

### 落石正、反转转速对法向恢复系数影响的室内试验

王庭辉, 姬中民, 伍法权, 贾 嘉, 褚怀保

### Experiment on the effect of forward and reverse rotation speeds of rockfall on normal restitution coefficient

WANG Tinghui, JI Zhongmin, WU Faquan, JIA Jia, and CHU Huabao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-06>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 基于Trajec 3D的硬岩人工路堑边坡滚石运动范围预测

`\${suggestArticle.titleEn}`

陈涛, 陈志坚, 孟子耀 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(5): 37-41

##### 冻融和干湿循环对原状黄土渗透系数的影响

`\${suggestArticle.titleEn}`

赵茜, 杨金熹, 赵晋萍 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(2): 119-126

##### 黄土湿陷系数影响因素的相关性分析

`\${suggestArticle.titleEn}`

朱凤基, 南静静, 魏颖琪, 白兰 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(2): 128-133

##### 喜马拉雅中段冰湖终碛坝体溃决过程实验研究

Experimental study on the process of end-moraine dam failure in the middle Himalaya glacial lake: Taking the Jialongcuo glacial lake end-moraine dam as an example

苏鹏程, 刘威, 李昊, 陈乔, 刘阳, 张议芳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 18-28

##### 基于增量加载法的泥石流拦挡坝抗冲击力数值模拟

Numerical simulation of impact resistance of debris flow dam: A case study of the debris flow dam in Sanyanyu Gully, Zhouqu County, Gansu Province

刘兴荣, 魏新平, 陈豫津, 王翔宇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 78-83

##### 基于水槽试验的冰碛土泥石流启动机理分析

Analysis of the start-up mechanism of moraine debris flow based on flume test: A case study of the Aierkuran Gully along the Sino-Pakistan highway

樊圆圆, 宋玲, 魏学利 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 1-9



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.02-06

王庭辉, 姬中民, 伍法权, 等. 落石正、反转转速对法向恢复系数影响的室内试验 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 42-52.  
WANG Tinghui, JI Zhongmin, WU Faquan, *et al.* Experiment on the effect of forward and reverse rotation speeds of rockfall on normal restitution coefficient[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 42-52.

## 落石正、反转转速对法向恢复系数影响的室内试验

王庭辉<sup>1</sup>, 姬中民<sup>2</sup>, 伍法权<sup>2</sup>, 贾 嘉<sup>3</sup>, 褚怀保<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 绍兴文理学院土木工程学院,  
浙江 绍兴 312000; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 为探究落石正转和反转转速对法向恢复系数( $R_n$ )的影响, 选制正方、圆盘和圆柱三种典型形状试块, 通过专门研发的落石碰撞测试装置, 开展不同正转和反转转速下试块绕  $X$  和  $Y$  轴与坡面的碰撞测试。试验结果表明: 圆盘和圆柱状试块绕  $Y$  轴旋转时(近似正碰), 转速对  $R_n$  基本无影响; 3 种形状试块绕  $X$  轴旋转时(非正碰), 转速和  $R_n$  存在一定相关性, 但  $R_n$  还受到试块形状和冲击姿态联合影响。为此, 引入综合变量-冲击姿态系数( $IPC$ )来量化转速对  $R_n$  的影响。鉴于不同冲击姿态下法向冲击力对  $R_n$  的力学作用机制存在差异, 对试块冲击回弹特征采取分类探讨。一次冲击回弹型, 正转试验中质心(C)在接触点(CP)之后和 C 在 CP 之前条件下,  $IPC$  与  $R_n$  分别呈线性正相关和负相关关系; 反转试验结果则正好相反。二次冲击回弹型, 无论正转或反转, 第一次冲击 C 在 CP 之前或之后, 各形状试块  $IPC$  与  $R_n$  均为强正相关, 但各工况下的相关规律并不一致。这些获得的结论基本揭示了转速对  $R_n$  的影响关系, 同时为转动异形落石冲击回弹过程的精准预测提供了参考。

**关键词:** 正转; 反转; 恢复系数; 冲击姿态系数; 落石

中图分类号: P554 文献标志码: A 文章编号: 1003-8035(2022)02-0042-11

## Experiment on the effect of forward and reverse rotation speeds of rockfall on normal restitution coefficient

WANG Tinghui<sup>1</sup>, JI Zhongmin<sup>2</sup>, WU Faquan<sup>2</sup>, JIA Jia<sup>3</sup>, CHU Huabao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;  
2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China;  
3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of forward and reverse rotation speeds of rockfall on normal restitution coefficient ( $R_n$ ), three typical blocks of cube, disc and cylinder were customized, and the impact tests of each block with slope at different forward and reverse rotation speeds in  $X$  and  $Y$  axes were carried out through the specially developed rockfall impact test device. Results show that the rotation speed has no effect on  $R_n$  when the disc and the cylinder shaped blocks rotate around the  $Y$ -axis (approximately normal impact); when the three shaped blocks rotate along the  $X$ -axis (non-normal impact), there exists a certain correlation between the rotation speed and  $R_n$ , but  $R_n$  is also affected by the block shape and impact posture. Thus, a comprehensive variable - impact posture coefficient ( $IPC$ ) was introduced to quantify the effect of rotation speed on  $R_n$ . In view

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-05-09 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41831290)

第一作者: 王庭辉(1982-), 男, 讲师, 主要从事工程防护方面研究工作。E-mail: wangtinghui425@hpu.edu.cn

通讯作者: 姬中民(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事落石灾害预测与防治方面研究工作。E-mail: gang880129@126.com

of the difference of the mechanical action mechanism of normal impact force on  $R_n$  under different impact posture, the impact-rebound characteristics of the blocks were classified and discussed. For the type of rebounding after only one impact,  $IPC$  and  $R_n$  have linear positive correlation and negative correlation respectively when the mass center (C) is behind and in front of the contact point (CP) in the forward rotation test, and the results of the reverse rotation test were just the opposite. For the type of rebounding after two impacts, regardless of forward or reverse, whether C is behind or in front of CP during the first impact,  $R_n$  and  $IPC$  of each shaped block are strongly positive correlation, yet the relevant laws are not consistent under various working conditions. These conclusions basically reveal the influence of rotation speed on  $R_n$ , and provide a reference for accurate prediction of impact-rebound process of rotating irregular rockfall.

