

考虑颗粒状态转化的高位远程滑坡数值模拟方法

高 杨^{1,2}, 殷跃平³, 李 滨^{1,2}, 张 晗⁴, 吴伟乐⁴

(1. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 高位远程滑坡运动过程复杂, 滑体状态多变, 动力学机制和反演预测技术一直是防灾减灾研究中的重点和难点问题。通过调查分析、理论研究和数值技术研发, 揭示高位远程滑坡运动过程中基于密集程度的多态转化动力过程, 综合 SPH 和 DEM 算法提出基于动力学本构转化的滑坡后破坏(LPF^{3D})数值模拟方法。研究结果显示: (1) 通过实际滑坡视频分析和颗粒滑槽试验记录, 认为滑坡运动中具有一定空间效应, 滑体颗粒呈现了浓密态、稀疏态、超稀疏态, 颗粒状态是时刻变化和相互转化的; (2) 采用体积分数作为离散颗粒数量和颗粒状态转化的判别标准, 提出不同动力学本构求解滑坡运动中不同状态的数值计算方法和临界体积分数值; (3) 基于多态转化理论的宏观连续介质算法反演了重庆武隆鸡尾山滑坡碎屑流实际案例, 模拟结果同实际堆积结果基本一致; (4) LPF^{3D} 数值模拟方法在计算滑坡后破坏的运动过程, 实现了颗粒状态转化和满足实际颗粒数量的高效计算, 并提高了计算收敛稳定性, 计算优势明显。综上研究, 认为在高位远程滑坡风险调查与动力过程研究分析中, 应当充分考虑滑体颗粒状态变化和实际颗粒数量的影响, 滑坡后破坏 LPF^{3D} 数值模拟方法为高位远程滑坡的风险评估预测提供了高效和量化的可选方法。

关键词: 边坡工程; 高位远程滑坡; 颗粒状态; LPF^{3D} 数值模拟

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2023)07 - 1623 - 15

Numerical simulation method of high-position and long runout landslides under granular state transformation

GAO Yang^{1, 2}, YIN Yueping³, LI Bin^{1, 2}, ZHANG Han⁴, WU Weile⁴

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 4. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: The movement process of high-position and long-runout landslides is complex and the sliding main body is changeable. The dynamics theory of post-failure and inversion prediction technology have always been the focus and difficult problems in the field of disaster prevention and reduction. In this paper, the dynamic process of polymorphic transformation based on the degree of density in the movement of high-position and long-runout landslide is revealed by survey analysis, theoretical research and numerical technology development. Based on SPH and DEM algorithm and dynamical constitutive model transformation, a new numerical simulation method for landslide post-failure motion(LPF^{3D}) is presented. The results show that: (1) Through the analysis of actual landslide

收稿日期: 2022 - 10 - 31; **修回日期:** 2023 - 01 - 28

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(42177172); 国家自然科学基金青年基金项目(41907257)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 42177172) and National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(Grant No. 41907257)

作者简介: 高 杨(1989 -), 男, 博士, 2011年毕业于长安大学地质工程专业, 现任副研究员, 主要从事高位远程滑坡动力成灾机制与风险评估方面的研究工作。E-mail: 737263992@qq.com。通讯作者: 殷跃平(1960 -), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: yinyueping0712@qq.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2022.1174

video and grains chute experiment recording, it is found steric effect which the grains motion in the process of landslide movement mainly present the dense state, dilute state and ultra-dilute state, and the grains state changes and transforms with each other at all times. (2) The volume fraction is used as the criterion of discrete grains number and grains state transformation, and the numerical calculation method and critical volume fraction is proposed to solve different states in landslide movement based on different dynamical constitutive models. (3) The macroscopic continuum algorithm based on the theory of polymorphic transformation is used in the inversion of the debris flow of Jiweishan landslide in Wulong, Chongqing, and the simulation results are basically consistent with the actual landslide accumulation. (4) The LPF^{3D} simulation method achieved the transformation of grains state and the efficient calculation of the actual number of grains in the calculation of landslide failure movement, and improves the convergence stability of the calculation, which has great computational advantages. Based on the above research, it is believed that in the risk investigation and dynamic process analysis of high-position and long-runout landslide flow, the influence of the state changes of sliding body grains and the actual number of grains should be fully considered. The LPF^{3D} simulation method provides an efficient, quantitative and optional method for the risk assessment and prediction of high-position and long-runout landslide.

Key words: slope engineering; high-position and long-runout landslide; grains state; LPF^{3D} numerical simulation

1 引言

近些年随着全球气候变化影响, 极端天气事件增多, 进而导致地质灾害频发。其中, 高位远程滑坡碎屑流是对人类生命和财产安全造成最为严重威胁的地质灾害之一, 具有成灾范围广、冲击能量大的成灾特征, 亟待引起高度关注^[1-4]。高位远程滑坡碎屑流往往具有高位启动和远距离运动的成灾特征, 流态化运动现象明显^[5]。高位远程滑坡成灾动力学成为防灾减灾领域研究的重要方向之一, 许多研究人员对高位、高速、远程滑坡破坏后动力学机制开展了大量研究, 从地质模型、动力学模型和计算力学模型方面取得了丰硕的研究成果^[6-15]。

高位远程滑坡破坏失稳后, 滑体材料经历了滑源区脱离、势动能转化和碎屑堆积的 3 个主要动力阶段, 其中势动能转化阶段往往具有滑体解体、岩块破碎和冲击铲刮等复杂的动力学作用, 最终形成远距离岩屑堆积体。在这个过程中, 滑体以极高的速度运动, 表现出剪切、碰撞、摩擦、断折和碎胀的作用现象^[16-18]。这些现象在滑坡实际发生过程中很难被捕捉到, 但是在少量的滑坡视频记录和物理模型试验中证明是确实存在的^[19-22]。因此, 数值模拟技术成为了开展高位远程滑坡碎屑流运动状态和过程分析的高效研究方法。在高位远程滑坡动力学的大量数值模拟研究中, 根据滑体材料特征的动力学模拟, 主要分为三大计算理论: (1) 滑块模型 (Sliding-block theory): 通常采用了有限元(FEM)、离散元(DEM-HMB/LC)和非连续变形分析方法(DDA),

