

DOI:10.11918/202310045

# 滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律

王佳佳,陈浩军,肖莉丽,李枝强,蔡宗润,孙兆龙

(长安大学 公路学院,西安 710064)

**摘要:**为深入探究滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律,通过简化地形特征,考虑体积效应和启滑高度关键因素,建立室内滑坡碎屑流试验模型,监控并获取模型运动与堆积过程特征参数,揭示滑坡碎屑流运动学特征。此外,应用TS方法模拟滑坡碎屑流缩尺模型的运动全过程,反演获得碎屑流模型关键动力学参数,结合试验和数值方法定量研究碎屑流的运动过程(距离、厚度、速度等)、堆积特征以及能量转化规律。结果表明:滑坡体积与启滑高度对碎屑流最大运动距离的影响程度较为相近,启滑高度对堆积体宽度几乎没有影响;碎屑流平均速度先增大至峰值后逐渐减小,速度峰值受到启滑高度影响明显,碎屑流前缘速度显著大于中部及后缘速度;碎屑流重力势能转化为动能的效率在10%~25%,且转化效率随着启滑高度的增加而增大,而体积对转化效率影响较小。综合研究了滑坡碎屑流运动堆积特征和能量耗散规律,成果对滑坡碎屑流动力学机制研究提供支撑,对防灾减灾具有一定的价值。

**关键词:**滑坡-碎屑流;运动特征;堆积形态;能量耗散;物理模型试验;Tsunami Squares方法

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0063-09

## Motion and accumulation characteristics and energy dissipation laws of landslide-debris flow

WANG Jiajia, CHEN Haojun, XIAO Lili, LI Zhiqiang, CAI Zongrun, SUN Zhaolong

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to further study the motion and accumulation characteristics and energy dissipation landslide debris flow, we established an experimental model of landslide debris flow by simplifying terrain features and considering key factors such as volume effect and start slip height. The characteristic parameters and accumulation process are monitored and obtained to reveal the kinematic characteristics of landslide debris flow. In addition, the TS method is used to simulate the movement process of landslide debris flow, and the key dynamic parameters are obtained by inversion. Combined with experimental and numerical methods, we quantitatively studied the motion process (distance, thickness, velocity, etc.), accumulation characteristics and energy conversion law of debris flow. The results show that the landslide volume and slip height have similar effects on the maximum movement distance of debris flow, while slip height has minimal effect on the width of accumulation body. The average velocity with time is in the form of a parabolic downward opening, and the peak velocity is obviously affected by height, and the velocity of the leading edge is greater than that of the middle and trailing edge. The conversion efficiency of the gravitational potential energy into kinetic energy is between 10% and 25%, and the conversion efficiency increases with the height of start slip, while the volume has little effect on the conversion efficiency. This paper comprehensively investigates the accumulation characteristics and energy dissipation law of landslide debris flow, and the results provide support for the study of the mechanism of landslide debris flow mechanics, which is of certain value for disaster prevention and mitigation.

**Keywords:** landslide-debris avalanche; motion characteristics; accumulation pattern; energy dissipation; physical model experiment; Tsunami Squares method

滑坡-碎屑流是大规模滑坡或崩塌在源区失稳后经过强烈的碎屑化作用而形成的岩土碎屑流,其表现出超高的运动速度( $>5$  m/s)、超远的搬运距

离,一旦发生往往产生灾难性后果,严重威胁着潜在灾害范围内的生命和财产安全<sup>[1-3]</sup>。国内外滑坡-碎屑流灾害时有发生,例如:1903年加拿大 Frank 滑

收稿日期: 2023-10-19;录用日期: 2023-11-09;网络首发日期: 2023-12-21

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231221.1244.002>

基金项目: 国家自然科学基金(41907234;41907237)

作者简介: 王佳佳(1988—),男,博士,副教授

通信作者: 肖莉丽,llxiao@chd.edu.cn

坡-碎屑流以  $4 \times 10^7 \text{ m}^3$  的碎屑体积在 30 s 内运动了 2.5 km, 造成超过 10 000 人遇难<sup>[4]</sup>。2010 年四川汉源二蛮山滑坡形成约  $4.8 \times 10^5 \text{ m}^3$  的碎屑体, 运动近 1.4 km 距离, 迫使 1 500 人紧急转移并造成 20 人失踪<sup>[5]</sup>。2017 年四川茂县新磨村滑坡-碎屑流体积约  $4.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 运动距离超过 2.5 km, 最大运动速度达 74.6 m/s, 造成 10 人遇难和 73 人失踪<sup>[6]</sup>。2019 年贵州水城县“7·23”滑坡-碎屑流总体积  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 运动距离达 1 350 m, 造成近 1 600 人受灾, 43 人遇难和 9 人失联, 直接经济损失高达 1.9 亿元<sup>[7]</sup>。近年来, 全球范围内板块运动活跃且极端气候趋势显著, 叠加巨震的长期效应, 中国山区滑坡-碎屑流灾害风险持续加剧且灾变后果愈趋严重<sup>[8]</sup>。因此, 探讨滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律是滑坡-碎屑流研究中的重要组成部分。

针对滑坡-碎屑流运动堆积特征, 相关学者考虑滑坡体与地形等因素开展研究并取得了大量成果。李祥龙等<sup>[9]</sup>利用二维颗粒离散元数值模拟方法, 分析了岩石碎屑流初始高度、体积、斜面坡度、堆积底面摩擦系数以及堆积底面地表起伏程度对于岩石碎屑流最大运移距离的影响。Manzella 等<sup>[10]</sup>研究了材料体积、初始高度、滑床的坡度、坡脚连接等因素对运动特征的影响。郝明辉等<sup>[11]</sup>通过开展室内模型试验, 研究碎屑粒径、滑床糙率和挑坎对运动特性的影响。王玉峰等<sup>[12]</sup>以谢家店子滑坡地形为基础进行三维物理模型试验, 研究了其流态化运动与堆积特征及真实复杂地形环境对滑坡-碎屑流运动堆积的影响。袁锦涛等<sup>[13]</sup>运用离散元方法定量地研究场地偏转和分形维数对滑坡碎屑流运动堆积特性及滑坡碎屑流堆积体颗粒反序结构特征的影响规律。以上学者采用物理模型试验或数值模拟的单一方法探究了滑坡-碎屑流的运动堆积特征, 取得的研究成果对滑坡碎屑流机理研究具有重大意义。

