

落石法向恢复系数的多因素联合影响研究

姬中民, 张 晟, 伍法权, 牛庆合, 王可意

Research on the joint influence of multiple factors on the normal coefficient of restitution of rockfall

Ji Zhongmin, ZHANG Sheng, WU Faquan, NIU Qinghe, and WANG Keyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应

Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact

吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 许泽鹏 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 114-122

落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应

Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact

吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 许泽鹏, 罗刚, 韩玫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 78-87

郑万高铁宜万段边坡危岩崩落破坏特征

Caving failure characteristic of slope rockfall on Yiwan section of the Zhengzhou—Wanzhou high-speed railway

黄海宁, 巨能攀, 黄健, 张成强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 164-172

无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope

黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149-155

地形因子对偏转型滑坡-碎屑流运动参数的影响

Influence of terrain factors on the motion parameters of the turning-type landslide-debris flow

杨海龙, 樊晓一, 裴向军, 裴钻 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 129-129

含石量对软质岩土石混合料土力学特性影响研究

A study of the effect of rock content on mechanical properties of soil-soft rock mixture

邵忠瑞, 罗雪贵, 郭娜娜 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 111-111



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105050

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.

落石法向恢复系数的多因素联合影响研究

姬中民^{1,2}, 张晟³, 伍法权¹, 牛庆合⁴, 王可意⁵

(1. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 郑州工程技术学院土木工程学院, 河南 郑州 450044; 3. 江西应用技术职业学院资源环境与珠宝学院, 江西 赣州 341000; 4. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 5. 河北工程大学土木工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 法向恢复系数(R_n)作为落石灾害预测及分析中最为关键的输入参数, 由于其受控因素较多, 如何确定准确合理的 R_n 值仍然是一个难题。为探究多因素对 R_n 的联合影响规律及机理, 首次采用响应曲面-中心复合试验设计方法对 R_n 的7因素联合影响展开测试。通过对试验结果进行回归和方差分析, 遴选的7个因素对 R_n 影响均较显著, 显著程度依次为碰撞角(θ)>试块硬度(H_1)>转速(ω)>形状因子(η)>入射速度(V)>坡面硬度(H_2)>尺寸(d)。许多交互参数对 R_n 亦表现出了显著影响, 依次为 $d-\theta > H_1-d > V-\eta > H_1-\omega > d-\eta > \eta-\omega > H_1-\eta$ 。对于单因素参数, R_n 随 d 、 V 、 η 、 θ 减小和 H_1 、 H_2 、 ω 增大, 呈增大趋势; 对于交互参数, d 和 ω 对 R_n 影响较弱仅表现在 H_1 较小时, 随 H_1 增大, 影响逐渐增强; η 在 H_1 较小时对 R_n 影响较显著, 随 H_1 增大, 影响明显减弱; η 较小时, R_n 随 V 或 d 减小显著增大, η 较大时, 这种影响不显著; θ 较小时, R_n 随 θ 增大减小较快, θ 较大时, 减小趋势放缓; 相比较小 η 值试块, 较大 η 值试块的 ω 对 R_n 影响更为显著。这些获得的结论可为落石 R_n 计算模型的构建提供重要参考, 进而为落石灾害的精准预测及防护提供依据。

关键词: 落石; 法向恢复系数; 响应曲面; 联合影响; 交互作用

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)02-0164-10

Research on the joint influence of multiple factors on the normal coefficient of restitution of rockfall

Ji Zhongmin^{1,2}, Zhang Sheng³, Wu Faquan¹, Ni Qinghe⁴, Wang Keyi⁵

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou, Henan 450044, China; 3. College of Resources Environment and Jewelry, Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 4. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 5. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: The normal coefficient of restitution (R_n) is the most critical input parameter in the prediction and analysis of rockfall disasters. Because of its many controlling factors, how to determine an accurate and reasonable value of R_n is still a difficult problem. In order to explore the law and mechanism of the joint influence of multiple factors on R_n , the response surface methodology-central composite design method is used to investigate the

收稿日期: 2021-05-22; 修订日期: 2021-08-06

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 河南省自然科学基金项目(222300420366); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ191347)

第一作者: 姬中民(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事落石灾害预测及防治研究。E-mail: gang880129@126.com

通讯作者: 王可意(1988-), 女, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害防护研究。E-mail: 814207371@qq.com

combined effect of seven factors on R_n for the first time. Through regression and variance analysis of the test results, the seven selected factors have the significant effects on R_n , and the order of significance is the impact angle (θ) > block hardness (H_1) > rotational speed (ω) > shape factor (η) > incident velocity (V) > slope hardness (H_2) > size (d). Many interaction parameters also show the significant effects on R_n , in the order of $d-\theta > H_1-d > V-\eta > H_1-\omega > d-\eta > \eta-\omega > H_1-\eta$. For a single factor parameter, R_n increases with the decrease of d , V , η , θ and the increase of H_1 , H_2 , ω ; for interaction parameters, d and ω have a weak effect on R_n , only when H_1 is small, and the effect gradually increases with the increase of H_1 ; η has a significant effect on R_n when H_1 is small, and the effect significantly decreases with the increase of H_1 ; when η is small, R_n increases significantly with the decrease of V or d , and this effect is not significant when η is large; when θ is small, R_n decreases rapidly with the increase of θ , and the decreasing trend slows down when θ is large. Compared with block with small η , the ω of block with larger η has a more significant effect on R_n . These conclusions can provide an important reference for the construction of the R_n calculation model of rockfall, and provide a basis for the accurate prediction and prevention of rockfall disasters.