**Keywords:** forward rotation; reverse rotation; restitution coefficient; impact posture coefficient; rockfall

## 0 引言

落石在坡面的运动轨迹可通过滑动、滚动、腾空(自由飞行)和冲击回弹<sup>[1-3]</sup>等4种运动形式的组合进行模拟,其中冲击回弹过程最为复杂,在目前绝大多数的落石运动路径模拟中仅通过一个关键参数——恢复系数来表征,该系数取值的准确性将直接影响落石运动路径的预测精度<sup>[4-8]</sup>。

一直以来,受Newton对恢复系数定义的影响,在落石研究领域通常认为恢复系数是坡面材料的常数,随着认识的加深以及相关试验数据的日渐丰富,这种观点变得不再可靠,相同坡面材料的恢复系数值存在巨大差异,甚至相同的初始条件,恢复系数值也迥然不同,这说明还有其他因素对恢复系数有着显著的影响<sup>[4,9-11]</sup>。为此,学者们分别通过室内和现场试验针对落石特征<sup>[12-16]</sup>、坡面特征<sup>[17-20]</sup>和运动特征<sup>[4,12,21-24]</sup>对恢复系数的影响展开了研究,且获得了许多重要的结论。然而,对于试块转速对恢复系数的影响在却鲜有涉及。落石在顺坡向向下运动过程中,其自身除了具有一定的平动速度外,往往还伴随着一定的转动速度。当这些落石与坡面发生撞击时,必然会引起平动能和转动动能之间的转化,直接影响恢复系数,进而影响落石运动路径的预测精度<sup>[12,17]</sup>。因此,开展转速对恢复系数影响的研究对于落石灾害的精准预测具有重要意义<sup>[18]</sup>。

目前,转速对恢复系数的影响主要通过现场试验和室内试验两种途径进行研究。现场试验中,Spadari等<sup>[11]</sup>分别在坡角为17°~30°的4种坡面上进行不同角速度条件下天然形态落石与坡面的冲击测试,结果表明法向恢复系数( $R_n$ )和切向恢复系数( $R_t$ )均不受落石转速的影响。室内试验中,Ji等<sup>[12]</sup>和Asteriou等<sup>[23]</sup>选择球形试块进行不同转速条件下的冲击测试,结果表明转速对试块的 $R_n$ 基本无影响,对 $R_t$ 则无显著影响或呈正相关关系。Buzzi等<sup>[17]</sup>对椭圆形、圆形、方形和五边形混

凝土试块分别在15°~40°冲击角下以不同转速与水平坡面进行撞击测试发现,转速与各形状试块的 $R_t$ 以及非圆形试块的 $R_n$ 呈正相关关系,对于圆形试块的 $R_n$ 值,转速的影响则不明显。然而,这些研究结论并未达成一致,甚至相冲突,可归结为3个方面的原因:(1)试验方法不规范,测试中可能存在其他因素的干扰;(2)试验结果的分析仅限于数据描述,影响机理不清晰;(3)选用的试验材料差异较大,且未能反映现场实际落石特征。

此外,值得注意的是上述研究均是针对落石顺运动方向的转动速度(正转)对恢复系数的影响,对于落石逆运动方向的转动速度(反转)对恢复系数的影响则并未被考虑。近年来关于恢复系数的相关试验研究中<sup>[12-14]</sup>,这种情况并不少见。尤其是对于具有初始转速的异形试块(例如正方体、圆柱等),当其对坡面发生冲击后,试块发生反转的情况接近总测试样本的30%,而这又将成为下一次冲击时试块的初始运动条件,直接影响恢复系数和落石的运动轨迹。因此,进行试块反转转速对恢复系数的影响研究同样重要。鉴于 $R_n$ 是目前各种落石运动轨迹预测模型中最为关键的输入参数,文章暂只针对其展开详细研究。

综合上述分析,本研究拟基于现场实际落石特征及之前试验中发生反转的试块形状特征,选制3种不同形状且具有代表性的试块,采用专门设计的落石抛射装置和高帧率摄像机分别展开各形状试块在不同正转转速和反转转速条件下对坡面的冲击测试。基于冲击动力学理论对试验结果进行分析,探讨试块正转转速和反转转速对法向恢复系数的影响机理,最终建立它们之间的影响关系。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

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1)。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。翻转释放机构由顶部有凹槽且中心有贯穿孔的钢筒、翻转轴以及支撑槽组装而成。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。通过调节拉力的大小获得试块不同的入射速度, 每次碰撞测试试块的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、两块钢板和限位绳组成, 坡角的大小可通过调整限位绳的长度实现, 碰撞角的大小则可通过液压支架和坡角调节装置联合控制。

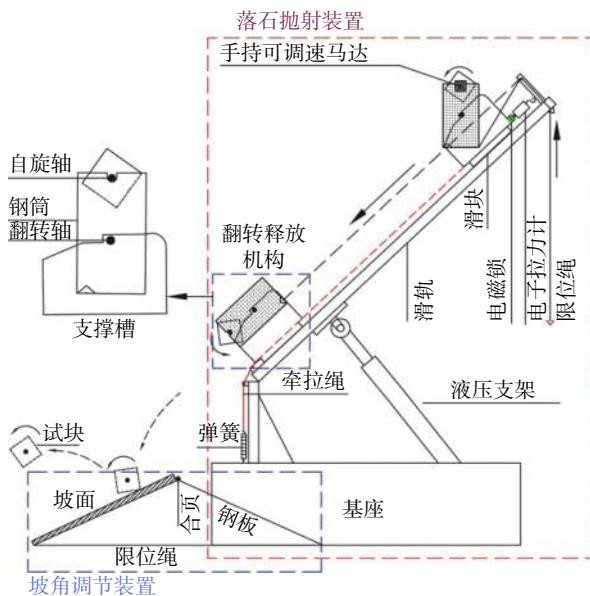


图 1 落石冲击测试装置

Fig. 1 Impact testing device of rockfall

## 1.2 试验程序

参考山区易于发生落石灾害的典型落石形状特征以及易于发生倒转的试块形状特征<sup>[25]</sup>, 文中分别选择正方体、圆盘和圆柱体作为试块形状(图 2)。试块体积相同且均由天然灰岩加工制作而成, 坡面材质与试块材质一致。正转转速影响测试中, 试块分别以 100~500 r/min 的转速绕 X 和 Y 轴旋转, 而后以固定的人射速度( $V$ )和冲击角( $\alpha$ )对坡面冲击; 反转转速影响测试的初始条件与正转相同, 但基于实际观测反转现象发生的条件, 试块均仅绕 X 轴以 100~500 r/min 的转速与坡面进行冲击。每组测试均重复 5 次, 具体参数见表 1。

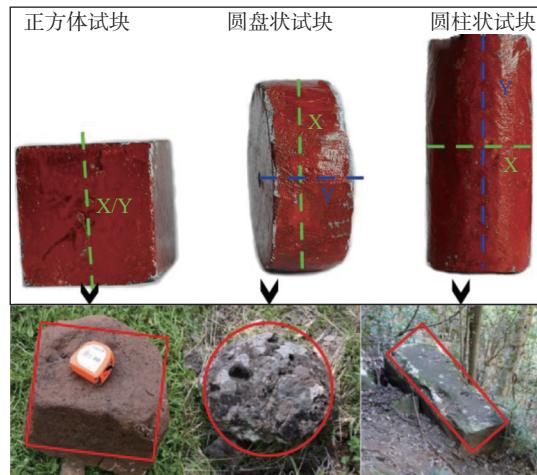


图 2 试验中所采用的不同形状的试块  
Fig. 2 Blocks with different shapes used in the test

表 1 试块与坡面特征参数及试验初始条件

Table 1 The characteristic parameters of the block and slope and the initial conditions of the test

岩石类型	形状	试块特征			
		尺寸	$V/(m \cdot s^{-1})$	$\alpha/(^\circ)$	初始转速/ (r \cdot min^{-1})
灰岩	正方体	特征长度			
	圆盘	边长	40.3		
	圆柱	直径/厚度	58.6/24.3	3.5	40
		直径/高	33.78/73		100~500 (正/反转)
坡面特征					
岩石类型	形状	尺寸			
		特征长度	值/mm		
灰岩	长方体	长/宽/高	700/500/150		

