

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.

LUO Xiao, CHENG Qian-gong, WANG Yu-feng, et al. Landquakes Generated by Debris Falls with Different Particle Sizes[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(1): 118-130.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.10002

粒径对岩崩-碎屑流滑震特征的影响

罗 肖¹, 程谦恭^{1,2*}, 王玉峰^{1,2}, 李天话¹

(1. 西南交通大学 地质工程系, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611756)

摘 要:岩崩-碎屑流是一种发生在高山峡谷地区, 具有高位性、隐蔽性、事件突发性和灾害巨大危害性等特征的地质灾害, 滑震信号监测可实现对地质灾害体运动信息的实时捕获, 为灾害预警及灾后评估提供重要信息。以颗粒集合体崩落运动过程为研究对象, 设计并开展了物理模型实验, 分析了颗粒粒径对滑震信号特征的影响, 探讨了岩崩-碎屑流撞击过程产生的滑震信号特征及其现实意义。结果表明:①颗粒集合体总质量一定时, 滑震信号最大振幅值为 17.33g~39.21g, 且随着颗粒粒径的增大而增大;②颗粒集合体总质量一定时, 滑震信号包络线平均值、阿里亚斯强度随着颗粒粒径的增大而增大;③粒径为 2~4 mm 的颗粒集合体产生的滑震信号平均频率为 16.95~23.02 kHz, 且在总质量一定时, 滑震信号的平均频率随着颗粒粒径的增大而减小。本文研究成果以期进一步加深对滑震信号影响因素的认识, 并为灾害潜在区域监测预警系统建立、重大地质灾害灾后快速评估、应急响应措施制定等提供理论依据。

关键词:地质灾害; 岩崩-碎屑流; 颗粒流; 物理模型实验; 滑震; 环境地震学; 地震动信号; 参数反演

中图分类号: P694; P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)01-0118-13

Landquakes Generated by Debris Falls with Different Particle Sizes

LUO Xiao¹, CHENG Qian-gong^{1,2*}, WANG Yu-feng^{1,2}, LI Tian-hua¹

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

2. State-province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Debris fall, which is a kind of geological disaster with high position and concealment characteristics, often develops in mountainous areas and occurs suddenly. It poses a great threat to the safety of downstream constructions and persons. Compared with traditional monitoring methods, the seismic signals generated by geophysical flows have certain advantages, which can provide continuous real-time monitoring of geological disasters that occurred hundreds of kilometers away and even far, and provide important information for disaster early warning and post-disaster assessment. Taking the fall processes of granular flows as research objects, a series of physical model experiments of granular flows was designed and conducted here with the kinematic process and seismic signals of granular flows being recorded; the characteristics of the

收稿日期: 2022-10-03; 修回日期: 2022-12-03 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177131, 41877226, 41877237)

作者简介: 罗 肖(1996-), 男, 四川蒲江人, 工学硕士研究生, E-mail: luoxiao@my.swjtu.edu.cn.

* 通讯作者: 程谦恭(1962-), 男, 甘肃静宁人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: chengqiangong@swjtu.edu.cn.

seismic signals under the influence of particle size were detailed analyzed. The results show that ① at a constant granular flow volume, the maximum amplitude of the seismic signal is between 17.33g and 39.21g, which increases with the increase of particle size; ② at a constant granular flow volume, the average value of seismic envelope and Arias intensity increase with the increase of particle size; ③ the frequency of seismic signal obtained on laboratory scale experiment with particle diameter from 2 to 4 mm is between 16.95 and 23.02 kHz; at a constant granular flow volume, the average frequency decreases with the increase of particle size. The above results can provide a theoretical basis for a deeper understanding of the influencing factors on landquakes, establishment of disaster potential regional monitoring and early warning system, rapid post-disaster assessment of major geological disasters, and development of emergency response measures.

Key words: geological hazard; debris fall; granular flow; physical model experiment; landquake; environmental seismology; seismic signal; parameter inversion

0 引 言

岩崩-碎屑流是一种发生在高山峡谷地区,具有高位性、隐蔽性、事件突发性和灾害巨大危害性等特征的地质灾害,严重威胁着我国高山峡谷地区的长治久安,以及重大工程的安全建设与运行,近年来引起广泛关注^[1-2]。根据 Cruden 等(1996)的定义,岩崩是岩体沿着一个很小或者没有剪切位移发生的表面,从陡峭的斜坡岩体上剥离,然后沿着临空面通过自由下落、滚动、大角度碰撞等方式运动的一种地质灾害^[3]。崩塌体在运动过程中经过碎屑化作用而解体为碎屑颗粒,以类似流体的形式运移或扩散,形成岩崩-碎屑流^[4]。规模巨大的基岩岩体失稳后,经过强烈的碎屑化作用形成长距离运动且具有极端破坏力的高速远程滑坡^[5-7]。通过分析地质灾害体岩性特征、岩体结构、源区特征等因素,可对其进行空间分析与评估^[8-10]。兰恒星等研究认为,岩体结构单元主导下的碎屑化过程是研究大型岩质滑坡远程运移机制的关键,而滑坡体破碎程度的最直接反映即为碎屑颗粒的粒径大小^[11-12]。受岩体岩性、岩体结构面类型和发育程度等因素的影响,崩塌、滑坡体运动过程中将产生不同程度的破碎,进而产生不同粒径的碎屑颗粒^[13-14]。碎屑颗粒的粒径是影响碎屑流动力学特征的重要因素^[15-18]。

然而,岩崩-碎屑流灾害的源头常位于人烟稀少地区,因缺乏足够观测资料,在一定程度上为此类地质灾害运动过程及机理研究增加了难度^[19]。由密集的地震动监测台站组成的地震台网为监测区域内地球表面及内部活动提供了基础条件。现有研究表明,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生过程中,地震

台站会监测到不同于构造地震等天然地震的地震动信号,即滑震(Landquake)^[20-23]。开展滑震信号研究已发展成为一种新的地质灾害研究手段,不仅能实现灾难性地质灾害的监测预警^[24],还可用于表征地球物理颗粒流的运动学过程并揭示其动力学机理^[25]。

国内外许多学者以地质灾害发生时区域地震台站监测到的低频滑震信号为基础,通过反演获得力-时间函数,进而对其运动演化过程及特性进行研究。黄兴辉等以四川茂县新磨滑坡为例^[26],赵娟等以2003年三峡库区千将坪滑坡为例^[27],许世民等以贵州纳雍崩塌-碎屑流为例^[28-29],基于滑震信号反演分别对其运动阶段进行分析,推导出相关运动学参数,进而还原了灾害发生的整个过程。严炎等提出了一套基于滑震信号的灾害重构思路和方法体系,通过反演灾害的基本特征实现对灾害过程重构^[30]。Allstadt 以加拿大西部 Mount Meager 岩崩-碎屑流为例^[31],Ekström 等以巴基斯坦北部 Hunza-Attabad 滑坡为例^[32],Cook 等以印度北阿肯德邦一次岩崩为例^[33],在滑震信号反演的基础上,结合遥感影像、野外调查资料等对灾害特性进行了研究。

相比于低频滑震信号,高频滑震信号包含与地质灾害有关更为丰富的信息,可实现对地质灾害更细微研究的目的。李俊等通过对2000年西藏易贡滑坡-碎屑流主频2 Hz的滑震波进行解译,获得滑震信号参数、动力学过程及其特征参数^[34];曾求等以四川丹巴梭坡滑坡发生时短周期地震仪记录的滑震信号为基础,对滑坡体性质进行了分析^[35]。通过对高频滑震信号特征与地质事件重要特性之间的关系研究,可以量化评价和反演地质灾害特征。

Deparis 等对法国阿尔卑斯山岩崩滑震信号持续时间进行估计,结合平均速度实现对运动距离的估计^[36];Hibert 等基于法国 Piton de la Fournaise 火山岩崩高频滑震数据,建立滑震能与灾害体参数定量化关系,进而对其体积进行了反演^[37];Levy 等依据印度 Soufrière Hills 碎屑流体滑震数据,对其摩擦弱化、能量转换等进行了研究^[38];Dammeier 等基于阿尔卑斯山中部岩滑 1~20 Hz 滑震信号数据,通过多元线性回归分析,对其体积进行了预测^[39]。