FEM 主要使用在坡体失稳破坏阶段, 离散元法黏结模型和非连续变形分析方法可以模拟固体块体运动和解体破碎过程^[23-28]。(2) 颗粒流模型 (granular flows theory): P. A. Cundall 等^[29-31]提出颗粒流方法可以真实有效的还原滑坡运动过程。计算中主要采用离散颗粒, 根据牛顿力学定律和颗粒间接触模型对滑体摩擦和碰撞的接触行为进行计算(GDEM, EDEM, MatDEM 等)。但是往往颗粒数量远远达不到实际滑坡中的颗粒数量, 否则会大大降低计算效率。(3) 等效流体模型 (equivalent fluid theory): D. Varnes^[32]最早对远程流态化滑坡类型进行了定名。O. Hungr 等^[33]在 D. Varnes^[32]基础上进行了更新, 在流态化滑坡分类定名的框架下, 将滑坡运动等效为流体运动, 可以高效地反演远程滑坡运动过程。主要采用基于欧拉和拉格朗日的连续介质算法(SPH, LS-RAPID 和 MPM), 分为粒子算法和网格算法, 多数采用深度积分法, 重点考虑基底阻力模型选取^[34-37]。3 种计算理论各有计算优势, 但是单一材料的计算, 有可能忽略了滑坡运动中的某些实际物理力学现象。

滑坡运动过程极为复杂, 滑体碎屑颗粒不计其数的, 运动状态复杂多变。在大量基础物理学和流体力学研究中, 关于颗粒流研究中的运动状态类型有 3 种: (1) 一种为浓密准静的类固体状态(Dense quasi-static regime), 其中变形非常缓慢, 粒子通过摩擦接触相互作用; (2) 一种为运动迅速的类气体状态(gaseous regime), 粒子通过碰撞相互作用; (3) 一种为中间类液体过渡状态(intermediate liquid regime), 其中颗粒致密, 但仍然像液体一样流动,

粒子通过碰撞和摩擦相互作用^[38-41]。不同状态颗粒之间的作用方式不同，动力学计算本构有所不同。滑坡运动过程中存在多种状态，单一相态理论能否真实高效的还原滑坡复杂运动过程？为还原实际滑坡运动物理力学过程，提高计算精度和效率，状态转化和转化判别依据需要引起广大研究人员的重点关注。

本文基于野外调查、文献查阅和数值模拟研发，通过调查研究和数值算法开发，重点考虑解决实际滑坡运动过程中滑体运动仿真中的3个问题：(1) 颗粒状态的分类及划分依据；(2) 采用不同算法耦合和不同本构模型转化来匹配滑坡运动过程实际物理力学过程；(3) 克服颗粒状态转化和颗粒数量庞大计算效率低的问题，提出了新的动力学模型。基于宏观连续介质计算方法提出了实现滑坡运动过程中多态转化的LPP^{3D}(landslide post failure in three dimensions)计算模型，并对鸡尾山滑坡碎屑流的典型案例进行模拟分计算和分析讨论。

2 高位远程滑坡碎屑流多态转化特征

我国历史上发生过多次灾难性高位远程滑坡碎屑流灾害，滑坡下滑解体后多以无黏干碎屑颗粒运

动为主，具有巨大的冲击力，容易对周围房屋和建筑物造成毁灭性的损坏。例如：2009年6月5日，重庆武隆鸡尾山滑坡，500万方滑体高位剪出，高速撞击周围山体，滑体不断碰撞解体，形成滑坡-碎屑流，最终导致74人遇难^[42-44](见图1(a))。2010年6月28日，贵州关岭大寨滑坡，175万方滑体高位剪出，不断解体粉碎化后形成碎屑流运动，滑程约1.5km，2个村庄被毁，99人遇难^[44-45](见图1(b))。2017年6月24日，四川茂县发生特大滑坡灾害，滑体高位启动失稳后，碎裂解体后转化为碎屑流，冲击斜坡下部老滑坡堆积体形成扩散型碎屑堆积，堆积体体积达1637万方，摧毁了新磨村村庄，导致83人死亡^[2](见图1(c))。2017年8月28日，贵州纳雍张家湾滑坡，50万方滑体撞击解体后，形成滑坡-碎屑流灾害链，导致35人遇难^[46-47](见图1(d))。滑坡碎屑流动力学研究更应该注重实际运动过程中力学作用现象，还原滑坡的实际物理力学过程。因为大多数滑坡运动过程视频资料的缺乏，只能从这些滑坡野外调查中发现的一些滑坡物理痕迹进行定性推测，例如：滑坡擦痕、剪切层、岩块破碎堆积状态和颗粒反粒序堆积规律等，定性的判断滑坡动力过程是复杂多变，且作用方式以摩擦和碰撞为主。



(a) 重庆武隆鸡尾山滑坡(20090605)



(b) 贵州关岭大寨滑坡(20100628)



(c) 四川茂县滑坡(20170624)



(d) 贵州纳雍张家湾滑坡(20170828)

