

高位崩滑碎屑流多相态动力学物理模型试验研究

高杨¹□张仕林^{2*}□李军¹, 杨超平³□陈飞宇², 霍子豪³

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川成都 610031; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 极高山区高位崩滑碎屑流极为发育, 已成为威胁山区城镇和重大工程地质安全最为严重的灾害类型。研究大规模颗粒物质在高速运动过程中的流变学特性, 是从细观尺度上探索高位崩滑碎屑流动力学机制的重要手段。本文依托自主研发的高位远程地质灾害大型物理模型试验平台, 开展了不同颗粒粒径和体积条件下的高速颗粒流大型物理模型试验。结果发现: 高速颗粒流在运动过程中普遍呈现出浓密态—稀疏态—超稀疏态多相态共存的动力学特征, 其形成与演化本质上源于颗粒体系内部速度梯度差异引发的碰撞与速度波动; 颗粒粒径增大使得内部剪切由局部过渡为整体的差异性剪切, 激振程度增强, 颗粒体系趋向稀疏化, 而体积增加则显著增强基底局部集中剪切带内的剪切速率, 使得颗粒流在厚度方向上稀疏、超稀疏与浓密流态的分异更为突出。研究进一步揭示, 颗粒流中碰撞—剪切主导的应力传递机制与浓密—稀疏—超稀疏流态之间具有明确对应关系。上述认识表明, 构建高位崩滑碎屑流的动力学需引入能够表征颗粒浓度、颗粒温度及流态转换的状态参量, 以实现多相态结构及跨相态演化过程的有效表征。

关键词: 高位崩滑碎屑流; 大型物理模型试验; 高速颗粒流; 多相态

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2025-12-24

Dynamics of High-Altitude Rockslide-Debris Avalanches: Large-Scale Physical Model Experiments

GAO Yang¹, ZHANG Shilin^{2*}, LI Jun¹, YANG Chaoping³, CHEN Feiyu², HUO Zihao³

(1. Institute of Geo-Mechanics, Chinese Academy of Geo-Sciences, Beijing, 100081, China

2. Southwest Jiaotong University, Faculty of Geosciences and Engineering, Chengdu, Sichuan 610031, China

3. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract □ High-altitude rockslide-debris avalanches are widespread in extremely high mountain regions and represent one of the most severe geological hazards threatening mountain communities and critical infrastructure. Investigating the rheological behavior of large-scale granular materials during high-velocity motion provides key insights into the dynamic mechanisms of such flows from a mesoscopic perspective. In this study, a series of large-scale physical model experiments on high-speed granular flows were conducted using a self-developed remote-controlled experimental platform for high-elevation geological hazards, under varying granular size and flow volume conditions. The results show that high-speed granular flows commonly exhibit a dynamic coexistence of dense, dilute, ultra-dilute flow regimes. The formation and evolution of these multiphase states originate from granular collisions and velocity fluctuations induced by internal velocity-gradient heterogeneity within the granular system. Increasing granular size promotes a transition in shear behavior from localized to system-wide differential shearing, intensifies collisional excitation, and shifts the granular system toward dilute states. In contrast, increasing flow

基金项目: 国家重点研发计划(2024YF1700302); 国家自然科学基金(42507251); 中央高校基本科研业务费(2682025CX149).

作者简介: 高杨 (1989-), 男, 中国地质科学院地质力学研究所, 研究员, 主要从事高位远程滑坡动力成灾机制与风险评价方面的研究。E-mail: 737263992@qq.com, Tel: 15201655282. ORCID: 0000-0001-8204-2754

通讯作者: 张仕林 (1994-), 男, 西南交通大学地球科学与工程学院, 讲师, 主要从事高位远程地质灾害的研究工作。E-mail:

slzhang@my.swjtu.edu.cn, Tel: 18382437586.

volume markedly enhances shear rates within localized basal shear zones, leading to more pronounced vertical differentiation of dense, dilute, and ultra-dilute regimes. Furthermore, a clear correspondence is identified between collision–shear-dominated stress transmission mechanisms and the observed flow regimes. These findings indicate that dynamic modeling of high-elevation rockslide–debris flows should incorporate state variables characterizing granular concentration, granular temperature, and regime transitions to effectively capture multiphase structures and cross-regime evolution.

Key words: High-altitude rockslide–debris avalanches; Large scale physical model test; Rapid granular flows; Multiphase flow regimes

引言

极高山区是高位崩滑碎屑流灾害高发区（殷跃平等，2021；李滨等，2021；彭建兵等，2023；张永双等，2023）。自20世纪以来，欧洲阿尔卑斯山脉、北美落基山脉、南美安第斯山脉以及亚洲喜马拉雅山脉等极高山区发生了大量高位崩滑碎屑流灾害，累计造成逾50000人死亡，已成为威胁山区城镇和重大工程地质安全最为严重的地质灾害类型（Evans等，2006；Yin等，2023；Wang等，2024；Wang等，2025）。如，1970年安第斯山脉发生的Nevados Huascaran滑坡，近1亿立方米的岩体和冰川运动了16km，共造成了山下约18000人死亡（Mergili等，2018）；2021年初发生在印度喜马拉雅山查莫利特大冰岩滑坡碎屑流，造成了近200人死亡，下游两座在建水电站被毁（Shugar等，2021）；2025年5月发生在瑞士瓦莱州阿尔卑斯山区Blatten镇的高位冰岩崩碎屑流灾害，约 $8.5 \times 10^6 \text{m}^3$ 的冰岩复合体从海拔约3200~3600m区间整体失稳，沿山谷远距离运动约3km，几乎摧毁整座古镇造成重大损失（殷跃平等，2025；李滨等，2025）。在我国极高山区高位崩滑碎屑流灾害也极为发育，尤以雅鲁藏布江下游地区最为突出。2000年发生在易贡的特大高位崩滑碎屑流灾害（图1a），约3亿方的岩土体堵塞了易贡藏布，造成下游印度上千人遇难和五万余人无家可归（殷跃平，2000）；频繁发生在色东普沟的高位崩滑碎屑流的，多次堵塞干流，规模可超数亿立方米，为重大水电开发带来了极大的地质安全隐患（Gao等，2023；Zhang等，2026）。如何准确的认识这类地质灾害的动力学机理，对于评估预测灾害风险显得尤为重要，已成为当前研究的热点和难点问题（殷跃平和高少华，2023）。

从动力学本质来看，节理岩体从高陡崩滑源区失稳启动后，沿运动路径经历强烈的岩体-基底碰撞

以及内部差异性剪切作用，使原本结构相对完整的块体迅速解体破碎为跨越多个粒径尺度的多分散颗粒物质（高杨等，2022；Zhang等，2023；Chang等，2024）。随着颗粒粒径持续细化，滑体内部剪胀作用引起的体积膨胀促使接触机制由块体间相互作用，逐步转变为以颗粒碰撞、剪切滑移及瞬态力链重组为主导的颗粒状态，并使滑体由近似刚体的滑移与旋转快速过渡为近似连续介质的流动，继而实现远距离的高速运移（Transition）和侧向扩展（Spreading）（Davies等，1999；Locat等，2006；贺旭荣等，2024）。这一过程中形成的多尺度、非均一、各向异性颗粒集合体构成了高位崩滑碎屑流的主要物质形态和能量载体，其内部颗粒间多重相互作用形式产生了极为复杂的力学传递过程与能量耗散机制（Bryant等，2014；郑虎等，2021），使非定常的高速碎屑流实际物理学过程宏观上呈现出了多体动力学特征，即准静态、液体（密集态）和气态（碰撞态/惯性态）（Campbell，1990；Delannay等，2017；Gao等，2024）。因此，基于等效流体理论概化的模型无法对高位崩滑碎屑流复杂的动力学过程进行全面表达（高杨等，2023；高杨等，2025；Gao等，2025）。对于密集流，颗粒内部流动阻力通常与惯性数或者弗劳德数相关，而惯性流的流动阻力则取决于颗粒浓度和碰撞率（Jop等，2005；Forterre和Pouliquen，2008）。颗粒流从准静态过渡到密集态再到惯性态，颗粒体积分数持续降低，以至于颗粒之间难以形成持久的接触力链，颗粒之间的主要力学状态从接触摩擦转为瞬间的二元碰撞，颗粒内部的剪切变形显著增加、激振程度逐渐强烈（Sanvitale和Bowman，2017）。研究高速颗粒流力学状态的形成、演化对认识颗粒系统内部的流动阻力、动量转换和能量耗散至关重要。

大量研究从颗粒流变学特性出发，开展了不同初始条件下的颗粒集合体运动过程试验研究，通过测试颗粒流速度剖面、剪切速率、颗粒温度、颗粒

浓度等关键流变学参数，从细观尺度上揭示高位崩滑碎屑流颗粒系统内部流动特征、力学传递过程和能量耗散机制（Bartali 等，2015；Bryant 等，2015；Sanvitale 和 Bowman，2017；Li 等，2022）。目前，小尺度滑槽试验因可控性强而成为研究颗粒流动力学主要手段（Arran 等，2021；Bachelet 等，2023），但受制于尺寸效应以及数米级滑槽长度上的限制，难以观察到颗粒分选、混合、剪胀等物质迁移演化过程，无法真实再现极高山区高位崩滑碎屑流的高速流动特征（Zhang 等，2023）。同时，由于试验条件限制，现有研究多集中于颗粒流达到相对稳定状态后的流变与动力学特征，对于颗粒体系从准静态→缓慢→快速的流动演化过程及其关键流变行为辨识方面仍缺乏系统研究。因此，亟需依托大尺度物理模型试验平台，开展能够反映大规模、高速流动的颗粒物质运动特征试验研究，从而实现对接高山区高位崩滑碎屑流灾害动力学机理的深入揭示。

