

引用格式:覃耀,杨情情,罗鑫,佟璐冶,余晨. 基于PIV技术的冰-岩碎屑流运动特性斜槽实验研究[J]. 山地学报, 2025, 43(1): 144-156.
QIN Yao, YANG Qingqing, LUO Xin, TONG Luye, YU Chen. Experimental study on mobility of rock-ice avalanches by flume test using PIV technology [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 144-156.

基于 PIV 技术的冰-岩碎屑流运动特性斜槽实验研究

覃耀,杨情情*,罗鑫,佟璐冶,余晨

(西南交通大学 地球科学与工程学院,成都 611756)

摘要:冰-岩碎屑流作为高寒山区特有的多相复合型地质灾害,其运动过程涉及复杂的流固耦合效应。现有研究对微量相变水介导的固液耦合作用及其对颗粒流剪切力学行为与堆积形态的影响机制仍显不足。本研究采用斜槽实验,结合粒子图像测速技术(PIV),定量解析不同含冰量(0%、20%、40%和60%)条件下冰-岩混合材料的动力学响应规律及堆积特征。实验结果表明:(1)含冰量增加通过降低颗粒间摩擦系数显著提升物质运移能力。(2)薄层水膜润滑效应与毛细吸附阻力之间相互作用主导颗粒流运动状态。随融水量增加,颗粒表面水膜逐渐增厚,初期产生润滑作用,降低摩擦阻力,从而增强冰-岩混合材料的运动性和堆积体的侧展程度。进一步的水膜增厚导致毛细吸附作用增强摩擦,抑制运动性和堆积体的侧展。(3)剪切变形场呈现显著层状分异特征。冰屑糙率较小,多集中在颗粒流上层,受外力影响较小,保持了层间稳定性和速度一致性。底部岩屑剪切层的剪切速率高于表层冰屑剪切层,其剪切速率随层内冰屑含量增加而减小。(4)惯性数分析表明,20%和40%含冰量颗粒流的惯性数小于0.5,均呈现密集流特征,且40%含冰量颗粒流的惯性数更低。冰相组分通过抑制颗粒碰撞显著增强颗粒流的密集态流动特征。本研究有助于深化冰-岩碎屑流的运动机理和流态特征,为高寒山区冰-岩碎屑流的防灾减灾工作提供科学依据。

关键词:冰-岩碎屑流;斜槽实验;含冰量;融水量;剪切速率;流态特征

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

高寒山区冰川解体、陡峭山体崩塌或高位滑坡坠落后,形成挟带冰屑的特殊高速远程冰-岩碎屑流(Rock-ice avalanches),其典型特征表现超高方量($>10^6 \text{ m}^3$ 量级)、强冲击性(流速可达 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)及复杂流固耦合效应^[1-3]。在全球气候变暖背景下,冰川相变过程加速、极端水文事件频发以及人类活动的协同效应,导致冰-岩碎屑流灾害呈现显著时空扩张态势^[4-6]。例如,2000年西藏波密县易贡乡

扎木弄巴沟发生冰-岩碎屑流(方量约 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$,位移8 km),引发堰塞湖溃决造成链式灾害^[7-10]。2021年2月印度查莫利(Chamoli)地区发生冰川断裂,解体的冰岩体在运动过程中转化为冰-岩碎屑流(位移12.4 km)^[11-12]。

冰-岩碎屑流运动机理研究已成为地质灾害领域的热点和前沿课题。室内物理模型实验作为揭示冰-岩碎屑流运动机理的重要手段,具有不可替代的

收稿日期(Received date): 2024-11-02;改回日期(Accepted date): 2025-01-12

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42277127);四川省自然科学基金(2022NSFSC1164)。[National Natural Science Foundation of China (42277127); Natural Science Foundation of Sichuan Province of China (2022NSFSC1164)]

作者简介(Biography): 覃耀(1999-),男,重庆大足人,硕士研究生,主要研究方向:地质灾害防治工程。[QIN Yao (1999-), male, born in Dazu, Chongqing, M. Sc. candidate, research on engineering for prevention and control of geological hazards] E-mail: qinyao@my.swjtu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 杨情情(1984-),女,湖南慈利人,博士,副教授,主要研究方向:冰-岩碎屑流的运动机理和堆积特征。[YANG Qingqing (1984-), female, born in Cili, Hunan Province, Ph. D., associate professor, research on dynamics and deposition characteristics of rock-ice avalanches] E-mail: yangqq@swjtu.edu.cn

作用。其中,转鼓实验被广泛应用于模拟冰-岩混合材料的流动过程,研究热融过程中融水对摩擦系数的影响^[13]和流动过程中流态演化的规律及基底应力特性^[14-15]。同时,转鼓实验还深入探索含冰量、颗粒粒径、融水量及转鼓转速等因素对摩擦机制的影响。

相较于转鼓实验,斜槽实验在模拟冰-岩碎屑流的冲出和堆积过程方面更具优势。斜槽实验能够直观展示堆积形态,便于提取运动速度和剪切速率等参数,从而评估含冰量、初始组构及微量融水对运动特性的影响^[16-17]。此外,斜槽实验还能够模拟冰-岩碎屑流对刚性屏障的冲击过程,分析含冰量对冲击力的影响机制^[18],并结合数值模拟方法,揭示冰、岩材料特性在流动过程中对分选机制的影响^[19]。

尽管物理模型实验在再现冰-岩碎屑流运动过程,探讨材料因素(初始物质组构、冰融水、颗粒粒径等)对冰-岩碎屑流分选机制、摩擦特性、冲击力等影响方面取得了显著进展,但对于冰-岩碎屑流的运动过程,特别是其剪切特征和堆积形态特征等方面的研究仍显不足。

为解决这一问题,本研究引入了粒子图像测速技术(Particle image velocimetry, PIV)来捕捉颗粒流的运动过程并进行分析。PIV 源于 20 世纪 20 年代

的流体实验^[20],近年来常被用于测量土体变形特征^[21-22]。PIV 基于数字图像相关(Digital image correlation, DIC)的图像分析方法,能够实现对颗粒流运动过程的精确捕捉和量化分析,已成为颗粒流动力学研究的重要工具^[23-25]。

本文通过斜槽实验模拟冰-岩碎屑流的冲出和堆积过程,获取冲出距离、运动速度、剪切速率、惯性数等运动学参数,刻画冰-岩碎屑流的运动特性和流态特征,分析含冰量和微量融水对冰-岩碎屑流运动学的影响机制。研究成果不仅有助于深入理解冰-岩碎屑流的运动机理,也可高寒山区冰-岩碎屑流灾害的科学防灾减灾工作提供科学依据。

1 实验设备及方法

1.1 实验装置及材料

实验装置由斜槽(长 240 cm、宽 20 cm,倾角 35°)和堆积平板(长 300 cm、宽 200 cm,水平放置)两部分组成,如图 1 所示。槽宽为最大颗粒直径(1 cm)的 20 倍,边界效应可忽略^[26]。抽拉式挡板垂直于斜槽底面,通过快速抽拉挡板释放物料。堆积平板表面覆以 5 cm × 5 cm 网格的刻度膜,以便观测堆积体覆盖范围。斜槽侧面布设一台高速相机

