中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

考虑运动状态的落石运移及破碎特征研究

孙裴俊，邢爱国，袁　坤，王钱款，孙嘉福，臧佳园

Study on rockfall migration and fragmentation characteristics considering initial motion states

SUN Peijun, XING Aiguo, YUAN Kun, WANG Qiankuan, SUN Jiafu, and ZANG Jiayuan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202404006

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含构造节理的崩塌体动力破碎特征

Dynamic fragmentation characteristics of rock avalanche with tectonic joints

臧佳园, 常文斌, 邢爱国, 张耀明, 王春玲, 金凯平, 沈凌铠, 于文罡　中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(3): 1-11

贵州都匀马达岭滑坡碎屑流动力演化过程分析

Analysis of the dynamic fragmentation process of debris flow in the Madaling landslide in Duyun, Guizhou

马杰, 张耀明, 于文罡, 王春玲, 张国锋, 何君毅　中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 42-49

柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律

Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China

孔祥, 李滨, 贺凯, 罗浩, 常文斌, 邢爱国　中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(5): 1-10

土垫层缓冲落石冲击力特性离散元数值模拟分析

Analysis of soil cushion buffering characteristic for rockfall impact force through discrete element numerical simulation

陈宇, 沈位刚, 宋忠友, 高攀, 鄢发斌, 雍平, 张锐　中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 90-97

鄂西山区崩塌落石运动特征及危险性分析

Characteristics of rockfall trajectory and hazard assessment in western Hubei Province: A case study of the Wapo collapse area in Yuan’an County

黄维, 艾东, 胡胜华, 许汇源, 寇磊, 周宝, 袁晶晶, 夏冬生　中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 37-43

四川宝兴张家沟危岩体稳定性及运动学分析

Analysis of stability and kinematics of the dangerous rock mass in Zhangjiagou, Baoxing, Sichuan Province

陈锡锐, 刘虹强, 杨剑红, 艾其凯, 钟波, 蔡国军　中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 81-89

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202404006
孙裴俊, 邢爱国, 袁坤, 等. 考虑运动状态的落石运移及破碎特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 26-36.
SUN Peijun, XING Aiguo, YUAN Kun, et al. Study on rockfall migration and fragmentation characteristics considering initial motion states[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 26-36.

考虑运动状态的落石运移及破碎特征研究

孙裴俊[1], 邢爱国[1], 袁　坤[2], 王钱款[1], 孙嘉福[1], 臧佳园[1]
（1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海　200240；
2. 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所，北京　100081）

摘要：高位落石通常具有较大的崩落高度和势能，运动过程中动力破碎效应明显。因此，高位落石的致灾范围是防灾减灾研究中的难点和热点问题之一。将落石崩落过程中的运动状态分解为平动与滚动两种形式，通过离散元数值模型试验，统计不同初始运动状态下落石解体后碎屑的粒径分布与运移距离，深入分析落石初始运动状态对其动力破碎程度以及运移距离的影响。结果显示：(1)初始运动状态显著影响落石的破碎程度，进而间接改变落石的运移距离。初始水平速度正相关于碎屑的最远运动距离，而负相关于质心运移距离。落石的初始滚动角速度则不仅负相关于碎屑的最远运动距离，也负相关于质心运移距离；(2)不同初始运动状态对落石碎屑粒径分布的影响主要体现于数据密度较稀疏的中大粒度碎屑，而小粒度碎屑的粒径分布差异性并不明显；(3)落石初始水平速度的提高会加剧落石的破碎解体程度，减小碎屑粒径范围，增强分选性；相反初始滚动角速度的提高则会在一定程度上抑制落石破碎解体程度，增大碎屑粒径范围，减弱分选性。研究成果可为落石潜在致灾范围的预测及落石防护设计提供参考。

关键词：高位落石；动力破碎；碎屑粒径分布；运移距离；离散元
中图分类号：P642.21　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035(2025)04-0026-11

Study on rockfall migration and fragmentation characteristics considering initial motion states

SUN Peijun[1], XING Aiguo[1], YUAN Kun[2], WANG Qiankuan[1], SUN Jiafu[1], ZANG Jiayuan[1]
(1. *School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*; 2. *Railway Engineering Research Institute, China Acadamy of Railway Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: High-altitude rockfalls typically exhibit significant falling heights and high potential energy, resulting in pronounced dynamic fragmentation effects during motion. As such, determining the disaster range of high-altitude rockfalls remains a key challenge in disaster prevention and mitigation research. This study systematically examines how the initial motion states of falling rocks influence migration distance and dynamic fragmentation after impacting the slope. The motion states are decomposed into translational and rotational forms. A series of discrete element method (DEM) simulations were conducted under varying initial motion states to analyze the resulting particle migration distances and fragmentation levels. The results show that initial motion states significantly affect the degree of rock fragmentation and consequently, the migration behavior of rockfall debris. Specifically, an increase in initial horizontal velocity is positively

收稿日期：2024-04-01；**修订日期：**2024-07-04　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
第一作者：孙裴俊(1999—)，男，安徽芜湖人，硕士研究生，主要从事地质灾害防治研究。E-mail: sunpeijun1124@sjtu.edu.cn
通讯作者：邢爱国(1971—)，男，陕西礼泉人，博士，研究员，主要从事地质灾害和环境岩土工程研究。
E-mail: xingaiguo@sjtu.edu.cn

correlated with the maximum migration distance of fragments but negatively correlated with the centroid migration distance. In contract, higher initial angular velocity shows a negative correlated with both maximum and centroid migration distances. Variations in initial motion states primarily affect the distribution of medium- to large-sized fragments, while the differences in fine particle distributions are less pronounced. Furthurmore, increasing initial horizontal velocity promotes more severe rock fragmentation, resulting in a narrower particle size distribution and improving sorting. Conversely, greater initial angular velocity inhibits rock fragmentation, producing a broader particle size range and reduced sorting performance. These findings provide valuable insights for predicting the potential hazard zones of rockfalls and supporting the design of effective protective measures.