## 1.3 图像处理与计算

落石冲击回弹过程由架设在一侧的高速摄像机以 1 000 帧/s 的帧率记录, 试块冲击前后的速度通过合肥君达高科技信息技术有限公司开发的图像跟踪软件 Tracker V2.0 进行测算。该软件可以对试块的像素进行追踪, 从而获得试块的入射速度和回弹速度。法向恢复系数值采用式(1)计算, 该公式是落石研究中最常用的定义<sup>[15~18]</sup>, 表达式如下:

$$R_n = \frac{V_n'}{V_n} \quad (1)$$

式中:  $V_n$ ——冲击前试块法向速度/(m·s<sup>-1</sup>);

$V_n'$ ——冲击结束后试块法向速度/(m·s<sup>-1</sup>)。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 试块转速(正转和反转)对 $R_n$ 的影响

根据式(1)分别计算 3 种形状试块在不同正转转速和反转转速条件下与坡面冲击的法向恢复系数值, 获得

各试块转速与  $R_n$  之间的关系如图 3 和图 4。图中:  $X$  表示试块绕  $X$  轴旋转与坡面撞击;  $Y$  表示试块绕  $Y$  轴旋转与坡面撞击。

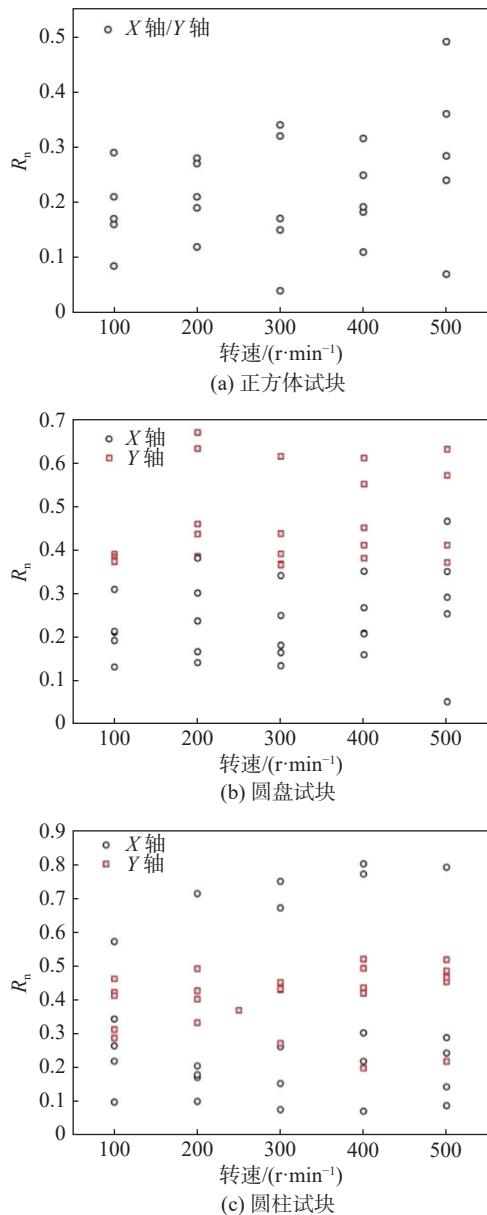


图 3 不同形状试块  $R_n$  值与正转转速的关系

Fig. 3 Relationship between forward rotation speeds and  $R_n$  values of blocks with different shapes

### 2.1.1 试块正转转速对 $R_n$ 的影响

从图 3 中可以看出,当试块绕  $X$  轴旋转时,随着正转转速的增加,3 种形状试块的  $R_n$  值均未表现出某种清晰的变化趋势;各转速条件下试块的  $R_n$  值分布均较为离散且变化范围较大,这与 Spadari 等<sup>[11]</sup>试验中获得的结论相符。然而,从理论上讲,该工况下试块的转速一定会影响  $R_n$  值,非球形试块在冲击过程中,法向冲击

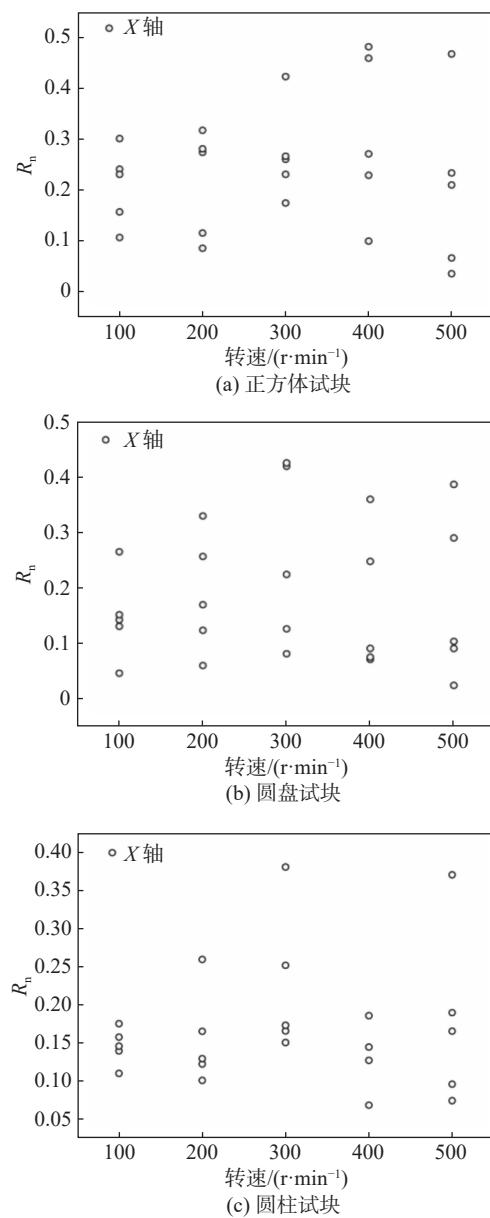


图 4 不同形状试块  $R_n$  值与反转转速的关系

Fig. 4 Relationship between reverse rotation speeds and  $R_n$  values of blocks with different shapes

力往往不通过质心,转速的变化会引起法向冲击力的改变,进而影响  $R_n$ 。上述试验结果说明试块转速可能并不能单独直接对  $R_n$  产生影响或者对  $R_n$  起到了绝对控制作用,研究其对  $R_n$  的影响可能还需要联合其他因素。此外,试验中还发现即使相同试块在相同转速条件下,试块与坡面的冲击姿态也各不相同,而不同冲击姿态下冲击力对  $R_n$  的影响机制也存在较大差异。因此,对其采用一个简单通用的规律来概括可能并不合适,分类细化研究可能有助于该问题的解决。

当试块绕  $Y$  轴旋转时(图 3),圆盘和圆柱状试块的  $R_n$  值对转速的变化并不敏感(正方体状试块绕  $X$  和

$Y$  轴旋转冲击效果相同, 此处不重复讨论), 随着试块正转转速的增加, 两种试块的  $R_n$  值变化不明显。这与 Buzzi 等<sup>[17]</sup>对圆盘状试块测试结果相一致。该条件下, 法向冲击力往往通过质心, 近似于球形试块的正碰, 对转动能的变化影响很小。值得注意的是, 虽然该工况下  $R_n$  受转速的影响不明显, 但从图中可以清晰的看出两种形状试块的  $R_n$  取值范围存在一定的差异, 圆盘状试块  $R_n$  值为  $0.36 \sim 0.66$ , 圆柱状试块  $R_n$  值为  $0.2 \sim 0.52$ , 前者明显大于后者。圆盘状试块更接近于正碰, 圆柱形试块在试验中则很难做到完全线接触正碰。该工况下获得的测试结果更加突显了形状对  $R_n$  的影响, 这也说明形状对  $R_n$  的影响是固有的, 研究转速对  $R_n$  的影响时该因素不可忽视。