图1 高位远程滑坡碎屑流典型案例列举

Fig.1 Typical examples of high-position and long run out landslide flow

目前大多数的研究中多采用一些无量纲数颗粒流体密度比、Stokes number 和 Savage number 综合颗粒流的黏度、速度、粒径、惯性数等参数，作为颗粒运动中的动力作用方式的判别条件。随着视频和试验技术的发展，通过对一些珍贵的滑坡视频反复观察、滑槽物理模型和滑槽数值试验分析(见图 2)，碎屑颗粒流运动过程中颗粒状态和动力作用方式具有一定的空间效应(steric effect)，随着运动位置和运动是时刻发生变化的，其中颗粒体积分数成为了影响颗粒状态的重要指标^[19]。从空间分布角度分析，碎屑颗粒体底部和堆积体中部为浓密颗粒流，表层和周缘为稀疏颗粒体，个别弹飞的滚石颗粒为超稀疏颗粒体(见图 2(b))；从时间进程角度分析，高位滑坡失稳后脱离滑源区初始阶段滑体状态为浓密颗粒，滑体岩体解体粉碎加速运动阶段以稀疏颗粒态和超稀疏颗粒态为主，碎屑体运动停止前后又恢复以浓密态为主。不同状态下的力学作用方式不同，碎屑颗粒动力作用方式多以剪切、碰撞和摩擦为主。

当颗粒处于浓密态时，作用方式多以剪切作用为主；当颗粒处于稀疏态时，多以碰撞和摩擦的动力作用为主；当颗粒处于超稀疏态时，颗粒体多处于惯性态，多以碰撞动力作用为主。因此，根据碎屑颗粒体空间的体积分数，将滑体运动状态分为浓密态、稀疏态和超稀疏态，并认为分别服从准静态黏塑性本构、颗粒动理学本构和离散质点动力学本构。

3 数值算法概述

该研究基于颗粒状态转化地质模型和 SPH 方法提出了 LPF^{3D}(landslides post failure)数值计算模型，该方法克服了传统离散单元法求解遇到的计算量大、无法获取系统宏观特性的问题以及传统欧拉网格法求解遇到的无法追踪滑坡运动轨迹和无法实现全三维计算的问题，实现了滑坡颗粒浓密 - 稀疏 - 超稀疏的全部运动状态过程模拟，最大计算量上限可达到 60 万个计算粒子。

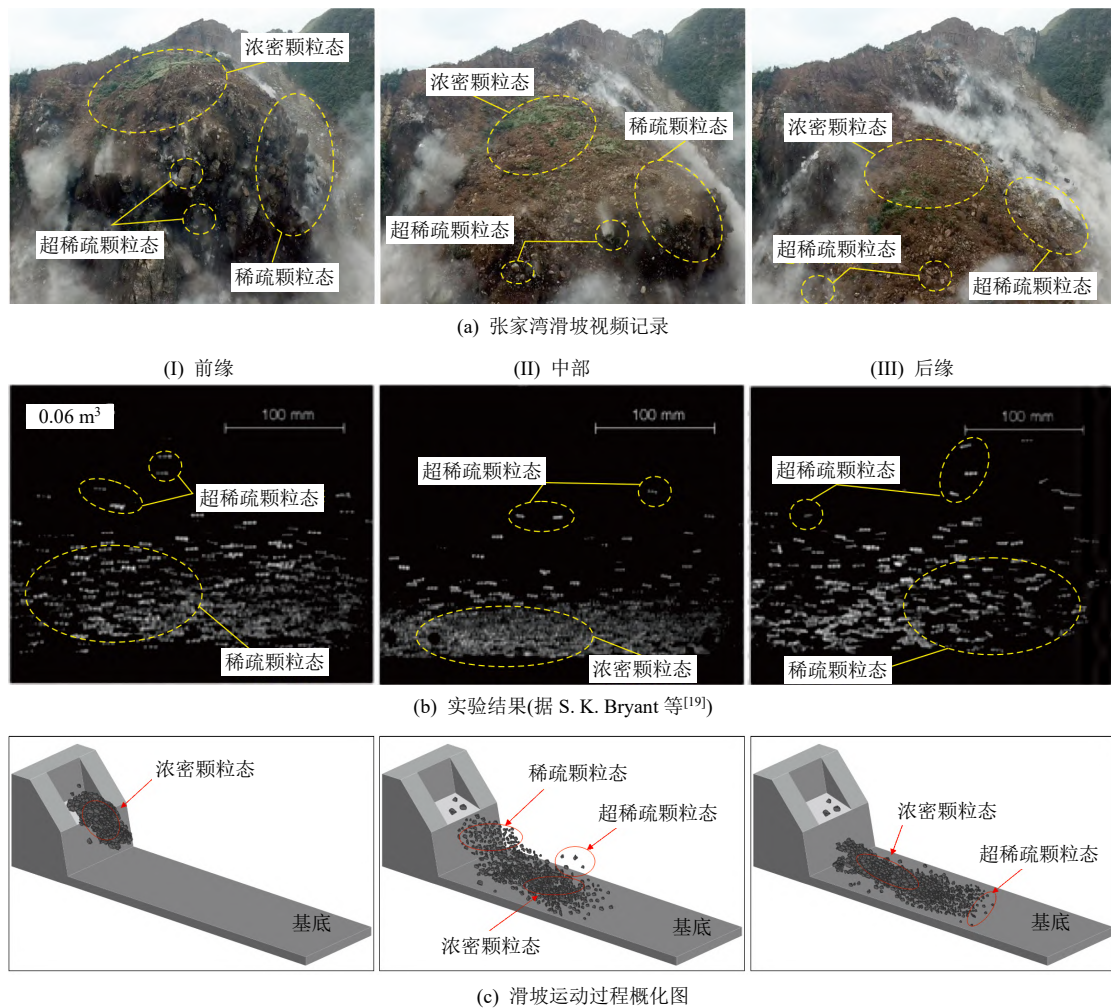


图 2 高位远程滑坡碎屑流运动过程中不同颗粒状态分布图
Fig.2 Distribution of different grains states in movement process