Keywords: high-altitude rockfall; dynamic fragmentation; particle size distribution; migration distance; discrete element method

0　引言

落石是指陡峻斜坡上的个别岩石块体在重力和其他外力作用下，突然向下滚落的现象[1－3]。落石普遍具有分布范围广、发生频率高、隐蔽性强、失稳破坏快、致灾后果严重等特点[4－7]。我国西南山区地质环境复杂、人类活动频繁，是落石灾害的高发区。近年来，受强烈地震、极端强降雨重现周期缩短和人类工程扰动日益增强等诱发因素的影响，高位岩质落石灾害发生的频率逐渐增加[8－12]。落石灾害不仅对区域生态环境及基础设施带来巨大破坏，更会对附近居民的生命财产安全构成严重威胁。落石危岩体通常发育于高差较大的斜坡，地形结构呈现“上硬下软、上陡下缓”的典型特征，其崩落过程通常经历了高位启动-凌空加速-破碎解体-碎屑堆积的四个阶段。超高的坠落高差导致落石危岩体在运动过程中存在复杂的动力作用，尤其是破碎解体作用，落石危岩体受该作用影响改变运动路径，而影响其成灾范围，进一步增加了落石灾害危险性的评估难度，因此预测破碎解体作用下的落石运移距离及成灾范围成为地质灾害防灾减灾领域研究中亟待解决的难点和热点问题之一。

多年来，国内外大量学者对落石的动力破碎作用开展了较为详细的研究。Gili 等[13]通过落石现场破碎试验，发现诸如撞击角、坡面材质、落石几何形状以及岩性等因素会显著影响落石的破碎程度与运移距离。为探究落石破碎解体作用与其运移距离间的关系，Zhao 等[14]基于离散元程序 ESyS-Particle 开展斜板试验，分析落石沿斜板释放滑落撞击坡脚的动力破碎过程，结果显示落石发生撞击解体后短时间内其竖直动量急剧衰减至零，同时水平动量急剧增大，促进了碎屑沿水平底板运移距离的不断扩大。

落石破碎解体后堆积区的碎屑粒径可以作为衡量落石破碎程度的一个参量，统计并研究落石碎屑的粒径有助于理解落石的动力破碎机理与运移机制。一些研究表明，落石碎屑的粒径大小对其运移距离影响显著，碎屑粒径与运移距离宏观上表现为负相关[15－17]。因此，包括落石质量、落石形状、落石岩性、落石下落高度、斜坡坡度、斜坡特征以及坡面覆盖层材质等外部因素会直接改变落石碎屑的粒径，从而间接影响落石的运移距离。目前已有大量学者通过落石模型试验研究上述外部因素对落石运动距离的影响，结果显示：落石质量对运移距离的影响随机性较强，无明显规律[18－19]；形状越接近球形的落石，其运移距离越大[20－21]；岩性较软或者内部结构面较发育的落石，其运移距离一般较短[22－24]；落石下落高度越高，其运移距离越远[25－26]；斜坡坡度的提高会抑制落石的质心运移距离，但与最远运移距离间不存在明显的线性关系[26－27]；坡形为上缓下陡状的落石运动距离最大，其次是台阶状坡形，最小者为上陡下缓状坡形[25, 28－29]；坡面覆盖层材质越软越粗糙，落石运移距离越短[30－31]。

上述研究全面且详细地分析了外界因素对落石运移距离的贡献，但鲜有研究关注落石发生撞击前自身的运动状态特别是自身角速度可能会产生的影响。事实上，落石与斜坡坡面的动力交互过程是一个极其复杂的接触交互方式，在该过程中落石的运动状态具有丰富的外在表现形式（如跳动、滚动、滑动等）[32]，不同的运动状态可能会对落石的运移距离产生不同的影响。因此，本文将落石坠落撞击斜坡前的运动状态分解为平动与滚动，并为其运动属性赋予不同的值，从而设置多组运动状态下的离散元颗粒流模型，通过统计分析不同运动状态下落石撞击坡面后碎屑的粒径与运移距离，以此量化研究落石的初始运动状态对其动力破碎程度以及运移距离的影响，研究成果可为进一步测算崩塌落石潜在致灾范围以及设计相应防护措施提供理论支持。

1 离散元颗粒流模型设置

1.1 颗粒流基本原理

颗粒流方法 PFC[33]是一款离散元数值仿真计算平台，已被国内外学者成功用于分析岩土体的力学响应、水力压裂、边坡稳定性和崩塌落石灾害防治等岩土工程问题，其基本模型包含实体(body)、接触块(piece)和接触(contact)三部分。PFC 对其系统内的粒间接触力学和颗粒运动学特征有严格的定义。作用在刚性实体颗粒上的力和力矩由颗粒间的柔性接触承载，并通过力-位移定律在各次循环迭代中进行更新。根据牛顿运动定律，前一次循环迭代计算所得的粒间接触力和接触力矩，将被用于在当前时间步长内更新每个实体颗粒的位置及速度。PFC 程序通过不断更新颗粒间的广义力和广义位移来模拟材料的变形，突破了常规数值仿真方法分析材料大变形的局限性，为揭示微观及细观介质材料的破坏机理提供更好的手段。

本文采用 PFC 内置的线性平行黏结接触模型(linear parallel bond model)模拟岩石一类具有胶结特性的材料。该接触模型允许胶结物在不同实体颗粒的接触块(piece)间传递接触力和接触力矩。当胶结物的应力超过粘结强度时，平行胶结键断裂，接触模型将退化为线性接触模型(linear model)。需要指出，线性接触模型中接触界面无法抵抗颗粒间的相对旋转运动，因而只能传递接触力。

线性平行黏结接触模型主要由弹簧、阻尼器、滑动器与胶结键四部分组成。弹簧(spring)具有法向刚度(k_n)与切向刚度(k_s)，用于模拟颗粒间的线弹性变形。阻尼器(dashpot)具有法向临界阻尼比(β_n)与切向临界阻尼比(β_s)，用于模拟颗粒间的黏性行为。滑动器(slider)依靠摩擦系数(μ)工作，用于模拟颗粒间的滑移行为，根据库仑准则可计算切向线性力(F_s^l)。胶结键(bond)可以理解为一组均匀分布在接触面上的弹簧板，同样具有法向刚度($\bar{k}_n$)与切向刚度($\bar{k}_s$)；但与弹簧不同，其不仅可以传递颗粒运动产生的胶结力($\bar{F}$)，也能传递胶结力矩($\bar{M}$)。当颗粒间表面间隙(g_s)小于或等于零时，接触被激活，此时线性弹簧、阻尼器、滑动器与胶结键同步工作，如图 1 所示。

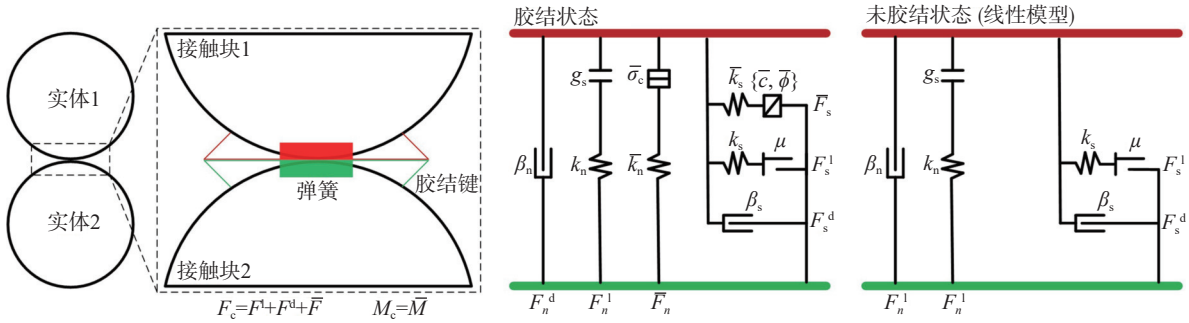


图 1 PFC 线性平行黏结接触模型

Fig. 1 Linear parallel bond model in PFC

1.2 参数标定

本研究旨在模拟自然重力加速度作用下的落石在实验室尺度上的运移过程，因此需要构建一种脆性材料来模拟天然岩石。本文选择采样自中国贵州省纳雍县鬃岭镇中岭边坡的灰岩作为标定对象，灰岩样本强度参数经室内试验测定，其弹性模量和单轴抗压强度分别为 E = 31.844 GPa, UCS = 128.961 MPa。室内试验测定的宏观物理力学参数不可直接用于 PFC 仿真过程中的参数设定，而需要进行相应的数值仿真试验来标定参数，具体过程包括使用 PFC 程序构建人工合成岩石试样(synthetic rock mass specimen, SRMS)，再对 PFC Fish Tank 内置的压缩试验案例程序进行部分改进，最后通过单轴压缩数值试验对接触参数进行标定。