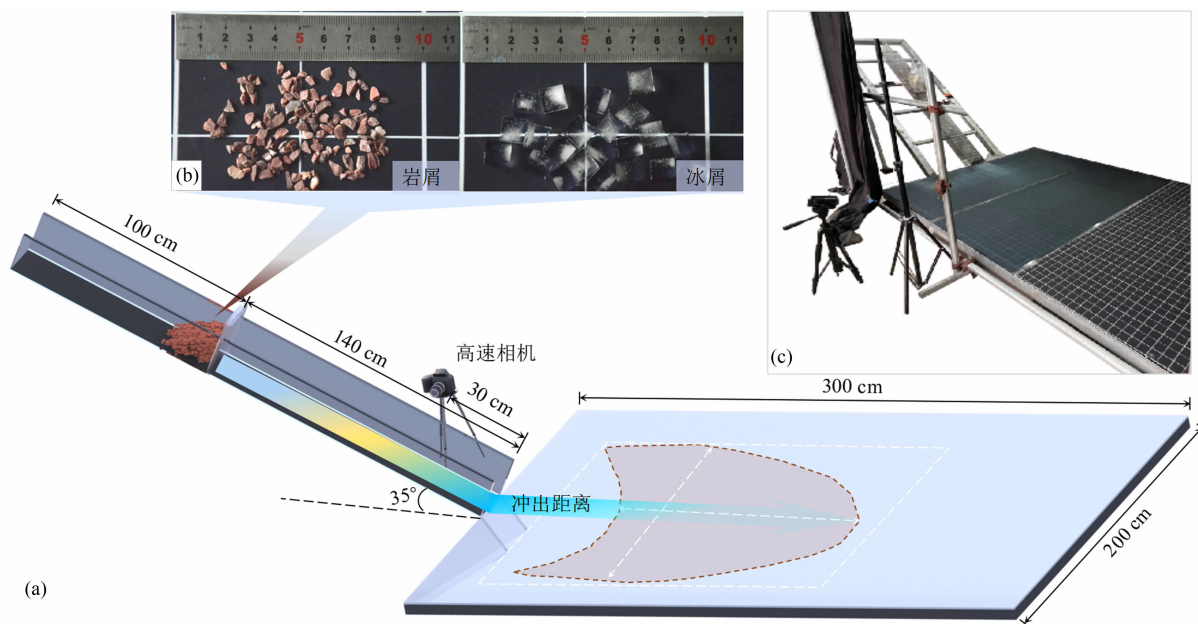


图 1 实验装置图:(a)斜槽示意图;(b)实验材料;(c)斜槽实物图

Fig. 1 Diagram of the experimental device;

(a) sketches of the experimental flume; (b) experimental materials; (c) physical diagram of the experimental flume

(型号 EoSens® 2.0CXP2, 帧率 1000 fps, 分辨率 1980 × 1080 px) 放置于距槽口 30 cm 处, 捕捉颗粒流在斜槽末段的运动形态图像, 并利用 PIV 技术计算流速、流深等运动学参数。

实验材料经机械破碎并筛分的 2 ~ 5 mm 粒径石英砂岩碎屑物 (颗粒密度为 2760 kg/m³) 以及统一制式的 1 cm³ 的规则冰块作为实验材料, 冰、岩颗粒粒径差异较大利于分选。释放物料总重均为 3 kg (2 ~ 3 L)。

1.2 工况设计

参考 Yang^[16] 等的实验结果 (80% 含冰量类似纯冰崩), 实验设置 4 组含冰量 (0%、20%、40% 和 60%), 根据岩屑最大持水量设置 6 组融水量 (0%、1%、2%、3%、4% 和 5%), 采用全因子实验设计方法系统解析冰-水耦合效应, 形成 24 组工况 (表 1)。预实验证实, 无水工况下基质吸湿率趋近于零, 可有效规避二次相变干扰。为避免出现冰、岩结团现象^[17], 采用浓度为 5% 的 NaCl 溶液模拟冰融水^[27], 融水质量按干燥岩屑质量的百分比添加。

表 1 实验工况表

Tab. 1 Conditions of the experiments

含冰量/%	冰屑质量/g	融水量/%	NaCl 溶液质量/g
0	0	0/1/2/3/4/5	0/30/60/90/120/150
20	600	0/1/2/3/4/5	0/24/48/72/96/120
40	1200	0/1/2/3/4/5	0/18/36/54/72/90
60	1800	0/1/2/3/4/5	0/12/24/36/48/60

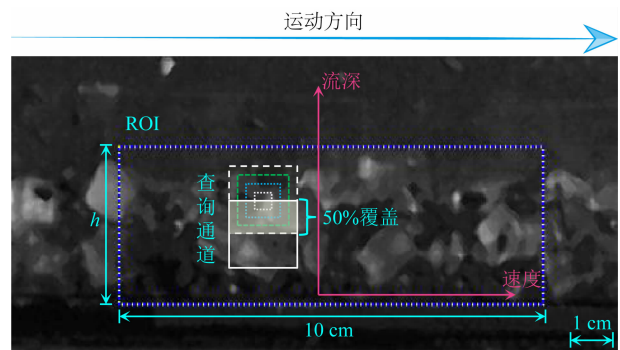
为减少热扰动对实验结果的影响, 在冬季进行实验, 室温为 10 ℃ 左右。将岩屑漂洗、烘干后, 冷却至 -15 ℃ 备用; 提前制备冰屑 (-23 ℃ ~ -17 ℃); 使用冰袋对槽体进行降温处理; 将预冷后的 NaCl 溶液混入岩屑中, 经充分搅后加入冰屑; 将混合均匀的冰-岩混合材料填入料仓进行实验 (混料、填料和释放过程在 1 min 内完成)。

1.3 数据获取

实验模拟冰-岩碎屑流的冲出和堆积过程, 获取冲出距离、流体速度、流体深度等运动学参数。冲出距离定义为颗粒流前端沿斜槽段和平板段的运动距离 (图 1a)。

为深入分析冰-岩碎屑流的运动机理和剪切特

征, 通过 PIV 技术获取颗粒流侧面速度场时空演化特征。基于 PIVlab 开源软件^[28] 设置多级互相关算法解算流场参数: 首先对侧视影像感兴趣区域 (图 2) 进行网格化分区, 通过相邻双帧图像纹理位移追踪^[29] 获取瞬时速度矢量及流深数据。为提高计算精度, 通过正交试验优化查询通道 (Interrogation area) 参数组合 (尺寸、重叠率、数量), 经过多次试算与人工对比, 确定采用四查询通道多级互相关算法 (64 × 50 × 36 × 22 px, 重叠率 50%)^[30], 并以 25 帧间隔 ($\Delta t = 0.025$ s) 的时域平均法抑制随机噪声干扰。



ROI 即 Region of interest, 表示感兴趣区域; 高度 h 自适应流深变化。

图 2 PIV 计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PIV calculation

2 实验结果分析

2.1 堆积形态

颗粒流冲出斜槽后, 由于失去斜槽侧壁约束, 逐渐呈现侧向展布趋势, 堆积体形态如图 3 所示。不同工况用 I 和 W 加数字表示, 例如 I20W4 表示 20% 含冰量、4% 融水量的工况。随含冰量增加, 堆积体侧向展布越显著; 随融水量增加, 堆积体侧向展布程度不断变化。用堆积体长宽比衡量堆积体侧展程度, 堆积体长宽比定义为堆积体的中轴线长度和最大宽度之比, 计算结果如图 4 所示。

(1) 含冰量

融水量一定, 随含冰量增加, 堆积体长宽比减小, 堆积体侧向展布越显著。颗粒流脱离斜槽侧限约束后, 流深持续衰减引发厚度方向势能梯度重分布, 进而转化为多向动能耗散过程。当侧向扩散力足以克服基底摩阻时, 颗粒沿主流动方向移动的同时, 将发生明显的侧向偏移。相较于岩屑颗粒, 冰屑