滑坡-碎屑流运动过程中速度变化以及能量耗散规律对分析滑坡致灾范围至关重要, 也是滑坡-碎屑流动力学研究的关键内容。袁锦涛等<sup>[14]</sup>通过分析滑坡碎屑流颗粒冲击过程中的能量交换和接触作用力及冲击过程过后的堆积形态, 为滑坡碎屑流灾害的防治提供了参考。高杨等<sup>[15]</sup>通过选取 Frictional、Voellmy 等流变模型, 模拟了滑坡运动全过程, 得到滑坡运动速度的变化规律。吴越等<sup>[16]</sup>基于滑体下滑运动机理提出了一种考虑内部耗能的运动模型, 在一定程度上反映了滑体运动过程中内部崩解摩擦耗能的规律。葛云峰等<sup>[17]</sup>基于室内试验, 获取了运动过程中滑体颗粒的速度与位移等参数, 揭示了高速远程滑坡运动堆积过程中滑体颗粒间能量

传递的现象。周月等<sup>[18]</sup>通过开展滑坡运动冲击破碎物理模型试验, 探究了能量耗散的类型及其影响因素。但上述学者仅对滑坡-碎屑流能量的传递与耗散进行了定性分析, 未能定量的探究滑坡-碎屑流在运动过程中能量的转化。

本文采用物理模型试验与数值模拟相结合的方法, 研究滑坡-碎屑流运动堆积特征及能量耗散规律。物理模型试验探究碎屑流的运动堆积特征, 为数值模拟提供初始条件和边界条件; 此外, 采用 Tsunami Squares (TS) 数值方法完整反演物理模型试验的全过程, 针对碎屑流的运动速度、能量转化等参数进行定量研究。本文成果支撑滑坡-碎屑流灾害动力学机理研究, 对滑坡-碎屑流灾害防治具有重要的意义。

## 1 物理模型试验设计

### 1.1 试验装置

滑坡碎屑流的运动过程可分为启滑、运移和堆积 3 个阶段。本试验依据典型滑坡碎屑流的地质模型, 选取试验模型与原型的长度相似比为 1:200, 同时遵守运动相似、动力相似和几何相似准则, 设计了一个可以装载和释放碎屑体的矩形滑槽, 通过控制不同的碎屑流初始体积和启滑高度, 以此来探究滑坡碎屑流的运动堆积特性。滑槽试验装置如图 1 所示, 图 1(a) 为平面图, 图 1(b) 为 Y 轴方向剖面图。

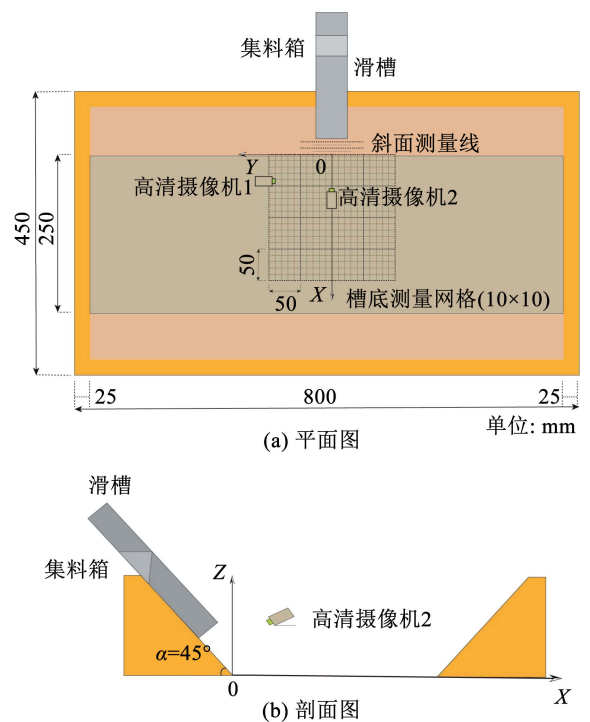


图 1 试验模型装置

Fig. 1 Test model device

试验装置包括集料箱、不锈钢滑槽、运动堆积区等。滑槽模型长 2.0 m, 宽 0.5 m, 高 0.5 m, 固定在倾角  $\alpha = 45^\circ$  倾斜坡面上。滑槽底面为不锈钢材质, 两侧为透明亚克力板, 便于观察碎屑流的运动过程。集料箱设置于滑槽内部宽度为 0.5 m, 试验选用粒径为 0.1 ~ 1.5.0 cm、平均密度为 2.2 g/cm<sup>3</sup> 的天然鹅卵石, 能较好地模拟碎屑流物质, 初始堆积体形状

为直角三棱柱体。在水泥斜面上绘制测量线, 基线高差为 10 cm; 滑槽底部堆积区绘制 10 cm × 10 cm 的测量网格。同时, 以滑槽底面中线与槽底的交点为原点  $O$ , 滑槽底面与水泥斜面交线为  $Y$  轴, 垂直于  $Y$  轴方向为  $X$  轴, 垂直于底面的为  $Z$  轴, 建立三维直角坐标系, 如图 2 所示。

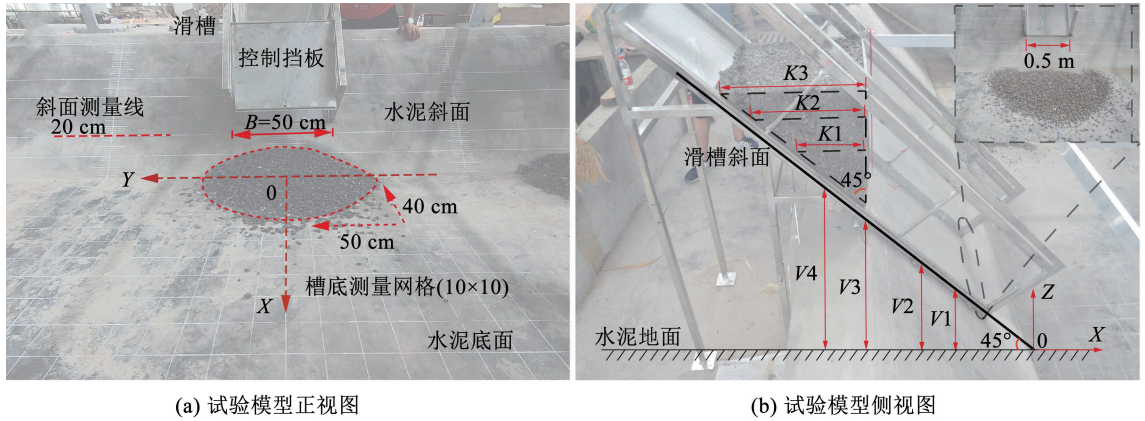


图 2 物理模型试验实物  
Fig. 2 Physical models test objects

## 1.2 数据采集与处理

试验过程中主要量测内容包括: 滑坡-碎屑流运动特征、碎屑流堆积特征(包括碎屑流堆积范围、堆积形状、堆积厚度等)。采用两部高清摄像机从下滑侧面和正面分别记录滑坡-碎屑流启滑、运动和堆积的全过程, 高清摄像机采集图像分辨率为 1 440 p, 拍摄刷新率为 60 帧/s。碎屑流堆积范围及形状由标注在滑槽底部的正方形网格(10 cm × 10 cm)和倾斜坡面的测量线确定, 同时由高清照相机记录堆积形态, 堆积体厚度使用测量针测量获取。将所获得的试验数据导入到 Origin 软件及 Adobe Illustrator 软件进行处理并绘制平面图、 $X = 20$  cm 横剖面图及  $Y = 0$  cm 纵剖面图。

