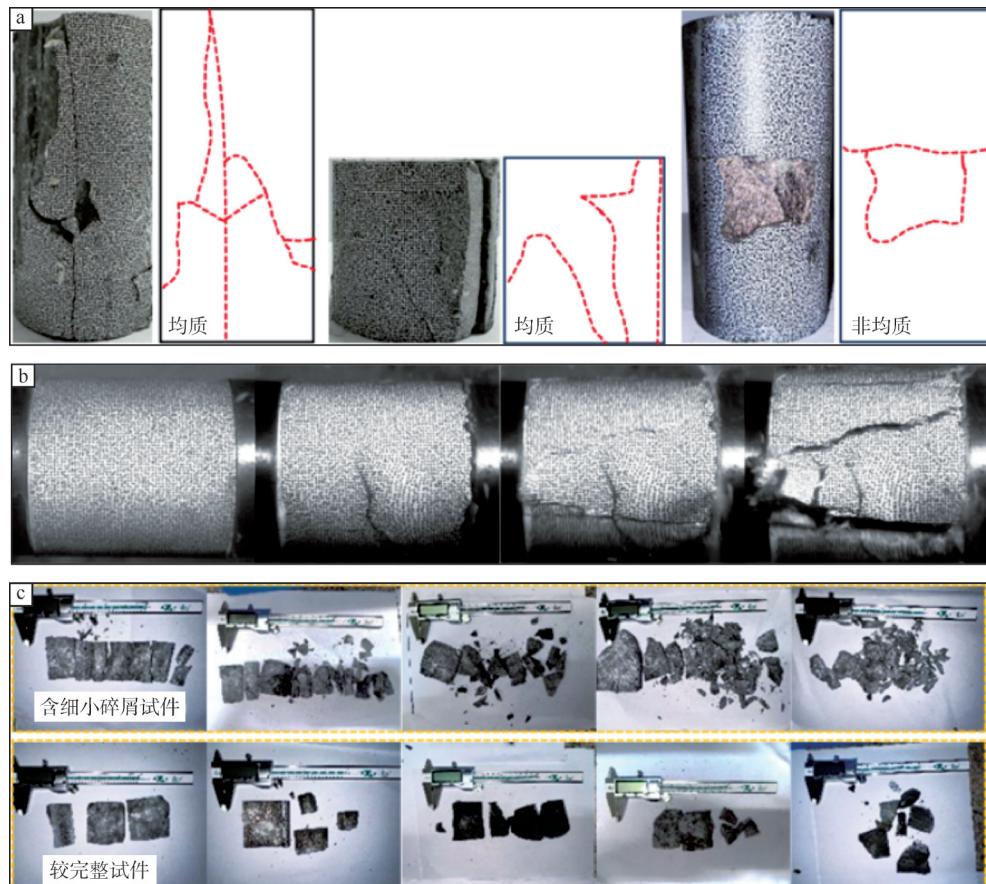


图2 试件破坏分布特征

Fig. 2 Characteristics of specimen failure distribution

在岩性、弱化层理等内因作用下试件的破碎岩块具有多种分布情况,其分布如图2-c所示。冲击破坏后的试件碎块分布主要分为两大类型:一类为大块矿岩样与细小碎屑混合;另一类为大块与小块矿岩样的混合。研究发现,试件在动载冲击作用下最终仅剩下具有微弱承载能力的部分岩石骨架及微裂纹扩展破裂导致的碎屑。

### 2.2.2 DIC监测破坏分析

动态加载破裂过程主应变场云图如图3所示。由图3可知:试件在加载初期( $0 \sim 300 \mu\text{s}$ )处于弹性压密阶段,表面不存在高应变区且应变场分布均匀,仅在端面处有较大应变。加载中期( $300 \sim 600 \mu\text{s}$ ),试件表面应变场有较大增幅,且受层理影响开始出现重分布现象,此过程中试件内部结构出现微裂纹和一定损坏,未出现宏观裂纹。随着进一步加载动载冲击( $600 \sim 900 \mu\text{s}$ ),内部高应变区沿层理逐渐向外延

