

• 复杂艰险山区重大工程与环境 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400605



本刊网刊

高位崩塌碰撞破碎能量转化机制模型试验研究

黄健,袁圆*,曾探,周琨,袁镜清,李靖恒

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059)

摘要:崩塌落石灾害作为山区常见的主要地质灾害类型,具有显著的突发性和随机性特征,且运动中的碰撞碎裂过程复杂,能量转化机制不明,易造成人员伤亡和财产损失。本文以落石碰撞碎裂现象为切入点,设计了灰岩相似材料法向碰撞试验,通过精细测量试样碰撞碎裂动力学参数,提取相应的能量大小,重点分析不同初始条件下试样碰撞碎裂过程中的能量转化问题。结果表明:碰撞碎裂过程具有明显的阶段性并存在碎裂程度差异。能量耗散主要包括弹塑性变形能与断裂能,占比可达 91.94%;剩余碎裂块体的动能仅占比 8.05%;能量转化率与初始总能量成负相关。定义基于弹性应变能的碎裂度量化指标,并对比不同材料试样的法向碰撞试验结果,发现落石碰撞碎裂具有一致性规律;进一步对比斜板碰撞试验,发现撞击角度对试样碎裂度影响较大,并且控制了能量的转化效率。上述结论可提升对崩塌落石灾害撞击碎裂过程中能量转化的认识水平,为治理方案设计提供支撑。

关键词:崩塌落石;法向碰撞;能量转化;破碎程度

中图分类号:TV139.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)01-0167-14

崩塌落石是山区常见的一种地质灾害,具有显著的突发性和破坏性。近年来,西南地区工程建设增多、强震与极端暴雨事件频发,诱发大量高位崩塌落石灾害(落差超过 100 m),造成较大规模的人员伤亡和经济损失^[1-3]。例如:2019 年,京昆高速姚河坝隧道出口 200 m 处在降雨影响下突发崩塌落石灾害,导致公路掩埋、桥梁垮塌;2019 年,成昆线埃岱站位置在抢险期间突发高位岩崩,瞬间掩埋坡脚的临时工棚,造成 24 人遇险、13 人死亡;2023 年,重庆奉节一辆行驶中的客运车遭碎石砸中,伤亡 15 人。高位崩塌落石运动过程伴随着落石的碰撞、碎裂与解体,块体的动力演化机制复杂,并且易造成更大范围的破坏^[4-6]。目前,学者们对崩塌落石运动过程中的碰撞碎裂现象关注较少,尤其是对破碎过程中的能量转化问题,尚未形成一个统一的认识。

根据对原型案例的调查统计,高位岩体受结构面切割、冻融循环等作用而具有明显碎裂化特征,一旦失稳,在首次坡面撞击过程中易发生沿结构面解体的

现象。当撞击动能足够大时,除上述解体过程外,完整块体同样会产生新的破裂面,形成较小粒径的岩石块体^[7]。高速碰撞碎裂的力学机理复杂,但可以明确的是,岩体碰撞碎裂是一个不断吸收外部荷载做功产生能量,又以不同形式将能量释放的过程^[8-9]。因此,研究落石撞击碎裂过程中的能量转化问题有助于分析崩塌动力破碎过程的能量转化难题^[10]。例如:De Blasio 等^[11]发现落石虽会通过空气阻力、震动波、声音传播、地面变形等方式耗散能量,但更多的是破碎耗能 with 碎块动能耗散,其中,破碎耗能占初始势能的 0.2%~18.0%,动能耗散占初始势能的 80.0%^[12]。Zhao 等^[13]通过数值模拟观察到落石在撞击前无能量消耗,撞击后动能急剧下降,90% 以上的初始能量用于摩擦和阻尼耗散,而碎裂过程中晶键断裂消耗的能量较小,破碎耗能仅占初始能量的 3.95%。为探索控制落石破碎程度的主要因素,吕庆等^[14]研发落石碰撞试验系统,分析破碎程度与岩石强度参数、碰撞速度、入射角度的关系,以及破碎效应对块体运动特征的影响。Asteriou

收稿日期:2024-08-01 修回日期:2024-11-27 网络出版日期:2024-11-28

基金项目:四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0264)

作者简介:黄健(1984—),男,教授.研究方向:地质灾害风险量化评价与监测预警. E-mail:huangjian2013@cdut.edu.cn

*通信作者:袁圆, E-mail:yuanyuan@alu.cdut.edu.cn

等^[15]通过试验证明了落石能量恢复系数与速度恢复系数存在相似变化规律,且坡度对恢复系数有显著影响。叶阳等^[16]对不同直径的大理岩球开展法向碰撞试验,利用黏弹性接触理论,分析尺寸、速度等因素对落石法向恢复系数的影响,以及落石损伤破坏模式特征。黄健等^[17]利用低强度、高脆性相似材料,开展高位崩塌动力碎裂过程物理模型试验研究,分析了崩塌动力碎裂主控因素、运动特征及归一化运动距离与碎裂度的量化关系。上述研究主要集中在落石动力破碎特征及其与运动距离的关系,对于撞击碎裂过程中能量转化的定量关系尚未涉及。考虑到高位崩塌因撞击碎裂产生的威胁范围会更大,故研究崩塌撞击碎裂过程的能量转化具有重要意义。

鉴于此,本文针对落石撞击碎裂能量转化问题,开展基于相似材料的球体法向碰撞碎裂试验。通过布设传感器测量碎裂块体的动力参数,量化不同能量组分的分配特征,揭示法向碰撞破碎过程中能量转化规律。在此基础上,提出基于弹性应变能的破碎程度量化指标,进一步系统分析控制碎裂程度的主控因素及其与能量转化间的量化关系,探索崩塌动

力碰撞碎裂过程中的能量转化机制,为高位崩塌落石动力碎裂条件下的威胁范围预测与减灾防灾工程设计提供支撑。

1 法向碰撞物理模型试验

1.1 相似材料

试验以贵州左家营崩塌灰岩为原型制作相似材料,具体参数见表1。经反复试验确定最优配比:重晶石与石英砂质量之比为7:3,重晶石、石英砂与石膏质量之比为30:1,羧甲基纤维素钠质量占比为2.5%,拌和水质量占比为24%。采用WHY-1000型号微机控制压力试验机的应变率(10^{-2} 、 5×10^{-3} 、 10^{-3} 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$),对“人”字形切槽巴西圆盘(CCNBD)试样加载至破坏,得到落石相似材料断裂韧度,结果见表2。

表1 原型与相似模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of prototype and rock-like models

材料类型	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗压强度 σ_{bc}/MPa	弹性模量/ GPa	泊松比 ν
原型	2.50~2.70	60.00~180.00	10.00~25.00	0.20~0.30
相似模型	2.50~2.70	0.20~0.60	0.03~0.08	0.20~0.30

表2 落石相似材料断裂韧度

Tab. 2 Fracture toughness of rock-like materials

试样编号	试样半径 R/mm	试样厚度 B/mm	无量纲厚度 α_B	初始“V”形缺口无量纲裂纹长度 α_0	最终“V”形缺口无量纲裂纹长度 α_1	破坏荷载 P_{\max}/kN	临界无量纲应力强度因子 Y_{\min}^*	断裂韧度 $K_{IC}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
C-1	34.9	30.3	0.869	0.229	0.725	0.430	0.935	0.050
C-2	34.9	30.1	0.863	0.229	0.725	0.530	0.936	0.062
C-3	35.1	29.9	0.854	0.228	0.721	0.710	0.930	0.083
C-4	35.0	30.3	0.866	0.229	0.723	0.590	0.932	0.069
C-5	34.9	30.0	0.852	0.229	0.725	0.820	0.937	0.097
C-6	35.2	30.1	0.855	0.227	0.719	1.130	0.926	0.131
C-7	35.3	29.9	0.859	0.227	0.717	0.560	0.922	0.065
C-8	34.8	30.2	0.868	0.230	0.727	0.680	0.938	0.080

1.2 法向碰撞试验

1.2.1 试验装置

试验装置如图1所示,主要包括试样自动释放装置、冲击测试装置、摄影装置、撞击板等,通过正方形桁架组合在一起。采用圆球状试样模拟落石,保证每次碰撞过程接触条件尽量统一。为避免释放过程中产生角速度而影响试验结果,设计了落石自动释放装置,如图1(d)所示,圆球固定组件与电磁铁形成三点支撑,以适应不同尺寸试样的固定需求。通过电流开关控制电磁铁,实现试样的法向自由落体运动,确保释放过程的精准性和一致性。释放装置由桁架固定至设计高度,在不同方位布设高清摄像装置,以240 fps帧率采集落石碰撞及破碎全过程。在撞击板与桁架侧

面布置黑色幕布便于后期处理分析图像数据。撞击板传感器布置如图1(e)所示,冲击力通过3个量程为100 kN的压力传感器采集,采样频率为10~100 kHz。传感器安装于正方形撞击板正中等边三角形顶点位置(底部由石板和砂组成找平层,确保传感器水平放置),并通过上下两层石板固定,另将加速度传感器(量程50g, g 为重力加速度)粘贴于撞击板正下方。