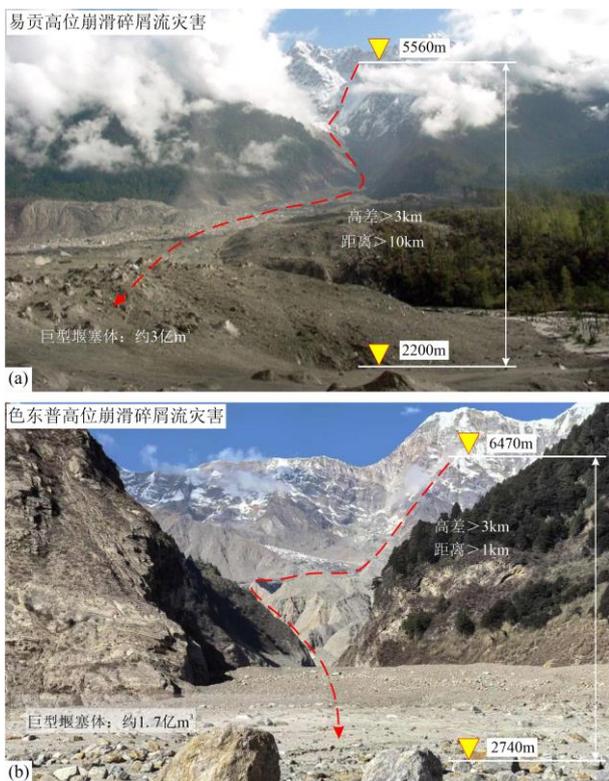


图 1 雅鲁藏布江下游极高山区典型高位崩滑碎屑流灾害
Fig.1 Typical High-altitude and long-runout disasters in the upper reaches of the Yarlung Tsangpo River

本研究通过大型物理模型试验平台，开展了不同颗粒粒径和体积影响下的颗粒流大型物理试验，通过高速相机、基底力监测数据，分析了颗粒流速、剪切速率、流态、颗粒温度等关键流变学参数及其演化特征，据此发现了高速运动的颗粒集体在空

间上表现出的差异性流动结构，提出了极高山区高位崩滑碎屑流多相态动力学模型。本研究可为构建多相态动力学理论模型，实现高位崩滑碎屑流灾害精细化评估提供支撑。本文所述“多相态”并非指物质的赋存状态（如固态、液态和气态），而是特指干燥碎屑颗粒物质在高速运动过程中，由于流变特性差异所表现出的不同流动状态。

1 试验材料及方法

1.1 试验方案

图 2a 是自主研发的“高位远程地质灾害大型物理模型试验平台”。该试验装置最大高度达到 21m，有效高度 14m，整体长度约 34m。主要由以下几个部分组成：①料斗（滑源区），料斗的几何尺寸为 1×1.2×3.2m（长/高/宽）。料斗坡度由底部液压杆控制，坡度变化范围能够与第一节滑槽坡度相适应；②两段滑槽（势、动能转换区），滑槽长度均为 11m，第一段滑槽截面尺寸为 1.2×1.2m，第二段滑槽截面宽度为 1.2m，截面高度可通过滑槽底部的丝杆调节，范围为 1.2~1.5m。两段滑槽的坡度由四根液压支架控制，每根液压长 2.5m，最大进尺 2m，液压最大支撑荷载均为 16 吨，液压支架所控制的两段滑槽坡度变化范围分别是 40-50°和 30-40°；③底部堆积平台（堆积区），长度约 12m，宽度约 4.8m。滑槽底部和一个侧壁为钢板，另一个侧壁为透明的防弹玻璃，可用于观测试验过程中材料的动力学行为特征。该平台相较于以往研究有效降低了滑坡动力学试验研究对尺寸效应的依赖性，可实现大规模（最大可达 5m³，约 8t）颗粒物质高速（>12m/s）、远距离（>30m）运动的模拟，因此试验结果观察到的现象更加能够反映实际高位崩滑碎屑流动力学行为。

在试验过程中，将该试验装置的两段滑槽利用液压装置调节为相同坡度 40°（图 2b），源区物质从料斗释放后，会经过长达约 22m 的高速流动后堆积于底部水平平台。现有研究表明，颗粒的流动特性与颗粒粒径、级配、边界条件、初始的几何特征、初始势能、体积、运动路径等密切相关（Cagnoli 和 Piersanti，2015；Sanvitale 和 Bowman，2017；Bartali 等，2020；Li 等，2022）。此外，在双分散、多分散复杂颗粒体系下，往往会形成分选、混合等复杂的颗粒动力学行为（Kokelaar 等，2014；Yin 等，2023），对颗粒流变学特性带来极大的影响。在这种

复杂颗粒组构下，颗粒流的流动性与粒径往往不是一个单调增加或者单调降低的关系，而是存在一个最优值（Hass 等，2015），这对试验结果分析带来极大的复杂性和不确定性。考虑到本试验研究重点围绕高速颗粒流的流变特性及其演化特征，要求试验中颗粒流达到一个相对“成熟”的流态。为此，本试验仅仅考虑单分散颗粒结构。同时，考虑到颗粒的粒径和体积对颗粒流流动结构的形成和演化具有重要的影响，试验共设置了两个系列变量：颗粒粒径和颗粒体积（表 1）。采用带棱角的石英作为颗粒

材料，其棱角分明的特征与实际崩滑碎屑流的碎屑颗粒具有一定相似性，因而也被广泛应用到大量模型试验研究中（Iverson 等，2004；李坤等，2021）。如表 1，共设置了 4 种颗粒粒径，分别是 16-32mm、8-16mm、4-8mm 和 2-4mm；对于体积系列，通过释放不同质量、相同几何尺寸比的颗粒来改变颗粒的体积，包括了 720kg、1000kg 和 1500kg 三个工况（图 3）。体积相同的试验组采用相同的初始布置。对于表 1 中每一种工况，至少开展两组以上，确保各组试验数据具有较高的可靠性。

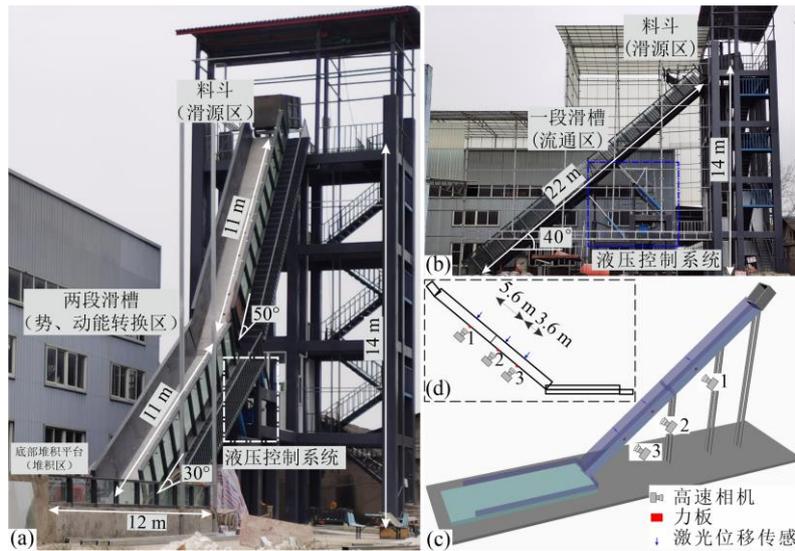


图 2 试验装置及监测布置

Fig.2 Test Equipment and Monitoring Arrangement

□1 试验工况

Table 1-1 Test conditions

编号	G1	G2	G3	G4	G5	G6
粒径 (mm)	16-32	8-16	4-8	2-4	4-8	4-8
质量 (kg)	1000	1000	1000	1000	720	1500



图 3 三种不同规模的颗粒流试验源区布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of source area layout for three different scales of granular flow experiments

1.2 数据采集分析

试验仪器布置如图 2c 和 d 所示。首先，沿着两段滑槽在其侧面共布置了三台高速相机，三台高速

相机之间间距分别是 5.6m 和 3.6m。高速相机分辨率均为 1280×1024，其中 1 号高速相机的采样频率为 1000 帧/秒，2 号和 3 号高速相机的采样频率为 2000 帧/秒，最大采样时间均为 4s。利用三台高速相机，能够精细捕捉颗粒从源区料斗释放后，沿滑槽顶部到底部流动过程中颗粒结构的演化特征。颗粒流剖面流动速度分布特征对确定颗粒流变力学参数至关重要（Langlois 等，2015），为提取高速相机所记录的颗粒流动速度，通过 PIV 技术对图片中颗粒运动信息进行了提取。值得说明的是，受侧壁摩擦影响，颗粒在滑槽中部的流动速度高于两侧近壁区域，而靠近侧壁处的流速相对较低。因此，所得到的速度场主要反映的是侧壁附近的流动特征，本文将作为整体流动行为的近似表征。其次，研究颗粒高速流动过程中与基底相互作用力（即基底力）的分布特征及其与颗粒流动特征（如流动速度、颗粒激振程度）、边界条件等的相关关系，对认识颗粒流变力学特性和能量耗散具有重要意义（Du 等，