## 1.3 试验工况及参数

为研究滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律, 试验设置了单因素(碎屑流初始体积、启滑高度)对照组试验。考虑数值分析中滑体模型建立的便利性, 设置顺滑槽倾斜的三角形形状滑体, 初始体积编号分别为 K1、K2 和 K3。各工况初始状态碎屑流底部距离槽底的距离编号分别 V1、V2、V3、V4。初始体积为 25 cm × 25 cm × 50 cm × 1/2, 启滑高度为 30.7 cm 的试验工况编号为 K1V1。依此类推, 本试验设置 3 种体积、4 种启滑高度, 共计 12 组试验工况见表 1。

表 1 试验工况设计

Tab. 1 Design of test conditions

试验编号	初始体积/dm <sup>3</sup>	启滑高度/m
K1V1	165.25	0.307
K1V2	165.25	0.476
K1V3	165.25	0.780
K1V4	165.25	1.063
K2V1	306.25	0.307
K2V2	306.25	0.476
K2V3	306.25	0.780
K2V4	306.25	1.063
K3V1	625.00	0.307
K3V2	625.00	0.476
K3V3	625.00	0.780
K3V4	625.00	1.063

## 2 运动过程和堆积形态

### 2.1 运动过程

滑坡碎屑流的运动具有明显的流动性, 基于试验分析将运动过程分为 3 个阶段: 初始运动阶段、加速运动阶段、减速堆积阶段。以 K2V1 工况的碎屑流运动过程为例: 当  $t = 0$  s 时, 打开控制挡板, 初始滑体在重力、基底摩擦力及内部摩擦力作用下开始运动; 当  $t = 0.4$  s 时, 碎屑流颗粒脱离挡板束缚向两侧挤出, 此阶段碎屑流整体滑动速度较小, 最大速度约 0.19 m/s。当  $t = 0.8$  s 时, 碎屑流沿着倾斜坡面向下滑动, 卵石颗粒的运动表现出滑动、滚动等方

式,碎屑流前缘颗粒主要以滑动为主,中部及后缘由于颗粒间的挤压作用,使得该部分颗粒运动方式以滚动为主,颗粒运动速度不断增大,最大为 1.75 m/s 左右。当  $t = 1.2$  s 时,前缘的碎屑流颗粒已静止于水平面上,碎屑流进入减速堆积阶段,此时少量的中

后缘碎屑流颗粒继续冲击扰动堆积体,缓慢地改变堆积体形态,随后颗粒流速度下降,堆积体形态趋于稳定,最终在斜面与水平面交界附近形成类似扇形堆积体,外围分布少量散体颗粒(图 3)。

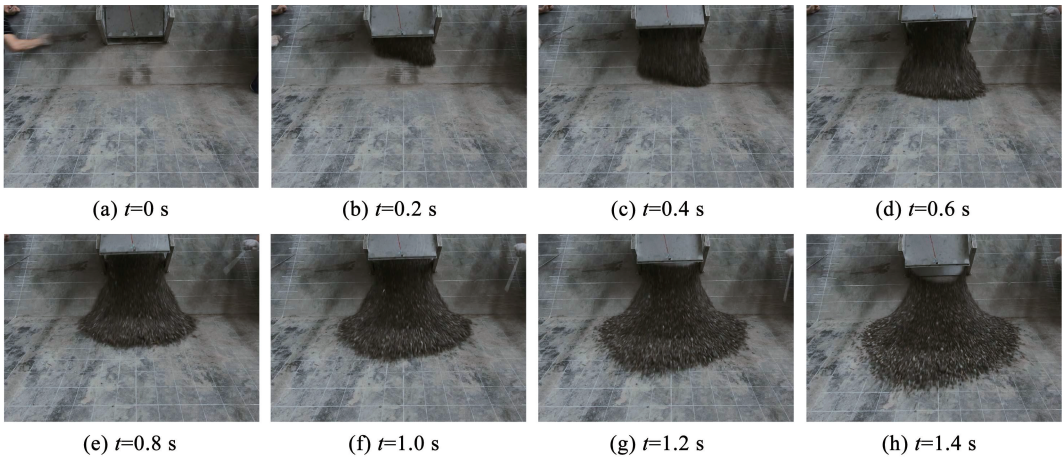


图 3 K2V1 工况的碎屑流运动过程

Fig. 3 Movement process of debris flow in K2V1 condition

### 2.2 运动距离

由于体积  $K2$  近似为  $K1$  的 2 倍,高度  $V4$  近似为  $V2$  的 2 倍,故本节选用表 2 中的 3 种工况进行分析,以探究滑坡碎屑流启滑高度与初始体积对碎屑流最大运动距离的影响。

表 2 碎屑流运动距离

Tab. 2 Debris flow movement distance

试验编号	初始体积/dm <sup>3</sup>	启滑高度/m	最大运动距离/m
K1V2	165.25	0.476	0.74
K1V4	165.25	1.063	0.92
K2V2	306.25	0.476	0.99

$K1V4$ 、 $K2V2$  由  $K1V2$  控制体积变高度和控制高度变体积得到,两者的最大运动距离变化差值为 0.07 m,说明体积高度翻倍对碎屑流最大堆积距离的作用基本一致。因此,滑坡碎屑流的最大堆积距离受到初始体积与初始高度的影响较为相近。

### 2.3 堆积体形态特征

试验中,碎屑流模型经启动和加速运动过程后,最终减速堆积在试验水平堆积区,形成类似扇形的堆积体,相较于初始流动状态堆积体长度和宽度显著增加,充分体现了碎屑流运动的流动性。此外,碎屑体大部分堆积在后缘坡角处,且堆积体的厚度呈现由后缘向前缘逐渐减小形态(图 4)。本次试验主要考虑滑坡碎屑流初始体积与启滑高度两个变量设计试验工况,基于不同工况结果探讨以上两类因素对滑坡堆积体形态的影响。