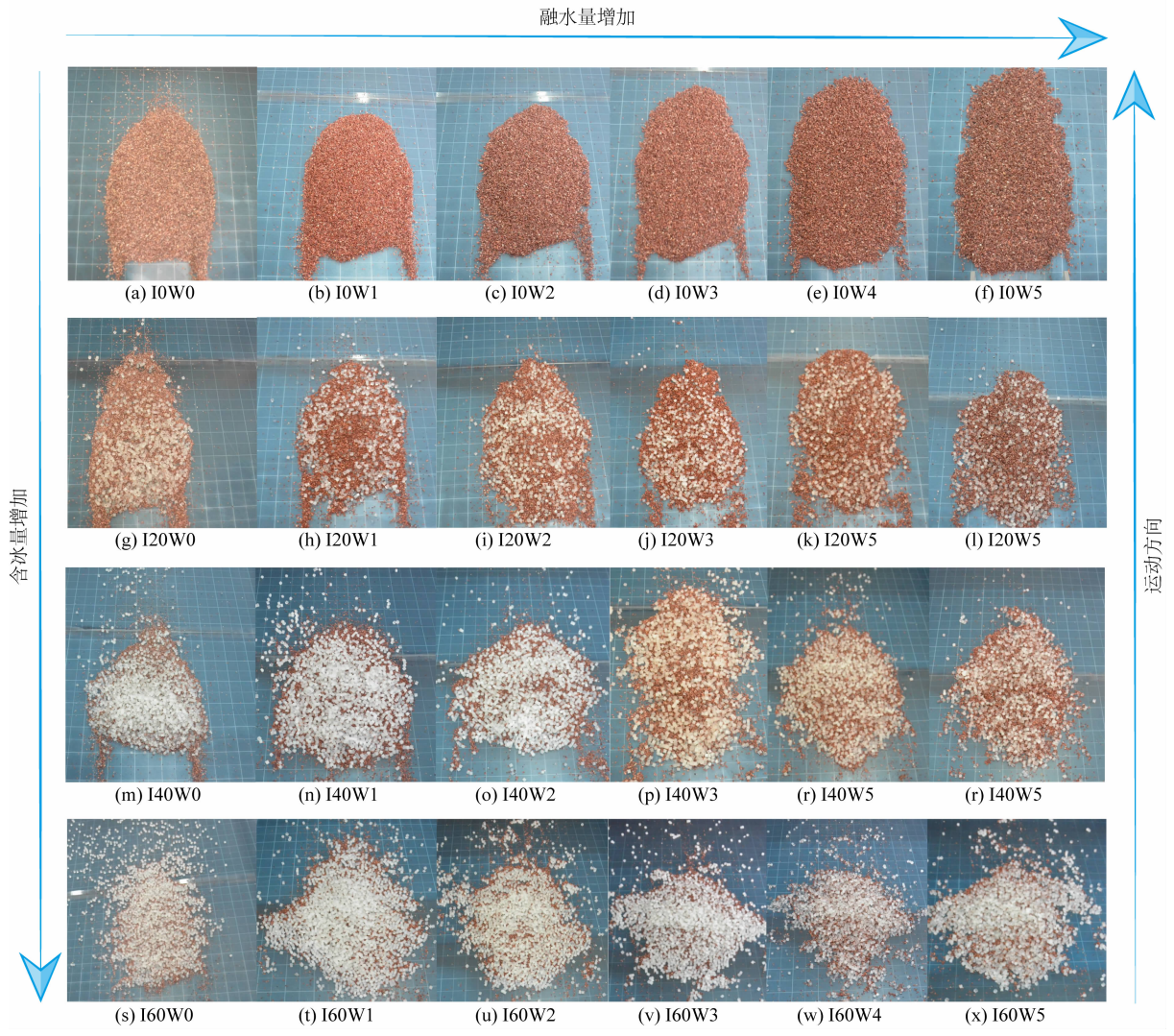


图 3 堆积形态
Fig. 3 Deposition morphology

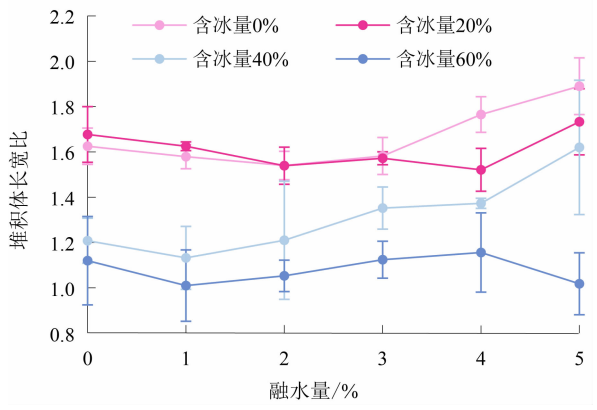


图 4 2~5 mm 粒径系列工况堆积体平均长宽比
Fig. 4 Average length-to-width ratio of the deposits
for 2-5 mm particle size conditions

因表面糙度较低,具有更显著的横向动量传递效率。因此,随着含冰量的增加,颗粒流整体的侧向扩散程度也随之提高,导致堆积体长宽比减小。

(2) 融水量

含冰量一定,随融水量增加,堆积体长宽比总体呈“先减小、后增加”的非线性演化特征。融水量较低时(0%和20%含冰量工况下的0%~2%融水量;40%含冰量工况下的0%~1%融水量),水分润滑颗粒^[31],有效降低基底摩擦系数,增强颗粒横向迁移能力,促使堆积体长宽比减小。

融水量增加时(0%和20%含冰量工况下的3%~5%融水量;40%含冰量工况下的2%~5%融水量),液体的黏性足以抵抗侧向扩散力,颗粒的扩散运动矢量在左右两侧相互抵消,导致侧向扩散合力

趋于减小或消失,促使堆积体的长宽比增大,形态趋于细长。

2.2 冲出距离

冰-岩混合材料的冲出距离如图 5 所示。相同融水量工况下,随含冰量增加,冲出距离逐步增加;相同含冰量工况下,随融水量增加,冲出距离呈现出“先增加、后减小、再增加”的趋势。

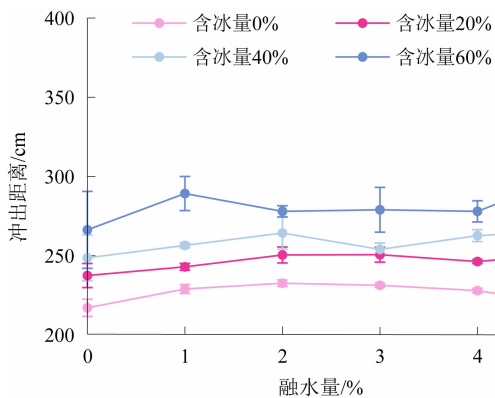


图 5 平均冲出距离

Fig. 5 Average run-out distance

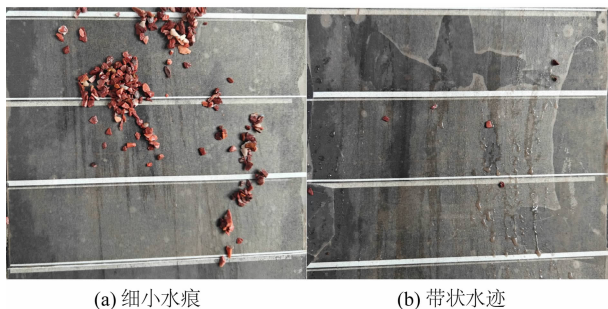
(1) 含冰量

低摩擦的冰屑增加,冰-岩混合材料的基底摩擦、侧限摩擦以及粒间摩擦减小,受摩擦控制的耗能减小,因此冲出距离增加。

(2) 融水量

0% 含冰量工况的冲出距离呈现“先增加、后减小”的规律。1%~2% 融水量润滑颗粒^[31],导致冲出距离增加。融水量增至 3%~5% 时,槽底出现细小水痕(无肉眼可见水珠)并黏滞岩屑颗粒(如图 6a),说明基底毛细吸附效应^[32]增大基底摩擦,导致颗粒流运动性下降,冲出距离减小。

20%、40% 含冰量工况的冲出距离呈现“先增



(a) 细小水痕

(b) 带状水迹

图 6 残存水渍

Fig. 6 Residual water stains

加、后减小、再增加”的规律。随着融水量增加,水分先后发挥润滑和毛细吸附双重效应,导致冲出距离先增加后减小。随着融水量进一步增加,槽底出现带状水迹(肉眼可见水珠)且没有黏滞岩屑颗粒(如图 6b),说明滑面水膜降低有效上覆压力^[33],基底摩擦减小促使冲出距离再次增加。