滑震信号传播过程中受到多种因素影响,如地层岩性、地形地貌、地质构造等导致滑震信号的抑制、弥散或衰减。通过在条件可控的实验室环境中进行小尺度模型实验,安装数据采集仪器对实验过程进行监测,可弥补上述研究手段的缺陷和不足。Farin 等选用不同的球体颗粒及碎石开展了撞击室内模型实验,基于碰撞理论模型对产生的振动信号进行了分析^[40];进而设计并开展了钢珠在斜板上的颗粒柱体坍塌实验,建立了振动信号与动力学参数之间的关系^[41-42]。邓凯丰等通过开展岩崩-碎屑流撞击地面的物理模型实验,建立了初始条件与滑震特征参数的关系^[43-44]。杨宗佑等通过室内模型实验,对不同坡度下山前平地型碎屑流和堵河型碎屑流运动过程震动特征进行了分析^[45]。自然环境中的现场实验更接近真实情况,Saló 等在采石场进行了单一块石的下落撞击破碎实验,依据振动信号数据进行了块体体积参数的反演^[46]。Feng 等通过户外落石实验,同步分析其振动信号和声波信号的演化特征^[47]。斜槽实验常用于地球物理流体的模拟,Arran 等通过颗粒流斜槽物理模型实验,对比研究了高频地震信号特征的 5 种理论模型结果^[2]。Bachelet 等通过斜槽实验数据分析了斜坡上近稳定颗粒流所产生的高频辐射信号特征,并使用一个简化稳定颗粒流模型进行了参数预测^[48]。

目前,滑震信号研究大多聚焦于低频滑震信号力-时间函数反演以及高频滑震信号与动力学参数经验关系式的获取,进而对地质灾害过程进行分析并预测其规模、速度等参数,而初始条件对滑震参数具有怎样的影响仍需进一步探索。前文述及,崩塌体经过碎屑化作用而解体为由大量离散颗粒组成的碎屑流体,岩体破碎程度的差异影响着碎屑颗粒粒径的大小,进而影响着颗粒流内部的复杂动力学过程,造成不同粒径颗粒流运动速度和运动距离的差异,也进一步影响着灾害体的致灾效应。因此,本文设计并开展了岩崩-碎屑流室内物理模型实验,旨在

探究颗粒流体粒径与滑震信号特征之间的定量关系,为岩崩-碎屑流灾害的应急响应及快速研判工作提供定量化实验数据支撑和科学依据。

1 模型实验概述

1.1 装置介绍

岩崩-碎屑流通常发育于陡峭临空面,具有滑移、倾倒、坠落等失稳模式,其中坠落模式的典型特征之一是其近自由落体的运动过程,并在坡脚处发生大角度碰撞。为分析此失稳模式下的岩崩-碎屑流撞击坡脚并辐射振动波的过程,本文设置并开展了不同粒径颗粒集合体的自由落体实验,以颗粒集合体模拟失稳体运动撞击过程。

物理模型实验装置主要由物料盒、释放装置、撞击底板、数据采集仪器及支撑装置组成(图 1)。物料盒底部装有两片可以活动的扇叶。当扇叶关闭时,物料盒形成一个上部开口的长方体容器,将用于模拟岩崩-碎屑流物质的颗粒体密集地放置于其中;当扇叶突然打开时,物料盒变成一个无底容器,放置其中的物体可以近似无初速度自由下落。释放装置由抽板及滑轮组成,通过抽动抽板,控制物料盒扇叶的开闭。物料盒与释放装置通过螺栓连接在一起,二者作为整体与一根亚克力棒相连,并固定于脚手架上。已有研究表明,材质均匀的亚克力板能够保障振动波的稳定传播,确保实验现象及典型振动信号特征的良好重复性^[40,49]。鉴于此,本实验采用尺寸为 1.20 m×1.00 m×0.01 m 的亚克力板作为撞击底板,水平布置于物料盒正下方 0.3 m 处。数据采集装置由一台高速摄像机和一台加速度传感器组成,拍摄帧率为 850 fps 的 Baumer VCXU-02M 型高速摄像机布设在实验装置正前方,用于监测颗粒的下落-撞击过程;频响范围为 1~54 kHz 的 Brüel & Kjaer 8309 型加速度传感器安装于亚克力板背面,距离撞击点 0.3 m 处(图 1),用于监测关键振动信号。高速摄像机与加速度传感器分别通过东华 DH5922D 动态数据采集仪与一台高性能计算机相连。

1.2 材料选取

物理模型实验材料的选择,首要考虑的是实验材料的稳定性,不应在实验过程中发生变化而对实验结果产生影响,其次还需考量其是否能满足研究的要求。通过对同领域研究进行文献调研发现,钢珠、玻璃珠等球形颗粒材质均一、形状统一、物理力学性质稳定^[40-42,48],在常规物理模型实验条件下不

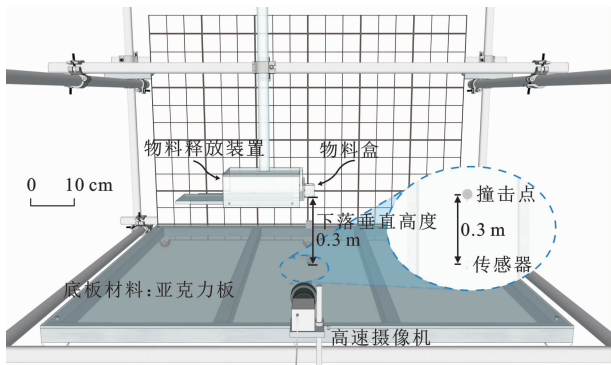


图 1 物理模型实验装置示意图

Fig.1 Schematic View of Equipment of Physical Model Experiment

会发生性质变化,选用此类实验材料既能聚焦离散颗粒组成的颗粒流与底面碰撞并辐射振动波这一关键动力过程,又能排除潜在影响因素对实验结果造成的干扰,避免系统误差。鉴于此,本文选用不同粒径的 304 钢珠作为实验材料。

1.3 工况设计

本文主要探究岩崩-碎屑流颗粒粒径对滑震信号特征的影响,因此,选用 5 种不同粒径的 304 钢珠颗粒进行实验。颗粒总质量及下落高度作为本次研究的无关变量,应尽量消除其影响。为保证实验结果的可靠性,每组工况至少进行 5 次重复实验。具体的工况设计见表 1。

表 1 工况设计

Table 1 Design of Work Conditions

工况编号	实验材料	粒径/mm	总质量/g	下落高度/m
G1	304 钢珠	2.0	106.000±0.004	0.3
G2	304 钢珠	2.5	106.000±0.031	0.3
G3	304 钢珠	3.0	106.000±0.026	0.3
G4	304 钢珠	3.5	106.000±0.032	0.3
G5	304 钢珠	4.0	106.000±0.000	0.3

2 滑震信号处理

2.1 预处理

为保证滑震信号的可靠性,本研究中对每一工况下的滑震信号进行了预处理,基于预处理结果,分析了滑震信号的分布与演化特征。参考前人研究成果,对于滑震信号的预处理主要包括去趋势处理和去噪处理两个步骤。

2.1.1 去趋势处理

加速度传感器采集到的原始滑震信号存在一定偏移[图 2(b)]。Pan 等研究认为,这是由复杂系统中各元素之间的强相互作用所产生的长程空间或时

间相关性造成的^[50]。这一问题在一定程度上可以通过去趋势处理来解决,即考虑去除多项式步长之间的幂律相关性趋势^[51]。Peng 等提出的去趋势波动分析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA)方法已经成为一种广泛使用的技术^[52],被用于确定噪声、非平稳时间序列中的(单)分形标度性质和检测长程相关性^[53]。本文基于去趋势分析和处理方法,使用 MATLAB 软件编写程序对原始滑震信号数据进行去趋势处理。经过去趋势处理后的数据各阶趋势已经得到极大消除[图 2(b)]。图 2(a)是颗粒流从下落→撞击→反弹后再次撞击过程的滑震信号时域曲线。图 2(a)中,区域Ⅰ是撞击发生之前的滑震信号数据,即被传感器采集到的环境噪声数据;区域Ⅱ是从撞击开始到结束过程的滑震信号数据;区域Ⅱ之后是碎屑颗粒与底板撞击反弹后再次撞击底板及颗粒滚动产生的滑震信号数据。本研究主要关注碎屑颗粒的撞击过程,即图 2(a)中区域Ⅱ的滑震信号数据,且后续分析处理也只针对这一部分。