1.2.2 试验方案

针对落石碰撞碎裂行为,试验选取关键变量开展研究,包括碰撞速度(坠落高度分别取0.5、1.0、1.5、2.0 m)、落石尺寸(直径为60、80和100 mm)、撞击板材质(花岗岩板和45#钢板)。落石试样参数及撞击板材料参数分别见表3和4,落石试样和模具如图2所示。

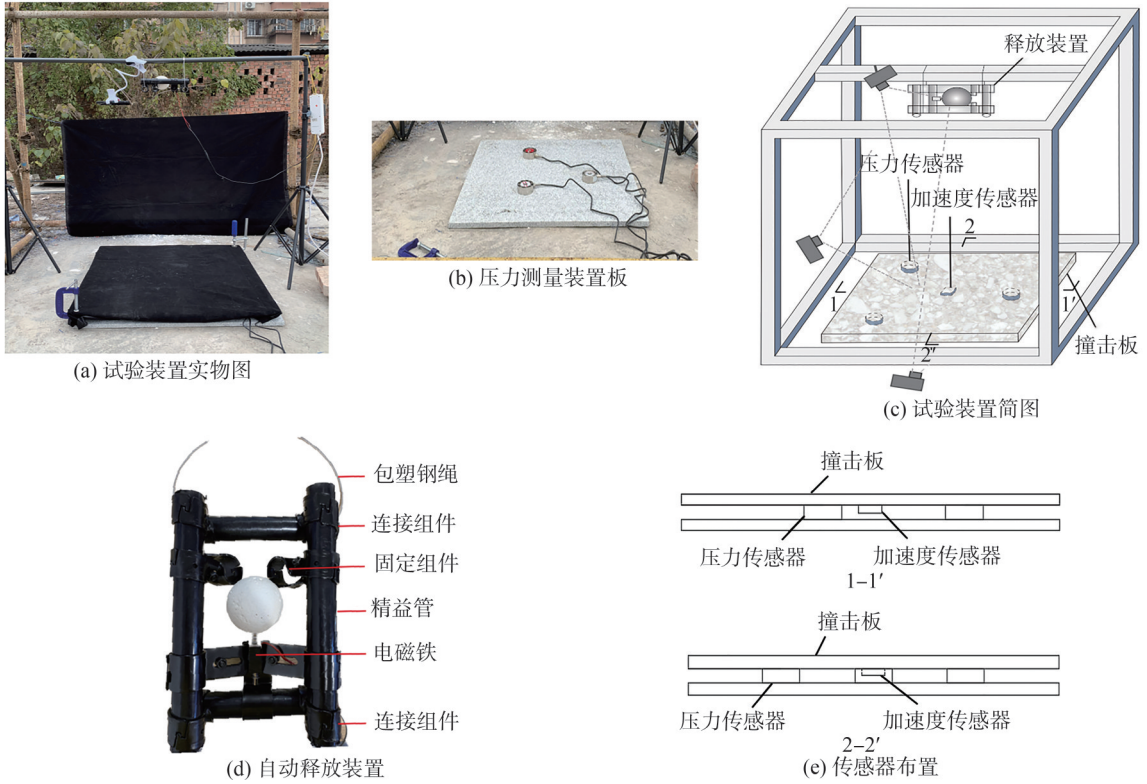


图 1 落石法向碰撞过程试验装置

Fig. 1 Experimental setup for the normal impact process of rockfall

表 3 落石试样参数

Tab. 3 Parameters of rockfall samples

密度 $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	抗压强度 σ_{bc} / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比 ν	断裂韧性 $K_{IC} / (\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$
2.510	0.438	70.642	0.221	0.114

表 4 撞击板材料参数

Tab. 4 Material parameters of the impact slab

板材名称	弹性模量/GPa	泊松比 ν	密度 $\rho / (\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
花岗岩板	31.00	0.20	2.71
45#钢板	210.00	0.31	7.85



图 2 法向碰撞试验落石试样和模具

Fig. 2 Rockfall specimens and molds for normal impact tests

试验采用控制变量法,具体方案见表 5,共设置 18 组落石法向碰撞试验,以研究落石法向碰撞过程的破碎特征及能量转化规律。

表 5 落石法向碰撞试验方案

Tab. 5 Rockfall normal impact test programmes

试验编号	坠落高度 / m	撞击速度 $v_{imp} / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	落石直径 D / mm	撞击板材质
D-1	0.50	3.13	60	花岗岩板
D-2	1.00	4.42	60	
D-3	1.50	5.42	60	
D-4	2.00	6.26	60	
D-5	0.50	3.13	80	
D-6	1.00	4.42	80	
D-7	1.50	5.42	80	
D-8	2.00	6.26	80	
D-9	0.50	3.13	100	
D-10	1.00	4.42	100	
D-11	1.50	5.42	100	
D-12	2.00	6.26	100	
E-1	0.50	3.13	80	钢板
E-2	1.00	4.42	80	
E-3	1.50	5.42	80	
E-4	2.00	6.26	80	
E-5	1.50	5.42	60	
E-6	1.50	5.42	100	

为获取不同撞击速度下,落石头试样产生的损伤和能量耗散,采用 Hertz 接触理论^[6],计算球板碰撞起裂速度 v_{ci} 和损伤速度 v_{cd} :

$$v_{ci} = 2.67 \times \left(\frac{\sigma_y^5}{\rho_1 E^4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$v_{cd} = 3.95 \times \left(\frac{\sigma_y^5}{\rho_1 E^4} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: σ_y 为屈服应力,假定 σ_y 等于圆球试样峰值应力^[18],根据相似材料断裂,起裂应力、损伤应力分别为峰值应力0.58、0.86倍,峰值应力取最大值0.503 MPa; ρ_1 为落石相似材料密度; E 为球板等效弹性模量,根据球的弹性模量 E_1 和泊松比 ν_1 、板的弹性模量 E_2 和泊松比 ν_2 计算。

计算得到撞击花岗岩板的 v_{ci} 、 v_{cd} 分别为 1.74×10^{-3} 、 2.59×10^{-3} m/s。撞击钢板时的 v_{ci} 、 v_{cd} 分别为 1.73×10^{-3} 、 2.57×10^{-3} m/s。 v_{ci} 、 v_{cd} 均小于试验方案中的最小撞击速度3.13 m/s。因此,落石试样在撞击过程中存在损伤和能量耗散。

2 落石动力破碎过程能量分配

落石法向碰撞碎裂过程模型试验总体满足能量守恒定律:

$$E_k^b = \Delta E_{tot} + E_k^a \quad (4)$$

式中, E_k^b 为试样碰撞前总动能, E_k^a 为试样碰撞后总动能(撞击破碎后为各碎裂块体动能累加), ΔE_{tot} 为撞击过程试样总损失能量。试验设计的试样自动释放装置极大程度地减少了旋转产生的影响,且Guccione等^[19]实测旋转产生的动能消耗占比极小,故试验仅考虑试样碰撞前后平动动能的变化。

试样碰撞破碎后总动能为:

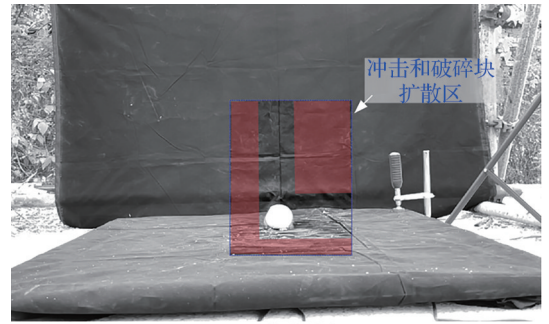
$$E_k^a = \sum_{i=1}^N E_{ki}^a = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (5)$$

式中: E_{ki}^a 为碰撞后第 i 个块体的动能; m_i 为碰撞后第 i 个块体的质量; v_i 为撞后第 i 个块体的平移速度,通过PIVlab分析图像中的示踪粒子(图3)获取。

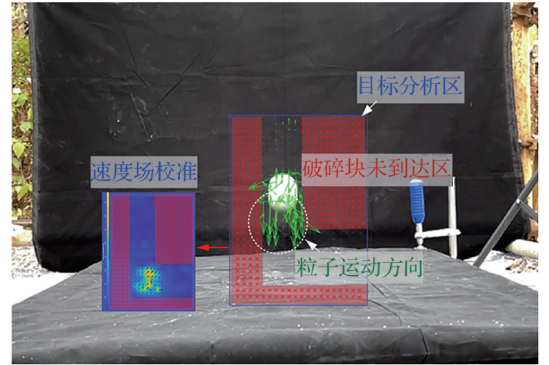
在落石圆球对撞击板的法向碰撞碎裂过程中,主要耗能包括落石试样的弹塑性变形耗能(ΔE_d)和撞击板的变形耗能(ΔE_{slab})、破碎耗能(ΔE_{fr})与撞击振动传播中的弹性波耗能(ΔE_w);其他的耗散能量,如空气阻力和声能等,可忽略不计。因此,在试验装置条件下,对总损失能量的计算如下:

1) 撞击板变形耗能

考虑到撞击板相较于圆球试样刚度更大,假设根据加速度传感器获取的撞击板中心最大垂直位移 z_{max}



(a) 图像前分析



(b) 速度场分析标定

图3 PIVlab图像处理

Fig. 3 Processing of PIVlab Image

中,无撞击板弯曲造成的变形^[20],则碰撞过程中撞击板的变形耗能(ΔE_{slab})为:

$$\Delta E_{slab} = \frac{1}{2} F_T z_{max} \quad (6)$$

式中, F_T 为落石碰撞撞击板的传递力,即3个压力传感器采集的合力。

试验布设的压力测量装置(图1(b))是一个质量-弹簧-阻尼模型,如图4所示。

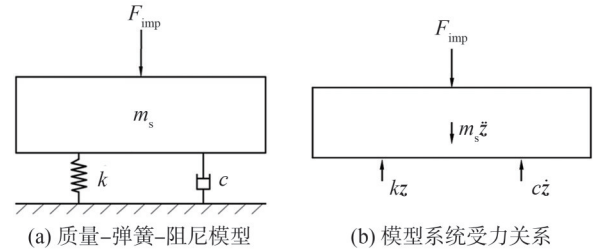


图4 质量-弹簧-阻尼模型及受力分析^[21]

Fig. 4 Model and force analysis of the mass-spring-damper system^[21]

该系统为单自由度系统,其运动方程为:

$$m_s \ddot{z} + c \dot{z} + kz = F \quad (7)$$

式中: m_s 为撞击板质量; c 为系统黏滞阻尼系数; k 为系统刚度,可通过试验所测得的最大支座反力总和 F_T 及相应最大位移 z_{max} (由加速度传感器获取的加速度积分得到)计算获取,计算可得花岗岩板和钢板系统刚度 k 分别为 2.877×10^8 N/m、 6.534×10^8 N/m(图5); \ddot{z} 、 \dot{z} 、 z 分别为撞击板加速度、速度、位移; F 为落石圆球施加

的实际冲击力 F_{imp} 。

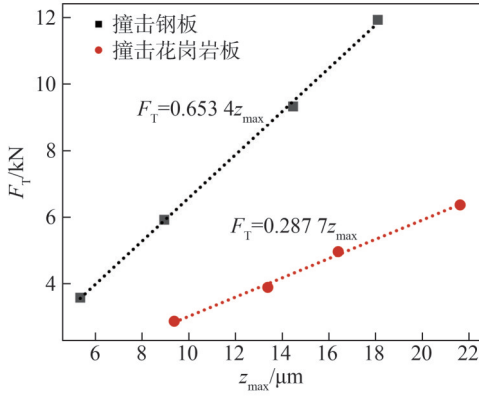


图5 系统刚度计算结果(圆球直径 80 mm)

Fig. 5 Calculation results of system stiffness (spherical specimen diameter 80 mm)

由图4可以看出,撞击板底部反力之和与支座反力总和 F_T 相等,即:

$$F_T = cz + kz \quad (8)$$

定义支座反力总和 F_T 与冲击力之比为力的传递率^[21],即结构动力学中的隔振系数,计算公式为:

$$\frac{|F_T|}{|F_{\text{imp}}|} = \sqrt{\frac{1 + (2\beta\Omega)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + (2\beta\Omega)^2}} \quad (9)$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{f_d}{f_n}\right)^2} \quad (10)$$

$$\Omega = \frac{f}{f_n} \quad (11)$$

式(9)~(11)中: β 为阻尼比; Ω 为频率比; β 、 Ω 可根据结构动力学,由 f 、 f_d 、 f_n 得到; f 为冲击力频率,在装置调试阶段由压力传感器测量直接冲击持续时间(Δt_{imp})计算得到; f_d 为系统有阻尼时的固有频率,通过由撞击板底部压力传感器获取的冲击时间(Δt_T)计算得到; f_n 为系统无阻尼时的固有频率,由系统刚度 k 和撞击板质量 m_s 计算得到。 f 、 f_d 、 f_n 的具体计算方法为:

$$f = \frac{2\pi}{2\Delta t_{\text{imp}}} \quad (12)$$

$$f_d = \frac{2\pi}{2\Delta t_T} \quad (13)$$

$$f_n = \sqrt{\frac{k}{m_s}} \quad (14)$$

冲量 J 根据冲击力和冲击时间 t 得到:

$$J = \int_0^{\Delta t} F_{\text{imp}} dt \quad (15)$$

本文将冲击力-冲击时间曲线近似为一个三角形面积,因此冲量计算公式可简化为式(16),即由最大的冲击力 $F_{\text{imp,max}}$ 和 Δt_{imp} 得到:

$$J = \frac{1}{2} F_{\text{imp,max}} \Delta t_{\text{imp}} \quad (16)$$

2) 试样变形耗能

落石试样局部弹塑性变形中的能量损失 (ΔE_d) 可由下式计算:

$$\Delta E_d = E_k^b (1 - CoR_{\text{theo}}^2) \quad (17)$$

式中, CoR_{theo} 为一个理想弹性-塑性球体撞击平面时的恢复系数^[22],计算公式如下:

$$CoR_{\text{theo}} = \frac{v_y}{v_{\text{imp}}} \left(\frac{8}{5} \left(\frac{v_{\text{imp}}}{v_y} \right)^2 - \frac{3}{5} \right)^{\frac{3}{8}} \quad (18)$$

$$v_y = \left(\left(\frac{4}{5} \pi \right) \left(\frac{3}{4} \pi \right)^4 \left(\frac{\vartheta_y \sigma_y}{\tilde{E}} \right)^4 \left(\frac{\vartheta_y \sigma_y \tilde{R}^3}{m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

式(18)、(19)中: v_y 为试样屈服速度,根据试样屈服应力 σ_y 获取^[19]; m 为试样质量; ϑ_y 为平均压痕应力与屈服应力比值,取为 1.61^[23]; \tilde{E} 为等效弹性模量; \tilde{R} 为等效半径。 \tilde{E} 和 \tilde{R} 的计算公式为:

$$\frac{1}{\tilde{E}} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\tilde{R}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (21)$$

式(20)~(21)中: R_1 、 R_2 分别为落石试样和平板的半径,由于 R_2 远大于 R_1 ,故 $R_2 \rightarrow \infty$,则 \tilde{R} 取 R_1 ; E_3 为系统弹性模量,可通过试算获取。

对于完整未碎裂试样,根据能量守恒,撞击过程中能量损失 ΔE_{tot} 主要包括 ΔE_d 和 ΔE_{slab} ,则能量转化公式(4)可改写为:

$$E_k^b = \Delta E_{\text{slab}} + \Delta E_d + E_k^a \quad (22)$$

ΔE_d 可表示为:

$$\Delta E_d = E_k^b - \Delta E_{\text{slab}} - E_k^a \quad (23)$$

$$\Delta E_d = E_k^b \left(1 - \frac{\Delta E_{\text{slab}} + E_k^a}{E_k^b} \right) \quad (24)$$

$$CoR_{\text{exp}}^2 = \frac{\Delta E_{\text{slab}} + E_k^a}{E_k^b} \quad (25)$$

式中, CoR_{exp} 为由落石法向碰撞试验得到恢复系数。调整 E_3 使得当 CoR_{exp} 和 CoR_{theo} 曲线拟合优度最高时,所得到的 E_3 即为系统弹性模量。据此可得出试验试样撞击花岗岩板和钢板的 E_3 分别为 0.050 与 0.112 GPa。

3) 破碎耗能

法向碰撞试验落石破碎过程产生的破碎耗能 ΔE_{fr} 可由下式计算:

$$\Delta E_{\text{fr}} = \gamma \sum_{j=1}^n A_j \quad (26)$$

$$\gamma = \frac{K_{IC}^2(1-\nu_1^2)}{E_1} \quad (27)$$

式(26)、(27)中: A_j 为第 j 个碎块的新增表面积, 未碎裂试样采用新增裂纹面积计算; n 为产生的碎块总数; γ 为单位面积表面能。对动态应变率下的落石法向碰撞试验, 采用准静态应变率下的断裂韧度可能导致所计算的破碎耗能偏小, 受限于试验条件, 采用

