

引用格式: 杨钧凯, 姜元俊, 阿比尔的, 朱元甲, 刘宇桐. 密度及粒径差异对冰岩碎屑流分选模式及冲击力的影响[J]. 山地学报, 2024, 42(6): 816-826.

YANG Junkai, JIANG Yuanjun, ABI Erdi, ZHU Yuanjia, LIU Yutong. Grain density and gradation jointly regulate the grain segregation patterns and impact force effects in rock-ice debris flow [J]. Mountain Research, 2024, 42(6): 816-826.

## 密度及粒径差异对冰岩碎屑流分选模式及冲击力的影响

杨钧凯<sup>1</sup>, 姜元俊<sup>2\*</sup>, 阿比尔的<sup>1</sup>, 朱元甲<sup>2</sup>, 刘宇桐<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 a. 国家内河航道整治工程技术研究中心; b. 山区公路水运交通地质灾害重庆市教委重点实验室, 重庆 400074;

2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全重点实验室, 成都 610213)

**摘要:** 冰岩碎屑流在运动过程中, 因岩石颗粒和冰颗粒之间存在显著的密度差异, 产生颗粒分选现象, 影响其流动特性和冲击效应, 最终改变冰岩碎屑流的致灾性。前期研究多采取室内实验研究的方法, 检验单一颗粒性质对颗粒分选的影响, 并没有考虑颗粒粒径差异和密度差异对冰岩碎屑流颗粒分选的综合影响。本文采用室内物理模型实验与数值模拟, 探究冰岩碎屑流在岩石和冰的粒径及密度差异下的运动过程。由于冰岩碎屑流物质组成的复杂性, 本研究假设岩石和冰均为单一、均匀粒径, 简化岩石和冰的粒径级配, 仅考虑岩石与冰之间的粒径比, 分析岩-冰粒径比对颗粒分选模式及冲击力的影响规律。结果表明: (1) 岩石和冰的粒径差异能够显著改变颗粒分选模式, 形成两种不同的分选模式: 大颗粒冰-小颗粒岩石的上层冰-下层岩、前方冰-后方岩模式, 以及小颗粒冰-大颗粒岩石的上层岩-下层冰、前方岩-后方冰模式。(2) 粒径差异与颗粒的分选程度呈显著正相关, 即粒径差异越大, 分选程度越高。(3) 颗粒分选模式显著影响冰岩碎屑流的冲击力。具体而言, 上层冰-下层岩、前方冰-后方岩模式对挡板的冲击力小于上层岩-下层冰、前方岩-后方冰模式, 且上层冰-下层岩、前方冰-后方岩的分选模式导致能量耗散更大。本研究可以为揭示冰岩碎屑流的颗粒分选机制及冰岩碎屑流灾害防治提供理论依据。

**关键词:** 冰岩碎屑流; 颗粒分选; 粒径差异; 密度差异; 冲击力

中图分类号: TU432

文献标志码: A

冰岩碎屑流是颗粒流灾害的关键类型, 其发源自高寒、高海拔高原地带。在启动或运动阶段, 冰岩碎屑流裹挟岩屑推进, 具有长距离迁移、高流速、极强破坏力的超强流动性特性<sup>[1-4]</sup>。在全球气候变化的背景下, 冰岩碎屑流规模和发生频率持续上升<sup>[5-6]</sup>。例如, 2015年4月, 尼泊尔地震引发朗塘冰岩碎屑流, 其体积高达  $1.438 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。此次灾害的运动过程极为复杂, 冰岩混合物经历多次阶梯式

下落、爬升和最终堆积, 导致约 300 人丧生<sup>[7]</sup>。

颗粒流在运动过程中存在颗粒分选现象<sup>[8-10]</sup>。例如, 费利克斯(Félix)和托马斯(Thomas)<sup>[8]</sup>研究指出, 在双分散颗粒流体系中, 当大、小颗粒的粒径比小于 5 时, 大颗粒会向上层运动, 形成反粒序现象; 而当大、小颗粒的粒径比大于 15 时, 大颗粒在重力作用下, 向下层运动, 产生逆向分选现象。这些研究考虑单一颗粒性质对分选的影响, 为冰岩碎屑流颗

收稿日期(Received date): 2024-09-28; 改回日期(Accepted date): 2024-12-25

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42172320)。[National Natural Science Foundation of China (42172320)]

作者简介(Biography): 杨钧凯(1998-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 岩土工程与地质灾害防治。[YANG Junkai (1998-), male, born in Pingdingshan, Henan Province, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering and geological disaster prevention] E-mail: yjk0386@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 姜元俊(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 岩土工程与地质灾害防治。[JIANG Yuanjun(1982-), male, Ph. D., professor, research on disaster prevention and mitigation engineering] E-mail: yjjiang@imde.ac.cn

粒分选研究提供了有价值的研究思路。

冰岩碎屑流在运动过程中,因岩石颗粒和冰颗粒之间存在显著的密度差异,导致了颗粒分选现象<sup>[11]</sup>。这一分选现象影响冰岩碎屑流流动特性和冲击效应,最终改变其致灾性<sup>[12-13]</sup>。

冰岩碎屑流颗粒分选研究的关注焦点是含冰量及其影响。已有研究<sup>[12]</sup>发现,随着含冰量的增加,冰岩碎屑流总体分选程度呈现先增后减的趋势,并在含冰量达到40%时达到峰值。含冰量较低冰岩碎屑流会表现出更高的剪切速率和较低的沉降速度。这导致冰颗粒在流动剪切面上的相对滑移增加,而岩石颗粒在流深方向上的滑移减少,从而加剧了流动方向上的分选现象,同时减弱了流深方向的分选现象<sup>[11]</sup>。然而,上述实验研究并未考虑冰岩碎屑流中颗粒粒径差异和密度差异对分选现象的综合影响,需要进一步采用模型实验与数值方法进行验证。

由于冰岩碎屑流动力学极其复杂,本研究假设岩石和冰均为单一且均匀的粒径,仅考虑岩石与冰之间的粒径比,忽略含冰量和颗粒形状对分选的影响,通过模型试验与数值模拟相结合,综合研究冰岩碎屑流运动过程中的颗粒分选现象。在此基础上,分析在岩石和冰密度差异的条件下,颗粒粒径差异对颗粒分选模式及冲击力的影响。本研究可以为揭示冰岩碎屑流的颗粒分选机制及冰岩碎屑流灾害防治提供理论依据。