滑坡碎屑流的岩块颗粒体属于非连续介质材料，需要建立真实颗粒与计算粒子间的联系，研究中基于颗粒动力学模型将传统 SPH 方法改造成适用于离散颗粒的 SPH 方法，使得 SPH 粒子不仅承载质量、密度、速度、加速度等各种物理量，同时承载着颗粒的粒径、体积分数等颗粒属性，超稀疏颗粒体采用离散质点方法进行求解^[48-50]。

3.1 控制方程

滑体在不同状态下的质量守恒方程和动量守恒控制方程如下：

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\alpha} \quad (\text{连续方程}) \quad (1)$$

$$\frac{dv^\alpha}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma^{\alpha\beta}}{\partial x^\beta} + f^\alpha \quad (\text{运动方程}) \quad (2)$$

对于稀疏颗粒态，采用针对颗粒动力学理论描述控制方程，即颗粒拟温度的能量方程：

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2}{3} \left[\frac{\sigma^{\alpha\beta}}{\rho} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial}{\partial x^\beta} \left(k_p \frac{\partial \theta}{\partial x^\beta} \right) - N_c \theta_p \right] \quad (\text{能量方程}) \quad (3)$$

式(1)~(3)中： α, β 代表任意一个笛卡尔坐标系分量 x, y 或 z ，如 $\alpha\beta$ 可为 xy, xz, yz 等； ρ 为密度； v 为速度； f^α 为其他外力(如重力、相间力)； d/dt 为全导数； $k_p \nabla \theta_p$ 为能量耗散项； k_p 为能量耗散系数； $N_c \theta_p$ 为颗粒间碰撞产生的能量耗散项^[49]； $\sigma^{\alpha\beta}$ 为张量，通常分为两部分：

$$\sigma^{\alpha\beta} = -P\delta^{\alpha\beta} + \tau^{\alpha\beta} \quad (4)$$

式中： $\delta^{\alpha\beta}$ 为克罗内克符号，当 $\alpha = \beta$ 时， $\delta^{\alpha\beta} = 1$ ，当 $\alpha \neq \beta$ 时， $\delta^{\alpha\beta} = 0$ 。

3.2 计算本构

(1) 浓密颗粒流 - 黏塑性本构

各项同性压力 P 由黏塑性本构方程直接计算，采用平均应力定义，表示为

$$P = -\frac{\sigma^{\gamma\gamma}}{3} = -\frac{1}{3}(\sigma^{xx} + \sigma^{yy} + \sigma^{zz}) \quad (5)$$

式中： σ^{xx}, σ^{yy} 和 σ^{zz} 分别为应力张量在 x, y 和 z 方向上的分量。当颗粒处于准静态状态时，颗粒整体几乎不产生大变形，主要以弹性变形为主，在此阶段，根据线弹性模型(胡克定律)计算颗粒的应力 - 应变关系：

$$\dot{\sigma}^{\alpha\beta} = 2G\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} + K\dot{\epsilon}^{\gamma\gamma}\delta^{\alpha\beta} \quad (6)$$

式中： $\dot{\sigma}^{\alpha\beta}$ 为增量形式的应力分量； G 为剪切模量， $G = E/[2(1+\nu)]$ ； K 为弹性体积模量， $K = E/[3(1-2\nu)]$ ； E 为弹性模量(杨氏模量)； ν 为泊松比；

$\dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ 为偏剪切应变率张量， $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = \dot{\epsilon}^{\alpha\beta} - \frac{\dot{\epsilon}^{kk}\delta^{\alpha\beta}}{3}$ ，应变率张量，且 $\dot{\epsilon}^{\alpha\beta} = 0.5 \left(\frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\beta} + \frac{\partial v^\beta}{\partial x^\alpha} \right)$ 。

偏应力分量可表示为

$$\tau^{\alpha\beta} = \frac{\mu(I)P}{|\dot{\epsilon}|} \dot{\epsilon}^{\alpha\beta} \quad (7)$$

式中： $|\dot{\epsilon}|$ 为第二应变不变量； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率张量，对应于摩擦因数 $\mu(I)$ ，体现体积分数对惯性常数关系：

$$\mu(I) = \mu_p + \frac{\mu_2 - \mu_p}{\frac{I_0}{I} + 1} \quad (8)$$

试验和数值模拟表明，在函数式(8)中，当 I 为一个非常低的惯性常数时，有最小值 μ_p ，随着 I 增大， μ_p 逐渐增大到 μ_2 ， I_0 为常数，式(8)中的参数与材料的性质有关。例如，典型的取值为 $\mu_p = \tan 21^\circ$ ， $\mu_2 = \tan 33^\circ$ ， $I_0 = 0.28$ ^[51]。 I 可表示为

$$I = \frac{|\dot{\epsilon}|d}{\left(\frac{P}{\rho_p}\right)^{0.5}} \quad (9)$$

惯性常数表示惯性时间尺度($d^2\rho_p/P$)^{0.5} 与宏观变形时间尺度($1/|\dot{\epsilon}|$)的比值。

(2) 稀疏颗粒态 - 颗粒动力学本构(KTGF)

在颗粒动力学理论中，滑体是指颗粒组成的宏观连续介质，对于正应力 P ，包括碰撞和动能压力两部分，公式为

$$P = \rho[1 + 2(1 + e_{pp})\xi_p g_0]\theta \quad (10)$$

式中： g_0 为颗粒的径向恢复系数，同颗粒体积分数相关； ξ_p 为颗粒所占据的体积分数，颗粒所占据的体积分数有限，有效密度等于真实密度与所占据的体积分数的乘积，且有

$$\xi_p = \frac{\rho}{\rho_p} \quad (11)$$

式中： ρ 为颗粒相有效密度，即 SPH 粒子密度，遵循质量守恒方程； ρ_p 为颗粒的实际密度。 g_0 可表示为

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\xi_p}{\xi_{p, \max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (12)$$