伸,表面出现应变集中,试件宏观裂纹萌生并形成宏观裂隙面。冲击结束后( $900 \sim 1500 \mu\text{s}$ ),试件表面裂纹发育贯穿,造成整体破坏,试件端部因冲击摩擦而起裂破碎,且在冲击作用下脱离入射杆与反射杆。

试件在冲击动载的作用下未出现瞬间破坏,而是在内部出现损伤后由于层理等软弱夹层的应力集中逐渐顺层向表面发展成宏观破裂面,其扩大并贯穿试件形成冲击破坏面,表明动载下矿岩试件的裂纹萌生、发展及破坏受试件内部应力集中程度与层理控制。

## 3 滑坡冲击数值计算

### 3.1 岩石细观参数标定

室内试验和数值模拟的单轴压缩应力-应变曲线与破坏模式对比如图4所示。在试验条件下,试件破坏模式均为斜轴剪切破坏模式,且存在多条竖向张拉

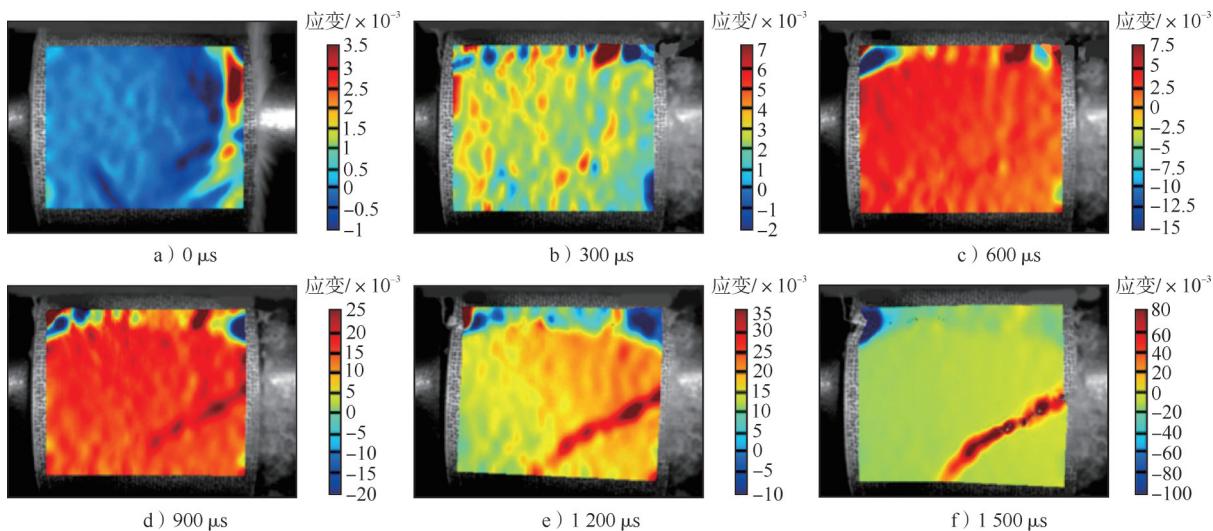


图3 动态加载破裂过程主应变场云图

Fig. 3 Nephogram of principal strain field during dynamic loading and fracture process