图 2 显示了本文用于参数标定的颗粒流模型，SRMS 的尺寸设定为 0.25 m×0.5 m。构成 SRMS 的微小颗粒半径取值范围为 0.002 ~ 0.003 m，共随机生成 5 454 个颗粒，用以模拟岩石试样的微观结构。利用 PFC 刚性墙以及伺服程序对试样施加轴压，模拟室内岩石单轴压缩试验过程中的预压及轴向加载过程。模拟过程中，记录轴向加载下合成岩石试样的应力-应变曲线，结果见图 2。根据记录所得的应力-应变曲线，获得其对应 PFC 接触模型参数下的 SRMS 强度参数。经多次试算、调试和修改，确定接触模型参数按表 1 取值，获得的 SRMS 强度参数接近室内压缩试验测定的岩石强度参数，参数值分别为 E = 31.625 GPa, UCS = 125.121 MPa。

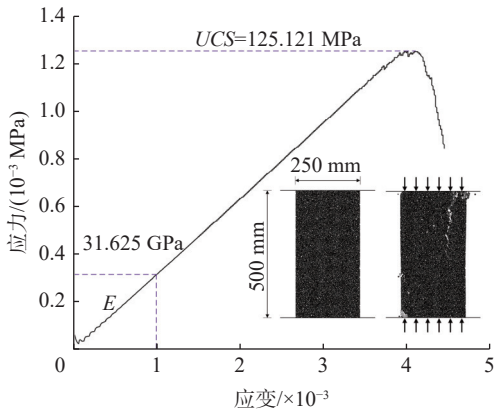


图 2　合成岩石试样(SMRS)的单轴压缩试验应力-应变曲线

Fig. 2　Stress-strain curve of the synthetic rock mass specimen in uniaxial compression test

1.3　斜板试验模型设置

自然界真实发生的落石灾害大多发育于高陡边坡中。胡厚田等[1]对宝成铁路沿线 57 处落石工点进行统计后发现其中 75.4% 的落石发生在坡度大于 45°的陡峭地形。此外，考虑到落石与斜坡坡面间复杂的动力交互过程，即落石的运动状态往往表现为跳动、滚动、滑动等形式[32]。因此，本文基于前人设计的室内斜板试验[34－38]，通过对落石形成的地形条件以及运动状态进行分析解耦，给出了图 3 所示的斜板试验数值概化模型。该模型包含概化的合成岩块样本与地表两部分，其中地表由斜板与水平底板组成，斜板的坡度设定为 60°。人工合成岩块试样为三维球体，半径为 0.1 m，沿 X 轴正向运动，v_x 为岩块样本的水平初速度，v_z 为竖向速度（g 为重力加速度），ω_x 为沿运动方向的滚动角速度，岩块样本的释放高度（H）设为 10 m，解体后岩块碎屑的质心水平运移距离以（L_c）表示，而最远水平运移距离（L_t）指体积大于 1% 岩块总体积的碎屑与撞击点间的水平距离。

需要说明，本文将岩块样本的释放方式设置为动态释放，并通过改变释放点的水平方向坐标值来确保岩块样本在不同水平初速度下与斜板的撞击点位置是相同的，该撞击点距离斜板底部的水平距离恒定为 1 m，岩块样本释放点的水平方向坐标可预先通过牛顿运动定律计算得到，从而在保证释放点高度不变情况下通过改变释放点的水平位置来维持斜板撞击点相同。同时，为了定量研究不同初始运动状态（水平初速度、滚动角速度）的岩块与斜板碰撞的动力交互过程，该模型需要确保岩块与斜板的接触方式一致，因此本文选择三维球体作为岩块样本的形状，从而避免因岩块外形导致岩块与斜板碰撞时出现撞击位置与角度存在随机性差异的问题。

现实中包括地形坡度、起伏程度、岩块坠落高度以及岩块的力学强度等在内的诸多因素都会显著影响落

表 1　合成岩石试样(SRMS)微观参数

Table 1　Micromechanical parameters of the synthetic rock mass specimen

关键材料参数	值	关键材料参数	值
颗粒粒径（d）/m	0.002 ~ 0.003	胶结有效模量（E_b^*）/(N·m^{-2})	1.21E+10
颗粒集合体密度（ρ）/(kg·m^{-3})	2 200	胶结刚度比（κ_b^*）	1.5
颗粒有效模量（E^*）/(N·m^{-2})	7E+9	胶结抗拉强度（pb_ten）/(N·m^{-2})	8.1E+8
刚度比（κ^*）	1.5	胶结黏聚力（pb_coh）/(N·m^{-2})	4.6E+8
摩擦系数	0.577	胶结内摩擦角（pb_fa）/(°)	39.8

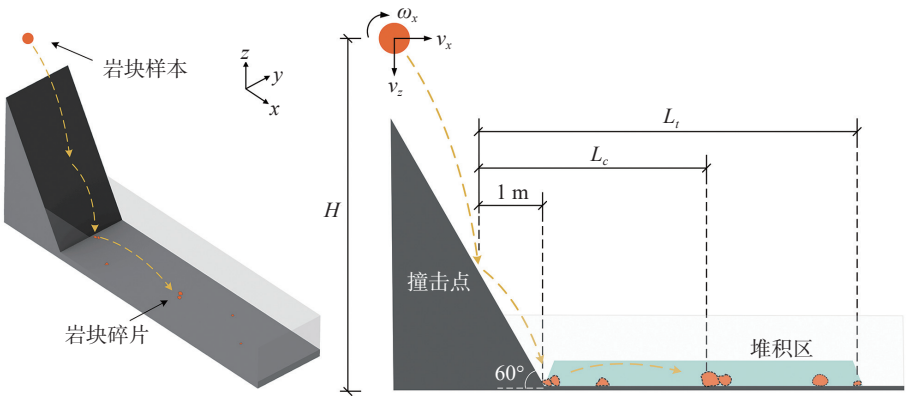


图 3　斜板试验模型示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the inclined-plate test model

