https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.589



# 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制

葛云峰1,周 婷2\*,霍少磊3,夏 丁1,胡 勇1,钟 鹏1,张 莉1

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 清华大学水利水电工程系岩土工程研究所,北京 100091

3. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司,安徽合肥 230601

摘 要:高速远程滑坡往往引发灾难性事故,开展运动堆积过程定量研究,对于探究滑坡发生机理及预测致灾范围具有重要 意义.基于室内物理模型试验,通过 PIV 技术分析高速摄像机在试验过程中拍摄的照片,获取了运动过程中滑体颗粒的水平速 度、竖直速度与位移等运动参数.从滑体颗粒群和不同位置处单体颗粒角度,分析高速远程滑坡的运动演化规律.结果显示: (1)滑体颗粒前端出现高速区,该高速区随着滑坡停止具有一定的保持性.颗粒间存在明显的碰撞现象;(2)从不同位置单体 颗粒来看,前部颗粒位移量最大,速度波动频繁,碰撞频次最高,能量多次补充;中部颗粒位移量其次,速度有波动过程,但不及 前部频繁;后部颗粒位移量最小,速度基本呈递降趋势,能量逐渐减小.结合重庆鸡尾山滑坡以及 Black Rapids Glacier 滑坡实 例分析,揭示了高速远程滑坡运动堆积过程中滑体颗粒间存在碰撞及能量传递现象,从而进一步探究高速远程滑坡形成机制, 在监测预防、灾害治理等方面具有现实指导意义.

关键词:高速远程滑坡;运动堆积过程;PIV技术;模型试验;能量传递;环境地质;工程地质.
中图分类号: P642
文章编号: 1000-2383(2019)11-3939-11
收稿日期:2017-06-19

# Energy Transfer Mechanism during Movement and Accumulation of Rockslide Avalanche

Ge Yunfeng<sup>1</sup>, Zhou Ting<sup>2\*</sup>, Huo Shaolei<sup>3</sup>, Xia Ding<sup>1</sup>, Hu Yong<sup>1</sup>, Zhong Peng<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1</sup>

- 1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
- 2. Institute of Geotechnical Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100091, China
- 3. Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Hefei 230601, China

**Abstract:** Rockslide avalanches usually cause catastrophic accidents. Quantitative study on the movement process of rockslide avalanches is of great significance to the study on the mechanism of landslide occurrence and the prediction of disaster scope. Based on the indoor physical model test, the PIV technique was used to analyze the photographs taken by the high-speed camera during the experiment, and the motion parameters such as the horizontal velocity, vertical velocity and displacement of the sliding particles were obtained. The evolution of rockslide avalanche motion was analyzed from angles of the whole landslide and single particles. The results show follows: (1) the front position of landslide shows high speed spot. The spot keeps high speed though the

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No.41602316);中国地质大学(武汉)英才工程人才培养计划项目(No.20161215);岩土钻掘与 防护教育部工程研究中心开放研究基金项目(No.201502).

作者简介:葛云峰(1985一),男,副教授,博士,从事工程地质研究及相关教学工作,主要从事高速远程滑坡演化机理、岩体结构面粗糙度评价、 地质工程与岩土工程数值模拟等研究. E-mail: cug\_gyf@foxmail.com

<sup>\*</sup>通讯作者:周婷, E-mail: 14zt@cug. edu. cn

引用格式: 葛云峰,周婷,霍少磊,等,2019. 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制.地球科学,44(11):3939-3949.

landslide is ending. (2) From the view of single particles, the front particle is the largest one in displacement and most frequent in velocity fluctuation. The front particles own high collision frequency and their energy gains multiple supplements. The displacement of the middle particles ranks the second place. The velocity of middle particles is fluctuating, but less frequent than those of front. The displacement of the rear particles is the smallest. The velocity and energy generally decrease constantly. It is concluded that there are collision and energy transmission between the sliding particles in the process of rockslide avalanches, combined with the facts found in Jiweishan and Black Rapids Glacier rockslide avalanches. The formation mechanism of rockslide avalanche is also discussed in depth, which is of practical significance to the disaster monitoring, prevention, and control.

**Key words:** rockslide avalanche; process of movement and accumulation; PIV technique; model test; energy transfer; environmental geology; engineering geology.

# 0 引言

高速远程滑坡具有运动速度大、滑行距离长、 致灾范围广的特点."国际地科联滑坡工作组"对于 "极迅速"滑坡下限速度的定义为5m/s,高速远程 滑坡的速度(30m/s以上)则远超这一值.高速远程 滑坡具有超长的运行距离,美国Mount Shasta滑坡 运行距离高达43km.在秘鲁Yungay城、美国华盛 顿等地发生的滑坡造成巨大的人身伤亡及财产损 失(张明等,2010),在我国,重庆武隆鸡尾山地区于 2009年6月发生大型高速远程滑坡(葛云峰等, 2014,2016),损失惨重.