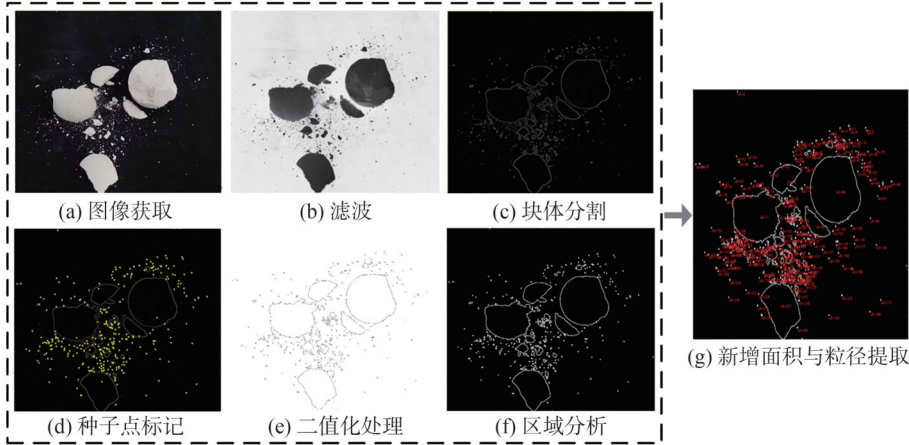


图 6 ImagePy 图像识别提取

Fig. 6 ImagePy image recognition extraction

4) 弹性波耗能

对于球板碰撞试验, 假设落石试样可在接触点周围产生弹性应力场^[19], 且弹性波沿径向传播, 则弹性波在传播过程中的能量损失 ΔE_w 为:

$$\Delta E_w = E_k^b (1 - CoR_w^2) \quad (28)$$

$$CoR_w = \frac{1 - 0.88\lambda}{1 + 0.88\lambda} \quad (29)$$

式(28)、(29)中, ΔE_w 为弹性波耗能, CoR_w 为弹性波传播的恢复系数, λ 为非弹性参数。可知, 影响球板碰撞弹性波耗能的主要参数为非弹性参数 λ , 根据弹性波影响范围和碰撞板材料参数, 得到非弹性参数 λ ^[10]:

$$\lambda = \frac{\pi^{3/5}}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{R_1}{h_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{v_{imp}}{v_p}\right)^{1/5} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{E_1/(1-\nu_1^2)}{E_1/(1-\nu_1^2) + E_3/(1-\nu_2^2)}\right)^{2/5} \quad (30)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{E_3}{\rho_2(1-\nu_2^2)}} \quad (31)$$

式中: ρ_2 为撞击板密度; h_s 为撞击板厚度; v_p 为撞击板中的纵波波速, 通过 E_3, ρ_2, ν_2 获得。

3 结果分析

3.1 动力破碎过程

3.1.1 冲击力与冲量

在法向碰撞试验中, 所有的冲击持续时间都很短

CCNBD 试验最大平均断裂韧度 $0.114 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 计算。

通过正面拍摄落石法向碰撞试验结果, 采用 ImagePy 图像识别, 提取碎块粒径与新增面积, 如图 6 所示。利用灰度处理、高斯滤波去除图像杂点, 避免不同色斑造成识别误差。采用 Sobel 滤波获取块体轮廓边界, 根据图像中参照物尺寸与像素间的关系, 标定图像尺寸比例, 从而精准获取碎裂块体粒径^[17]。

(<0.01 s), 不同落石尺寸和下落高度的试验结果差异较小; 随着冲击速度的增加, 冲击持续时间呈轻微变短的趋势(图 7)。图 8 为冲击速度与隔振系数的关系, 可知隔振系数整体波动较小, 撞击板系统隔振系数分别为 $0.574\sim 0.670$ (花岗岩板)、 $0.477\sim 0.524$ (钢板), 主要受到撞击板刚度和质量的影响。

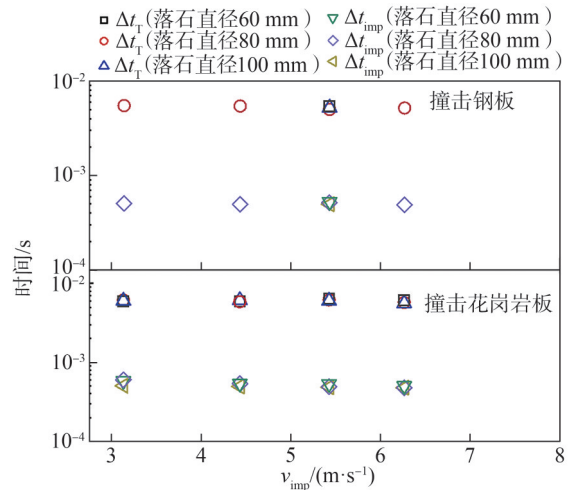


图 7 冲击持续时间与冲击速度关系

Fig. 7 Relationship between impact duration and impact velocity

根据冲击持续时间间接估算出冲击力和冲量, 如图 9 所示。由图 9 可知, 随着冲击速度的增加, 冲击力和冲量也随之增加。对于落石直径和落高相同的情况, 钢板所受的冲击力和冲量大于花岗岩板。基于弹

性接触理论,冲击板的弹性模量对接触冲击力有一定影响。因此,弹性模量越高(钢板),冲击力越大。在相同尺寸试样的条件下,随着冲击速度的增加,冲击力和冲量的增长率逐渐增大。同时,对于不同尺寸的试样,在相同落高条件下,冲击力和冲量的差值也逐渐增大。

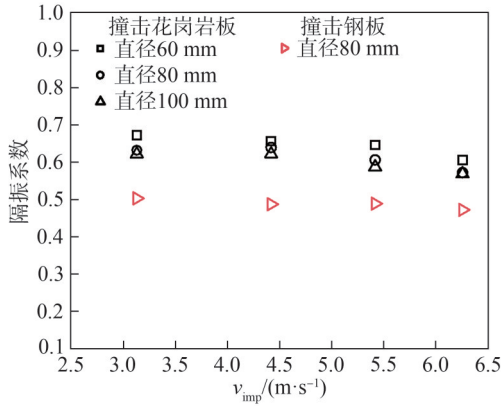
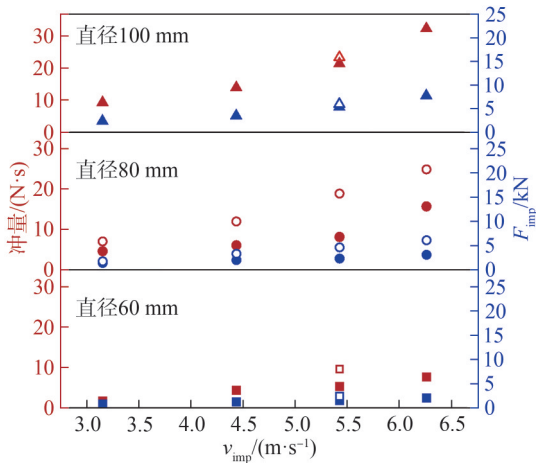


图 8 冲击速度与隔振系数关系

Fig. 8 Relationship between impact velocities and vibration isolation coefficients



注:实心图形表示撞击花岗岩板,空心图形表示撞击钢板;红色图形表示冲量,蓝色图形表示冲击力。

图 9 撞击速度与冲击力及冲量关系

Fig. 9 Relationship between impact velocity and impact force/impulse

3.1.2 动力破碎特征

通过高速摄像机观察不同碰撞速度、不同尺寸落石试样的动力破碎过程,并结合现有研究分析,如图 10 所示。由图 10 可知:直径 60 mm 的圆球在 0.5 m 坠落高度下撞击花岗岩板,圆球表面无宏观裂纹,但存在塑性变形;当坠落高度为 1.0~2.0 m 时,试样虽未碎裂,但随着坠落高度增加,试样表面宏观裂纹径向贯通,塑性变形增大,试样损伤程度增大。

由图 10 还可以看出:直径 80 mm 的圆球在 0.5 m 坠落高度下撞击花岗岩板,球板碰撞接触区表面形成

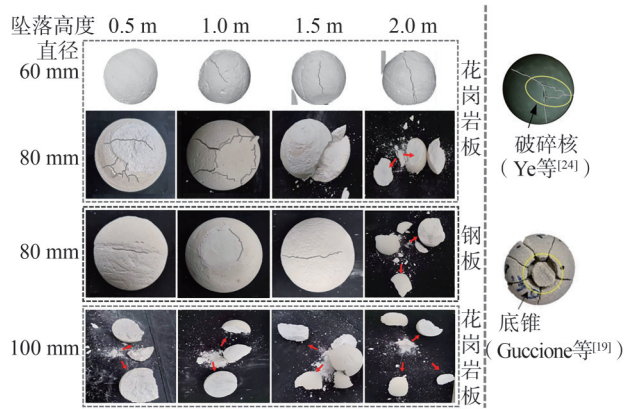


图 10 落石试样法向碰撞破碎过程

Fig. 10 Normal impact fragmentation process of rockfalls

网状裂纹;随着坠落高度增加至 1.0 m,碰撞接触区出现环状裂纹,并沿损伤区径向扩展出宏观裂纹,但试样未碎裂;在 1.5~2.0 m 坠落高度下,试样均碎裂成 3 部分;在 2.0 m 高度坠落时,圆球破碎。直径 80 mm 的圆球在 0.5~1.5 m 坠落高度下撞击钢板的破裂形态与其撞击花岗岩板的破碎形态相似;随着坠落高度增加,裂纹长度不断增大。

直径为 100 mm 的圆球撞击花岗岩板时,随着坠落高度增大,碎裂块体数量也随之增多。在圆球法向碰撞过程中,裂纹从碰撞接触区域开始沿径向扩展,且在接触区形成一个锥形块体。裂纹贯通后,碎裂块体开始围绕底锥呈张开状向外运动。

由试样不同角度的法向碰撞破碎过程可以发现:在较高的冲击速度下,产生的碎片越来越多,破碎成小于 4 个大碎片和若干小碎片;随着冲击速度的增加(冲击能量增加),破碎机制发生变化(不同能量耗散机制),对宏观裂纹的逐渐扩展有一定的影响,大碎片的尺寸逐渐减小,额外的破碎和局部损伤进一步生成小碎片。