## 1 物理模型实验和数值模拟

### 1.1 模型试验设置

本研究旨在探究冰岩颗粒粒径差异和密度差异对颗粒分选特征的影响规律。为此,试验未严格基于具体冰岩碎屑流案例进行相似性设计,而是在保留岩石颗粒和冰颗粒粒径及密度特征的基础上,采用简化模型进行研究。试验水槽的设计参数(倾斜角度、长度和宽度)主要参考了相关研究<sup>[3,13-14]</sup>,其尺寸为3200 mm×350 mm×500 mm(长×宽×高),整体倾斜角度设为40°,以模拟自然斜坡条件(见图1)。

为了装载均匀混合的冰岩颗粒,水槽顶部设有一个容积为87.5 L的双开门料仓。料仓门打开后,

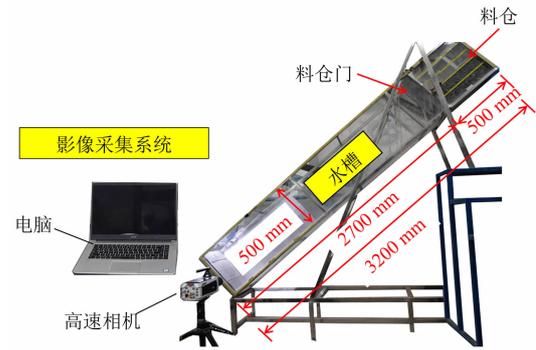


图1 物理试验装置

Fig. 1 Physical model experimental setup of the research

冰岩颗粒沿水槽流动至底部挡板,有效流动距离为2.62 m。试验过程中,为准确记录颗粒的运动过程,水槽侧面安装一台高速摄像机。为减少岩石和冰之间的形状差异带来的影响,试验选用形状规则的立方体人工烧制刚玉颗粒和立方体冰颗粒,其中刚玉颗粒的边长分别为7.5 mm、10 mm和15 mm,密度为2225 kg/m<sup>3</sup>;冰颗粒的边长为10 mm和15 mm,密度为920 kg/m<sup>3</sup>。制冰过程中添加了少量红墨水,以便更直观地观察冰岩颗粒在流动和冲击过程中的分选现象(图2)。

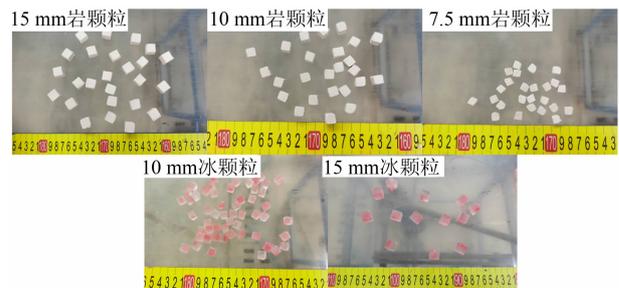


图2 用于模型试验的岩石颗粒和冰颗粒

Fig. 2 Rock and ice particles used in model experiments

此外,试验水槽的宽度与最大颗粒粒径之比为23,处于20~90,因此水槽边界效应对颗粒流动的影响可以忽略不计<sup>[15-16]</sup>。为排除冰岩颗粒组成比例对分选现象的影响,冰岩混合物的初始体积设定为40 L,冰和岩颗粒各占20 L。

根据岩石颗粒与冰颗粒的粒径比,设计4组模型试验工况,分别为岩-冰粒径比0.5、0.67、1和1.5。试验过程中,高速摄像机的采样帧率设置为1000 fps。

## 1.2 数值模拟设置

离散单元法 (DEM) 是一种基于颗粒间接触关系和相互作用力学的数值计算方法, 用于模拟颗粒在不同时间和空间位置的运动状态。该方法最早由 Peter Cundall 于 1971 年提出, 经过 50 余年的发展, 已被广泛应用于滑坡和碎屑流的运移及冲击机制研究<sup>[17-19]</sup>。在 DEM 模拟中, 颗粒的运动和受力状态遵循牛顿第二定律和力-位移法则, 其核心在于颗粒的接触特性, 即接触本构模型的选取。本研究采用赫兹接触模型<sup>[20-23]</sup>, 该模型基于麦德林 (Middlin) 和德雷谢维奇 (Deresiewicz) 的研究<sup>[20]</sup>, 使用非线性公式描述接触力随接触面积变化的情况。

为了克服试验采集设备的限制, 本研究建立了一个与试验水槽尺寸和倾角一致的三维离散元数值模型 (图 3), 用于获取颗粒在流动过程中的位置和速度数据。在离散元数值模拟中, 材料的微观参数受到本构模型控制, 而在模型试验中, 材料的相关参数则反映其物理特性。然而, 由于实际物理机制的复杂性, 这些参数直接应用于数值模拟中会造成误差。因此, 为确保模拟结果的准确性, 需要对数值模拟的颗粒参数进行标定。

由于目前尚无完善的理论方法来标定试验参数, 本文采用了常用的对比验证法<sup>[24]</sup>, 即通过对比物理模型试验与数值模拟的形态, 确定数值模拟参数。在此过程中, 通过颗粒柱坍塌试验、倾斜试验和单轴压缩试验, 确定了岩石颗粒和冰颗粒的休止角、滑动摩擦角、弹性模量和泊松比等参数 (表 1)。这些参数将作为数值模拟的校准依据, 其中, 弹性模量、密度和泊松比等材料固有属性, 不受外界条件影响, 因此无需调整即可用于数值模拟中。

考虑到模型试验中颗粒形状为立方体, 而数值

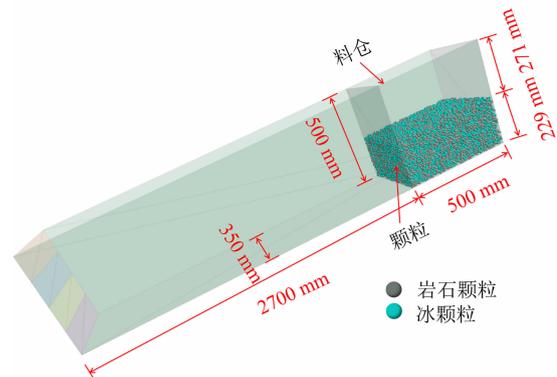


图 3 离散元水槽模型

Fig. 3 DEM model of the flume

模拟中使用的则是球形颗粒, 二者的形状差异可能会影响数值模拟结果。为此, 本文通过多次调整摩擦参数, 使模拟结果与试验结果更加吻合 (图 4)。同时, 使用数值模拟中球形颗粒的半径替代模型试验中立方体颗粒的边长, 作为颗粒大小的量化标准, 并对不同岩-冰粒径比工况进行数值模拟。最终, 结合模型试验中采集的冰岩颗粒流动影像, 进一步调整数值模拟的阻尼参数, 使得数值模拟中的流动和冲击形态与试验结果更匹配, 具体结果见图 5 所示。