Keywords: rockfall; normal coefficient of restitution; response surface; joint influence; interactive effect

落石是高山峡谷地区频发的一种地质灾害, 具有快速、突发、高能和随机性强等特点, 严重威胁周边基础设施、人员及财产安全^[1-5]。为减轻落石灾害带来的影响, 许多防护措施已被采取, 例如拦石墙、棚洞、及主动、被动柔性防护网等^[6]。然而, 要确定这些防护设施的尺寸、设置位置及极限承载能力, 必须准确预测危险区域以及落石冲击力^[7]。因此, 预测落石运动轨迹对实际防护结构的设计具有重要意义。

鉴于现场试验成本较高、条件复杂, 且相关数据难以统计分析, 数值仿真逐渐成为落石轨迹预测中普遍使用的一种方法。落石在坡面的运动常被建模为滚动、滑动、碰撞反弹和自由下落四种运动形式的组合, 其中碰撞反弹过程最为复杂, 也最难预测, 在绝大多数的落石运动轨迹数值模拟程序中(如 Stone (3D-GIS)、Rockfall Analyst、Trajec 3D、Rockfall、3D DEM、RocPro3D 和 Rockyfor 3D)主要通过恢复系数(COR)来控制^[8-15], 例如运动恢复系数(R_v)、法向恢复系数(R_n)和切向恢复系数(R_t)。这些参数至为关键, 不仅反映碰撞前后落石能量损失, 还直接影响落石轨迹预测精度。然而, 由于其受控因素较多, 如何确定准确的恢复系数值仍是落石灾害预测中一个尚未解决的难题。

章广成等^[4]、Dorren^[11]、Giani 等^[16]、Spadari 等^[17]、Ferrari 等^[18]、Wyllie^[19] 和 Pfeiffer 等^[20] 采用天然或者人造试块分别与不同材质坡面进行现场碰撞测试, 获得了各种坡面的 COR 值, 并将其作为落石模拟程序中参数选择的参考值。尽管这些 COR 值较为可靠, 但

直接采用它们来模拟落石运动轨迹可能并不具备说服力。相同坡面材料的 COR 值存在着巨大差异, 甚至相同初始条件下获得的 COR 值也迥然不同。这说明 COR 影响因素复杂, 仅考虑坡面材料性质是远远不够的。

为此, 许多学者分别通过现场和室内试验针对落石特征(形状、尺寸/质量、施密特硬度等)、运动特征(入射速度、转速、碰撞角等)及坡面特征(坡面硬度、坡面材料等)对 COR 的影响展开了研究, 且获得了许多有意义的结论^[2-3, 19, 21-24]。然而, 这些研究绝大多数均为单因素定性研究, 仅有少数学者针对各因素对 COR 的影响予以了定量研究, 但所提出的计算模型一般只考虑 1~4 个独立因素^[19, 22-23, 25-26]。尽管个别模型已应用于工程实践, 但其适用条件十分有限。Chau 等^[27] 观测到低能量水平下, 随碰撞能量增大, R_n 值减小; 高能量水平下, 碰撞能量对 R_n 无影响; Turrin 等^[28] 发现当碰撞速度较低时, 落石半径为 COR 主要影响因素, 随着碰撞速度增大, 坡面弹性模量逐渐起主控作用; Wyllie 等^[19] 对北美和日本五个地区的实际落石事件进行统计分析, 结果表明 R_n 与边坡材料性质相关性较差; Buzzi 等^[29] 和 Ji 等^[24] 研究发现, 试块形状与转速对 R_n 存在显著交互影响, 两者呈伴生关系。这些结论强烈表明回弹过程是由多个因素综合控制的, 仅用一个孤立的或有限独立的因素可能难以真实描述落石冲击过程^[30]。因此, 开展 COR 的多因素联合影响研究十分迫切和必要。鉴于 R_n 是目前各种落石轨迹预测模型中最为关键的输入参数, 本文仅针对该参数展开室内研究。

1 试验

1.1 试验设计

1.1.1 确定试验设计方法

本研究中需综合考虑 7 个参数对 R_n 的影响, 如果实施全面试验, 虽然可获得更为全面的数据, 但工作量巨大, 几乎无法完成。因此, 这里采用响应曲面法开展研究, 其不仅综合了统计和数学方法, 且可以较少的试验次数收集更多的数据。考虑到因素之间可能存在的交互作用以及某些因素与 R_n 之间的非线性关系, 选择响应面-中心复合试验设计方法 (RSM-CCD) 进行设计。该设计由三种类型的点组成: 析因设计得到的立方点、轴点和中心点。所需试验总次数可由 $N=2^k+2k+C_0$ 确定, 其中 k 为因子数, 2^k 为立方点数, $2k$ 为轴点数, C_0 为中心点数^[31]。

1.1.2 R_n 值多因素综合作用试验设计

为弄清前述 7 个主控因素对 R_n 联合控制及因素交互作用对 R_n 的影响, 本研究基于 RSM-CCD 方法, 采用 Design Expert 软件设计一个 7 因素 5 水平试验方案, 共需进行 152 组试验 ($N=2^k+2k+C_0=2^7+2 \times 7+10=152$), 每个变量被编码在 5 个水平上: $-\alpha$ (低轴点)、 -1 (低水平)、 0 (中心点)、 $+1$ (高水平) 和 $+\alpha$ (高轴点), 计算轴

点所用的 α 值根据实际试验情况确定为 1.576。在系统试验之前, 已进行初步试验以确定所调查参数的实际水平, 落石和坡面施密特硬度 (H_1/H_2)、碰撞角 (θ)、尺寸 (d)、形状因子 (η)、入射速度 (V) 和初始转速 (ω) 的高低水平值分别为 54 ~ 76、 $18^\circ \sim 66^\circ$ 、4.0 ~ 6.0 cm、1.35 ~ 2.05、3.5 ~ 5.5 m/s 和 100 ~ 300 转/min, 如表 1 所示。试块和坡面施密特硬度值通过施密特回弹锤测定, 试块尺寸采用同体积球体直径表征, 试块形状则由形状因子 (η) 来量化^[3], 具体见式(1)。

$$\eta = \frac{3 \times S_0}{S \times \left(\frac{d_{\min}}{d_{\max}} + \frac{d_{\text{mid}}}{d_{\max}} + \frac{d_{\min}}{d_{\text{mid}}} \right)} \quad (1)$$