综上,试样法向碰撞破碎过程表现出 4 种典型特征:①试样仅有塑性变形,无宏观裂纹(如直径 60 mm、坠落高度 0.5 m 工况);②试样出现塑性变形,表面有宏观裂纹,但裂纹未贯通,圆球整体保持稳定;③裂纹沿径向扩展且贯通,试样呈劈裂破坏;④在碰撞接触区域,试样形成环状裂纹且沿径向扩展,贯通球体,导致试样呈张拉破坏,碰撞接触区底部出现锥形块体,同时产生向四周飞散的小粒径块体。对于动力破碎过程中出现的锥形块体, Ye 等^[24]在进行多次大理岩球法向碰撞后发现,大理岩通常会劈裂成 2~3 块,并在接触损伤区产生一个破碎核,这是脆性材料法向碰撞破碎的共性特征之一。Guccione 等^[19]通过混凝土圆球法向碰撞试验指出,锥形块体通常会停留在撞击点,而不会在碰撞过程中随着材料的动力破裂而移动。

对不同时间 t 时顶部摄像机捕获的圆球(直径

100 mm, 坠落高度 2.0 m) 法向撞击破裂图像进行粒子图像测速 (PIV) 处理^[17], 获得落石试样法向碰撞破裂扩散过程如图 11 所示, 进一步精确分析其进入破裂扩散阶段后的平面运动。由图 11 可知, 碰撞破裂时, 径向宏观裂纹将圆球劈裂成橘子状碎片, 橘子状碎片进一步压缩导致碎片再次破碎。圆球的损伤破碎模式与裂

纹数密切相关, 径向宏观裂纹的产生导致裂纹数显著增加。碰撞破碎过程中生成高速碎片, 速度云图上方两个大块体的速度明显高于下方两个破碎块体, 碰撞后接触区小碎片脱离大块体, 高速碎片以小碎片为主。这些高速小碎片即由高环向拉应变率导致的环向“胀爆”效应^[25]。

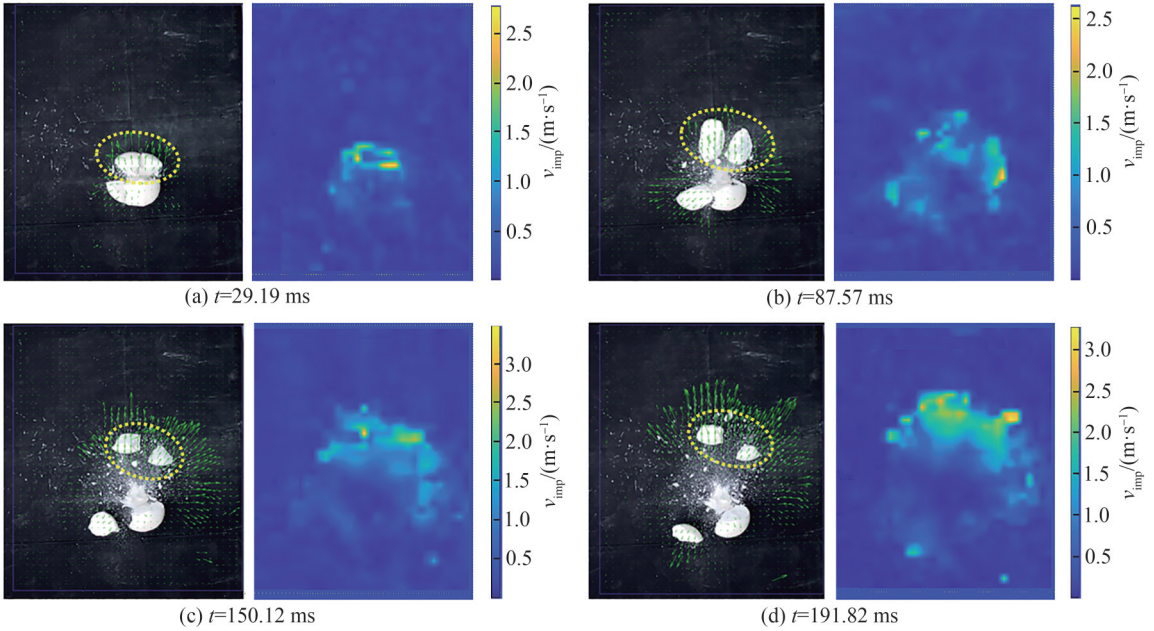


图 11 落石法向碰撞破裂扩散过程(直径 100 mm, 坠落高度 2.0 m)

Fig. 11 Rockfall normal impact fragmentation diffusion process (diameter 100 mm, fall height 2.0 m)

3.2 破碎过程各能量转化占比

根据第 2 节落石法向碰撞碎裂过程能量计算方法, 得到各能量与撞前动能 (E_k^b) 的比例关系, 分析落石法向碰撞碎裂过程能量转化的定量关系, 见图 12。

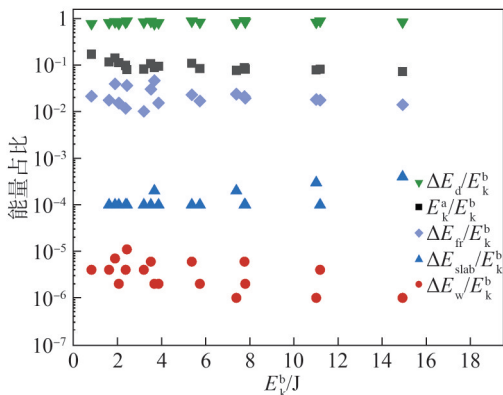


图 12 法向碰撞破碎各能量占比分布

Fig. 12 Distribution of energy proportions in normal impact fragmentation

由图 12 可知, 碰撞破碎后的撞后动能占比随着撞前动能的增加逐渐减小。但由于试验条件限制, 试样形成较多小碎块, 未能全部统计, 导致数据呈现出上下波动特征。试样法向撞击花岗岩板与钢板的撞后动能占比分别为 7.32%~17.24% 和 8.05%~14.34%。尽

管撞后动能 E_k^a 随 E_k^b 增大而增大, 但其占比有略微降低, 这与 Guccione 等^[19]采用混凝土圆球试样法向撞击混凝土板的试验结果一致。

球体变形损失的能量 (ΔE_d) 是冲击过程中最大的能量损失, 当撞击板为钢板时, 能量占比 (85%~91%) 高于撞击板为花岗岩板时的能量占比 (78%~85%), 且随着撞前动能增大而增大。碎片中破碎耗能的损失取决于球体的直径和强度, 但其占比基本不变, 变化范围为 1.02%~4.67%; 由图 12 可见, 破碎耗能占比 ($\Delta E_{fr}/E_k^b$) 随撞前动能增加呈现微弱减小的趋势。

弹性波耗能 (ΔE_w) 始终维持在较低水平 (0.000 1%~0.001 1%), 法向碰撞过程仅有少量 E_k^b 转化为 ΔE_w 。在法向碰撞破碎过程中, 撞击板变形能 (ΔE_{slab}) 同样较小, 占 E_k^b 的 0.01%~0.04%。值得注意的是, 不同直径圆球在撞击过程中的能量损失随撞击速度增加而增大, 但其归一化能量占比变化不大; 其中, 碎裂能与撞前动能的比值基本保持恒定, 这与 Giacomini 等^[26]利用天然岩石开展的原位试验结果一致。

3.3 破碎过程能量转化机制

为研究落石动力破碎过程中的能量转化机制, 引入落石破碎度与能量转化率两个指标, 分别用于表示

撞击过程中试样的破碎程度与能量转化占比的量化特征。通过试验数据,系统分析破碎度、能量转化率与碰撞速度、碰撞角度之间的关系。

3.3.1 破碎程度量化

通过对落石法向碰撞破碎能量转化进行分析,可知撞击碎块过程中的弹性应变能释放对碎裂程度有较大影响^[27]。在碰撞初始阶段,大量弹性应变能储存于试样内部;与撞击板接触一段时间后,受冲击力持续作用,当岩石内部储存的弹性应变能突破储能极限时,弹性应变能突然释放,造成试样碎裂^[28]。因此,定义基于弹性应变能释放量的破碎程度量化指标 B :

$$B = \frac{E_c - E_{cE}}{E_c} \quad (32)$$

式中, E_c 为弹性应变能极限, E_{cE} 为残余应力点的弹性应变能。

考虑到试验条件难以获取 E_c , 根据能量守恒定律可以得出落石碰撞过程块体储存的弹性应变能极限 E_c 为初始能量 E_0 与耗散能 E_h 之差:

$$E_c = E_0 - E_h \quad (33)$$

式中, E_0 也即为撞前动能 E_k^b 。

落石在碰撞破碎过程中,能量以声音、热量、接触材料变形及破碎等形式耗散,残余的弹性应变能则转换为碎裂块体的动能 $E_k^{a[11]}$, 即:

$$E_{cE} = E_k^a \quad (34)$$

由于落石碰撞破碎过程中声音、热量等消耗能量较小,可忽略不计,则

$$E_h = \Delta E_w + \Delta E_{slab} \quad (35)$$

将式(33)~(35)代入到式(32),可得落石法向碰撞破碎程度量化指标 B :

$$B = \frac{E_k^b - (\Delta E_w + \Delta E_{slab}) - E_k^a}{E_k^b - (\Delta E_w + \Delta E_{slab})} \quad (36)$$