石的破碎程度，并且目前已有大量文献对上述因素展开研究[14, 26, 39]，但是鲜有关注岩块自身运动状态条件对其动力破碎程度的影响。因此本文以岩块水平初速度(v_x)、滚动角速度(ω_x)为条件变量，设置两组对照试验组，研究岩块在不同初始运动状态条件下发生破碎解体后的运移距离、碎屑粒径分布等动力响应，进而探究其运移机制。对照试验组分为 CG1 与 CG2 两组，各含 3 组试验工况，工况 1 作为标准工况 SWC 用于数据参照，对照试验组具体设置见表 2。

表 2　对照试验组设置情况

Table 2　Experimental setup of control groups

工况	试验组	v_x /(m·s^{-1})	ω_x /(rad·s^{-1})
1	SWC	0.5	0
2	CG1	1	0
3	CG1	1.5	0
4	CG1	2	0
5	CG2	0.5	10
6	CG2	0.5	20
7	CG2	0.5	30

2　斜板试验模拟结果

2.1　运移距离

本文斜板试验模型的计算域边界条件为反射边界(reflect)，该边界会对运动至计算域边界处的岩块施加镜像速度，从而使其在不耗损动能的情况下继续运动，因此不会影响碎屑沿 X 轴方向的运动距离。图 4 及图 5 分别显示了 CG1 对照试验组与 CG2 对照试验组中各个工况下岩块碎屑的最远运移距离(L_t)与质心运移距离(L_c)。需要说明，各工况下岩块碎屑的最远运动距离

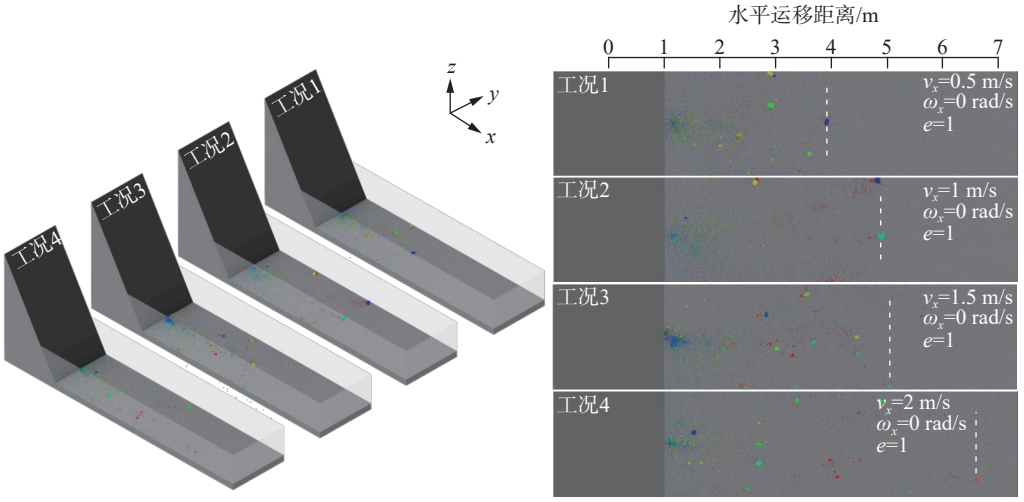


图 4　CG1 对照试验组堆积特征

Fig. 4　Control test group CG1 stacking characteristic

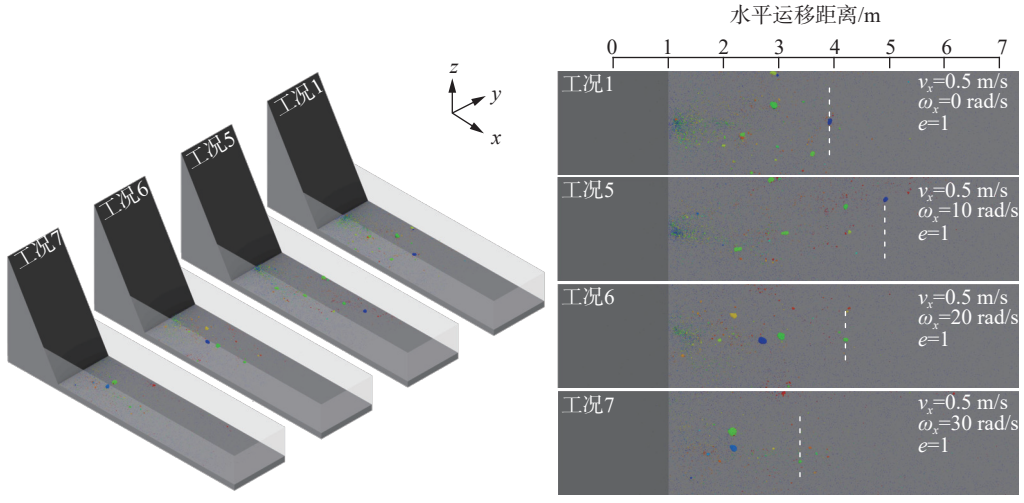


图 5　CG2 对照试验组堆积特征

Fig. 5　Control test group CG2 stacking characteristic

(L_t)是根据体积不小于初始岩块样本 1% 体积的碎屑与撞击点间的水平距离来计算。

CG1 对照试验组的结果表明，工况 1 至工况 4 的初始水平速度(v_x)分别为 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s 以及 2.0 m/s，各自对应的最远运动距离(L_t)依次增大，分别约为 3.81 m、4.83 m、5.12 m 以及 6.59 m，反映岩块碎屑的最远运动距离(L_t)与其初始水平速度(v_x)间的关系为正相关；而岩块碎屑的质心运移距离(L_c)总体呈现减小趋势，反映了岩块碎屑的质心运移距离与其初始水平速度间的关系在一定范围内表现为负相关。同时根据图 6，随着岩块初始水平速度的提升，岩块碎屑 L_t 与 L_c 间的运移距离差(ΔL)呈现不断增大的趋势，一定程度上表明初始水平速度的提高会加剧岩块碎屑沿其水平运移方向的分散程度。

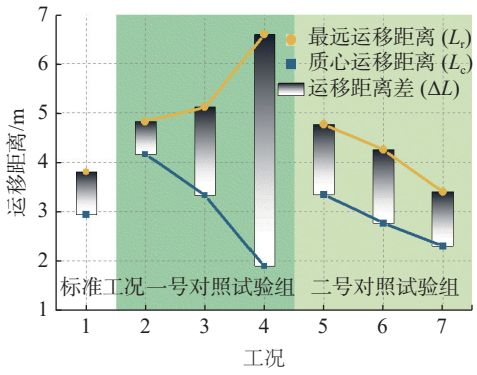


图 6　各工况下岩块碎屑运移距离

Fig. 6　Migration distances of rock fragments under various conditions

CG2 对照试验组的结果表明，工况 1、5、6、7 的初始滚动角速度(ω_x)分别为 0 rad/s、10 rad/s、20 rad/s 以及 30 rad/s，各自对应的最远运动距离分别约为 3.81 m、4.93 m、4.26 m 以及 3.41 m。可见，随着工况 5 至工况 7 中岩块初始滚动角速度的增加，最远运动距离呈现减小趋势，说明岩块碎屑的最远运动距离(L_t)与初始滚动角速度在一定范围内呈负相关；同时岩块碎屑的质心运移距离(L_c)总体也呈现减小趋势，反映了岩块碎屑的质心运移距离与其初始滚动角速度(ω_x)间的关系在一定范围内表现为负相关。此外图 6 显示，随着岩块初始水平速度的提升，岩块碎屑 L_t 与 L_c 间的运移距离差变化趋势表现为缓慢减小，一定程度上表明初始滚动角速度的提高会抑制岩块碎屑沿其水平运移方向的分散程度。