2.1.2 去噪处理

为评估环境噪声对实验数据的影响,利用加速度传感器采集了未进行实验时的信号数据,发现人声、飞机轰鸣、人走动等都会产生振幅较小的信号数据。因此,在实验开展过程中,尽量避开环境嘈杂的时间段,在实验操作过程中尽量避免发出声响。尽管实验中抽动抽板产生噪声不可避免,但本文主要研究颗粒集体撞击阶段数据,抽动抽板后颗粒集体下落到撞击底板过程需要一定时间,这段时间成功避免了该噪声对目标数据的影响。通过对环境噪声信号数据与实验信号数据进行快速傅里叶变换(FFT),将其从时域转换到频域进行分析,转换后的结果如图 3 所示。通过对二者频域特征进行分析,发现环境噪声信号的频率处于 60 Hz 以下占绝大部分,碎屑颗粒撞击产生的滑震信号频率则大部分分布在较高频段,越接近 50 kHz(奈奎斯特频率)越少,说明本实验的采样频率(100 kHz)满足要求。去噪处理可以减小实验数据中环境噪声的影响,常用的去噪方法主要有高通滤波、低通滤波、带通滤波、带阻滤波及小波去噪等^[54]。因为已知环境噪声及目标信号的频率范围,本文选用带通滤波进行去噪处理,带通滤波的通带设置为 60~50 000 Hz。

2.2 特征参数计算

2.2.1 包络线平均值

包络线平均值是通过在持续时间内对信号包络线求取平均值得到,用以表征地震信号的一般强

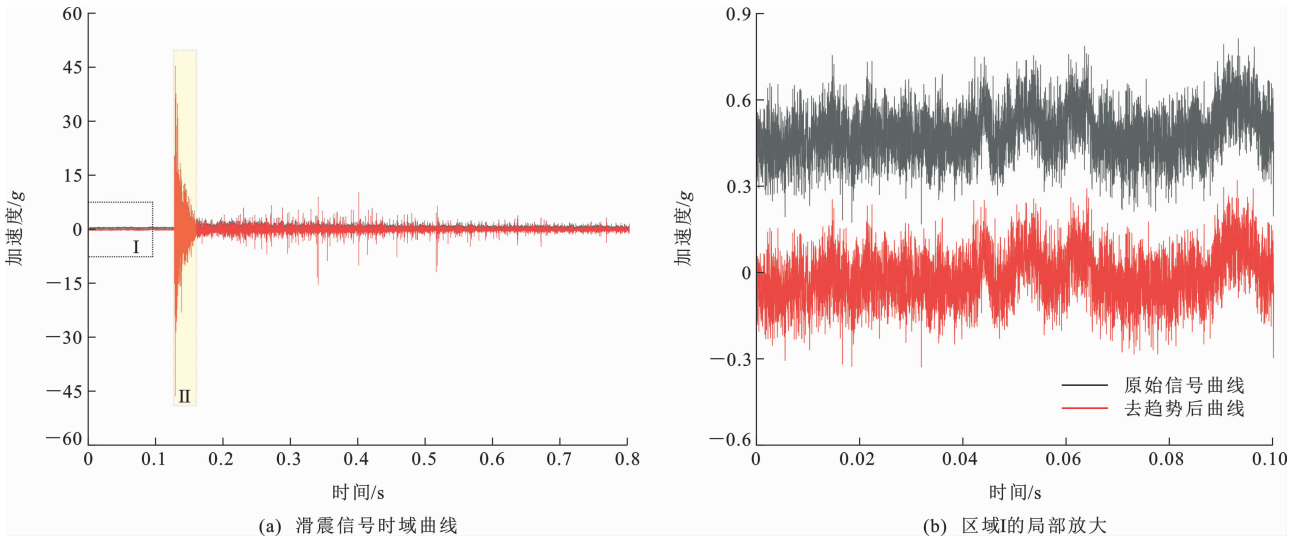


图 2 颗粒流原始加速度时程曲线

Fig. 2 Raw Acceleration Time History Curves of One Granular Flow

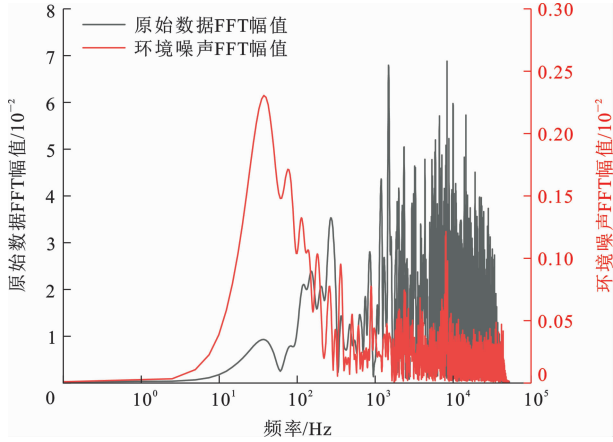


图 3 傅里叶变换频域曲线

Fig. 3 Frequency Domain Curves of Fourier Transform

度^[55]。Saló 等通过分析信号峰值与包络线平均值的比值,用以研究信号持续时间内较为清晰的峰值信号与其他较为平坦信号之间的区别^[46]。Farin 等通过获取不同初始条件下颗粒柱体产生振动信号的包络线,分析各阶段的演化特征^[41]。本文选取这一参数,用以探究不同颗粒粒径工况下滑震信号的振幅特征。其计算公式为

$$M_{\text{env}} = \frac{\sqrt{a(t)^2 + H_t(a(t))^2}}{T_A} \tag{1}$$

式中: M_{env} 为包络线平均值; $a(t)$ 为滑震信号数据; $H_t(a(t))$ 为滑震信号数据的希尔伯特变换值,本研究中取其虚部进行计算; T_A 为滑震信号持续时间; t 为时间。

2.2.2 平均频率

相对于滑震信号的最大频率或振幅谱最大值处对应的频率而言,平均频率对信噪比更加不敏

感^[40],可以表征滑震信号绝大部分能量所在位置,也是定位其质心频率所在位置的一个重要测量参数,常用来定量描述其频率分布情况^[46]。本文选用这一参数对滑震信号的频域特征进行量化描述,探究不同颗粒粒径工况下滑震信号频率特征。本文参考 Farin 等对平均频率的计算方法^[40],得到平均频率的计算公式为

$$f_{\text{mean}} = \frac{\int_0^{+\infty} |\tilde{A}| f df}{\int_0^{+\infty} |\tilde{A}| df} \tag{2}$$

式中: f_{mean} 为平均频率; f 为频率; \tilde{A} 为滑震信号快速傅里叶变换后的幅值。

2.2.3 阿里亚斯强度

阿里亚斯强度是 Arias 于 1970 年提出用来评估地震动信号强度的一个参数^[56]。Saló 等使用这个参数来研究破碎撞击是否与系统更高的振动强度相关^[46];邓凯丰等使用这个参数来研究更大的物源体积是否会产生更高的震动强度^[43]。本文选用这一参数来探究不同颗粒粒径工况下滑震信号振动强度特征。其计算公式为

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_i}^{t_f} a(t)^2 dt \tag{3}$$

式中: I_A 为阿里亚斯强度; g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; t_i 和 t_f 分别是滑震信号开始和结束的时间。

3 结果分析

3.1 颗粒流崩落过程

颗粒流崩落过程与滑震信号演化特征密切相

关,对其进行研究有利于理解滑震信号特征。本文基于高速摄像机(拍摄帧率为 850 fps)拍摄的影像数据对各组工况崩落过程进行分析,以工况 G5-2(工况 G5 第二次重复实验)为例进行简要阐述。图 4 展示了颗粒流自物料盒自由下落后的运动与撞击演化过程,将颗粒流与底板撞击瞬间记为 0 s,以 0.005 s 时间间隔展示其运动过程。颗粒流下落过