国内外探讨高速远程滑坡形成机制的理论模 型有:(1)空气润滑模型:该理论认为滑体能够以高 速运行,依赖于下落过程中滑体与地面之间储存的 大量空气,圈闭的空气使得固体颗粒间的摩擦力急 剧减小(Kent, 1966). 而在月球、火星表面以及海底 等无空气或少空气环境下,该模型受到极大挑战. (2)颗粒流模型:该理论认为地面的剪切力使得粉 尘等破碎颗粒存在于滑体内部,降低了碎屑颗粒间 的摩擦作用,滑体从而能高速运行较长距离(Hsu, 1975).但该模型不能很好地解释高速远程滑坡的尺 寸效应.(3)底部超孔隙水压力模型:该理论认为滑 体对冰川、淤积层等的铲刮作用,会形成饱和淤泥 层,由此产生的超孔隙水压力使得摩擦阻力减小 (Sassa, 1989). 而该模型运用在无水参与的干碎屑 滑坡时存在一定的局限性.上述滑坡形成机制模型 的合理性往往依附于特定的条件,因此模型的普适 性尚有欠缺.而能量是贯穿不同层次结构的通用物 理量,能够描述宏观微观物质的运动特征.能量传 递理论认为滑体的碎屑颗粒间存在能量传递过程, 前部碎屑接受后部的能量补充获得较高的速度,使 得滑体整体运行较远(Eisbacher, 1979).相对来讲, 能量传递模型具有更为广泛的适用性与合理性,能 够解释高速远程滑坡运动堆积过程中伴随的各种 地质现象.然而对于能量传递机制,目前研究多集 中在理论假设与现象描述层面,并没有开展具有针 对性的试验分析与定量评价.

为了验证高速远程滑坡形成机制理论,研究方 法主要有理论分析、数值模拟、模型试验等(Sassa, 1989; Sosio et al., 2008). 其中模型试验具有再现滑 坡演化全过程的特点,是研究滑坡运动特性的重要 方法.国内外学者对高速远程滑坡运动堆积过程已 成功开展了大量的模型试验研究,如:Hsü(1975)早 在 1966—1967 年期间, 就以膨润土(bentonite suspension)和淤泥混合物(silt mixture)为相似材料,从 几何相似与运动相似两方面成功模拟了高速远程 滑坡的运动堆积过程.Okura et al.(2000a, 2000b)设 计模型试验分析了滑体碎屑流体积对滑体远端及 重心位移的影响.Manzella and Labiouse (2007)通 过模型实验分析了材料类型等系列控制因素对堆 积形态、运行距离的影响.Dufresne(2009)基于滑 梯相似模型试验,研究了不同性质基质材料下的 高速远程滑坡运移与堆积特征.郝明辉等(2014) 设计斜槽实验分析了颗粒粒径、滑床糙率等因素 对滑体整体运动距离的影响.因此,采用模型试验 手段,对滑体颗粒进行追踪,获取详细的运动信 息,精细定量描述滑坡运动全过程,从而来揭示高 速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制,具 有较强的合理性与可行性.但是多数学者开展的 模型试验,分析停留在滑体整体运动特性、影响因 素等方面,在刻画具体的滑坡运动过程时多从定 性角度出发,分析稍显粗略.

本文拟采用 PIV 技术,对模型试验中高速摄像 机拍摄的照片进行图像处理,获得所有滑体颗粒在 运动全过程中的运动信息;同时抓获滑体中不同位 置颗粒,分析其在滑坡过程中的运动过程参数和能 量演化特征.结合理论推导,以及重庆武隆鸡尾山 滑坡、Black Rapids Glacier 滑坡案例分析,旨在揭示 高速远程滑坡在运动堆积过程中的能量传递机制. 本文处理的模型试验照片来自于 Anja Dufresne 博 士于 2009 年共享的资源.

# 1 理论分析

假设滑坡过程中两滑体岩块的碰撞过程如图 1 所示,滑体颗粒 1 从倾角为 $\theta$ ,摩擦系数为 $\mu$ 的斜坡 滑下,斜坡长度为 $S_1$ ,颗粒 1 再运行 $S_2$ 与颗粒 2 接触 产生对心弹性碰撞,碰撞前二者的速度分别为 $v_1$ 和  $v_2$ ,碰撞后速度分别变为 $v'_1$ 和 $v'_2$ .其中两滑块的质 量分别为 $m_1$ 与 $m_2$ .

在滑体颗粒1和2的碰撞过程有,

$$\begin{cases} \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2, \\ m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2', \end{cases}$$
(1)

当v2=0时,有,

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2, \qquad (2)$$

显然有 v<sub>1</sub> < v<sub>1</sub>,即后端滑体碰撞后速度减小,能量 发生损失.

当
$$v_2 \neq 0$$
时,解方程组(1)有,  
 $v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}$ , (3)

$$v_1' - v_1 = \frac{2m_2(v_2 - v_1)}{m_1 + m_2}.$$
(4)

对于滑块1来说,当前端的滑块2速度较小时  $(v_2 < v_1)$ ,否则后端滑块1无法追及滑块2,碰撞也 无法发生.由式(4)得 $v'_1 < v_1$ ,即后端通过向前端 补给动能,而自身动能发生衰减.这样的补给关系 趋向于使二者动能相衡.而实际上,后端有若干能 量不同的颗粒,当某一后部颗粒与前部颗粒达到能 量相恒时,其他滑体碎屑仍可向前段传递能量,从



而使得前端能量最终产生较大增长.