为验证该指标的合理性,选取常见的质量比法(量化指标 B_1 ^[29]、 B_2 ^[30])、表面积比法(量化指标 B_3)估算岩石破碎程度指标,如(37)~(39)所示:

$$B_1 = \frac{m}{m_{max}} \quad (37)$$

$$B_2 = \frac{m - m_{max}}{m} \quad (38)$$

$$B_3 = \frac{S_a}{S_b} \quad (39)$$

式(37)~(39)中, m_{max} 为最大碎块质量, S_b 、 S_a 为试验前后试样表面积(利用 ImagePy 识别提取碎片粒径表面积^[19])。

3.3.2 不同碰撞速度下的破碎度

以直径 100 mm 落石试样撞击花岗岩板和 80 mm 落石试样撞击钢板为例,对定义的落石法向碰撞破碎

程度量化指标(B_1 、 B_2)进行归一化处理(式(40)),得到不同撞击速度下破碎程度的对应关系,如图 13 所示。

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (40)$$

式中, x' 为破碎度归一化量值, x_{min} 为破碎程度最小值, x_{max} 为破碎程度最大值, x 为破碎程度试验结果。

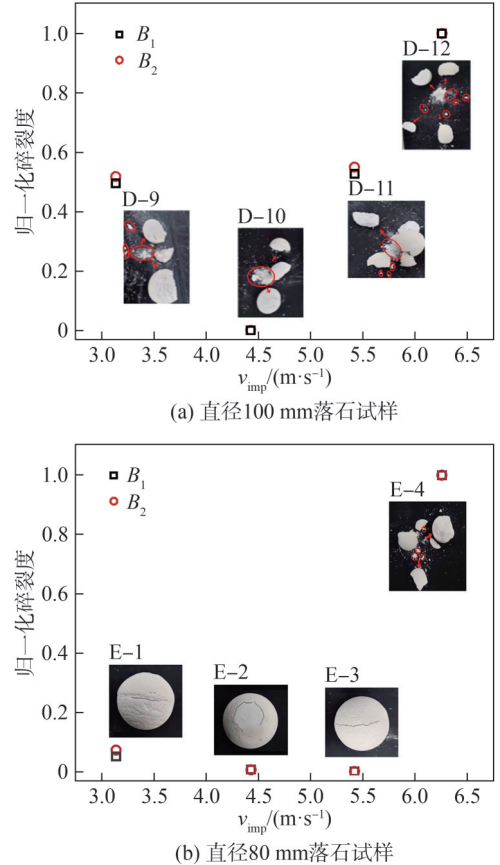


图 13 不同撞击速度下落石法向碰撞碎裂程度关系(B_1 和 B_2)

Fig. 13 Normal-impact fragmentation degree of rockfall under different impact velocities (B_1 and B_2)

由图 13 可知,撞击速度与落石法向碰撞归一化破碎程度总体呈正相关。图 13(a)中的 D-10 试样撞击破碎后仍有完整的半球未破裂,碎块最大质量增大,归一化后导致破碎值较小,接近于 0;图 13(b)中的 E-1、E-2 和 E-3 试样由于未发生破碎,归一化破碎度接近于 0,且有逐渐减小的趋势。可见,采用质量比法定义破碎程度,能反映不同工况下落石法向碰撞碎裂的变化趋势,但对于出现宏观裂纹但未碎裂的试样(E-1、E-2 和 E-3),该方法无法很好地评价其破碎程度。

同样地,将试验结果归一化为破碎程度指标 B ,并通过 ImagePy 软件识别提取新增表面积,结果如图 14 所示(图中百分比为新增裂纹面积占比)。进一步归一化为破碎度指标 B_3 ,并与文献[19]对比,结果见图 15,可知不同撞击速度下落石破碎程度的变化趋势相似。

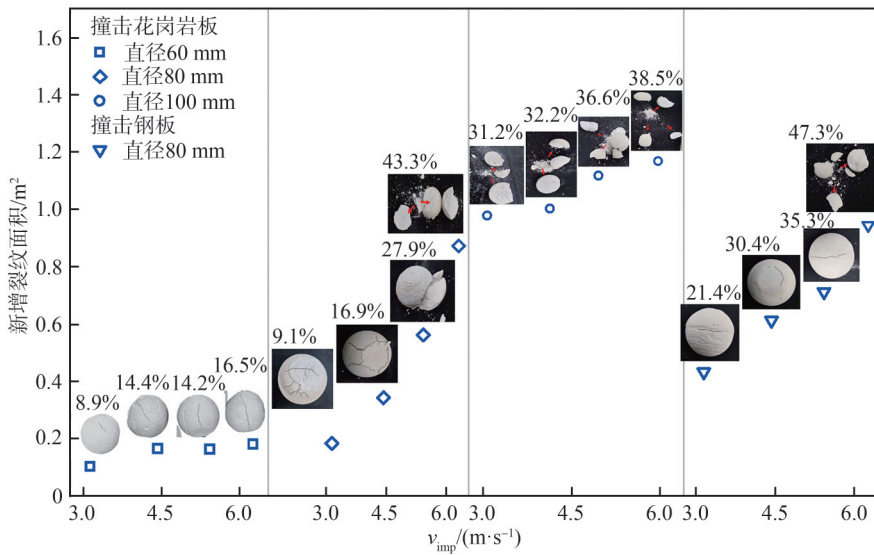
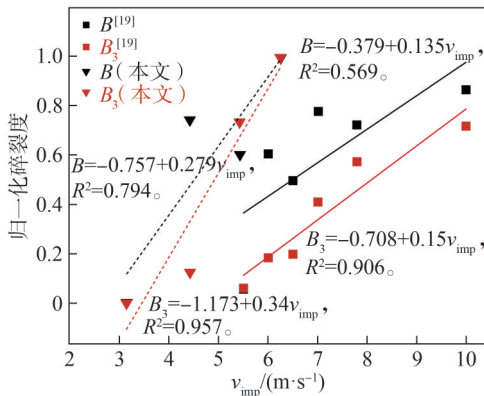
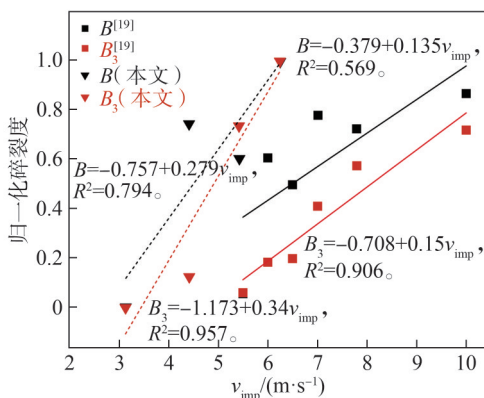


图 14 不同撞击速度下落石法向碰撞新增裂纹面积及面积占比

Fig. 14 Area and proportion of newly formed cracks in normal-impact fragmentation of rockfall at different impact velocities



(a) 80 mm 落石相似材料、75 mm 圆球混凝土材料



(b) 100 mm 落石相似材料、100 mm 圆球混凝土材料

图 15 不同撞击速度下落石法向碰撞破碎程度关系(B 和 B_3)

Fig. 15 Normal-impact fragmentation degree of rockfall under different impact velocities (B and B_3)

因此,上述指标适用于评价法向碰撞时试验落石的破碎程度。随着撞击速度的增加,裂隙扩展速率加快,表面积增加,破碎程度显著增加。对比 Guccione 等^[19]混凝土法向碰撞试验结果,本文提出的基于弹性

应变能释放量的破碎程度量化指标在规律趋势上与其保持一致。如图 15 所示,直径 75、100 mm 的混凝土材料圆球,破碎程度 B 、 B_3 变化趋势接近一致。可知,撞击速度(坠落高度)的增大导致由初始势能转换的冲击能量增大,影响撞击碎裂过程中能量耗散,其数值增加,对后续动力破碎特征影响也增大。这意味着高位高能的崩塌体撞击碎裂后,碎片尺寸会逐渐减小,额外的破碎和局部损伤产生小碎片。同时,根据试验与原型调查分析发现,部分远离撞击点的碎裂小块体反而具有极高的动能特征,表现出抛射特征。当前主流认识是,在碰撞碎裂过程中,远离撞击点且位于块体边缘的碎块,因获得坡面地震波反射的附加能而动能增大。

3.3.3 破碎程度与碰撞角度的关系

考虑到影响崩塌碰撞碎裂程度的因素较多,结合作者前期开展的斜板碰撞碎裂模型试验结果^[17],对比分析法向与斜板碰撞碎裂差异。

图 16 为斜板、法向碰撞时碰撞入射角度与碎裂度关系。由图 16 可知,随着入射角度和撞击速度的增加,法向/斜板碰撞碎裂度均呈现增大趋势,表现出相似的特征。然而,在斜板碰撞过程中,受结构面的影响,部分试验碎裂度表现出递减关系(图 16 中入射角度为 50° 工况)。