2.3 剪切特征

2.3.1 颗粒流速度分布特征

为了表征冰-岩碎屑流的内部剪切规律,厘清含冰量和融水量对冰-岩碎屑流流态特征的影响机制,选取了两组典型实验工况(含冰量为 20% 和 40%),提取其速度剖面。

(1) 融水量

20% 含冰量冰-岩混合材料的速度剖面如图 7 所示。曲线普遍呈上陡下缓,说明颗粒流内部剪切主要集中在底层。另外,速度剖面曲率随融水量增加呈现非单调响应,意味着不同融水量所造成的剪切变形不一致。

当融水量为 0%~2% 时,水分润滑效应促使颗粒间滑移势垒降低,因此速度剖面的变化梯度较大。当融水量为 3%~4% 时,观察高速影像发现冰屑与岩屑粘黏,这标志着颗粒间黏性的产生,颗粒流整体的抗剪能力增强^[34]。越上层的颗粒受到的剪切力越小,因此颗粒流上层的流速相近,而下层流速差异较大。当融水量为 5% 时,颗粒表面厚水膜阻止固体颗粒直接接触,一定程度上降低摩擦阻^[35],但黏性依然存在,颗粒流的抗剪能力相对较强。

40% 含冰量冰-岩混合材料的速度剖面如图 8 所示。曲线同样表现出上陡下缓的特征。随融水量增加,其速度剖面逐渐离散,表明颗粒流拉伸较为剧烈。

融水量为 0%~2% 时,水分润滑效应促使颗粒间滑移势垒降低,速度剖面变化梯度较大。然而冰屑层数增加且紧密堆积,通过增强颗粒间力链传递效率,抑制了层间速度梯度扩展,致使上层速度剖面曲率陡增。

融水量为 3%~5% 时,冰屑与岩屑发生粘黏,显著提升颗粒流的抗剪能力,促使速度剖面更加陡直。固-液界面毛细黏滞作用触发颗粒异质团聚,受粒径分选性差异与密度梯度驱动,低摩擦系数的冰屑团簇通过分选向上迁移形成悬浮层,而高摩擦系数的岩屑团簇在重力分选作用下富集于底部形成剪切

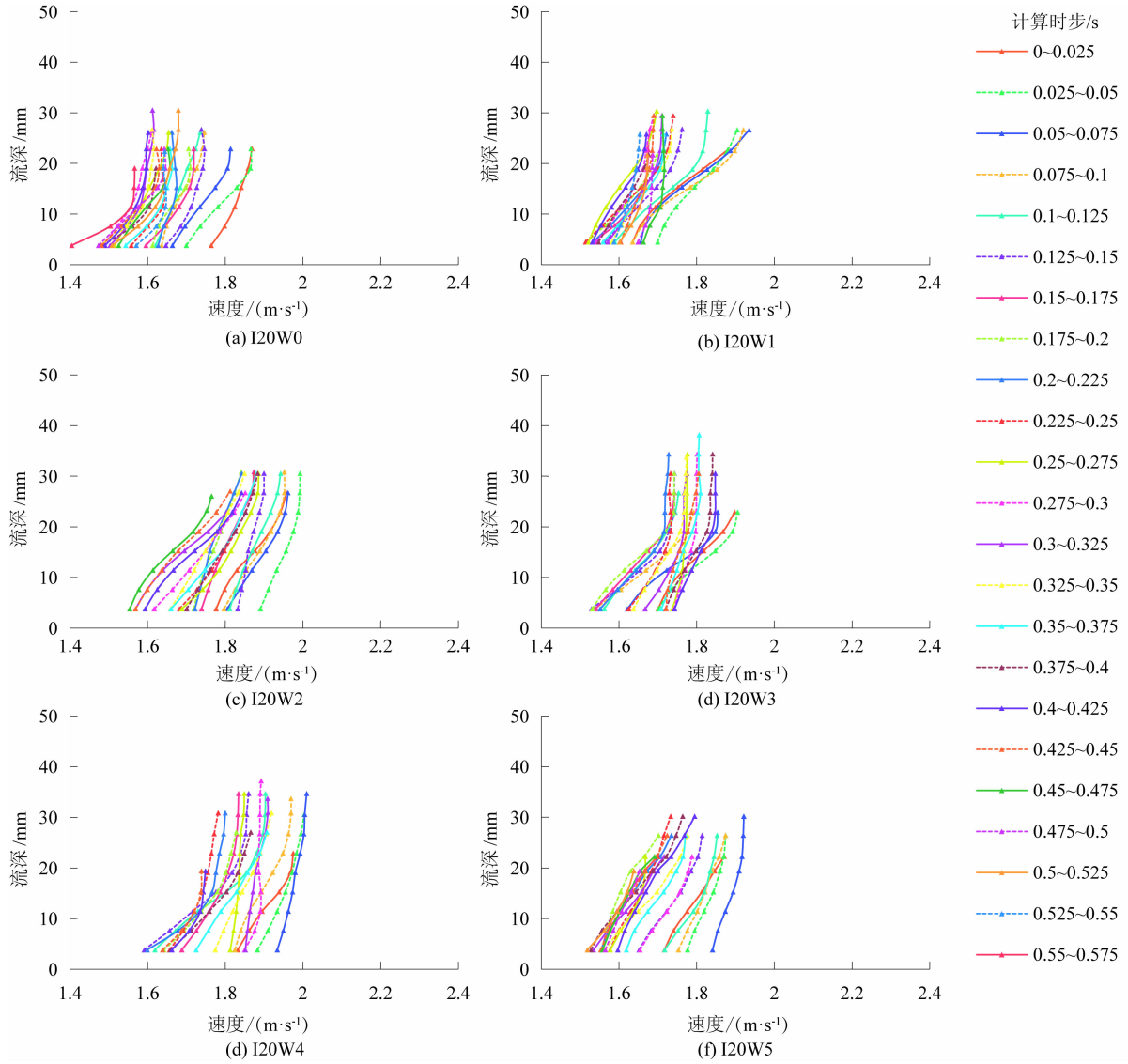


图 7 20% 含冰量列工况速度剖面

Fig. 7 Velocity profile of 20% ice-content conditions

带。贯穿性冰屑团簇通过应力桥接作用维持流层连续性,而基底支撑型岩屑团簇则通过摩擦耗散引发动量传递各向异性。团簇间摩擦系数空间异质性导致局部剪切速率分异,促使垂向速度剖面曲率增大并伴随横向离散化特征。

(2) 含冰量

对比分析图 7 和图 8,40% 含冰量工况的垂向速度剖面较 20% 含冰量工况更为陡直,揭示其剪切应变率垂向分异程度降低。40% 含冰量条件下,冰相骨架结构主导颗粒体系传力路径,岩屑体积占比的相对减少促使滑动主导运动模式取代滚动机制,进而优化力链网络的空间连续性,通过增强法向应力传递效率抑制层间错动,致使速度梯度衰减。上

述特征证实,冰相骨架的比例提升可有效弱化颗粒流垂向动量耗散,进而降低剪切局部化强度。

2.3.2 颗粒流剪切特征

图 7 和图 8 所示的速度剖面表明流体不同深度处剪切特征不同。为了厘清冰-岩碎屑流的局部剪切规律,选用每条速度剖面流深的 0.5 倍作为分界面,并使用式(1)和式(2)计算上下层的剪切速率^[36]。

上层平均剪切速率为:

$$\gamma_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mu_h - \mu_m}{h - 0.5h} \quad (1)$$

下层平均剪切速率为:

$$\gamma_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\mu_m - \mu_b}{0.5h} \quad (2)$$