对于滑块2来说,其在斜坡上运动时,

$$m_2 g(\sin\theta - \mu g \cos\theta) = m_2 \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t},\tag{5}$$

$$g(\sin\theta - \mu g\cos\theta) = v \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}s},\tag{6}$$

$$\int_{0}^{s_{1}} g(\sin\theta - \mu g \cos\theta) \,\mathrm{d}s = \int_{v_{0}}^{v} v \,\mathrm{d}v, \qquad (7)$$

设滑体在无扰动情况下下滑即 $v_0 = 0$ .滑块2运行 至斜坡坡脚时的速度为 $v_{20}$ ,解式(7)得,

$$v_{20} = \sqrt{2g(\sin\theta - \mu g \cos\theta)}, \qquad (8)$$

对于滑块1,该过程类似,求得的速度为v10.

滑块2继续运行 $S_2$ 后速度即为两滑块碰撞前滑块2的速度 $v_2$ ,

$$\int_{0}^{s_{2}} (-\mu g \mathrm{d}s) = \int_{v}^{v_{1}} v \mathrm{d}v, \qquad (9)$$

$$v_2 = \sqrt{2g(\sin\theta - \mu g \cos\theta)s_1 - 2\mu g s_2}, \qquad (10)$$

由式(8)、式(10)得, $v_2 < v_{20}$ .

滑块2经历碰撞以后的速度为 $v'_2$ ,

$$v'_{2} = v_{2} + \frac{2m_{1}(v_{2} - v_{1})}{m_{1} + m_{2}}.$$
(11)

当前端颗粒尚未达到与后端能量相衡时( $v_2 < v_1$ ),  $f_1v'_2 > v_2$ .

为了更加直观地表达上述速度大小关系,对式 (1)~(11)中具体参数进行假设.斜坡段 $S_1$ 的水平 投影为0.8 m,倾角 $\theta$ 设置为 $60^\circ$ ,碰撞发生点距离坡 脚的距离( $S_2$ )为0.5 m.滑块1、2的质量均为1 kg,滑 块1与斜坡、水平段的摩擦系数 $\mu$ 为0.45,由于滑块 2与滑块1碰撞前的速度 $v_2$ 小于 $v_1$ ,不妨设滑块2与 斜坡、水平段的摩擦系数 $\mu$ 较滑块1大,为0.6.此时 求得滑块1、2在碰撞前后的运动曲线如图2所示. 依据上述式(1)~(11),可以求出各阶段速度大小, 对应关系为:图2a中A、B、C对应的速度分别为  $v_{10}$ 、 $v_1$ 、 $v_1'$ ;图2b中A、B、C对应的速度分别为  $v_{20}$ 、 $v_2$ 、 $v_2'$ .

从图 2a、2b 可见,碰撞过程致使原本位于后端的较高速物体滑块1,产生一次速度降低,而位于前端的滑块2经历碰撞过程后,速度产生一定增长.

# 2 研究方法

#### 2.1 模型试验

Anja Dufresne博士的模型试验中,装置由滑槽 和斜坡2部分构成,其中滑槽宽30 cm,平直段长 1 m,设置斜坡坡脚为60°.基底材料为金属材料



Fig. 2 The movement curves of sliding block collision

胶结薄层细沙,滑体颗粒材料为6L尺寸为1~ 2.5 cm的煤炭碎屑.试验材料的选取和装置尺寸 的设定,均遵循室内试验与实际情况之间的几何 相似与运动相似.滑槽上方设置有手动启闭的活 动门,试验过程中,让煤炭碎屑从高处滑落,并利 用高速相机拍摄运动整个过程,其中拍摄速度为 1000 fps.图3为滑坡模型试验过程采用高速摄像 机拍摄的滑坡运动过程某一时刻的图片.

该模型试验基底材料采用金属材料胶结薄层 细沙,基底材料相对坚硬,完整性较好;在模型试验 处理过程中没有水参与,滑体相似材料采用破碎煤 块;滑槽采用顺直行结构,滑移路径上不存在障碍 物.基于上述模型试验条件,本文中处理的模型试 验适用于体积较大、滑体较破碎、滑移路径坚硬且 地形平坦,具有一定流动特性的干燥岩质碎屑流.

试验的引发条件为活动门打开,滑体颗粒突然释放.在整个实验过程中,滑体突然释放,颗粒流向前运动,相互挤压作用,最终在表面形成一定的堆积形态.滑坡破坏前经历初始变形、等速变形和加速变形阶段(罗文强等,2016).活动门打开的过程类似于滑坡"锁固段"发生突发性破坏,滑坡模型的发



图 3 滑坡模型实验示意

Fig. 3 The diagrammatic sketch of physical model experiment of rock avalanche 据Dufresne(2009)

生机制有"挡墙溃屈"(黄润秋,2007)的特点.同时, 在试验过程中,滑体前缘率先向临空面滑动,后缘 随后失稳运动.该引发条件,与坡脚卸荷等原因引 起的牵引式滑坡的发生机制有一定的相似性.