程中基本保持柱体形状,整体性较好。与底板撞击时,位于最下部颗粒先与板面接触,随后沿其侧面以滚动、弹跳等方式运动,整个颗粒柱体逐渐解体坍塌。颗粒流与底板撞击后,通过弹跳方式运动颗粒在重力作用下再次撞击底板,直至最后通过滚动方式逐渐停积在板面上。总体而言,颗粒流崩落过程是颗粒流从柱体形态到单一离散颗粒的过程。

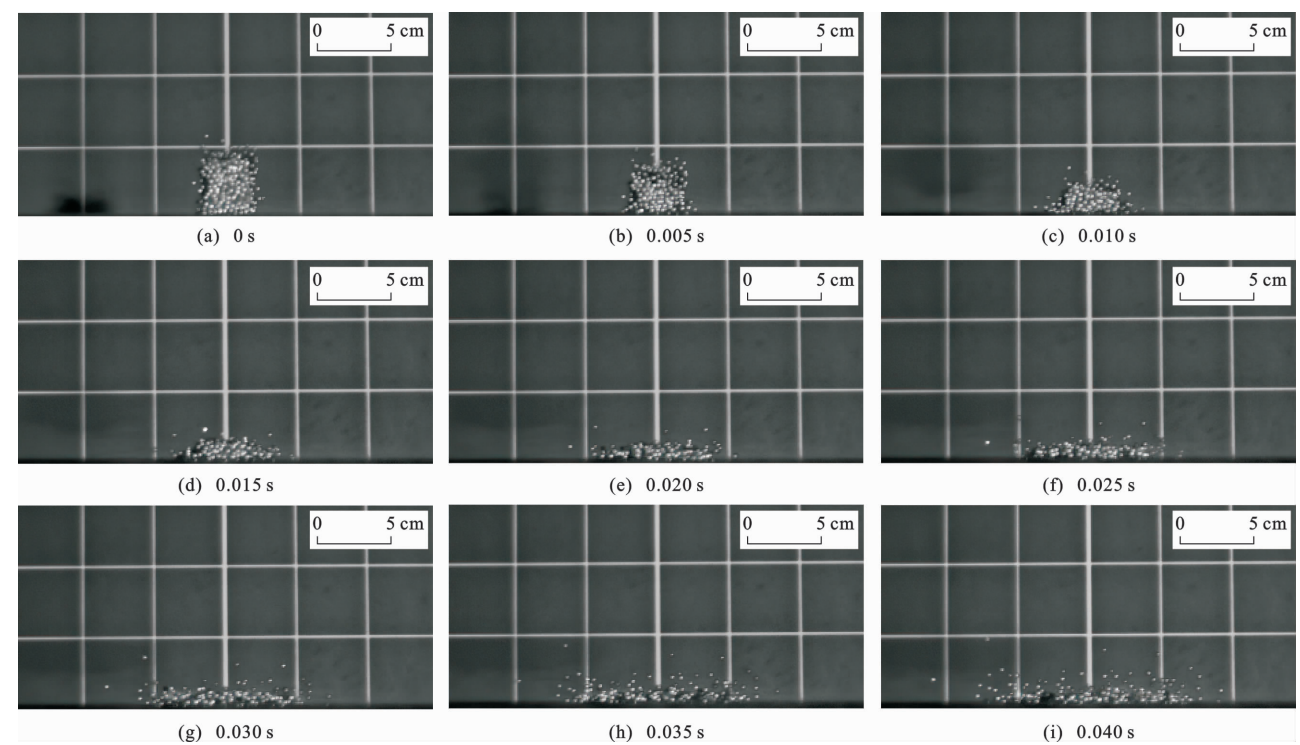


图 4 工况 G5-2 的物理模型实验影像

Fig. 4 Physical Model Experimental Images of Work Condition G5-2

3.2 滑震信号特征

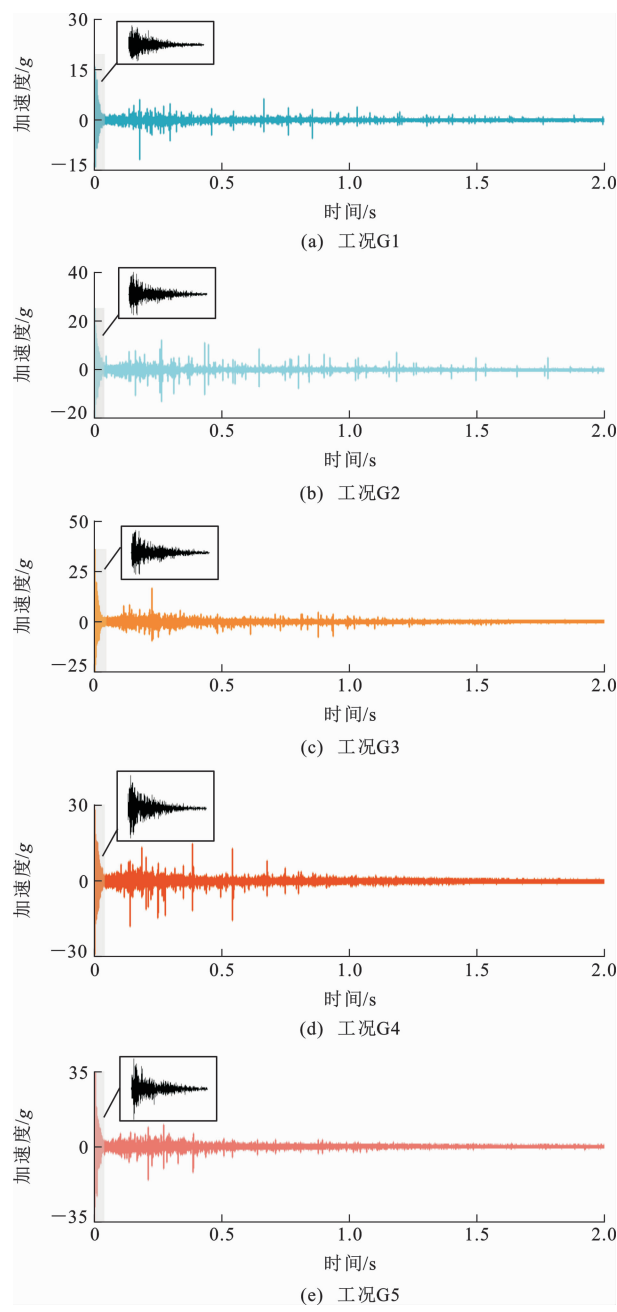
本文开展颗粒集合体撞击过程滑震特征研究实验,重点聚焦颗粒粒径对滑震信号的影响。为分析不同颗粒粒径的滑震信号特征,挑选各组工况数据进行对比分析。图 5 展示了工况 G1~G5 下,一组颗粒流实验的滑震数据经过预处理后的振动波形曲线。从滑震信号最大振幅值来看,在颗粒流总质量相同情况下,颗粒粒径从 2 mm 增加到 4 mm,滑震信号最大振幅值在 17.33g 到 39.21g 范围内变化,且随着颗粒粒径的增大,最大振幅值呈现出递增趋势,增长幅度近线性增长。从滑震信号演化特征分析可知:颗粒流撞击阶段滑震信号振幅值最大,撞击后弹跳颗粒再次撞击及滚动颗粒的滑震信号振幅值相对较小;颗粒流撞击阶段达到最大振幅值持续时间较从最大值处衰减到较小值持续时间短。

3.3 颗粒粒径与滑震信号包络线平均值的关系

根据式(1)分别对实验中记录的振动波数据进

行后处理计算,得到了不同工况条件下滑震数据的包络线平均值,对同组工况每次重复实验结果求取平均值,绘制了滑震信号包络线平均值与颗粒粒径之间的关系曲线(图 6)。当颗粒粒径从 2 mm 增加到 4 mm 时,滑震信号包络线平均值在 2.17g 到 4.54g 范围内变化。分析二者关系发现,在总质量相同的情况下,滑震信号包络线平均值随着颗粒粒径的增大而增大,从拟合线中发现二者增长趋势呈现近似线性增长关系(图 6)。

滑震信号包络线平均值可以表征振动的一般强度。本研究发现在总质量相同情况下,振动强度却因颗粒粒径不同而出现差异,这一现象引发对振动信号来源的思考。Farin 等认为滑震信号是由大量颗粒在板上撞击产生的不相关冲击波组成^[41]。在后续的分析模型中发现,滑震信号振幅不是由多个颗粒撞击产生信号振幅的简单相加,这些信号之间存在相互干扰,导致振幅出现不变、增大或减小的现