2023)。本试验在三台高速相机视框对应的位置分别布置了三个力传感器（图 2c 和 2d），传感器底部与试验装置的底部横梁刚性焊接，而其顶部与长、宽均为 30cm 的板用螺栓刚性连接，板的材料与滑槽底板完全相同。本文将力传感器和板构成的测量元件统称为力板。力板的顶部与滑槽底面保持平整，同时力板与滑槽底部之间预留了约 0.5cm 的缝隙，以最大限度地减少测量数据对滑槽振动的敏感性，缝隙内用硅胶封堵、找平。此外，为了确定颗粒流的流动厚度，在力板对应位置的正上方，布置了激光位移传感器，用于确实颗粒流前缘到底测点的精准时刻（图 2c 和 2d）。上述传感器的数据采集系统采样频率为 10kHz。最后，在每组试验后，使用三维激光扫描仪（Regel VZ-400）获取颗粒堆积物的三维点云数据，利用该数据构建高精度数字高程模型（DEM），据此计算等效摩擦系数和表观摩擦系数。

力板测量获取的原始基底力数据通常呈现极度非线性和非平稳的特征，同时具有多频点谐波、明显的波动以及背景噪音。在数据处理过程中，需要对这些原始数据进行预处理，从而更有效地提取内部信息。采用经验模态分解（EEMD）技术将原始信号自适应地分解为一系列频率逐渐降低的固有模态函数（IMF），剔除前三阶高频部分的 IMF 后，将剩余 IMF 线性叠加合成一个新的基底力信号，该信号频率不超过 200Hz；随后，利用一个 110Hz 的 Butterworth 低通滤波器进一步去除高频噪音。利用上述噪音处理方法得到的结果如图 4 所示。从图中可以看出，预处理后的基底力信号波动更加稳定，主频部分更加集中。

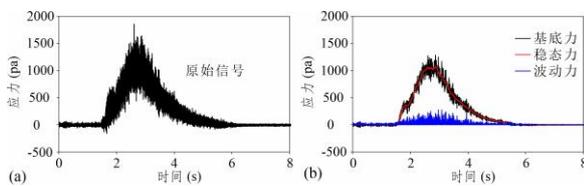


图 4 基底力信号处理

Fig.4 Baseband Signal Processing

滤波处理后获取的基底力信号 (σ_i) 可以看成由两部分组成，分别是受颗粒整体流动特性影响的稳态力（或平均力）和受颗粒激振影响的波动力（Hsu 等，2014），即：

$$\sigma_i = \bar{\sigma}_i + \sigma_i' \quad (1)$$

其中，公式右边第一项是稳态力，第二项是波动力。通过移动窗口中值滤波可以将稳态力从基底

力信号中分离出来，然后利用公式（1）便能确定基底力的波动成分。在此基础上，为了研究基底力时频域上的基本特征，对基底力信号进行了深入分析。首先，对基底力信号做短时傅里叶变换，确定信号在时频域上的分布特征；其次，利用公式（2）计算了基底力信号的功率谱密度（PSD）分布特征，该参数能够表征信号能量在频域上的分布，即：

$$PSD(f) = |\tilde{\sigma}_i|^2 / \Delta f \quad (2)$$

公式右侧分子项是基底力信号 σ_i 的傅里叶变换，分母项是频率的计算分辨率，等于时间窗口长度的倒数。值得注意的是，颗粒流主体在到达力板前以及经过力板后，受到跳跃的分散颗粒影响，基底力信号出现了高频率、低量值的波动，这部分数据存在较大的随机性，因而在定量分析过程中应忽略。

2 颗粒流流动及堆积特征分析

2.1 流动结构演化

图 5 呈现了三台高速相机记录的 G3 试验组颗粒流动结构演化过程，可以看出从滑槽上部到下部位置，颗粒流在长距离流动演化过程中，其前缘、后缘始终集中分布着大量稀疏、跳跃的分散颗粒，浓度极低，结构稀疏，颗粒间难以形成持久接触，其作用形式主要以瞬间的二元碰撞为主。而对于颗粒流的中部主体部分，颗粒相对密集，浓度较高，颗粒之间能够保持持久的力链接触。1 号高速相机位置对应的颗粒，由于该位置距离源区料斗较近，颗粒流受到了初始变形的影响，流态发展并不成熟，导致颗粒内部出现了明显的横向剪切、波动痕迹。这些现象在 2 号和 3 号高速相机对应位置基本消失，表明颗粒流态趋于成熟稳定。因此，后续仅仅对 2 号和 3 号高速相机位置对应位置的颗粒流开展深入分析。

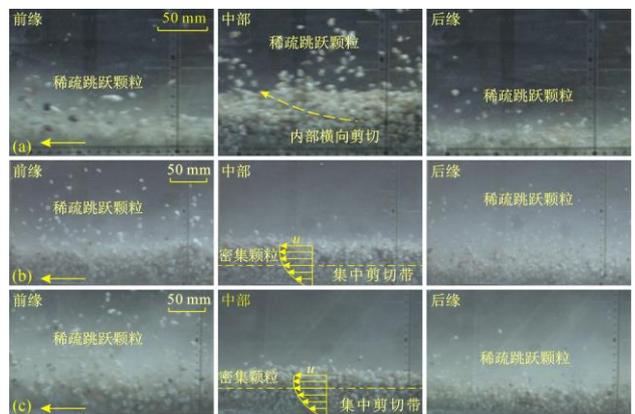


图 5 典型试验组 G3 获取的颗粒流动状态示意图

Fig.5 Schematic diagram of the granular flow state obtained by typical experimental group G3

对比 2 号和 3 号高速相机对应位置的颗粒流，从视觉上可以清晰地发现颗粒流基底分布着一个集中的剪切带，带内颗粒剪切速率较高，而颗粒浓度相对外部较低。同时，对比这两个位置，可以发现随着颗粒持续流动，底部集中剪切带的边界逐渐朝着自由面向上扩展。这也证明了颗粒流的流态并非恒定不变，也从侧面说明了研究颗粒流变力学特性演化至关重要。

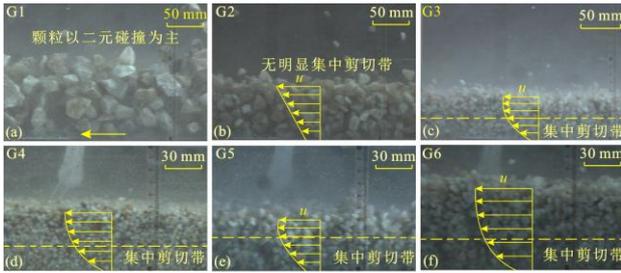


图 6 不同试验组颗粒主体流动状态对比示意图

Fig.6 Comparison diagram of bulk granular flow states in different experimental groups

2.2 颗粒流主体流动特征

相较于前缘和后缘相对分散的结构，颗粒主体流动特征表现出了与粒径、体积之间强烈依赖性。图 6 呈现了不同试验组在 2 号高速相机对应位置处的颗粒主体基本流动特征。对比 G1-G4，在粗糙基底条件下，随着颗粒粒径增加，颗粒体系稀疏程度逐渐增加，以至于对于 16-32mm 的颗粒而言，颗粒间难以保持持久接触，运动速度较为紊乱，从流动状态上看，颗粒流表现为气态，颗粒间接触力被惯性力所主导。对于细颗粒试验组，尤其是 G4 试验组，颗粒内部保持密集接触，浓度较高，流动速度剖面从视觉上具有随着流动深度增加而逐渐增加的趋势，基底区域存在一个集中剪切带。然而，随着颗粒粒径不断增加，颗粒流基底剪切局部化范围逐渐朝着自由面扩展，致使 G2 试验组颗粒流内部难以维持一个稳定的剪切集中带，而流动整体上一一直保持一个强烈的差异性剪切。对于不同规模的试验组，对比图 6 中的 G3、G5、G6 试验组，可以发现体积较小试验组的颗粒之间接触相对比较分散，从颗粒流动状态角度看，减少颗粒体积，颗粒惯性占比有所增加，颗粒接触力逐渐被碰撞应力主导。

此外，从视觉上，随着体积减少，颗粒流剖面的流态也有明显的变化，主要表现在颗粒基底剪切

局部化范围逐渐增加。从图 6e 可以发现，对于体积最小的试验组，颗粒流上表现为一个整体差异性剪切的流动结构，与 G2 相似。

2.3 颗粒流剖面流动速度及剪切速率分布特征

利用 PIVlab 程序分析提取了 2 号和 3 号高速相机获取的颗粒流瞬时速度剖面，计算分辨率为 2000 张/秒，随后以 20 张连续照片为一组做平均化处理，进而得到更加可靠和准确的颗粒流动速度信息。图 7 呈现了各个试验组两台高速相机在不同时间下的颗粒流动速度分布特征。值得说明的是，由于 G1 试验组颗粒流动结构较为分散，难以形成稳定的流动剖面，因此没有计算该组试验的剖面流动速度。