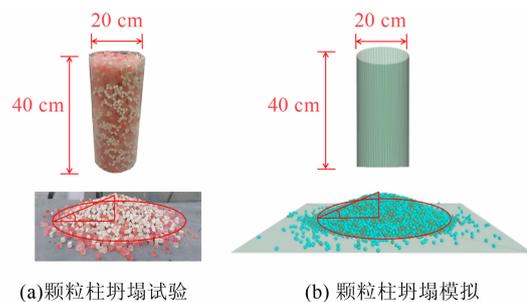


图 4 数值模拟的摩擦系数调整

Fig. 4 Adjustment of friction coefficients in numerical simulations

表 1 数值模拟中岩石颗粒和冰颗粒的标定参数

Tab. 1 Calibration parameters of the rock and ice particles in numerical simulations

颗粒类型	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	半径/mm	颗粒间法向 刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒间切向 刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	泊松比	颗粒间摩擦 系数	界面摩擦 系数	接触法向 阻尼
岩石颗粒	2225	15/10/7.5	2e6	2e6	0.25	1.52	0.56	1.0
冰颗粒	920	15/10	2.5e5	2.5e5	0.35	0.40	0.50	0.70

## 2 模型试验和数值模结果分析

### 2.1 不同粒径差异对分选模式的影响

图 6 为冰岩碎屑流运动过程中颗粒的分选结果。本文将不同工况下岩石颗粒和冰颗粒在流动过程中的空间分布定义为分选模式。图 6 展示了试验中冰颗粒的分布(第一列)、试验中岩石颗粒的分布(第二列)、数值模拟中冰颗粒的分布(第三列)和数值模拟中岩石颗粒的分布(第四列)。

图 6a ~ 图 6c 对应岩-冰粒径比为 0.5、0.67 和 1 的工况,此时岩石颗粒和冰颗粒呈现出上层冰-下层岩、前方冰-后方岩的分选模式。图 6d 和图 6e 则对

应岩-冰粒径比为 1.5 和 2 的工况,此时颗粒呈现上层岩-下层冰、前方岩-后方冰的分选模式。对比各工况的流动影像可发现,随着岩-冰粒径比的变化,颗粒的分选模式也随之改变,说明粒径差异与颗粒分选模式存在相关性。

在岩-冰粒径比为 2 的工况中,由于设定的冰颗粒粒径过小,实验无法制备。因此采用数值模拟呈现该工况的流动影像。此外,由于高速相机的拍摄限制,试验过程中未能捕捉到完整的颗粒流动影像,因此后续分析主要依赖数值模拟结果。

图 7 展示了颗粒接触挡板前一时刻( $t = 0.8 \text{ s}$ )各数值模拟工况的完整流动影像。可以观察到,随着岩-冰粒径比的变化,颗粒的分选模式也随之变化。

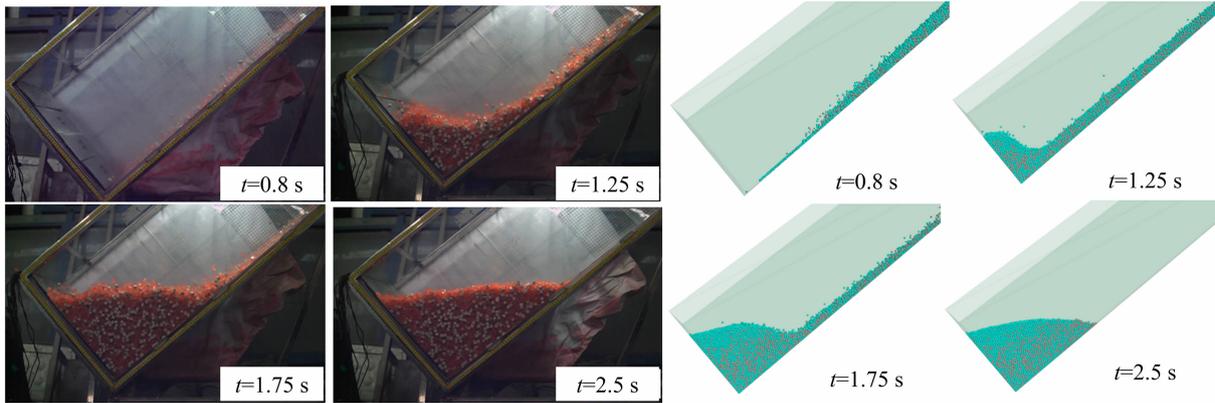


图 5 数值模拟与模型试验的冰岩颗粒冲击形态对比

Fig. 5 Comparison of the impact morphology of the ice and rock particles between numerical simulations and model experiments