灰色区域为颗粒流撞击阶段滑震信号演化曲线；
黑色信号曲线为灰色区域波形放大图

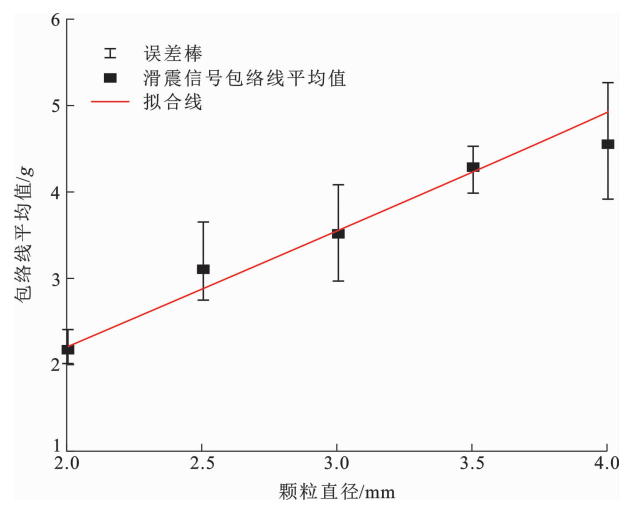
图 5 各工况振动波形曲线

Fig. 5 Seismic Signals Curves of All Work Conditions

象^[57]。Hibert 等通过对 12 个大型滑坡的高频滑震信号进行分析,发现滑震信号的包络线最大振幅和最大流体动量之间存在定量化关系^[58]。对比本文的研究结果,说明滑震信号的包络线平均值可能受多种因素影响,颗粒粒径是其中一个因素,对于其还受其他哪些因素影响,有待进一步研究与探讨。

3.4 颗粒粒径与平均频率的关系

根据式(2)分别对所有实验数据进行后处理计算,得到了每次实验滑震数据的平均频率,对同组工

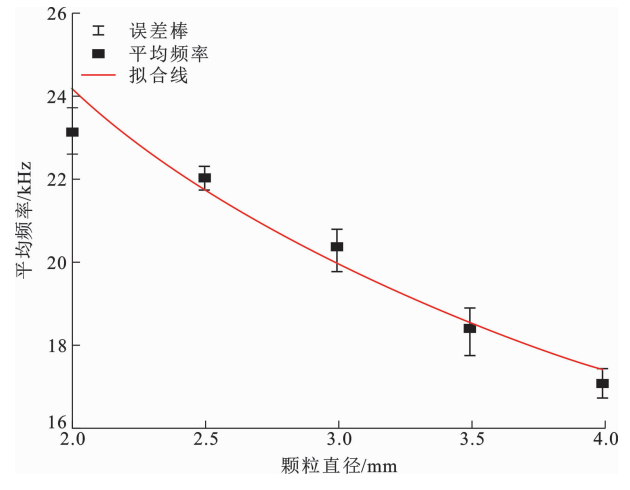


判定系数为 0.99;图中上误差线代表重复实验的最大值;
下误差线代表重复实验的最小值

图 6 颗粒粒径与滑震信号包络线平均值的关系

Fig. 6 Relationship Between Granular Flow Diameter and Seismic Signal Envelope Average

况每次重复实验结果求取平均值,绘制了平均频率与颗粒粒径之间的关系曲线(图 7)。当颗粒粒径从 2 mm 增加到 4 mm 时,平均频率在 16.95 kHz 到 23.02 kHz 范围内变化。分析二者关系发现,在总质量相同情况下,滑震信号平均频率随着颗粒粒径的增大而减小,从拟合线中发现二者呈现出近似指数衰减趋势(图 7)。



判定系数为 0.96;上误差线代表重复实验的最大值;
下误差线代表重复实验的最小值

图 7 颗粒粒径与平均频率的关系

Fig. 7 Relationship Between Granular Flow Diameter and Average Frequency

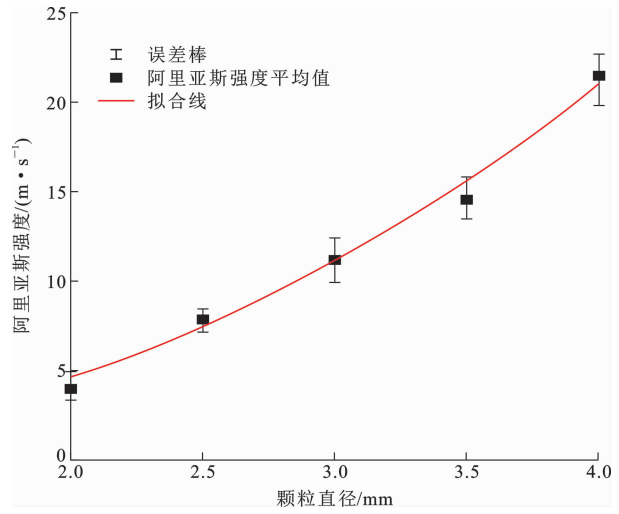
不同岩性的崩塌体在运动过程中将产生不同程度的破碎作用。硬质岩类通常破碎程度相对较低,易形成粒径相对较大的碎屑流体,软质岩类在运动过程中破碎程度高,易形成细颗粒碎屑流。碎屑颗

粒粒径的差异将显著影响其滑震信号的频域特征。Saló 等通过户外单一落石撞击实验,发现破碎块体相比于非破碎块体会以更高的频率释放其大部分能量^[46]。对于高频信号的来源,有学者认为高频信号主要是由颗粒之间以及颗粒与底板之间的摩擦、撞击产生^[26,48]。总质量相同的颗粒集合体因颗粒粒径的增大而使颗粒数量减少,可模拟不同岩性崩塌体破碎程度降低的过程,且用于分析的振动信号数据为撞击阶段数据,有力地解释了平均频率随着颗粒粒径的增大而减小的现象。此外,Farin 等在斜板上开展的颗粒柱体坍塌实验亦发现颗粒流滑震信号的平均频率随着颗粒粒径的增加而出现衰减的现象,同时对比了相同直径的单一钢珠与颗粒集合体撞击产生振动信号的平均频率,发现二者结果相似^[41]。这在一定程度上说明颗粒粒径较颗粒数目对平均频率的影响更大。

3.5 颗粒粒径与阿里亚斯强度的关系

根据式(3)分别对所有实验数据进行后处理计算,得到了每次实验滑震数据的阿里亚斯强度,对同组工况每次重复实验结果求取平均值,绘制了阿里亚斯强度平均值与颗粒粒径之间的关系曲线(图 8)。当颗粒粒径从 2 mm 增长到 4 mm 时,阿里亚斯强度在 $3.69 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $21.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内变化。分析二者之间的关系发现,在总质量相同情况下,阿里亚斯强度随着颗粒粒径的增大而逐渐增大,从拟合线中发现二者呈现出近似指数增长趋势(图 8)。

阿里亚斯强度通过对滑震信号的平方进行积分获取,受滑震信号幅值的影响较大。第 3.3 节已发现滑震信号包络线平均值与颗粒粒径之间的近似线性正相关关系,这一规律有力地解释了阿里亚斯强度与颗粒粒径之间近似指数增长趋势的关系。Feng 等开展了户外单一大块体岩石、单一小块体岩石及大小混合块体岩石的下落实验,通过对其运动路径上所布设的 3 个加速度传感器采集到的数据进行计算,发现大块体岩石较小块体岩石工况具有更高的阿里亚斯强度^[47]。阿里亚斯强度既可以表征振动强度,同时又是能量参数。Farin 等在斜板上进行的颗粒柱体坍塌实验发现,在质量一定时,其振动能与颗粒直径的 3 次方成正比,这一关系在颗粒流总质量发生改变时依旧成立^[42]。以上结论在一定程度上验证了本文研究成果的正确性,说明颗粒直径较颗粒数目对滑震信号振动强度的影响更大。



