

基于 CFD-DEM 耦合的泥石流三维动力学特征及粒径效应

吉东亮¹ 李皓¹ 袁维¹ 冯怀平¹ 贾康杰¹ 李晓斌²

1. 石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;

2. 煤炭开采水资源保护与利用全国重点实验室 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102209

摘要: 为揭示泥石流在不同颗粒粒径条件下的运动特征与动力学响应规律。本文以辽东半岛中部区域老牛圈沟为研究对象, 通过无人机调查和遥感影像技术获取地形特征, 基于 CFD-DEM 耦合方法构建了泥石流三维数值模型, 结合室内试验标定模型微观参数, 对泥石流启动、加速、减速及堆积全过程进行了系统模拟并分析了多组粒径级配下泥石流运动与颗粒粒径效应间的响应关系。结果表明: 泥石流平均速度整体呈“急剧增长—峰值波动—逐渐衰减”的演化特征, 滑动区域前、中、后三段颗粒速度与位移均表现明显差异, 呈现典型的沿程能量积累、碰撞传递与耗散规律; 另外, 颗粒粒径是影响泥石流速度、位移与能量转化的重要参数。能量分析结果显示, 粒径增大时碰撞剪切作用增强, 阻尼能与摩擦耗能显著增大, 势能峰值随粒径增大而增大, 动能峰值降低。研究结果揭示了粒径效应对泥石流运动、能量转化机制的影响, 可为泥石流数值模拟、运动特征分析及灾害防控研究提供一定的理论依据。

关键词: 泥石流; CFD-DEM; 运动特征; 颗粒粒径; 能量分析

中图分类号: P694

收稿日期: 2026-1-7

Three Dimensional Dynamic Characteristics and Particle Size Effect of Debris Flow Based on CFD-DEM Coupling

Ji Dongliang¹, Li Hao¹, Yuan Wei¹, Feng Huaiping¹, Jia Kangjie¹, Li Xiaobin²

1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior in Traffic Engineering Structure and System Safety, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

2. State Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization in Coal Mining, National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102209, China

Abstract: In order to reveal the motion characteristics and dynamic response laws of debris flow under different particle sizes. In this paper, Laoniuguan gully in the central region of the Liaodong Peninsula was taken as the research object. Topographic characteristics were obtained through drone surveys and remote sensing image technology. A three-dimensional numerical model of debris flow was constructed based on the CFD-DEM coupling method. Combined with indoor tests, the model's microscopic parameters were calibrated. The entire process of debris flow initiation, acceleration, deceleration and accumulation was systematically simulated and the response relationship between debris flow movement and particle size effects under multiple groups of particle size gradations was analyzed. The results show that the average velocity of debris flow generally shows an evolution characteristic of "sharp increase-peak fluctuation-gradual decline". The particle velocities and displacements in the front, middle and rear sections of the sliding area show obvious differences, showing typical energy accumulation, collision transfer and dissipation laws along the way; in addition, particle size is an important parameter affecting the velocity, displacement and energy transformation of debris flow. The energy analysis results show that as the particle size increases, the collision and shear effect increases, the damping energy and friction energy dissipation increase significantly, the peak potential energy increases with the increase of the particle size, and the peak kinetic energy decreases. The results

¹基金项目: 中国国家铁路集团有限公司研发项目(L2023G017); 河北省教育厅青年基金(50199990574); 河北省燕赵黄金台聚才计划(A2025022); 国铁重大项目(K2020G034); 国家自然科学基金项目(U2568213); 煤炭开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金(NICE_RD_2025_111); 河北省自然科学基金杰出青年基金项目(E2024210019); 河北省高等学校基础研究重点培育专项(JZX2024011)
第一作者简介: 吉东亮(1992—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为岩石力学。ORCID:0000-0002-5166-9789. E-mail:1065045422@qq.com
通信作者: 袁维(1986—), 男, 教授, 博士, 研究方向为工程地质灾害安全防控。ORCID:0000-0003-3368-3859. E-mail:yuanweisuper001@126.com

reveal the influence of particle size effect on debris flow movement and energy transformation mechanism, which can provide theoretical basis for debris flow numerical simulation, movement characteristics analysis and disaster prevention and control research.

Key words: Debris flow; CFD-DEM; Motion characteristics; Particle size; Energy analysis.

0 引言

泥石流作为一种常见的地质灾害,具有突发性强、流速快、流量大、破坏力强、运动范围广等特点,经常发生在山区及沟谷地带,严重威胁人类的生产生存活动,造成人员伤亡及财产损失^[1-3](石振明等, 2022; 李永威等, 2024; 陈文鸿等, 2025;)。泥石流运动过程涉及固-液两相流的复杂相互作用,其中包括边坡失稳、颗粒碰撞、流体拖拽、能量转化与耗散等多种物理机制^[4-5](舒安平等, 2010; 张晗等, 2022),因此对泥石流运动机理和运动特征的深入研究具有重要的理论与现实意义。

离散单元法 (DEM) 是研究碎屑流颗粒及滑坡运动的重要方法之一^[6](李坤等, 2022),通过对颗粒运动过程的实时监测,得到颗粒运动过程的实时动态数据,能准确描述颗粒间、颗粒与环境间复杂的力学作用^[7-8](Su et al., 2008; Lei et al, 2020),在模拟土体非连续变形和大变形流动方向具有显著优势^[9](田振农等, 2008)。周健等^[10](周健等, 2015)发现离散元法 PFC^{3D} 能清晰的再现泥石流启动、发展变化规律,在泥石流研究方面具有优越性。张家勇等^[11](张家勇等, 2021)基于 PFC^{3D} 建立了鱼鳅坡滑坡的数值模型,分析了滑坡破坏过程,同样发现 PFC^{3D} 软件在模拟滑坡、泥石流运动方面具有较好的适用性。石子健等^[12](石子健等, 2025)使用颗粒流 PFC^{3D} 复现了恩施市沙子坝滑坡运动、堆积过程,剖析了滑坡的动力学及堆积特征。张龙等^[13](张龙等, 2012)利用 PFC^{3D} 对鸡尾山滑坡进行模拟,结合速度、位移监测详细分析了滑坡运动过程。贾珂程等^[14](贾珂程等, 2023)采用 PFC^{3D} 建立了戈龙布滑坡的数值模型,结合不同位置颗粒运动参数深入研究了动力学运动过程。

计算流体力学方法 (CFD) 常用于求解流体计算的控制方程,以对流体力学问题进行模拟和分析,具有计算精度高、适应性强、研究成本低、应用范围广泛等优点^[15-16](Von Boetticher et al., 2016; 蔡国庆等, 2024),在流体计算及流-固耦合研究中被广泛应用。随着碎屑流颗粒数值模拟方法的不断发展,基于计算流体力学与离散元法 (CFD-DEM) 的耦合计算数值模型逐渐成为研究泥石流运动机制的有效工具^[17-18](Zhao et al., 2016; 杨柳等, 2022)。该方法综合

了 CFD 和 DEM 两种方法的优点能够同时从宏观流动特性与微观颗粒行为两个尺度揭示滑坡、泥石流的动力演化过程,已被许多学者采纳并广泛应用在滑坡、泥石流运动等流-固耦合研究领域^[19-20](方君等, 2022; 杨昶等, 2023)。

滑坡—碎屑流现象涉及复杂的能量传递和转化过程^[21](葛云峰等, 2019),王佳佳等^[22](王佳佳等, 2024)采用物理模型试验并结合数值模拟手段,分析了不同工况下滑坡—碎屑流运动和堆积过程中的能量变化。刘春等^[23](刘春等, 2017)开展了滑坡运动过程的数值模拟,详细分析了滑坡运动过程中的机械能、热能间的转化规律。胡晓波等^[24](胡晓波等, 2019)基于离散元模拟方法对三溪村滑坡过程的能量转化过程进行了研究,从能量的角度揭示滑坡碎屑流的运动演化机制。现有研究表明,滑体颗粒粒径大小和级配的不同会造成滑坡运动时间、运动速度、能量传递和转化差异^[25-26](李天话, 2018; 王涓等, 2023;)。袁锦涛等^[27](袁锦涛等, 2022)研究了粗、中、细三种颗粒级配滑坡碎屑流运动的平均动能、平均势能变化,发现粗颗粒组的平均动能下降速度和幅度最快,细颗粒组的平均势能下降速度和幅度最快。陶伟等^[28](陶伟等, 2023)发现不同粒径级配对滑坡碎屑流运动过程中的能量演化具有重要影响,粒径大小与动能峰值、摩擦耗能呈正比例关系,粒径越大,能量的传递和耗散越剧烈。

综上所述,国内外学者在滑坡碎屑流、泥石流数值模拟研究领域取得了丰富的研究成果。许多学者将 DEM 模型用于灾害反演及不同影响因素下的动力学过程分析,但采用 CFD-DEM 耦合方法研究粒径效应对泥石流运动过程影响的相对较少。另外,关于颗粒粒径对泥石流运动的作用效应、能量转化尚不清晰,缺乏从此角度开展对滑坡碎屑流运动特征、堆积情况的分析工作。因此,开展有关方面的研究对深入理解泥石流动力学特征有重要意义。本文构建 CFD-DEM 耦合框架以辽东半岛中部老牛圈沟为研究对象,采用离散元颗粒流软件 PFC^{3D} 建立泥石流三维模型,流体力学计算则基于 Python 开发的 Fipy 偏微分方程,模拟不同粒径大小和级配下的泥石流运动,并通过对颗粒数据的监测分析了不同粒径条件下泥石流运动行为、能量演化过程,为利用数值模拟技术探究滑坡碎屑流粒径效应及泥石流灾

害防治提供借鉴。

1 计算模型与研究方法

1.1 CFD-DEM 耦合模型原理

本文采用 CFD-DEM 耦合方法将连续介质（流体）和离散介质（颗粒）相结合。其中，不同粒径颗粒为泥石流浆体的组成部分，使用单相流体模拟泥石流浆体的运动，实现对老牛圈沟泥石流运动特征及粒径效应的分析。计算过程中使用的控制方程由以下三部分组成：