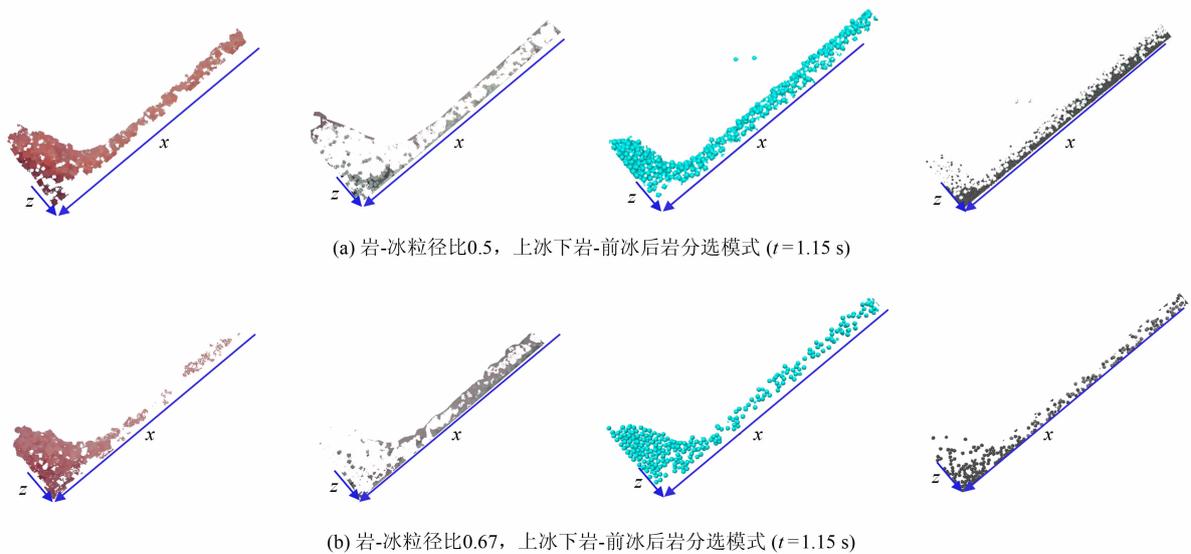


图 6 数值模拟与模型试验的冰岩颗粒流动形态对比

Fig. 6 Comparison of flow morphology of the ice and rock particles between numerical simulations and model experiments

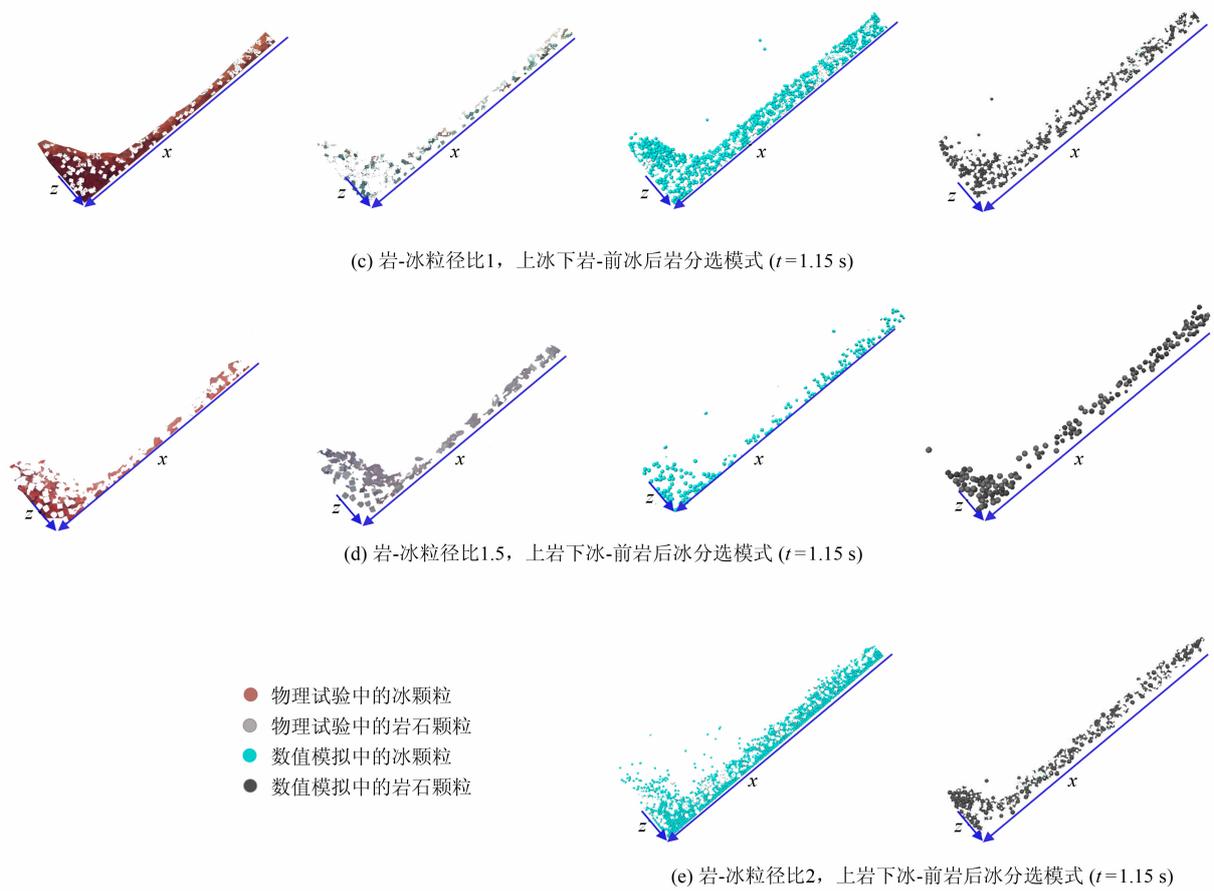


图6 (续)

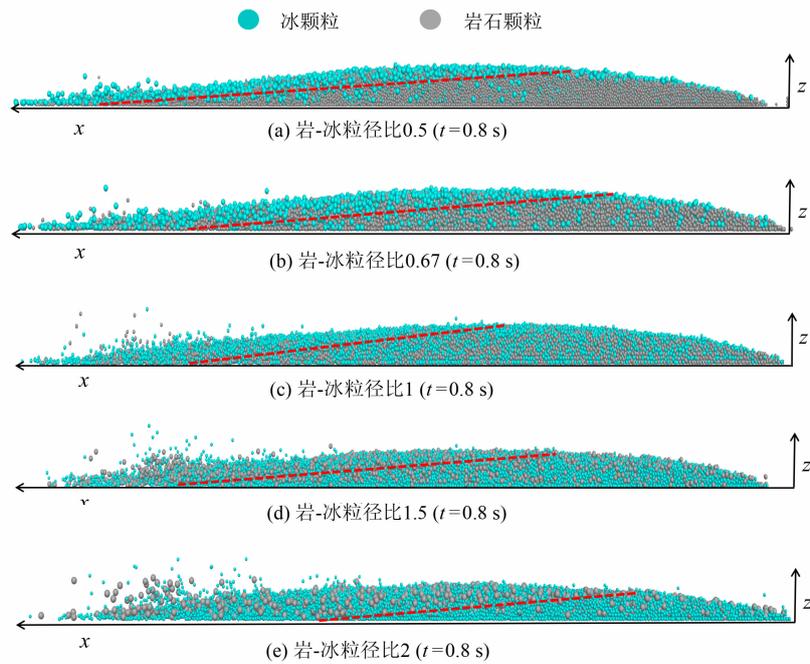


图7 不同数值模拟工况在流动阶段末  $t=0.8$  s 时的分选形态

Fig.7 Particle segregation morphology under various numerical simulated working conditions at  $t=0.8$  s at the end of flow phase