#### 2.2 PIV 技术原理

粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)是用成像的方法记录下多次曝光粒子的 位置,利用图像分析技术得到粒子的位移,由位移 及曝光时间间隔得到流场中各点的速度矢量,并可 以计算得出流线图、漩度图等(许联锋等,2003). PIV技术可以用于二维和三维图像测速,包含的技 术方法有灰度分布图像相关法、轨迹法、粒子分布 图像相关法等(董周宾等,2004).

本文利用粒子图像测速软件 PIVLAB 对滑 坡照片资料进行处理.PIVLAB 是由W. Thielicke 与E.J. Stamhuis于 2010年5月设计开发运行在 MATLAB软件下的图像测速软件(Thielicke and Stamhuis, 2014).

PIVLAB软件的操作步骤主要包括前处理、图 像测速、后处理3部分,图像的前处理包括避免曝 光强度不同影响的均衡和有效化等处理方法,图像 后处理包括对获得的数据进行设置速度、几何边 界、筛选过滤、平滑去噪等操作手段.图像测速属 于软件的核心功能部分,前处理与后处理则属于计 算结果优化部分.

核心部分图像处理的主要原理是互相关算法. 待处理图片被划分成很多小区域,称为询问区域, 软件对各询问区域进行互相关计算.本质上,这样 的互相关计算是一种基于统计的图像匹配技术,如 图4中亮点区域在不同图片中得到匹配,可得其在 图中的像素位移(px),再以实际运动参数为参照,



Fig. 4 Pattern cross correlation matching Thielicke and Stamhuis(2014)

从而获得实际位移.结合时间,导出速度等参数.

互相关计算方程如式(12)所示,式中A和B分 别表示图像A、B中的询问区域,矩阵C中的强度峰 值的位置给出颗粒从A到B最可能的位移.

 $C(m,n) = \sum_{i} A(i,j) B(i-m,j-n),$  (12) 式(11)的求解可以通过快速傅里叶变换和直接互 相关2种方法获得,这2种方法在MATLAB中均可 实现且各有优劣.

目前 PIVLAB 工具不仅可以运用于常规流 体测速,此外,在砂砾石变形研究(Huang *et al.*, 1997)、细胞的可视化流动(Ryerson and Schwenk, 2011)以及人体心脏的超声心动图速度 测试等各领域也逐渐发挥作用(Booth-Gauthier *et al.*, 2012; Piro *et al.*, 2012; Panciroli and Porfiri, 2013; Shi *et al.*, 2013).

### 3 处理结果

#### 3.1 滑体前端高速区

处理得出滑体颗粒群的速度分布云图,并进行分析.图5中箭头部分指示速度方向,图5中不同的颜色表示速度的数值大小,蓝色部分速度为0,颜色越接近红色,速度就越大.

由图 5a 可见,随着滑坡进程,滑体前端颗粒 出现颜色深红的高速区,由图 5b 可见,当滑坡即 将结束时(图 5 中表示为恢复为蓝色),前部颗粒 仍能保持较高速度.

作滑坡即将结束时颗粒速度的分布图(图 6)如下,从图6中可以看出速度较高的颗粒多 分布在滑体前部位置.且前部滑体颗粒速度平 均水平高于中后部.

#### 3.2 滑体颗粒间碰撞现象

处理绘制 t=1.919 s时滑体颗粒群速度分布图 如图 7.从图 7 中可见在滑体整体向前运移的大趋势 下,部分颗粒速度矢量箭头向后,速度发生反向.同



图5 滑体前端速度较大且随滑坡停止保持高速

Fig. 5 The front particles own high speed and keep it at the end of landslide



Fig. 6 The scatter plot of particle velocity



图7 颗粒速度反向与滑体前端方向散射现象



时前端颗粒产生了类似于散射的现象,速度方向向 四周散开(如图7中红圈标识所示).分析颗粒的速 度反向和方向散射现象,或是由于颗粒在相互接触 时产生碰撞,导致颗粒原有运动路径受阻从而发生 变向.而前端可观察到的方向散射现象更明显、完 整,或因前段碰撞更加频繁.

#### 3.3 滑体颗粒位置特异性

考虑到不同位置颗粒在整个运动过程中的差 异性.本文在滑体前部、中部以及后部分别选取2个 具体的煤炭颗粒,追踪各颗粒在整个运动过程中的 运动情况.所研究颗粒的位置如图8所示(前1表示 前部位置1号颗粒,其他的类推).

3.3.1 水平运动特征 首先选取离散颗粒群中前 端的颗粒,记录其在滑坡模型试验进程中的运动状态,记录的运动参数包括水平速度 u、竖直速度 v、水 平位移 x、竖直位移 y 及动能 E<sub>k</sub>(假设各颗粒均匀且 为单位质量).同样地,可以得到前 2、中1、中 2、后 1、 后 2 乃至颗粒群中任意颗粒的数据,限于篇幅仅展 示前部 1 号颗粒数据(表 1).

作前部、中部以及后部颗粒的水平速度 u 与水平 位移 x 的图像.对于前部颗粒,从图 9a 中可以看出前 部 2 个研究颗粒在运行过程中速度大小有明显的波动 现象,速度经历多次增长过程.从图 9b 可见中部颗粒 速度波动次数少于前部颗粒.而从图 9c 中可见颗粒的 水平速度随着滑行距离的增长呈持续下降趋势.