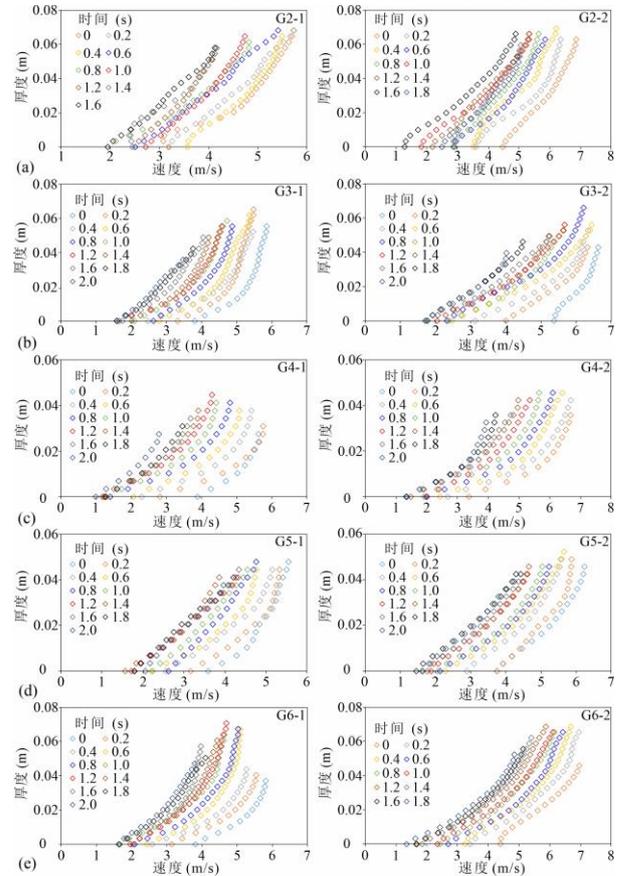


图 7 不同试验组颗粒主体流动速度分布

Fig.7 Schematic Diagram of the Flow Velocity of Granulars in Different Experimental Groups

对于所有试验组，从图中可以发现颗粒流动速度从前缘向后缘逐渐降低，而从 2 号高速相机对应位置到 3 号高速相机对应位置，颗粒流的流动速度有明显增加。此外，发现试验中颗粒流的基底速度不等于 0，表明了颗粒底部存在明显基底滑移而并非是简单的剪切。流动速度剖面本质上反映了颗粒内部力的传递以及能量的耗散机理 (Zhang 等, 2022)。不同的初始条件，从图 7 中可以观察到不同

的流动剖面形态及其演化。对于 G2-G4 试验组，在粗糙基底条件下，随着颗粒粒径的增加，流动速度剖面形态从近似直线分布转变为凸形分布，且颗粒越小的试验组，凸形剖面速度分布曲线的曲率越平滑。类似地，对于不同体积的颗粒流，随着体积规模的增加，流动速度剖面从 G5 的近似直线形分布逐渐变化为 G6 中曲率更加平滑的凸形分布。

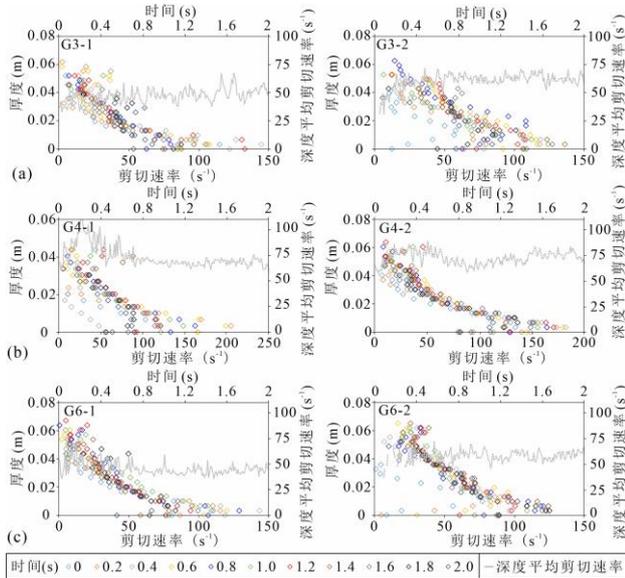


图 8 典型试验组中颗粒流剖面剪切速率分布特征

Fig.8 Characteristics of Shear Rate Distribution in Granular Flow Profiles for Typical Experiment Groups

图 7 所呈现的颗粒流在剖面上所呈现的速度梯度分布特征，实际上反映了颗粒内部强烈的差异性剪切行为，这种内部剪切是驱动颗粒波动、能量耗散的重要来源 (Zhou 和 Sun, 2013)。如图 8 所示，呈现了三个典型试验组在不同时刻剪切速率在流动厚度方向上的分布特征以及每个时刻深度平均的剪切速度变化过程 (图中灰色虚线)。根据图 7 和图 8，可以发现颗粒内部剪切与颗粒流试验的初始条件密切相关。对于 G3 试验组，图 8a 结果表明颗粒流内部剪切速率从顶部到底部逐渐增加，其底部存在一个剪切速率极高的局部剪切带，剪切带内颗粒流动速度的变化梯度较为明显，而顶部的剪切速率趋近于 0。随着颗粒粒径的逐渐降低，G4 试验组中颗粒流的速度梯度明显变大，尤其基底附近的速度梯度增加十分显著。然而，对于颗粒粒径较大的试验组 G2，图 7a 表明颗粒流在流动厚度方向上速度的变化相对恒定，底部没有发现明显的局部剪切带，这意味着颗粒流内部整体均表现出了差异性剪切的流动行为，这与图 6 中观察到的结果完全吻合。

此外，图 9 所呈现的颗粒流剖面深度平均剪切速率平均值计算结果显示，在颗粒粒径减小的情况下 (从 G2 到 G4)，深度平均剪切速率呈现明显增加的趋势。同时，对比两个高速相机位置对应的颗粒流剪切速率变化，发现随着颗粒粒径增加，其变化程度逐渐减小，尤其是对于 G2 试验组中两个测点位置的平均剪切速率基本保持不变。颗粒流体积对内部剪切的影响如图 8a 和 8c 所示，随着颗粒体积的增加，基底局部剪切速率的散点明显向右移动，表明了颗粒基底局部集中剪切程度逐渐增强，并且局部剪切带的范围更靠近流动底部，而在局部剪切带之外的流动范围内，剪切速率随着颗粒体积的增加而降低。但是，根据图 9，深度平均剪切速率与颗粒体积没有明显的相关性，G3、G5 和 G6 三组不同体积试验组在两台高速相机对应位置的平均剪切速率基本一致。

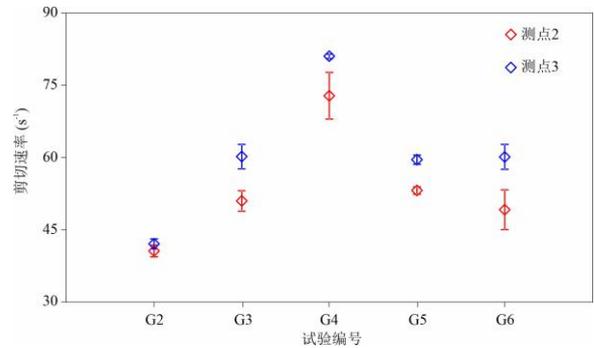


图 9 深度平均剪切速率

Fig.9 Average depth-averaged shear rate

2.4 颗粒流堆积特征

图 10 是三维激光扫描仪获取的典型试验组堆积体的数字表面模型 (DSMs)。图中最为显著的特点是当颗粒粒径在 16-32mm 时 (G1)，远端颗粒堆积较为松散，表明了颗粒在流动过程中前缘具有更加稀疏的结构。随着颗粒粒径减小 (G1-G4) 以及颗粒体积增加 (G5、G3、G6)，在颗粒流堆积体的远端和中部可以清晰观察到弧形状的横向脊，尤其在 G4 细颗粒试验中，横向脊从前缘朝着后缘逐渐消失的痕迹十分明显。这种流态状的堆积地貌在野外滑坡碎屑流中也常常被发现 (Wang 等, 2020)。现有研究结果认为其形成机制与滑坡停积就位过程密切相关。滑坡碎屑流在就位过程中因速度突然降低形成了差异性的剪切流动速度，从而颗粒内部在强烈挤压、横向扩张作用下出现了显著的扭曲变形，这种变形以系列弧形状横向脊的形式出露于堆积体表面。

在图 10a 所建立的局部坐标系下，计算确定了各试验组的表观摩擦系数和等效摩擦系数，结果如图 11 所示。图中计算确定的摩擦系数结果表明，颗粒流的表观摩擦系数和等效摩擦系数之间基本满足

正相关关系。考虑到等效摩擦系数更能用于表征颗粒体系能量耗散特征，下面仅对等效摩擦进行深入分析。

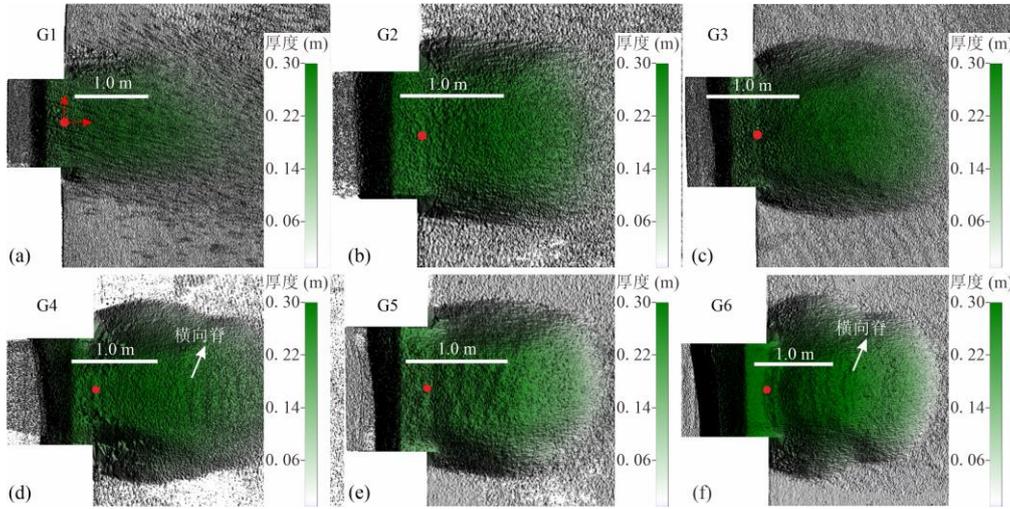


图 10 颗粒堆积体的数字表面模型（红色点代表坐标原点，即底部堆积平台中轴线起点）

Fig.10 Digital surface model of a granular pile (the red dot represents the coordinate origin, which is the starting point of the central axis of the bottom stacking platform)

