

DOI: 10.11779/CJGE20240600

密集固-液两相颗粒流流变特性及黏/惯性界限试验研究

杨晓霞, 李 延*, 胡 伟

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 泥石流和浅层流滑等地质灾害的动力学本质是一种密集固-液两相颗粒流, 由于复杂的固-液相间相互作用机制, 其流变学特性极其复杂。颗粒物理学提出了针对干颗粒流的 $\mu(I)$ 惯性指数本构模型以及针对固-液两相颗粒流的 $\mu(J)$ 黏性指数本构模型, 然而上述模型主要是基于自由表面流或极低正应力条件 (小于 1 kPa), 并采用理想的颗粒材料 (塑料/金属/玻璃球), 与真实地表灾害的应力范围与材料特性都有显著的差异。为此, 采用旋转流变仪和自主研发的试验腔体, 可以实现 5~20 kPa 的正应力加载, 0.1~360 s⁻¹ 剪切应变率条件下的长距离剪切, 选用铅珠与石英砂颗粒模拟岩土颗粒, 选用水与不同黏度的硅油模拟不同黏度的间质黏性流体, 以期揭示固液两相颗粒流的流变特性。试验结果表明: 高黏度间质流体会显著提高高速剪切条件下的颗粒流摩擦系数; 干颗粒流或间质流体黏度较低时, $\mu(I)$ 模型可以较为准确的表征其流变特性, 而间质流体黏度较高时需要采用 $\mu(J)$ 模型来表征其流变特性。基于物理试验结果, 提出了具体的无量纲参数值来定量划分黏性与惯性颗粒流的界限, 进而可以根据主导物理机制的不同采用合适的本构模型, 实现对该类地质灾害宏观动力学过程更为准确的描述。

关键词: 密集固-液两相颗粒流; 流变试验; 流变学本构; 无量纲参数

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2408-08

作者简介: 杨晓霞(1999—), 女, 硕士, 主要从事地质灾害防护方面的研究工作。E-mail: 1663977043@qq.com。

Experimental investigation of rheological behavior and viscous-inertial boundary in dense solid-liquid two-phase granular flows

YANG Xiaoxia, LI Yan, HU Wei

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The dynamic processes of geological disasters, such as debris flows and shallow landslides, are essentially characterized by dense solid-liquid two-phase granular flows. Due to the complex interaction mechanism between the solid and liquid phases, its rheological properties are extremely complex. The $\mu(I)$ and $\mu(J)$ constitutive models are proposed to describe the rheological behavior for dry granular flows and solid-liquid two-phase granular flows, respectively. However, these models have been proposed based on free surface or very low normal stress conditions (generally <1 kPa), and ideal granular materials (e.g., plastic/metal/glass spheres) are used. These conditions (stress range and material properties) deviate significantly from those encountered in real-world geohazard scenarios. Therefore, experiments are conducted using a rheometer equipped with a designed shear chamber, capable of applying normal stresses ranging from 5 kPa to 20 kPa and shear strain rates from 0.1 s⁻¹ to 360 s⁻¹ to granular materials under long-distance shearing. We utilize zirconia beads and quartz sand as granular materials, and water and silicone fluid as interstitial fluids to simulate a range of solid-liquid two-phase flow conditions. Test results demonstrate that high-viscosity interstitial fluids significantly enhance the friction coefficient of granular flows, especially under high-speed shear. It is found that the $\mu(I)$ constitute effectively characterizes flow behavior when the viscosity of the dry granular material or interstitial fluid is low, while the $\mu(J)$ constitute is more suitable for high-viscosity interstitial fluids. Based on these physical simulation experiments, specific dimensionless boundary parameters are proposed to delineate viscous and inertial flow regimes.

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目 (42325703); 国家自然科学基金项目 (42477207); 四川省科技计划资助项目 (2021JDTD0014, 2024NSFSC1980) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) Outstanding Youth Science Fund Project (Grant No.42325703), National Natural Science Foundation of China (NSFC) Project (Grant No.42477207), and Sichuan Provincial Science and Technology Program Project (Grant Nos.2021JDTD0014, 2024NSFSC1980).

收稿日期(Received): 2024-06-19 修回日期(Revised): 2024-11-23 接受日期(Accepted): 2024-12-10 网络出版日期(Online): 2024-12-11

*通信作者 (E-mail: 43133660@qq.com)

Furthermore, based on the differences in dominant physical mechanisms, appropriate constitutive models can be adopted to achieve a more accurate description of the macroscopic dynamic processes of such geological hazards.

Key words: dense solid-liquid two-phase granular flow; rheometer experiment; rheological constitutive; dimensionless parameter

0 引言

泥石流、海底滑坡、浅层流滑 (flowslides) 等是自然界中常发生且极具破坏性的地质灾害^[1-3]。此类地质灾害的动力学本质是一种固-液两相颗粒流^[4], 其中粗粒形成了两相颗粒流中的固相颗粒, 细粒悬浊在孔隙水中形成了液相黏性流体, 一定的上覆压力作用使得这些地表过程的底部剪切带往往处于密集颗粒流状态 (图 1)。在稀疏态, 其动力学机制主要受间质流体的影响^[5]。而在密集态, 既存在固相颗粒间的摩擦或碰撞行为, 又存在黏性流体的润滑行为, 其动力学机制极其复杂^[6-7], 相关研究是工程地质学、颗粒物理学、流体力学等学科的研究热点。与此同时, 揭示相关流变学特性及物理机制对于准确描述该类地质灾害的宏观动力学特性具有重要理论价值。