### 2.1.2 试块反转转速对 $R_n$ 的影响

与正转转速对  $R_n$  的影响结果相似, 图 4 中 3 种形状试块的  $R_n$  值亦不随反转转速的变化而变化, 其受转速的影响表现不显著。不同转速下三种形状试块的  $R_n$  值分布均较为离散且取值的变化区间较大。造成这种现象的原因与 2.1.1 节中关于正转转速对  $R_n$  的影响的分析相类似。

综合上述分析, 当试块绕  $Y$  轴旋转时, 转速对于  $R_n$  的影响关系基本明晰; 当试块绕  $X$  轴旋转时, 由于多变的冲击姿态以及复杂的冲击回弹机制, 该工况下转速对  $R_n$  的影响机理尚不清楚, 这可能也是大部分研究中回避该问题的一个重要原因<sup>[11, 23]</sup>。不过, 根据上述试验结果的分析也获得了一些可能解决该问题的途径, 例如基于不同的力学作用机理分类探讨, 综合考虑试块的形状、冲击姿态的影响等, 基于该思路展开详细分析和探讨。

### 2.2 冲击姿态系数对 $R_n$ 的影响

通过对试块与坡面的冲击回弹特征的观测, 可将试块的冲击回弹过程分为两个大类: 即一次冲击后发生回弹(I-1)和连续两次冲击后发生回弹(I-2), 如图 5 所示。这两类情况在 Buzzi<sup>[17]</sup>的试验中也曾被观测到且给予了分类。初步的理论分析表明: 带有初始转速的试块回弹特征与动量矩方程存在密切关联, 法向冲击力相对质心的位置不同, 接触点的法向冲量对质心的冲量矩对冲击后试块的运动影响效果不同。以此为依据, 将一次冲击回弹分为质心在接触点之前, 如图 5(a) 和质心在接触点之后, 如图 5(b)。二次冲击回弹分为第一次接触质心在接触点之前, 如图 5(c) 和质心在接触点之后, 如图 5(d)。图中正转和反转试块冲击前后的旋转方向分别以蓝色和黑色箭头标示。

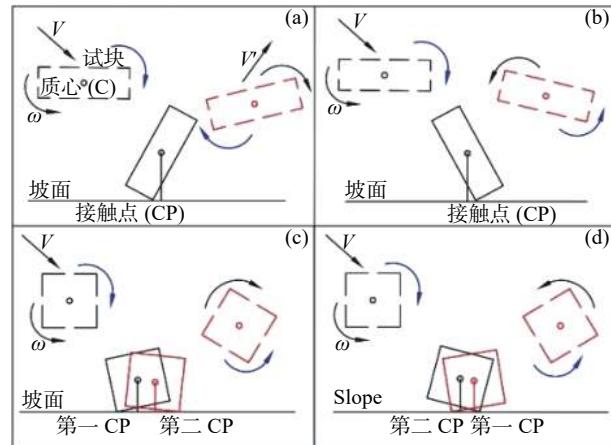


图 5 试块冲击回弹特征分类示意图  
Fig. 5 The classification diagram of the impact-rebound characteristics of the blocks

然而, 仅做这些分类是不够的, 根据 2.1 节中分析获得的结论, 探讨转速对  $R_n$  的影响还需综合考虑其发生作用的载体——试块形状和冲击姿态, 这里特别引入一个关键变量——冲击姿态系数( $IPC$ ), 由此来量化转速对  $R_n$  的影响。

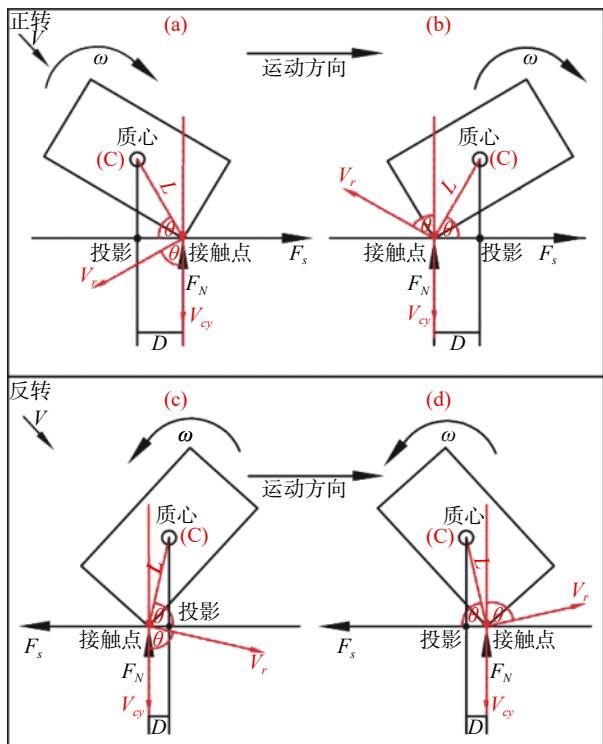
$$IPC = \omega \cdot L \cdot \cos \theta = \omega \cdot D \quad (2)$$

式中:  $\omega$ —冲击(或第一次冲击)时试块角速度/(rad·s<sup>-1</sup>);  
 $L$ —质心与接触点之间连线长度/m, 反映试块的形状特征;  
 $\theta$ —冲击(或第一次冲击)时试块质心和接触点连线与坡面的夹角/(°), 反映冲击姿态特征;  
 $D$ —冲击(或第一次冲击)时质心投影与接触点之间的距离/m, 在 Ji 等<sup>[12]</sup>的研究中其曾被借助用于解释不同形状试块在不同接触姿态下的回弹机制。

从本质上讲,  $IPC$  是因转动引起的试块接触点的速度在法向的投影值, 其反映的是试块法向冲击速度的改变量。如图 6 所示, 正转工况(a)质心在接触点之后和(b)质心在接触点之前, 反转工况(c)质心在接触点之前和(d)质心在接触点之后,  $F_N$  和  $F_S$  分别为法向和切向冲击力。试块的运动可认为是随质心 C 的整体移动(各点速度相同)和各点绕质心 C 转动的叠加, 即:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_e + \vec{V}_r \quad (3)$$

式中:  $V_a$ —接触点绝对速度/(m·s<sup>-1</sup>);  
 $V_e$ —接触点牵连速度/(m·s<sup>-1</sup>),  $V_e = V = V_c$  (质心的速度);  
 $V_r$ —接触点相对质心的速度/(m·s<sup>-1</sup>),  $V_r = \omega \cdot L$ ;

图 6 IPC 对  $R_n$  的影响机理Fig. 6 Influence mechanism of IPC on  $R_n$ 

$V_a$  在向的投影值为接触点法向的冲击速度, 即:

$$\vec{V}_{ay} = \vec{V}_{cy} + \vec{V}_{ry} \quad (4)$$

$$V_{ay} = V_{cy} \pm V_{ry} = V_{cy} \pm \omega \cdot L \cdot \cos \theta = V_{cy} \pm IPC \quad (5)$$

式中:  $V_{cy}$  ——  $V_c$  的法向分量/( $m \cdot s^{-1}$ );