（1）颗粒运动控制方程。颗粒运动形式主要包括平动和转动，运动过程中能量的交换既可以通过颗粒与周边颗粒和边壁的撞击实现，也可以通过与周围流体间的相互作用实现^[29]。因此，单个颗粒运动可结合牛顿第二定律进行描述，并在此基础上引入流体-颗粒的相互作用力 F_i^f 其控制方程为：

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{i,j}^c + F_i^f + F_i^g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{i,j} \quad (2)$$

式中： m_i 为颗粒 i 的质量， v_i 为颗粒 i 的平动速度， I_i 为颗粒 i 的转动惯量， ω_i 为颗粒 i 的角速度， $F_{i,j}^c$ 为其它颗粒或边壁作用于颗粒 i 上的接触力， F_i^f 为颗粒 i 通过颗粒—流体相互作用受到的作用力， F_i^g 为颗粒 i 受到的重力， $M_{i,j}$ 为其它颗粒或边壁作用于颗粒 i 上的力矩。

（2）流体运动控制方程。通常利用连续性方程和动量方程描述黏性不可压缩流体的运动。根据质量守恒定律建立的流动控制方程即连续性方程，在计算流体的固定体积单元内，该方程体现为：单位时间内，通过体积单元的流量等于体积单元内质量的变化量^[30]。

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f) = 0 \quad (3)$$

式中： α_f 为流体的体积分数， u_f 为流体的运动速度， ∇ 为拉普拉斯算子。

根据牛顿第二定律建立的流体流动控制方程即为动量方程，Anderson 等^[31](Anderson and Jackson, 1967)所推导的动量方程在流体力学计算中被普遍采用，该方程表明，单位时间内体积单元内动量的变化率主要来源于以下因素：通过表面流入的质量所携带的动量、表面应力产生的动量、流体压力引起的动量、颗粒对流体拖拽作用产生的动量，以及各类体积力所带来的动量。动量方程如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f u_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f u_f u_f) = \\ -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \tau_f) + \alpha_f \rho_f g - f_{\text{fluid}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： ρ_f 为流体的密度， p 为流体的压强， τ_f 为流体的应力张量， g 为重力加速度， f_{fluid} 为流体平均下的颗粒通过颗粒-流体相互作用受到的阻力。

（3）颗粒-流体间相互作用力控制方程。颗粒和流体之间相互运动而产生黏性阻力，是颗粒—流体间相互作用力的重要来源，相互作用力的大小与流体的流动状态和颗粒雷诺数有关^[32](聂一品等，2024)。其表达式为：

$$f_{\text{fluid}} = \frac{1}{2} C_d \rho_f \pi r^2 |u_f - v_i| (u_f - v_i) \cdot n^{1-\chi} \quad (5)$$

式中： C_d 为阻力系数， χ 为经验修正因子， $\chi = 3.7 - 0.65 \exp(-(1.5 - \lg Re_p)^2 / 2)$ ，其中， Re_p 为颗粒雷诺数。

1.2 CFD-DEM 耦合流程

CFD-DEM 耦合模型将单相流体和不同粒径颗粒视为两个相互作用的子系统，利用 Fipy 和 PFC 相结合模拟老牛圈沟泥石流颗粒与运动流体的相互作用^[16](蔡国庆等，2024)。构建的 CFD-DEM 耦合模型能充分发挥 PFC^{3D} 在颗粒模拟方面的优势，同时利用 FiPy 在流体数值求解中的可靠性实现流—固两相耦合，为深入研究泥石流启动—运移—堆积机制提供了有效手段。

图 1 展示了 CFD-DEM 耦合计算的基本原理，计算开始前设置 Python 与 PFC 间的交互及颗粒、块体的初始条件，包括流体的流速和方向，颗粒位置、速度、密度、黏度等，流场数据初始化及验证后即可开始计算。计算开始后，CFD 模块根据输入的数据计算流体的控制方程，得到流体—颗粒间的相互作用力，并传入至 DEM 循环计算模块。DEM 模块循环计算后，实时更新颗粒的位置、速度、接触力，进行运动方程的计算并判断模型是否达到收敛。若模型未达到收敛，则将计算所得的颗粒速度和位置等数据进行传递，并循环此计算过程直至模型收敛。若模型达到收敛，则计算结束。

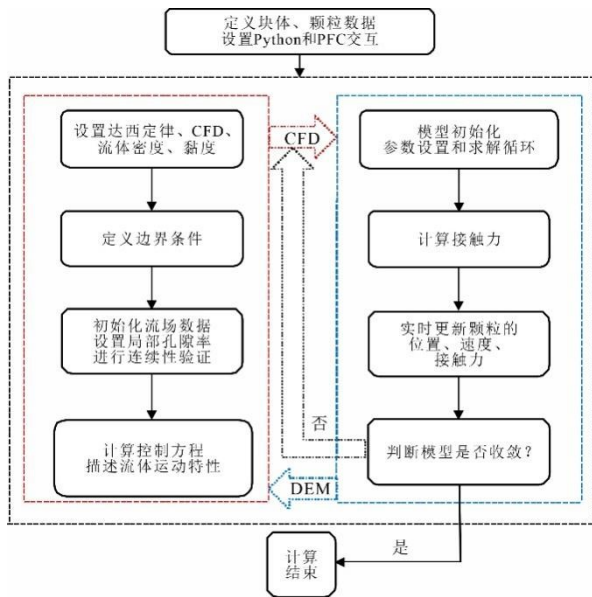


图1 CFD-DEM 耦合流程图

Fig.1 CFD-DEM coupling flow chart

1.3 泥石流三维模型构建

本文以辽东半岛中部老牛圈沟为研究对象，该区域地貌上以侵蚀剥蚀作用形成的低山丘陵为主，其间散布着面积有限的河谷盆地。区内的山体岩性主要为岩浆岩与变质岩，浅部岩体较为破碎，表层普遍覆盖着一层松散、薄弱的碎石土。此外，当地降水丰富，年平均降水量在 800 至 1000 mm 之间，且降雨多集中于汛期，呈现明显的集中性特征。

通过无人机调查和遥感影像技术获取了高精度的滑动面及周边地形的数据，导出.stl 文件并基于离散元软件 PFC^{3D} 构建泥石流三维模型，计算模型底部为固定约束，模型四周为自由边界。通过标定滑床及周边地形细观参数，发现滑床摩擦系数对滑体运动特征及堆积形态存在显著影响，经大量标定试验与实际情况对比，取摩擦系数 $f=0.12$ ^[13](张龙等，2012)。滑床及周边地形由 48094 个四面体网格单元组成，此网格单元能够较好地适应颗粒介质的非规则性并提供较高的计算精度。将网格信息导入 Fipy 偏微分方程求解器中实现 CFD-DEM 控制方程的计算过程，可以较好地模拟流体与滑动面的相互作用，减少模型精度对泥石流滑动特征与堆积形态模拟结果的限制。

离散元方法中，微观颗粒介质的参数设置取决于宏观上的接触力学性质，通过对颗粒样品的室内标定试验获取颗粒组合的岩体宏观力学特性，以标定数值模型的微观参数^[14](贾珂程等，2023)。采用 PFC^{3D} 设置微观参数构建单轴压缩数值模型，通过

赋予上下墙体速度来控制加载速率及方向。同时，对现场采集的岩样进行室内单轴压缩试验，将试验结果与模拟计算结果进行对比如图 2 所示。单轴压缩下两者的应力—应变曲线比较吻合，峰值强度均达到约 35.0 MPa，试件整体表现为单一斜面剪切破坏，模拟与试验中的破坏模式较为一致，这表明所计算模型所设置的微观参数比较合理。

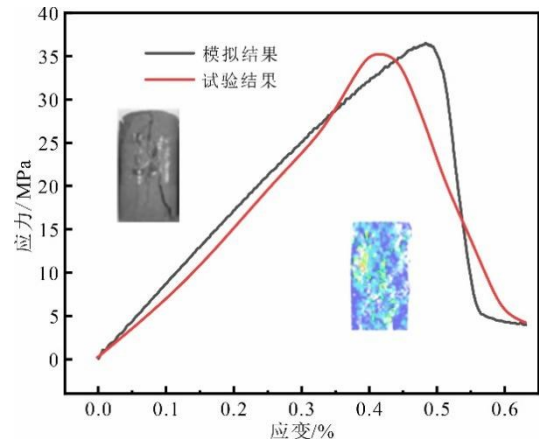


图2 单轴压缩应力-应变曲线数值模拟与试验结果对比

Fig.2 Comparison between numerical simulation and test

results of uniaxial compression stress strain curve

通过生成随机球形颗粒代替真实滑体进行三维运动过程模拟，滑体由若干球形颗粒组成。颗粒与颗粒间应用平行粘结模型、颗粒与墙体间应用线性接触模型，为反映块体之间及块体与表面之间的相互作用，使用联合刚度对颗粒与墙体之间的接触刚度进行计算^[33](石崇等，2013)，引入带有阻尼器的块体接触模型并借助其滞后阻尼特性予以表征泥石流过程中的能量损失^[34](孙其诚和王光谦，2008)，PFC 中力学阻尼主要分为局部非黏性阻尼和黏性阻尼^[35](王忠福等，2014)，局部非黏性阻尼反映系统向平衡态演化的数值稳定性特征，黏性阻尼反映运动过程中能量耗散机制，二者结合能精确模拟泥石流运动过程。经调试，局部阻尼 $\alpha=0.5$ ，黏性阻尼 $\nu_n=0.1$ ， $\nu_s=0.08$ ，详细的拟合模型参数如表 1 所示。

表 1 PFC 拟合模型基本参数

Table 1 Basic parameters of PFC fitting model

黏结方式	参数名称	数值
平行黏结基本参数	颗粒密度/($\text{kN}\cdot\text{m}^3$)	2500
	平行黏结有效模量/GPa	23.2
	法向与切向刚度比 kn/ks	1
	平行键黏聚力/MPa	26
	平行键抗拉强度/MPa	130
	平行键摩擦角/ $^\circ$	31.7
	颗粒间摩擦系数	0.1