式中： $\xi_{p, \max}$ 为颗粒材料在可压缩条件下所能达到的最大体积分数。

对于剪切应力 $\tau^{\alpha\beta}$ 可用以下公式表示：

$$\tau^{\alpha\beta} = \frac{4\xi_p^2 \rho_p d_p g_0 (1+e_{pp})}{3} \sqrt{\frac{\theta_p}{\pi}} \frac{\partial v^\alpha}{\partial x^\alpha} + 2 \left\{ \frac{4\xi_p^2 \rho_p d_p g_0 (1+e_{pp})}{5} \sqrt{\frac{\theta_p}{\pi}} + \frac{2\sqrt{5\pi}}{96} \rho_p d_p \sqrt{\theta_p} \left[1 + \frac{4}{5} \xi_p g_0 (1+e_{pp}) \right]^2 \right\} \quad (13)$$

式中： d_p 为颗粒的直径； e_{pp} 为颗粒之间的碰撞恢复系数，表示颗粒之间碰撞前后绝对速度跳跃关系，服从线弹性模型(LSD model)^[52]。

(3) 超稀疏颗粒态 - 离散介质本构

离散元法可通过牛顿第二定律分别描述，方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{c,ij} + F_{d,ij}) + m_i g \quad (14)$$

式中： m_i ， v_i 分别为颗粒*i*的质量和速度； $m_i g$ 为颗粒的重力； $F_{c,ij}$ ， $F_{d,ij}$ 分别为颗粒*i*与*j*的接触力与黏性接触阻尼力； k_i 为所有与颗粒接触的颗粒总数。颗粒*i*与*j*的接触力可分解为法向与切向接触力。如果颗粒之间有接触作用，则采用 Hertz-Mindlin 模型。法向力 F_{Hertz} 的表达式如下：

$$F_{Hertz} = k_n \delta_n \quad (15a)$$

式中： δ_n 为颗粒接触时的重叠量； k_n 为法向刚度，在该模型中， k_n 的值会随着的变形而改变，可表达为

$$k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (15b)$$

式中： E^* ， R^* 分别为等效杨氏模量和等效半径，其表达式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_j}, \quad \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (15c)$$

式中： E_i ， E_j 为 2 个碰撞颗粒弹性模量； R_i ， R_j 为 2 个碰撞颗粒接触半径。

可以看出， k_n 的值会随着重叠量 δ_n 变化而发生改变，即随着颗粒的变形而改变，说明该模型是非线性弹性模型。

切向力 $F_{Mindlin}$ 是切向重叠量 δ_t 的函数，表达式如下：

$$F_{Mindlin} = k_t \delta_t \quad (16a)$$

切向刚度 $k_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_t}$ ， G^* 为等效剪切模量，表达式为

$$\frac{1}{G^*} = \frac{1}{G_i} + \frac{1}{G_j} \quad (16b)$$

颗粒间的碰撞常伴随着能量损失，法向和切向的阻尼力分别为

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_n m^*} v_n^{rel} \quad (17)$$

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{k_t m^*} v_t^{rel} \quad (18)$$

其中，

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

式中： e 为恢复系数，用来表示物体碰撞时的能量损失特性，与 e_{pp} 取值一致，完全弹性碰撞时， e 的值为 1，表示没有能量损耗； v_n^{rel} ， v_t^{rel} 分别为 2 个物体碰撞时相对速度法向和切向的分量。

3.3 SPH 粒子与实际颗粒

从颗粒动力学角度出发，将颗粒相视为拟流体，拟流体区域采用 SPH 方法离散求解，SPH 粒子不仅承载颗粒相的质量、速度、位置、压力等传统参量，而且承载颗粒的粒径分布形态、体积分数以及由颗粒动力学引入拟温度等颗粒属性。SPH 粒子质量与其所代表的颗粒群总质量相等，密度为颗粒群的有效密度，速度为颗粒群的均值速度，拟温度以及压力均为所代表的颗粒群的均值拟温度及均值压力。通过体积分数实现了用较少的计算粒子数去计算较多的实际颗粒数，同时体积分数也是判别颗粒浓密、稀疏和超稀疏状态的重要指标。

SPH 粒子与实际颗粒之间属性的对应关系为

$$\rho_{SPH} = \rho = \xi_p \rho_p \quad (19)$$

式中： ρ_{SPH} 和 ρ_p 分别为 SPH 粒子有效密度和实际颗粒密度。假设流场区域中存在 n 个颗粒，颗粒的平均体积为 V_p ，平均质量为 M_p ，空间总体积为 V_0 ，那么有

$$\rho_{SPH} = \alpha_p \rho_p = \frac{nV_p}{V_0} \rho_p = \frac{nM_p}{V_0} \quad (20)$$

3.4 状态转化

不论是浓密颗粒介质还是稀疏颗粒介质，SPH 粒子在表征颗粒的物理性质方面是相同的，只不过力学本构模型不同，不同状态颗粒之间的转化主要由颗粒体积分数值控制，而颗粒的体积分数主要由 SPH 粒子有效密度决定(式(19))。

(1) 浓密颗粒 - 稀疏颗粒算法转化

在碎屑流滑坡计算中，体积分数和本构模型决定了不同滑体状态的求解。滑体运动状态表现为 4 种：浓密颗粒态、过渡态、稀疏颗粒态和超稀疏颗粒态(见图 3)，本构模型分别对应为准静态黏塑性本构模型、颗粒动力学本构、质点动力学本构。目前