式中: S_0 ——试块的实际表面积;

S ——同体积球体表面积;

d_{\max} ——试块最长维度;

d_{\min} ——垂直 d_{\max} 方向上试块最小维度;

d_{mid} ——同时垂直 d_{\max} 和 d_{\min} 的试块维度。

根据表 1 中各变量实际水平, 确定完整、可实施的试验方案。每组试验重复 15 次 (包括试块分别绕 X 轴、Y 轴和 Z 轴旋转与坡面的各 5 次冲击测试, 如图 1 所示), 结果取其平均值。

表 1 中心复合试验设计中的变量水平

Table 1 Variable levels in the central composite experimental design

编码因子变量	实际因子变量	实际水平				
		低轴点	低水平	中心点	高水平	高轴点
		$-\alpha (-1.576)$	-1	0	1	$+\alpha (+1.576)$
A	坡面硬度 (H_2)	47.66	54	65	76	82.33
B	试块硬度 (H_1)	47.66	54	65	76	82.33
C	入射速度 (V)/(m·s ⁻¹)	2.92	3.5	4.5	5.5	6.08
D	尺寸/等效直径 (d)/cm	3.42	4	5	6	6.58
E	形状因子 (η)	1.15	1.35	1.70	2.05	2.25
F	碰撞角 (θ)/($^\circ$)	4.18	18	42	66	79.82
G	初始转速 (ω)/(转·min ⁻¹)	42	100	200	300	358

1.2 试验装置

本试验装置由落石抛射装置和坡角调节装置两大部分构成 (图 2)。其中落石抛射装置包括翻转释放机构、滑轨、滑块、弹簧、牵拉绳、限位绳、电子拉力计、基座、液压支架和电磁锁。翻转释放机构由一个顶部有凹槽且中心有贯穿孔的钢筒, 一个翻转轴以及一个支撑槽组装而成。该装置固定在滑块上, 其前端通过牵拉绳与弹簧相连, 后端则通过电磁锁与电子拉力计相连。翻转筒在重力的作用下始终保持铅锤状

态, 试块通过自旋轴架设在筒顶凹槽上。在对支撑槽施加预定拉力后, 使用手持可调转速马达通过自旋轴对试块施加转速, 当转速计显示达到预定转速时, 对电磁锁断电, 滑块沿滑轨弹出。当连接在桶底前端和滑轨后端的限位绳拉紧绷直时试块抛出。试块可通过调节不同拉力大小获得不同入射速度, 每次碰撞测试试块转速通过手持可调转速马达施加和调节。坡角调节装置由合页、两块钢板和一根限位绳组成, 坡角大小可通过调整限位绳长度实现, 碰撞角大小则可

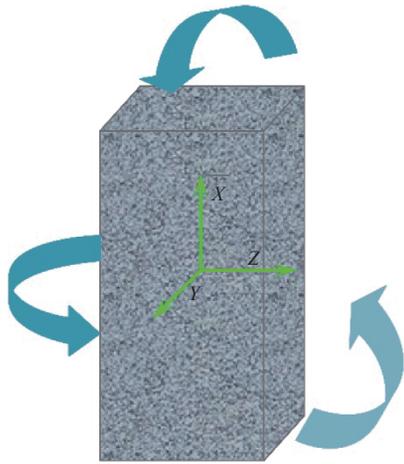


图 1 碰撞前试块绕 X、Y、Z 轴旋转示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the block rotating around the X-, Y- and Z- axis before impact

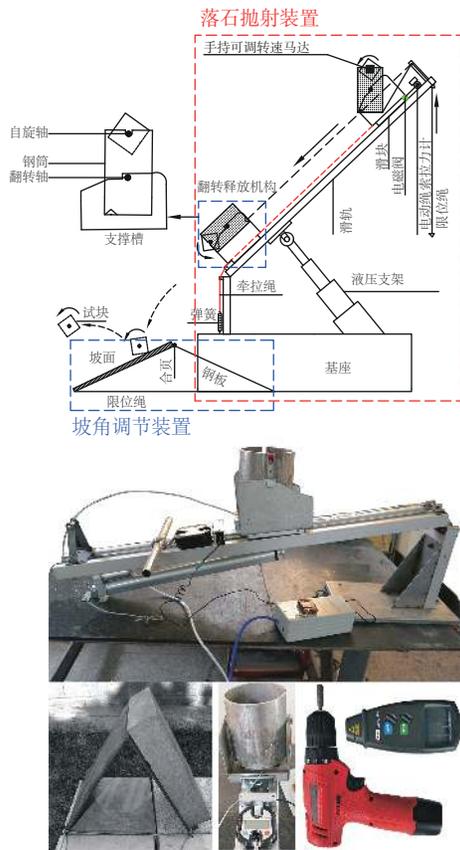


图 2 落石碰撞测试装置

Fig. 2 Rockfall impact test device

通过液压支架和坡角调节装置联合控制。

1.3 试验材料

本试验所用试块及坡面试样根据设计矩阵中确定的规格参数进行选择 and 加工, 试块形状的选择参考山区地带易于诱发落石灾害的五类典型落石形状特征, 包括正二十面体、立方体、正四面体、长方体及三