此外,从图 16 还可以看出,在相同撞击速度下,试样法向碰撞碎裂度 B 远大于斜板碰撞。试样法向碰撞碎裂度为 $0.828 \sim 0.926$, 撞击斜板碎裂度为 $0.443 \sim 0.703$, 相同撞击速度下(4.43、5.42、6.26 m/s),不同入射角度的试样在撞击速度为 6.26 m/s 时,法向碰撞和斜板碰撞碎裂度 B 的差值最大,可达 48.3%。

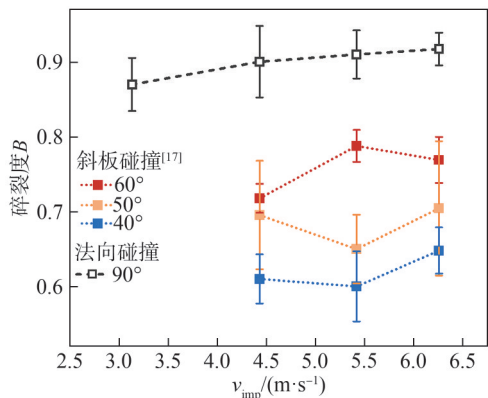


图 16 不同撞击角度下破裂度随冲击速度的变化关系
Fig. 16 Relationship between fragmentation degree and impact velocity at different impact angles

对比法向、斜板碰撞恢复系数(即碰撞后与碰撞前落石速度之比)与归一化破裂度之间的关系,如图 17 所示。由图 17 可以看出:法向/斜板碰撞破碎程度均随着恢复系数的增加呈现递减规律,两者具有高拟合性,拟合优度 R^2 均超过 0.985。法向碰撞的恢复系数范围为 0.189 至 0.435,表明碰撞后块体的动能较小;斜板碰撞的恢复系数为 0.443 至 0.703,且在相同撞击速度下,破裂程度与恢复系数之间呈负相关关系。这表明崩塌碰撞过程中的能量转化受到入射角度和撞击速度的影响,进而影响了落石的运动能力。

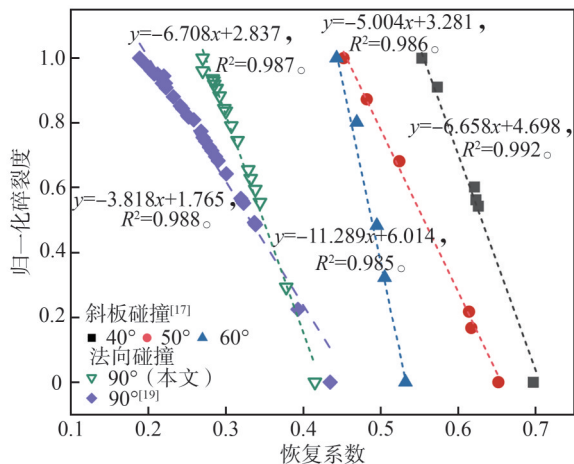


图 17 斜板、法向碰撞恢复系数与归一化破裂度的关系
Fig. 17 Relationship between the coefficients of restitution and the normalized fragmentation degree for inclined slab and normal impacts

3.3.4 能量转化与碰撞角度的关系

定义能量转化率(η)为撞后与撞前的动能比值,即 E_k^a/E_k^b 。对比分析法向与斜板碰撞试验的撞前动能与能量转化率间的关系,如图 18 所示。由图 18 可知,法向及斜板碰撞后,动能随撞击速度增加而增大,但能量转化率逐渐减小。这表明碰撞碎裂过程中的能量转化率(E_k^a/E_k^b)与初始总能量呈负相关关系。斜板碰撞

的能量转化率范围为 24.14%~45.50%,法向碰撞能量转化率范围仅为 7.30%~17.24%,说明斜板碰撞过程利于能量转化。值得注意的是,法向碰撞能量转化率最大值(17.24%)仍低于斜板碰撞能量转化率的最小值(24.14%),这表明在崩塌落石撞击坡面过程中,能量的转化受撞击角度影响显著,这与不同因素下的斜板碰撞破碎试验结论^[17]一致。

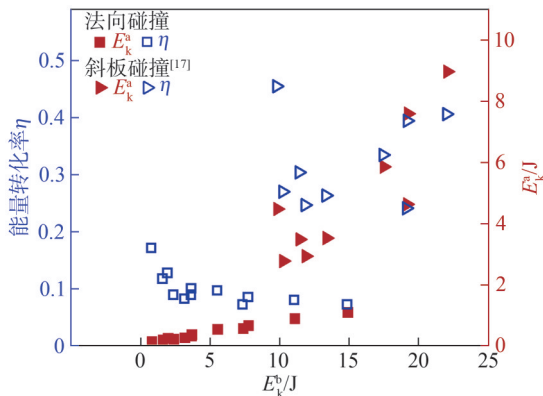


图 18 斜板、法向碰撞撞后动能及能量转化率随撞前动能的变化

Fig. 18 Variation of post-impact kinetic energy and energy conversion efficiency with pre-impact kinetic energy for inclined slab and normal impacts

图 19 为斜板、法向碰撞入射角度与能量转化率关系。由图 19 可知,斜板碰撞的能量转化率明显高于法向碰撞,且通常高出 2 倍以上。相同撞击速度下,随着入射角度的增加,法向/斜板碰撞的能量转化率总体呈下降趋势。然而,斜板碰撞试验数据显示,由于碰撞碎裂受不连续结构面与冲击面间夹角影响,部分试样的能量转化率表现出增大的特征(图 19 中入射角度 50° 工况)。

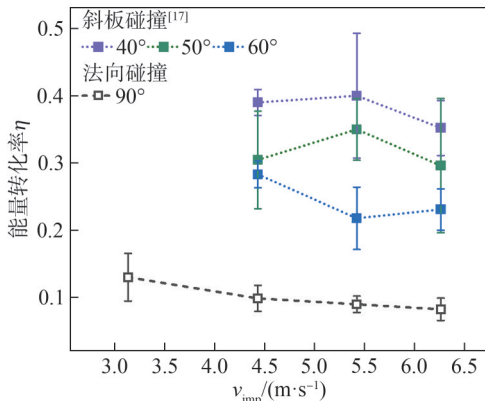


图 19 不同撞击角度下能量转化率随冲击速度的变化关系
Fig. 19 Relationship between energy conversion efficiency and impact velocity at different impact angles

4 结 论

本文从落石法向碰撞碎裂试验入手,分析了碎裂

过程的能量转化特征及其与碎裂度的量化关系,并对比斜板碰撞试验,得到如下结论:

1)模型试验显示,落石碰撞碎裂过程具有显著的4种动力破碎特征。破碎后形成的大碎片进一步压缩导致碎片破碎,小碎片的数目明显大于大碎片数目;受高环向拉应变率作用,小碎片以高速脱离大碎片运动。

2)根据落石法向碰撞能量分析,撞前动能增大,弹性波耗能、冲击板变形能、撞后动能、弹塑性变形能、断裂能均有不同程度的增大;其中,弹性波耗能与撞击板变形能耗散所占比例相对较低,而弹塑性变形能、撞后动能和断裂能耗散占比可达80%。

3)对比分析基于能量转化的动力破碎程度量化指标(B)与由质量、面积定义的碎裂指标(B_1 、 B_2 、 B_3),验证了基于能量分析试样碰撞碎裂过程的可行性。

4)量化分析破碎程度与能量转化率关系发现,撞击速度(坠落高度)对碰撞碎裂过程的能量耗散有较大影响且呈正相关。

5)对比法向与斜板碰撞试验结果发现,碎裂度与能量转化率主要受入射角、撞击速度影响,且碎裂度与恢复系数呈负相关。

参考文献:

[1] Peng Jianbing, Cui Peng, Zhuang Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12): 2377-2389. [彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2377-2389.]

[2] Zhang Yanfeng, Gao Yang, Li Bin, et al. Analysis on the development characteristics of melange belt and its geological disasters in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3): 981-998. [张彦锋, 高杨, 李滨, 等. 青藏高原混杂岩带及其地质灾害发育特征分析[J]. 工程地质学报, 2023, 31(3): 981-998.]

[3] Luo Gang, Cheng Qiangong, Shen Weigang, et al. Research status and development trend of the high-altitude extremely-energetic rockfalls[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 913-934. [罗刚, 程谦恭, 沈位刚, 等. 高位高能岩崩研究现状与发展趋势[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 913-934.]

[4] Luo Xiao, Cheng Qiangong, Wang Yufeng, et al. Landquakes generated by debris falls with different particle sizes[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(1): 118-130. [罗肖, 程谦恭, 王玉峰, 等. 粒径对岩崩-碎屑流滑震特征的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(1): 118-130.]

[5] Yin Yueping, Gao Shaohua. Research on high-altitude and

long-runout rockslides: Review and prospects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 1-18. [殷跃平, 高少华. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 1-18.]

[6] Ye Yang. Energy dissipation and fragmentation of rock spheres upon normal impact[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019. [叶阳. 岩石球砾法向碰撞的能耗与损伤破碎研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.]