**3.3.2 竖直运动特征** 作前部颗粒的竖直速度v与竖直位移y的v-y图,从图10a中可见,前部颗粒竖向位移量较小,竖向位置变幅较大,总体呈现出运动十分杂乱.中部以及后部颗粒竖直方向的运动同样



图 8 颗粒不同位置示意 Fig. 8 The different positions of the particles investigated

表1 前部1号颗粒运动参数

 Table 1
 The movement parameters of the first particle in the front position

u(m/s)	v(m/s)	<i>x</i> (m)	y(m)	$E_k(\mathbf{J})$
0.231	0.146	0.084	0.128	0.037
0.144	-0.022	0.119	0.133	0.011
-0.387	-0.010	0.154	0.126	0.075
-0.008	0.484	0.189	0.119	0.117
-0.377	0.070	0.217	0.112	0.074
-2.026	0.797	0.252	0.112	2.370
3.243	-0.313	0.280	0.119	5.306
1.074	0.129	0.314	0.128	0.585
2.144	1.295	0.314	0.119	3.136
0.039	0.077	0.349	0.133	0.004
0.505	1.706	0.370	0.133	1.582
2.903	-2.358	0.398	0.133	6.995
-0.568	-0.089	0.426	0.126	0.165
-0.077	0.153	0.440	0.119	0.014
1.180	-0.184	0.468	0.133	0.713
-0.502	-0.074	0.496	0.147	0.129
-1.705	-0.023	0.517	0.133	1.454
0.057	-0.037	0.545	0.133	0.002

具有位移量小、杂乱的特点.滑体颗粒在竖直方向出 现这样的特点,或与滑体竖向的厚度较薄有关.

**3.3.3 能量特征**综合颗粒的合运动,可引用颗粒的动能参数*E*<sub>k</sub>.滑坡过程中,滑行距离较受关注,且在本文处理的模型试验中,滑体颗粒在竖直方向较薄、竖直位移y远小于水平位移x,故作*E*<sub>k</sub>-x图像.

从图 11a 中可以看出颗粒的动能变化趋势经历 了数次涨跌的过程,能量多次出现极值,而一次从 跌到涨往往表示了能量的一次补充.从图 11b 中可 以看出,中部颗粒的能量涨落次数不及前部颗粒.



Fig. 9 Horizontal movement of particles in different positions





Fig. 11 The energy changes of particles in different positions

#### 表2 不同位置颗粒运动特征

Table 2 The motion characteristics of particles at different positions

颗粒位置	滑行距离	最大	最小动能	平均动能	碰撞频次
	(m)	动能(J)	(J)	(J)	
前部	0.515	6.007	0.002	1.127	6
中部	0.175	4.899	0.001	1.227	3
后部	0.056	4.662	0.0003	1.785	1

而从图 11c 可见,除局部小波动外,后部颗粒的 能量整体呈持续下降趋势.对分析结果进行量化比 对,总结如表2.

在前文的理论分析中,由图2可见滑块1和2在 碰撞发生点对应呈现速度突变现象,速度图像产生 极值点.而类似的现象从模型试验滑体颗粒的水平 速度u、动能E<sub>k</sub>图中均可以发现.而直观来看碰撞作 为相对剧烈的过程常伴随能量转移和速度突变的 特点,故颗粒E<sub>k</sub>-x图像中能量极值点一定程度上 能反映碰撞发生点.由此可以得出表2中滑体颗粒 碰撞的统计次数.

从表2中可以直观地看出前部颗粒滑行距离最 大,可达0.515 m,中部颗粒与后部颗粒依次降低, 分别为0.175 m、0.056 m.前部颗粒动能瞬间最大值 可达6J,而中后部仅为4J左右.前部颗粒碰撞频次达6次,均高于中部、后部颗粒.

# 4 实例分析

高速远程滑坡的室内研究方法各异,有必要结 合实际案例对研究结果进行比对、分析,从而获得 更准确的结论.本文选取重庆武隆鸡尾山滑坡及美 国 Black Rapids Glacier滑坡进行分析.

#### 4.1 鸡尾山滑坡

2012年8月12日--8月19日期间,笔者随项目 组参与了重庆武隆鸡尾山滑坡现场考察,对堆积区 大块石进行了测量与统计.由于初始3组近似正交 结构面发育,堆积区大块石形状多为长方体,采用 测绳或皮尺测量其长宽高,对于不规则形状块石测 量其近似长宽高,其中堆积区后缘的一最大块石尺 寸可达到36m×22m×27m(图12).同时,利用罗 盘和地形图对块石进行定位.

基于现场测量数据,绘制滑坡堆积块石体积分 布图(图13).由图13可以明显看出:滑坡堆积体后 缘块石较完整且体积较大,体积甚至超过5000 m<sup>3</sup>, 随着距滑源距离越来越远,块石体积逐渐变小,而 前缘滑体岩石破碎最为严重,体积普遍较小,处 于 30~100 m<sup>3</sup>. 这一现象在滑坡堆积区正摄航拍 影像图中也得到了体现(图 14).

由于位于同一研究区域,岩块在岩性、节理 发育、含水量等情况差异不大.此时,块体破碎程 度越大则反映了其受到的碰撞更加强烈.这一现 象与滑体颗粒前段碰撞频次更高的模型试验 PIV处理结果相吻合.