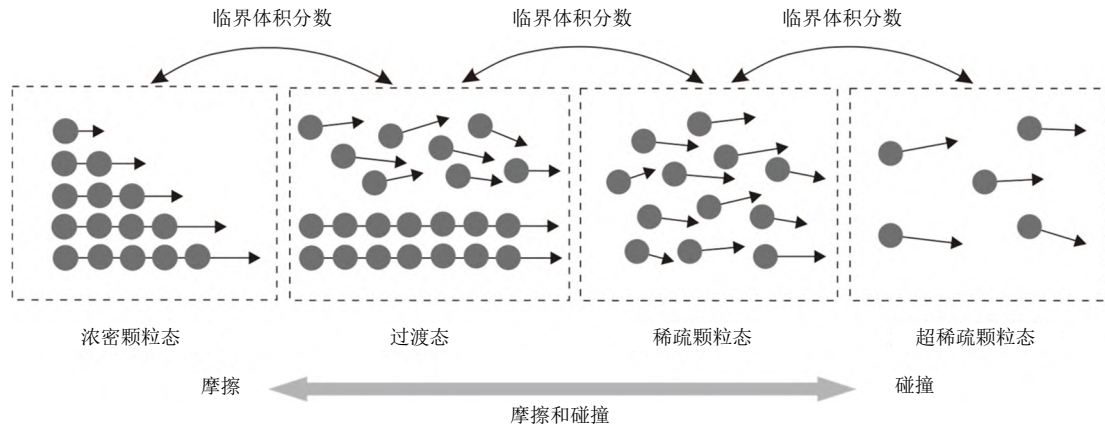


图 3 颗粒状态转化示意图

Fig.3 Schematic diagram of grains state transformation

对过渡状态的研究较少，模拟结果是否在一定程度上适用于真正的颗粒系统仍是未知的。

当浓密颗粒态在向稀疏颗粒态算法转变时，首先要保持粒子的物性参量均不变，主要区别在粒子间相互作用力上。浓密颗粒流的弹性正应力转化为稀疏颗粒介质的摩擦正应力：

$$P = P_{\text{friction}} = Fr \frac{(\xi_p - \xi_{p, \min})^n}{(\xi_{p, \max} - \xi_p)^m} \quad (21)$$

式中： Fr ， n ， m 为经验确定的材料常数，分别取值为 0.5，2 和 5^[51]。根据体积分数 ξ_p 的变化更新由摩擦产生正应力的值；剪应力则继续采用式(7)剪应力公式 $\tau^{\alpha\beta} = \mu(I)P / |\dot{\epsilon}| \dot{\epsilon}^{\alpha\beta}$ ，这时 P 由式(21)计算，保证了转化的动量守恒；同时从转化开始，拟温度的值由零开始计算，由碰撞产生的正应力和剪应力逐渐增大，直到过渡区完全或部分转化为颗粒动力学模型。

(2) 稀疏颗粒 - 浓密颗粒算法转化

稀疏颗粒向浓密颗粒转化同样保持粒子的物性参量不变，主要区别在粒子间相互作用力上。由稀疏颗粒的拟温度值反向从过渡区开始逐渐降低，两两相互碰撞应力值逐渐降低，而摩擦正应力值 P_{friction} 逐渐增加，摩擦剪应力值同样增加，采用流变学剪应力公式计算，直到稀疏颗粒态转化为浓密颗粒态。这时由于剪切力逐渐减小，弹性剪切力逐渐增加，颗粒速度逐渐降低，体积分数逐渐增大，直到准静止状态。

(3) 浓密颗粒 - 稀疏颗粒相互作用

在浓密颗粒流和稀疏颗粒流同时存在的状况下，2 种状态颗粒之间存在着相互作用。当 2 种不同状态的粒子作为邻近粒子时，需要判定两者之间是否参与对方应力和速度的计算中：① 当稀疏颗粒

为主动粒子，浓密颗粒为被动粒子时，浓密颗粒对稀疏颗粒之间具有贡献，浓密颗粒参与稀疏颗粒的速度梯度计算；② 浓密颗粒为主动粒子，稀疏颗粒为被动粒子时，稀疏颗粒不参与浓密颗粒的速度梯度计算。

3.5 边界力计算

(1) 法向边界力

SPH 作为无网格方法，不能像网格方法那样直接将界面力施加在边界点上。边界力求解采用罚函数方法求解颗粒与边界之间的法向边界力 σ ^[38]。

(2) 切向边界力

滑体与边界层的基底阻力选用颗粒材料基底阻力模型、库仑摩擦模型和 Voellmy 模型^[5]。

摩擦模型如下：

$$T = \sigma(1 - r_u) \tan \varphi \quad (22)$$

式中： σ 为滑体底部正应力， r_u 为孔隙水压力系数， φ 为摩擦角。

Voellmy 模型如下：

$$T = \sigma \tan \varphi + \gamma \frac{v^2}{\xi} \quad (23)$$

该模型中 T 主要由摩擦项与湍流项共同控制，湍流项主要由湍流系数 ξ 和运动速度 v 控制， γ 为滑体重度，而摩擦项则与摩擦模型基本一致。

4 鸡尾山崩滑碎屑流案例研究

4.1 滑坡基本情况

图 4 为鸡尾山滑坡实际堆积结果遥感图。2009 年 6 月 5 日，重庆市武隆县铁矿乡鸡尾山滑坡，约有 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的滑体从滑源区沿视倾角方向剪出，滑体岩性为二叠系栖霞组灰岩，运动过程中不断解体，