角板状(图 3)^[32]。坡面板采用天然石材精加工而成, 坡面十分平整。通过测试, 应用于本试验的五种坡面的摩擦系数分别为: 大理石, 0.395; 花岗岩-1, 0.415; 花岗岩-2, 0.39; 灰岩, 0.41; 砂岩, 0.385。试样具体参数如表 2 所示。



图 3 试验所采用的试块

Fig. 3 Blocks used in the experiment

1.4 图像分析与计算

试块冲击回弹过程通过一侧架设的高速摄像机以 1 000 fps 帧率连续记录。碰撞前后的速度采用合肥君达高研发的图像追踪软件 Tracker V2.0 进行测算。该软件可对试块像素进行追踪, 从而获得每次碰撞时试块速度和加速度。

恢复系数的计算采用文献中最为常用的方法计算^[16], 公式如下:

$$R_n = \frac{V'_n}{V_n} \quad (2)$$

式中: V_n ——碰撞前试块速度法向分量;

V'_n ——碰撞后试块速度法向分量。

2 试验结果与分析

试验获得不同工况下的 R_n 值与设计矩阵一并给出。试块 R_n 值在坡面和试块高施密特硬度(H_2/H_1)、低入射速度、高转速、小尺寸、小碰撞角和小形状因子条件下最大, 为 0.646。这其中包含了 Buzzi 等^[29] 试验获得高 R_n 值所需的 3 个必备条件, 初步反映了本研究中测试结果的可靠性。下面将对试验结果进行方差和回归分析, 以确定多因素联合影响下 R_n 的显著性影响因素及交互参数, 继而结合冲击动力学理论, 深入探讨各参数对 R_n 的影响机理。

2.1 确定 R_n 显著性影响参数

为确定最佳拟合模型, 采用 Design-Expert 软件 (Trial version 10.0, Stat-Ease, Inc., MN) 对试验结果进行逐步拟合。软件通过失拟检验和模型汇总统计, 提出

表 2 试验所用试块及坡面板特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the blocks and slopes used in the experiment

岩石类型	施密特硬度	形状	尺寸		η
			特征长度	值/mm	
大理岩	54	长方体	长/宽/高	53.9/24.9/24.9	2.05
大理岩	54	长方体	长/宽/高	80.85/37.35/37.35	2.05
大理岩	54	近似立方体	长/宽/高	52.58/46.35/46.35	1.35
大理岩	54	近似立方体	长/宽/高	35.05/30.9/30.9	1.35
花岗岩-1	76	长方体	长/宽/高	53.9/24.9/24.9	2.05
花岗岩-1	76	长方体	长/宽/高	80.85/37.35/37.35	2.05
花岗岩-1	76	近似立方体	长/宽/高	52.58/46.35/46.35	1.35
花岗岩-1	76	近似立方体	长/宽/高	35.05/30.9/30.9	1.35
灰岩	65	正四面体	边长	82	1.70
灰岩	65	正四面体	边长	56.28	1.70
灰岩	65	正四面体	边长	108.06	1.70
灰岩	65	正二十面体	边长	31.07	1.15
灰岩	65	三角板	底边/高/厚度	57.1/70.6/32.65	2.25
花岗岩-2	82	正四面体	边长	82	1.70
砂岩	48	正四面体	边长	82	1.70

一个二次模型。根据表 3 中所示的多元回归分析结果(基于模型、模型项显著性检验结果及对应的模型项系数),以编码单位表示的因子变量和响应变量之间的经验关系可通过以下模型表示:

表 3 R_n 值的响应曲面二次模型方差分析结果

Table 3 Analyses of variance (ANOVA) for the response surface quadratic model of the R_n values

方差来源	SS	df	MS	F值	P值	Prob > F	模型系数
截距							0.27
A	0.025	1	0.025	21.18	<0.000 1		0.014
B	0.36	1	0.36	313.27	<0.000 1		0.052
C	0.026	1	0.026	22.55	<0.000 1		-0.014
D	0.023	1	0.023	19.39	<0.000 1		-0.013
E	0.044	1	0.044	37.9	<0.000 1		-0.018
F	1.01	1	1.01	871.14	<0.000 1		-0.087
G	0.28	1	0.28	242.17	<0.000 1		0.046
BD	0.009 9	1	0.009 9	8.51	0.004 2		0.008 8
BE	0.004 6	1	0.004 6	3.96	0.048 6		0.006
BF	0.003 4	1	0.003 4	2.91	0.090 2		-0.005 1
BG	0.006 8	1	0.006 8	5.84	0.017		0.007 3
CE	0.008 6	1	0.008 6	7.36	0.007 6		0.008 2
DE	0.006 2	1	0.006 2	5.3	0.022 8		0.006 9
DF	0.012	1	0.012	9.93	0.002		0.009 5
DG	0.002 4	1	0.002 4	2.11	0.149 1		0.004 4
EF	0.002 6	1	0.002 6	2.27	0.134 7		0.004 5
EG	0.004 9	1	0.004 9	4.23	0.041 8		0.006 2
C^2	0.027	1	0.027	23.29	<0.000 1		0.038
F^2	0.046	1	0.046	39.29	<0.000 1		0.05
Model	1.98	19	0.1	89.5	<0.000 1		
Lack of Fit	0.14	123	0.001 2	0.99	0.564 9		
$R^2=0.928$							

$$R_n = 0.27 + 0.014A + 0.052B - 0.014C - 0.013D - 0.018E - 0.087F + 0.046G - 0.0088BD + 0.006BE - 0.005BF + 0.0073BG + 0.0082CE + 0.0069DE + 0.0095DF + 0.0044DG + 0.0045EF + 0.0062EG + 0.038C^2 + 0.05F^2 \quad (3)$$

通过式(4)对式(3)进行编码值换算:

$$x_i = (X_i - X_0) / \Delta X \quad (4)$$

式中: x_i ——第 i 个自变量的无量纲编码值;