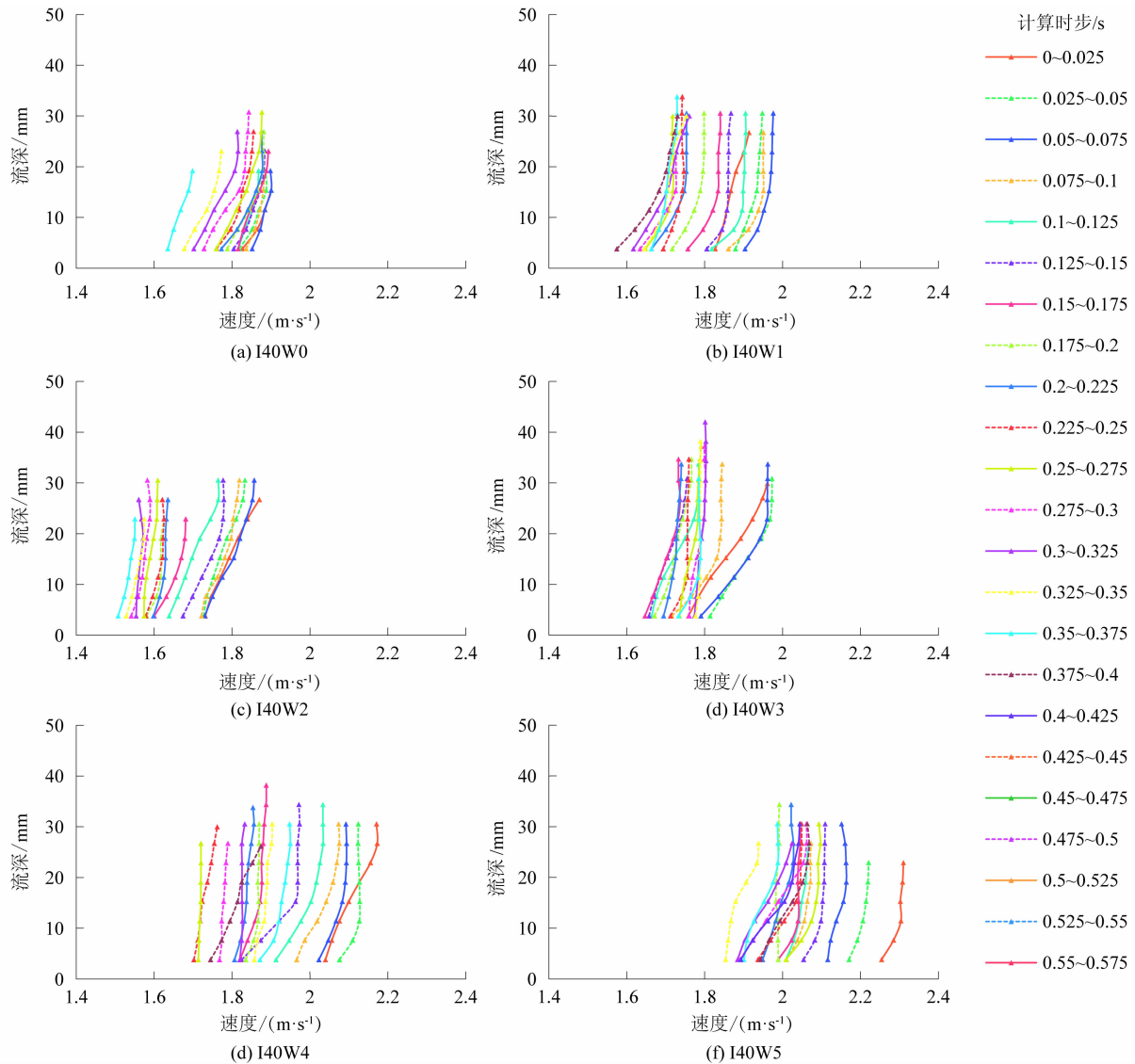


图8 40%含冰量系列工况速度剖面

Fig. 8 Velocity profile of 40% ice-content conditions

式中, n 为计算时步数; μ_h 为颗粒流各时步的表面平均速度; μ_m 为颗粒流各时步的中面平均速度; μ_b 为颗粒流各时步的底面平均速度; h 为颗粒流各时步的平均厚度。计算结果如图9所示。

图9显示在相同融水量条件下, 20%含冰量颗粒流的上层(20% Ice-SurSR)与下层(20% Ice-BotSR)平均剪切速率均显著高于40%含冰量对应层流(40% Ice-SurSR与40% Ice-BotSR)。结合高速影像分析(图10), 发现低含冰量工况剪切动力学响应更为活跃。图10揭示20%含冰量工况呈现典型双层层序结构: 上层为富冰屑相, 下层为富岩屑相; 而40%含冰量工况则形成冰相主导结构: 上层近于纯冰层, 下层冰屑富集。由于“巴西果效应”^[37]引

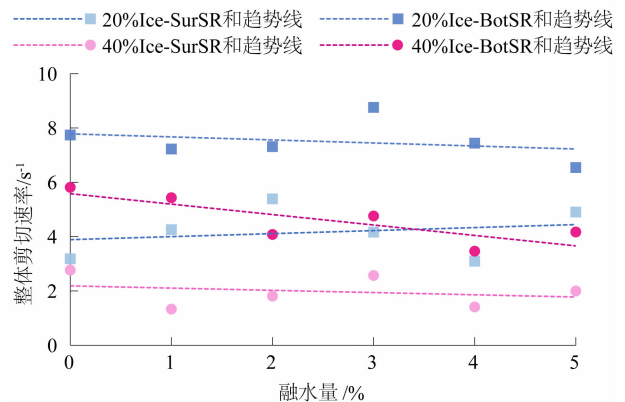


图9 20%和40%含冰量颗粒流的上下层剪切速率及变化趋势

Fig. 9 20% and 40% ice-bearing particle flow shear rate and variation trend

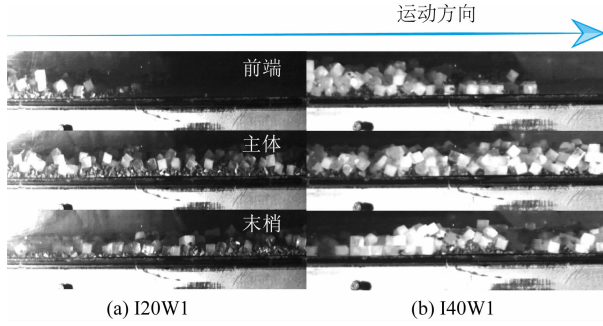


图 10 I20W1 和 I40W1 的前端、主体和末梢

Fig. 10 Front, body, and end of I20W1 and I40W1

起冰、岩分选强化,低含冰量工况下层岩屑相因表面糙度较大,在承受上覆荷载剪切作用时产生显著速度梯度,致使该层剪切速率更大;而上层冰屑相因低摩擦特性维持稳定层流状态,形成次生剪切带。相较之下,高含冰量工况中冰相基质的低摩擦阻特性抑制了层间动量传递效率,整体剪切速率呈现空间均质化趋势。由此可知,含冰量通过调控相组成空间配置与摩擦耗散路径,主导颗粒流剪切行为的垂向分异模式。

2.4 惯性数

为进一步量化冰融水和含冰量对颗粒流流态的影响,使用无量纲惯性数 I (Inertial number) 区分颗粒流的流态,可划分为准静态流 ($0 < I \leq 0.01$)、密集流 ($0.01 < I \leq 0.5$)、稀疏流 ($0.5 < I$)^[38]。惯性数 I 计算如下^[39]:

$$I = \gamma_a \bar{d} \sqrt{\rho_{\text{mix}} / P} \quad (3)$$

$$\text{其中,} \quad \gamma_a = \frac{\mu_h - \mu_b}{h} \quad (4)$$

$$P = \rho_{\text{mix}} g h \cos \theta \quad (5)$$

式中, γ_a 为深度平均剪切速率; \bar{d} 为冰、岩颗粒平均直径; ρ_{mix} 为混合颗粒密度; P 为围压; θ 为斜槽倾角。 \bar{d} 和 ρ_{mix} 均使用加权平均法进行计算^[39]。