2.2　粒径分布

2.2.1　粒径统计结果

由于 PFC 颗粒流程序内置的破碎逻辑无法输出任何可直接用于表征岩块碎屑(fragment)尺寸的参数，因此学者们通常使用“等效粒径”这一概念去定量描述岩块的粒径规模。“等效粒径”通常以基于岩块碎屑体积的归一化公式来表示，见式(1)。目前已有大量学者利用该等效粒径对崩滑灾害开展堆积区岩石粒径的研究，例如：Zhao 等[14]基于离散元方法模拟岩块的斜板试验、Gao 等[40]基于颗粒流程序模拟汤家沟岩崩碎屑流的动力破碎过程中以及孔祥瑨等[41]基于离散元软件研究重庆甑子岩崩塌，均采用了该等效粒径公式进行粒径分析。

$$d = \sqrt{\frac{V_f}{V_0}} \tag{1}$$

式中：d——岩块碎屑的等效粒径；

V_f——岩块碎屑的体积；

V_0——岩块破碎前的总体积，在本文中指落石样本的总体积。

基于上述等效粒径公式，本研究统计了各组工况下岩块碎屑的等效粒径，并通过偏态系数 SK 对岩块碎屑粒径散布的偏态情况进行定量描述，统计结果见图 7。结果显示，各组工况下碎屑的等效粒径均呈正偏态，且偏态系数集中于 0.253 至 0.385，表明不同初始运动状态对岩块碎屑粒径分布的影响主要体现于数据密度较低的中大粒度碎屑，小粒度碎屑的粒径分布差异性则较弱。

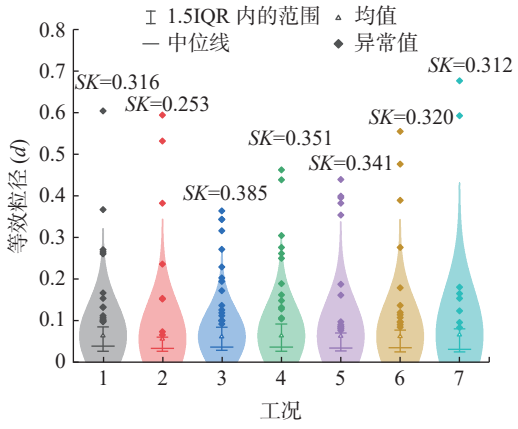
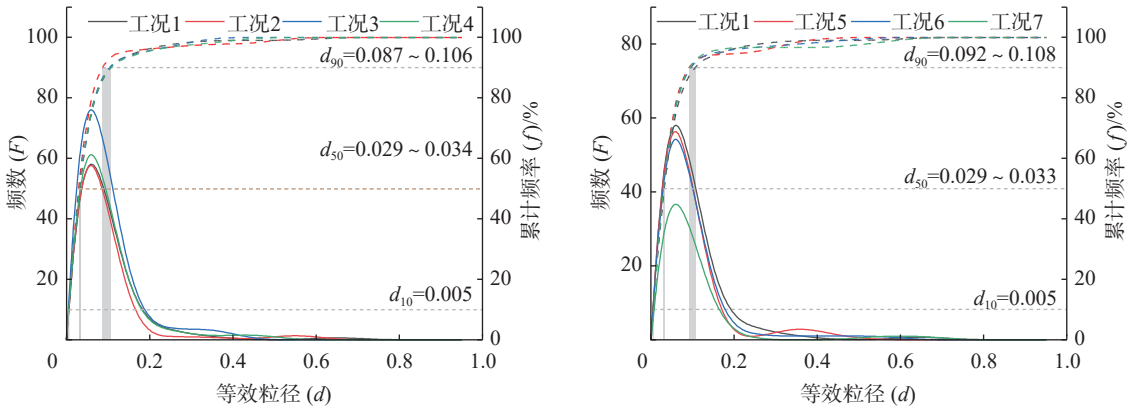


图 7　等效粒径统计结果

Fig. 7　Statistical results of equivalent particle size

图 8 统计了各对照试验组所设工况下岩块碎屑的特征等效粒径，定义为累计频率达到特征值 10%、50% 及 90% 时所对应的粒径，分别以 d_{10}、d_{50} 与 d_{90} 表示。结果显示，CG1 对照试验组中各工况的 d_{10} 均约为 0.005，d_{50} 处于 0.029 至 0.034 范围，d_{90} 则处于 0.087 至 0.106 范围内；并且 CG2 对照试验组中各工况的 d_{10} 同样约



（a）CG1 对照试验组　　（b）CG2 对照试验组

图 8　特征等效粒径统计结果

Fig. 8　Characteristic equivalent particle size distribution

为 0.005, d_{50} 也处于 0.029 至 0.033 范围内, d_{90} 则处于 0.092 至 0.108 范围内。上述结果表明, 两组对照试验组中, 随着特征等效粒径从 d_{10} 增大至 d_{90}, 各工况间岩块碎屑的粒径差异越明显, 进一步印证了初始运动状态对岩块碎屑粒径分布造成的差异主要体现于中大粒度的碎屑。

2.2.2　双参数 Weibull 分布拟合结果

目前已有大量研究使用不同分布函数来分析岩块碎屑的粒径分布规律, 其中双参数 Weibull 分布模型应用较为广泛[42 − 47], 本文使用该分布模型来描述各工况下岩块碎屑的等效粒径分布。岩块碎屑粒径分布的双参数 Weibull 模型可通过下式表示[42, 48 − 49]:

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_c}\right)^{\beta}\right] \tag{2}$$

式中: P——累计体积分数;

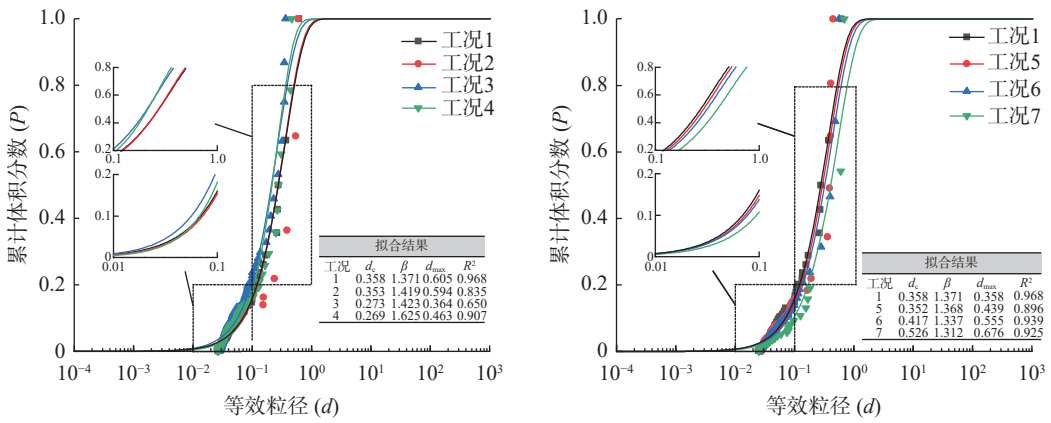
d——岩块碎屑的等效粒径;

d_c——尺寸参数;