$V_{ry}$  ——  $V_r$  的法向分量/( $m \cdot s^{-1}$ )。

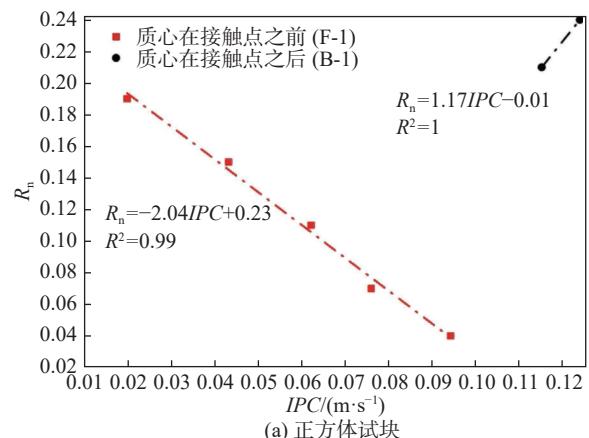
法向冲击速度决定了法向冲击力的大小, 法向速度的改变引起法向冲击力的改变, 进而影响  $R_n$ 。

借助软件 Tracker V2.0 中的测量模块测量每次测试时冲击瞬间试块的角速度  $\omega$ 、接触点与质心投影之间的距离  $D$ , 而后根据式(2)计算  $IPC$  值。不同冲击反弹特征类型试块  $R_n$  值与  $IPC$  的关系如图 7—图 9 和图 13 所示。

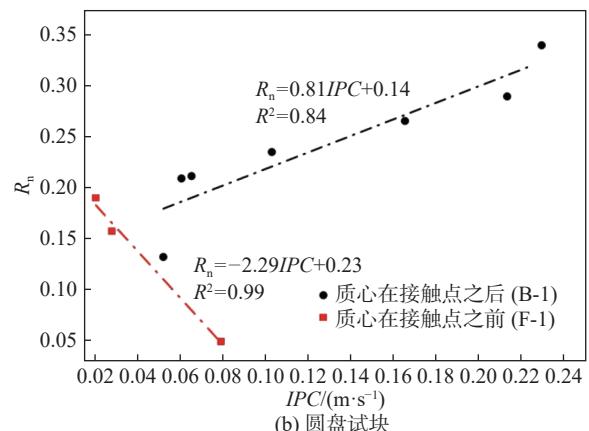
## 2.2.1 I-1 类型试块 $IPC$ 对 $R_n$ 的影响

### (1) 正转试验中 $IPC$ 对 $R_n$ 的影响

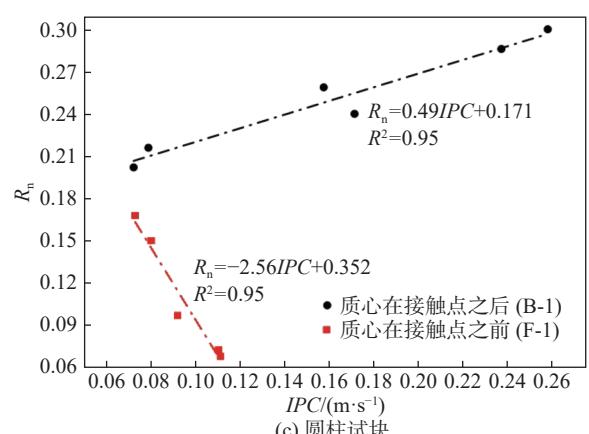
当质心在接触点之后时(B-1), 图 7 中三种不同形状试块的  $R_n$  值随着  $IPC$  值的增大呈现上升趋势, 且两者之间呈强线性相关关系 ( $R^2$  值分别为 1, 0.84 和 0.95)。该条件下,  $IPC$  对法向冲击速度起到一个增加的效果如图 6(a)所示,  $IPC$  越大,  $V_{ay}$  和法向冲击力越大, 使得  $R_n$  值也就越大。根据冲击动力学相关理论, 相同材料正碰的冲击力与接触速度为线性关系, 即  $F =$



(a) 正方体试块



(b) 圆盘试块

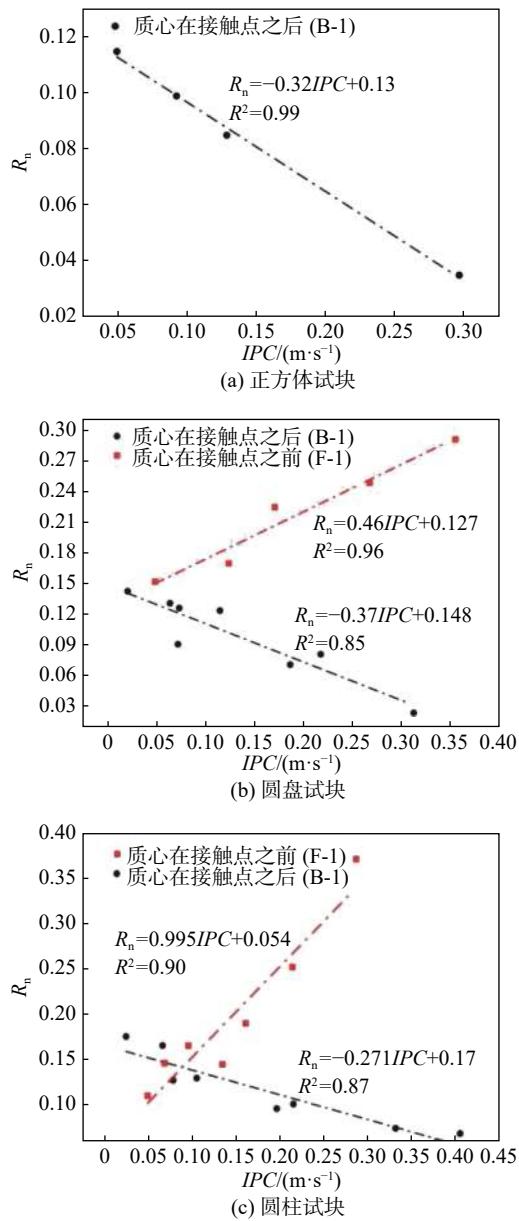


(c) 圆柱试块

图 7 正转试验中 I-1 类型试块  $IPC$  与  $R_n$  的关系Fig. 7 The relationship between  $IPC$  and  $R_n$  of I-1 type blocks in forward rotation test

$KV_t$  ( $K$  为系数,  $V_t$  为接触速度)<sup>[26]</sup>。本试验质心初始法向速度相同, 其增量  $IPC$  与法向冲击力变化量也应呈线性关系, 而法向冲击力又直接决定  $R_n$  的大小, 故  $IPC$  与  $R_n$  之间关系可能也具有线性特征。