	时间步/s	0.01
线性接触基本参数	线性接触有效模量/GPa	500
	法向与切向刚度比 kn/ks	1

离散元数值模型构建如图 3 所示。模型计算区域为长 6100 m、宽 4200 m、高 3500 m 的不规则几何体；流体颗粒初始位置坐标范围为 $x=800\sim3100$ m, $y=700\sim2500$ m, $z=1700\sim3500$ m。根据已有文献^[36](胡明鉴等, 2010)可知, 滑坡体的大变形运动特征无法直接整体监测进行研究, 须以各特征颗粒运动速度与位移的均值来近似研究滑坡体的平均运动速度与平均位移特征。故将泥石流滑体分为前、中、后三段, 分别选取代表颗粒进行监测, P1 为泥石流前段中部颗粒, P2 为泥石流中段中部颗粒, P3 为泥石流后段中部颗粒, 对其位移、速度进行监测, 获取数据用于后续模拟结果分析。

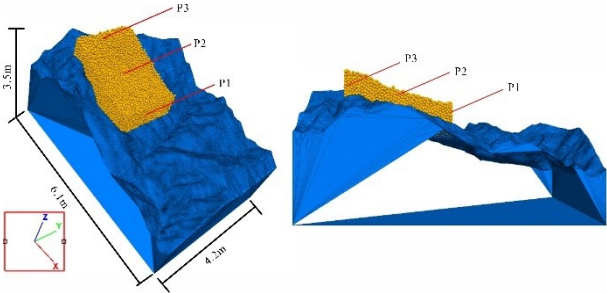


图 3 三维模型构建

Fig.3 Construction of 3D model

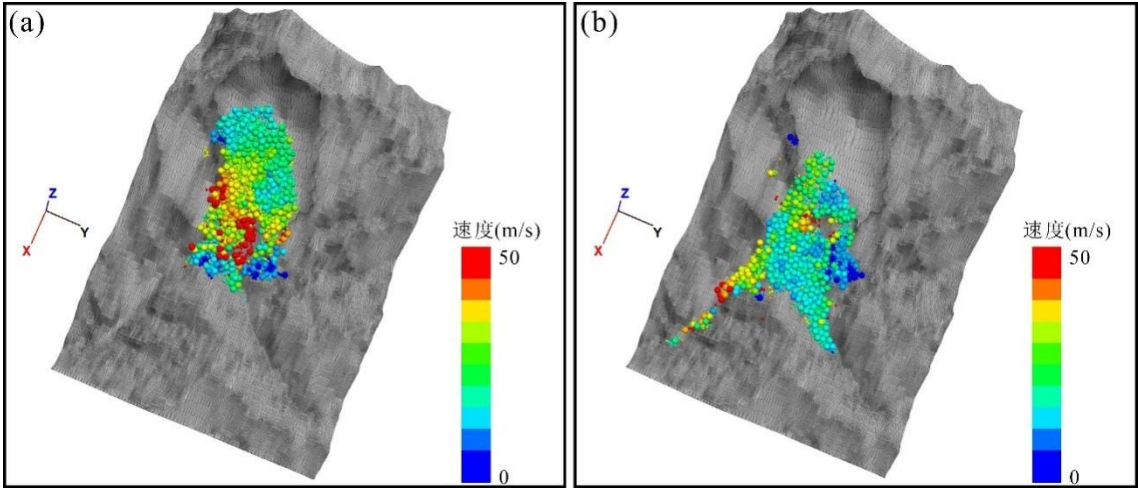
为分析粒径效应对泥石流运动的影响特性, 模拟过程拟采用不同颗粒粒径进行分析, 平行黏结基本参数保持不变, 改变颗粒粒径参数以分析颗粒级配 对泥石流滑体运动特征的影响。本次模拟共设置三组颗粒级配, 细颗粒组 (M1)、中颗粒组 (M2)、粗颗粒组 (M3)。当滑体体积确定时, 颗粒粒径越大, 生成颗粒数越少。反之, 颗粒粒径越小, 生成颗粒数越多。颗粒粒径参数表如下:

表 2 颗粒粒径参数			
Table 2 The parameters of particle sizes			
样本	M1	M2	M3
最小粒径/m	30	30	30
最大粒径/m	34	50	100
最大粒径体积分数/%	40	10	10
最小粒径体积分数/%	30	80	80
颗粒数量/个	12304	5200	2986

2 运动过程分析

分析细颗粒组 (M1) 的运动特征, 图 4 展示了基于 PFC^{3D} 模拟泥石流在不同运动阶段的颗粒速度分布情况及运动过程, 颗粒颜色代表速度大小, 泥石流运动过程是一个先加速再减速的过程。从整体上看, 泥石流经历了由初始堆积、启动加速、缓慢减速以及堆积静止四个主要阶段的动力学演化过程。

图 4(a)初始阶段, 土体失稳发生泥石流滑坡, 颗粒整体速度较低, 颗粒主要集中在源区上部, 表现为局部滑动启动, 下部颗粒向谷中沟壑两侧发生分流。图 4(b)中, 滑动体进一步破碎扩展, 颗粒出现明显分流, 运动速度增大, 物质向沟道两侧分散范围迅速扩大, 滑动体此时处于加速阶段。图 4(c), 泥石流主体处于充分运动阶段, 物质沿沟道快速流动并出现分支扩散, 原区域颗粒基本全运动至沟道及两侧, 左右两侧均发生颗粒堆积。此后, 颗粒速度逐始衰减, 由减速阶段向堆积静止阶段过渡。最后图 4(d)中泥石流逐渐堆积稳定, 部分颗粒冲出计算区域, 大部分颗粒经能量损失后速度降低至较低水平, 显示出堆积过程中的局部惯性冲击。模拟结果中泥石流的运动堆积情况与 Li 等^[37](Li et al., 2024)对泥石流的研究结果较为相似。



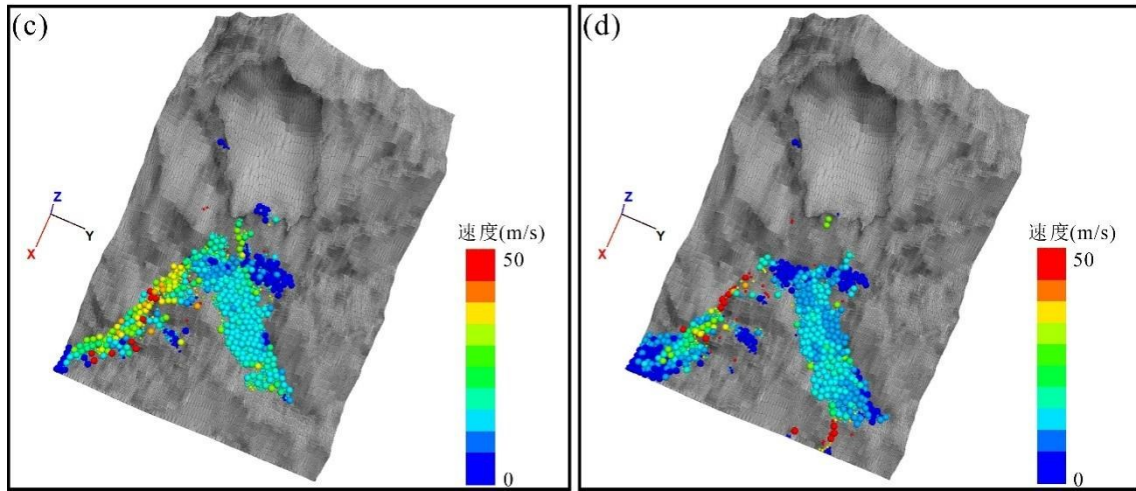


图 4 细颗粒组泥石流运动模拟结果

Fig.4 Simulation results of debris flow movement of fine particle group

a.t=98 s; b.t=196 s; c.t=288 s; d.t=392 s

图 5 中展示了泥石流运动过程中不同位置监测点 (P1、P2、P3) 的颗粒速度随时间的变化规律。总体来看, 泥石流前段和后段的速度曲线变化规律相似, 均表现上下波动、达到最大值后逐渐减小直至稳定, 而中段出现明显的两个速度峰值。

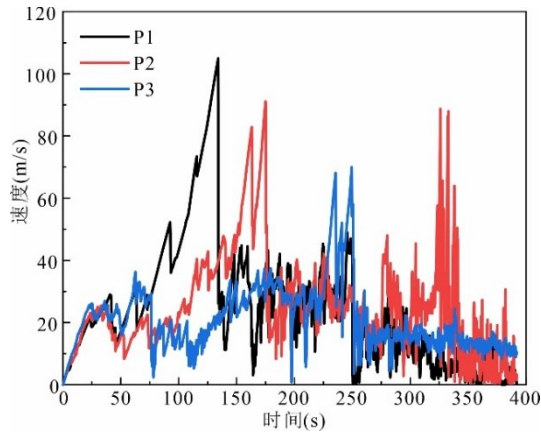


图 5 监测点运动速度

Fig.5 Movement speed of monitoring point

泥石流运动初期 (0-196 s) 各监测颗粒速度均较低, 说明流体尚未形成连续滑动层。随着流体体积增大及坡面剪应力的持续积累, 监测颗粒的速度发生变化, 滑体前端颗粒 (P1) 速度迅速增大, 表明运动过程中前端颗粒粒间的相互碰撞和与流体剪切作用频繁。滑体中段速度 (P2) 逐渐增大, 后段颗粒速度呈现非线性缓慢增加, 表明此时滑动体处于加速阶段。泥石流运动中期 (196-288 s) 各段颗粒速度增大, 滑体发生分流, 颗粒向沟壑两侧发生分流并出现堆积区, 颗粒主体充分运动, 后段颗粒速度增大。此后, 前段、后段颗粒速度曲线均上下波