裂纹,数值模拟应力-应变曲线与室内试验的应力-应变曲线存在较小差异,这是由对实际岩石内部组分与

结构简化所导致的,数值模型的变形破坏与实际岩石的变形破坏较一致。岩石细观力学参数如表1所示。

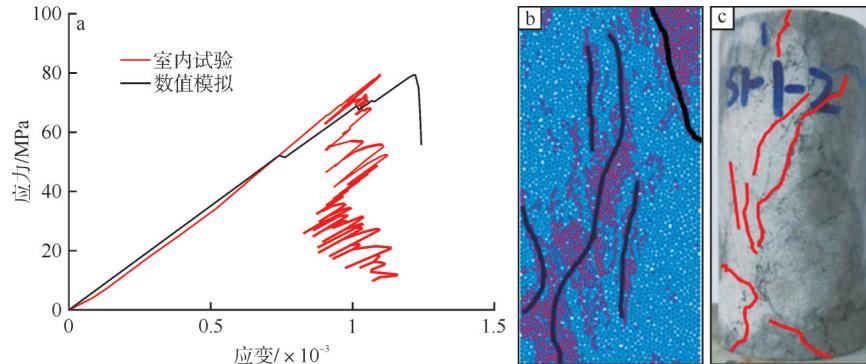


图4 单轴压缩破坏模式

Fig. 4 Uniaxial compression failure mode

表1 岩石细观力学参数

Table 1 Rock micromechanical properties

粒径比 $R_{\max}/R_{\min}$	颗粒密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	颗粒摩擦系数	弹性模量/Pa	刚度比	有效模量/ Pa	黏结刚度比	内聚力/ Pa	抗拉强度/ Pa	内摩擦角/(°)	黏结摩擦系数
1.5	2 500	0.58	$1 \times 10^9$	1.0	$9.36 \times 10^{11}$	1.66	$1.2 \times 10^8$	$3 \times 10^7$	45	0.58

### 3.2 滑坡冲击力学分析模型

滑坡冲击力学分析模型建模过程如图5所示,对三维矿山模型竖向剖切,准确表征潜在滑坡面的地貌特点并转化为二维矿山边坡剖面,如图5-a所示。基于Geo-Studio的降水分析结果完成剖面边坡分界且其为滑移线,同时结合实际尺寸优化建立-45 m、-60 m、-75 m水平3.8 m直径的圆形巷道,其水平间距为18 m。采用MATLAB图像识别代码对二维剖面图进行图像处理,将建模区域分成3个部分,剖面图输出含有3种颗粒的二维PFC滑坡剖面模型,颗粒从上到下依次分组为削坡体、滑体和滑床,如图5-b所示。

利用PFC内置measure命令对全巷道、巷道间等间距采空区进行测量圆布置(如图5-c黑色圆点所示)。采用削坡开挖法进行模型的迭代运算,冲击破坏特性研究力学模型如图5-c所示。

### 3.3 滑坡冲击细观特征

边坡破坏发展颗粒图如图6所示。由图6可知:模型在开挖后暴露出3个较大的深凹台阶面与多个小型台阶面,表明在未开挖削坡体前的自平衡迭代过程中基本保持原边坡坡线的结构不变,在重力和颗粒相互挤压下未发生较大形变。