当岩-冰粒径比为1时,由于岩石和冰的粒径相同,分选主要由密度差异驱动,形成上层冰-下层岩、前方冰-后方岩的分选模式,但分选效果较弱。当岩-冰粒径比小于1时,粒径和密度差异共同作用,分选模式表现为上层冰-下层岩、前方冰-后方岩,颗粒分选明显且边界清晰,表明此时粒径差异增强了分选效果。

当岩-冰粒径比大于1时,虽然粒径和密度差异仍然存在,但分选模式发生了变化,呈现出上层岩-下层冰、前方岩-后方冰的分选模式,表明此时粒径差异能够改变颗粒的分选模式。

综上所述,颗粒的粒径差异在冰岩碎屑流中显著影响并改变了其分选模式。

## 2.2 不同粒径差异对分选程度的影响

为了定量分析冰岩碎屑流的分选规律,本文引入无量纲分选指标( $N_z$ 、 $N_x$ )<sup>[25]</sup>并进行了优化,用以准确描述颗粒在深度方向( $N_z$ )、流动方向( $N_x$ )上的分选程度和分选模式。此外,通过对高速相机采集的颗粒流动影像进行分析,判断冰岩碎屑流是否接触挡板,从而将冰岩碎屑流的运动过程划分为两个阶段,首先是流动阶段,即冰岩碎屑流从启动到接触挡板的时间段( $t=0\sim 0.8\text{ s}$ );随后进入冲击阶段,从冰岩碎屑流与挡板接触开始,到在挡板前堆积完成的时间段( $t=0.8\sim 2.5\text{ s}$ )。各个时刻的分选指标 $N_z$ 和 $N_x$ 计算如下:

$$N_z = \frac{H_{t,\text{ice}}}{H_{t,\text{rock}}} - \frac{H_{t=0,\text{ice}}}{H_{t=0,\text{rock}}} \quad (1)$$

$$N_x = \frac{L_{t,\text{ice}}}{L_{t,\text{rock}}} - \frac{L_{t=0,\text{ice}}}{L_{t=0,\text{rock}}} \quad (2)$$

式中, $H_{t,\text{ice}}$ 为各个时刻的所有冰颗粒在 $z$ 方向(流深方向)上的质心的平均高度, $H_{t,\text{rock}}$ 为各个时刻的所有岩石颗粒在 $z$ 方向(流深方向)上的质心的平均高度, $L_{t,\text{ice}}$ 为各个时刻的所有冰颗粒在 $x$ 方向(流动方向)上的质心与水槽后壁之间的平均距离, $L_{t,\text{rock}}$ 为各个时刻的所有岩石颗粒在 $x$ 方向(流动方向)上的质心与水槽后壁之间的平均距离。

图8a和图8b分别展示了不同岩-冰粒径比工况下,颗粒在 $z$ 方向(流深方向)和 $x$ 方向(流动方向)的分选指标随时间的变化。在初始时刻( $t=0\text{ s}$ ), $N_z$ 和 $N_x$ 均为0,表明岩石颗粒和冰颗粒未发生分选。

在岩-冰粒径比为1的工况中,岩石颗粒和冰颗粒的粒径相同,主要由密度差异驱使颗粒发生分选。在流动阶段中( $t=0\sim 0.8\text{ s}$ ), $N_z > 0$ ,说明冰颗粒(低密度)分选到冰岩碎屑流的上层。同时, $N_x > 0$ ,说明冰颗粒(低密度)分选到冰岩碎屑流的前端,形成上层为冰、下层为岩石,前方为冰、后方为岩石的分选模式。

在岩-冰粒径比小于1的工况中,岩石颗粒和冰颗粒之间同时存在粒径差异和密度差异。在流动阶段中( $t=0\sim 0.8\text{ s}$ ), $N_z > 0$ ,表明冰颗粒(大粒径-低

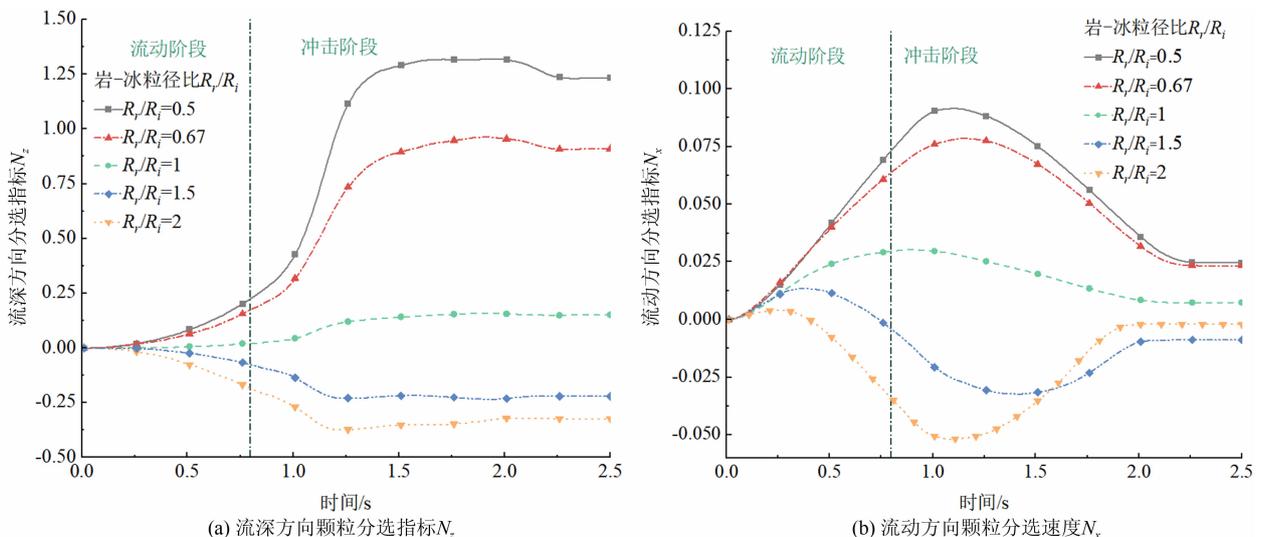


图8 不同数值模拟工况的颗粒分选指标

Fig. 8 Particle segregation indicators for various numerical simulation conditions