20 世纪中期, Bagnold^[8]通过剪切悬浮在牛顿流体中的球形颗粒提出了颗粒碰撞行为占主导的“颗粒惯性状态”和颗粒间流体行为占主导的“宏观黏性状态”, 为后续研究奠定了重要的基础。Midi^[9]、DA Cruz 等^[10]和 Jop 等^[11]先后揭示了密集颗粒流中摩擦阻力随剪切应变率而增加的变化规律, 即著名的 $\mu(I)$ 流变本构模型, 并认为高速条件下颗粒间以碰撞作用为主。众多学者基于 $\mu(I)$ 流变模型开展了固-液两相颗粒流的试验和数值模拟研究^[12-13]。然而, 当固-液两相颗粒流中间质流体黏度较高时, 间质黏性流体引起的能量耗散十分重要^[6, 14]。为充分考虑其影响, Boyer 等^[15]提出了基于黏性指数的本构模型, 即 $\mu(J)$ 流变本构模型。地质灾害领域的学者们基于地质过程, 对此也有类似的认识。Takahashi^[16]认为颗粒间的碰撞行为在泥石流中占主导地位, 液相流体产生的黏性作用与之相比可以忽略不计, 并据此提出了水石流模型。而 Berzi 等^[17]、Pudasaini 等^[18]的研究表明液相间质流体产生的固-液相间作用力对两相颗粒流的力学特性会产生显著的影响。目前仍需要一个更为系统的理论框架来解

释固-液两相颗粒流复杂的物理行为机制。

无量纲数常常被用来大致估算两相颗粒流的流动状态。Bagnold^[8]提出了一种基于无量纲数巴格诺尔德数 N_{Bag} 的简单分类, 认为黏性/惯性状态的过渡发生在 $N_{\text{Bag}} = 40 \sim 450$ 。Iverson^[19]、DE Haas 等^[20]在研究泥石流等相关地质灾害时, 采用上述的结论, 将 $N_{\text{Bag}} > 450$ 作为描述泥石流中碰撞作用占主导的边界值。另一方面, Ancy 等^[14]将不可压缩牛顿流体中的刚性球体颗粒假设为仅受重力作用的简单剪切流, 并基于颗粒流物理学建立运动方程进行分析和推导。他提出了一个理论值 $N_{\text{Bag}} = 1$, 对于惯性碰撞态, $N_{\text{Bag}} \gg 1$; 对于黏性润滑态, $N_{\text{Bag}} \ll 1$ 。Siman-Tov 等^[6]在区分饱和和颗粒流的流变物理状态中沿用了这种分类方法。

纵观国内外上述研究, 目前对区分黏/惯性的 N_{Bag} 界限值仅有基于理论与经验的建议取值, 却缺乏严格的物理试验明确 $\mu(I)$ 本构与 $\mu(J)$ 本构的适用条件及其界限。为此, 本文采用旋转流变仪和自主研发的试验腔体, 实现了 5~20 kPa 上覆应力 (对应表层至 1 m 左右埋深土体的有效应力), 0.1~360 s^{-1} 剪切应变率条件下的密集干颗粒流与密集固-液两相颗粒流剪切试验, 选用具有规则圆球形状的矿物颗粒——锆珠和具有不规则形状的天然颗粒——石英砂作为试验的颗粒材料, 并通过水和不同黏度的硅油模拟黏性泥浆。基于试验初步探索密集固-液两相颗粒流复杂的流变特性及其物理机制, 并结合无量纲参数分析, 研究 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 本构模型其各自的适用范围及界限, 从而为该类地质灾害宏观动力学过程的描述提供重要的理论基础。

1 试验设备与方案

本试验所采用的设备为德国 HAAKE 公司的 MARS 60 流变仪, 如图 2 (a) 所示。该型流变仪可施加的法向力范围为 0.01~50 N, 扭矩范围为 0.05~200 mN·m, 转速范围为 $10^{-8} \sim 4500$ r/min, 数据采

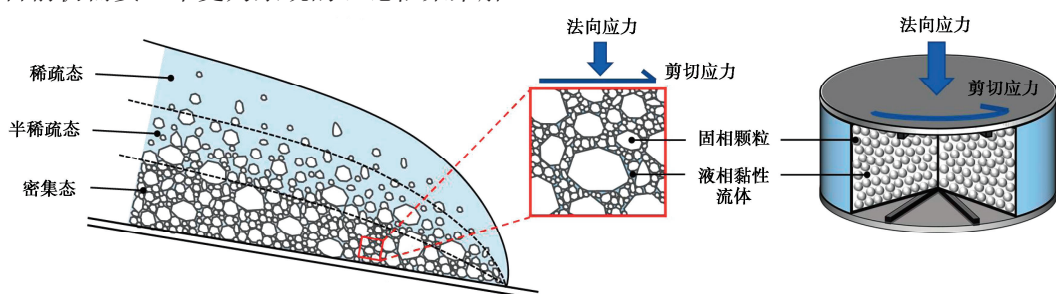


图 1 重力作用下的固-液两相颗粒流体沿斜面流动示意图及试验力学模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gravity-driven solid-liquid two-phase particle fluid flow along an inclined plane and experimental mechanical model