X_i ——第 i 个自变量的未编码值;

X_0 —— X_i 在中心点的值(平均值),为阶跃变化值。

获得实际因素水平的关系模型如下:

$$R_n = 1.61 + 0.0012H_2 + 0.0056H_1 - 0.4V - 0.02d - 0.42\eta - 0.013\theta - 0.00049\omega - 0.0008H_1d + 0.0016H_1\eta - 0.000019H_1\theta + 0.0000066H_1\omega + 0.023V\eta + 0.02d\eta + 0.0004d\theta + 0.000044d\omega + 0.00018\eta\omega + 0.038V^2 + 0.000087\theta^2 \quad (5)$$

回归模型和模型项的显著性通过 F 检验判定, 概率 P 值越小, 则显著程度越高。 P 值 < 0.05 表示模型项对响应值的影响及模型是显著的, P 值 < 0.01 则为极显著。从表 3 中的方差分析结果可以看出, 回归模型的 P 值 < 0.000 1, 说明模型显著可靠。获得模型的决定系数 (R^2) 为 0.928, 表明在本研究范围内 92.8% 的变异可由拟合模型解释。单因素参数 $A(H_2)$ 、 $B(H_1)$ 、 $C(V)$ 、 $D(d)$ 、 $E(\eta)$ 、 $F(\theta)$ 和 $G(\omega)$ 的 P 值均低于 0.000 1, 说明所选因素对 R_n 的影响均达极显著程度。其中, $F(\theta)$ 影响最为显著, 其后依次为 $B(H_1)$ 、 $G(\omega)$ 、 $E(\eta)$ 、 $C(V)$ 、 $A(H_2)$ 和 $D(d)$ 。交互参数中 BD 、 CE 和 DF 的 P 值 <

0.01,说明 H_1-d 、 $V-\eta$ 和 $d-\theta$ 对 R_n 的交互影响高度显著, BE 、 BG 、 DE 和 EG 对 R_n 的交互影响也较为显著(P 值 <0.05),但相对较弱。各显著交互参数对 R_n 的影响程度依次为 $DF>BD>CE>BG>DE>EG>BE$ 。二次项中, C^2 和 F^2 为高度显著项,两者 P 值 <0.01 ,说明 V 和 θ 对 R_n 的影响高度卷曲。

2.2 各参数对 R_n 的影响

2.2.1 单因素参数对 R_n 的影响

结合式(5),仅考虑一阶效应,各单因素(主要影响因素)对 R_n 的影响如图4所示。当 d 、 V 、 η 和 θ 值较小, H_1 、 H_2 和 ω 值较大时,可获得较高的 R_n 值,反之,结果正好相反。这与之前单因素试验^[24]及Wyllie^[19]、Asteriou等^[22-23]、Giacomini等^[25]、Ansari等^[26]、Buzzi等^[29]研究中获得的结论相一致,具体机理阐述参见文献Ji等^[24]。另外,值得注意的是,过大的 V 和 θ 会对碰撞过程中试块的 R_n 值产生相反的影响,这则主要归因于多项式中二次项 C^2 和 F^2 的系数均为正值。

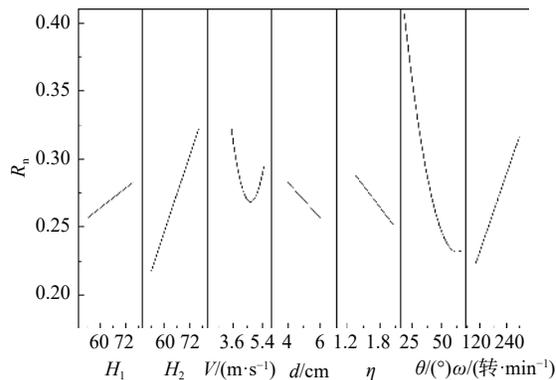


图4 参数对 R_n 的主要影响

Fig. 4 Main effects of parameters on R_n values

2.2.2 交互参数对 R_n 的影响

图5通过三维响应曲面图显示了各因子变量组合(显著性交互参数)对 R_n 的交互影响。根据图5(a), R_n 随试块 H_1 的增大而增大,但并非呈简单的线性关系,相对于 H_1 , d 对 R_n 影响则较小,随着 d 增大, R_n 仅表现出较弱的下降趋势。此外,从图中还可以看出, d 对 R_n 的影响不显著仅表现在 H_1 较小时,随着 H_1 的增大,这种影响逐渐变得显著。当 H_1 较大时,试块趋于弹性,不易破碎。随着 d 增加,试块冲量臂增大,平动能与转动能之间的转化更加剧烈,使得 R_n 对 d 的变化更加敏感。当试块 H_1 较小时,碰撞过程中试块太容易破碎,加之棱角状试块本身的易损性,最终使得 R_n 对 d 的变化不太敏感。

从图5(b)可以看出, R_n 随 H_1 的增大和 η 的减小

而逐渐增大。与 H_1 相比, η 对 R_n 影响较小。当 H_1 较小时, η 对 R_n 的影响较为显著。然而,随着 H_1 的增大, η 的影响明显减弱。这是因为当 H_1 较低时,对应试块较为脆弱,形状的变化会引起碰撞冲量大幅度变化,从而使能量损失发生较大变化,表现出对 R_n 的影响较为明显。反之,结果也正好相反。

图5(c)显示了中心值条件下 H_1 和 ω 对 R_n 的交互影响。试块 R_n 值随着 H_1 和 ω 的增大而增大, ω 的影响略弱于 H_1 。当 H_1 较小时, R_n 值较低, ω 对 R_n 的影响相对较小。然而,随着 H_1 的增加,这种影响明显增强。碰撞过程中, H_1 增大,能量损失减小(碰撞试块更接近于弹性体),直接影响转动能向平动能的转化效率(通常表现为增大)。此时, ω 越大,转化能量越多,其对 R_n 的影响越显著。反之,结果正好相反。