判定系数为 0.99;上误差线代表重复实验的最大值;
下误差线代表重复实验的最小值

图 8 颗粒粒径与阿里亚斯强度的关系

Fig. 8 Relationship Between Granular Flow Diameter and Arias Intensity

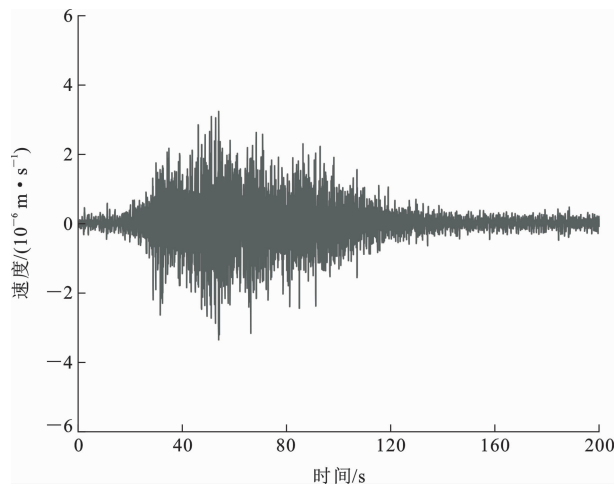
4 讨 论

4.1 滑震信号特征现实意义

基于室内物理模型实验,本文初步分析与探讨了颗粒集合体撞击过程中包络线平均值、平均频率及阿里亚斯强度等滑震信号参数的变化特征,并分别建立了它们与颗粒粒径之间的定量关系。然而,考虑到实验室尺度下的小规模物理模型实验无法真实再现自然环境中岩崩-碎屑流地质灾害事件,如何将本文的研究成果应用于实际的地质灾害监测预警与防治及灾后评估中,是需要进一步探讨的问题。

实验室环境与自然环境的条件存在诸多差异,探讨这些差异对于二者滑震信号特征的影响有利于对本文研究成果的现实意义进行客观评价。首先,从二者的波形特征分析,通过对图 5 中不同颗粒粒径撞击阶段振动信号进行放大处理(图 5 中黑色信号),发现其波形呈现出“纺锤”形状。Farin 等将斜板上颗粒柱体坍塌实验振动信号波形与自然环境中岩崩、碎屑流、滑坡等滑震信号波形进行比较,发现它们都呈现出类似“雪茄”形状,开始阶段呈现急速变化的特征^[41]。图 9 展示了自然环境中岩崩滑震信号的时域曲线^[37]。上述分析说明本文物理模型实验振动信号与自然环境中滑震信号在波形上具有相似性。

滑震信号包络线平均值可以在一定程度上表征颗粒体与底板之间相互作用的强弱。尽管各实验工况下颗粒流的总质量和下落高度相同,但得到的包



图件引自文献[36]

图 9 自然环境中岩崩滑震信号时域曲线

Fig. 9 Time Domain Curve of Landquake Generated by Natural Rockfall

络线平均值却因颗粒粒径的差异而呈现不同的变化。这一结果表明对于离散的颗粒集合体,产生的总的振动信号并不是各颗粒振动信号的简单叠加。邓凯丰利用相似材料研究了不同破碎程度块体的包络线平均值特性,发现包络线平均值随着块体破碎程度的增大而逐渐减小^[55]。本次研究发现,在总质量相同条件下,颗粒集合体的颗粒数量因颗粒粒径增大而减少的现象可以模拟岩崩-碎屑流破碎程度的变化,滑震信号包络线平均值与颗粒粒径的关系在一定程度上可以认为是滑震信号包络线平均值与破碎程度的关系。自然环境中岩崩-碎屑流地质灾害因岩性不同,其碎屑化程度存在差异。滑坡的碎屑化作用是高速远程滑坡运动过程中的典型动力过程,是滑坡体中特殊内部结构形成的前提条件,也被认为是可能促进高速远程滑坡超强流动性的物理力学机理^[6]。通过分析滑震信号包络线平均值,可以对岩石块体的岩性强度及破碎程度做出评价,为评估地质灾害的危害性提供关键信息。

本文模型实验所获取的碎屑流崩落振动信号平均频率为 16.95~23.02 kHz,且主要通过碎屑颗粒撞击作用产生。Farin 等通过颗粒柱体坍塌实验所获振动信号频率为 1~20 kHz^[41]。Huang 在实验中发现岩石或砾石与基底摩擦所产生的信号频率较低,但它们碰撞所产生的信号频率却较高^[59],这一结论解释了本文实验结果与 Farin 等的实验结果之间的差异。Huang 等通过户外实验测得单一岩块所产生的振动信号频率为 10~150 Hz,且随着块石体积的增大,其峰值频率逐渐减小^[60]。Hibert 等研

究发现岩崩落石所产生滑震信号的传播能量为 2~30 Hz^[37]。Farin 等通过实验测得质量为 326 kg 的卵石撞击地面所产生的振动信号频率为 10~20 Hz^[40]。通过对比自然环境中滑震信号与物理模型实验振动信号的分布频率,发现实验室环境中所获得的结果远大于自然环境。Farin 等研究发现单一颗粒撞击产生振动信号的平均频率与撞击持续时间成反比关系^[41]。根据赫兹弹性撞击理论模型,其持续时间(T_c)为

$$T_c \approx 2.87 \left(\frac{m^2}{RE^* V_z} \right)^{1/5} \quad (4)$$

式中: m 代表撞击体的质量; R 代表撞击体的半径; V_z 代表撞击体垂直方向(z 方向)的速度; E^* 代表弹性模量。

由此可见,颗粒的尺度及弹性模量在一定程度上对撞击持续时间具有较大的影响。自然环境中岩崩-碎屑流破碎块体比实验中颗粒集合体大几个数量级,而弹性模量远小于实验颗粒。尽管岩崩发生时也存在厘米级甚至尺寸更小的碎屑颗粒的崩落现象,但受限于传感器布设的位置、高频振动信号的弥散、衰减等,野外条件下很难捕获到大于 1 Hz 的岩崩振动信号^[41],这在一定程度上解释了实验室环境中物理模型实验所获频率远大于自然环境中滑震信号频率的现象。本文所获滑震信号平均频率与颗粒粒径之间的关系对于自然环境中岩崩-碎屑流碎屑体粒径的评估具有重要意义,通过对其滑震信号频率范围的分布和演化特征进行分析可以在一定程度上获取与其破碎过程及程度有关的重要信息。

阿里亚斯强度是地震学领域用来表征地震动强度的参数之一,与地震引起的灾害现象具有很强的相关性,被广泛应用于地震灾害的危险性分析^[61]。李雪婧等通过文献调研,发现阿里亚斯强度与地震诱发滑坡具有很强的相关性,利用这一特征可以对潜在的地震诱发滑坡进行预测^[62]。本文通过物理模型实验建立了阿里亚斯强度与颗粒粒径之间的关系,可以为评估岩崩-碎屑流地质灾害的破坏性提供理论参考,即通过分析自然环境中岩崩-碎屑流滑震信号阿里亚斯强度的大小,对碎屑体的块体体积进行评价,进而对其危害性进行合理评估,为采取合理防治措施提供理论依据。

4.2 滑震信号研究展望

持续的滑震信号监测是研究岩崩-碎屑流地质灾害的有效手段,可以提供有关其特征的重要信息。目前,这一方法被用于确定地质灾害发生的位置,确

定其辐射的震动能,推断地质灾害的规模、受力、动力学参数等^[46]。Vilajosana 等应用滑震信号分析手段对岩崩的规模及位置进行了确定^[63]。Ekström 等依据地质灾害滑震信号数据对其持续时间、动量、势能损失、质量、抛射轨迹等进行了估计^[32]。邓凯丰等利用碎屑体体积与地震动信号特征参数之间的经验关系对其初始条件及运动学参数进行了反演^[43,55]。大型岩崩-碎屑流的物源组成复杂多样,大多发育于偏远地区,通过常规手段对其进行监测存在局限性,应用滑震监测手段则无需提前预知地质灾害发生的位置以及可能的引发因素^[33]。Rao 等探讨了滑震信号实时监测与卫星资料解译、数值模拟和地貌分析等手段的综合应用前景,阐述了在喜马拉雅地区建立地质灾害早期预警系统以应对该区域可能发生的大规模泥石流、岩崩等地质灾害的必要性^[24]。Yan 等结合滑震信号动态反演和数值模拟方法对滑坡过程进行了重建,并以 2018 年白格滑坡为例进行了探讨^[64]。因此,滑震信号在未来的研究中,不仅需要作为一种独立的技术不断深入发展,进一步拓宽其应用范围,还应与遥感监测、卫星图像监测等手段结合,优势互补,相互印证,共同组建高效准确的地质灾害预警系统。