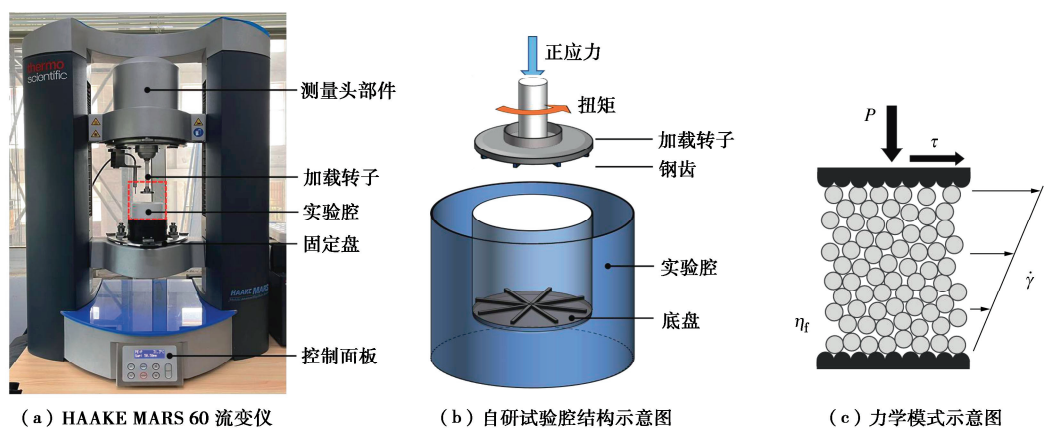


图 2 试验设备及力学模式示意图

Fig. 2 Test apparatus and schematic diagram of mechanical mode

集频率最高为 500 Hz。试验腔体内径 35.1 mm，高 40 mm，其侧壁由聚四氟乙烯（特氟龙）制成以尽可能减少边壁摩擦对试验结果的影响，如图 2（b）所示。加载转子下部和试验腔下底板各固定 8 条凸起高度为 1 mm 的钢齿，以增加底板与颗粒之间的摩擦，减少颗粒与加载转子之间的相对滑移。转子与试验腔侧壁之间的间隙为 0.05 mm，可以确保试验过程中转子不与侧壁产生额外的摩擦，且直径约为 1 mm 的试验颗粒材料无法流出。间质流体可以通过间隙流出，以确保样品内没有额外的超孔隙流体压力。试验腔体的设计允许从试样上部施加精确控制的正应力和转速，通过调节转速可以模拟不同速度下的剪切作用。该试验装置可以实现长距离的剪切，从而有效模拟地质灾害中的远程运动过程。力学原理与试验装置见图 1，2。

在本试验中，选用粒径约为 1 mm（0.85~1.18 mm）的铅珠和石英砂作为固体颗粒材料模拟岩土颗粒，其中铅珠为一种理想的圆球形矿物颗粒材料，其几何形状规则且不易破碎；而石英砂为一种典型的常见岩土颗粒材料。试验中选用的石英砂颗粒密度为 2.65 g/cm³，铅珠颗粒密度为 6.0 g/cm³。选用水和不同黏度硅油作为理想的间质流体，模拟不同细粒含量的黏性泥浆。试验中选用的水和硅油黏度范围为 0.001~0.5 Pa·s，与常见的浆体黏度范围相似。试验具体操作步骤如下：取固定重量的铅珠/石英砂颗粒倒入试验腔中，通过击实器将样品分层压实到 10 mm 样品厚度（约 10 个颗粒粒径），从而保证样品初始体积分数（固体颗粒体积/总体积）基本一致，约为 0.60；然后加入相同体积的水/硅油浸没铅珠，并放入真空室饱和和处理 12 h；饱和流程完成后，将试验腔固定于旋转流变仪加载台处，通过加载转子施加固定的上覆应力，设置等效剪切速度分别为 1，4，7，12，37，74，123，368，735，1225，1715，2205，2695，3186，3676 mm/s，每个速度剪切至剪应力和样品厚度达到稳态。由于试验设备扭矩限制，各组试验能达到的最高速度有所不

同。试验在室温 24℃ 下进行，具体试验条件见表 1。

2 试验结果

摩擦系数 μ 和剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 可由下式得出^[9]：

$$\mu = \frac{\tau}{P} = \frac{3T}{2\pi r^3 P}, \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h}. \quad (2)$$

式中： τ 为剪应力（Pa）； P 为正应力（Pa），其在本试验中的取值为系统施加的上覆应力与颗粒材料自重产生的平均附加应力之和； T 为扭矩（N·m）； r 为圆柱体试样的半径（m）， v 为等效剪切速度（m/s）； h 为样品厚度（m）。如图 3 为一组试验的剪应力/样品厚度-时间图，剪切过程可分为“瞬态阶段”和“稳态阶段”^[21]。在稳态阶段，剪应力和样品厚度随时间的变化基本保持不变。取稳态阶段的均值作为剪应力和样品厚度的有效值。每组试验结束后，额外开展不同剪切速度的重复性试验，以确保试验测量结果的准确性。

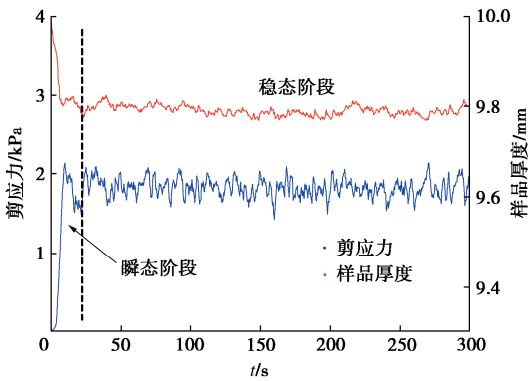


图 3 剪应力和样品厚度随时间的变化曲线

Fig. 3 Shear stress and sample thickness variation with time

2.1 间质流体黏度对流变特性的影响

图 4 为不同间质流体黏度下摩擦系数 μ 与剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 的关系图。由图 4 可知，铅珠颗粒材料和石英砂颗粒材料表现出相似的变化趋势。在非常低的剪切