对于本试验所采用的粗糙基底情况，颗粒在流动过程中基底和颗粒内部会产生更加强烈的剪切，能量耗散更加明显，从而具有更低的摩擦系数，表现出更弱的流动性，以至于颗粒流与底部平台碰撞后，颗粒在后续就位堆积过程中出现了与 Cagnoli 和 Piersanti (2015) 研究中类似的现象，即颗粒在转折端附近逐渐向后沉积，具体表现在滑槽末端具有一个较宽的堆积形貌。这种现象主要是因为流动前缘的颗粒在减速堆积时，中后部颗粒仍然保持一定的速度向前运动，引起颗粒流在流动的后部逐渐积聚堆积。值得注意的是，颗粒流在转折端逐渐向后沉积将可能阻碍颗粒流在堆积平台上的流动。尤其是对于 G6 试验组，图 11 表明 G3 的等效摩擦系数小于 G6，但是实际上从图 7 中的流动速度分布，可以看出 G3 的剖面流动速度是大于 G6 的，表明了颗粒流的流动性随着体积从 G5 (720kg)、G3 (1000kg) 到 G6 (1500kg) 的增加是变强的，即证实了颗粒流流动性对体积的正向依赖性。然而，目前大部分颗粒流滑槽试验均没有发现这种普遍存在于实际滑坡碎屑流中的体积效应。例如，Bartali 等 (2020) 的研究结果发现颗粒的流动距离与颗粒质量（体积）没有相关性，而是与单位质量内颗粒的数量相关，并认为由于内部剪切激发的单位时间长度内耗能颗粒的数量与单位质量的颗粒数成呈正相关关系，因

此颗粒集合体能量耗散很大程度上取决于颗粒的大小，而与体积无关；再如，在 Li 等 (2021) 的研究中，颗粒流动性与颗粒体积呈现出负相关关系，并认为可能出现了某些额外的因素，阻碍了颗粒体积对流动性的影响。上述结论显然与实际滑坡碎屑流中流动性随着规模增加而增强的普遍规律不相符。此外，对于不同颗粒粒径的试验组，从图 10 和 11 可以看出，随着粒径从 G1 减少到 G4，颗粒流重心运动距离从整体上仍然保持减少的趋势，但是在 G2 处存在一个突变，且 G2 的重心运动距离最短。

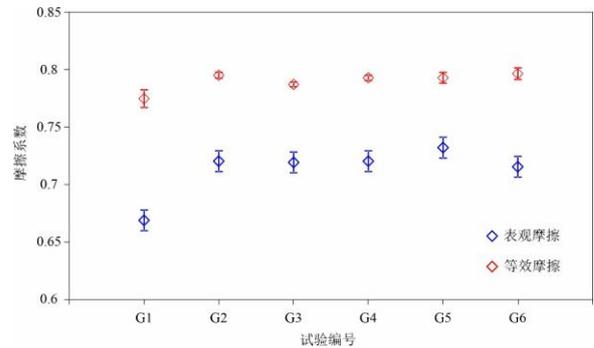


图 11 等效摩擦角和表观摩擦系数分布

Fig.11 Distribution of Equivalent Friction Angle and Apparent Coefficient of Friction

3 颗粒流基底应力分析

3.1 基底应力信号及其分布特征

目前，有关颗粒流基底力特性的试验和数值模拟研究成为了国际上一个前沿热点问题。一般可以将颗粒流基底力分解为两部分，即稳态力和波动力（式1）。前者表征颗粒整体流动特性，往往与颗粒流的密度和厚度相关，而后者表征激振特性，与颗粒速度、粒径、浓度等相关（Hsu 等，2014）。相较于稳态力，波动部分在信号上表现出高频、高量级的特征（McCoy 等，2013），其成因机制更为复杂，但却能够刻画细观尺度上的力学行为。图 12 展示了三个典型试验组经滤波处理后的基底应力信号及其稳态部分与波动部分的分布特征，以及基底应力信号经短时傅里叶变换处理后得到的时频谱特征与功率谱密度（PSD）分布。

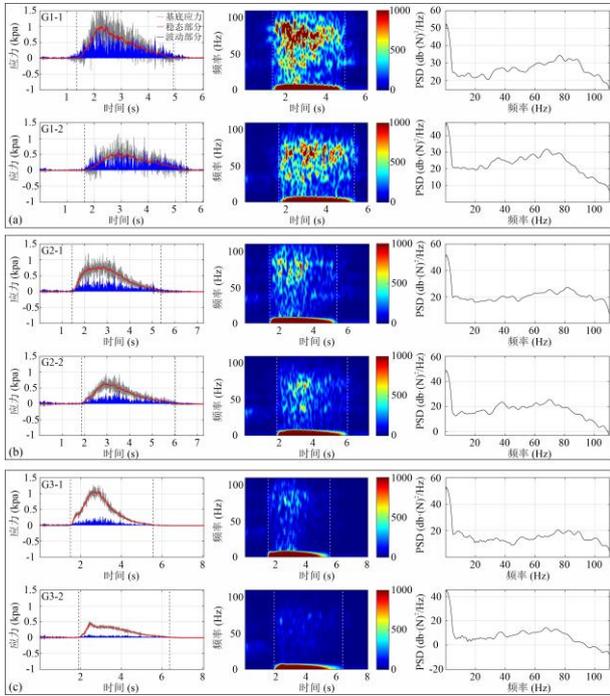


图 12 典型试验组基底应力、频谱和 PSD 分布特征

Fig.12 Characteristics of baseline stress, spectrum, and PSD distribution in the typical test group

从图 12 中可以看出，颗粒流与力板直接作用时，会产生持续波动的基底力，相较于稳态力，基底力信号普遍具有较大的幅值和较高的波动频率，最大频率约为 100Hz。根据基底力时频分布特征，可以将其分成低频（ $\leq 5\text{Hz}$ ）和高频（ $> 5\text{Hz}$ ）两大部分。从时频谱中可以看出，低频部分是频谱密度主要集中区，认为这部分频谱能量主要受到了稳态力的影响，而高频部分表现出了与波动应力之间显著的正相关关系，因而认为这部分能量是由高频的波动力激发，并且在 60-80Hz 之间存在一个相对集中的频

率分布区间。相应根据功率谱和边际谱特征，两者在频域上具有相似分布特征，均在频率范围 0-5Hz 之间呈现急剧下降，随后在 5-100Hz 内持续波动，并且在 60-80Hz 之间出现了一个强度相对集中的频段。此外，对比分析各组试验中的 2 号和 3 号力板基底力信号，可以看出基底力量值出现了明显的降低，这表明在流动演化过程中，颗粒与基底相互作用的程度有所减小。然而，进一步观察 PSD 曲线，发现其强度的降低主要集中在低频部分，而高频部分的变化并不明显。这意味着颗粒流在流动演化过程中，尽管基底力会出现降低，但是基底力高频部分的占比反而会逐渐增加，可能与更加强烈的湍动和颗粒与基底之间的相互作用有关。

3.2 基底波动特征

试验结果表明，基底应力的波动部分往往具有大量值、高频率的特征。这些波动应力的形成往往和单颗粒与基底瞬间碰撞以及密集颗粒流内部的局部力链分布密切相关（McCoy 等，2013），并且基底波动应力被认为能够反映基底颗粒激振程度，是控制颗粒流动力学、能量分配以及颗粒流动性的重要参数。参考 Cagnoli 和 Piersanti（2015）的研究，利用基底应力与稳态应力的标准偏差（ σ_{sd} ，如式 3 所示）来对比分析不同试验组基底应力波动的强度：

$$\sigma_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (\sigma_i')^2} \quad (3)$$

式中， n 是基底力测量的总数量。 σ_{sd} 的计算结果如图 13 所示。此外，正如 Iverson（1997）研究结果中所提到的，采用小尺寸力板测量确定的基底波动应力相较于稳态应力往往比较大尺寸力板结果更加显著。这主要是由于在测量单位时间长度内，较大的力板上能够覆盖更多的颗粒，因而测量结果更多地体现了颗粒流对基底作用的平均水平（即稳态应力）。然而，大量值、高频的波动应力实际上更多地是反映了单个颗粒在流动期间以滑动、滚动和弹跳的运动方式与力板接触作用而激发产生，其信号在时间序列上是不连续、孤立的脉冲（如图 12 中第一列图片的蓝色实线所示），且其量值往往在正负之间交替往复波动（Cagnoli 和 Piersanti，2015）。因此，如果采用尺寸过大的力板，基底力信号中的波动部分可能难以识别，同时也意味着基底波动应力仅仅是一个相对量值，对于力板尺寸不同的试验，基底波动应力之间没有可比性。