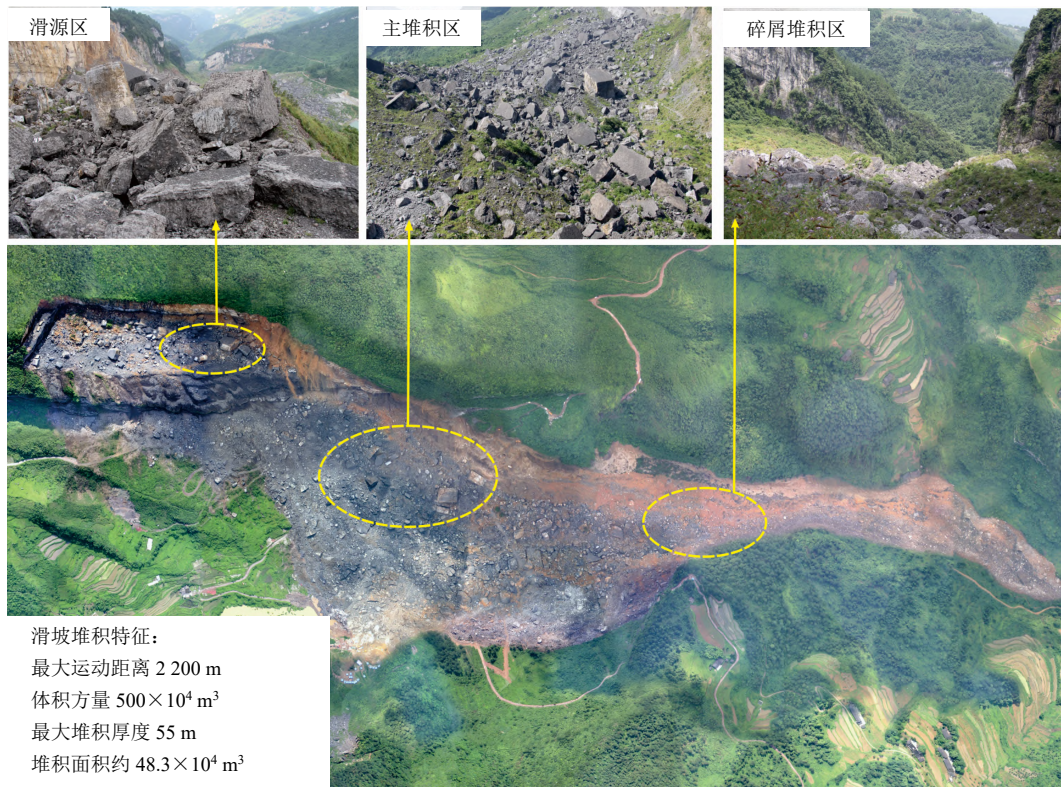


图4 鸡尾山滑坡实际堆积结果遥感图

Fig.4 Remote sensing of actual accumulation result of Jiweishan landslide

最终形成平均厚度超过 10 m, 最大堆积厚度 55 m, 纵向长度约 2 200 m, 总体积约为 $700 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的碎屑堆积体, 导致 74 人死亡和 8 人受伤^[42-43, 53-54]。滑体启动后, 从约 70 m 高的陡坎剪出, 不断同周围岩土体撞击, 经过深约 50 m、宽约 200 m 铁匠沟沟谷后撞击对岸, 受对岸陡坡的阻挡, 高速运动的滑体物质解体破碎, 随后转向沿沟谷向铁匠沟下游以碎屑流的方式运动堆积。鸡尾山滑坡为单相干颗粒体材料, 滑体运动状态体现了从完整岩体 - 浓密岩块 - 松散碎屑的运动过程。

4.2 模型建立及参数选取

地形和滑体模型采用 1 : 2 000 等高线数据完成建模, 建立滑体体积为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 根据野外调查结果, 鸡尾山滑坡堆积体多为大块石, 实际碎屑颗粒选用平均粒径 6 m, 模型 SPH 计算粒子 8 647 个, 模拟实际颗粒数量为 26 500 个。滑体碎屑颗粒体材料密度为栖霞组灰岩密度, 颗粒之间内摩擦角为 24° , 设置颗粒解体后无黏聚力。数值模拟中摩擦因数对滑坡的运动距离非常关键, 尤其是摩擦因数的选取, 大量研究多数采用试错计算进行确定。体积方量也是确定摩擦因数的关键因素, M. Yamada 等^[55]指出较小体积的岩质滑坡摩擦因数为 0.6~0.7, 而体积较大的厚层岩质滑坡摩擦因数小于 0.3。大量关

于鸡尾山滑坡的研究文献中, 摩擦因数取值多在 0.1~0.3^[44, 56-57], 本文在此范围内通过几次试算, 确定摩擦因数为 0.22 的模拟结果同实际情况最为接近。

关于临界体积分数数值选取, 一些通过数次物理和数值试验比对校核研究成果^[52, 58-63]认为, 摩擦和碰撞作用是影响滑体运动状态的主要作用方式, 当碰撞作用较小, 以摩擦作用为主的浓密态干碎屑颗粒体积分数 $\xi_p > 50\% \sim 60\%$, 服从宏观岩土学本构; 当摩擦作用较小, 以碰撞作用为主的稀疏态干碎屑体适用于颗粒动力学理论(KTGF)模型, 颗粒体积分数 $\xi_p < 50\% \sim 60\%$, 计算精度同离散元基本一致, 可以大大提高计算效率。当颗粒体体积分数 $\xi_p < 2\%$ 的超稀疏态, 不考虑颗粒和颗粒之间相互作用, 颗粒服从牛顿第二定律, 实现最少数量的颗粒达到较高计算效率, 同时可以保证前缘或边界位置处的颗粒最高精度堆积分布。该方法体现了在浓密和稀疏状态下采用高效的宏观连续介质计算, 在超稀疏状态下采用离散介质计算, 既保证计算效率的同时也保证计算精度。在鸡尾山滑坡模拟中, 设置体积分数 $> 60\%$ 为浓密态(类固态), $40\% \sim 60\%$ 为浓密向稀疏转化的过渡态(类液态), $2\% \sim 40\%$ 为稀疏态(类气态), 其中当体积分数小于 2% 时为超稀疏态(惯

性态)。模拟中动力学参数取值如表 1 所示。

表 1 鸡尾山滑坡 LPF^{3D} 计算参数
Table 1 Calculation parameters of LPF^{3D} of Jiweishan landslide