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

试验编号	试验材料	流体黏度/ (Pa·s)	上覆应力/ kPa	等效剪切速度/(mm·s ⁻¹)
1	铅珠 (干)	0.000018	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715/2205/2695/3186/3676
2	铅珠 (水, 浸没)	0.001000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715/2205/2695/3186/3676
3	铅珠 (硅油, 浸没)	0.010000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715/2205/2695/3186/3676
4	铅珠 (硅油, 浸没)	0.100000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
5	铅珠 (硅油, 浸没)	0.350000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
6	铅珠 (硅油, 浸没)	0.500000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
7	铅珠 (干)	0.000018	10	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715/2205/2695/3186/3676
8	铅珠 (硅油, 浸没)	0.100000	10	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
9	铅珠 (干)	0.000018	20	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
10	铅珠 (硅油, 浸没)	0.100000	20	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
11	石英砂 (干)	0.000018	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
12	石英砂 (水, 浸没)	0.001000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
13	石英砂 (硅油, 浸没)	0.010000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
14	石英砂 (硅油, 浸没)	0.100000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
15	石英砂 (硅油, 浸没)	0.350000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715
16	石英砂 (硅油, 浸没)	0.500000	5	1/4/7/12/37/74/123/368/735/1225/1715

应变率条件下, 摩擦系数受剪切应变率的影响较为有限, 该阶段对应于干颗粒流的准静态颗粒摩擦阶段^[22]。其中, 铅珠颗粒材料在准静态区的摩擦系数约为 0.34, 而石英砂颗粒材料约为 0.68。在较高剪切应变率条件下, 两种材料的摩擦系数随剪切应变率的增大而快速上升, 并且在不同的剪切应变率条件下, 石英砂的摩擦系数均大于铅珠的摩擦系数。根据试验结果可以推测颗粒形状、棱角、表面粗糙度等因素会直接影响不同剪切应变率条件下干颗粒流与固-液两相颗粒流的表现摩擦系数。此外, 在该阶段内可以发现间质黏性流体会显著影响密集固-液两相颗粒流的流变特性, 即间质流体黏度越高, 密集固-液两相颗粒流的摩擦系数越大。

2.2 正应力对流变特性的影响

图 5 为不同正应力下摩擦系数 μ 与剪切应变率 $\dot{\gamma}$ 的关系图。由图可知, 密集干颗粒流和密集固-液两相颗粒流具有相似的正应力效应。在较低剪切应变率条件下 (小于 10 s^{-1}), 即准静态区, 干铅珠、铅珠与 0.1 Pa·s 硅油混合试样的摩擦系数几乎均不受正应力的影响, 保持恒定在 0.34 左右; 在较高剪切应变率条件下, 摩擦系数会随着剪切应变率的增加而快速增加, 但是其增加的趋势在一定程度上会被施加的正应力所抑制, 且正应力越大抑制效果越明显。由于黏性流体产生的额外黏性力的作用, 固-液两相颗粒流在较高剪切应变率条件下的摩擦系数会明显高于干颗粒流的摩擦系数。

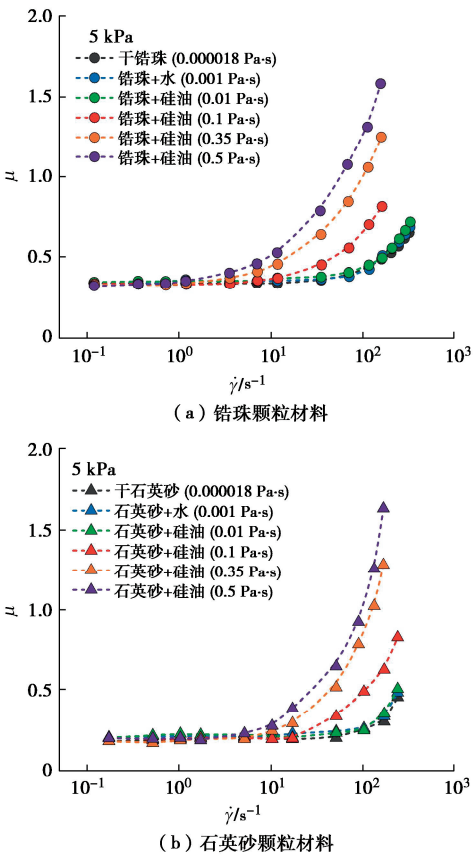


图 4 不同间质流体黏度下摩擦系数与剪切应变率的关系图
Fig. 4 Relationship between friction coefficient and shear strain rate under different interstitial fluid viscosities

2.3 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 模型的对比

DA Cruz 等^[10]通过数值模拟和量纲参数分析得出

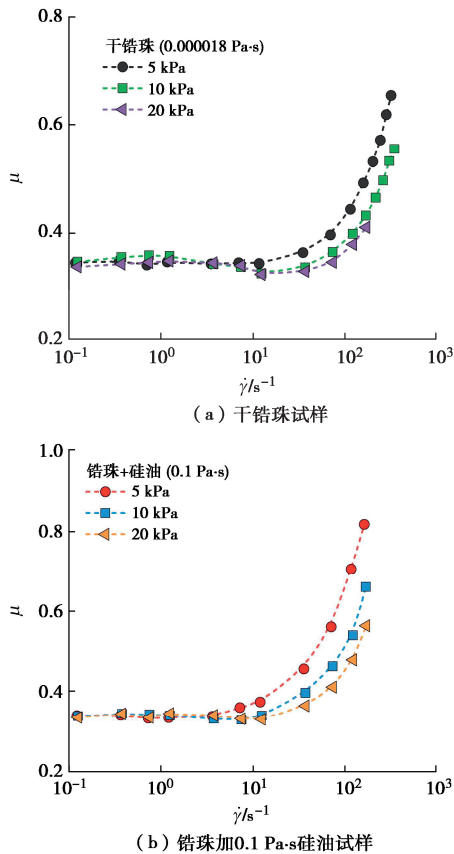


图 5 不同正应力下摩擦系数与剪切应变率的关系图

Fig. 5 Relationship between friction coefficient and shear strain rate under different normal stresses