#### 2.3.1 启滑高度的影响

首先,控制试验模型体积恒定,研究不同启滑高

度下碎屑流堆积形态的变化特征。图 4 将 12 组试验数据按照体积相同分为 3 组绘制成图,详细记录了堆积体的平面位置、 $X = 20$  cm 横剖面厚度、 $Y = 0$  cm 纵剖面厚度。

由图 4 可知,在碎屑流体积不变条件下,启滑高度越高,堆积体运动距离越远,堆积面积越大且面积增长体现在长度方向,堆积体最大宽度几乎没有变化,说明启滑高度对滑坡碎屑流堆积宽度的影响较小。从堆积体平面形态来看,启滑高度越高,下滑冲击槽底面的速度越大,导致平面形态更类似于“长锥形”;而启滑高度越小,平面形态越类似于颗粒的自然堆积形态。启滑高度决定滑体初始条件下的重力势能,启滑高度增加即滑体初始势能增大,使碎屑流在运动过程中所获得的动能越多,从而使得碎屑流具有更强的流动性和更大的运动速度,导致在运动堆积过程中形成较长的流动距离和较大的堆积面积。

由  $X = 20$  cm 横剖面图、 $Y = 0$  cm 纵剖面图可知,堆积体平均厚度相差不大,最大厚度位置随启滑高度增加向运动方向偏移。启滑高度越低,滑坡碎屑流集中分布在坡脚附近,导致该处厚度大,整体分布不均匀;启滑高度越高,堆积体最大厚度越小且分布更均匀。

#### 2.3.2 初始体积的影响

通过控制试验模型启滑高度恒定,可以研究不同初始体积下碎屑流堆积形态的变化特征。图 5 将 12 组试验数据按照启滑高度相同分为 3 组绘制成图,详细记录了堆积体的平面位置、 $X = 20$  cm 横剖面厚度、 $Y = 0$  cm 纵剖面厚度。