图5(d)(e)分别显示了交互参数 $\eta-V$ 和 $\eta-d$ 对试块 R_n 值的交互影响。当 η 较小时, R_n 值随 V 或 d 的减小均呈显著增大趋势,而当 η 较大时,这种影响变得不太显著。造成这一现象的原因主要有两个:(1)大 η 值试块碰撞姿态更为复杂多变,导致碰撞过程中转动能与平动能之间的转化规律较为混乱;(2)当 η 较大时,试块均较易破碎,使得碰撞过程中试块能量耗散规律不明晰。此外,图5(d)中当 V 较大时, V 对试块 R_n 影响非常弱,该现象在Chau等^[27]的试验中(其采用试块也为棱角状)也曾被观测到,这可能归因于棱角状试块本身的易损性,当 V 值较大时,所有试块均较易破碎,最终使得试块的能量耗散随 V 值增大未表现出明显的变化。

图5(f)显示了 d 和 θ 对 R_n 值的交互影响,响应面卷曲程度较高,等值线密度变化较大。随着 d 值增大, R_n 逐渐减小;相较于 d , θ 对 R_n 的影响更为卷曲,其对 R_n 的影响并非呈简单的线性关系。当 θ 较小时, R_n 随 θ 增大而减小得较快,当 θ 较大时, R_n 减小逐渐放缓,这与之前单因素试验^[24]和Wyllie^[19]、Asteriou等^[23]、Giacomini等^[25]研究中获得的结论基本一致。此外,当 θ 约为 45° 时,近似于一个拐点。

图5(g)显示了 η 和 ω 对 R_n 的交互影响,该现象在Ji等^[24]和Buzzi等^[29]的研究中也曾被报道过。试块 ω 值与 R_n 值呈正相关关系,相比 ω ,试块 η 值对 R_n 的影响相对较弱,且随着 η 值的增加, R_n 呈逐渐下降趋势。然而,与具有较大 η 值的试块相比,当试块 η 值较小时, ω 对试块 R_n 不太显著。当 η 较大时,转动能向平动能的转换更为强烈,导致 V_n 的增加,使得 R_n 值随 ω 的增加有明显的增加趋势。当 η 很小时,转

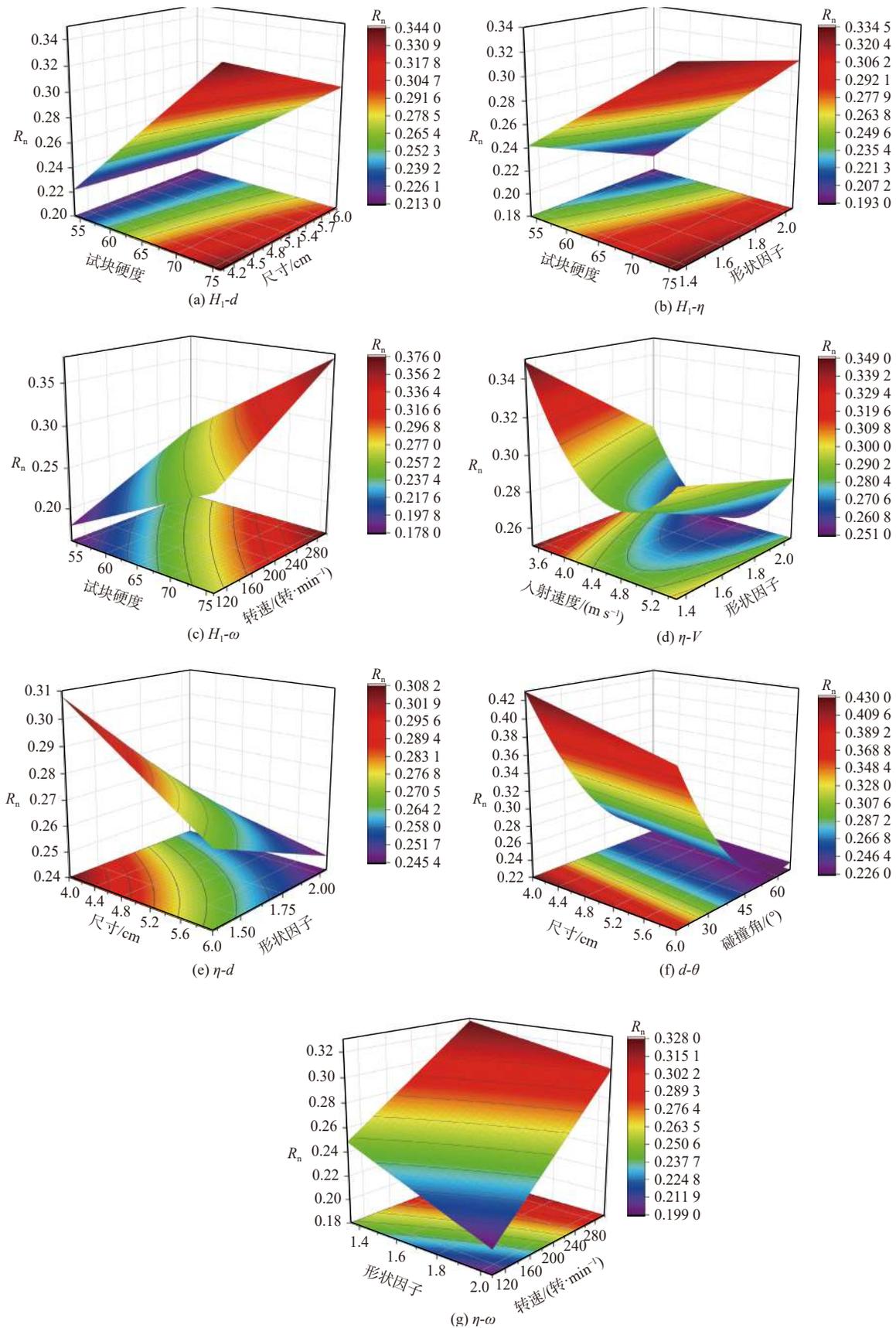


图 5 显著性交互参数对 R_n 影响的三维曲面图

Fig. 5 3D surface plots for the effects of the significant interaction parameters on R_n values