密集干颗粒流的摩擦系数与无量纲参数惯性指数 $I = \dot{\gamma} d / \sqrt{P / \rho_p}$ 有关。Jop 等^[11]在此基础上提出了描述密集颗粒流的本构方程：

$$\mu(I) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{1 + I_0 / I} \quad (3)$$

式中： μ_1 为 I 趋于 0 时的有效摩擦系数值；随着 I 的增大， μ 逐渐增大并最终趋于一个极限值 μ_2 ； I_0 为一常数，其取值主要取决于颗粒的性质； d 为颗粒粒径 (m)； ρ_p 为颗粒密度 (kg/m^3)。惯性指数 I 代表颗粒流细观尺度下的颗粒相对运动时间 $d / \sqrt{P / \rho_p}$ 与宏观尺度下颗粒流平均剪切变形时间 $1 / \dot{\gamma}$ 的比值。 $\mu(I)$ 模型可以有效地刻画一些条件下干颗粒的流动特性^[10-11]。

对于固-液两相颗粒流，当间质流体黏度相对较高时，颗粒流摩擦强度的速度强化效应十分显著，此时流体黏性力的影响无法被忽略且可能占据主导地位。Boyer 等^[15]据此提出了无量纲参数——黏性指数 $J = \eta_f \dot{\gamma} / P$ ，并构建了考虑间质流体黏性效应的 $\mu(J)$ 本构方程：

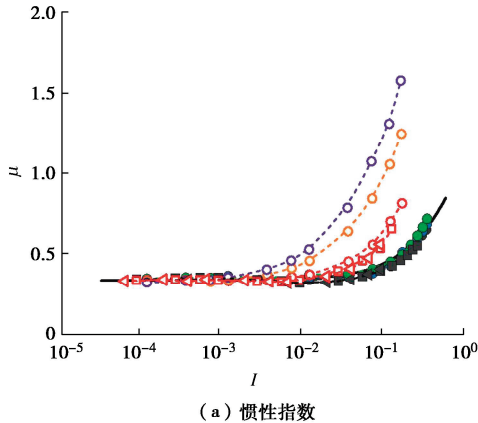
$$\mu(J) = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{1 + I_0 / J} + J + \frac{5}{2} \phi_m J^2 \quad (4)$$

式中： ϕ_m 为固体颗粒体积分数可达到的最大临界值，本试验中取值为 0.6（考虑颗粒间摩擦的影响）； η_f 为

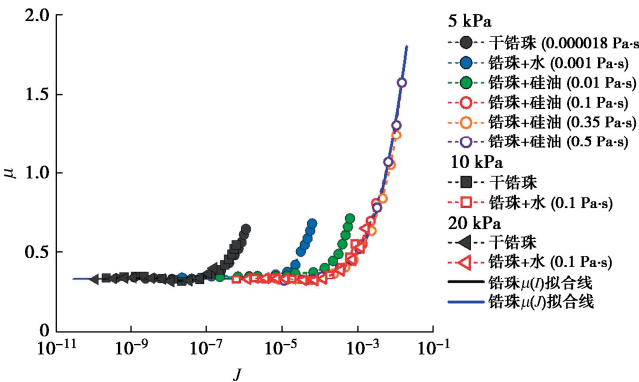
间质流体黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。细观尺度的颗粒相对运动时间变为由黏性尺度 $t_{\text{micro}} = \eta_f / P$ 给出。

基于式 (3)，(4)，可以分别通过 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 对试验结果进行拟合，结果见图 6，7。对于理想颗粒材料锆珠，其 $\mu_1 = 0.34$ ， $\mu_2 = 2.80$ ；而对于岩土颗粒材料石英砂，其 $\mu_1 = 0.68$ ， $\mu_2 = 4.50$ 。

如图 6 (a)，7 (a) 所示， $\mu(I)$ 本构模型不仅适用于描述密集干颗粒流的流变特性，低间质流体黏度 ($\eta_f \leq 0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 的固-液两相颗粒流与 $\mu(I)$ 曲线也几乎重合，表明其流变行为非常类似于干颗粒流系统，即流动过程可分为低剪切应变率下由摩擦行为主导的准静态和高剪切应变率下由颗粒碰撞行为主导的准惯性态。这与 Takahashi^[16]的观点相似，即在低黏度固-液两相颗粒流体内，颗粒间的碰撞作用依然起到控制性作用。但当间质流体黏度显著增加后，即 $\eta_f \geq 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时，其流变特性曲线逐渐偏离 $\mu(I)$ 本构曲线，显然基于惯性指数 I 的本构模型对这种情况并不适用。



(a) 惯性指数



(b) 黏性指数

图 6 锆珠材料的摩擦系数与惯性指数和黏性指数的关系图
Fig. 6 Relationship between friction coefficient and (a) inertial number/(b) viscous number of zirconia bead material

如图 6 (b)，7 (b) 所示，在横轴为黏性指数 J 的坐标系中，高间质流体黏度 ($\eta_f \geq 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 的固-液两相颗粒流的流变特性曲线几乎重合，可以很好的被 $\mu(J)$ 流变学所表征。这表明对于高间质流体黏度的