图 11 显示 20% 和 40% 含冰量颗粒流的惯性数 I 总体位于区间 (0.01, 1)。20% 含冰量颗粒流的惯性数 I 大部分小于 0.5; 40% 含冰量的颗粒流的惯性数 I 几乎全部小于 0.5, 这表明 20% 和 40% 含冰量颗粒流均具有密集流特征。

含冰量对颗粒流惯性数演化具有显著调控效应。图 11 中 20% 含冰量颗粒流的惯性数 I 随时间的变化表现为“两头高, 中间低”的变化趋势, 其惯性数在运动初期与末期突破流态转变临界阈值

($I > 0.5$)。此现象源于剪切-摩擦-碰撞多应力耦合作用促使局部岩屑突破层间约束, 经由间隙运移形成弥散相。前锋区因结构弱化引发弥散相富集, 导致惯性数超临界现象频发。相较之下, 40% 含冰量工况惯性数始终低于临界阈值 ($I < 0.5$), 且时间演化趋势呈现准稳态特征。高含冰量体系通过冰相骨架压制岩屑层离散化能力, 抑制剪切带应变率梯度, 致使前端与末梢仅因残余离散效应产生弱惯性数波动。

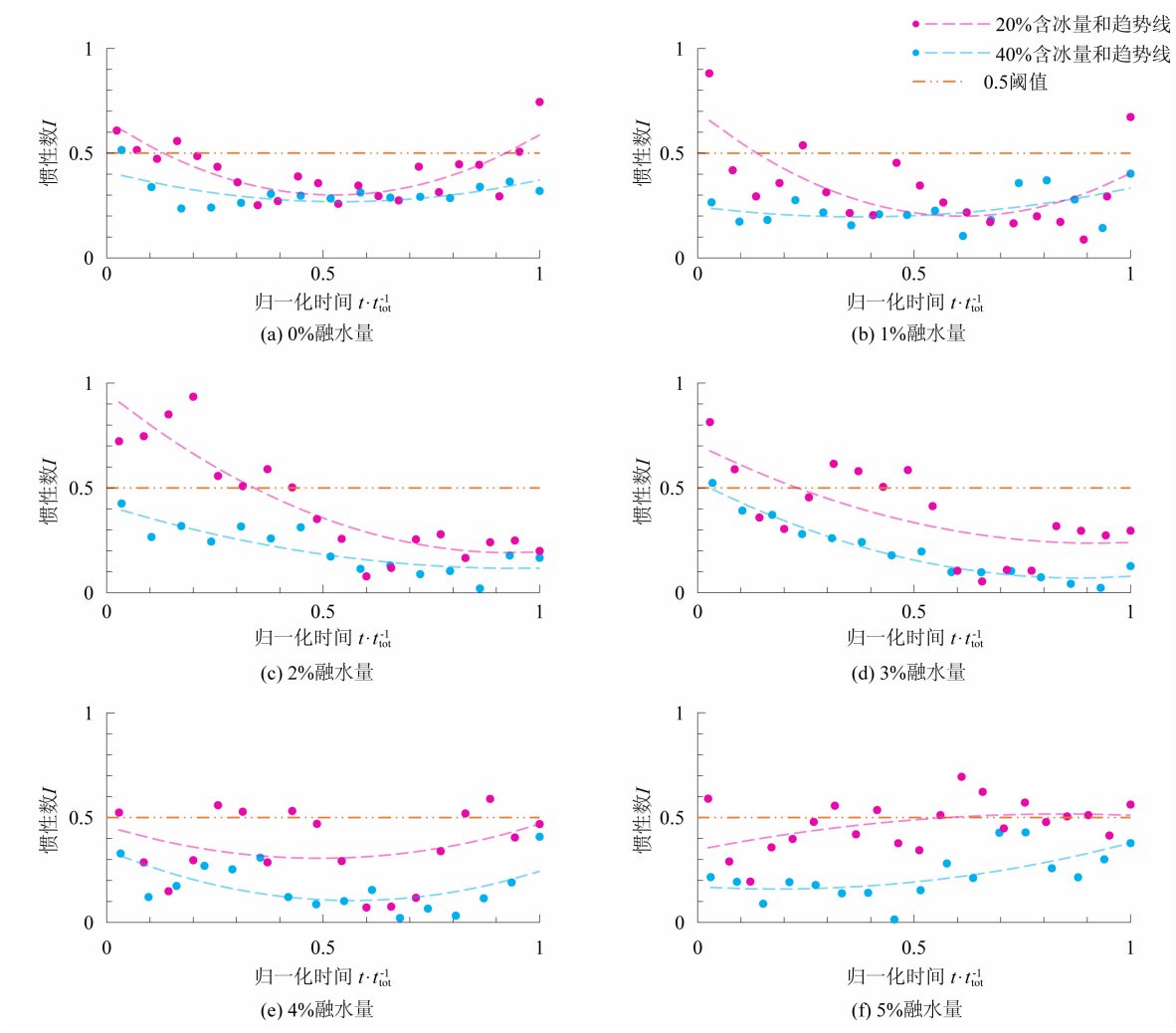
3 讨论

3.1 冰融水的凝结

低温环境下冰融水的相变行为对颗粒流动力学呈现显著工况依赖性调控机制: 在 60% 高含冰量工况中, 当融水量处于 1% ~ 3% 低值区间时, 融水优先在颗粒界面定向凝结形成冰膜 (图 12a), 诱发界面润滑效应, 通过降低摩擦系数提升颗粒运移能力, 致使冲出距离增大与堆积形态侧向展布增强; 而当融水量增至相变临界阈值时, 粒间融水发生体相冻结, 形成跨颗粒冰桥结构 (图 12b), 冰桥断裂过程中的能量耗散效应显著抑制动能传递效率, 导致运动距离衰减与堆积长宽比抬升。本实验观测到 60% 含冰量工况斜槽底部持续维持干燥状态, 证实液相融水通过界面冰膜或冰桥网络参与力学响应。该发现与 Persson^[40] 揭示的纳米尺度冰膜低温冻结机制及 Mille^[41] 等报道的雪崩停滞阶段瞬时胶结效应具有理论一致性, 表明在高含冰量体系下, 冰-水相变通过“润滑-冻结”竞争机制主导颗粒流运动学参数的空间分异规律。

3.2 冰屑形状的影响

本研究采用规则立方体冰相介质构建理想化模型, 成功复现了文献^[16-19] 报道的冰相上浮-岩相下沉分层结构。然而需强调, 自然冰-岩碎屑流中冰体普遍呈现不规则破碎形态 (如棱角状、片状及多孔结构), 其复杂几何特征可能通过双重路径调控动力学过程: 其一, 非规则冰相的表面形貌差异改变冰-水界面热传导效率, 调控局部融水生成速率与空间分布特征; 其二, 基于形态依赖的分选机制^[42], 冰相几何特征通过改变颗粒接触概率与传力路径分布, 进而影响剪切带的空间演化规律。这些发现表明, 当前基于规则冰相的本构模型可能低估自然冰-



t 为时步时长; t_{tot} 为颗粒流运动总时长。

图 11 20% 和 40% 含冰量颗粒流惯性数结果

Fig. 11 Inertia number and variation trend of 20% and 40% ice-content granular flows