动, 中段颗粒速度变化幅度较大。运动后期 (288-392 s) 中段颗粒 (P2) 受到后部颗粒撞击, 速度出现剧烈波动而后波动减弱, 速度逐渐稳定减小。前段 (P1) 和后段颗粒 (P3) 的速度曲线趋于稳定并缓慢减小, 表明体系能量耗散加剧、速度逐渐趋于稳定。

从整体运动过程分析, 监测颗粒的运动速度多处于 0-50 m/s, 监测颗粒的运动会出现瞬间速度较高, 运动速度最高可达 80-110 m/s, 这是由于监测颗粒在流场中空间分布具有非均匀性, 位于主流线或能量集中区域的颗粒往往能获得更高的动能。此外, 离散元数值模拟中颗粒运动具有固有的随机性和偶然性, 颗粒间的碰撞、弹射等动态相互作用, 造成监测颗粒的瞬时速度显著增大^[38](Nie et al., 2024)。

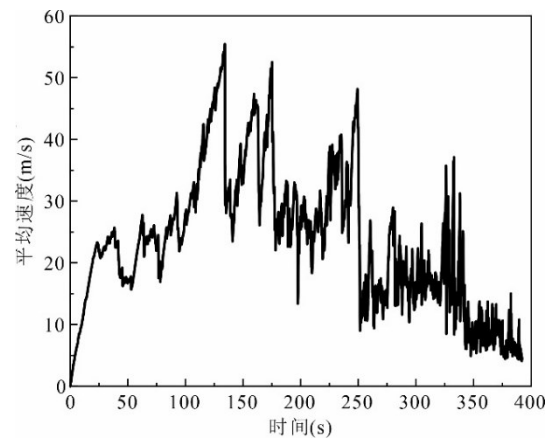


图 6 运动过程平均速度-时间图

Fig.6 Average speed time diagram of motion process

图 6 为运动过程的平均速度与时间关系, 泥石流运动的平均速度总体呈现出“急剧上升—峰值波动—逐渐衰减”的明显阶段性变化特征, 体现出泥石

流运动过程中能量积聚、释放与耗散的动态演化规律。0~135 s, 泥石流运动处于加速阶段, 颗粒间的相互作用与流体剪切作用逐渐增强, 约在 135 s 时达到速度峰值 55 m/s。135 s 后, 平均速度出现峰值波动现象并逐渐减小。此时, 滑坡体仍具有较高的运动速度, 流固耦合作用增强, 泥石流表现出高动能与强侵蚀能力, 向沟道两侧分流并产生堆积。至 345 s, 平均速度出现明显下降趋势并趋于稳定, 颗粒动能因摩擦损失及堆积阻力显著衰减, 但仍有较小速度, 计算时间足够长时将逐渐趋于 0。

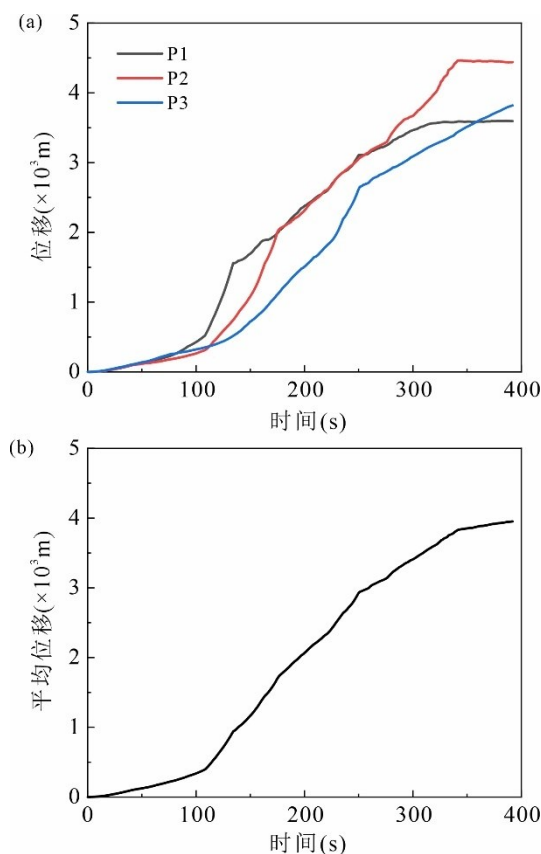


图7 位移时程曲线

Fig.7 Displacement time history curve

a.监测点位移时程曲线; b.平均位移时程曲线

通过观察监测点位移-时程曲线, 如图 7 (a) 所示, 可以发现监测颗粒均在 325 s-392 s 内达到位移峰值, 滑体前段颗粒位移最小为 3.595×10^3 m。滑体中段颗粒位移最大为 4.465×10^3 m, 中段颗粒达到位移峰值后下降并逐渐平缓, 这是由于颗粒在运动过程中与后续颗粒碰撞、翻越堆积体并静止。滑坡体的位移无法通过直接监测, 故根据三个监测点的平均位移绘制出滑体的平均位移时程曲线如图 7 (b), 结果表明 0-109 s 内平均位移呈近似线性缓慢增大, 整体速度较低。109-250 s 平均位移缓慢增

大, 曲线斜率增大, 滑体正处于加速阶段。250-342 s, 平均位移逐渐增大, 曲线斜率降低, 滑体正处于减速阶段。342 s 后平均位移变化趋势逐渐稳定, 最大位移为 3.950×10^3 m。

3 颗粒粒径对滑坡运动的影响

3.1 颗粒粒径对速度的影响

为探究颗粒粒径大小和级配对滑体运动的作用效应, 得到不同粒径大小下泥石流运动过程中沿程监测点的速度变化如图 8 所示, 其中, P1 对应泥石流前段, P2 为中段, P3 为后段, 反映了不同物源条件下泥石流颗粒结构的特征差异。总体上, 各粒径条件下的速度-时间曲线均表现出“快速增长—急剧变化—逐渐衰减”的变化特征, 但速度峰值大小、峰值频率、波动幅度及持续时间存在显著差异, 表明颗粒粒径对泥石流运动的动能释放与能量耗散过程有明显影响。

细颗粒 (M1) 组中, 滑体前段速度上升迅速, 初期速度远高于滑体中段与后段, 表明泥石流前缘在初始滑动阶段能量集中、动能积累显著, 受重力加速与流体推力叠加作用影响形成显著的加速区, 随后速度迅速衰减并趋于稳定。说明在均匀细颗粒体系中, 颗粒间摩擦与流体黏性阻力主导能量耗散过程, 整体具有较好的流动性, 表现出流体主导特征。中颗粒 (M2) 组运动初期滑体各段的速度大小接近。至 200 s 时, 中段及后端颗粒经撞击作用, 瞬时速度增大后缓慢减小。中颗粒组级配下, 小颗粒可填充于大颗粒空隙之间, 增强了体系致密性与流体耦合效应, 使得动能传递更均匀、减小局部流速差异。泥石流运动表现出较好的连续性与稳定性, 能量分配更为协调, 流固相作用处于较平衡状态。粗颗粒 (M3) 组速度曲线呈现显著的脉冲型特征, 表明大颗粒体系在运动过程中易发生局部堵塞、滚动、跳跃与再启动等现象, 造成流-固耦合系统中的非连续性和不稳定性增强。尤其在滑体前、中段处, 短时高峰与快速衰减交替出现, 体系能量释放呈现强烈的瞬态波动性。可以看出, 随着颗粒粒径增大, 速度曲线波动性增强, 流动稳定性显著下降。因此, 颗粒粒径大小是泥石流速度演化与能量耗散机制的重要影响因素。均匀细颗粒体系流体化程度高但动能衰减快; 大颗粒体系流动不连续且波动显著; 中颗粒体系兼具流动性与稳定性, 在能量传递、速度分布及动力响应方面表现出最优特征。需要指出, 由于离散元方法的颗粒运动过程的随机性和非

连续性,颗粒间的瞬时碰撞、反弹及接触—分离行为易引发局部动能的短时集中,从而导致监测颗粒的运动速度达到了 80-180 m/s。

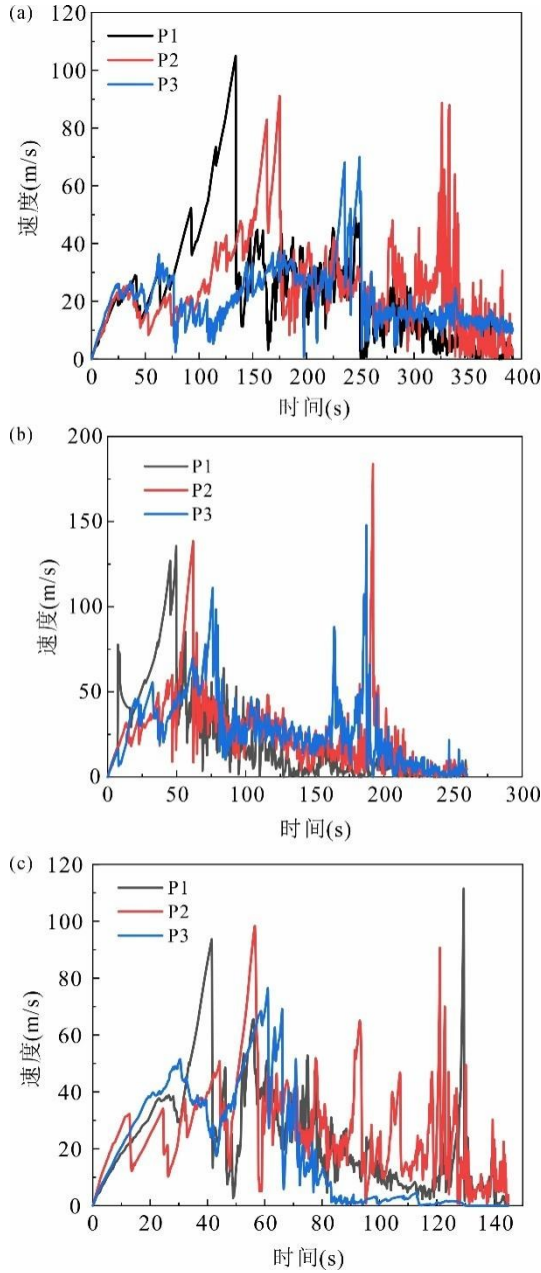


图 8 不同粒径下监测颗粒速度

Fig.8 Monitoring particle velocity under different particle sizes

a.细颗粒组(M1)监测点速度; b.中颗粒组(M2)监测点速度;
c.粗颗粒组(M3)监测点速度

根据各粒径条件下颗粒速度数据,绘制了不同颗粒粒径下泥石流平均速度变化如图 9 所示。细颗粒(M1)组中泥石流平均速度缓慢增加,流体黏性与颗粒碰撞作用使体系平均速度衰减并趋于稳定。中颗粒(M2)组运动初期平均速度较大,流体一颗