固-液两相颗粒流, 其间质流体的黏性力起到控制性作用, 而颗粒碰撞等机制可能已经被间质黏性流体所抑制, 其影响极为有限。然而目前对于 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 模型各自的适用范围仍缺乏基于试验的定量化结论。

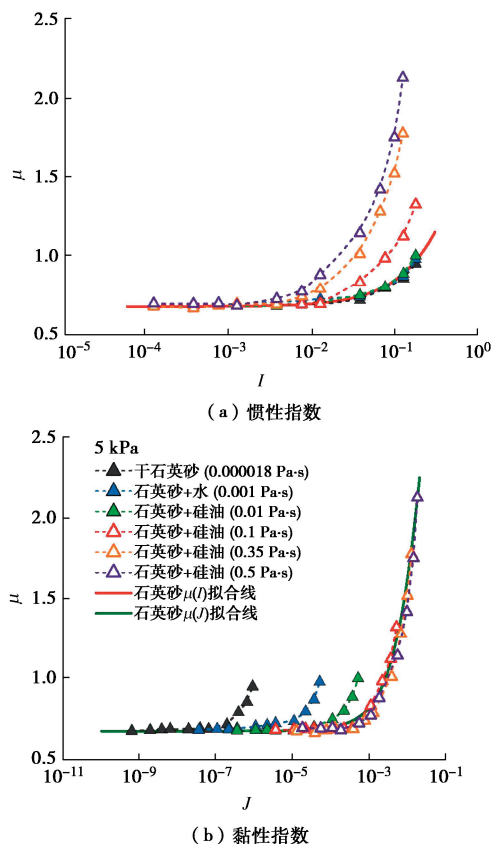


图 7 石英砂材料的摩擦系数与惯性指数和黏性指数的关系图

Fig. 7 Relationship between friction coefficient and (a) inertial number/(b) viscous number of quartz sand

2.4 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 模型的适用条件

巴格诺尔德数 N_{Bag} 由 Bagnold^[8]在 1954 年提出, 用来区分惯性机制与黏性机制主导的物理过程。

$$N_{\text{Bag}} = \frac{\sqrt{\lambda} \rho_p \dot{\gamma} d^2}{\eta_f} \quad (5)$$

式中: 参数 $\lambda = 1/[(C_0/C)^{1/3} - 1]$ 为颗粒直径与颗粒间距的比值, 称为线性颗粒浓度; C 为固体颗粒体积分数 (固体颗粒体积/总体积); C_0 为固体颗粒堆积的最大体积分数 (二维条件下, 对于最密填充的球体为 0.74)。 N_{Bag} 越小, 则黏性效应越大, 反之惯性效应越大。

Bagnold^[8]早在 1954 就提出用 N_{Bag} 来区分惯性与黏性作用机制, 然而当时缺乏成熟的 $\mu(I)$ 与 $\mu(J)$ 本构模型, 所提出的界限值并非针对这两种本构模型。此外, 其开展的试验中颗粒样品置于两个圆柱体之间进行剪切, 样品内部剪切应变率 (沿旋转剪切径向) 不均匀分布, 且缺乏上覆压力, 与真实泥石流流的应力状态存在差异。该研究基于试验结果认为 $N_{\text{Bag}} = 40 \sim 450$ 为黏性主导机制与颗粒碰撞主导机制的过渡区域。

Ancely 等^[14]在深入的理论分析框架下, 将不可压

缩牛顿流体中的刚性球体颗粒假设为仅受重力作用的简单剪切流, 采用微观结构方法, 将两相流视为宏观层面上的有效连续体, 定性的比较了惯性作用与黏性作用两种物理机制的强弱, 即对于惯性碰撞态, $N_{\text{Bag}} \gg 1$; 对于黏性润滑态, $N_{\text{Bag}} \ll 1$ 。显然, 该巴格诺尔德数界限值仅定性比较了两种物理机制是哪一种机制所主导, 并非基于试验得到的具体界限值。

本文试验采用铅珠与石英砂来模拟岩土体的颗粒材料, 采用水与多黏度硅油模拟不同细粒含量的黏性泥浆, 进而模拟真实地质灾害中的固-液两相颗粒流的物理力学行为。如图 8 所示, 符合惯性指数本构 $\mu(I)$ 的试验结果用实心符号表示, 符合黏性指数本构 $\mu(J)$ 的试验结果用空心符号表示。试验结果清晰的表明 $N_{\text{Bag}} \approx 70$ 可以作为本文试验条件下表征黏性/惯性转变的界限值。对于 $N_{\text{Bag}} < 70$ (虚线左侧), 黏性力在流动中可能占主导作用, 其流变特性可以用 $\mu(J)$ 本构模型来准确的描述。对于 $N_{\text{Bag}} > 70$ (虚线右侧), 惯性碰撞力在流动中可能占主导作用, 其流变特性可以很好的被 $\mu(I)$ 本构模型所描述。本研究得出的界限值符合 Bagnold^[8]所提出的宽泛范围 40~450, 但基于严格控制的试验给出了更为精确的界限值, 可以为相似力学条件下地质灾害的流变学特性及其本构模型的选取提供重要的量化依据。