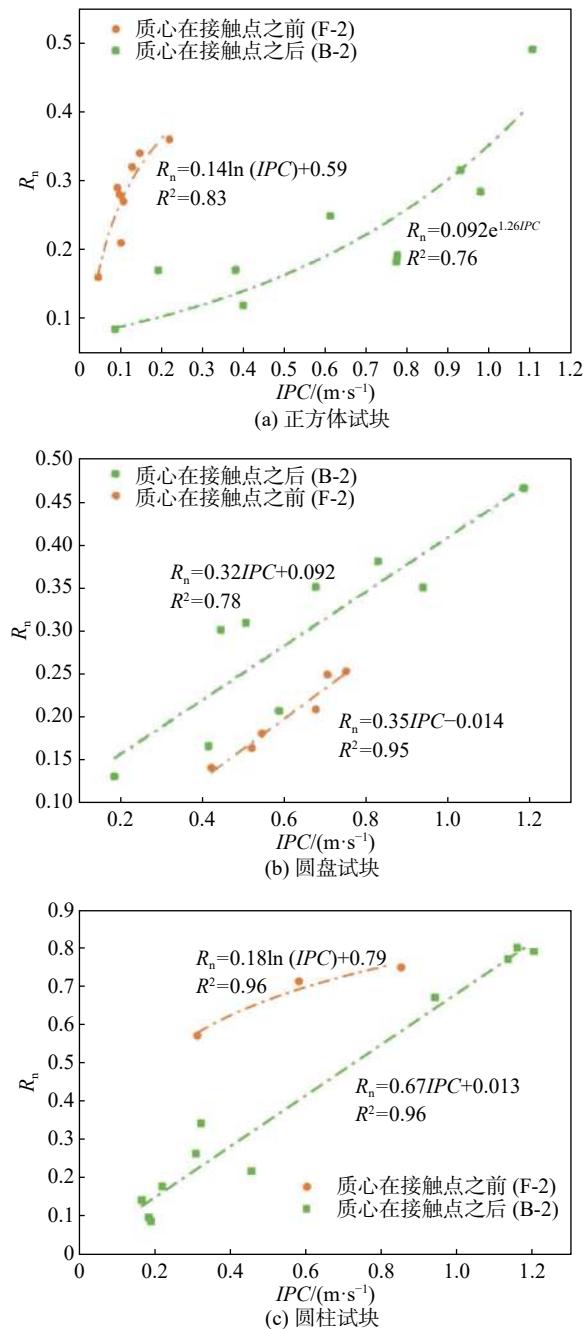
当质心在接触点之前(F-1), 正方体、圆盘和圆柱状试块的  $IPC$  值与  $R_n$  均呈强线性负相关关系,  $R^2$  值分别为 0.99, 0.99 和 0.95。该条件下  $IPC$  值对法向冲击速

图 8 反转试验中 I-1 类型试块 IPC 与  $R_n$  的关系Fig. 8 The relationship between IPC and  $R_n$  of I-1 type blocks in reverse rotation test

度起到一个减弱的效果,如图 6(b)所示。随着 IPC 的增大,  $V_{ay}$  逐渐减小,这样法向冲击力也减小,从而使得  $R_n$  值降低。两者之间存在线性关系的原因与 B-1 相类似。

此外,从图 7 中还可以看出 B-1 条件下 3 种形状试块的  $R_n$  值总是大于 F-1 条件下的  $R_n$  值,这主要是由于 B-1 条件下试块接触点的法向冲击速度一定大于 F-1 条件下试块接触点的冲击速度,前者的法向冲击力也一定大于后者。

## (2) 反转试验中 IPC 对 $R_n$ 的影响

图 9 正转试验中 I-2 类型试块 IPC 与  $R_n$  的关系Fig. 9 The relationship between IPC and  $R_n$  of I-2 type blocks in forward rotation test

反转试验中 IPC 与  $R_n$  的关系和正转试验正好相反(图 8)。B-1 条件下,3 种形状试块的  $R_n$  值随着 IPC 的增大而减小,且两者呈强线性相关,  $R^2$  值分别为 0.99, 0.85, 0.87, 该条件下 IPC 对法向冲击速度起到一个减弱的效果,如图 6(d)所示。F-1 条件下,圆盘和圆柱状试块  $R_n$  值则与 IPC 呈强线性正相关,  $R^2$  值分别为 0.96, 0.90, 该条件下 IPC 对法向冲击速度起到一个增加效果,如图 6(c)所示。相关的影响机理与正转试验相近似。

### 2.2.2 I-2类型试块IPC对 $R_n$ 的影响

#### (1) 正转试验中IPC对 $R_n$ 的影响

冲击瞬间,当试块与坡面之间的 $\theta$ 值小于临界角度值时,便会发生试块与坡面二次冲击后反弹的现象,其实质上是一次质心在接触点之前的冲击和一次质心在接触点之后的冲击联合作用的结果。从图9中可以看出,F-2和B-2条件下3种形状试块的 $R_n$ 值均随IPC的增大而增大。F-2条件下,正方体、圆盘和圆柱状试块的 $R_n$ 值与IPC分别呈指数函数和线性函数关系,且相关性良好, $R^2$ 值分别为0.76,0.78和0.96。B-2条件下,正方体、圆柱和圆盘状试块 $R_n$ 值与IPC则分别呈对数函数和线性函数关系,且皆为强相关, $R^2$ 值分别为0.83,0.96和0.95。

F-2条件下的试块,见图10(a)、图10(b),图中 $F_{N1}$ 表示第一次冲击时的法向冲击力, $F_{N2}$ 表示第二次冲击时的法向冲击力。虽然试块与坡面发生第一次冲击后的恢复系数 $R_{n1}$ ( $V_{n1}/V_n$ , $V_{n1}$ 为第一次冲击后或第二次冲击时质心的法向速度)随IPC的增大而减小(原理近似正转F-1),但通过对该工况下冲击过程的观测,第一次冲击的剧烈程度普遍显著小于第二次冲击(图11),第二次冲击后的恢复系数 $R_{n2}$ ( $V_n/V_{n1}$ )对 $R_n$ 值的大小明显起主导作用。当试块与坡面发生第一次冲击后,会使得试块的转速增大,即 $\omega_1 > \omega$ ( $\omega_1$ 为第一次冲击后或第二次冲击时试块的角速度);且第二次冲击时的 $\theta_1$ 值均略小于第一次冲击时的 $\theta$ 值,即 $D_1 > D$ ( $D_1$ 为第二次冲击时质心投影与接触点的距离)。这样,随着IPC的增大,第二次冲击时的 $\omega_1$ 、 $D_1$ 相应增加, $R_{n2}$ 也随之增大(原理近似正转B-1),最终使得 $R_n$ 值呈现上升趋势。

对于B-2条件下的试块,当其与坡面发生第一次冲击后, $R_{n1}$ 随着IPC的增大而增大,如图10(c)、图10(d)所示。原理近似正转B-1。然而,仅依赖于 $R_{n1}$ 尚不能确定IPC与 $R_n$ 的关系,最终 $R_n$ 随IPC的变化趋势还要联合考虑第二次冲击后的恢复系数 $R_{n2}$ 与IPC的关系来判定。由于冲击前后试块切向速度变化很小,可近似认为切向速度保持不变,可列第一次冲击前后能量守恒方程及动量方程如下:

$$\frac{1}{2}mV_n^2 + \frac{1}{2}mJ\omega^2 = \frac{1}{2}mV_{n1}^2 + \frac{1}{2}mJ\omega_1^2 + \Delta E \quad (6)$$

$$F_{N1} \cdot D \cdot t = J(\omega_1 + \omega) \quad (7)$$

$$F_{M1} \cdot t = m(V_n - V_{n1}) \quad (8)$$

式中: $m$ —试块质量;