β——形状参数。

其中, 累计体积分数P表示小于某一粒径的岩块碎屑累计体积百分含量; d_{max}表示尺寸最大的岩块碎屑粒径; 尺寸参数(d_c)对应于累计体积分数$P = 1 - 1/e$的岩块碎屑粒径, 在本文中可用于衡量岩块碎屑中的小粒径碎屑占比; 形状参数(β)用于表征岩块碎屑的级配, β值越大, 粒径分布越窄, 级配越差。

基于双参数 Weibull 分布函数, 本文拟合得到如图 9 所示的各工况下岩块碎屑等效粒径-累计体积分数分布曲线, 曲线 R^2 值均在 0.835 至 0.968 范围内, 拟合精度良好, 结果显示: (1) CG1 对照试验组中工况 2 至工况 4 的尺寸参数(d_c)分别为 0.353, 0.273, 0.269, 形状参数(β)则分别为 1.419, 1.423, 1.625; 可见随着工况 2 至工况 4 中岩块初始水平速度(v_x)不断从 1 m/s 增加至 2 m/s, 尺寸参数 d_c 总体上呈现降低趋势, 反映岩块



（a）CG1对照试验组　　（b）CG2对照试验组

图 9　岩块碎屑等效粒径-累计体积分数分布

Fig. 9　Equivalent particle size vs. cumulative volume fraction distribution

碎屑破碎解体程度的增加；形状参数 β 则呈现上升趋势，反映岩块碎屑的粒径分布范围不断变窄，相应的级配不断变差。（2）CG2 对照试验组中工况 5 至工况 7 的尺寸参数（d_c）分别为 0.382, 0.417, 0.526，形状参数 β 则分别为 1.368, 1.337, 1.312；可见随着工况 5 至工况 7 中岩块初始滚动角速度（ω_x）从 10 rad/s 增加至 30 rad/s，尺寸参数（d_c）总体上呈现增大趋势，反映岩块碎屑的破碎解体程度在不断减弱；形状参数 β 则呈现减小趋势，表明岩块碎屑的粒径分布范围不断变宽，相应的级配不断改善。

2.2.3　分形维数拟合结果

由于落石危岩体的形成与运动过程中往往伴随着风化、研磨、冲击等外部作用，所以岩块碎屑大多满足分形条件[50]。本文采用分形几何理论来对各对照试验组中岩块碎屑的分形特征进行对比分析，以进一步印证双参数 Weibull 分布的拟合结果。分形特征可以由岩块碎屑数量与等效粒径的幂律关系来表示为[50]：

$$N = Cd^{-D} \tag{3}$$

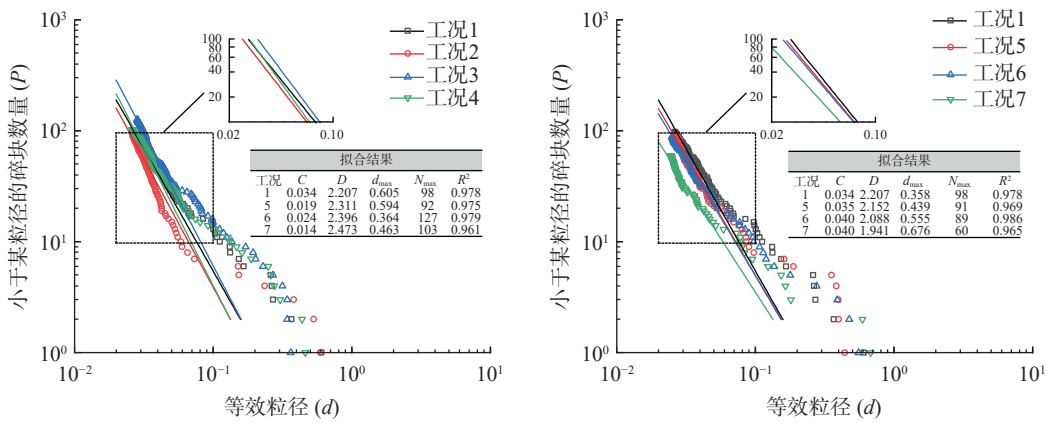
式中：N——岩块碎屑数目；

C——比例常数；

d——岩块碎屑的等效粒径；

D——分形维数，其值越大，岩块碎屑的破碎解体程度越高。

基于式(3)，本文拟合得到如图 10 所示的各工况下岩块碎屑等效粒径-数目级配曲线，曲线 R^2 值均在 0.961 至 0.986 范围内，拟合精度较优，结果显示：(1) CG1 对照试验组中工况 2 至工况 4 的分形维数（D）分别为 2.311、2.396 与 2.473；可见随着工况 2 至工况 4 中岩块 v_x 不断从 1 m/s 增加至 2 m/s，D 呈现不断上升的趋势，岩块碎屑粒径的离差程度减小，使得碎屑分选性得到改善，进一步印证岩块碎屑破碎解体程度与 v_x 间的正相关性。（2）CG2 对照试验组中工况 5 至工况 7 的 D 分别为 2.152、2.088 与 1.941；可见随着工况 5 至工况 7 中岩块初始滚动角速度（ω_x）从 10 rad/s 增加至 30 rad/s，分形维数（D）总体上呈现不断降低的趋势，岩块碎屑粒径的离差程度增大，使得碎屑分选性不断变差，印证了岩块碎屑的破碎解体程度与 ω_x 间具有负相关性。



（a）CG1对照试验组　　（b）CG2对照试验组

图 10　岩块碎屑等效粒径-数目级配曲线

Fig. 10　Equivalent particle size-number gradation curve of rock fragments

3　讨论

根据斜板试验模拟得到的各项结果，落石岩块初始水平速度（v_x）的提高，导致落石岩块撞击坡面后所形成碎屑的最远运移距离（L_t）变长，而质心运移距离（L_c）却变短，因而碎屑的平面分布更分散；同时 v_x 的提高也使得落石岩块的整体破碎程度相对更为剧烈，造成碎屑粒径分布范围区间更窄，级配也相对更差。与此相反，落石岩块初始滚动角速度（ω_x）的提高，导致落石岩块撞击坡面后所形成碎屑的 L_t 与 L_c 均变短，但二者的距离差值却呈缓慢减小趋势，因而碎屑在堆积平面上的分散程度得到一定减缓；同样 ω_x 的提高使得落石岩块的整体破碎程度相对更为平缓，造成碎屑粒径分布范围区间更宽，级配也相对更好。