粒之间的动能传递稳定性增大,曲线整体波动幅度减小,滑体平均速度呈现波动缓降的趋势,经碰撞作用运动后期仍出现较高速度,而后迅速衰减直至稳定。粗颗粒(M3)组中,颗粒粒径较大造成局部区域易出现堵塞、堆积及再启动等行为,导致泥石流能量释放不均匀,平均速度曲线波动频繁且运动时间较短。需要注意,细颗粒(M1)组中颗粒在沟谷分流后能充分填充山体模型中的沟道,出现大量颗粒堆积现象,颗粒仍然具有较小的运动速度,计算步长和计算时间变长。

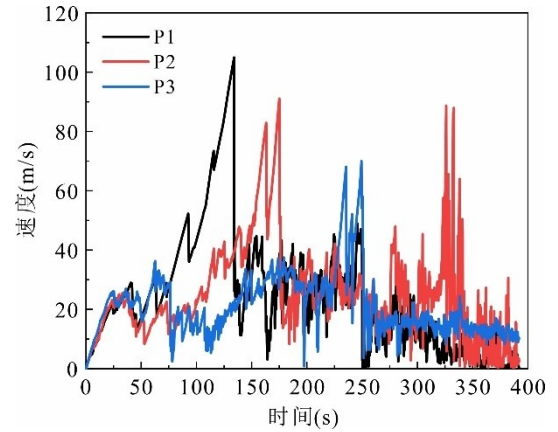


图 9 不同粒径条件的泥石流平均速度

Fig.9 Average velocity of debris flow under different particle size conditions

3.2 颗粒粒径对位移的影响

颗粒级配及粒径大小的差异直接影响滑坡碎屑流的动力学行为和运动轨迹,从而改变位移特征。通过对不同颗粒级配条件下滑体关键位置颗粒的监测,得到各细、中、粗颗粒级配组中各段颗粒的运动轨迹图 10,以揭示颗粒尺度效应对位移的影响机制。

各粒径级配下,泥石流前段达到沟道分流处具有较快的运动速度。细颗粒组(M1)因粒径细小且相对均一,颗粒间摩擦阻力较低使滑体前段颗粒呈现集中且连续的轨迹,体现出较高的流动性与稳定的推进方向。与之相比,中颗粒组(M2)与粗颗粒组(M3)级配更宽、大颗粒含量更高,颗粒间碰撞与局部堆积现象加剧,导致前段轨迹更为发散,局部运动出现不连续特征,表明粗颗粒在滑体前缘区域具有强化扰动与冲击的作用效应。滑体中段区域受前缘驱动及后部推动的双重作用,各组依然保持较强的流动连续性。后段轨迹体现出明显的颗粒效应:细颗粒组(M1)后段颗粒运动至沟谷两侧;中颗粒组(M2)后段粗颗粒的滚动和滑移行为更为突出;粗颗粒组(M3)后段颗粒在沟道分流处产生堆

积，使轨迹呈现出更大的偏离与随机性。中颗粒和粗颗粒组因粗细颗粒混合构成而增强了内部的“堵

塞效应”，轨迹出现明显波动甚至局部滞阻，揭示出能量耗散机制逐渐由黏性主导向碰撞主导转变。

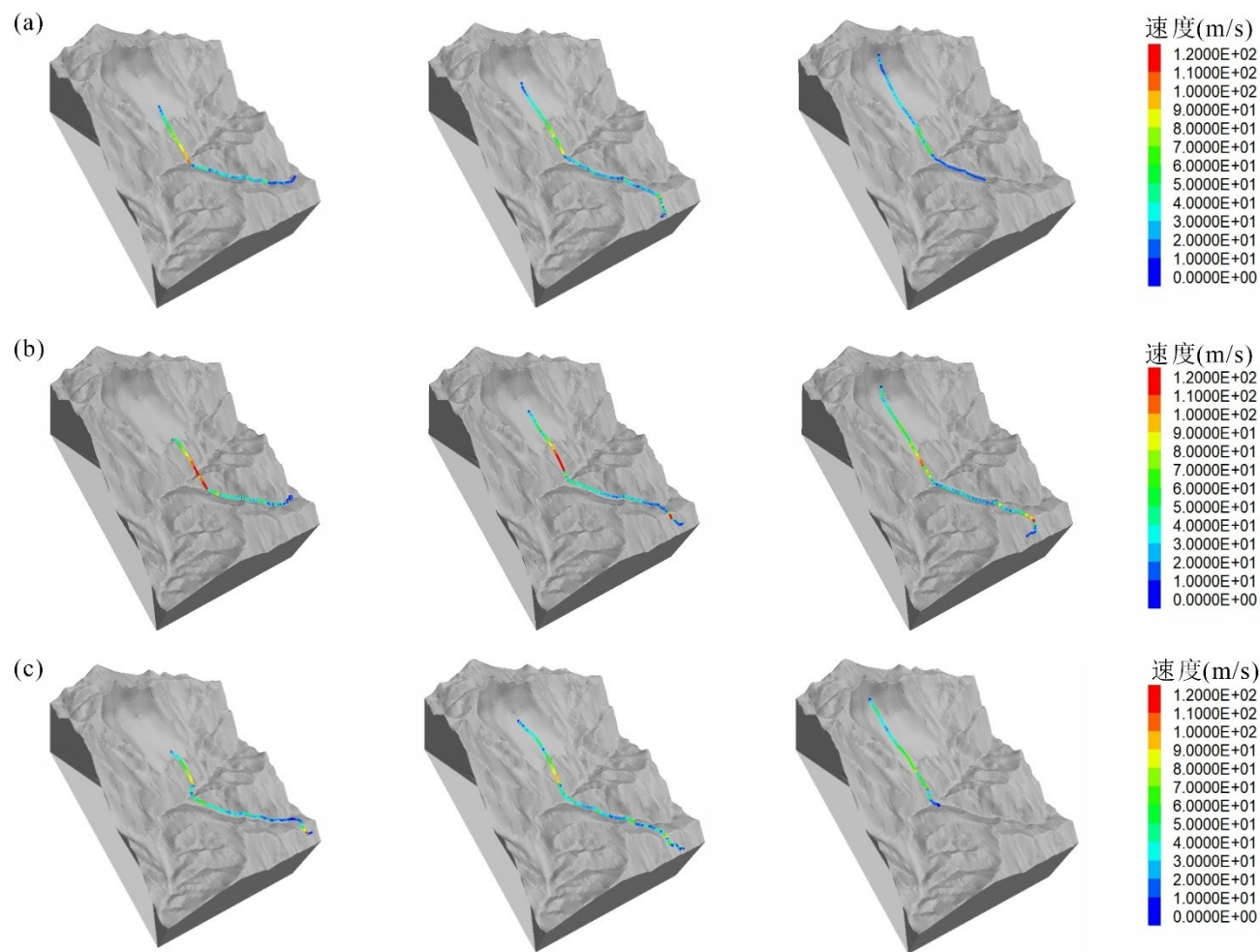


图 10 不同粒径下监测颗粒运动轨迹

Fig.10 Monitoring particle trajectory under different particle sizes

a.细颗粒组(M1)监测颗粒位移轨迹；b.中颗粒组(M2)监测颗粒位移轨迹；c.粗颗粒组(M3)监测颗粒位移轨迹

图 11 给出了不同粒径级配下滑体各段的位移。细颗粒组（M1）中 $t=100\text{ s}$ 时各段曲线斜率逐渐增大，此时泥石流处于加速阶段，各监测颗粒的平均速度增大，随后位移增速趋缓，进入较稳定的运动阶段。多数时间下后段位移增长速率落后于前段及中段，表明泥石流后段受前部牵引作用较弱，运动响应滞后，使后段位移较早达到平稳状态，运动结束时中段位移最大。此粒径级配下，流体具有较强的推进能力与能量传递连续性。中颗粒组（M2）泥石流后段在流体携带作用下位移幅值明显增大，中后段间的位移差值缩小，前段（P1）位移衰减明显，表明泥石流前段的能量沿程耗散加剧。粗颗粒组（M3）中滑体中段颗粒的位移最大，后段位移先达到恒值，表明泥石流后段较早发生颗粒沉积。120 s 前后滑体前段及中段位移发生小幅激增，这是由于

粗颗粒级配下，泥石流运动易出现局部出现堆积、停滞及再启动现象，前段及中段的部分颗粒受到后方颗粒的挤压和冲撞，动能增大并迅速衰减，位移缓慢增大。通过计算各级配中的颗粒位移发现前段颗粒受重力驱动及流体推力叠加作用，平均位移峰值为 $3.5 \times 10^3\text{ m}$ ；中段颗粒受前缘牵引与后段挤压双重影响，平均位移峰值为 $4.5 \times 10^3\text{ m}$ ；后段颗粒运动相对滞后，平均位移峰值为 $3.9 \times 10^3\text{ m}$ 。