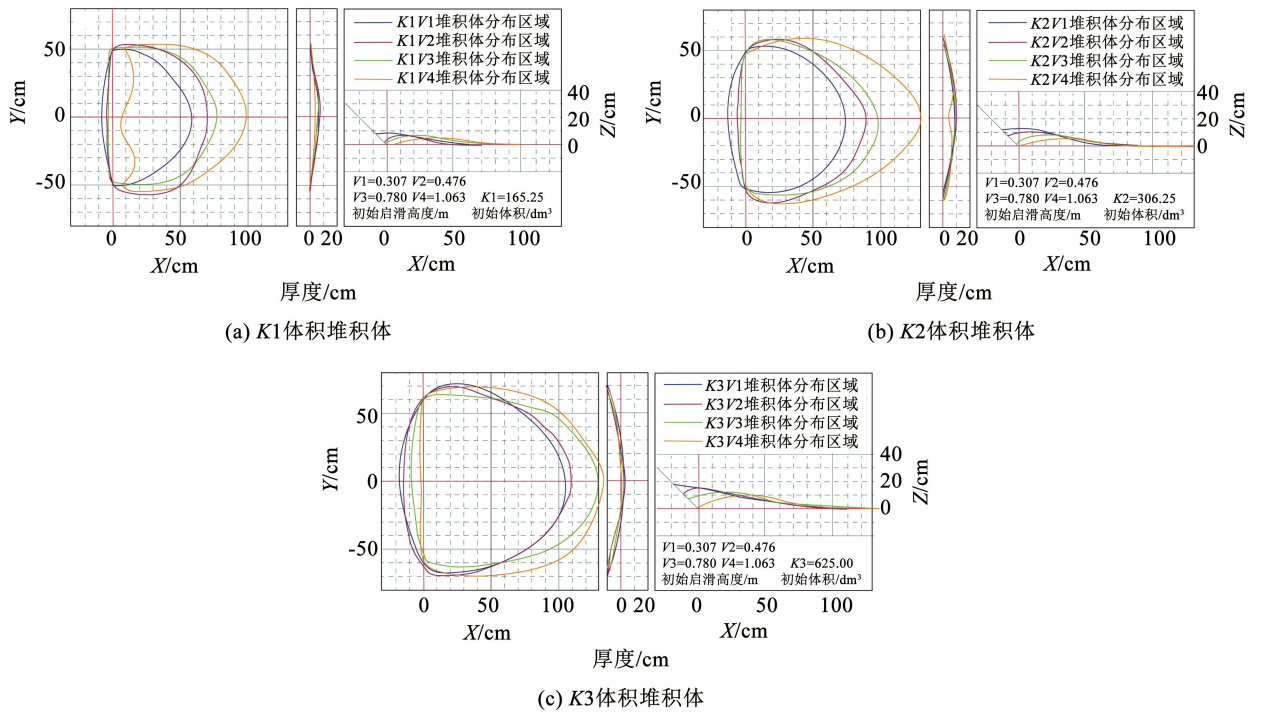


图 4 不同启滑高度的堆积体形态

Fig. 4 Accumulation morphology at different height of slip

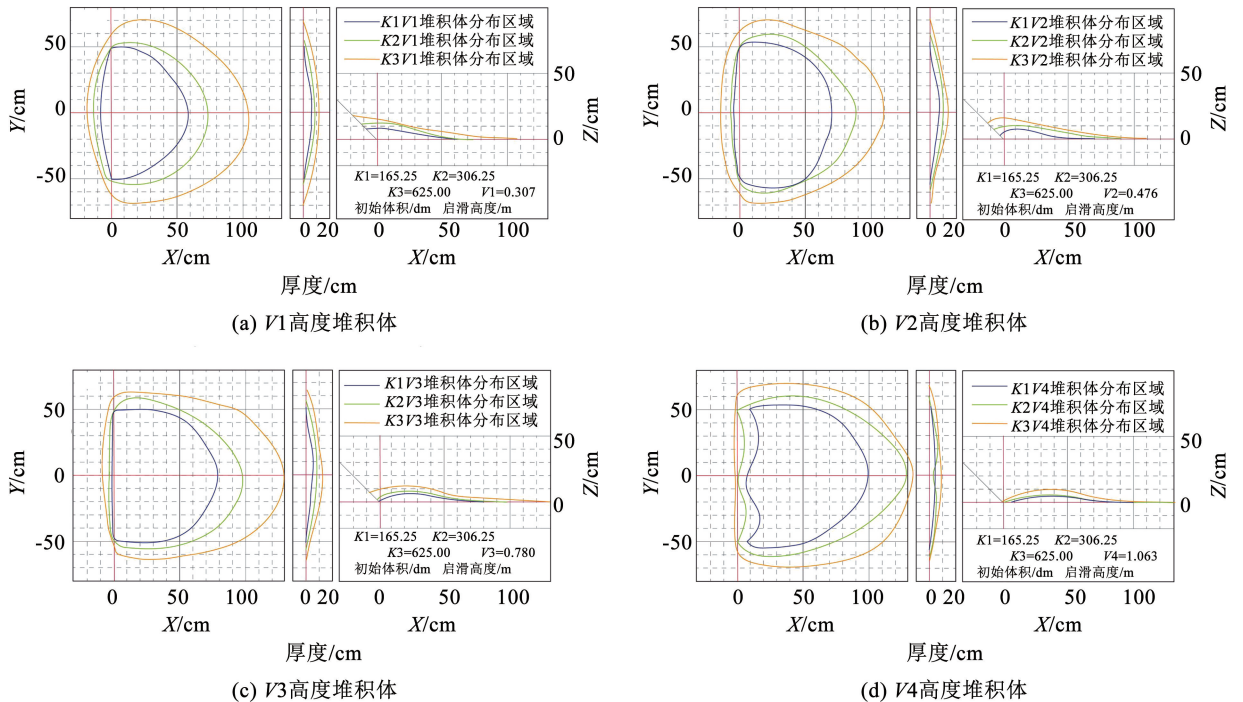


图 5 不同初始体积的堆积体形态

Fig. 5 Accumulation morphology at different initial volumes

由图 5 可知,在所有试验对照组中,启滑高度相同,碎屑流体积增大时,堆积体面积逐渐增大,且体现在宽度和长度都显著增大。该结论与 Davies<sup>[19]</sup>的研究结果一致,利用统计学的方法对大量的滑坡碎屑流进行分析,说明了堆积体体积是影响滑坡碎

屑流运动距离的关键因素,并提出了两者的关系式。在启滑高度相同的条件下,碎屑流质量随碎屑流体积增大而增加,导致碎屑流流动量增加、冲击距离变远,堆积范围扩大等现象。此外,碎屑流体积增大所造成的质量增加与滑体重心上升,使滑体的初始重

力势能增大,也会导致碎屑流出现流动性增强和冲击距离较远等特征。由  $X=20\text{ cm}$  横剖面图、 $Y=0\text{ cm}$  纵剖面图可得,随着体积的增大,堆积体的厚度随之增大,中间部位明显隆起。

### 3 碎屑流速度与能量

本文采用 TS 数值模拟方法对碎屑流试验模型的运动堆积过程进行反演,定量分析碎屑流运动过程中的速度和能量转化规律。基于拉格朗日场与欧拉场耦合的类流体数值方法 Tsunami Squares (TS) 是基于 Tsunami Ball (Ward and Day2008<sup>[20]</sup>, 2011<sup>[21]</sup>) 进行技术改进后提出。该方法与传统的数值模拟方法相比无需复杂的网格和边界处理,具有计算效率高、模拟尺度不受限制、模拟结果准确等优点,该方法已成功用于流体和类流体运动,例如:1792 年 Unzen-Mayuyama 巨型滑坡<sup>[22]</sup>、El Picacho 滑坡<sup>[23]</sup>、三峡水库巩家坊滑坡<sup>[24]</sup>、红岩子滑坡<sup>[25]</sup>、万州孙家镇滑坡<sup>[26]</sup>、三峡库区巫峡段龚家方滑坡涌浪<sup>[27]</sup>等。滑坡碎屑流作为一种固体流,运动过程中具有流体和固体双重属性,其运动状态与环境中的各种参数相关。以往研究中大多将滑坡碎屑流运动中的摩擦力分为两类:一类是与滑坡正应力有关的基底摩擦力,另一类是与运动速度相关的运动摩擦力。TS 方法采用与速度无关的基底摩擦力 (basal

friction) 和与速度平方有关的运动摩擦力 (dynamic drag friction or  $v^2$  friction) 来模拟滑坡碎屑流受阻力运动过程。

通过 TS 数值模拟方法建立原尺寸滑坡碎屑流数值模型:建立与试验环境相一致的数值滑槽,网格尺寸为  $0.01\text{ m}$ ,数值模型初始条件见图 7 ( $t=0\text{ s}$  时刻)。如图 6 所示,数值模拟获得的碎屑流堆积形态数据与模型试验所获得数据进行对比可验证 TS 数值模拟结果与模型试验结果基本吻合,通过反演获取数值模型相关参数。如图 7 所示为 K2V1 工况下 TS 模拟运动过程,本次工况下  $\mu_{b1} = 0.02$ 、 $\mu_{b2} = 0.39$ 、 $\mu_d = 0.2$  ( $\mu_{b1}$  为不锈钢滑槽的基底摩擦系数,  $\mu_{b2}$  为水泥斜面的基底摩擦系数)。

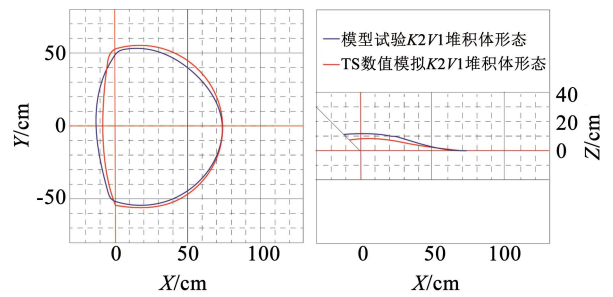


图 6 K2V1 工况 TS 模拟与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of TS simulation and test results in K2V1 condition