模型迭代初期(如图6-a)~c所示):在重力作用

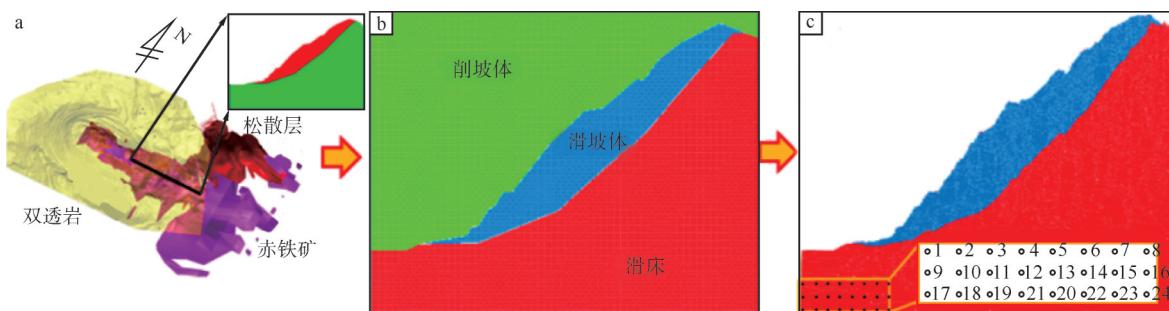


图5 滑坡冲击力学分析模型建模过程

Fig. 5 Establishment of two-dimensional discrete element numerical model

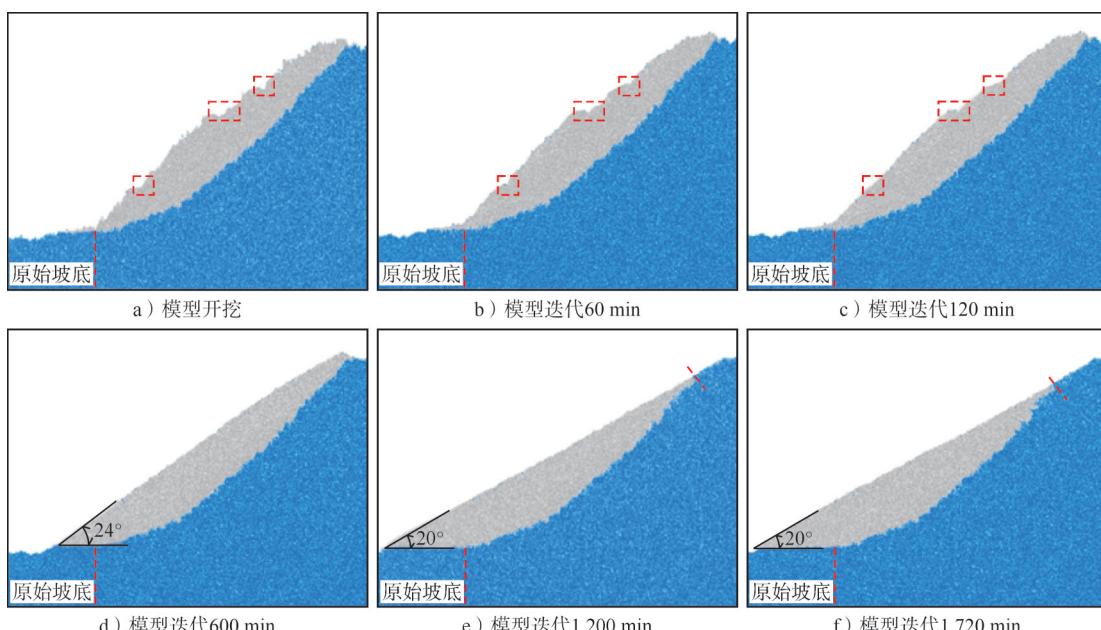


图6 边坡破坏发展颗粒图

Fig. 6 Particle diagram of slope failure development

下局部坡面弱支撑颗粒向下滑移。3个深凹台阶面结构形态基本保持不变,其余台阶被全部填满,边坡面基本光滑,未发生整体滑移。坡底地表整体在自重作用下较平整且无上覆滑坡土层。目前,石碌铁矿小英山边坡正处于该阶段,坡面土体与岩石下滑并填充开采台阶,形成多个深凹台阶面未完全填充。

模型迭代中期(如图6-d所示):边坡表面光滑且形成1条平直坡面线,沿滑移线发生整体滑坡滑移,台阶面完全填充,坡底较平整且部分区域有滑体颗粒覆盖。由于存在滑床坚硬岩层支撑作用,因此坡顶处的滑坡体保持原有坡顶角度斜面,此时边坡倾角为24°。

模型迭代后期(如图6-e)、(f)所示):边坡倾角逐渐减小,同时在较长迭代运算中未发生较大变化,该边坡最终的自然休止角为20°。边坡整体下滑趋势明显,坡底平整且大部分区域有滑坡体颗粒单元覆盖。滑床在滑坡作用下明显下沉并与坡顶发生一定错动,坡顶无法保持原有正常地形,此时已经有部分滑床颗粒(蓝色)侵入滑体颗粒(灰色)中并在同一条边坡坡

线中保持稳定。这表明滑床坚硬岩石颗粒单元在滑坡作用下最终发生部分破坏,与滑体颗粒滚落。其他部分的滑床与滑体交界线基本保持不变,说明中下部坚硬滑床单元未伴随发生二次破坏。