Courrech 等^[23]将固-液两相颗粒流流动分为自由落体状态、惯性状态和黏性状态。从一种流动状态到另一种流动状态的转变由 3 个无量纲数的界限值来定义^[24]: 表征惯性效应与黏性效应相对大小的斯托克斯数 $St = l^2 / J = \rho_p d^2 \dot{\gamma} / \eta_f$, 颗粒密度与流体密度之比的平方差 $r = (\rho_p / \rho_f)^{1/2}$, 以及粒子雷诺数 $Re = St / r$ 。这些参数可以投影到 r - St 参数空间中, 如图 9 所示。Courrech 等^[23]通过试验发现饱和颗粒流的界限值为 $St=10$, $r=4$, $Re=2.5$ (图 9 中实线)。本文试验结果大体上满足其定义的界限值, 即干颗粒流处于自由落体状态, 低间质流体黏度的固-液两相颗粒流 ($\eta_f \leq 0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 处于惯性状态, 高间质流体黏度的固-液两相颗粒流 ($\eta_f \geq 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 处于黏性状态。但如果调整界限值为 $St=20$ 可以更符合试验结果。尽管如此, 采用如图 9 所示的方法也可以对两种本构的适用条件进行基本有效地判断。

真实岩土材料固-液两相颗粒流的宏观流变特性远比本文所开展的试验研究更为复杂。比如真实的岩土颗粒往往具有复杂的颗粒级配和颗粒形状, 其中颗粒级配的影响还会不可避免的发生颗粒粒径分选 (segregation)。此外, 真实间质流体泥浆往往为非牛顿流体, 其流变学特性相较于本研究所采用的硅油更为复杂。毫无疑问, 揭示复杂的真实岩土材料固-液两

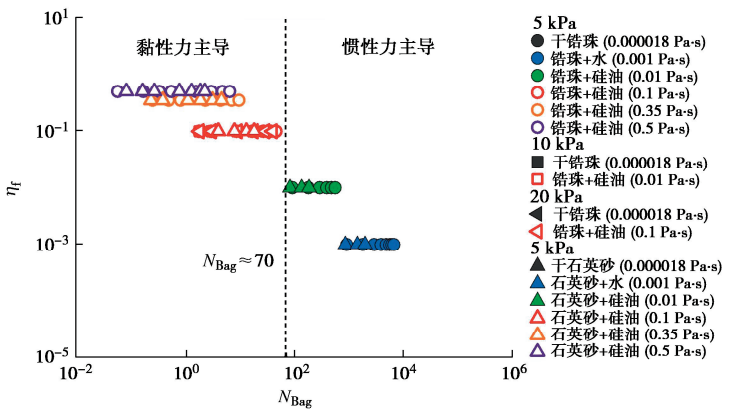


图 8 固-液两相颗粒流中流体黏度与巴格诺尔德数的关系图及基于 N_{Bag} 的黏/惯性界限 (剔除了准静态摩擦阶段的数据点以更清晰地展现结果)

Fig. 8 Relationship between fluid viscosity and Bagnold number in two-phase particle flow & the boundary between viscous to inertial domain phase (data points from the quasi-static friction phase are excluded for a clearer presentation)

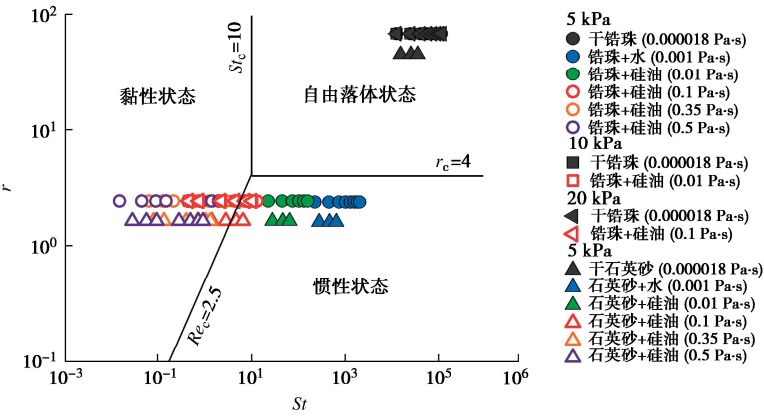


图 9 固-液两相颗粒流的流动状态分类图

Fig. 9 Phase classification diagram of solid-liquid two-phase particle flows

相颗粒流其流变学特性仍有大量的系统性工作有待开展。受限于工作量与篇幅的影响, 本文仅致力于阐明相对理想条件下颗粒土体与黏性间质流体组成的密集固-液两相颗粒流的流变特性, 以期获得相对基础的物理力学规律。

3 结 论

(1) 在低剪切应变率下, 摩擦系数基本保持不变, 流动处于准静态摩擦阶段; 在较高剪切应变率下, 摩擦系数随剪切应变率的增大而快速上升。高黏度的间质流体会对固-液两相颗粒流的流变特性产生显著影响。同时, 正应力的增加会一定程度抑制较高剪切应变率条件下的颗粒流表观摩擦。

(2) 干颗粒流与低黏度固-液两相颗粒流的流变特性可以用 $\mu(I)$ 本构来表征, 其高速流动中颗粒间碰撞行为起控制性作用; 而高黏度间质流体的固-液两相颗粒流其流变特性可以用 $\mu(J)$ 本构来表征, 其动力学行为被流体黏性力显著影响。真实岩土颗粒材料与理想颗粒材料的流变特性都符合 $\mu(I)$ 或 $\mu(J)$ 准则, 不同的材料主要影响了本构模型中的 μ_1 和 μ_2 参数。