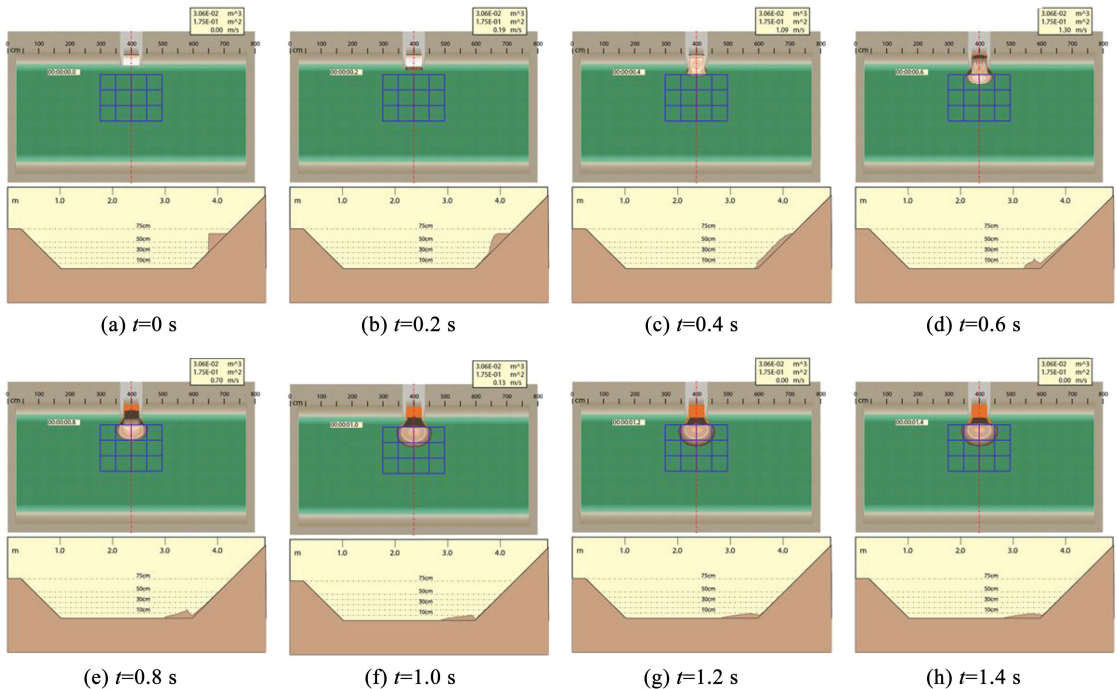


图 7 K2V1 工况下 TS 模拟运动过程

Fig. 7 TS simulates the movement process at K2V1

#### 3.1 速度分析

通过 TS 数值模拟获取滑坡碎屑流运动过程中的平均速度 (所有碎屑流颗粒在某时刻下的速度均

值) 和观测点速度,观测点为水平面上坐标为  $(20\text{ cm}, 0\text{ cm})$  的点。将平均速度及观测点速度按照相同初始体积分组绘制成图 8 和图 9。

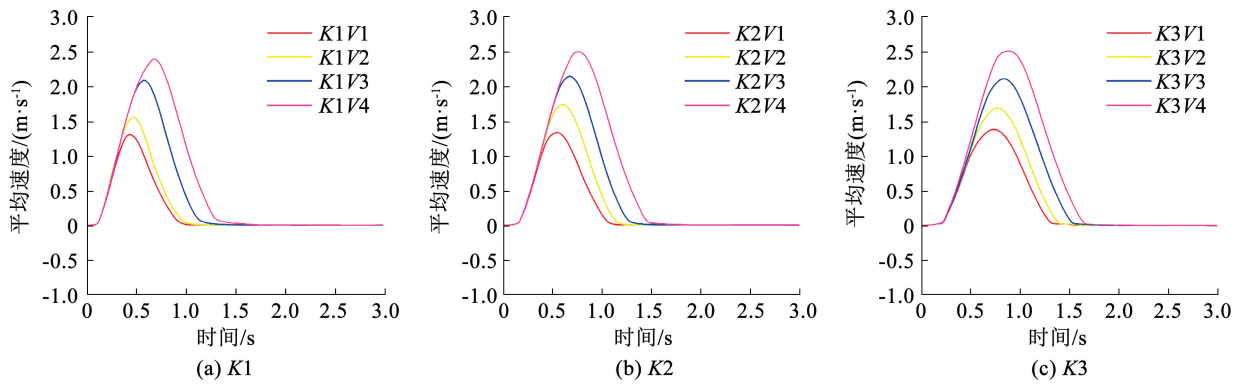


图 8 平均速度

Fig. 8 Average speed

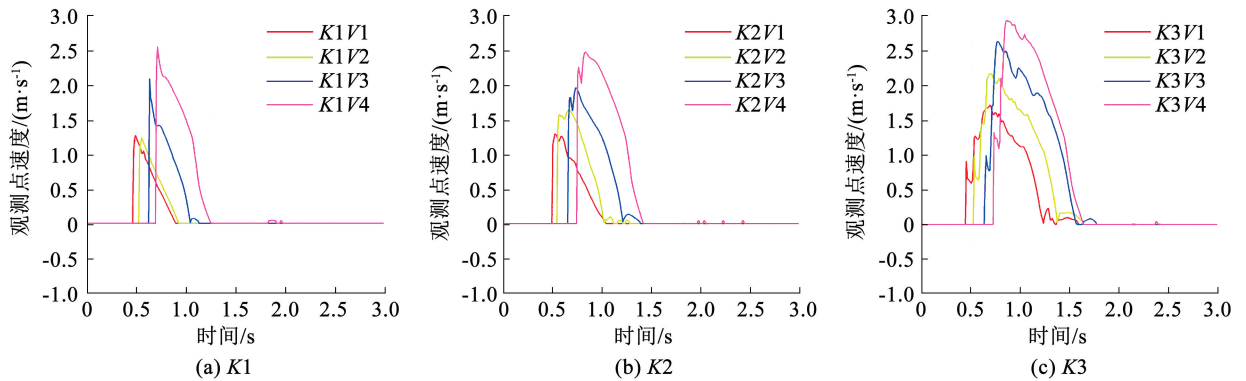


图 9 观测点速度

Fig. 9 Velocity of observation point

由图 8 可知,碎屑流初始体积相同时,由不同的启滑高度下滑后,高度越高平均速度的峰值越大。在最大启滑高度条件下,平均速度峰值接近 2.5 m/s,而在最小启滑高度时,平均速度峰值约为 1.25 m/s。此外,启滑高度越高,平均速度变化的时间跨度越大,平均速度峰值出现的时间也越靠后。相同启滑高度下,平均速度峰值受体积因素的变化影响较小。从平均速度变化趋势角度看,12 组试验的平均速度变化趋势呈现出先增大后减小的二次抛物线形式。

由图 9 可知,碎屑流初始体积相同时,启滑高度越高,碎屑流经过观测点的速度峰值越大,此时的速度为碎屑流前缘到达该点时的速度。此外,在启滑高度相同时,随着体积的增大观测点处的速度峰值也随之上升,观测点速度变化时间范围显著增大。在速度峰值出现之后,碎屑流经过该点的速度不断减小,表明碎屑流在运动过程中前缘速度最大,靠后位置速度较小。

滑坡碎屑流的初始体积和启滑高度都影响其初始势能和动能大小,而碎屑流的流动性和速度随动能增加而增大,因此,滑坡碎屑流的初始体积与启滑高度均对碎屑流运动过程中的速度有显著影响。此外,滑坡碎屑流过程中前缘颗粒率先开始运动且过

程中受到后部颗粒的推动作用;碎屑流中部及后缘的颗粒体在运动过程中与周围颗粒发生碰撞摩擦使其动能下降加快。例如,在点(20,0)速度监测图中可见碎屑流前端到达时经过该点的速度从 0 陡增致峰值,随后碎屑流中部及后缘颗粒经过时速度逐渐降低。