结合模型试验与鸡尾山滑坡现象来看,不难发现滑坡过程中存在碰撞现象,而滑体前部碰撞次数 尤为频繁,随之伴有能量的频繁波动与多次补充.

#### 4.2 Black Rapids Glacier 滑坡

在美国 Black Rapids Glacier 滑坡,滑源区位于 一处冰山的中上部,即为图 15 中字母 S标记的位 置,滑坡体滑下后,崩滑物质覆盖在冰川上形成堆 积区,如图 15 中红色轮廓所示范围.堆积体中发现 有明显的陡坎现象,陡坎的基本走向与分布位置如 图 15 中黑线部分所标示.该处的陡坎或由于滑体后 缘在运动过程中前方受阻速度降低而产生堆积.同 时在模型试验 PIV 处理结果中,正显示后端滑体在 运行堆积过程中能量呈持续降低.

结合模型试验与实际案例来看,在滑体运移





过程中,后缘部分速度持续降低,能量发生消散、 转移.这一过程在现实中反映为低动能的物质逐 渐堆积形成陡坎.

# 5 讨论

在对滑坡能量传递形成机制的研究中,发现滑坡过程中,滑体碎屑物质的空间位置从前至后存在 一定的保持性.这样的次序保持性或因能量传递时 的方向.笔者对鸡尾山滑坡进行数值模型,以一组 颜色序列表征滑体的位置次序,得出结果如图16.

从图 16a 中可看出,在滑坡初期,由前至后滑体颜色为墨绿一蓝一红一草绿一橙,在滑坡结束时,图 16b 颜色顺序基本上保持不变,即滑体位置次序具有一定的保持性.后续将对这一现象进行进一步研究.

同时在滑坡高度、体积与地形条件固定的前 提下,岩体结构特征对高速远程滑坡运动过程影 响不能忽视.下一步研究拟设计更有针对性的物 理模型试验,将高度、体积与地形等因素变量固 定,改变岩体结构特征,如颗粒尺寸、颗粒形状与 颗粒分布等.获取相应工况下的高速远程滑坡运 动过程的运动数据(高速摄像机拍摄的照片),进 一步研究岩体结构特征对运动过程中能量传递 与碰撞碎裂的影响规律.

值得注意的是,高速远程滑坡在运动堆积过程 中会伴随铲刮效应,尤其是在滑移路径土体比较松 散、饱水情况下.在库区等饱水环境下,坡体内有效 应力发生变化(喻孟良等,2016),铲刮作用亦受影 响.铲刮效应设计涉及滑体与基质的相互作用,过 程和机理更为复杂.而解决复杂工程问题一般需要 由简至难逐步推进,本文涉及模型试验基底材料强 度较为坚硬,因此没有反映出铲刮效应,试验工况



图 13 滑坡堆积体块石分布 Fig. 13 The distribution of accumulation body stone in avalanche 据邹宗兴(2014);单位为m<sup>3</sup>

与实际基底较为坚硬的高速远程滑坡边界条件较 为吻合,如在高寒地区发生或者滑移路径出露基岩 的高速远程滑坡,具有一定的适用范围,下一步研 究计划着手研究考虑铲刮效应的能量传递机制.



图 14 滑坡堆积区航拍图 Fig. 14 The aerial image of deposit region of landslide 来源于重庆市土地勘测规划院、中国测绘科学研究院



图 15 Black Rapids Glacier 滑坡中的陡坎现象 Fig. 15 The scarps in the Black Rapids Glacier avalanche 据 Hewitt *et al.*(2008)

将 PIV 处理模型试验的速度结果与实际高 速远程滑坡进行对比.已知对于滑体体积较大的 高速远程滑坡具有一定的流态性质(张明等, 2010),本文处理的模型试验正属于颗粒流.在以 重力为主要动力的流动中,原形与模型流动满足 弗鲁德相似准则(重力相似准则),遵循式(13), 其中v表示速度,*l*为长度,*g*为重力加速度,下标 p表示原形,m表示模型:

$$\frac{v_{\rm p}^2}{l_{\rm p}g_{\rm p}} = \frac{v_{\rm m}^2}{l_{\rm m}g_{\rm m}},\tag{13}$$

即,

$$v_{\rm m} = \sqrt{\frac{l_{\rm m}g_{\rm m}}{l_{\rm p}g_{\rm p}}} v_{\rm p}. \tag{14}$$

根据对国内外217个高速远程滑坡的统计结果 (陈卓根和葛云峰,2016),求得各滑坡最大滑距的 平均值即L=8863.58m,处理的模型试验中滑体的 运行距离为 l<sub>m</sub>= 1.04 m,以高速远程滑坡下限为计 算依据, $v_{\rm p}$ =30 m/s.由式(14)得模型的速度 $v_{\rm m}$ = 0.318 m/s, 与本文试验处理速度大小基本上在同一 数量级.同时可见,文中处理得到的滑体颗粒在某 些时刻的速度与0.318 m/s相比有一定差距,但是 滑体运动堆积过程中的各种现象却是统一的,如碰 撞、破碎和能量传递等过程均能够在模型试验中得 到体现.目前,滑槽试验仍为国内外普遍认可的方 法之一.但是不得不承认,小比例尺模型由于其自 重产生的应力远低于实际滑坡,从而在速度方面存 在差距.为解决这一问题,在后续研究中可以开展 离心机试验,使得原型结构自重应力与室内模型相 同,以准确再现高速远程滑坡运动堆积特征.