密度)分选到冰岩碎屑流的上层。同时,  $N_x > 0$ , 表明冰颗粒(大粒径-低密度)分选到冰岩碎屑流的前端, 形成上层为冰、下层为岩石, 前方为冰、后方为岩石的分选模式, 在这种分选模式下,  $N_z$  和  $N_x$  值越大, 分选程度越大。相同时刻的  $N_z$  和  $N_x$  值随岩石颗粒和冰颗粒粒径差异的增大而增大, 说明此时粒径差异与颗粒分选正相关。

在岩-冰粒径比大于 1 的工况中, 岩石颗粒和冰颗粒之间同时存在粒径差异和密度差异。在流动阶段中( $t = 0 \sim 0.8$  s),  $N_z < 0$ , 说明冰颗粒(小粒径-低密度)分选到冰岩碎屑流的下层。同时,  $N_x < 0$ , 表明冰颗粒(小粒径-低密度)分选到冰岩碎屑流的后端, 形成上层为岩石、下层为冰, 前方为岩石、后方为冰的分选模式。在这种分选模式下,  $N_z$  和  $N_x$  值越小, 分选程度越大。相同时刻的  $N_z$  和  $N_x$  值随岩石颗粒和冰颗粒粒径差异的增大而减小, 说明此时粒径差异与颗粒分选正相关。

在冲击阶段( $t = 0.8 \sim 2.5$  s), 各工况的分选指标  $N_z$  和  $N_x$  均呈现先增大后减小、最终趋于平稳的趋势。这是由于冲击过程中, 岩石颗粒和冰颗粒撞击挡板后反弹至较高处, 导致分选指标发生变化。随着冲击阶段的进行, 挡板前方逐渐形成堆积体, 后续岩石颗粒和冰颗粒撞击堆积体时, 部分颗粒沿堆积体斜面向上运动, 颗粒流动方向发生偏转。

### 2.3 分选模式对冲击力的影响

图 9 展示了不同岩-冰粒径比工况下的归一化冲击力时程曲线。由于粒径差异, 相同体积下各工况的堆积密度不同, 从而导致颗粒总重量的差异。为消除重量差异对冲击力的影响, 本研究采用了归一化冲击力(冲击力与颗粒总重量的比值)作为分析指标。冰岩碎屑流的冲击力随时间呈现出先增加、后减小, 最终趋于平稳的趋势。鉴于各工况下冲击力的波动, 本研究选用最大归一化冲击力作为对比标准, 因为最大冲击力是工程应用中结构安全设计的关键参考指标。随着岩-冰粒径比的增大, 各工况的最大归一化冲击力也随之增加, 表明岩石颗粒和冰颗粒的粒径差异对冰岩碎屑流的冲击力有显著影响。这是因为随着岩-冰粒径比的变化, 颗粒在流动过程中会形成不同的分选模式, 而这些模式直接影响冲击力的大小。

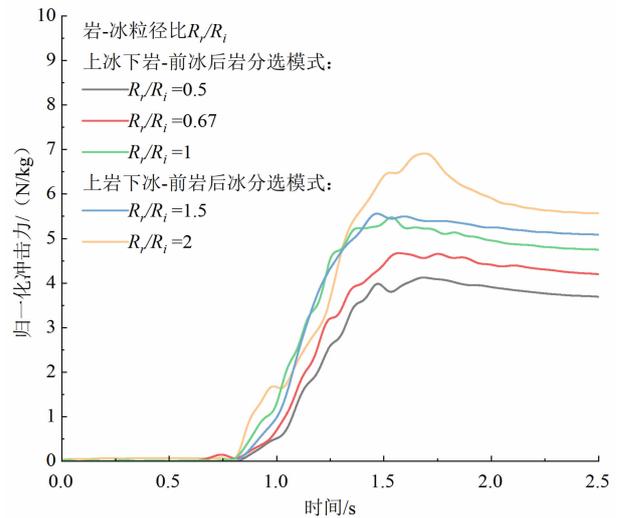


图 9 不同分选模式的冲击时程曲线

Fig. 9 Impact time history curves of different segregation modes

图 10 展示了不同岩-冰粒径比工况下的能量耗散曲线。各工况的能量耗散随时间持续增加, 表明颗粒在流动过程中发生了能量损失。能量耗散较低的工况传递给挡板的有效冲击能量较高, 冲击力也较大。

当岩-冰粒径比小于或等于 1 时, 冰岩碎屑流呈现上层为冰、下层为岩, 前方为冰、后方为岩的分选模式。在撞击挡板时, 冰岩碎屑流前端的冰颗粒数量(大粒径-低密度)多于岩石颗粒(小粒径-高密度), 由于冰颗粒重量较小, 导致初始冲击力较小。当前端颗粒在挡板前形成堆积体后, 后续高密度岩

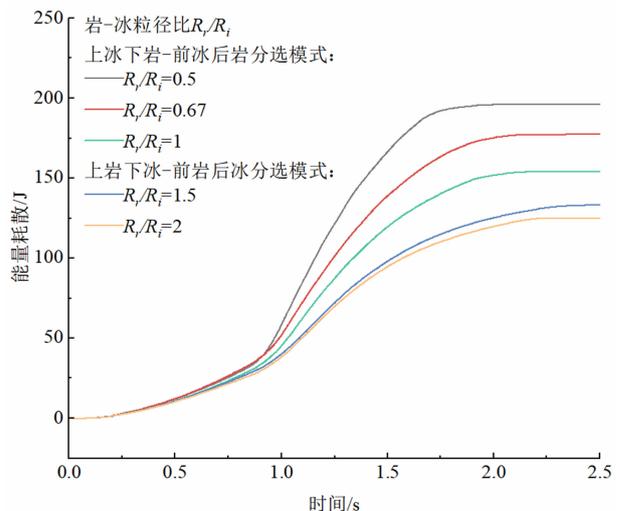


图 10 不同分选模式的能量耗散曲线

Fig. 10 Energy dissipation curves of different segregation modes

石颗粒通过撞击堆积体传递冲击力,或沿堆积体斜面流动并改变方向后接触挡板,使得冰岩碎屑流对挡板的整体冲击力显著降低。此外,如图 10 所示,上层冰-下层岩、前方冰-后方岩模式的能量耗散曲线始终位于上层岩-下层冰、前方冰-后方岩模式之上,表明前者的能量耗散更大。这是因为冰岩碎屑流下层的岩石颗粒(小粒径-高密度)比表面积较大且表面粗糙,显著提高了摩擦耗能。