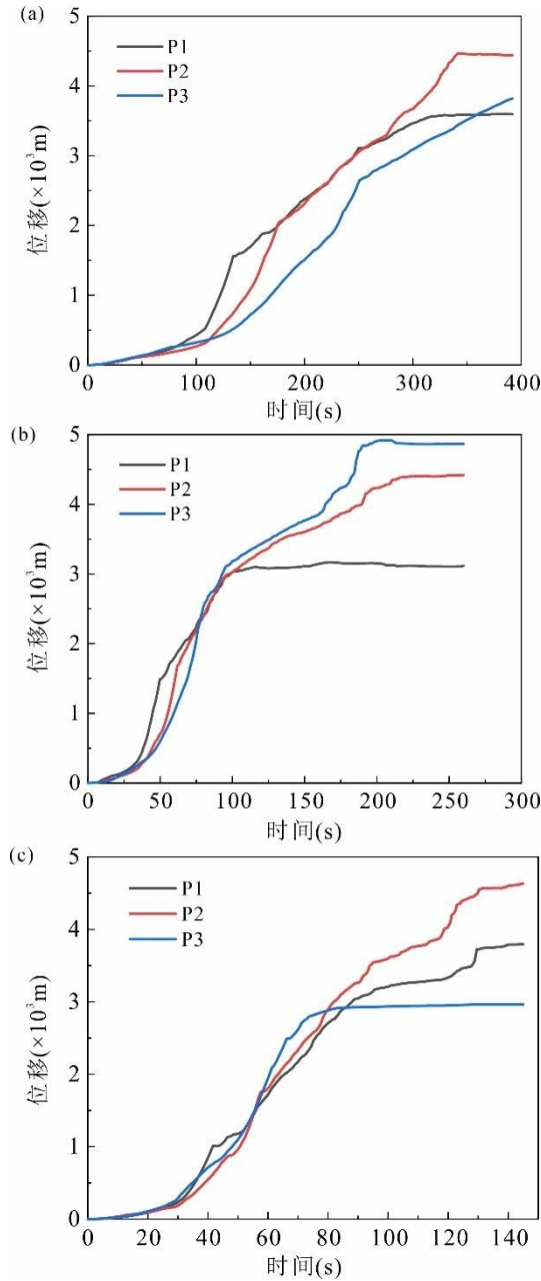


图 11 不同粒径下监测颗粒位移

Fig.11 Monitoring particle displacement under different particle sizes

a.细颗粒组(M1)监测点位移; b.中颗粒组(M2)监测点位移;
c.粗颗粒组(M3)监测点位移

根据不同粒径下各监测点的平均位移得到泥石流平均位移曲线图 12, 体现了不同粒径条件下泥石流的平均位移特征。整体来看, 三种粒径样本的初期速度、位移增长速率及最终位移量上存在明显差异。细颗粒组 (M1) 的初期位移曲线近似呈线性增长。至 110s, 曲线斜率增大, 平均位移持续增加直至运动结束。流体初期速度缓慢、位移增长速率低, 此颗粒级配下, 颗粒能充分填充山体模型, 运动持

续时间更长, 位移增长过程更为平稳。中颗粒组 (M2) 的总位移量最大, 0~30s 内位移缓慢增长, 30s 时曲线斜率突增, 位移迅速增大。至 85s 斜率减小, 位移仍缓慢增大而后逐渐稳定。其初期速度、位移增长速率介于细颗粒组 (M1) 与粗颗粒组 (M3) 组之间。粗颗粒组 (M3) 粒径条件下, 泥石流位移增长速率最快, 位移在 0~100s 内迅速增加并逐渐趋于稳定, 大粒径颗粒具有较高的运动速度和摩擦耗能。可以发现, 中颗粒 (M2) 和粗颗粒组 (M3) 在运动末期平均位移均有短幅增大, 这是因颗粒碰撞而产生的再启动现象。因此, 泥石流位移体现出明显的粒径效应^[28](陶伟等, 2023): 粒径越大, 启动越快、位移增长速率越高, 但运动持续时间较短; 粒径越小, 启动延迟、位移增长缓慢, 运动持续时间较长。

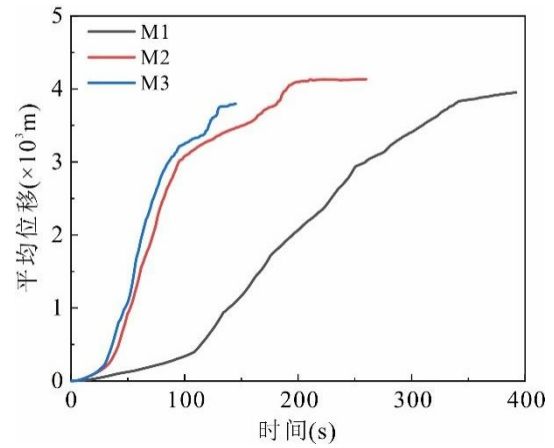


图 12 不同粒径条件的泥石流平均位移

Fig.12 Average displacement of debris flow under different particle size conditions

3.3 颗粒粒径对能量转化的影响

3.3.1 能量计算公式

在离散元法中, 模型是由遵循牛顿第二定律的颗粒堆积而成, 颗粒之间通过弹簧力相互作用, 颗粒间的链接状态跟法向力 F_n 有关, 公式如下:

$$F_n = \begin{cases} K_n X_n & X_n < X_b, \text{ 完整连接 (a)} \\ K_n X_n & X_n < 0, \text{ 断裂连接 (b)} \\ 0 & X_n \geq 0, \text{ 断裂连接 (c)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_n 是法向刚度; X_n 是法向相对位移(图 13a); X_b 为断裂位移。初始时, 颗粒与其相邻颗粒相互连接, 受拉力或压力的弹簧力作用。当两颗粒之间的 X_n 超过断裂位移 (X_b) 时, 弹簧断裂, 颗粒间拉力消失(式 6c), 仅可存在压力作用(式 6b)。

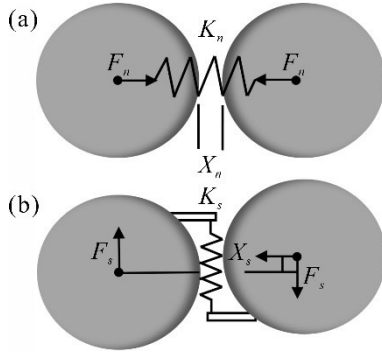


图 13 颗粒间接触力示意图

Fig.13 Schematic diagram of indirect contact force of particles

a.颗粒间的法向弹簧；b.颗粒间的切向弹簧力

颗粒间通过切向弹簧来模拟剪切变形和切向力。剪切弹簧的切向力 F_s 如下：

$$F_s = K_s X_s \quad (7)$$

式中： K_s 为切向刚度； X_s 为切向相对位移。

完整的颗粒连接的最大切向力由摩尔库伦准则定义：

$$F_{Smax} = F_{s0} - \mu_p F_n \quad \text{完整连接} \quad (8)$$

式中： F_{s0} 为颗粒内部的抗剪力； μ_p 为摩擦系数； F_n 为法向力。

当颗粒所受切向外力增大并超过 F_{Smax} 时，颗粒间连接破裂断裂， F_s 应该小于等于断裂状态下的最大切向力 F'_{Smax} ：

$$F'_{Smax} = -\mu_p F_n \quad \text{断裂连接} \quad (9)$$

当两颗粒间力大于最大内摩擦力 F'_{Smax} 时，颗粒开始相对滑动，滑动摩擦力等于 F'_{Smax} ，因此产生能量损失。滑动过程中的摩擦耗能 E_μ 可表示为平均滑动摩擦力与滑动距离 dS 的乘积：

$$E_\mu = \frac{1}{2} ((F_s^L)_o + F_s^L) \cdot dS \quad (10)$$

式中： E_μ 为摩擦耗能； $(F_s^L)_o$ 和 F_s^L 分别是在当前时步开始和结束时的滑动摩擦力，即连接断裂时的最大切向力； dS 是滑动距离。在一个时间步内，颗粒间法向力可能发生变化，摩擦力也相应变化，因此在式(10)中使用平均摩擦力。滑动距离(dS)为颗粒沿摩擦表面的滑动距离。

3.3.2 能量-时间曲线分析

为清晰地揭示不同粒径级配条件下泥石流运动过程中的能量转化机制，绘制了不同级配下泥石流的能量-时间演化曲线如图 14 所示。

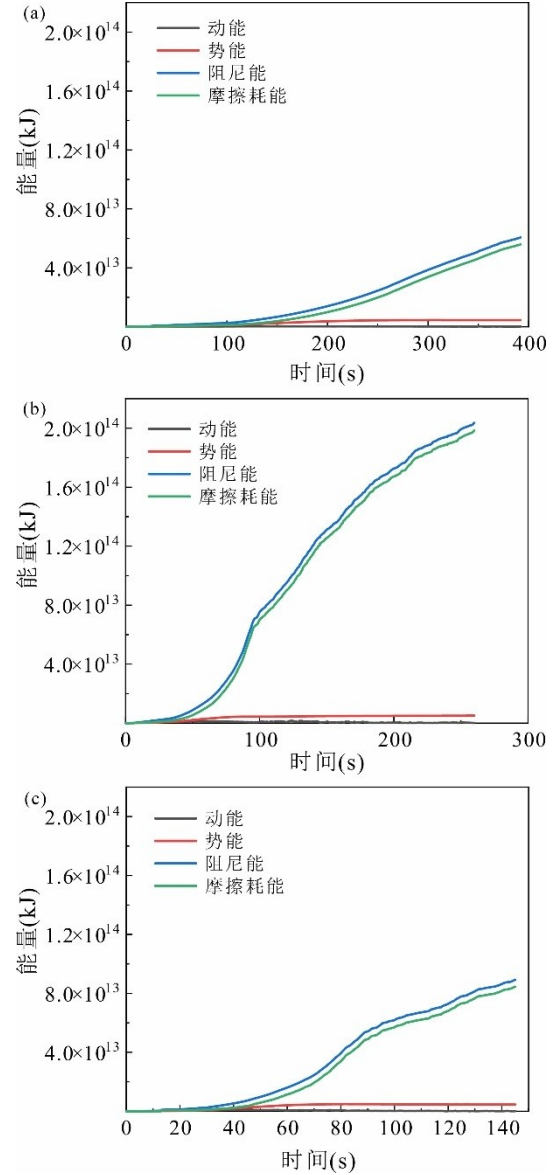


图 14 不同粒径滑坡体能量-时间变化曲线

Fig.14 Energy time curve of landslide mass with different particle sizes

a.细颗粒组(M1)能量曲线；b.中颗粒组(M2)能量曲线；

c.粗颗粒组(M3)能量曲线

对滑坡体整体动能的监测即为所有单个颗粒动能的总和，势能同理。随着泥石流的启动和加速，动能开始增大，颗粒间碰撞、摩擦及流体阻尼作用增强，体系能量逐步向耗散能转化，达到峰值后动能逐渐衰减，各粒径组的动能大小远低于阻尼能及摩擦耗能。势能变化则较为平稳，随着运动进行缓慢变化。运动过程中的相同时刻，大粒径颗粒的势能明显大于小粒径颗粒，这是由于大颗粒间接触键的稳定性差于小颗粒间的接触键，且颗粒体积大时生成的颗粒数少，链接键的数量下降，这使得大粒径