上述试验结果表明，落石的初始运动状态紧密影响其动力破碎程度，而落石的破碎解体程度又进一步影响岩块碎屑的运移距离。本文认为，落石初始水平速度（v_x）的提高赋予了岩块更高的动能，高动能的落石与斜

坡的撞击过程中，动能通过断裂能、摩擦能、阻尼能等形式进行耗散，能量的耗散程度直接体现于岩块的破碎形态，破碎更剧烈的落石往往能量耗散程度更高；高动能的落石经撞击形成高破碎态的碎屑，并且这些碎屑仍保有较高的动能；同时高破碎态的落石碎屑具有粒径均匀、分选性好、级配较差等特征，因此更高v_x的落石往往可以形成粒径相对稍小但数量更多的中型碎屑，这类中型碎屑在高动能驱动下 L_t 相对也更远。考虑到各工况的细粒径落石碎屑数量占比较高，因此落石的 L_c 受细粒径碎屑强烈影响，导致具有更高v_x的落石其 L_c 相对更短。与此相反，落石ω_x的提高却使得落石减小了与坡面的冲量，导致岩块碎屑的破碎程度相对更低；此类低破碎态的碎屑具有粒径参差、分选性差、级配较好的特征，因此具有更高ω_x的落石虽然可以形成粒径相对稍大、数量较少的大块碎屑，但中型碎屑的数量却受落石总体积限制反而较少，导致 L_t 相对更短。同样，由于细粒径落石碎屑数量占比较高，因此不同ω_x落石的 L_c 仍受细粒径碎屑强烈影响，以致其 L_c 随ω_x的提高而变短。

本文也存在一定局限性，主要为各对照试验组中设置的工况数量偏少，由于试验结果建立在有限的数据样本上，可能导致研究结论只能在指定范围内成立，而范围之外的研究结论仍有待验证，例如：当落石岩块的v_x提高至一定程度时，岩块与斜板之间的撞击角度将会很小，造成岩块与斜板撞击时的冲量削弱程度较大，岩块的破碎程度可能因此反而大幅减小；此外标准工况SWC(工况 1)未能与各对照试验组保持一致的运移距离变化趋势，表明标准工况与各对照试验组间也可能存在不同的规律；因此为验证上述现象的可能性，需在后续研究中增设多组试验工况用于进一步对比分析。

4 结论

(1) 不同初始运动状态下落石的运移距离本质上是通过改变落石的破碎程度来控制。落石运动状态与碎屑运移距离间的相关性关系表现为：落石岩块的初始水平速度(v_x)正相关于岩块碎屑的 L_t，而负相关于岩块碎屑的 L_c，并且v_x的提高会加剧岩块碎屑沿其水平运移方向的分散程度。与此同时，落石岩块的ω_x则不仅负相关于岩块碎屑的 L_t，也负相关于岩块碎屑的 L_c，并且ω_x的提高会抑制岩块碎屑沿其水平运移方向的分散程度。

(2) 不同初始运动状态下落石岩块碎屑的等效粒径数值分布均呈正偏态，且偏态系数较为相近，表明不同初始运动状态对落石碎屑粒径分布的影响主要体现于数据密度较稀疏的中大粒度碎屑，而小粒度碎屑的粒径分布差异性并不明显。

(3) 根据落石岩块碎屑的双参数 Weibull 分布以及分形维数拟合结果，落石v_x的提高会加剧落石岩块撞击坡面后的破碎解体程度，造成岩块碎屑粒径分布范围相对更窄，分选性更好，而级配不断变差；相反ω_x的提高则会在一定程度上抑制落石岩块撞击坡面后的破碎解体程度，造成岩块碎屑粒径分布范围相对更宽，分选性变差，级配得到改善。

(4) 落石初始水平速度和初始滚动角速度的改变会影响岩块撞击坡面的破碎解体程度及运移距离，进而影响落石灾害的成灾规模和致灾范围。初始滚动角速度越大，岩块碎屑水平运移距离越小，落石灾害的致灾范围越小，以往的落石防灾相关规范及实际工程应用中较少考虑到这一点。

参考文献(References)：

[1] 胡厚田. 崩塌与落石 [M]. 北京：中国铁道出版社，1989. [HU Houtian. Collapse and falling rocks [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989. (in Chinese)]

[2] DORREN L K A. A review of rockfall mechanics and modelling approaches [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2003, 27(1): 69 − 87.

[3] VOLKWEIN A, SCHELLENBERG K, LABIOUSE V, et al. Rockfall characterisation and structural protection–a review [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(9): 2617 − 2651.

[4] PATTON F D, HENDRON A J. General report on mass movements [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1976, 13(2): A19.

[5] Hungr O, Evans S G. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards [C] //International symposium on landslides. 1988: 685-690.

[6] Giani G P. Rock slope stability analysis [M]. CRC Press, 1992.

[7] CHEN Hongey, CHEN Rongher, HUANG Tsanhwei. An application of an analytical model to a slope subject to rockfalls [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1994, xxxi(4): 447 − 458.

[8] HUANG Runqiu. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China [J]. Landslides, 2009, 6(1): 69 − 81.

[9] XU Qiang, FAN Xuanmei, HUANG Runqiu, et al. Landslide dams triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province,

south West China［J］. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(3): 373 − 386.

［10］ YIN Yueping, WANG Fawu, SUN Ping. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China［J］. Landslides, 2009, 6(2): 139 − 152.

［11］ XU Qiang, FAN Xuanmei, HUANG Runqiu, et al. A catastrophic rockslide-debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: Background, characterization, and causes［J］. Landslides, 2010, 7(1): 75 − 87.

［12］ 王立朝，侯圣山，董英，等. 甘肃积石山 M_S 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议［J］. 中国地质灾害与防治学报，2024, 35(3): 108 − 118.［WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_S 6.2 earthquake and suggestions for their risk control［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 108 − 118.（in Chinese with English abstract）］

［13］ GILI J A, RUIZ-CARULLA R, MATAS G, et al. Rockfalls: Analysis of the block fragmentation through field experiments［J］. Landslides, 2022, 19(5): 1009 − 1029.

［14］ ZHAO Tao, CROSTA G B, UTILI S, et al. Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3-D discrete element analyses［J］. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2017, 122(3): 678 − 695.

［15］ PERINOTTO H, SCHNEIDER J L, BACHÈLERY P, et al. The extreme mobility of debris avalanches: A new model of transport mechanism［J］. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(12): 8110 − 8119.

［16］ CAGNOLI B, ROMANO G P. Effect of grain size on mobility of dry granular flows of angular rock fragments: An experimental determination［J］. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2010, 193(1/2): 18 − 24.

［17］ HAUG Ø T, ROSENAU M, LEEVER K, et al. On the energy budgets of fragmenting rockfalls and rockslides: Insights from experiments［J］. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(7): 1310 − 1327.