当岩-冰粒径比大于 1 时,冰岩碎屑流呈现上层为岩、下层为冰,前方为岩、后方为冰的分选模式。在撞击挡板时,冰岩碎屑流前端的岩石颗粒(大粒径-高密度)数量多于冰颗粒(小粒径-低密度),由于岩石颗粒重量较大,因此初始冲击力较大。尽管后续冰颗粒(小粒径-低密度)的冲击力被堆积体削弱,但颗粒混合物的整体冲击力损失较小。如图 10 所示,上层岩-下层冰、前方岩-后方冰模式的能量耗散曲线始终低于上层冰-下层岩、前方冰-后方岩模式,表明前者的能量耗散较小。这是因为冰岩碎屑流下层的冰颗粒(小粒径-低密度)摩擦较小,摩擦能耗较低。

### 3 讨论

研究表明,粒径差异引发的筛分效应使小颗粒向下分选、大颗粒向上分选,这一过程可称为粒径分选;而密度差异产生的浮力效应促使高密度颗粒向下分选、低密度颗粒向上分选,这一过程可称为密度分选。然而,在冰岩碎屑流这种特殊的颗粒流中,粒径分选和密度分选同时存在,导致岩石和冰的粒径分选与密度分选在颗粒分选过程中既可能产生协同强化作用,也可能引发竞争弱化效应。

#### 3.1 粒径分选与密度分选之间的协同强化作用

在岩-冰粒径比小于 1 的工况下,粒径分选和密度分选所引起的筛分和浮力效应的协同作用,驱使岩石颗粒(小粒径-高密度)分选至冰岩碎屑流的下层,而冰颗粒(大粒径-低密度)则分选至上层。分选到下层的小粒径岩石颗粒由于其较大的比表面积和较粗糙的表面导致与水槽底板的摩擦增大,摩擦耗能较大,从而使得这些颗粒的流速显著减慢,逐渐滞后于冰岩碎屑流的后端。与此同时,冰颗粒向上分

选至冰岩碎屑流的自由表面,受挤压较小,流速较快,逐渐向前端聚集。这种分选效应导致整个冰岩碎屑流的长度不断拉长,流动中的空隙增大,从而使得小粒径岩石颗粒更容易下落至碎屑流的底层。由此,粒径分选和密度分选相辅相成,持续增强颗粒分选现象。

#### 3.2 粒径分选与密度分选之间的竞争弱化作用

在岩-冰粒径比大于 1 时,粒径分选和密度分选的协同强化作用会转变为竞争弱化作用,这种竞争弱化作用直接影响冰岩碎屑流的颗粒分选过程。密度分选使得被岩石颗粒包围的冰颗粒(小粒径、低密度)受到向上的浮力作用,促使部分冰颗粒向上运动。然而,也有一些冰颗粒会随机沉入碎屑流中的空隙,并下移至下层区域。粒径和密度的差异驱使冰颗粒既向上层迁移,又向下层下沉,最终导致冰颗粒在冰岩碎屑流中的空间分布趋于均匀,从而减弱了流深方向上的颗粒分选效应。同时,下层的岩石颗粒粒径较大、比表面积较小,而下层冰颗粒表面光滑,两者共同作用使得下层颗粒的摩擦耗能较小,流动速度较快,导致上下层颗粒之间的流速差异减小。这使得冰岩碎屑流的层间剪切运动不明显<sup>[11]</sup>,进而削弱了流动方向上的颗粒分选效应。

尽管本研究深入探讨了在岩石与冰的密度差异条件下,粒径差异对颗粒分选规律和冲击力的影响,但由于本研究仅为冰岩碎屑流分选问题的初步探索,采取了简化处理,主要聚焦于岩石和冰均为单一、均匀粒径并仅考虑粒径比的情况。因此,研究未考虑岩石和冰的粒径级配、形状、含冰量等因素,且所选用的粒径较小,这使得所得的颗粒分选规律和冲击规律具有一定的局限性。在后续工作中将考虑更复杂的影响因素,以进一步丰富和完善研究。

### 4 结论

本研究通过模型试验和数值模拟相结合的方法,深入研究了岩石和冰的粒径差异对冰岩碎屑流分选特征的影响,可得出以下结论。

(1) 颗粒粒径差异影响分选模式。在岩石和冰的密度差异条件下,颗粒粒径差异的改变可以引起冰岩碎屑流分选模式的改变。当岩-冰粒径比从小

于 1 逐渐增大至大于 1 时,冰岩碎屑流分选模式从上层冰-下层岩、前方冰-后方岩转变为上层岩-下层冰、前方岩-后方冰。

(2) 粒径差异与分选程度有正相关性。在冰岩颗粒分选过程中,不管冰岩碎屑流呈现何种分选模式,粒径差异都与颗粒分选程度呈现显著的正相关关系,即粒径差异越大,冰岩颗粒的分选程度就越高。

(3) 分选模式的不同对冲击力有显著影响。上层冰-下层岩、前方冰-后方岩的模式造成的冲击力小于上层岩-下层冰、前方岩-后方冰的模式。此外,上层冰-下层岩、前方冰-后方岩的分选模式导致的能量耗散更大,使得其传递给挡板的有效冲击能量低于后者。