图 16 鸡尾山滑体位置次序保持现象 Fig. 16 The phenomenon of landslide position order retention in Jiweishan

### 6 结论

本文借助于粒子图像测速工具 PIVLAB 获得 任意时刻碎屑颗粒流的运动信息.对滑坡中杂乱的 滑体碎屑流进行定量化的运动学分析.首先分析颗 粒群体运动规律,接着选取滑体中不同位置颗粒分 别进行*x*和*y*维度的运动分析,并结合能量分析,概 括得出如下主要结论:

(1)随着滑坡进行,颗粒群前段出现高速区,在 滑坡即将结束时,前端仍能保持较高速度.同时,部 分滑体颗粒出现反向的水平速度分量,且在滑体前 端出现颗粒向四周辐散现象.与理论分析中滑块碰 撞点发生速度突变现象相一致,故可推测,滑坡中 各碎屑颗粒或存在碰撞现象.

(2)不同位置颗粒运动及能量变化具有递变 性规律.滑体前部颗粒滑动距离最大,速度波动 频繁.前部颗粒碰撞频次最高,能量获得多次补 充,瞬间可达较大数值;滑体中部颗粒滑动距离 其次,速度波动及碰撞次数能量均低于前部颗 粒;滑体后部颗粒滑行距离最短,速度鲜少波动, 能量基本呈下降趋势.

(3) 在滑移路径材料较为坚硬条件下,揭示了 高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制, 即在运动堆积过程中,通过碰撞的形式,后缘滑体 将能量传递给前缘滑体做减速运动,前缘滑动接 收能量后加速运动,从而使得前缘滑体获得更高 速度运动更远距离.该滑坡能量传递机制模型在 鸡尾山滑坡、Black Rapids Glacier滑坡等经典滑坡 中获得现实支撑.

致谢:感谢新西兰坎特伯雷大学 Anja Dufresne 博士共享的高速远程滑坡模型试验高速摄像机图 像信息;感谢中国地质大学(武汉)工程学院熊承 仁、刘佑荣、邹宗兴、张龙等老师和学生在堆积体块 石野外测量与统计过程中付出的辛苦劳动!

#### References

- Booth-Gauthier, E. A., Alcoser, T. A., Yang, G., et al., 2012. Force-Induced Changes in Subnuclear Movement and Rheology. *Biophysical Journal*, 103(12): 2423-2431. https://doi.org/10.1016/j.bpj.2012.10.039
- Chen, Z.G., Ge, Y.F., 2016. Forecast Analysis of Movement Distances of High-Speed and Long-Distance Landsides Based on Statistical Methods. *Yangtze River*, 47(12): 42-47 (in Chinese with English abstract).

- Dong, Z.B., Yan, D.P., Zhang, Z.L., et al., 2014. Research on Methods of Sandbox Modeling and Case Study Based on Particle Image Velocimetry (PIV). *Geoscience*, 28 (2): 321-330 (in Chinese with English abstract).
- Dufresne, A., 2009. Influence of Runout Path Material on Rock and Debris Avalanche Mobility: Field Evidence and Analogue Modelling (Dissertation). University of Canterbury, Christchurch.
- Eisbacher, G. H., 1979. Cliff Collapse and Rock Avalanches (Sturzstroms) in the Mackenzie Mountains, Northwestern Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 16(2): 309-334.
- Ge, Y.F., Tang, H.M., Li, W., et al., 2016. Evaluation for Deposit Areas of Rock Avalanche Based on Features of Rock Mass Sructure. *Earth Science*, 41(9):1583-1592 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/ 10.3799/dqkx.2016.117
- Ge, Y.F., Tang, H.M., Xiong, C.R., et al., 2014. Effect of Sliding Plane Mechanical Parameters on Landslide Stability—A Case Study of Jiweishan Rockslide in Wulong, Chongqing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(Suppl. 2): 3873-3884 (in Chinese with English abstract).
- Hao, M.H., Xu, Q., Yang, L., 2014. Physical Modeling and Movement Mechanism of Landslide-Debris Avalanches. *Rock and Soil Mechanics*, 35(Suppl. 1): 128-132 (in Chinese with English abstract).
- Hewitt, K., Clague, J.J., Orwin, J.F., 2008. Legacies of Catastrophic Rock Slope Failures in Mountain Landscapes. *Earth-Science Reviews*, 87(1-2):1-38.
- Hsü, K. J., 1975. Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86(1): 129. https://doi.org/10.1130/0016 -7606(1975)86<129:cdssgb>2.0.co;2
- Huang, H., Dabiri, D., Gharib, M., 1997. On Errors of Digital Particle Image Velocimetry. *Measurement Science* and Technology, 8(12): 1427-1440.
- Huang, R.Q., 2007. Large-Scale Landslide and Their Sliding Mechanisms in China since the 20<sup>th</sup> Century. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433-454 (in Chinese with English abstract).
- Kent, P. E., 1966. The Transport Mechanism in Catastrophic Rock Falls. The Journal of Geology, 74(1): 79-83. https://doi.org/10.1086/627142
- Luo, W. Q., Li, F. A., Liu, X. S., et al., 2016. Evolution Stage Division of Landslide Based on Analysis of Multivariate Time Series. *Earth Science*, 41(4): 711-717 (in Chinese with English abstract).