(3) $\mu(I)$, $\mu(J)$ 流变学的应用可以通过巴格诺尔德数 $N_{Bag} \approx 70$ 来进行大致划分。当 $N_{Bag} < 70$ 时, 黏性力占主导作用, 介质流动用 $\mu(J)$ 流变学来表征; 当 $N_{Bag} > 70$ 时, 惯性力占主导作用, 介质流动用 $\mu(I)$ 流变学来表征。此外, 也可以通过 $r-St$ 平面空间来区分主导的物理机制。选用合适的流变学本构模型对准确描述地质灾害的宏观动力学特性至关重要, 本文基于物理试验提出了定量的界限值。与此同时需要注意的是, 本文所提出的界限值可能亦局限于所采用设备可以达到的正应力与剪切应变率范围, 更高应力和剪切应变率条件下固-液两相颗粒流的动力学特性仍有待更为先进的试验装置开展系统的试验研究。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 胡伟, 李延和杨晓霞设计试验方案; 胡伟和李延提供研究指导; 杨晓霞完成试验操作与计算分析; 李延和杨晓霞参与论文的写作和修改; 所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。HU Wei, LI Yan and YANG Xiaoxia designed the experimental scheme. HU Wei and LI Yan provided

research guidance. YANG Xiaoxia completed the experimental operations and computational analysis. LI Yan and YANG Xiaoxia participated in the writing and revision of the manuscript. All authors have read and agreed to the submission of the final manuscript.

参考文献:

- [1] 郑 虎, 牛文清, 毛无卫, 等. 颗粒物质力学及其在工程地质领域中的应用初探[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(1): 12-24. (ZHENG Hu, NIU Wenqing, MAO Wuwei, et al. Mechanics of granular material and the application in engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(1): 12-24. (in Chinese))
- [2] HU W, LI Y, XU Q, et al. Flowslide high fluidity induced by shear thinning[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2022, **127**(12): e2022JB024615.
- [3] 郭 剑, 崔一飞. 滑坡-泥石流转化研究进展[J]. 工程地质学报, 2023, **31**(3): 762-779. (GUO Jian, CUI Yifei. An overview of landslide-induced debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, **31**(3): 762-779. (in Chinese))
- [4] 崔 鹏, 唐金波, 林鹏智. 泥石流运动阻力特性及其研究进展[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, **48**(3): 1-11. (CUI Peng, TANG Jinbo, LIN Pengzhi. Research progress of resistance character of debris-flow[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, **48**(3): 1-11. (in Chinese))
- [5] BATCHELOR G K, GREEN J T. The determination of the bulk stress in a suspension of spherical particles to order c^2 [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, **56**: 401-427.
- [6] SIMAN-TOV S, BRODSKY E E. Distinguishing between rheophysical regimes of fluid-saturated granular-flows using dilatancy and acoustic emission measurements[J]. Granular Matter, 2021, **23**(2): 44.
- [7] 宋东日, 陈 倩, 陈晓清, 等. 密实及稀疏泥石流的流动性控制因素[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, **52**(4): 585-598. (SONG Dongri, CHEN Qian, CHEN Xiaoqing, et al. Control factors for mobility of dense and dilute debris flows[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, **52**(4): 585-598. (in Chinese))
- [8] BAGNOLD R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1954, **225**(1160): 49-63.
- [9] MIDI G. On dense granular flows[J]. The European Physical Journal E, 2004, **14**(4): 341-365.
- [10] DA CRUZ F, EMAM S, PROCHNOW M, et al. Rheophysics of dense granular materials: discrete simulation of plane shear flows[J]. Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 2005, **72**(2 pt 1): 021309.
- [11] JOP P, FORTERRE Y, POULIQUEN O. A constitutive law for dense granular flows[J]. Nature, 2006, **441**(7094): 727-730.
- [12] PAILHA M, POULIQUEN O. A two-phase flow description of the initiation of underwater granular avalanches[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009, **633**: 115-135.
- [13] LAGRÉE P Y, STARON L, POPINET S. The granular column collapse as a continuum: validity of a two-dimensional Navier-Stokes model with a $\mu(I)$ -rheology[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, **686**: 378-408.
- [14] ANCEY C, COUSSOT P, EVESQUE P. A theoretical framework for granular suspensions in a steady simple shear flow[J]. Journal of Rheology, 1999, **43**(6): 1673-1699.
- [15] BOYER F, GUAZZELLI É, POULIQUEN O. Unifying suspension and granular rheology[J]. Physical Review Letters, 2011, **107**(18): 188301.
- [16] TAKAHASHI T. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures[M]. London: Taylor & Francis, 2007.
- [17] BERZI D, JENKINS J T. A theoretical analysis of free-surface flows of saturated granular-liquid mixtures[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, **608**: 393-410.
- [18] PUDASAINI S P, KRAUTBLATTER M. The mechanics of landslide mobility with erosion[J]. Nature Communications, 2021, **12**(1): 6793.
- [19] IVERSON R M. The physics of debris flows[J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(3): 245-296.
- [20] DE HAAS T, BRAAT L, LEUVEN J R F W, et al. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, **120**(9): 1949-1972.
- [21] DI TORO G, GOLDSBY D L, TULLIS T E. Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates[J]. Nature, 2004, **427**(6973): 436-439.
- [22] 李 坤, 程谦恭, 林棋文, 等. 高速远程滑坡颗粒流研究进展[J]. 地球科学, 2022, **47**(3): 893-912. (LI Kun, CHENG Qiangong, LIN Qiwen, et al. State of the art on rock avalanche dynamics from granular flow mechanics[J]. Earth Science, 2022, **47**(3): 893-912. (in Chinese))
- [23] COURRECH DU PONT S, GONDRET P, PERRIN B, et al. Granular avalanches in fluids[J]. Physical Review Letters, 2003, **90**(4): 044301.
- [24] CUI K F E, ZHOU G G D, JING L, et al. Generalized friction and dilatancy laws for immersed granular flows consisting of large and small particles[J]. Physics of Fluids, 2020, **32**(11): 113312.