### 3.2 能量分析

采用 TS 数值方法模拟试验模型中滑坡碎屑流运动堆积过程,计算碎屑流时序状态能量,分析滑坡碎屑流运动堆积过程中能量耗散及相互转化的基本规律。图 10 和图 11 分别显示本实验 12 组试验工况的能量转化图。

滑坡碎屑流的初始总能量为其初始势能,在碎屑流运动和堆积过程中,势能逐渐减小,动能逐渐增大,最终因减速堆积势能保持在 10 ~ 20 J 稳定状态,而动能逐步减小为 0。由于运动过程中摩擦耗能,滑坡碎屑流的动能与势能之和逐渐减小。此外,碎屑流运动过程中的能量损失不仅来源于碎屑流与坡面的摩擦作用,还有颗粒间碰撞所造成的能量损失,并以热能、声能等形式向周围环境耗散。

由图 10 可得,同一初始体积下,滑坡碎屑流启滑高度越高起始势能越大,造成运动过程中的动能

峰值、存在动能的时间跨度也越大,所以碎屑流冲击的距离越远。在启滑高度相同时,初始体积越大,起始势能越大,运动过程中的动能峰值越大。随着碎

屑流初始体积的增大,内部颗粒碰撞加剧,尤其是在坡底停积过程中的碰撞,导致堆积体后缘颗粒的停积距离减小。

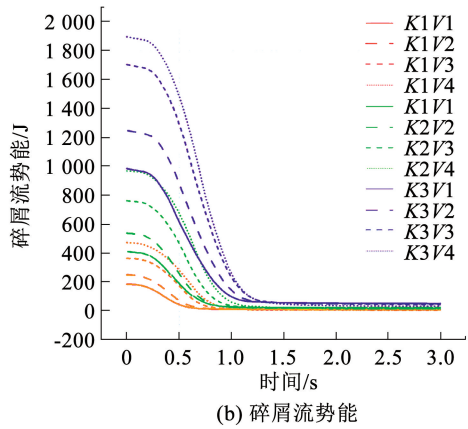
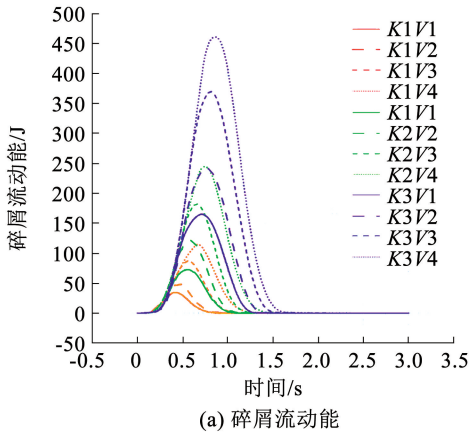


图 10 试验碎屑流能量变化

Fig. 10 The energy change of debris flow was tested

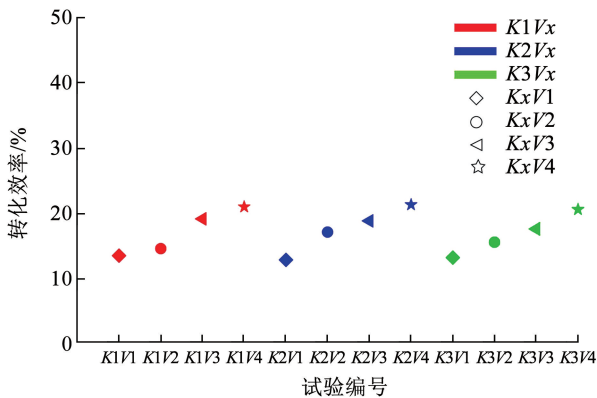


图 11 能量转化效率

Fig. 11 Energy conversion efficiency

由图 11 可知,所有试验组在运动过程中势能转化为动能的转化效率在 10% ~ 25% 之间,与刘艺梁等<sup>[28]</sup>通过分区段力学模型计算所得的能量转化率相近,说明能量转化效率的可信度较高。同时,能量的转化效率与碎屑流的初始体积和启滑高度有明显的相关性,初始体积相同时,下滑高度越大碎屑流的势能转化为动能的转化效率越高;下滑高度相同时,体积因素对能量转化效率的影响不显著。

## 4 结 论

本文以天然卵石模拟滑坡-碎屑流模型,研究启滑高度、初始体积对滑坡-碎屑流运动堆积特征的影响,采用 TS 数值模拟方法,研究滑坡-碎屑流能量耗散及转化规律。得到以下结论:

1) 滑坡-碎屑流在初始运动阶段具有明显的滑塌蠕动特性,运动加速阶段碎屑流前缘以滑动为主,后缘以滚动和跳动为主;滑坡-碎屑流初始体积和启滑高度对碎屑流的最大运动距离有明显影响,体

积与启滑高度对碎屑流最大运动距离和堆积形态影响相近,启滑高度对堆积体宽度几乎没有影响。

2) 滑坡-碎屑流运动过程分为初始塌滑、运动加速、缓慢堆积三个阶段,运动速度先增大后减小,平均速度随时间呈开口向下的抛物线形式,最大平均速度可达 2.5 m/s;随着滑体初始体积和启滑高度的增加,碎屑流运动速度越大。此外,碎屑流在滑动过程中前缘速度远大于中部以及后缘速度。

3) 滑坡-碎屑流在运动和堆积过程中的动能先增大后减小,最后减小为零;碎屑流势能则是一直减小,且减小的速率先快后慢,最后减小至 10 ~ 20 J。碎屑流重力势能转化为动能在效率在 10% ~ 25%,且转化效率随着下滑高度的增加而增大,体积对碎屑流能量转化效率的影响较小。

## 参 考 文 献

[1] 龙艳梅, 宋章, 王玉峰, 等. 基于物理模型试验的碎屑流流态化运动特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 126  
LONG Yanmei, SONG Zhang, WANG Yufeng, et al. An analysis of flow-like motion of avalanches based on physical modeling experiments [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 1266. DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000 - 3665. 202011035

[2] 袁小一, 许强, 程谦恭, 等. 高速远程滑坡-碎屑流超前冲击气浪分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 113  
YUAN Xiaoyi, XU Qiang, CHENG Qiangong, et al. An analysis of air-blasts induced by rock avalanche [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 113. DOI:10. 16030/j. cnki. issn. 1000 - 3665. 2016. 06. 18