对比图 12 和 13 中不同颗粒粒径的试验组，可以看出随着颗粒粒径的增加，颗粒流基底应力高频段频谱密度更加集中， σ_{sd} 的量值也逐渐增加，这些趋势均反映了颗粒粒径的增加使得基底产生了更强烈的波动应力。这种规律在现有试验研究中也普遍存在，例如根据 Farin 等（2019）理论研究颗粒高频基底力激发的功率谱密度与颗粒有效粒径之间存在一个 1.5 次方的幂律关系。此外，根据 G3、G5、G6 计算确定的 σ_{sd} 结果，可以发现颗粒体积对波动应力的影响具有显著的体积依赖性，且该影响随颗粒体积增大而逐步强化。实际上，高频基底波动应力在相同粒径、坡度和材料性质情况下仅仅与颗粒流动速度和基底颗粒浓度相关，即与颗粒流的流动特性相关，而与颗粒体积之间并不存在直接相关性（Farin 等，2019）。但是，根据前面的分析可知，颗粒体积会对颗粒流的流动特征带来影响。随着颗粒体积的减少，流动中基底颗粒的数量随之减少，颗粒之间保持更加密集接触的可能性降低，颗粒之间因碰撞导致的能量耗散程度也随之减少。而随着颗粒体积增加，将会有更多的颗粒对力板施加荷载作用，从而增加颗粒的基底波动应力。

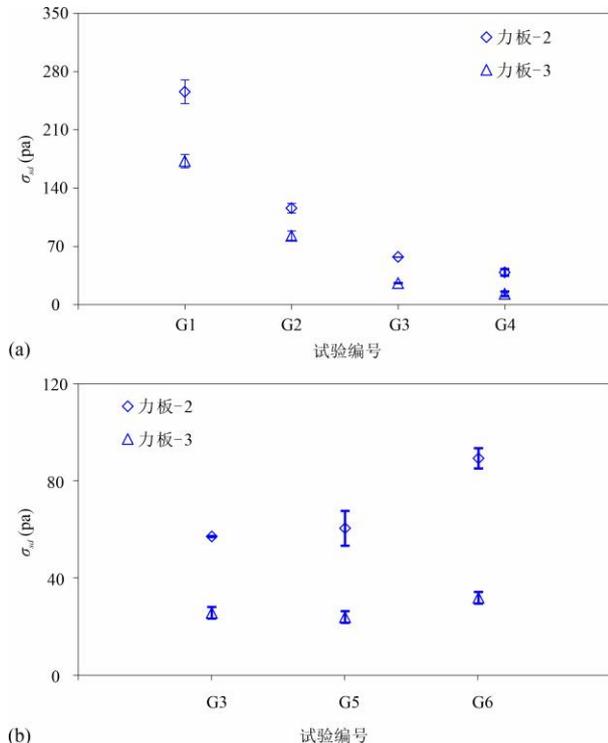


图 13 颗粒流基底波动应力分布特征

Fig.13 Characteristics of Basal Fluctuation Stress Distribution in Granular Flow

4.1 高速颗粒流多相态动力学特征

受浓度和局部应力状态的影响，颗粒流可能会处于准静态、过渡态和快速流态，而不同流态决定了颗粒内部具体的内力传递形式（司鹏飞，2019）。通常，对于崩滑碎屑流和滑槽试验中的颗粒而言，体积浓度往往在 50% 以上，密集程度较高，接触应力主导了颗粒间力的传递，但由于单个颗粒速度相较于平均水平存在流动速度的梯度差异，导致颗粒内部会出现速度波动，从而表现出迥异的动力学特征。从图 5 和图 6 所记录到的不同时间和空间尺度上的动力学特征可以看出，颗粒在高速流动过程中呈现出了多相态的动力学特征。

如图 14a 和 14c 所示，在颗粒流的前缘和后缘区域，始终分布着大量稀疏、跳跃的分散颗粒，浓度极低，整体上表现为稀疏/超稀疏态的流动特征。对于更加关键的颗粒流主体区域，从图 14b 中可以看出，颗粒体系整体趋于致密化并呈现出浓密态流动特征，但在厚度方向上仍表现出显著的流态分异。具体而言，靠近基底区域受局部集中剪切作用（图 8），较大的剪切速率使得颗粒发生剪切稀化，层内颗粒浓度低于上部区域，但颗粒之间仍通过频繁的碰撞和剪切摩擦维持强烈的相互作用；在颗粒流中部区域，剪切速率处于较低且变化幅度有限的水平（图 8），颗粒流表现为低剪切的“堵塞态”，类似于一个近似刚性的“固体板”，颗粒浓度高，呈现出浓密的准静态流动行为；而在颗粒流顶部自由表面附近，由于缺乏应力约束，局部颗粒会以飞跃、滚动和弹跳形式呈高度弥散状态，颗粒浓度极低，其相互作用形式主要以低频次、瞬间二元碰撞为主。

颗粒流主体作为重点关注区域，对比不同颗粒粒径和规模的试验组，从颗粒流流态（图 6）、速度剖面（图 7）、剪切速率分布（图 8）和基底应力波动特性（图 12 和图 13）可以发现：随着颗粒粒径增大，虽然深度平均剪切速率有所降低，但是颗粒流内部剪切结构由基底局部剪切逐渐演化为整体性的差异性剪切，内部激振程度显著增强，颗粒之间分散性增大，颗粒流更趋向于稀疏态。相比之下，颗粒规模的增加虽未显著改变深度平均剪切速率的量值，但显著提高了基底局部集中剪切带内的剪切速率，增强了基底颗粒的激振程度，从而使颗粒流在厚度方向上稀疏、超稀疏与浓密流态的分异更加明显。与此同时，颗粒规模的增加有效增大了流动厚度（即法向应力水平），对基底剪切带内处于稀

4 讨论

疏强烈碰撞颗粒的进一步发展形成约束，同时提高了处于浓密准静态颗粒的相对占比，从而降低了颗粒系统的能量耗散，增强了颗粒流的整体流动能力。

4.2 高速颗粒流多相态力学传递机制

高速颗粒流的多相态动力学特性本质上源于颗粒体系内部速度梯度差异引发的碰撞与速度波（即颗粒激振），并且在不同流态下颗粒之间遵循不同的力学传递机制。首先，为了量化颗粒内部的激振程度，本文采用颗粒温度对其进行定量表征。如式 4

所示，在流动过程中，颗粒流体系中每一个颗粒的速度 (\mathbf{u}) 可以被分解为由两部分构成，分别是颗粒体系的平均速度 ($\bar{\mathbf{u}}$) 和随机速度 (\mathbf{u}') (Ogawa, 1978):

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad (4)$$

Ogawa (1978) 认为颗粒的随机运动速度类似于热力学中的气体分子运动，提出采用颗粒温度 T 来描述颗粒的激振程度。颗粒温度 T 可以计算为两倍的单位质量颗粒波动动能，定义为：

$$T = (\mathbf{u} - \bar{\mathbf{u}})^2 = (\mathbf{u}')^2 \quad (5)$$

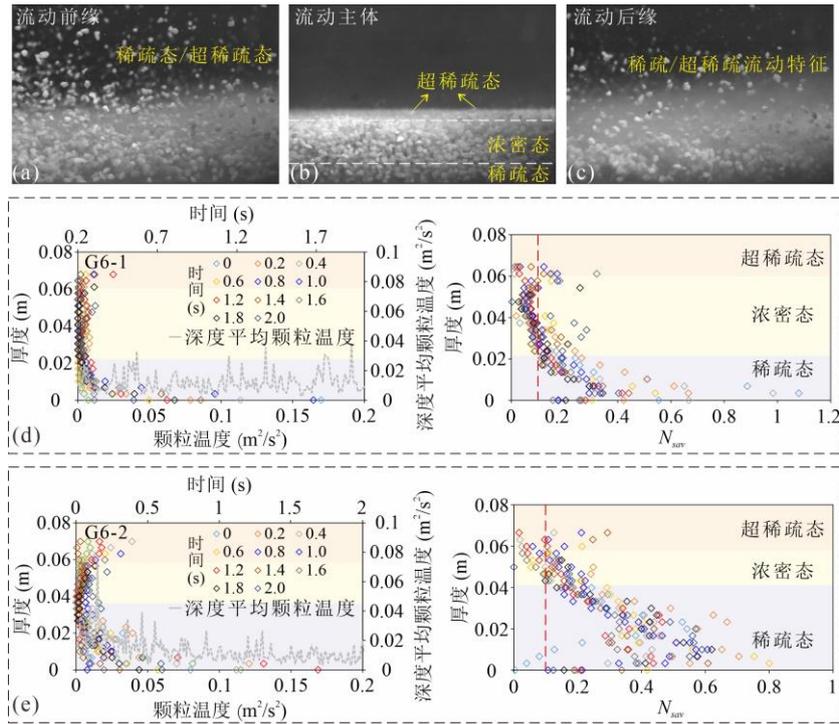


图 14 高速颗粒流多相态动力学特征

Fig. 14 Dynamic Characteristics of Rapid Granular Flow in Multiphase States

颗粒温度的产生机制主要是颗粒之间存在速度梯度，并沿颗粒流体系平均流动速度的矢量方向上具有最大值 (Campbell, 2006)。因此，这里仅计算颗粒流沿着滑槽方向上的颗粒温度。基于 PIVlab 所得的颗粒流速度场，利用式 5 计算了各试验组颗粒温度在厚度方向上的分布特征，并进一步统计了深度平均的颗粒温度 (\bar{T})。在计算颗粒温度时，选取的时间平均窗口大小对结果极为关键。试验采用的高速相机采样频率为 2000 帧/秒，以 20 张连续图像为一组进行时间平均，对应时间窗口为 0.01s。该时间窗口相对于碎屑流整体运动及低频涌动等有组织流动结构的特征时间尺度较小，同时又能够涵盖多次颗粒碰撞过程，因此可有效分离随机颗粒运动引起的速度脉动与低频整体流动波动。