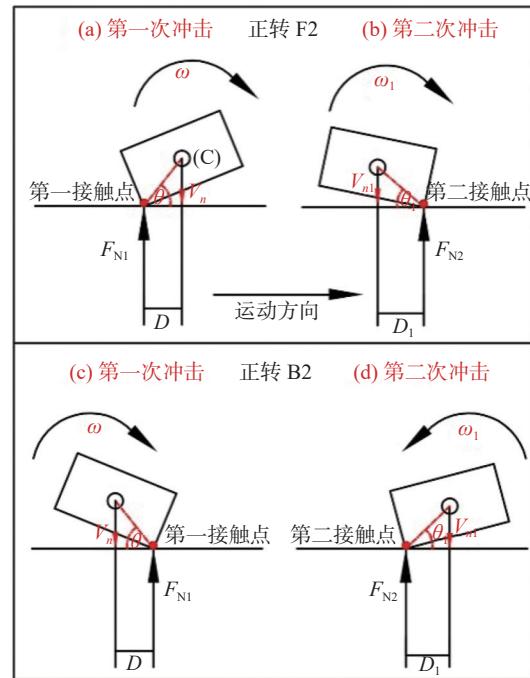


图10 正转试验I-2类型试块IPC对 $R_n$ 的影响示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the impact of IPC on  $R_n$  in forward transfer test I-2 type test block

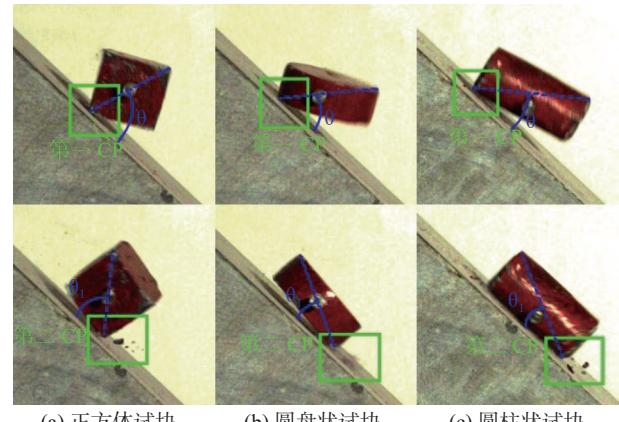


图11 正转试验F-2条件下试块对坡面第一次冲击与第二次冲击剧烈程度及接触角( $\theta$ ,  $\theta_1$ )对比

Fig. 11 Comparison of the intensity and contact angles ( $\theta$ ,  $\theta_1$ ) of the first impact and the second impact between the blocks and the slope under F-2 condition in forward rotation test

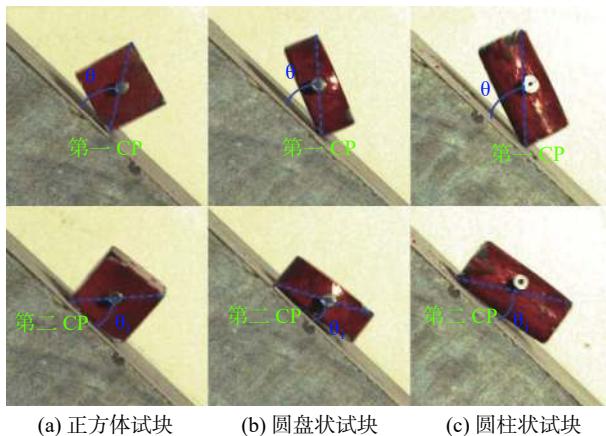
$J$ —试块绕质心的转动惯量;

$\Delta E$ —能量损失;

$F_{N1}$ —法向冲击力;

$t$ —冲击时间。

转速以顺时针方向为正; $V_{n1}$ 与 $V_n$ 方向一致(为正),均为向下,这与试验中观测到的现象相一致,如图12所示, $\theta$ 值均小于 $\theta_1$ 。

图 12 正转试验 B-2 条件下接触角 ( $\theta, \theta_1$ ) 对比Fig. 12 Comparison of contact angles ( $\theta, \theta_1$ ) under B-2 condition in forward rotation test

联合式(6)–(8)可得:

$$\begin{aligned} \frac{V_n + V_{n1}}{D} &= \frac{J(\omega_1 - \omega)(\omega_1 + \omega) + \Delta E}{J(\omega_1 + \omega)} \\ &= \underbrace{\frac{\Delta E}{J(\omega_1 + \omega)}}_{(1)} + \underbrace{(\omega_1 - \omega)}_{(2)} \end{aligned} \quad (9)$$

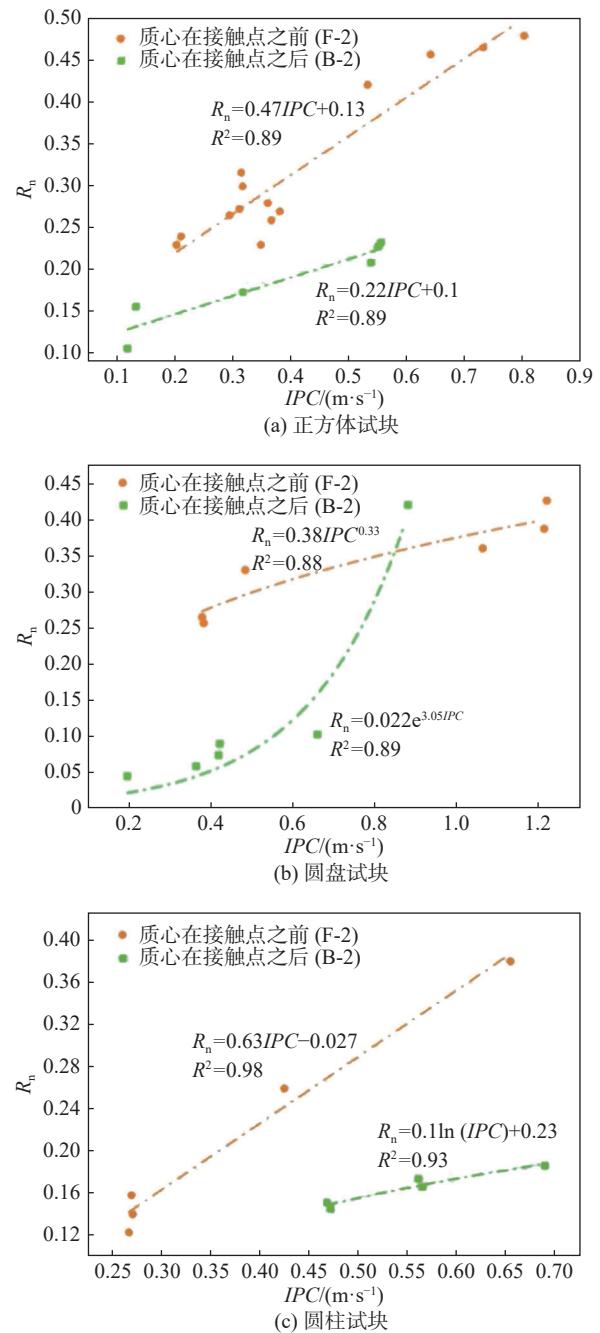
式(9)中  $\frac{V_n + V_{n1}}{D}$  为正, 而冲击过程中能量损失  $\Delta E$  相

对于总体能量较小, ①项在简化分析中可不予考虑, 由此可推得  $\omega_1$  和  $\omega$  相当或  $\omega_1$  大于  $\omega$ 。这样, 随着  $\omega$  增大  $\omega_1$  亦增大, 加之该工况下  $D$  均小于  $D_1$  (图 12), 使得  $R_{n2}$  随着  $\omega D$  的增大呈上升趋势(原理近似正转 B-1)。综合上述分析, 根据确定的  $R_{n1}, R_{n2}$  与  $IPC$  的关系可判定  $R_n = R_{n1} \cdot R_{n2}$  与  $IPC$  也呈正相关关系。