滑坡破坏过程速度云图如图7所示。边坡开挖掉上层削坡体后受扰动较小且分布不均匀,整体模型的初始速度量级小,从坡顶到坡脚速度减小、竖向分层。模型加载前期(0~430 min),边坡滑移以表面悬浮颗粒沿台阶面滑移、填充滑坡上各台阶为主,此时边坡较为稳定,主要滑移块体速度为3 m/s,游离颗粒部分速度达5.8 m/s,整体滑移趋势主要集中在滑坡中下部、坡脚位置(如图7-b)、(c)所示)。模型加载中期(430~860 min),滑坡表面台阶被完全填充,此时滑坡体整体向下顺坡滑移,并诱导部分滑床单元的坚硬岩石颗粒下滑,主要滑移块体速度为4.5 m/s,悬浮颗粒速度峰值为7.5 m/s(如图7-d所示)。模型加载后期(860~1290 min),滑坡体的整体滑动基本停止,主要是坡脚与水平面交界处及坡顶位置仍存在滑动颗粒,表明坡顶部分软弱滑坡体颗粒正带动坚硬滑床

颗粒同时滑动(如图7-e所示)。模型加载结束( $1290 \sim 1720$  min)时,速度数量级为 $10^{-7}$ ,速度分布为层理形态且在边坡表面连通,表明边坡表面颗粒

分布不均可能导致块石飞落等二次灾害(如图7-f所示)。

滑坡破坏过程位移云图如图8所示。受边界条

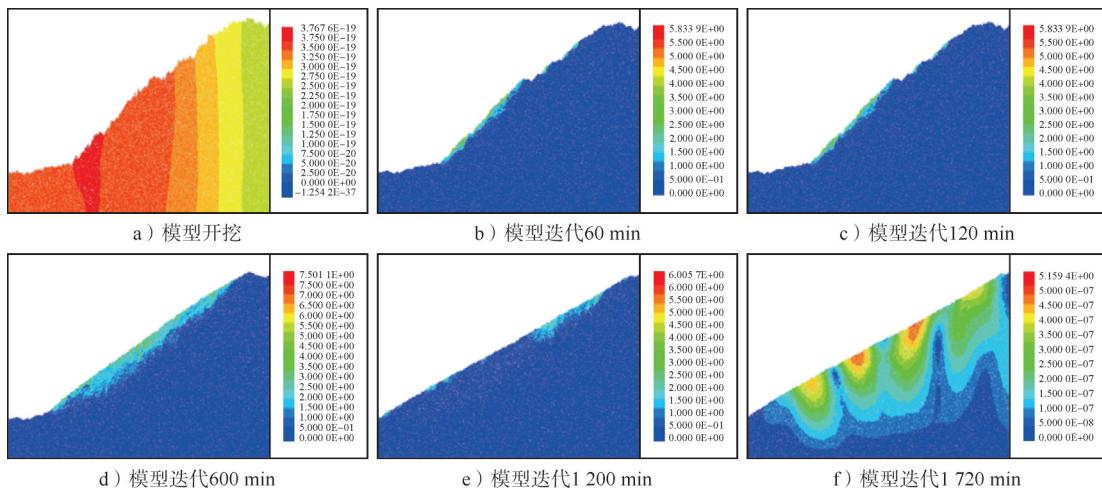


图7 滑坡破坏过程速度云图

Fig. 7 Nephogram of slip failure process velocity

件影响,模型在自平衡过程中存在四周向边坡左右两端挤压的作用,开挖后位移没有发生瞬时变化,同时发现整体位移呈边坡中部向四周环形分布,如图8-a)所示。模型加载前期( $0 \sim 430$  min),位移沿着坡脚方向呈圆弧层理形逐渐减小,表明在重力作用下边坡整体有沿着向下压缩的趋势。边坡表面3个深凹台阶处有沿坡线方向的层理位移分布。该阶段内边坡上部与边坡中下部浅层岩层颗粒出现明显的滑动,如图8-b)、c)所示。模型加载中期( $430 \sim 860$  min),

边坡的滑床坚硬基岩压密,仅滑坡体浅层有顺层滑移现象,滑移位移呈层理分布。位移由边坡表面向内部逐渐减小,最大位移为 $136.9$  m且集中于坡脚位置。坡脚表面部分位移数量级为 $10^2$ ,滑坡体内部位移为 $40 \sim 70$  m,如图8-d)所示。模型加载后期( $860 \sim 1720$  min),滑坡位移分布形态不变,最大位移达 $310.6$  m,整体位移数量级为 $10^2$ ,滑坡体内部位移为 $100 \sim 200$  m,如图8-e)、f)所示。