动能向平动能的转化比例减小, 虽然 ω 对 R_n 有着相同的影响, 但其影响并不如当 η 较大时显著。这也进一步验证了 Ji 等^[24] 和 Buzzi 等^[29] 试验中所获得的结论。

通过上述试验结果分析, 基本确定了多因素联合作用下试块 R_n 值的显著性影响参数, 且各参数对 R_n 值的影响关系及机理也得以阐明。这些获得的结论为基于多因素综合作用的恢复系数模型的建立奠定了重要基础, 进而可为落石运动轨迹的精准预测提供可靠依据。

3 讨论

本试验中采用的 R_n 值是试块分别绕 X 、 Y 和 Z 轴旋转与坡面进行碰撞测试所获得的平均值。试验结果中获得的 R_n 最大值仅表明在该条件下平均的 R_n 值最大, 并不意味着该条件下 R_n 值均为或始终最大。研究中发现, 在 ω (绕 Y 轴)、 η 较大 (如长方体 $\eta=2.05$)、 θ 较小、 H_1 和 H_2 较高条件下, 当冲击瞬间试块质心滞后于接触点, 且两者之间水平距离 D 较小时, 极易出现极高 R_n 值 (>1) (图 6); 然而, 当试块绕 X 轴旋转与坡面碰撞时, R_n 值急剧下降, 使得最终总体的平均 R_n 值较低。这种情况下落石的危害同样值得格外关注, 因为具有极端高 R_n 值的落石的防护空间及防护难度更大, 造成的危害亦不可忽视。

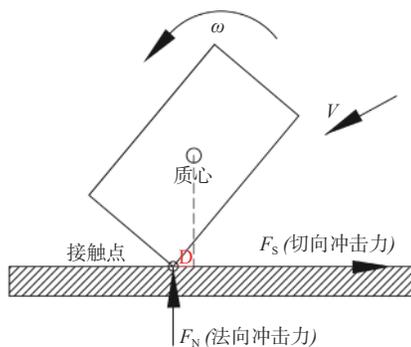


图 6 易于获得极端高 R_n 值的条件

Fig. 6 Conditions for obtaining extremely high R_n values

本研究所获得的结论主要基于小尺度低能量的落石碰撞试验, 与实际的落石事件尚存在差异。这些结论若要直接应用于工程实际, 尚需通过大量的现场大尺度落石试验作进一步的验证和校准。此外, 本研究主要针对硬岩质坡面条件下的落石碰撞运动特征的分析, 这仅代表了一部分坡面材料特征, 还有其他坡面材料 (例如松散介质、草覆盖层坡面、泥沙坡面

等) 尚未纳入, 未来围绕该方面内容还有待进一步研究。同时, 根据本研究获得的结论可以发现, 影响 R_n 的因素基本不是独立存在的, 许多因素间均存在强烈的交互作用, 且对 R_n 影响显著, 这不同于之前文献中获得的个别因素独立影响 R_n 的结论。建议在未来落石研究中对于恢复系数的取值尽可能考虑多因素的联合影响, 而非仅考虑简单某个或某几个独立的因素, 从而获得更为准确的落石灾害预测结果。

4 结论

(1) 首次采用 RSM-CCD 方法针对多因素对落石 R_n 值的联合影响展开了研究。通过对试验结果进行回归和方差分析, 7 个因素均显著影响 R_n 值, 显著程度依次为 $\theta > H_1 > \omega > \eta > V > H_2 > d$ 。交互参数 H_1-d 、 $H_1-\eta$ 、 $H_1-\omega$ 、 $V-\eta$ 、 $d-\eta$ 、 $d-\theta$ 和 $\eta-\omega$ 对 R_n 也均表现出了显著影响, 显著程度依次为 $d-\theta > H_1-d > V-\eta > H_1-\omega > d-\eta > \eta-\omega > H_1-\eta$ 因子。

(2) 对于单因素参数, 随 d 、 V 、 η 和 θ 减小, ω 、 H_1 和 H_2 增大, R_n 值呈上升趋势。对于交互参数, d 和 ω 对 R_n 影响较弱仅表现在 H_1 较小时, 随 H_1 增大, 影响逐渐增强; η 在 H_1 较小时对 R_n 影响较显著, 随着 H_1 增大, 影响则明显减弱; η 较小时, R_n 值随 V 或 d 减小均呈显著增大趋势, 当 η 较大时, 这种影响不太显著; θ 较小时, R_n 随其增大减小较快, θ 较大时, 减小趋势逐渐放缓; 与较大 η 值试块相比, 较小 η 值试块的 ω 对 R_n 的影响不太显著。

(3) d 、 V 、 η 和 θ 较小, ω 、 H_1 和 H_2 较大条件下, 往往获得的 R_n 值较大; 极端高的 R_n 值 (>1) 则易于出现在 ω (绕 Y 轴)、 η 、 H_1 和 H_2 较大、 θ 较小条件下, 该条件下落石的危害同样值得格外关注。

参考文献 (References) :