[3] 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, 2023(3): 815  
LIN Qiwen, CHENG Qiangong, LI Kun, et al. Review on fragmentation-related dynamics of rock avalanches [J]. Journal of Engineering Geology, 2023(3): 815. DOI:10. 13544/j. cnki. jcg. 2021 - 0035

- [4] CRUDEN D M, HUNGR O. The debris of the Frank Slide and theories of rockslide-avalanche mobility [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986, 23(3): 425. DOI: 10.1139/e86-044
- [5] 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010 年 7·27 四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 609  
XU Qiang, DONG Xiujun, DENG Maolin, et al. The Ermanshan rock slide-debris flow of July 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: characteristics and failure mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 609
- [6] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2612  
XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2612. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2017.0855
- [7] 李华, 史文兵, 朱要强, 等. 贵州省水城县“7·23”灾难性滑坡形成机制研究 [J]. *自然灾害学报*, 2020, 29(6): 188  
LI Hua, SHI Wenbing, ZHU Yaoqiang, et al. Study on the formation mechanism of “7·23” catastrophic landslide in Shuicheng County, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2020, 29(6): 188. DOI:10.13577/j.jnd.2020.0620
- [8] 张贝, 黄雨. 基于离心试验与离散元模拟的滑坡碎屑流冲击效应研究 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(7): 1498  
ZHANG Bei, HUANG Yu. Investigation on the impact effect of debris avalanches based on centrifuge modeling and DEM simulation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(7): 1498
- [9] 李祥龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 岩石碎屑流运移堆积过程数值模拟 [J]. *工程地质学报*, 2011, 19(2): 168  
LI Xianglong, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Numerical simulation of flow and deposition process of rock avalanche [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(2): 168
- [10] MANZELLA I, LABIOUSE V. Empirical and analytical analyses of laboratory granular flows to investigate rock avalanche propagation [J]. *Landslides*, 2013, 10(1): 23. DOI: 10.1007/s10346-011-0313-5
- [11] 郝明辉, 许强, 杨磊, 等. 滑坡-碎屑流物理模型试验及运动机制探讨 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊 1): 127  
HAO Minghui, XU Qiang, YANG Lei, et al. Physical modeling and movement mechanism of landslide-debris avalanches [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup. 1): 127. DOI:10.16285/j.rsm.2014.s1.011
- [12] 王玉峰, 许强, 程谦恭, 等. 复杂三维地形条件下滑坡-碎屑流运动与堆积特征物理模拟实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(9): 1776  
WANG Yufeng, XU Qiang, CHENG Qiangong, et al. Experimental study on the propagation and deposit features of rock avalanche along 3D complex topography [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1776. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.1575
- [13] 袁锦涛, 韩培锋, 欧小红, 等. 基于 DEM 的滑坡碎屑流运动堆积特性研究 [J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(3): 230  
YUAN Jintao, HAN Peifeng, OU Xiaohong, et al. Study of the accumulation characteristics of landslide debris flow movement based on DEM [J]. *Journal of natural disasters*, 2023, 32(3): 230. DOI: 10.13577/j.jnd.2023.0321
- [14] 袁锦涛, 韩培锋, 田述军, 等. 滑坡碎屑流颗粒级配及地形偏转对其冲击和堆积过程的影响研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(5): 1319  
YUAN Jintao, HAN Peifeng, TIAN Shujun, et al. Impact of landslide debris flow particle gradation and terrain deflection on its impact and accumulation process [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(5): 1319. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210533
- [15] 高杨, 殷跃平, 邢爱国, 等. 鸡尾山高速远程滑坡——碎屑流动力学特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(4): 46  
GAO Yang, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4): 46. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.018
- [16] 吴越, 刘东升, 周忠浩. 考虑滑动过程内部崩解耗散的滑坡体运动模型 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 35  
WU Yue, LIU Dongsheng, ZHOU Zhonghao. Mobility assessment model for landslide mass considering disintegration energy consumption in slipping process [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(1): 35
- [17] 葛云峰, 周婷, 霍少磊, 等. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制 [J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3939  
GE Yunfeng, ZHOU Ting, HUO Shaolei, et al. Energy transfer mechanism during movement and accumulation of rockslide avalanche [J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3939. DOI:10.3799/dqkx.2017.589
- [18] 周月, 廖海梅, 甘滨蕊, 等. 滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 726  
ZHOU Yue, LIAO Haimei, GAN Binrui, et al. Physical modeling test on impacting fragmentation during landslide moving [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 726. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0850
- [19] DAVIES T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization [J]. *Rock Mechanics*, 1982, 15(1): 9. DOI: 10.1007/BF01239474
- [20] WARD S N, DAY S. Tsunami balls: a granular approach to tsunami runup and inundation [J]. *Communications in Computational Physics*, 2008, 3(1): 222
- [21] WARD S N, DAY S. The 1963 landslide and flood at Vaiont Reservoir Italy. A tsunami ball simulation [J]. *Italian Journal of Geosciences*, 2011, 130(1): 16. DOI: 10.3301/IJG.2010.21
- [22] WANG Jiajia, WARD S N, XIAO Lili. Tsunami Squares modeling of landslide generated impulsive waves and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama mega-slide in Japan [J]. *Engineering Geology*, 2019, 256: 121. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.020
- [23] WANG J, WARD S N, XIAO L. Numerical modelling of rapid, flow-like landslides across 3-D terrains: a Tsunami Squares approach to El Picacho landslide, El Salvador, September 19, 1982 [J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 201(3): 1534. DOI: 10.1093/gji/ggv095
- [24] XIAO L, WARD S N, WANG J. Tsunami Squares approach to Landslide-Generated Waves: application to Gongjiafang Landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(12): 3639. DOI: 10.1007/s00024-015-1045-6
- [25] XIAO L, WANG J, WARD S N, et al. Numerical modeling of the June 24, 2015, Hongyanzi landslide generated impulse waves in Three Gorges Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2018, 15(12): 2385
- [26] XIAO L, WANG J, ZHU Y, et al. Quantitative risk analysis of a rainfall-induced complex landslide in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir, China [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2020, 11(3): 347. DOI: 10.1007/s10346-018-1057-2
- [27] 肖莉丽. 库岸滑坡涌浪数值模拟研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2015  
XIAO Lili. Numerical simulation of landslide generated waves in reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015
- [28] 刘艺梁, 陈健翔, 高晨曦, 等. 基于滑面分区段力学模型的高速滑坡运动过程能量转化研究 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(2): 139  
LIU Yiliang, CHEN Jianxiang, GAO Chenxi, et al. Energy conversion of the high-speed landslide movement process based on a sliding surface partition mechanical model [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(2): 139. DOI: 10.19509/j.cnki.dzktq.2022.0061