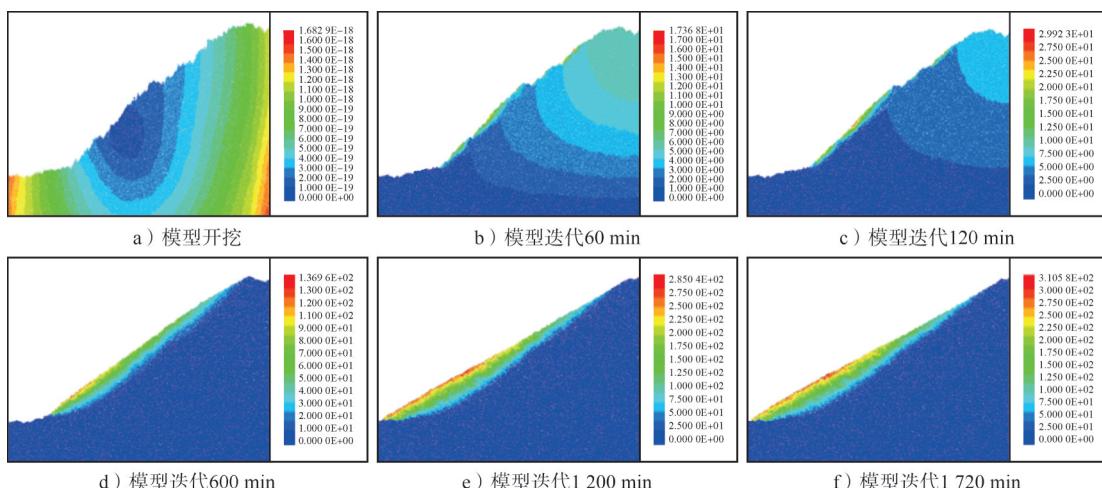


图8 滑移位移云图

Fig. 8 Nephogram of slip displacement

#### 4 基于滑坡冲击的井下潜在危险区

为了探究边坡滑坡对地下巷道的影响,通过地下巷道二维小断面外部输入的冲击动能( $E_k$ )与内部输出的弹性应变能( $U_e$ )判断巷道的稳定性。其中,冲击动能由所有划分的巷道颗粒组动能之和求得,如

式(1)所示,主要通过hist命令和PFC内置函数模块记录断面内的颗粒质量与速度。考虑二维情况,忽略第二主应力 $\sigma_2$ ,弹性应变能计算如式(2)所示。

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_i^2 \quad (1)$$

$$U_e = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 2\nu\sigma_1\sigma_3}{2E} \quad (2)$$

式中: $m_i$ 为岩石块体各小碎块的质量(kg); $v_i$ 为每个小碎块对应的速度(m/s); $\sigma_1$ 为最大主应力(MPa); $\sigma_3$ 为最小主应力(MPa); $\nu$ 为泊松比; $E$ 为弹性模量(GPa)。其中, $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 由PFC的测量圆功能获得。

在工程尺度下,忽略小单元岩石损伤能量耗散和表面做功影响,仅考虑外部输入的冲击动能与内部存储的弹性应变能,即岩石内部弹性应变无法完全吸收外来能量才发生破坏,此时有破坏判定准则: $U_e > E_k$ ,巷道安全; $U_e = E_k$ ,巷道处于临界状态; $U_e < E_k$ ,巷道失稳。

-45 m水平测量圆为M1~M8,-60 m水平测量圆为M9~M16,-75 m水平测量圆为M17~M24。其中,M1、M3、M5、M7、M10、M12、M14、M16、M17、M19、M21和M23为巷道处测量圆,其余分布在巷道之间的围岩中。各巷道能量监测结果如表2所示。由表2可知:-45 m水平巷道有垮塌风险,-60 m和-75 m水平巷道安全。