图 14d 和 14e 展示了颗粒流规模最大的试验组 G6 在 2 号和 3 号高速相机对应位置的颗粒温度及其深度平均值 (图中灰色线条)。从图中可以看出，颗粒温度沿厚度方向总体呈现先降后升的分布特征，其较高值集中分布于基底和自由面附近，并朝向颗粒流内部显著衰减。在高速剪切颗粒流中，颗粒体系的温度演化由剪切做功与非弹性碰撞耗能之间的竞争机制控制：前者与剪切速率 (即速度梯度) 正相关，后者则主要受颗粒浓度主导，浓度越高耗散越快 (Campbell, 2006)。因此，高剪切速率且颗粒浓度偏低的区域成为温度较高值的主要分布带。在本试验中，基底局部集中剪切带 (图 8c) 与高颗粒温度分布区 (图 14d 和 14e) 在空间上高度重合，而颗粒温度的量值变化相较于剪切速率分布更具辨识

度。由于较高颗粒温度意味着更强烈的颗粒激振行为，即更趋向于惯性流动，因此颗粒的高温/低温主导区可直接作为稀疏—超稀疏态与浓密态流动的识别标志。进一步对比两个高速相机点位处的颗粒温度场可以发现，随着颗粒流沿滑槽加速，颗粒流变学特性持续演化，颗粒体系的颗粒温度明显升高，颗粒温度较高区的厚度也呈现出扩张的趋势。该现象表明颗粒体系整体向稀疏甚至超稀疏态演化，具体表现为浓密态主导区域的收缩以及稀疏化程度的增强。

其次，引入无量纲 Savage 数 (N_{Sav})，以定量表征高速颗粒流中碰撞-剪切关键流变力学状态的主导机制，其计算公式如式 6 所示(Zhou 和 Sun, 2013; Zhang 等, 2022):

$$N_{Sav} = \frac{\gamma^2 d^2}{gH \tan \phi} \quad (6)$$

式中， γ 是剪切速率； d 是颗粒的平均粒径； g 是重力加速度； H 是流动厚度， ϕ 是颗粒的内摩擦角。随着 Savage 数的增大，颗粒流内部的碰撞作用逐渐占据主导，通常以 0.1 作为区分碰撞主导与剪切主导流动状态的临界阈值。利用式 6 计算确定了典型试验组 G6 的 N_{Sav} 在厚度方向上的分布(图 14d 和 14e)。从图中可以看出， N_{Sav} 在厚度方向上总体上呈现出先减小后增大的分布特征：在颗粒流基底和自由表面附近， N_{Sav} 往往大于 0.1，而在颗粒流中部则出现 N_{Sav} 小于 0.1 的区域，形成明显的流变力学状态分异特征。随着颗粒流由 2 号高速相机向 3 号高速相机位置持续加速， N_{Sav} 较大值的主导区域明显扩展，表明颗粒体系内部碰撞效应不断增强。上述分布特征表明，颗粒流在基底和顶部区域以碰撞作用为主，而在中部主体区域以剪切作用为主，并且随着颗粒流持续加速，颗粒间的碰撞作用将变得更为显著。

此外，对比图 14d 和 14e 中颗粒温度和 N_{Sav} 的分布，发现较高和较低颗粒温度主导区域分别与较大和较低 N_{Sav} 主导区域基本一致。基于此，本文提出高速颗粒流中的碰撞-剪切主导应力状态与颗粒超稀疏-稀疏-浓密状态密切相关。在颗粒流的底部，颗粒温度较高， N_{Sav} 大于 0.1，表现出以强烈碰撞作用为主的稀疏态；在颗粒流的中部，颗粒温度趋近于 0， N_{Sav} 小于 0.1，表现出以低扰动剪切作用为主的浓密态；在颗粒流顶部自由表面附近，因缺乏应

力约束，颗粒温度较高，且 N_{Sav} 大于 0.1，表现出以低频碰撞作用为主的超稀疏态。

4.3 高位崩滑碎屑流动力学建模启示

试验揭示的颗粒流在高速运动过程中普遍存在的多相态共存、多相态转换及其伴随的结构性流动特征，为发展能够真实反映高位崩滑碎屑流动力学行为的理论与数值模型提供了关键物理约束，从而为灾害效应预测及重大工程防灾减灾提供了重要参考。目前用于刻画高位崩滑碎屑流动力学的模型主要包括两种类型：其一是以离散单元法为核心的颗粒流模型，能够直接刻画解体破碎、碰撞、剪切以及颗粒微观尺度上的相互作用过程。然而，受限于计算能力，该类模型中可模拟的颗粒数量与实际差距巨大，单颗粒尺寸通过被放大至米级，难以与实际滑坡保持一致(Zhang 等, 2023; 高杨等, 2023)；其二是将高位崩滑碎屑流非连续性的运动过程简化为连续过程的等效流体模型，通过二维深度积分处理后显著提升了计算效率，但是在本质上忽略了颗粒运动差异导致的多相态结构及其转换，无法刻画高速运动过程中的关键动力特性，其模拟精度往往依赖于对流变本构模型和流变学参数的反复试算与调整(Cagnoli 和 Piersanti, 2015)。试验所展示的相态分异、激振、剪切带迁移以及随运动加速而增强的稀疏化趋势表明，高位崩滑碎屑流在宏观上虽表现为连续介质行为，但在动力学本质上属于典型的“有效连续—颗粒介质”耦合系统，其流态演化无法由单一描述框架充分捕捉。因此，对高位崩滑碎屑流的真实建模可引入以颗粒浓度、颗粒温度等为核心的状态参量，实现对浓密态—稀疏态—超稀疏态等多相态的动力学辨识与碰撞-剪切跨相态本构切换，并通过离散—连续耦合、多本构动态转换等方式构建能够刻画相态耦合与动力学重构过程的新模型，以突破现有模型不足。

5 结论

颗粒集合体是极高山区高位崩滑碎屑流动力传递过程中主要的物质组成形态与能量承载，揭示其在高速运动过程中的流变学特性，是从细观尺度上阐明高位崩滑碎屑流动力学机理的重要手段。本文依托大型物理模型试验平台，开展了不同颗粒粒径与体积条件下的高速颗粒流大型试验，并结合高速相机与基底力监测数据，对颗粒流速度、剪切速率、

流态结构、颗粒温度等关键流变学参量及其演化规律进行了系统分析。在此基础上，提出了高速颗粒流多相态共存、多相态转换的动力学特征。主要结论如下：

(1) 试验发现，高速颗粒流在运动过程中普遍呈现出多相态的动力学特征。前缘与后缘始终分布着大量稀疏、跳跃的分散颗粒，浓度极低，整体上表现为稀疏/超稀疏态的流动特征，而流动的主体区域则形成由下至上的三层流动分异，即基底在局部集中剪切作用下发生剪切稀化并维持高激振的稀疏态，中部主体区以低剪切、低速度梯度的高浓度堵塞态为主，呈现近似刚性“固体板”的准静态流动，而自由表面附近的颗粒则在弱约束下表现为高度弥散的超稀疏态。随着颗粒流加速运动，颗粒体系整体向稀疏甚至超稀疏态演化，具体表现为浓密态主导区域的收缩以及稀疏化程度的增强。

(2) 颗粒粒径和体积对高速颗粒流的多相态动力学特征具有关键控制作用。随着颗粒粒径增大，尽管深度平均剪切速率有所降低，但颗粒流内部剪切结构由基底局部集中剪切逐渐演化为整体性的差异性剪切，激振程度显著增强、颗粒之间分散性增大，颗粒体系更趋向于稀疏态演化。相比之下，颗粒规模的增加虽未显著改变深度平均剪切速率的量值，但却显著提高了基底局部集中剪切带内的剪切速率，增强了基底层颗粒的激振程度，从而使得颗粒流在厚度方向上稀疏、超稀疏与浓密流态的分异更为突出。

(3) 研究发现，高速颗粒流中的碰撞-剪切主导应力状态与颗粒超稀疏-稀疏-浓密状态密切相关。在颗粒流的底部，表现出以强烈碰撞作用为主的稀疏态；在颗粒流的中部，表现出以低扰动剪切作用为主的浓密态；在颗粒流顶部自由表面附近，表现出以低频次碰撞作用为主的超稀疏态。

(4) 高速颗粒流所呈现的多相态动力学特征对建立高位崩滑碎屑流动力学模型构建提供了重要启示，可引入以颗粒浓度、颗粒温度等为核心的状态参量，实现对浓密态—稀疏态—超稀疏态等多相态的动力学辨识与碰撞-剪切跨相态本构切换，并通过离散—连续耦合、多本构动态转换等方式，构建能够刻画多相态耦合与转换的新模型。

References:

- Arran M, Mangeney A, De Rosny J, et al, 2021. Laboratory landslides: Insights from experiments into the high-frequency seismic signal generated by geophysical granular flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(5): e2021JF006172.
- Bachelet V, Mangeney A, Toussaint R, et al, 2023. Acoustic emissions of nearly steady and uniform granular flows: A proxy for flow dynamics and velocity fluctuations. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(4): e2022JF006990.
- Bartali R, Nahmad-Molinari Y, Rodriguez-Liñán G, et al, 2020. Gravity-Driven Monodisperse Avalanches: Inertial-to Frictional-Dominated Flow. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53: 3507-3520.
- Bartali R, Sarocchi D, Nahmad-Molinari Y, 2015. Stick-slip motion and high-speed ejecta in granular avalanches detected through a multi-sensors flume. *Engineering Geology*, 195: 248-257.
- Bryant S, Take W, Bowman E, 2015. Observations of grain-scale interactions and simulation of dry granular flows in a large-scale flume. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(5): 638-655.
- Cagnoli B, Piersanti A, 2015. Grain size and flow volume effects on granular flow mobility in numerical simulations: 3-D discrete element modeling of flows of angular rock fragments *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 2350-2366.
- Campbell C, 1990. Rapid Granular Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 22(1): 57-90.
- Campbell C, 2006. Granular material flows-an overview. *Powder Technology*, 162(3): 208-229.
- Chang W, Xing A, Zhang Y. Dynamic fragmentation characteristics of a heavily Jointed Rock Avalanche: DEM simulation and field seismic signal analysis[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 172: 106459.
- Davies T, McSaveney M, Hodgson K, 1999. A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36: 1096-1110.
- De Haas T, Braat L, Leuven J R F W, et al, 2015. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9): 1949-1972.
- Delannay R, Valance A, Mangeney A, et al, 2017. Granular and particle-laden flows: from laboratory experiments to field observations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(5): 053001.
- Du J, Zhou G, Cui K, 2023. Microscopic Description of Basal Stress Generated by Granular Free-surface Flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, e2022JF006953.

- Evans, S., Mugnozza, G.S., Strom, A., et al., 2006. Landslides from Massive Rock Slope Failure and Associated Phenomena. *Landslide*, 49:03-52. doi:10.1007/978-1-4020-4037-5_1
- Farin M, Tsai V, Lamb M, et al, 2019. A physical model of the high-frequency seismic signal generated by debris flows. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(13): 2529-2543.
- Forterre Y, Pouliquen O., 2008. Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40(1), 1–24.
- Gao Y, Chen F, Yin Y, et al, 2025. Numerical simulation of anisotropic landslide dam behavior in high-altitude environments of the Tibetan Plateau using a continuum model of multiphase-state fluid. *Engineering Geology*, 108385.
- Gao Y, Li B, Gao H, et al, 2023. Risk assessment of the Sedongpu high-altitude and ultra-long-runout landslide in the lower Yarlung Zangbo River, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(9): 360.
- Gao Y, Yin Y, Li B, et al, 2024. Multistate transition and coupled solid-liquid modeling of motion process of long-runout landslide. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(7): 2694-2714.
- Gao Y, Zhuang Y, Li B, et al. Entrainment-driven transition from avalanche to debris flow: Insights from the 2018 Sedongpu event[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2026, 131(2): e2025JF008750.
- Hsu L, Dietrich W, Sklar L, 2014. Mean and fluctuating basal forces generated by granular flows: Laboratory observations in a large vertically rotating drum. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(6): 1283-1309.
- Hsu L, Dietrich W, Sklar L, 2014. Mean and fluctuating basal forces generated by granular flows: Laboratory observations in a large vertically rotating drum. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(6): 1283-1309.
- Iverson R, 1997. The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3): 245-296.
- Iverson R, Logan M, Denlinger R, 2004. Granular avalanches across irregular three-dimensional terrain: 2. Experimental tests. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 109(F1).
- Jop P, Forterre Y, Pouliquen O, 2005. Crucial role of sidewalls in granular surface flows: consequences for the rheology. *Journal of fluid mechanics*, 2005, 541: 167-192.
- Kokelaar B, Graham R, Gray J, et al, 2014. Fine-grained linings of levee channels facilitate runout of granular flows. *Earth and Planetary Science Letters*, 385: 172-180.
- Langlois V, Quiquerez A, Allemand P, 2015. Collapse of a two-dimensional brittle granular column: Implications for understanding dynamic rock fragmentation in a landslide. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(9): 1866-1880.
- Li K, Wang Y, Cheng Q, et al, 2022. Insight into granular flow dynamics relying on basal stress measurements: From experimental flume tests. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3): e2021JB022905.
- Li K, Wang Y, Lin Q, et al, 2021. Experiments on granular flow behavior and deposit characteristics: Implications for rock avalanche kinematics. *Landslides*, 18: 1779-1799.
- Locat P, Couture R, Leroueil S, et al, 2006. Fragmentation energy in rock avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 43: 830–851.
- McCoy S, Tucker G, Kean J, et al, 2013. Field measurement of basal forces generated by erosive debris flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118: 589-602.
- Mergili M, Frank B, Fischer J, et al, 2018. Computational experiments on the 1962 and 1970 landslide events at Huascarán (Peru) with ravaflow: Lessons learned for predictive mass flow simulations. *Geomorphology*, 2018, 322: 15-28.
- Ogawa S, 1978. Multitemperature theory of granular materials//Proc. of the US-Japan Seminar on Continuum Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, 1978. *Gakajutsu Bunku Fukyu-Kai*, 208-217.
- Sanvitale N, Bowman E, 2017. Visualization of dominant stress-transfer mechanisms in experimental debris flows of different particle-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(2): 258-269.
- Shugar D, Jacquemart M, Shean D, et al, 2021. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373(6552): 300-306.
- Wang Y, Cheng Q, Yuan Y, et al, 2020. Emplacement mechanisms of the Tagarma rock avalanche on the Pamir-western Himalayan syntaxis of the Tibetan Plateau, China. *Landslides*, 17: 527-542.
- Wang Q, Xing A, Xu X, et al. Formation mechanism and dynamic process of open-pit coal mine landslides: a case study of the Xinjing landslide in Inner Mongolia, China[J]. *Landslides*, 2024, 21(3): 541-556.
- Wang Q, Li B, Xing A, et al. Failure process analysis of a catastrophic landslide in Zhenxiong triggered by prolonged low-intensity rainfall using centrifuge tests[J]. *Engineering Geology*, 2025, 351: 108044.

- Yin Y, Li B, Gao Y, et al, 2023. Geostrutures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(1): 66-101.
- Zhang S, Gao Y, Yin Y, et al, 2026. Experimental investigation and numerical modeling of substrate erosion and entrainment in rock avalanches. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2026.
- Zhang S L, Yin Y P, Hu X W, et al, 2023. Block-grain phase transition in rock avalanches: Insights from large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(11): e2023JF007204.
- Zhang S, Yin Y, Li H, et al, 2022. Transport process and mechanism of the Hongshiyuan rock avalanche triggered by the 2014 Ludian earthquake, China. *Landslides*, 19(8): 1987-2004.
- Zhou G, Sun Q, 2013. Three-dimensional numerical study on flow regimes of dry granular flows by DEM. *Powder technology*, 239: 115-127.
- 高杨, 殷跃平, 李滨, 2023. 考虑颗粒状态转化的高位远程滑坡数值模拟方法. *岩石力学与工程学报*, 42(7): 1623-1637.
- 高杨, 殷跃平, 李壮, 等, 2022. 高位远程岩质滑坡动力解体效应研究. *岩石力学与工程学报*, 41(10): 1958-1970.
- 高杨, 尹浩栋, 陈福振, 等. 高位远程地质灾害多相态动力学数值模拟研究综述[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2026, 37(1): 1-17.
- 贺旭荣, 殷跃平, 赵立明, 等. 基于大型物理模型试验的高位岩质滑坡碎屑流解体破碎效应[J]. *地球科学*, 2024, 49(7): 2650-2661.
- 李滨, 高杨, 庄宇, 等. 瑞士瓦莱州 Blatten 高位远程崩滑碎屑流成灾特征与级联放大效应[J]. *地球科学*, 2025, 50(12): 4950-4969.
- 李滨, 殷跃平, 谭成轩, 等, 2022. 喜马拉雅东构造结工程选址面临的地质安全挑战. *地质力学学报*, 28(6): 907-918.
- 李坤, 王玉峰, 程谦恭, 等, 2021. 分形粒径分布对颗粒流粒径分选的影响规律. *岩石力学与工程学报*, 40: 330-343.
- 彭建兵, 张永双, 黄达, 等. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应[J]. *地球科学*, 2023, 48(8): 3099-3114.
- 司鹏飞, 2019. 颗粒体-流体混合物的两相流模型及其应用 清华大学.
- 殷跃平, 2000. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究. *水文地质工程地质*, 27: 8-11.
- 殷跃平, 高少华, 2024. 高位远程地质灾害研究: 回顾与展望. *中国地质灾害与防治学报*, 35(1): 1-18.
- 殷跃平, 张仕林, 霍子豪, 等, 2025. 瑞士阿尔卑斯桦树“5·28”高位远程冰岩崩-碎屑流研究. *中国地质灾害与防治学报*, 36(4): 1- 14.
- 殷跃平, 朱赛楠, 李滨, 2021. 青藏高原高位远程地质灾害. 中国科学出版社, 2021.
- 郑虎, 牛文清, 毛无卫, 等, 2021. 颗粒物质力学及其在工程地质领域中的应用初探. *工程地质学报*, 29: 12-24.
- 张永双, 任三绍, 李金秋, 等. 怒江构造混杂岩带多拉寺滑坡的易滑地质结构及高位启滑运动机制[J]. *地球科学*, 2023, 48(12): 4668-4679.