5 结 语

本文通过开展岩崩-碎屑流撞击物理模型实验,研究了总质量相同情况下,不同颗粒粒径的滑震信号特征,对滑震信号参数的现实意义及未来研究方向进行了探讨,为揭示颗粒粒径与滑震信号特征的关系提供了一种方法。

(1)颗粒集合体总质量一定时,滑震信号最大振幅值为 17.33g~39.21g,且随着颗粒粒径的增大而增大,增长幅度近线性增长。

(2)颗粒集合体总质量一定时,滑震信号包络线平均值、阿里亚斯强度随着颗粒粒径的增大而增大,平均频率随着颗粒粒径的增大而减小。通过对数据进行拟合发现:滑震信号包络线平均值与颗粒粒径之间呈现近似线性增长关系;阿里亚斯强度与颗粒粒径之间呈现近似指数增长关系;平均频率与颗粒粒径之间呈现近似指数衰减关系。

(3)物理模型实验振动信号与天然滑震信号在波形上相似。在实验室环境中,直径为 2~4 mm 的颗粒集合体撞击产生的振动信号频率为 16.95~23.02 kHz,这一结果远大于自然环境中滑震信号频率。本实验采用的 304 钢珠颗粒的尺度、弹性模

量,与天然岩崩、落石的差异是造成这一结果的主要原因。

(4)滑震信号研究还需要进一步拓展其应用范围,不仅应该作为一种独立的手段进一步发展,还应与遥感等其他手段相结合组成一个系统发挥作用。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
HUANG Run-qiu. Mechanism and Geomechanical Modes of Landslide Hazards Triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [2] ARRAN M I, MANGENEY A, DE ROSNY J, et al. Laboratory Landquakes: Insights from Experiments into the High-frequency Seismic Signal Generated by Geophysical Granular Flows[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2021, 126(5): 006172.
- [3] TURNER A K, SCHUSTER R L. Landslides: Investigation and Mitigation[M]. Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [4] NEUENDORF K K E, MEHL JR J P, JACKSON J A. Glossary of Geology [M]. 5th ed. Alexandria: American Geosciences Institute, 2011.
- [5] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 72-84.
CHENG Qian-gong, ZHANG Zhuo-yuan, HUANG Run-qiu. Study on Dynamics of Rock Avalanches: State of the Art Report[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 72-84.
- [6] 林棋文, 程谦恭, 李 坤, 等. 高速远程滑坡碎屑化运动机理研究综述[J]. 工程地质学报, 2021, DOI: 10.13544/j. cnki. jeg. 2021-0035.
LIN Qi-wen, CHENG Qian-gong, LI Kun, et al. Review on Fragmentation-related Dynamics of Rock Avalanches[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, DOI: 10.13544/j. cnki. jeg. 2021-0035.
- [7] 王玉峰, 林棋文, 李 坤, 等. 高速远程滑坡动力学研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(1): 164-181.
WANG Yu-feng, LIN Qi-wen, LI Kun, et al. Review on Rock Avalanche Dynamics[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2021, 43(1): 164-181.
- [8] LAN H X, ZHOU C H, WANG L J, et al. Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction Using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China [J]. Engi-

- neering Geology, 2004, 76(1/2): 109-128.
- [9] LAN H X, DEREK MARTIN C, 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] LAN H X, DEREK MARTIN C, ZHOU C H, et al. Rockfall Hazard Analysis Using LiDAR and Spatial Modeling[J]. Geomorphology, 2010, 118(1/2): 213-223.
- [11] 兰恒星, 仇义星, 伍宇明. 岩体结构效应与长远程滑坡动力学[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 108-122.
LAN Heng-xing, ZHANG Yi-xing, WU Yu-ming. Effect of Rock Mass Structure on the Dynamics of Long-runout Landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 108-122.
- [12] LAN H X, ZHANG Y X, MACCIOTTA R, et al. The Role of Discontinuities in the Susceptibility, Development, and Runout of Rock Avalanches: A Review[J]. Landslides, 2022, 19(6): 1391-1404.
- [13] 刘传正. 论崩塌滑坡-碎屑流高速远程问题[J]. 地质论评, 2017, 63(6): 1563-1575.
LIU Chuan-zheng. Research on High Speed and Long-distance of the Avalanches or Landslide-debris Streams[J]. Geological Review, 2017, 63(6): 1563-1575.
- [14] 汪发武. 地震诱发的高速远程滑坡过程中土结构破坏和土粒子破碎引起的两种不同的液化机理[J]. 工程地质学报, 2019, 27(1): 98-107.
WANG Fa-wu. Liquefactions Caused by Structure Collapse and Grain Crushing of Soils in Rapid and Long Runout Landslides Triggered by Earthquakes [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 98-107.
- [15] BARTALI R, NAHMAD-MOLINARI Y, RODRÍGUEZ-LIÑÁN G M, et al. Gravity-driven Monodisperse Avalanches: Inertial- to Frictional-dominated Flow [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(8): 3507-3520.
- [16] CAGNOLI B, ROMANO G P. Effects of Flow Volume and Grain Size on Mobility of Dry Granular Flows of Angular Rock Fragments: A Functional Relationship of Scaling Parameters[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012, 117(B2): B02207.
- [17] LI K, WANG Y F, LIN Q W, et al. Experiments on Granular Flow Behavior and Deposit Characteristics: Implications for Rock Avalanche Kinematics [J]. Landslides, 2021, 18(5): 1779-1799.
- [18] 李 坤, 程谦恭, 林棋文, 等. 高速远程滑坡颗粒流研究进展[J]. 地球科学, 2022, 47(3): 893-912.
LI Kun, CHENG Qian-gong, LIN Qi-wen, et al. State of the Art on Rock Avalanche Dynamics from Granular Flow Mechanics[J]. Earth Science, 2022, 47(3): 893-912.
- [19] 许 强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1651-1659.
XU Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1651-1659.
- [20] FAVREAU P, MANGENEY A, LUCAS A, et al. Numerical Modeling of Landquakes[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(15): 043512.
- [21] CHEN C H, CHAO W A, WU Y M, et al. A Seismological Study of Landquakes Using a Real-time Broadband Seismic Network[J]. Geophysical Journal International, 2013, 194(2): 885-898.
- [22] CHAO W A, ZHAO L, CHEN S C, et al. Seismology-based Early Identification of Dam-formation Landquake Events[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19259.
- [23] CHAO W A, WU Y M, ZHAO L, et al. A First Near Real-time Seismology-based Landquake Monitoring System[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43510.
- [24] RAO N P, REKAPALLI R, SRINAGESH D, et al. Seismological Rockslide Warnings in the Himalaya[J]. Science, 2021, 372: 247.
- [25] WANG Y F, CHENG Q G, ZHU Q. Surface Microscopic Examination of Quartz Grains from Rock Avalanche Basal Facies[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(2): 167-181.
- [26] 黄兴辉, 李正媛, 余 丹, 等. 使用宽频带地震记录研究 2017 年 6 月 24 日茂县新磨滑坡的动力学过程[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4055-4062.
HUANG Xing-hui, LI Zheng-yuan, YU Dan, et al. Dynamic Processes of the 24 June 2017 Xinmo Landslide in Maoxian Revealed by Broadband Seismic Records[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4055-4062.
- [27] 赵 娟, 漆静晨, 杨佳琛, 等. 基于地震信号反演滑坡动力学机制[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1007-1012.
ZHAO Juan, QI Jing-chen, YANG Jia-chen, et al. Inverted Landslide Dynamics Based on Seismic Signals [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1007-1012.
- [28] 许世民, 殷跃平, 邢爱国. 基于地震信号的贵州纳雍崩塌-碎屑流运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 1-8.