- Manzella, I., Labiouse, V., 2007. Qualitative Analysis of Rock Avalanches Propagation by Means of Physical Modelling of Non-Constrained Gravel Flows. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 41(1): 133-151. https://doi.org/10.1007/s00603-007-0134-y
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., 2000a. Fluidization in Dry Landslides. *Engineering Geology*, 56(3/4): 347-360. https://doi.org/10.1016/s0013-7952(99)00118-0
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., et al., 2000b. The Effects of Rockfall Volume on Runout Distance. Engineering Geology, 58(2): 109-124. https://doi.org/ 10.1016/s0013-7952(00)00049-1
- Panciroli, R., Porfiri, M., 2013. Evaluation of the Pressure Field on a Rigid Body Entering a Quiescent Fluid through Particle Image Velocimetry. *Experiments in Fluids*, 54(12): 1630. https://doi.org/10.1007/s00348-013-1630-3
- Piro, V., Piro, N., Piro, O., 2012. Characterization of Intraventricular Blood Flow Using a Microbubble - Contrast Tracking Echo-PIV Technique. *Journal of the American College of Cardiology*, 59(13): E1139. https://doi.org/ 10.1016/s0735-1097(12)61140-1
- Ryerson, W. G., Schwenk, K., 2011. A Simple, Inexpensive System for Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) in Biomechanics. Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology, 317(2): 127– 140. https://doi.org/10.1002/jez.725
- Sassa, K., 1989. Special Lecture: Geotechnical Model for the Motion of Landslides. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(2): 88. https://doi.org/10.1016/0148-9062 (89)90311-2
- Shi, Q., Ghosh, R. P., Engelke, H., et al., 2013. Rapid Disorganization of Mechanically Interacting Systems of Mammary Acini. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(2): 658-663. https://doi.org/10.1073/ pnas.1311312110
- Sosio, R., Crosta, G. B., Hungr, O., 2008. Complete Dynamic Modeling Calibration for the Thurwieser Rock Avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology*, 100(1/2): 11-26. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2008.02.012
- Thielicke, W., Stamhuis, E. J., 2014. Pivlab-towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in Matlab. *Journal of Open Research*

 $Software,\ 2(1){:}1{-}10.\ https://doi.org/10.5334/jors.bl$ 

- Xu, L.F., Chen, G., Li, J.Z., et al., 2003. Research Progress on Particle Image Velocimetry. Advances in Mechanics, 33(4): 533-540 (in Chinese with English abstract).
- Yu, M.L., Mei, H.B., Li, J.H., et al., 2016. Landslide Displacement Prediction Based on Varying Coefficient Regression Model in Three Gorges Reservior Area. *Earth Science*, 41(9): 1593-1602 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.118
- Zhang, M., Yin, Y.P., Wu, S.R., et al., 2010. Development Status and Prospects of Studies on Kinematics of Long Runout Rock Avalanches. *Journal of Engineering Geolo*gy, 18(6):806-817 (in Chinese with English abstract).
- Zou, Z.X., 2014. Research on the Evolution Dynamics of the Consequent Bedding Rockslides (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈卓根, 葛云峰, 2016. 基于统计方法的高速远程滑坡距离 预测分析.人民长江, 47(12): 42-47.
- 董周宾,颜丹平,张自力,等,2004.基于粒子图像测速系统 (PIV)的砂箱模拟实验方法研究与实例分析.现代地 质,28(2):321-330.
- 葛云峰,唐辉明,李伟,等,2016.基于岩体结构特征的高速 远程滑坡致灾范围评价.地球科学,41(9):1583-1592.
- 葛云峰,唐辉明,熊承仁,等,2014.滑动面力学参数对滑坡 稳定性影响研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例.岩 石力学与工程学报,32(增刊2):3874-3875.
- 郝明辉,许强,杨磊,等,2014. 滑坡一碎屑流物理模型试验 及运动机制探讨. 岩土力学,35(增刊1):127-132.
- 黄润秋,2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报,26(3):433-454.
- 罗文强,李飞翱,刘小珊,等,2016.多元时间序列分析的滑 坡演化阶段划分.地球科学,41(4):711-717.
- 许联锋,陈刚,李建中,等,2003. 粒子图像测速技术研究进 展.力学进展,33(4):533-540.
- 喻孟良,梅红波,李冀骅,等,2016.基于变系数回归模型的 三峡库区滑坡位移预测.地球科学,41(9):1593-1602.
- 张明,殷跃平,吴树仁,等,2010. 高速远程滑坡一碎屑流运 动机理研究发展现状与展望. 工程地质学报,18(6): 805-817.
- 邹宗兴,2014.顺层岩质滑坡演化动力学研究(博士学位论 文).武汉:中国地质大学.