颗粒组在相同时间内势能变化速度较快。摩擦耗能与阻尼能的变化均表现为单调递增特性。颗粒与颗粒间的相互摩擦及运动过程中颗粒与滑动带的摩擦,使模型中的摩擦能不断增大。阻尼的设置使模型中的阻尼能同样增大。中颗粒组(M2)和粗颗粒组(M3)中,摩擦耗能和阻尼能分别在 50-100 s、40-90 s 时间段内快速增大,曲线斜率迅速变大,对应速度图 9 可知,体系正处于加速—堆积阶段,速度波动大。颗粒组(M2)体系的摩擦耗能与阻尼能最大,分别达到 1.98×10^{14} 、 2.04×10^{14} KJ,表明颗粒间相互碰撞及剪切作用增强,粗颗粒对床面阻力及摩擦损耗的贡献更为显著,导致整体能量耗散加剧。

表 3 给出不同级配下各组的能量峰值,需要指出:中颗粒组(M2)中粗颗粒形成骨架结构,又有细颗粒填充孔隙,使体系致密性和接触效率达到较优状态。这种结构增强了颗粒间的碰撞频率与剪切作用,另一方面又维持了整体运动的连续性,使能量在体系内部更充分地被消耗。因此,该级配计算过程中的颗粒能充分填充至计算模型中的沟道两侧,与模型的适配性强,运动位移增大,其摩擦耗能与阻尼能其他两组存在区别。

表 3 不同粒径组运动过程中各能量峰值

Table 3 Peak energy values during the movement of different particle size groups

样本	动能 10^{11} /KJ	势能 10^{12} /KJ	阻尼能 10^{13} /KJ	摩擦能 10^{13} /KJ
M1	4.59	4.58	6.06	5.59
M2	1.60	5.09	20.4	19.8
M3	1.17	4.84	8.93	8.46

经上述分析,颗粒粒径对泥石流能量演化过程的调控效应基本符合以下规律^[28](陶伟等,2023):颗粒间的碰撞剪切作用强度随粒径变化呈正比,大粒径颗粒能量耗散更强,摩擦耗与阻尼作用更大。势能峰值则随粒径增大而增大,动能相反。

4 结论

本文基于 CFD-DEM 耦合方法构建了以辽东半岛中部老牛圈沟泥石流为研究对象,分析了泥石流的运动特征,并从速度、位移及能量演化等方面系统分析了颗粒粒径和级配对泥石流运动行为的作用效应。主要结论如下:

(1) 模拟结果表明,泥石流整体运动依次经历“启动—加速—减速—堆积”四个阶段。其中,加速阶段速度增长迅速,减速阶段受流固耦合作用影响

速度出现峰值波动,堆积阶段速度逐渐衰减直至趋于稳定。均匀细颗粒体系流体化程度高,平均最高速度为 55 m/s;大颗粒体系流动不连续且波动显著,平均最高速度为 75 m/s;中颗粒体系兼具流动性与稳定性,在能量传递、速度分布及动力响应方面表现出最优特征,平均最高速度为 86 m/s。滑体各段速度和位移均表现出明显的空间差异,反映出内部颗粒碰撞、剪切、阻滞及再启动等复杂相互作用。

(2) 滑体前、中、后段具有显著的非同步运动特征。前段颗粒受重力驱动及流体推力叠加作用,平均位移峰值为 3.5×10^3 m;中段颗粒受前缘牵引与后段挤压双重影响,平均位移峰值为 4.5×10^3 m;后段颗粒运动相对滞后,平均位移峰值为 3.9×10^3 m。这种沿程差异性揭示了泥石流运动内部的非均匀性。

(3) 泥石流的运动特性体现出明显的粒径效应:整体速度和位移变化随粒径变化均出现不同差异,滑体平均速度峰值与颗粒粒径增大呈正比,最终位移量随颗粒粒径增大表现为先增大后减小。粗颗粒增多使运动轨迹呈现出更大的离散性和随机性。粒径越大,启动越快、位移增长速率越高,但运动持续时间较短;粒径越小,启动延迟、位移增长缓慢。

(4) 颗粒大小和级配对泥石流能量演化影响显著。摩擦耗能和阻尼能是泥石流能量耗散的主要途径,二者均随粒径增大显著提升;势能峰值随粒径增大而提高,动能则随粒径增大呈下降趋势,大粒径体系更易将能量以非弹性形式耗散。

References

- [1] Shi,Z.M.,Wu,B.,Zheng,H.C.,et al.,2022.State of the Art on Prevention and Control Measures and Impact Model for Debris Flow. *Earth Science*,47(12):4339-4349 (in Chinese with English abstract).
- [2] Li,Y.W.,Xu,L.R.,Shang,Y.H.,et al.,2024.Hazard Assessment of Debris Flow Considering Disaster Resistance of Check Dams. *Earth Science*,49(8):2839-2850 (in Chinese with English abstract).
- [3] Chen,W.H.,Yu,B.,Ye,P.,et al.,2025.Source Material Conditions for Gully-Type Debris Flows Induced by Shallow Landslides. *Earth Science*,50(6):2356-2371 (in Chinese with English abstract).
- [4] Shu,A.P.,Wang,L.,Yang,K.,et al.,2010.Discussion on Motion Characteristics of Solid and Liquid Phases in Heterogeneous

- Debris Flow. *Chinese Science Bulletin*,55(31):3006-3012 (in Chinese with English abstract).
- [5]Zhang,H.,Gao,Y.,Li,B.,et al.,2022.Numerical Simulation Analysis of Solid-Liquid Coupling Process in Composite Landslide:A Case Study of Wushanping Landslide. *Journal of Geomechanics*,28(6):1104-1114 (in Chinese with English abstract).
- [6]Li,K.,Cheng,Q.G.,Lin,Q.W.,et al.,2022.Research Progress on Granular Flow of Long Run-out Landslides. *Earth Science*,47(3):893-912 (in Chinese with English abstract).
- [7]Su, X., Xia, X. L., Liang, Q. H., et al., 2022. A coupled discrete element and depth-averaged model for dynamic simulation of flow-like landslides. *Computers and Geotechnics*, 141:104537. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104537>
- [8]Lei, M., Yang, P., Wang, Y. K., et al., 2020. Numerical Analyses of the Influence of Baffles on the Dynamics of Debris Flow in a Gully. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19):1052. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06016-z>
- [9]Tian,Z.N.,Li,S.H.,Liu,X.Y.,et al.,2008.Study on Deformable Method of Three-Dimensional Block Discrete Element. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,(S1):2832-2840 (in Chinese with English abstract).
- [10]Zhou,J.,Du,Q.,Yu,S.C.,2015.Numerical Simulation of Debris Flow Initiation Experiment. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*,42(9):96-103 (in Chinese with English abstract).
- [11]Zhang,J.Y.,Zou,Y.X.,Yang,D.S.,2021.Analysis of Movement Process of Yuqiupo Landslide Based on PFC3D. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,32(4):33-39 (in Chinese with English abstract).
- [12]Shi,Z.J.,Chen,W.,Sheng,Y.F.,et al.,2025.Study on Deformation and Movement Characteristics of a Debris Flow Landslide:A Case Study of the Shaziba Landslide in Enshi City. *Hydrogeology & Engineering Geology*,52(1):149-158 (in Chinese with English abstract).
- [13]Zhang,L.,Tang,H.M.,Xiong,C.R.,et al.,2012.PFC3D Simulation of Movement Process of Jiweishan Rapid and Long Run-out Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,31(S1):2601-2611 (in Chinese with English abstract).
- [14]Jia,K.C.,Zhuang,J.Q.,Zhan,J.W.,et al.,2023.Reconstruction of the Dynamic Process of the Gelongbu Landslide-Dammed Lake-Flood Disaster Chain Based on Numerical Simulation. *Earth Science*,48(9):3402-3419 (in Chinese with English abstract).
- [15]Von Boetticher, A., Turowski, J. M., McArdell, B. W., et al., 2016. DebrisInterMixing-2.3:a Finite Volume Solver for Three-Dimensional Debris-Flow Simulations with Two Calibration Parameters-Part1:Model Description. *Geoscientific Model Development*, 9(9):2909-2923. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2909-2016>
- [16]Cai,G.Q.,Diao,X.F.,Yang,R.,et al.,2024.Research Progress on Numerical Modeling Methods for Fluid-Solid Coupling Based on CFD-DEM. *Journal of Harbin Institute of Technology*,56(1):17-32 (in Chinese with English abstract).
- [17]Zhao, T., Utili, S., Crosta, G.B., 2016. Rockslide and Impulse Wave Modelling in the Vajont Reservoir by DEM-CFD Analyses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6): 2437–2456. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0731-0>
- [18]Yang,L.,Wang,J.A.,Li,W.J.,2022.Numerical Simulation of Tailings Dam Break Based on CFD-DEM Coupling. *Metal Mine*,(8):219-227 (in Chinese with English abstract).
- [19]Fang,J.,Wang,L.Z.,Hong,Y.,et al.,2022.Study on Impact Prevention of Debris Flow on Mountain Wind Farms. *Acta Energaie Solaris Sinica*,43(2):357-364 (in Chinese with English abstract).
- [20]Yang,C.,Tie,Y.B.,Zhang,X.Z.,et al.,2023.Research History and Development Trend of Debris Flow Numerical Simulation in China. *Journal of Soil and Water Conservation*,37(5):1-11 (in Chinese with English abstract).
- [21]Ge,Y.F.,Zhou,T.,Huo,S.L.,et al.,2019.Energy Transfer Mechanism in the Movement and Accumulation Process of Long Run-out Landslides. *Earth Science*,44(11):3939-3949 (in Chinese with English abstract).
- [22]Wang,J.J.,Chen,H.J.,Xiao,L.L.,et al.,2024.Movement Accumulation Characteristics and Energy Dissipation Law of Landslide-Debris Flow. *Journal of Harbin Institute of Technology*,56(11):63-71 (in Chinese with English abstract).
- [23]Liu,C.,Zhang,X.Y.,Xu,Q.,et al.,2017.Simulation Study on Landslide Energy Conservation Based on Three-Dimensional Discrete Element Model. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*,13(S2):698-704 (in Chinese with English abstract).
- [24]Hu,X.B.,Fan,X.Y.,Tang,J.J.,2019.Study on Movement Accumulation Characteristics and Energy Transformation of Long Run-out Landslide Based on Discrete Element

Method: A Case Study of Sanxi Village Landslide. *Journal of Geomechanics*, 25(4):527-535 (in Chinese with English abstract).