- XU Shi-min, YIN Yue-ping, XING Ai-guo, et al. Characteristic Analysis of the Nayong Rock Avalanche's Kinematics Based on Seismic Signals[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2):1-8.
- [29] 许世民. 基于滑震信号分析的特大崩滑灾害数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学, 2020.
- XU Shi-min. Characteristic Analysis of the Nayong Rock Avalanche's Kinematics Based on Seismic Signals[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [30] 严炎, 崔一飞, 周开来, 等. 基于地震动信号分析的地质灾害过程重构方法研究与应用[J]. 工程地质学报, 2021, 29(1):125-136.
- YAN Yan, CUI Yi-fei, ZHOU Kai-lai, et al. Research and Application of Geological Hazards Process Reconstruction Based on Seismic Signal Analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1):125-136.
- [31] ALLSTADT K. Extracting Source Characteristics and Dynamics of the August 2010 Mount Meager Landslide from Broadband Seismograms[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2013, 118(3):1472-1490.
- [32] EKSTRÖM G, STARK C P. Simple Scaling of Catastrophic Landslide Dynamics[J]. Science, 2013, 339:1416-1419.
- [33] COOK K L, REKAPALLI R, DIETZE M, et al. Detection and Potential Early Warning of Catastrophic Flow Events with Regional Seismic Networks[J]. Science, 2021, 374:87-92.
- [34] 李俊, 陈宁生, 赵苑迪. 基于地震波解译的2000年易贡滑坡-碎屑流动力学过程分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(10):142-149.
- LI Jun, CHEN Ning-sheng, ZHAO Yuan-di, et al. Analysis on Debris Flow Dynamic Process of 2000 Yigong Landslide Interpreted Based on Seismic Wave[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(10):142-149.
- [35] 曾求, 储日升, 盛敏汉, 等. 四川丹巴梭坡滑坡微震信号初探[J]. 中国地震, 2021, 37(2):300-308.
- ZENG Qiu, CHU Ri-sheng, SHENG Min-han, et al. Preliminary Study on Microseismic Signals of Danba Suopo Landslide in Sichuan Province[J]. Earthquake Research in China, 2021, 37(2):300-308.
- [36] DEPARIS J, JONGMANS D, COTTON F, et al. Analysis of Rock-fall and Rock-fall Avalanche Seismograms in the French Alps[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(4):1781-1796.
- [37] HIBERT C, MANGENEY A, GRANDJEAN G, et al. Automated Identification, Location, and Volume Estimation of Rockfalls at Piton de la Fournaise Volcano[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(5):1082-1105.
- [38] LEVY C, MANGENEY A, BONILLA F, et al. Friction Weakening in Granular Flows Deduced from Seismic Records at the Soufrière Hills Volcano, Montserrat[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(11):7536-7557.
- [39] DAMMEIER F, MOORE J R, HASLINGER F, et al. Characterization of Alpine Rockslides Using Statistical Analysis of Seismic Signals[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, 116(F4):F04024.
- [40] FARIN M, MANGENEY A, TOUSSAINT R, et al. Characterization of Rockfalls from Seismic Signal; Insights from Laboratory Experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(10):7102-7137.
- [41] FARIN M, MANGENEY A, DE ROSNY J, et al. Link Between the Dynamics of Granular Flows and the Generated Seismic Signal; Insights from Laboratory Experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(6):1407-1429.
- [42] FARIN M, MANGENEY A, DE ROSNY J, et al. Relations Between the Characteristics of Granular Column Collapses and Resultant High-frequency Seismic Signals[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(12):2987-3021.
- [43] 邓凯丰, 程谦恭, 林棋文, 等. 碎屑流撞击地面的震动信号特征分析[J]. 工程地质学报, 2020, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-281.
- DENG Kai-feng, CHENG Qian-gong, LIN Qi-wen, et al. Characteristic Analysis of the Seismic Signal for Granular Flow Impacting the Ground[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-281.
- [44] LIN Q W, WANG Y F, CHENG Q G, et al. Characteristics of the Seismic Signal Generated by Fragmental Rockfalls; Insight from Laboratory Experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2022, 127(11):025096.
- [45] 杨宗佶, 刘刚, 刘世皓, 等. 碎屑流-堵河震动频谱特征识别的试验研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4):19-26.
- YANG Zong-ji, LIU Gang, LIU Shi-hao, et al. Experiment on the Identification of Seismic Spectrum Cha-

- acteristics of Granular Flow Blocking Rivers[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 19-26.
- [46] SALÓ L, COROMINAS J, LANTADA N, et al. Seismic Energy Analysis as Generated by Impact and Fragmentation of Single-block Experimental Rockfalls[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2018, 123(6): 1450-1478.
- [47] FENG Z Y, ZHUANG R C. Characteristics of Seismic and Acoustic Signals of Rock Falls: An Experimental Study[J]. Landslides, 2021, 18(11): 3695-3706.
- [48] BACHELET V, MANGENEY A, TOUSSAINT R, et al. Acoustic Emissions of Nearly Steady and Uniform Granular Flows: A Proxy for Flow Dynamics and Velocity Fluctuations[J]. arXiv, 2021, DOI: 10.48550/arXiv.2101.04161.
- [49] FARIN M, MANGENEY A, DE ROSNY J, et al. Experimental Validation of Theoretical Methods to Estimate the Energy Radiated by Elastic Waves During an Impact[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362: 176-202.
- [50] PAN C P, ZHENG B, WU Y Z, et al. Detrended Fluctuation Analysis of Human Brain Electroencephalogram[J]. Physics Letters A, 2004, 329(1/2): 130-135.
- [51] KWAPIEN J, OSWIECIMKA P, DRZDZ S. Detrended Fluctuation Analysis Made Flexible to Detect Range of Cross-correlated Fluctuations[J]. Physical Review E, 2015, 92(5): 052815.
- [52] PENG C K, BULDYREV S V, HAVLIN S, et al. Mosaic Organization of DNA Nucleotides[J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1685-1689.
- [53] MOVAHED M S, JAFARI G R, GHASEMI F, et al. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Sunspot Time Series[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2006, 2006(2): P02003.
- [54] 霍鹏举, 史云鹏, 朱长发, 等. 小波去噪在数字信号去噪中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(17): 196-198.
- HUO Peng-ju, SHI Yun-peng, ZHU Chang-fa, et al. The Application of Wavelet De-noising in the Digital Signal De-noising[J]. Computer Knowledge and Technology, 2019, 15(17): 196-198.
- [55] 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.
- DENG Kai-feng. Seismic Signal Characteristics and Inversion Analysis of Rockfall Stone Impact and Fragmentation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [56] ARIAS A. A Measure of Earthquake Intensity[M]// HANSEN R. Seismic Design for Nuclear Power Plants. Cambridge: MIT Press, 1970: 438-483.
- [57] FARIN M, TSAI V C, LAMB M P, et al. A Physical Model of the High-frequency Seismic Signal Generated by Debris Flows[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(13): 2529-2543.
- [58] HIBERT C, EKSTRÖM G, STARK C P. The Relationship Between Bulk-mass Momentum and Short-period Seismic Radiation in Catastrophic Landslides[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2017, 122(5): 1201-1215.
- [59] HUANG C J. Monitoring the Ground Vibrations of Debris Flows Using Geophones[R]. Taipei: The Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, 2004.
- [60] HUANG C J, YIN H Y, CHEN C Y, et al. Ground Vibrations Produced by Rock Motions and Debris Flows[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F2): F02014.
- [61] 李 伟, 俞言祥, 肖 亮. 阿里亚斯强度衰减关系分析[J]. 地震学报, 2017, 39(6): 921-929, 976.
- LI Wei, YU Yan-xiang, XIAO Liang. Attenuation Relationship of Arias Intensity[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(6): 921-929, 976.
- [62] 李雪婧, 徐伟进, 高孟潭. 芦山地震强地面运动之阿里亚斯强度及 Newmark 位移特征研究[J]. 地震学报, 2021, 43(6): 768-786.
- LI Xue-jing, XU Wei-jin, GAO Meng-tan. Characteristics of Arias Intensity and Newmark Displacement of Strong Ground Motion in Lushan Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(6): 768-786.
- [63] VILAJOSANA I, SURIÑACH E, ABELLÁN A, et al. Rockfall Induced Seismic Signals: Case Study in Montserrat, Catalonia[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(4): 805-812.
- [64] YAN Y, CUI Y F, HUANG X H, et al. Combining Seismic Signal Dynamic Inversion and Numerical Modeling Improves Landslide Process Reconstruction[J]. Earth Surface Dynamics, 2022, 10(6): 1233-1252.