### (2) 反转试验中 $IPC$ 对 $R_n$ 的影响

与正转试验相类似, 反转试验中, 无论 F-2 还是 B-2 条件下三种形状试块  $R_n$  值均与  $IPC$  呈正相关, 且各自呈现某种清晰的变化趋势(图 13)。通过数据拟合, F-2 条件下, 正方体、圆柱和圆盘状试块  $R_n$  值与  $IPC$  分别呈线性函数和幂函数关系, 且  $R^2$  值分别为 0.89, 0.98 和 0.88, 均达到强相关; B-2 条件下, 正方体、圆盘和圆柱状试块  $R_n$  值与  $IPC$  分别呈良好的线性函数、指数函数和对数函数关系,  $R^2$  值分别为 0.89, 0.89 和 0.93。从本质上讲, 本试验中 B-2 条件下  $IPC$  对  $R_n$  的影响机理与正转试验 F-2 条件下  $IPC$  对  $R_n$  的影响机理是一致的, 而 F-2 条件下  $IPC$  对  $R_n$  的影响机理则与正转试验 B-2 条件下  $IPC$  对  $R_n$  的影响机理是一致的。

综合 2.2.1 和 2.2.2 节中的试验结论以及相关影响机理分析, 试块转速(包括正转和反转)对  $R_n$  的影响机理已基本明晰。当试块形状和冲击姿态固定时, 对于正

图 13 反转试验中 I-2 类型试块  $IPC$  与  $R_n$  的关系Fig. 13 The relationship between  $IPC$  and  $R_n$  of I-2 type test block in reverse test

转试验中 I-1 类型试块, B-1 和 F-1 条件下转速分别与  $R_n$  呈线性正相关和负相关关系, 对于反转试验, 情况则正好相反; 对于正转和反转试验中的 I-2 类型试块, 无论 B-2 或 F-2 条件, 各形状试块  $R_n$  均随转速增大呈上升趋势, 但相关关系并不一致。然而, 值得注意的是, 无论在室内或现场, 试块的冲击姿态在每次试验中均很难完全保持一致, 而且不规则落石冲击姿态的复杂多变正是实际落石冲击的基本特征, 单纯研究转速对  $R_n$  的影

响几乎是不可能的,也无实际意义。采用  $IPC$  量化转速对  $R_n$  的影响更具有现实意义。

需要说明的是,本研究虽然获得了 I-1 和 I-2 类型试块  $IPC$  与  $R_n$  的相关影响规律,但要实现这些规律的应用,还要确定是否会发生二次冲击,亦即二次冲击发生的条件。目前主要研究的是转速对  $R_n$  的影响,未来还将对此作进一步详细的测试和分析。

### 3 结论

(1) 正转试验中,当圆柱和圆盘状试块绕  $Y$  轴旋转与坡面冲击时,转速对  $R_n$  的影响较小,试块形状的影响则较为显著,且圆盘状试块  $R_n$  值明显高于圆柱状。当 3 种形状试块绕  $X$  轴旋转时,无论正转还是反转,未能发现转速与  $R_n$  之间存在直接相关关系。这并不代表转速对  $R_n$  无影响,只是难以单独直接影响。

(2) 综合考虑试块形状、转速和冲击姿态,引入一个关键变量——冲击姿态系数( $IPC$ ),并由此来量化转速对  $R_n$  的影响。

(3) 对试块冲击回弹特征展开分类探讨。对于 I-1 型,正转试验 B-1 条件下 3 种形状试块  $R_n$  与  $IPC$  呈线性正相关关系, F-1 条件下呈线性负相关关系;反转试验结果正好相反。对于 I-2 型,无论正转或反转, B-2 或 F-2 条件,每种形状的试块的  $R_n$  值均随  $IPC$  增加而增大,且两者呈强相关,但规律并不一致。

(4) 一定程度上解释了试块转速对  $R_n$  的影响机理,且这些获得的规律为转动异形落石冲击反弹过程的精细化预测提供了新的思路。

### 参考文献 (References) :

- [1] 傅锦福,张俊红,朱彬,等.边坡滚石运动轨迹分段循环算法 [J].*中国地质灾害与防治学报*,2011,22(4):96–101. [FENG Jinfu, ZHANG Junhong, ZHU Bin, et al. Segmented loop algorithm of theoretical calculation of trajectory of rockfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2011, 22(4): 96–101. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ASTERIOU P, SAROGLOU 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.
- [3] 贺凯,高杨,殷跃平,等.基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法 [J].*水文地质工程地质*,2020,47(4):82–89. [HE Kai, GAO Yang, YIN Yueping, et al. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 82–89. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 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)]
- [5] 李娟,何亮,荀晓慧.强震作用下崩塌滚石冲击耗能损伤演化分析 [J].*水文地质工程地质*,2022,49(2):157–163. [LI Juan, HE Liang, XUN Xiaohui. An evolution analysis of the impact energy damage of collapsed rolling stones under strong earthquakes [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 157–163. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙敬辉,石豫川.重庆甑子岩崩塌落石动力学特征及危险性分区 [J].*中国地质灾害与防治学报*,2019,30(3):6–11. [SUN Jinghui, SHI Yuchuan. Dynamics and hazard zoning of collapse and rockfall in Zengziyan, Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 6–11. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 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)]
- [8] 何宇航,裴向军,梁靖,等.基于Rockfall的危岩体危险范围预测及风险评价——以九寨沟景区悬沟危岩体为例 [J].*中国地质灾害与防治学报*,2020,31(4):24–33. [HE Yuhang, PEI Xiangjun, LIANG Jing, et al. Risk assessment and range prediction of dangerous rockmass based on rockfall: A case study of the Xuangou Collapse [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 24–33. (in Chinese with English abstract)]
- [9] BOURRIER F, BERGER F, TARDIF P, et al. Rockfall rebound: comparison of detailed field experiments and alternative modelling approaches [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(6): 656–665.
- [10] FERRARI F, GIANI G, APUANI T. Why can rockfall normal restitution coefficient be higher than one [J]. *Rend Online Soc Geol It*, 2013, 24: 122–124.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [ 13 ] JI Z M, CHEN Z J, NIU Q H, et al. A calculation model of the normal coefficient of restitution based on multi-factor interaction experiments [ J ]. *Landslides*, 2021, 18(4): 1531 – 1553.
- [ 14 ] 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) ]
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] ASTERIOU P, TSIAMBAOS G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction [ J ]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(3): 927 – 941.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] HEIDENREICH B. Small- and half scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes [ D ]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, 2004.
- [ 20 ] WYLLIE D C. Calibration of rock fall modeling parameters [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 67: 170 – 180.
- [ 21 ] ASTERIOU P, SAROGLOU H, TSIAMBAOS G. Rockfalls: influence of rock hardness on the trajectory of falling rock blocks [ J ]. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 2013, 47(4): 1684 – 1693.
- [ 22 ] 陈涛, 陈志坚, 孟子耀. 基于 Trajec 3D 的硬岩人工路堑边坡滚石运动范围预测 [ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(5): 37 – 41. [ CHEN Tao, CHEN Zhijian, MENG Ziyao. Movement prediction of falling boulders in artificial cutting slope of hard rock based on Trajec 3D [ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 37 – 41. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [ M ]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1994.