- [25] Li, T.H., Fan, X.Y., Jiang, Y.J., 2018. Influence of Geotechnical Particle Size Distribution on Impact Effect of Landslide Debris Flow. *Mountain Research*, 36(2):289-297 (in Chinese with English abstract).
- [26] Wang, J., Song, L.J., Liu, Y., et al., 2023. Model Test on Movement of Landslide Debris Flow and Accumulation Characteristics of River-Blocking Dam. *Yangtze River*, 54(2):191-199 (in Chinese with English abstract).
- [27] Yuan, J.T., Han, P.F., Tian, S.J., et al., 2022. Influence of Particle Size Distribution and Topographical Deflection on Impact and Accumulation Process of Landslide Debris Flow. *Journal of Railway Science and Engineering*, 19(5):1319-1330 (in Chinese with English abstract).
- [28] Tao, W., Hu, X. B., Jiang, Y. J., et al., 2023. Influence of Particle Size on Dynamic Characteristics and Energy Transformation of Landslide Debris Flow: A Case Study of Sanxi Village Landslide in Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 42(9):1610-1619 (in Chinese with English abstract).
- [29] Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T., 1992. Lagrangian Numerical Simulation of Plug Flow of Cohesionless Particles in a Horizontal Pipe. *Powder Technology*, 71, 239-250. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)80010-M](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)80010-M)
- [30] Zhu, H. P., Zhou, Z. Y., Yang, R. Y., et al, 2008. Discrete Particle Simulation of Particulate Systems: A Review of Major Applications and Findings. *Chemical Engineering Science*, 63(13), 5728-5770. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.08.006>
- [31] Anderson, T. B., Jackson, R., 1967. A Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds: Equations of Motion. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 6(4), 527-538. <https://doi.org/10.1021/i160024a007>
- [32] Nie, Y.P., Lan, L., Wang, X.K., 2024. Numerical Experiment on Sediment Deposition Characteristics at Mountain Torrent Gully Outlets in High-Mountain Canyon Areas. *Advanced Engineering Sciences*, 56(1):237-244 (in Chinese with English abstract).
- [33] Shi, C., Wang, S.N., Liu, L., 2013. Discrete Element Numerical Simulation of Rockfall from Steep Cliffs Under Seismic Action. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(S1):2798-2805 (in Chinese with English

abstract).

- [34] Sun, Q.C., Wang, G.Q., 2008. Review on Granular Flow Dynamics and Its Discrete Models. *Advances in Mechanics*, 38(1):87-100 (in Chinese with English abstract).
- [35] Wang, Z.F., He, S.M., Li, X.Z., 2014. Particle discrete element numerical analysis of dangerous rock collapse in zhangmuhou mountain, Tibet. *Rock and Soil Mechanics*, 35(S1):399-406 (in Chinese with English abstract).
- [36] Hu, M.J., Wang, R., Chen, Z.X., et al., 2010. PFC Numerical Simulation of Debris Flow Initiation Process. *Rock and Soil Mechanics*, 31(S1):394-397+434 (in Chinese with English abstract).
- [37] Li, Y., Yang, X., Hu, X., et al, 2024. Mechanisms of Rainfall-Induced Landslides and Interception Dynamic Response: A Case Study of the Ni Changgou Landslide in Shimian, China. *Scientific Reports*, 14, 1567. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51419-7>
- [38] Nie, J. Y., Cui, Y., Wu, Z., et al., 2024. DEM Study on Role of Fines in Mobility of Dry Granular Flows Considering Particle Size-Shape Correlation. *Computers and Geotechnics*, 166, 105980. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105980>

中文参考文献

- [1] 石振明, 吴彬, 郑鸿超, 等, 2022. 泥石流防治措施与冲击力研究进展. *地球科学*, 47(12):4339-4349.
- [2] 李永威, 徐林荣, 商拥辉, 等, 2024. 考虑拦挡坝抗灾能力的泥石流危险性评价. *地球科学*, 49(8):2839-2850.
- [3] 陈文鸿, 余斌, 叶鹏, 等, 2025. 浅层滑坡诱发沟谷型泥石流的物源条件. *地球科学*, 50(6):2356-2371.
- [4] 舒安平, 王乐, 杨凯, 等, 2010. 非均质泥石流固液两相运动特征探讨. *科学通报*, 55(31):3006-3012.
- [5] 张晗, 高杨, 李滨, 等, 2022. 复合型滑坡固液耦合过程数值模拟分析——以无山坪滑坡为例. *地质力学学报*, 28(6):1104-1114.
- [6] 李坤, 程谦恭, 林棋文, 等, 2022. 高速远程滑坡颗粒流研究进展. *地球科学*, 47(3):893-912.
- [9] 田振农, 李世海, 刘晓宇, 等, 2008. 三维块体离散元可变形计算方法研究. *岩石力学与工程学报*, (S1):2832-2840.
- [10] 周健, 杜强, 于仕才, 2015. 泥石流启动试验的数值模拟研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 42(9):96-103.
- [11] 张家勇, 邹银先, 杨大山, 2021. 基于 PFC3D 的鱼鳅坡滑

- 坡运动过程分析.中国地质灾害与防治学报, 32(4):33-39.
- [12]石子健, 陈稳, 盛逸凡, 等, 2025.碎屑流滑坡变形及运动特征研究——以恩施市沙子坝滑坡为例.水文地质工程地质, 52(1):149-158.
- [13]张龙, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012.鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC3D 模拟.岩石力学与工程学报, 31(S1):2601-2611.
- [14]贾珂程, 庄建琦, 占洁伟, 等, 2023.基于数值模拟的戈龙布滑坡-堵江-溃决洪水地质灾害链动力学过程重建.地球科学, 48(9):3402-3419.
- [16]蔡国庆, 刁显锋, 杨芮, 等, 2024.基于 CFD-DEM 的流-固耦合数值建模方法研究进展.哈尔滨工业大学学报, 56(1):17-32.
- [18]杨柳, 王金安, 黎伟佳, 2022.基于 CFD-DEM 耦合的尾矿库溃坝数值模拟.金属矿山, (8):219-227.
- [19]方君, 王立忠, 洪义, 等, 2022.泥石流对山区风电场冲击防治研究.太阳能学报, 43(2):357-364.
- [20]杨昶, 铁永波, 张宪政, 等, 2023.我国泥石流数值模拟研究历程及发展趋势.水土保持学报, 37(5):1-11.
- [21]葛云峰, 周婷, 霍少磊, 等, 2019.高速远程滑坡运动堆积过程中的能量传递机制.地球科学, 44(11):3939-3949.
- [22]王佳佳, 陈浩军, 肖莉丽, 等, 2024.滑坡-碎屑流运动堆积特征与能量耗散规律.哈尔滨工业大学学报, 56(11):63-71.
- [23]刘春, 张晓宇, 许强, 等, 2017.三维离散元模型的滑坡能量守恒模拟研究.地下空间与工程学报, 13(S2):698-704.
- [24]胡晓波, 樊晓一, 唐俊杰, 2019.基于离散元的高速远程滑坡运动堆积特征及能量转化研究——以三溪村滑坡为例.地质力学学报, 25(4):527-535.
- [25]李天话, 樊晓一, 姜元俊, 2018.岩土体颗粒级配对滑坡碎屑流冲击作用的影响研究.山地学报, 36(2):289-297.
- [26]王涓, 宋丽婧, 刘轶, 等, 2023.滑坡碎屑流运动及堵江堰塞体堆积特性模型试验.人民长江, 54(2):191-199.
- [27]袁锦涛, 韩培锋, 田述军, 等, 2022.滑坡碎屑流颗粒级配及地形偏转对其冲击和堆积过程的影响研究.铁道科学与工程学报, 19(5):1319-1330.
- [28]陶伟, 胡晓波, 姜元俊, 等, 2023.颗粒粒径对滑坡碎屑流动力特征及能量转化的影响——以四川省三溪村滑坡为例.地质通报, 42(9):1610-1619.
- [32]聂一品, 兰玲, 王协康, 2024.高山峡谷区山洪沟口泥沙堆积特征数值试验.工程科学与技术, 56(1):237-244.
- [33]石崇, 王盛年, 刘琳, 2013.地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究.岩石力学与工程学报, 32(S1):2798-2805.
- [34]孙其诚, 王光谦, 2008.颗粒流动力学及其离散模型评述.力学进展, 38(1):87-100.
- [35]王忠福, 何思明, 李秀珍, 2014.西藏樟木后山危岩崩塌颗粒离散元数值分析.岩土力学, 35(S1):399-406.
- [36]胡明鉴, 汪稔, 陈中学, 等, 2010.泥石流启动过程 PFC 数值模拟.岩土力学, 31(S1):394-397+434.