表2 各巷道能量监测结果

Table 2 Energy monitoring results of each tunnel

巷道编号	弹性应变能/J	动能/J	稳定性判断
M1	73.81	72.35	安全
M2	72.88	123.67	失稳
M3	74.63	79.40	失稳
M4	72.92	108.94	失稳
M5	73.82	113.43	失稳
M6	72.78	127.57	失稳
M7	74.72	117.45	失稳
M8	88.33	122.61	失稳
M9	87.25	49.30	安全
M10	88.22	43.09	安全
M11	88.56	36.98	安全
M12	87.19	44.31	安全
M13	88.73	36.80	安全
M14	88.88	37.84	安全
M15	88.29	36.61	安全
M16	87.79	44.57	安全
M17	103.03	10.00	安全
M18	102.80	0.60	安全
M19	101.87	0.44	安全
M20	102.68	0.71	安全
M21	101.99	0.53	安全
M22	101.70	0.80	安全
M23	102.21	0.43	安全
M24	102.22	0.66	安全

## 5 结 论

1)岩性为均质时矿岩破坏模式呈“V”字形,随着

试件高度增大,其中心部分出现碎屑化现象且表面剥落的面积较大。岩性为非均质且高径比为2时,矿岩呈强脆性破坏模式,试件中部位置形成贯通端面,矿岩试件破坏后较完整。试件碎块分布主要为大块矿岩样与细小碎屑混合、大块矿与小块岩样混合。

2)滑坡初期阶段,边坡上部与中下部表面有显著滑动。滑坡中期阶段,边坡表面光滑且形成1条平直坡面线,台阶面完全填充且边坡倾角为24°,滑移速度主要为4.5 m/s,滑移位移为40~70 m。滑坡后期阶段,边坡最终休止角为20°,边坡形体无显著变化,最大位移为310.6 m,滑坡体内部位移为100~200 m。

3)根据巷道二维小断面外部输入的冲击动能与内部输出的弹性应变能对巷道稳定性的判断:-45 m水平巷道有垮塌风险,需对其进行加固支护;-60 m和-75 m水平巷道安全。

## 参 考 文 献

- 刘泉,王晨.降雨条件下某矿山排土场边坡稳定性分析[J].黄金,2024,45(4):96~98.
- 李有仓,胡聪,王亚强,等.大西沟铁矿边坡稳定性数值模拟研究[J].黄金,2024,45(10):109~115.
- 王润,孟兴涛,曹洋,等.爆破荷载下露天矿边坡动力放大效应试验研究[J].黄金,2021,42(11):39~43.
- 段钊,董晨曦,郑文杰,等.滑坡冲击作用下的阶地砂质粉土层液化机理[J].工程地质学报,2020,28(6):1329~1338.
- 周月,廖海梅,甘滨蕊,等.滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4):726~735.
- 纪虹,王德起,黄维秋,等.不同滑坡体积对水下管道冲击作用研究[J].中国安全科学学报,2019,29(8):112~117.
- 黄帅,王中根,李昱,等.基于改进SPH方法的滑坡涌浪对大坝结构冲击响应规律研究[J].工程科学与技术,2025,57(1):120~131.
- 王孟鸿,赵要祥,郑晓彬.网架结构在山体滑坡冲击下的垮塌模拟分析[J].应用力学学报,2019,36(5):1069~1075.
- 陈果,钮志林,樊晓一,等.高速远程滑坡沿程速度演化与冲击力分布研究——以三溪村滑坡为例[J].自然灾害学报,2022,31(3):232~241.
- 陈鑫,赵洲,杨鹏.基于颗粒流方法的滑坡灾变过程及冲击致灾预测研究[J].水力发电,2020,46(4):35~40.
- 吴越,刘东升,李明军.岩体滑坡冲击能计算及受灾体易损性定量评估[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):901~909.
- 王升,曾鹏,李斌,等.土质滑坡失稳、运动及冲击压力物质点法模拟研究[J].工程地质学报,2022,30(4):1362~1370.
- 王泽华,李昊,邢磊,等.基于PFC3D的滑坡与建筑物相互作用过程研究[J].安全与环境工程,2023,30(1):107~118,191.
- 黄瑞启,黄筱云,张少强,等.水上滑坡冲击涌浪的远场传播特征数值模拟分析[J].水利水电科技进展,2023,43(1):36~42.
- 陈兴,赵洲,魏江波,等.马边滑坡运动特征及冲击强度的数值研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):234~241.
- 王念秦,张宁,段钊.泾阳南塬黄土滑坡冲击阶地易侵蚀层过程模拟[J].西安科技大学学报,2020,40(2):244~252.