［18］ 刘丹，叶四桥，杨威. 落石水平运动距离影响因素的模型试验研究［J］. 水文地质工程地质，2013, 40(6): 112 − 116.［LIU Dan, YE Siqiao, YANG Wei. Model test study of influence factors of horizontal movement of rockfalls［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 112 − 116.（in Chinese with English abstract）］

［19］ 叶四桥，陈洪凯，许江. 落石运动模式与运动特征现场试验研究[J]. 土木建筑与环境工程，2011, 33(2): 18-23.［YE Siqiao, CHEN Hongkai, XU Jiang. Rockfalls movement mode and movement features by field tests[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 18-23.（in Chinese with English abstract）］

［20］ MOLLON G, RICHEFEU V, VILLARD P, et al. Discrete modelling of rock avalanches: Sensitivity to block and slope geometries［J］. Granular Matter, 2015, 17(5): 645 − 666.

［21］ NAGENDRAN S K, ISMAIL M A M. Analysis of rockfall hazards based on the effect of rock size and shape［J］. International Journal of Civil Engineering, 2019, 17(12): 1919 − 1929.

［22］ 沈位刚，赵涛，戴峰，等. 基于离散元方法的落石碰撞破碎研究［C］//2016 年全国工程地质学术年会论文集. 成都，2016: 1064 − 1070.［SHEN Weigang, ZHAO Tao, DAI Feng, et al. Investigation of rockfall impact fragmentation based on the DEM［C］//Beijing :Science Press, 2016: 7.（in Chinese with English abstract）］

［23］ 向欣. 边坡落石运动特性及碰撞冲击作用研究［D］. 武汉：中国地质大学，2010.［XIANG Xin. Research on motion characteristics and impact force of rockfall［D］. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.（in Chinese with English abstract）］

［24］ LIN Qiwen, CHENG Qiangong, LI Kun, et al. Contributions of rock mass structure to the emplacement of fragmenting rockfalls and rockslides: Insights from laboratory experiments［J］. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(4): e2019JB019296.

［25］ MA Ke, LIU Guoyang, XU Nuwen, et al. Motion characteristics of rockfall by combining field experiments and 3D discontinuous deformation analysis［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138: 104591.

［26］ 刘世涛. 落石碎屑化运动与堆积特征研究［D］. 成都：西南交通大学，2021.［LIU Shitao. Study on characteristics of rockfall movement and deposition fragmentating-related. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.（in Chinese with English abstract）］

［27］ ZHAO Tao, CROSTA G B. On the dynamic fragmentation and lubrication of coseismic landslides［J］. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2018, 123(11): 9914 − 9932.

［28］ AZZONI A, BARBERA G L, ZANINETTI A. Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model［J］. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 709 − 724.

［29］ 黄润秋，刘卫华. 平台对滚石停积作用试验研究［J］. 岩石力学与工程学报，2009, 28(3): 516 − 524.［HUANG Runqiu, LIU Weihua. Platform resistent test on rolling rock blocks［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 516 − 524.（in Chinese with English abstract）］

［30］ DORREN L K A, BERGER F, PUTTERS U S. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes［J］. Natural Hazards and Earth System

Sciences, 2006, 6(1): 145 − 153.

[31] 万志文. 崩塌落石沿直线型斜面的运动特征室内试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [WAN Zhiwen. Experimental study on the movement characteristics of collapsing falling stone along linear straight. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]

[32] LI Langping, LAN Hengxing. Probabilistic modeling of rockfall trajectories: A review[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1163 − 1176.

[33] Itasca. Particle Flow Code, PFC^{3D}, Release 2.0[J]. Itasca Consulting Group Inc, 1999.

[34] MANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation[J]. Landslides, 2013, 10(1): 23 − 36.

[35] LONGCHAMP C, ABELLAN A, JABOYEDOFF M, et al. 3-D models and structural analysis of rock avalanches: The study of the deformation process to better understand the propagation mechanism[J]. Earth Surface Dynamics, 2016, 4(3): 743 − 755.

[36] LI Kun, WANG Yufeng, LIN Qiwen, et al. Experiments on granular flow behavior and deposit characteristics: Implications for rock avalanche kinematics[J]. Landslides, 2021, 18(5): 1779 − 1799.

[37] 姬中民, 张晟, 伍法权, 等. 落石法向恢复系数的多因素联合影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 164 − 173. [JI Zhongmin, ZHANG Sheng, WU Faquan, et al. Research on the joint influence of multiple factors on the normal coefficient of restitution of rockfall[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 164 − 173. (in Chinese with English abstract)]

[38] 郭亮, 李婧锪, 王保权, 等. 震后崩塌堆石体稳定性室内试验研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(5): 182 − 190. [GUO Liang, LI Jingru, WANG Baoquan, et al. Laboratory test of stability of post-earthquake collapse rockfill[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(5): 182 − 190. (in Chinese with English abstract)]

[39] LUO Hao, XING Aiguo, JIN Kaiping, et al. Discrete element modeling of the Nayong rock avalanche, Guizhou, China constrained by dynamic parameters from seismic signal inversion[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(4): 1629 − 1645.

[40] GAO Ge, MEGUID M A, CHOUINARD L E, et al. Insights into the transport and fragmentation characteristics of earthquake-induced rock avalanche: Numerical study[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(9): 04020157.

[41] 孔祥墨, 李滨, 贺凯, 等. 柱状岩体崩塌动力特征与破碎规律——以重庆甑子岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 1 − 10. [KONG Xiangzhao, LI Bin, HE Kai, et al. Dynamic characteristics and fragmentation evolution of columnar rockfall: A case study of the Zengziyan rockfall in Chongqing, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 1 − 10. (in Chinese with English abstract)]

[42] PALUSZNY A, TANG Xuhai, NEJATI M, et al. A direct fragmentation method with Weibull function distribution of sizes based on finite- and discrete element simulations[J]. International Journal of Solids and Structures, 2016, 80: 38 − 51.

[43] CHEONG Y S, REYNOLDS G K, SALMAN A D, et al. Modelling fragment size distribution using two-parameter Weibull equation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74: S227 − S237.

[44] PALUSZNY A, TANG X H, ZIMMERMAN R W. Fracture and impulse based finite-discrete element modeling of fragmentation[J]. Computational Mechanics, 2013, 52(5): 1071 − 1084.

[45] McSaveney M J. Recent rockfalls and rock avalanches in Mount Cook national park, New Zealand[J]. Geological Society of America, Review in Engineering Geology, 2002, 15: 35 − 70.

[46] MA Gang, ZHOU Wei, REGUEIRO R A, et al. Modeling the fragmentation of rock grains using computed tomography and combined FDEM[J]. Powder Technology, 2017, 308: 388 − 397.

[47] SALMAN A D, HOUNSLOW M J, VERBA A. Particle fragmentation in dilute phase pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2002, 126(2): 109 − 115.

[48] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18: 293 − 297.

[49] CARMONA H A, WITTEL F K, KUN F, et al. Fragmentation processes in impact of spheres[J]. Physical Review E, 2008, 77(5): 051302.

[50] Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B2): 1921