[7] Lanfranco C, Frattini P, Sala G, et al. Accounting for the effect of forest and fragmentation in probabilistic rockfall hazard[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023, 23(6): 2349-2363.

[8] Xie Heping, Ju Yang, Li Liyun, et al. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3003-3010. [谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.]

[9] Liu Junxin, Li Junrun, Yin Binrui, et al. New brittleness index based on energy balance and analysis of failure mechanism of shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 734-747. [刘俊新, 李军润, 尹彬瑞, 等. 基于能量平衡的新脆性指标与页岩失效机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 734-747.]

[10] Locat P, Couture R, Leroueil S, et al. Fragmentation energy in rock avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 830-851.

[11] De Blasio F V, Dattola G, Crosta G B. Extremely energetic rockfalls[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(10): 2392-2421.

[12] Crosta G B, Frattini P, Fusi N. Fragmentation in the val pola rock avalanche, Italian Alps[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F1): 2005JF000455.

[13] 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.

[14] Lyu Qing, Zhou Chunfeng, Yu Yang, et al. Experimental study on impact fracture effect of rolling stone slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3359-3366. [吕庆, 周春峰, 于洋, 等. 滚石坡面碰撞破裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3359-3366.]

[15] Asteriou P, Tsiambaos G. Empirical model for predicting rockfall trajectory direction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(3): 927-941.

[16] Ye Yang, Zeng Yawu, Peng Zhixiong, et al. Experimental

- study on normal coefficient of restitution and fragmenting of marble spheres[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1680–1690. [叶阳, 曾亚武, 彭志雄, 等. 大理岩球砾法向碰撞恢复系数及损伤破碎试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1680–1690.]
- [17] Huang Jian, Huang Xiang, Wang Hao, et al. Physical model experimental study on dynamic fragmentation process of high-locality rockfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2164–2174. [黄健, 黄祥, 王豪, 等. 高位崩塌动力碎裂过程物理模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2164–2174.]
- [18] Guccione D E, Thoeni K, Fityus S, et al. An experimental setup to study the fragmentation of rocks upon impact[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(8): 4201–4223.
- [19] Guccione D E, Giacomini A, Thoeni K, et al. On the dynamic fragmentation of rock-like spheres: Insights into fragment distribution and energy partition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 847–873.
- [20] Zener C. The intrinsic inelasticity of large plates[J]. Physical Review, 1941, 59(8): 669–673.
- [21] Thorby D. Structural dynamics and vibration in practice [M]. Amsterdam/Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2008.
- [22] Stronge W J. Impact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [23] Wang Q J, Chung Y W. Tribology[M]//Encyclopedia of Tribology. Boston: Springer, 2013: 3816–3818.
- [24] Ye Yang, Zeng Yawu, Thoeni K, et al. An experimental and theoretical study of the normal coefficient of restitution for marble spheres[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(6): 1705–1722.
- [25] Ye Yang, Zeng Yawu, Du Xin, et al. Study on three-dimensional discrete element simulation of spherical gravel collision damage and fragmentation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 368–378. [叶阳, 曾亚武, 杜欣, 等. 球形砾石碰撞损伤破碎三维离散元模拟研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 368–378.]
- [26] Giacomini A, Buzzi O, Renard B, et al. Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(4): 708–715.
- [27] Zhao Yixin, Wang Xiaoliang, Guo Yanding, et al. Brittleness index of sandstones from different buried depths based on energy release rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 248–262. [赵毅鑫, 王小良, 郭延定, 等. 基于能量释放率的不同赋存深度砂岩脆性指数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 248–262.]
- [28] Liu Xiaohui, Xue Yang, Zheng Yu, et al. Study on energy release during coal and rock crushing under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3201–3211. [刘晓辉, 薛洋, 郑钰, 等. 冲击荷载下煤岩破碎过程能量释放研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3201–3211.]
- [29] Haug Ø T, Rosenau M, Leeveer 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.
- [30] Deng Kaifeng. Characteristics and inversion analysis of vibration signals in the process of rock collapse and fragmentation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. [邓凯丰. 岩崩块石冲击与破碎过程震动信号特征与反演分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.]

Dynamic Fragmentation Mechanism of High-altitude Rockfalls: An Experimental Study on Energy Conversion

HUANG Jian, YUAN Yuan*, ZENG Tan, ZHOU Kun, YUAN Jingqing, LI Jingheng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract:

Objective Prior to incorporating fragmentation into predictive trajectory models, further research is required to gain a comprehensive understanding of its impact. This study explores the complexities of energy dissipation and fragmentation through experiments using rock spheres of varying diameters. The key outcomes are examined, including impact force, energy dissipation characteristics, and fragmentation conversion mechanisms. To quantify the degree of fragmentation, a novel index based on elastic strain energy is introduced, revealing the intricate relationship between energy dissipation and fragmentation.

Methods This study employs the Zuojiaying rockfall in Guizhou as a geological prototype. Rockfall similarity materials were selected to prepare high-brittleness, low-strength rock samples with mechanical properties analogous to those of limestone. Uniaxial compression tests and Chevron Notched Brazilian Disk (CCNBD) tests were conducted under a range of strain rate conditions to enable a systematic analysis of the effects of strain rate on the material's mechanical properties, energy dissipation, and fracture toughness. To further investigate the dynamic characteristics of

normal rockfall impacts, a custom-designed normal impact testing device was developed, featuring an automatic release system for precise control. Particle Image Velocimetry (PIV) and ImagePy image processing technology were employed to analyze pivotal parameters, including impact velocity and fragment size distribution. Furthermore, the effects of rockfall size and impact velocity on impact force, coefficient of restitution, and fragmentation degree were examined. Finally, the study focused on energy conversion and fragmentation characteristics under different impact conditions, proposed a fragmentation quantification index based on elastic strain energy, and compared the energy conversion and fragmentation differences between normal and inclined slab impacts.

Results and Discussions Based on the geological prototype of the Zuojiaying rockfall, rock-like materials were prepared. As the strain rate increased, the characteristic stress exhibited an overall increasing trend, while fracture toughness initially increased and then decreased. Elastic strain energy was continuously accumulated within the rock before the peak and was rapidly released after the peak. Due to the initiation and propagation of cracks, dissipated energy continued to grow. However, before the peak, its value was lower than that of elastic strain energy, while after the peak, the growth rate of dissipated energy increased, surpassing that of elastic strain energy. The results of the normal impact tests conducted on the rock-like spheres revealed four dynamic fragmentation characteristics and four stages of dynamic fragmentation. Following fragmentation, the larger fragments underwent further compression, resulting in additional fragmentation, with a significantly greater number of smaller fragments than larger fragments. Due to the action of high hoop tensile strain rates, the smaller fragments detached from the larger fragments at high speeds. As the falling height (or impact velocity) and specimen size increased, the impact force also increased. Additionally, an increase in the elastic modulus of the impacted slab led to an increase in the impact force. The energy conversion analysis of the dynamic fragmentation process demonstrates that the pre-impact kinetic energy, converted from the initial potential energy, dissipates in the form of slab deformation energy, elastic wave dissipation energy, elastoplastic deformation energy, fracture energy, and post-impact kinetic energy of the fragments. Among these, elastoplastic deformation energy, post-impact kinetic energy, and fracture energy account for more than 80% of the total energy dissipation. As the pre-impact kinetic energy increases, elastic wave dissipation energy, slab deformation energy, post-impact kinetic energy, elastoplastic deformation energy, and fracture energy all increase to varying degrees. Meanwhile, the energy conversion rate is negatively correlated with the initial total energy. Based on this analysis, a dynamic fragmentation degree index B , based on the degree of elastic strain energy release, is proposed. As impact velocity and impact force increase, the fragmentation degree curves of B and B_3 (area ratio) show consistency, indicating that this index effectively describes the degree of rockfall fragmentation and accurately reflects the energy conversion during the fragmentation process. Additionally, a comparison of normal and inclined slab impact test results reveals that fragmentation degree and energy conversion rate are primarily influenced by the incident angle and impact velocity, with fragmentation degree negatively correlated with the coefficient of restitution.

Conclusions The fragmentation process during impact exhibits distinct stages and varying degrees of severity, with energy dissipation primarily consisting of elastoplastic deformation energy and fracture energy, which together account for as much as 91.94% of the total. The kinetic energy retained by the remaining fragmented blocks comprises only 8.05% of the total, and the energy conversion rate is inversely proportional to the initial total energy. To quantify the degree of fragmentation, a metric based on elastic strain energy has been defined and validated for its feasibility in analyzing the fragmentation process of specimens during impact. A further comparison with inclined slab impact tests reveals that the impact angle significantly influences the degree of specimen fragmentation and controls the efficiency of energy conversion.

Key words: rockfall; normal impact; energy conversion; degree of fragmentation

(编辑 李轶楠)

引用格式: Huang Jian, Yuan Yuan, Zeng Tan, et al. Dynamic fragmentation mechanism of high-altitude rockfalls: An experimental study on energy conversion[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(1): 167–180. [黄健, 袁圆, 曾探, 等. 高位崩塌碰撞破碎能量转化机制模型试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(1): 167–180.]