- [17] 高杨,高浩源,李滨,等.滑坡冲击铲刮变量的计算方法研究[J].计算力学学报,2022,39(1):105-112.
- [18] 程谦恭,胡厚田,胡广韬,等.高速岩质滑坡撞击弹落冲击夯实成坝的动力学机理[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):43-46.
- [19] 吴越,刘东升,李硕洋.基于滑体与受灾体共同作用的冲击能计算模型[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊1):2 636-2 643.
- [20] 王占彬,张卫杰,张健,等.基于并行SPH方法的地震滑坡对桥桩的冲击作用[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(7):54-65.
- [21] 柴利蒙,孙东东,杨天鸿,等.金宝铁矿南帮顺倾边坡滑坡机理研究及治理工程实践[J].黄金,2022,43(12):33-38.
- [22] RMANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation[J]. Landslides, 2013, 10(1):23-36.
- [23] 陆鹏源,侯天兴,杨兴国,等.滑坡冲击铲刮效应物理模型试验及机制探讨[J].岩石力学与工程学报,2016,35(6):1 225-1 232.
- [24] 张贝,黄雨.基于离心试验与离散元模拟的滑坡碎屑流冲击效应研究[J].岩土工程学报,2024,46(7):1 498-1 508,1 515.
- [25] 严彬彬,高歌,刘新颖,等.滑坡碎屑流冲击刚性挡墙动力响应的数值模拟分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(10):176-185.
- [26] 袁锦涛,韩培锋,田述军,等.滑坡碎屑流颗粒级配及地形偏转对其冲击和堆积过程的影响研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(5):1 319-1 330.
- [27] 张睿骁,樊晓一,姜元俊,等.滑坡-碎屑流冲击导引结构的离散元模拟[J].水文地质工程地质,2019,46(5):161-168.
- [28] 王忠福,石风格,张旭升,等.三维地形条件下挡墙对滑坡-碎屑流运动和冲击特征的影响研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(3):149-160.

## Research on stability of underground roadways disturbed by impact energy of potential landslides in Shilu Iron Mine

Zhang Dongwei<sup>1</sup>, Wang Peitao<sup>2,3</sup>, Wang Xiangang<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>4</sup>, Chen Yichao<sup>1</sup>, Huang Hao<sup>2,3</sup>, Fu Yilin<sup>2,3</sup>

(1. Hainan Mining Co., Ltd.;

2. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing; 4. JCHX Mining Management Co., Ltd.)

**Abstract:** To predict hazardous zones in underground roadways under the action of slope landslides and their impacts in Shilu Iron Mine, the dynamic mechanical properties of ore and rock under equivalent impact air pressure were studied through split Hopkinson pressure bar (SHPB) impact tests. Combined with the particle flow code (PFC) discrete element method, a study on slope landslides at Shilu Iron Mine was conducted, and the meso-mechanical characteristics of landslide impact and their influence on underground roadways were analyzed. The research indicates that when the rock mass is homogeneous, the failure mode of the ore and rock is V-shaped. When the rock mass is heterogeneous, and the height-to-diameter ratio  $\alpha=2$ , the ore and rock exhibit a strong brittle failure mode, and the specimens remain relatively intact after failure; the impact length is proportional to the degree of specimen fragmentation. Slope landslides are induced by the deformation and failure of shallow rock layers, which cause the failure of internal rock particles, primarily sliding along the direction from the slope crest to the toe. The landslide surface is smooth, with a predominant slip velocity of 4.5 m/s. The final natural angle of repose of the slope is 20°. The internal displacement of the landslide mass ranges from 100 m to 200 m, with a maximum displacement reaching 310.6 m. The -45 m level roadway is at risk of collapse, while the -60 m and -75 m level roadways are safe. This study provides a useful reference for understanding the influence of landslide impact on the stability of underground roadways in mining areas.

**Keywords:** open-pit slope; landslide impact; energy disturbance; roadway stability; PFC2D; SHPB test