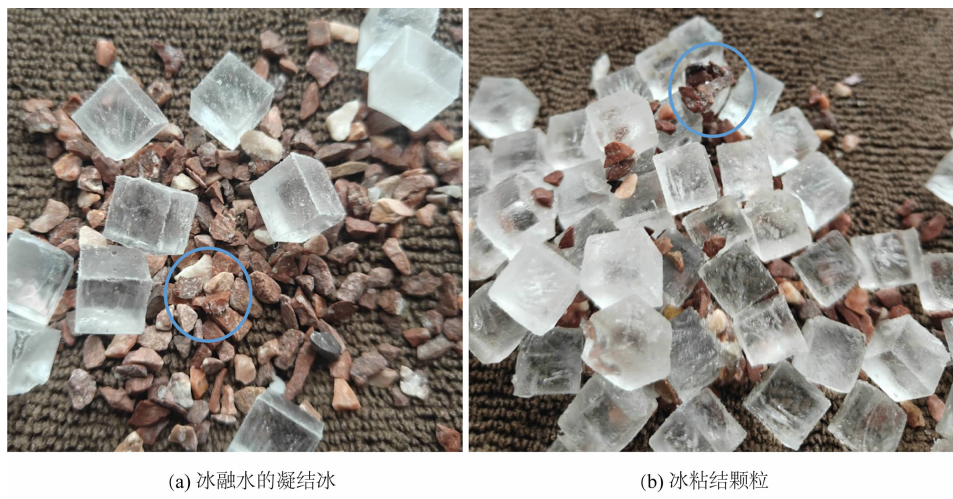


图 12 冰融水的凝结冰

Fig. 12 Condensation ice of meltwater

岩碎屑流的运动复杂性。因此,冰相几何形态对多相流变行为的调控机理亟待系统揭示。

为进一步揭示形态效应的动力学贡献,建议后续研究沿以下路径深化:构建冰相形态量化指标体系(如球度、棱角度、表面粗糙度),通过离散元-计算流体力学耦合模拟,量化形态参数对相分离临界条件的敏感性,进一步系统解析冰相几何特征对冰-岩碎屑流流变特征的影响机制。

4 结论

本文利用斜槽实验,模拟了不同融水量以及不同含冰量的组合情况下冰-岩碎屑流的运动演化过程,通过深入分析冲出距离、堆积形态、剪切速率以及惯性数等参数,得到以下结论。

(1)含冰量增加显著增强颗粒流侧向扩散能力,而融水量变化诱导堆积长宽比呈非线性演化。低融水量阶段(0%~3%)液膜减小基底摩擦系数,长宽比持续递减;高融水量阶段(3%~5%)毛细吸附效应触发侧向扩散合力衰减,长宽比逆向抬升。

(2)颗粒流冲出距离随融水量增加呈“先增后减再增”趋势。冰和冰融水的共同影响致使颗粒黏性、颗粒表面摩擦性质、孔隙吸附作用不断发生强弱交替,导致颗粒流运动性不断变化。

(3)对比 20% 与 40% 含冰量的颗粒流,发现后者剪切速率更低。冰屑糙率,且在上层受剪切和摩擦影响较弱,冰屑不易改变运动状态。当含冰量增加,这种效应更显著。

(4)40% 含冰量颗粒流惯性数显著低于 20% 含冰量工况,两者均具有密集流特征。含冰量提升通过压制剪切局部化与优化动量传递路径,促使颗粒流向密集流态演化。冰相骨架对岩屑层的空间约束效应随含冰量增加而强化,导致流态稳定性显著提升。

参考文献 (References)

- [1] SCHNEIDER D, HUGGEL C, HAEBERLI W, et al. Unraveling driving factors for large rock-ice avalanche mobility [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, **36**(14): 1948 – 1966. DOI: 10.1002/esp.2218
- [2] EVANS S G, DELANEY K B, RANA N M. The occurrence and mechanism of catastrophic mass flows in the mountain cryosphere

- [M]// WILFRIED HAEBERLI, COLIN WHITEMAN. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 541 – 596.
- [3] 杨情情, 郑欣玉, 苏志满, 等. 高速远程冰-岩碎屑流研究进展 [J]. *地球科学*, 2022, **47**(3): 935 – 949. [YANG Qingqing, ZHENG Xinyu, SU Zhiman, et al. Review on rock-ice avalanches [J]. *Earth Science*, 2022, **47**(3): 935 – 949] DOI: 10.3799/dqkx.2021.158
- [4] HUGGEL C, CLAGUE J J, KORUP O. Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, **37**(1): 77 – 91. DOI: 10.1002/esp.2223
- [5] WALTER F, AMANN F, KOS A, et al. Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows [J]. *Geomorphology*, 2020, **351**: 106933 – 106933. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106933
- [6] THAYYEN R J, MISHRA P K, JAIN S K, et al. Hanging glacier avalanche (Raunthigad-Rishiganga) and debris flow disaster on 7 February 2021, Uttarakhand, India: A preliminary assessment [J]. *Natural Hazards*, 2022, **114**(2): 1939 – 1966. DOI: 10.1007/S11069-022-05454-0
- [7] 殷跃平. 西藏波密易贡高速巨型滑坡特征及减灾研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2000(4): 8 – 11. [YIN Yueping. Research on characteristics and disaster mitigation of the high-speed giant landslide in Yigong, Bomi, Tibet [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000(4): 8 – 11] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2000.04.003
- [8] 刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2002, **13**(3): 11 – 20. [LIU Wei. Study on the characteristics of huge scale-super high-speed-long distance landslide chain in Yigong, Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazards and Control*, 2002, **13**(3): 11 – 20] DOI: 10.3969/j.issn.1003-8035.2002.03.002
- [9] 邢爱国, 徐娜娜, 宋新远. 易贡滑坡堰塞湖溃坝洪水分析 [J]. *工程地质学报*, 2010, **18**(1): 78 – 83. [XING Aiguo, XU Nana, SONG Xinyuan. Numerical simulation of lake water down-stream flooding due to sudden breakage of Yigong landslide dam in Tibet [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 78 – 83] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.01.011
- [10] 胡明鉴, 程谦恭, 汪发武. 易贡远程高速滑坡形成原因试验探索 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(1): 138 – 143. [HU Mingjian, CHENG Qiangong, WANG Fawu. Experimental study on formation of Yigong long-distance high-speed landslide [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(1): 138 – 143] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.01.018
- [11] 殷跃平, 李滨, 张田田, 等. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, **32**(3): 1 – 8. [YIN Yueping, LI Bin, ZHANG Tiantian, et al. The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazards and Control*, 2021, **32**(3): 1 – 8]

- DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-01
- [12] SHUGAR D H, JACQUEMART M, SHEAN D, et al. A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya [J]. *Science*, 2021, **373** (6552): 300-306. DOI: 10.1126/SCIENCE.ABH4455
- [13] SCHNEIDER D, KAITNA R, DIETRICH W E, et al. Frictional behavior of granular gravel-ice mixtures in vertically rotating drum experiments and implications for rock-ice avalanches [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, **69** (1): 70-90. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.07.001
- [14] DONG Zhibo, SU Lijun. Flow regimes and basal normal stresses in rock-ice avalanches by experimental rotating drum tests [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, **218**: 104081. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2023.104081
- [15] DONG Zhibo, SU Lijun, HU Bingli, et al. Friction behaviors and flow resistances of rock-ice avalanches [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, **220**: 104130. DOI: 10.1016/J.COLDREGIONS.2024.104130
- [16] YANG Qingqing, SU Zhiman, CHENG Qiangong, et al. High mobility of rock-ice avalanches: Insights from small flume tests of gravel-ice mixtures [J]. *Engineering Geology*, 2019, **260**: 105260. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105260
- [17] REN Yuhao, YANG Qingqing, CHENG Qiangong, et al. Solid-liquid interaction caused by minor wetting in gravel-ice mixtures: A key factor for the mobility of rock-ice avalanches [J]. *Engineering Geology*, 2021, **286** (1): 106072. DOI: 10.1016/J.ENGEO.2021.106072
- [18] WANG Chenyang, CUI Yifei, SONG Dongri, et al. Effect of ice content on the interaction between rock-ice avalanche and rigid barrier: Physical and numerical modeling [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, **150**: 104924. DOI: 10.1016/J.COMPGeo.2022.104924
- [19] ZHU Yuanjia, JIANG Yuanjun, LIU Yutong, et al. Material characteristic-controlled particle segregation in rock-ice avalanche [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, **171**: 106367. DOI: 10.1016/J.COMPGeo.2024.106367
- [20] NOBACH H, HONKANEN M. Two-dimensional gaussian regression for sub-pixel displacement estimation in particle image velocimetry or particle position estimation in particle tracking velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, **38** (4): 511-515. DOI: 10.1007/s00348-005-0942-3
- [21] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry [J]. *Géotechnique*, 2003, **53** (7): 619-631. DOI: 10.1680/geot.2003.53.7.619
- [22] STANIER S A, WHITE D J. Improved image-based deformation measurement in the centrifuge environment [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2013, **36** (6): 915-928. DOI: 10.1520/GTJ20130044
- [23] SARNO L, PAPA M N, TAI Y C, et al. A reliable PIV approach for measuring velocity profiles of highly sheared granular flows [C]//International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology. Salerno (Italy): [s.n.], June 3-5, 2014.
- [24] WANG S S, LI R, CHEN Q, et al. Experimental measurement of granular flow layers in the chute [J]. *Powder Technology*, 2020, **376**: 22-30. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.07.112
- [25] SANVITALE N, BOWMAN E T. Using PIV to measure granular temperature in saturated unsteady polydisperse granular flows [J]. *Granular Matter*, 2016, **18** (3): 57. DOI: 10.1007/s10035-016-0620-6
- [26] VALENTINO R, BARLA G, MONTRASIO L. Experimental analysis and micromechanical modelling of dry granular flow and impacts in laboratory flume tests [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, **41** (1): 153-177. DOI: 10.1007/s00603-006-0126-3
- [27] 刘圣春, 姜婷婷, 董紫腾. 纯水和氯化钠溶液凝固过程的实验研究 [J]. *化工进展*, 2016, **35** (S2): 68-74. [LIU Shengchun, JIANG Tingting, DONG Ziteng. Experimental study on water and sodium chloride solution solidification [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, **35** (S2): 68-74] DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2016.s2.011
- [28] THIELICKE W, STAMHUIS E J. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB [J]. *Journal of Open Research Software*, 2014, **2** (1): e30. DOI: 10.5334/jors.bl
- [29] THIELICKE W, SONNTAG R. Particle image velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab [J]. *Journal of Open Research Software*, 2021, **9** (1): 12. DOI: 10.5334/JORS.334
- [30] SARNO L, CARRAVETTA A, TAI Y, et al. Measuring the velocity fields of granular flows: Employment of a multi-pass two-dimensional particle image velocimetry (2D-PIV) approach [J]. *Advanced Powder Technology*, 2018, **29** (12): 3107-3123. DOI: 10.1016/j.apr.2018.08.014
- [31] REN Yuhao, CAI Fei, YANG Qingqing, et al. Importance of liquid bridge forces in dynamics of rock-ice avalanches: Insights from discrete element simulations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, **165**: 105904. DOI: 10.1016/J.COMPGeo.2023.105904
- [32] ZHAO C F, KRUYT N P, MILLET O. Capillary bridges between spherical particles under suction control: Rupture distances and capillary forces [J]. *Powder Technology*, 2020, **360**: 622-634. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.093
- [33] PUDASAINI S P, MERGILI M. A multi-phase mass flow model [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019, **124** (12): 2920-2942. DOI: 10.1029/2019JF005204
- [34] RICHEFEU V, YOUSSEFI M S E, RADJAI F. Shear strength properties of wet granular materials [J]. *Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2006, **73** (5): 051304. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.051304
- [35] KIETZIG A M, HATZIKIRIAKOS S G, ENGLEZOS P. Physics of

- ice friction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107** (8): 081101. DOI: 10.1063/1.3340792
- [36] 李坤. 高速远程滑坡流态化运动及堆积机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022: 1 – 183. [LI Kun. Research on flow-like motion and deposition mechanisms of rock avalanches [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022: 1 – 183] DOI: 10.27414/d.cnki.gxnju.2022.000045
- [37] MOBIUS M E, LAUDERDALE B E, NAGEL S R, et al. Size separation of granular particles [J]. *Nature*, 2001, **414** (6861): 270.
- [38] JOP P. Rheological properties of dense granular flows [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, **16** (1): 62 – 72. DOI: 10.1016/j.crhy.2014.12.001
- [39] TRIPATHI A, KHAKHAR D V. Rheology of binary granular mixtures in the dense flow regime [J]. *Physics of Fluids*, 2011, **23** (11): 113302. DOI: 10.1063/1.3653276
- [40] PERSSON B N J. Ice friction: Role of non-uniform frictional heating and ice premelting [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2015, **143** (22): 224701. DOI: 10.1063/1.4936299
- [41] MILLER D A, ADAMS E E, SCHMIDT D S, et al. Preliminary experimental evidence of heating at the running surface of avalanching snow [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2003, **37** (3): 421 – 427. DOI: 10.1016/S0165 – 232X (03) 00081 – 8
- [42] DAI Beibing, WU Fanyu, ZHONG Weitao, et al. Particle sorting in scree slopes: Characterization and interpretation from the micromechanical perspective [J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2022, **127**: e2021JF006372. DOI: 10.1029/2021JF006372

Experimental Study on Mobility of Rock-Ice Avalanches by Flume Test Using PIV Technology

QIN Yao, YANG Qingqing*, LUO Xin, TONG Luye, YU Chen

(Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: As a unique multiphase composite geo-hazard in alpine-cold areas, a typical granular flow, rock-ice avalanches bear complex fluid-solid coupling effects during movements. There were quite unknown about rock-ice avalanches regarding its solid-liquid coupling mechanism mediated by trace phase change water and the consequence to the shear behavior and accumulation morphology.

In this study, flume experiments combined with Particle image velocimetry (PIV) were used to quantitatively analyze the dynamic response laws and deposition characteristics of gravel-ice mixtures under different ice content conditions (0%, 20%, 40% and 60%).

(1) The increase in ice content in rock-ice avalanches significantly enhanced the material transport ability by reducing inter-particle friction coefficient.

(2) The interaction between the lubrication effect of thin-layer water film and capillary adsorption resistance dominated the movement state of rock-ice avalanches. As meltwater amount grew, water film on particle surfaces thickened, which initially decreased friction and thus enhanced the mobility and lateral spreading of the accumulation, but with further water increased, capillary adsorption effects arose, leading to increased friction that restricted both mobility and lateral spreading.

(3) In the shear deformation field, it exhibited significant layered differentiation characteristics. Ice particles had a smaller roughness and were mostly concentrated in the upper layer of rock-ice avalanches, experiencing less influence from external forces and maintaining interlayer stability and velocity consistency. The shear rate in the bottom debris shear layer significantly exceeded that of the surface shear layer, with shear rate progressively reducing as ice content increased within the stratified structure.

(4) It found by inertial number analysis that the inertial numbers of 20% and 40% ice-content granular flows were less than 0.5, both of which showed dense flow characteristics, with even lower inertial number for the flow of

40% ice-content. The ice-phase component significantly enhanced the intensive state of flow by inhibiting particle collisions.

This study contributes to deepening the understanding of the motion mechanisms and flow characteristics of rock-ice avalanches, providing a scientific basis for disaster prevention and mitigation efforts related to rock-ice avalanches in alpine-cold mountainous regions.

Key words: rock-ice avalanches; flume test; ice content; water content; shear rate; flow regime

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)

喜德县——彝族“母语之乡”阔步迈入新时代

(王家柱 中国地质调查局成都地质调查中心)

喜德县位于四川省凉山彝族自治州中北部,是国家“三区三州”集中连片深度贫困县之一,于 2020 年 11 月实现脱贫摘帽,阔步迈入新时代。然而区内地形高差大,易崩易滑地层广泛发育,滑坡灾害严重威胁着当地人民的生命财产安全。针对区内滑坡灾害,降雨预警是防灾减灾的重要手段,如何实现精确预警是迫切需要解决的重要问题。在传统 I(降雨强度)-D(历时)预警模型基础上,引入单日降雨强度构建双指标预警模型,或可一定程度上提升降雨预警精度,为更大范围滑坡预警提供借鉴。

详见本期《考虑日降雨强度的滑坡双指标降雨预警模型研究》一文。