- [1] 何思明, 吴永, 李新坡. 滚石冲击碰撞恢复系数研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 623 - 627. [HE Siming, WU Yong, LI Xinpo. Research on restitution coefficient of rock fall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 623 - 627. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 章广成, 向欣, 唐辉明. 落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1266 - 1273. [ZHANG Guangcheng, XIANG Xin, TANG Huiming. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1266 - 1273. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 姬中民,唐一举,伍法权,等. 落石形状和尺寸对恢复系数影响的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 665 - 672. [JI Zhongmin, TANG Yiju, WU Faquan, et al. Laboratory investigation of the effect of rockfall shape and size on coefficient of restitution[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 665 - 672. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 78 - 87. [WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 78 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 吴建利,胡卸文,梅雪峰,等. 高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板组合结构动力响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 114 - 122. [WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 114 - 122. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 沈均,何思明,吴永. 滚石灾害研究现状及发展趋势[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 122 - 125. [SHEN Jun, HE Siming, WU Yong. Present research status and development trend of rockfall hazards[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(4): 122 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [7] YAN P, ZHANG J H, KONG X Z, et al. Numerical simulation of rockfall trajectory with consideration of arbitrary shapes of falling rocks and terrain[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103511.
- [8] AGLIARDI F, CROSTA G B. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 455 - 471.
- [9] LAN H X, MARTIN C D, LIM C H. RockFall analyst: a GIS extension for three dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling[J]. Computers & Geosciences, 2007, 33(2): 262 - 279.
- [10] STEVENS W. RockFall: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rock falls[D]. Toronto: University of Toronto, 1998.
- [11] DORREN L K A. Rockyfor3D (v5.2) revealed-transparent description of the complete 3D rockfall model[EB/OL]. (2015-12-16)[2021-04-20]. <http://www.ecorisq.org/>
- [12] LI L P, LAN H X. Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1163 - 1176.
- [13] 叶四桥, 巩尚卿. 落石碰撞法向恢复系数的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 13 - 19. [YE Siqiao, GONG Shangqing. Research on normal restitution coefficient of rockfall collision by model tests[J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 13 - 19. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 882 - 891. [HUANG Runqiu, LIU Weihua. In-situ test study of characteristics of rolling rock blocks based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 882 - 891. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 叶四桥, 巩尚卿, 王林峰, 等. 落石碰撞切向恢复系数的取值研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(1): 8 - 15. [YE Siqiao, GONG Shangqing, WANG Linfeng, et al. Research on value of tangential restitution coefficient for rockfall collision[J]. China Railway Science, 2018, 39(1): 8 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [16] GIANI G P, GIACOMINI A, MIGLIAZZA M, et al. Experimental and theoretical studies to improve rock fall analysis and protection work design[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2004, 37(5): 369 - 389.
- [17] SPADARI M, GIACOMINI A, BUZZI O, et al. In situ rockfall testing in New South Wales, Australia[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 49: 84 - 93.
- [18] FERRARI F, GIANI G P, APUANI T. Why can rockfall normal restitution coefficient be higher than one?[J]. Rend Online Soc Geol It, 2013, 24: 122 - 124.
- [19] WYLLIE D C. Calibration of rock fall modeling parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 67: 170 - 180.
- [20] PFEIFFER T, BOWEN T. Computer simulation of rockfalls[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1989, 26(1): 135 - 146.
- [21] ASTERIOU P, TSIAMBAOS G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 927 - 941.
- [22] ASTERIOU P, TSIAMBAOS G. Effect of impact velocity, block mass and hardness on the coefficients of restitution for rockfall analysis[J]. International Journal of Rock

- [Mechanics and Mining Sciences](#), 2018, 106: 41 – 50.
- [23] ASTERIOU P, SAROGLU H, TSIAMBAOS G. Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis[J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2012, 54: 103 – 113.
- [24] JI Z M, CHEN Z J, NIU Q H, et al. Laboratory study on the influencing factors and their control for the coefficient of restitution during rockfall impacts[J]. [Landslides](#), 2019, 16(10): 1939 – 1963.
- [25] GIACOMINI A, THOENI K, LAMBERT C, et al. Experimental study on rockfall drapery systems for open pit highwalls[J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 2012, 56: 171 – 181.
- [26] ANSARI M K, AHMAD M, SINGH R, et al. Correlation between Schmidt hardness and coefficient of restitution of rocks[J]. [Journal of African Earth Sciences](#), 2015, 104: 1 – 5.
- [27] CHAU K T, WONG R H C, LEE F. Rockfall problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of restitution[J]. [International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences](#), 1998, 35(4/5): 662 – 663.
- [28] TURRIN S, HANSS M, SELVADURAI A P S. An approach to uncertainty analysis of rockfall Simulation[J]. [Computer Modeling in Engineering & Sciences](#), 2009, 52(3): 237 – 258.
- [29] BUZZI O, GIACOMINI A, SPADARI M. Laboratory investigation on high values of restitution coefficients[J]. [Rock Mechanics and Rock Engineering](#), 2012, 45(1): 35 – 43.
- [30] 柳万里, 晏鄂川, 魏鹏飞, 等. 落石运动特征试验及影响因素敏感性分析[J]. [山地学报](#), 2021, 39(1): 47 – 58. [LIU Wanli, YAN Echuan, WEI Pengfei, et al. Experimental study on rockfall and sensitivity analysis of influencing factors[J]. [Mountain Research](#), 2021, 39(1): 47 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [31] SAKKAS V A, ISLAM M A, STALIKAS C, et al. Photocatalytic degradation using design of experiments: A review and example of the Congo red degradation[J]. [Journal of Hazardous Materials](#), 2010, 175(1/2/3): 33 – 44.
- [32] FITYUS S G, GIACOMINI A, BUZZI O. The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks[J]. [Engineering Geology](#), 2013, 162: 43 – 52.

编辑: 汪美华