## 参考文献 (References)

- [1] 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
- [2] SOSIO R. *Rock-snow-ice avalanches* [M]. Boston: Academic Press, 2015: 191–240.
- [3] 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
- [4] 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
- [5] HUGGEL C. Recent extreme slope failures in glacial environments: Effects of thermal perturbation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, **28**(11–12): 1119–1130. DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.06.007
- [6] FISCHER L, HUGGEL C, KÄÄB A, et al. Slope failures and erosion rates on a glacierized high - mountain face under climatic changes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, **38**(8): 836–846. DOI: 10.1002/esp.3355
- [7] KARGEL J S, LEONARD G J, SHUGAR D H, et al. Geomorphic and geologic controls of geohazards induced by Nepal's 2015 Gorkha earthquake [J]. *Science*, 2016, **351**(6269): aac8353. DOI: 10.1126/science.aac8353
- [8] FÉLIX G, THOMAS N. Evidence of two effects in the size segregation process in dry granular media [J]. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2004, **70**(5): 051307. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.051307
- [9] PEREIRA G G, CLEARY P W. Segregation due to particle shape of a granular mixture in a slowly rotating tumbler [J]. *Granular Matter*, 2017, **19**(2): 23. DOI: 10.1007/s10035-017-0708-7
- [10] ALBABA A, LAMBERT S, NICOT F, et al. Relation between microstructure and loading applied by a granular flow to a rigid wall using DEM modeling [J]. *Granular Matter*, 2015, **17**(5): 603–616. DOI: 10.1007/s10035-015-0579-8
- [11] 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
- [12] FENG Zetao, FAN Xuanmei, NI Tao, et al. How ice particles increase mobility of rock-ice avalanches: Insights from chute flows simulation of granular rock-ice mixtures by discrete element method [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, **128**(8): e2023JF007115. DOI: 10.1029/2023JF007115
- [13] 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
- [14] HUTTER K, KOCH T. Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: Experiments and theoretical predictions [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences*, 1991, **334**(1633): 93–138. DOI: 10.1098/rsta.1991.0004
- [15] 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**: 153–177. DOI: 10.1007/s00603-006-0126-3
- [16] CUNDALL P A. Computer simulations of dense sphere assemblies [J]. *Studies in Applied Mechanics*, 1988, **20**: 113–123. DOI: 10.1016/B978-0-444-70523-5.50021-7
- [17] 周公旦, 孙其诚, 崔鹏. 泥石流颗粒物质分选机理和效应 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, **45**(1): 28–36. [ZHOU Gongdan, SUN Qicheng, CUI Peng. Study on the mechanisms of solids segregation in granular debris flows [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, **45**(1): 28–36] DOI: 10.15961/j.jsuese.2013.01.005
- [18] 季顺迎, 孙其诚, 严颖. 颗粒物质剪切流动的类型-液转化特性及相变图的建立 [J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2011, **41**(9): 1112–1125. [JI Shunying, SUN Qicheng, YAN

- Yin. Characteristics in quasi-solid-liquid phase transition of granular shear flow and its phase diagram [J]. *Scientia Sinica Phys, Mech and Astron*, 2011, **41**(9): 1112 – 1125] DOI: 10.1360/132011 – 1064
- [19] MOSLET P O. Field testing of uniaxial compression strength of columnar sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2007, **48**(1): 1 – 14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.08.025
- [20] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1953, **20**(3): 327 – 344. DOI: 10.1115/1.4010702
- [21] HUNT K H, CROSSLEY F R E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, **42**(2): 440 – 445. DOI: 10.1115/1.3423596
- [22] ELATA D, BERRYMAN J G. Contact force-displacement laws and the mechanical behavior of random packs of identical spheres [J]. *Mechanics of Materials*, 1996, **24**(3): 229 – 240. DOI: 10.1016/S0167 – 6636(96)00034 – 8
- [23] AGNOLIN I, ROUX J N. Internal states of model isotropic granular packings. I. Assembling process, geometry, and contact networks [J]. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2007, **76**(6): 061302. DOI: 10.1103/PhysRevE.76.061302
- [24] 李天话, 樊晓一, 姜元俊. 岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响研究[J]. *山地学报*, 2018, **36**(2): 289 – 297. [LI Tianhua, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Influence of Gradation on the impact effect of landslide debris flow [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(2): 289 – 297] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000324
- [25] JIANG Yuanjun, FAN Xiaoyi, LI Tianhua, et al. Influence of particle-size segregation on the impact of dry granular flow [J]. *Powder Technology*, 2018, **340**: 39 – 51. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.014

## Grain Density and Gradation Jointly Regulate the Grain Segregation Patterns and Impact Force Effects in Rock-Ice Debris Flow

YANG Junkai<sup>1</sup>, JIANG Yuanjun<sup>2\*</sup>, ABI Erdi<sup>1</sup>, ZHU Yuanjia<sup>2</sup>, LIU Yutong<sup>1</sup>

(1. a. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation; b. Key Laboratory of Geological Disaster Reduction for Highway and Waterway Transportation in Mountainous Areas, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** In the movement of an ice-rock debris flow, it occurs a natural phenomenon of sorting rock particles from ice particles possibly because of sharp distinction in density between ice-grain and rock-grain, which affects its flow behavior and impact effect, and finally alters the catastrophic consequence of an ice-rock debris flow. Most of previous studies took an approach of indoor experiments to examine the effect of single particle properties on particle sorting, but did not consider the combined action of differences in both particle size and density on grain sorting in moving ice-rock debris flows.

In this paper, it used indoor physical modeling experiments and numerical simulations to investigate the motion process of ice-rock debris flow under the density difference between rock and ice particles. Due to the complexity of the material composition of an ice-rock debris flow, this study assumed that both rock and ice were of a single, homogeneous particle size, and considered only the particle size ratio between rock and ice included in the simplified gradation model, and then analyzed the influence law of rock-ice particle size ratio on particle sorting mode and impact force.

(1) The difference in particle size between rock and ice significantly changed particle sorting pattern, resulting in two distinct sorting modes for a ice-rock debris flow body. One mode was of large particle ice in the upper layer with small rock particle in the lower layer in the ice-rock flow body (upper ice-lower rock model), or ice in the front with rock in the rear along an ice-rock flowing body (front ice-rear rock model), whereas another mode was small particle ice in the lower layer with large rock particle in the upper layer (upper rock-lower ice model), or rock in the front with ice in the rear (front rock-rear ice model).

(2) There was a significant positive correlation between the difference in particle size and the degree of sorting of particles, i. e., the larger the difference in particle size, the higher the degree of sorting.

(3) Particle sorting patterns significantly affected the impact force of ice-rock debris flows. Specifically, the upper ice-lower rock model had less impact on a designed retaining wall than the upper rock-lower ice model, and the upper ice-lower rock model and front ice-back rock model acquired greater energy dissipation.

This study provides a theoretical basis for understanding particle sorting mechanism in moving ice-rock debris flow and for the prevention and mitigation efforts.

**Key words:** rock-ice debris flow; particle sorting; particle size difference; density difference; impact force

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)