密度/ (kg · m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	摩擦 因数	颗粒 粒径/ m	实际颗 粒数量/ 个	SPH 粒子 数量/ 个	浓密/过渡/ 稀疏/超稀疏 体积分数/%
2670	0	24	0.22	6	26 500	8 647	60/40/2

4.3 模拟结果分析

基于多态理论和 LPF^{3D} 计算模型，反演了鸡尾山滑坡破坏后的运动过程，红色虚线为真实滑坡堆积范围，模拟结果同实际滑坡结果基本一致，滑坡运动时间为 150 s，实际电脑计算用时为 100 min。图 5 体现了滑坡运动过程中 SPH 体积分数的分布情况，红色为浓密颗粒状态，黄色代为浓密向稀疏状态转化的过渡状态，绿色为稀疏颗粒状态，蓝色代表超稀疏颗粒态。在计算过程中 SPH 粒子质量保持恒定，与其所代表的颗粒群总质量相等，当颗粒体积分数减少时，SPH 计算粒子显示粒径就会相应增加，呈现出图中不同颜色的颗粒状态的粒子粒径不同(见图 5)。鸡尾山滑坡运动过程中体积分数分布变化，体现了滑坡失稳后的初始阶段滑体处于浓密状

态，随着加速度的增加颗粒体逐渐过渡为稀疏状态。同时，当滑体下滑加速撞击剪出口下方的阻挡山体后，碰撞作用导致颗粒体速度增加，进而部分转化为超稀疏状态，在最后堆积停止阶段大多数堆积体底部颗粒又恢复为浓密状态。基于多态转化理论的模拟计算同滑坡碎屑流的实际物理力学运动情况基本一致。

图 6 显示鸡尾山滑坡不同运动阶段颗粒速度的分布情况，采用蓝黄红的主色系体现了颗粒运动速度大小。滑体整体平均最大速度约为 40 m/s，滑坡前缘个别颗粒最大速度能达到 50.9 m/s，运动过程体现了滑体从失稳启动 - 势能转化 - 碎屑堆积的运动全过程(见图 6)。图 7 显示鸡尾山滑坡不同运动阶段滑体厚度的分布情况，滑坡最大堆积距离为 2 180 m，由于剪出口下方山体的阻挡作用，剪出口下方的滑体堆积厚度最大，最大厚度为 60 m，堆积厚度从后缘向前缘逐渐减小。模拟中最大堆积厚度偏大，因为真实鸡尾山滑坡下滑中具有明显的冲击铲刮效应，剪出口下方山体被冲击铲刮带走，阻挡作用减弱后可以有效的分流。模拟结果总体堆积状态同真实滑坡基本一致(见图 7)，体现了多态转化理论和基本算法适用于此类高位远程滑坡的模拟计算。

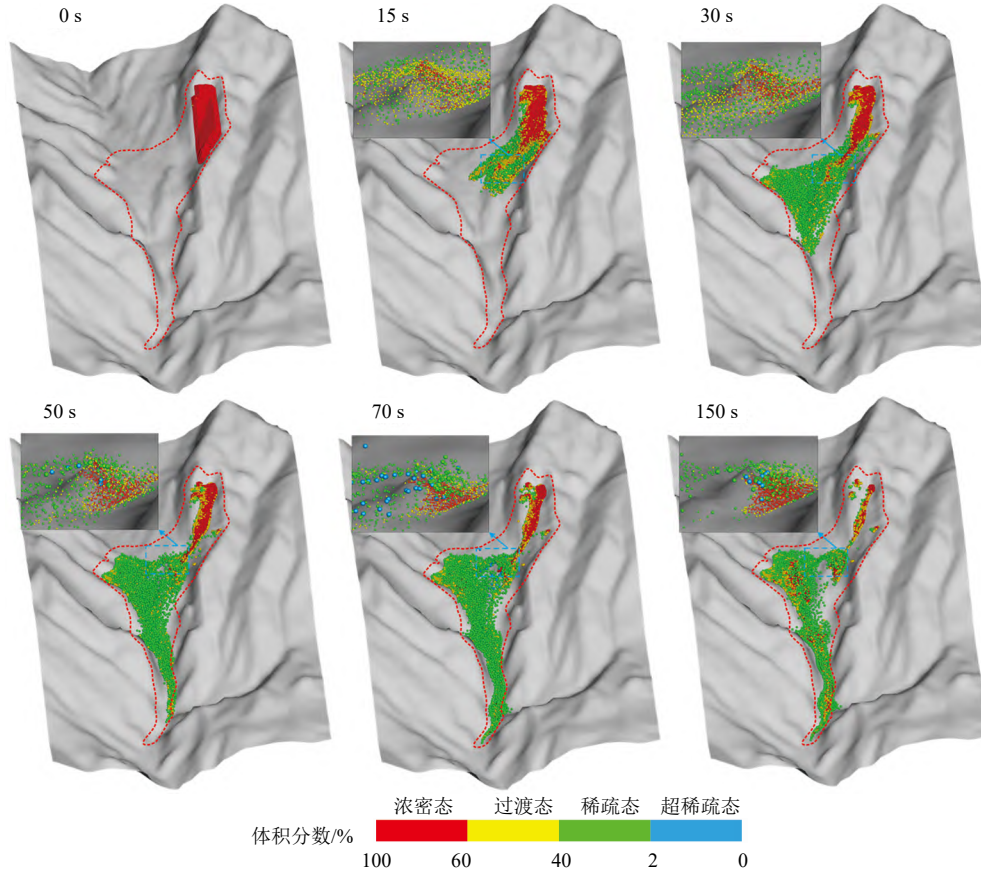


图 5 鸡尾山滑坡运动过程中颗粒体状态分布结果

Fig.5 The distribution of grains state during Jiweishan landslide movement

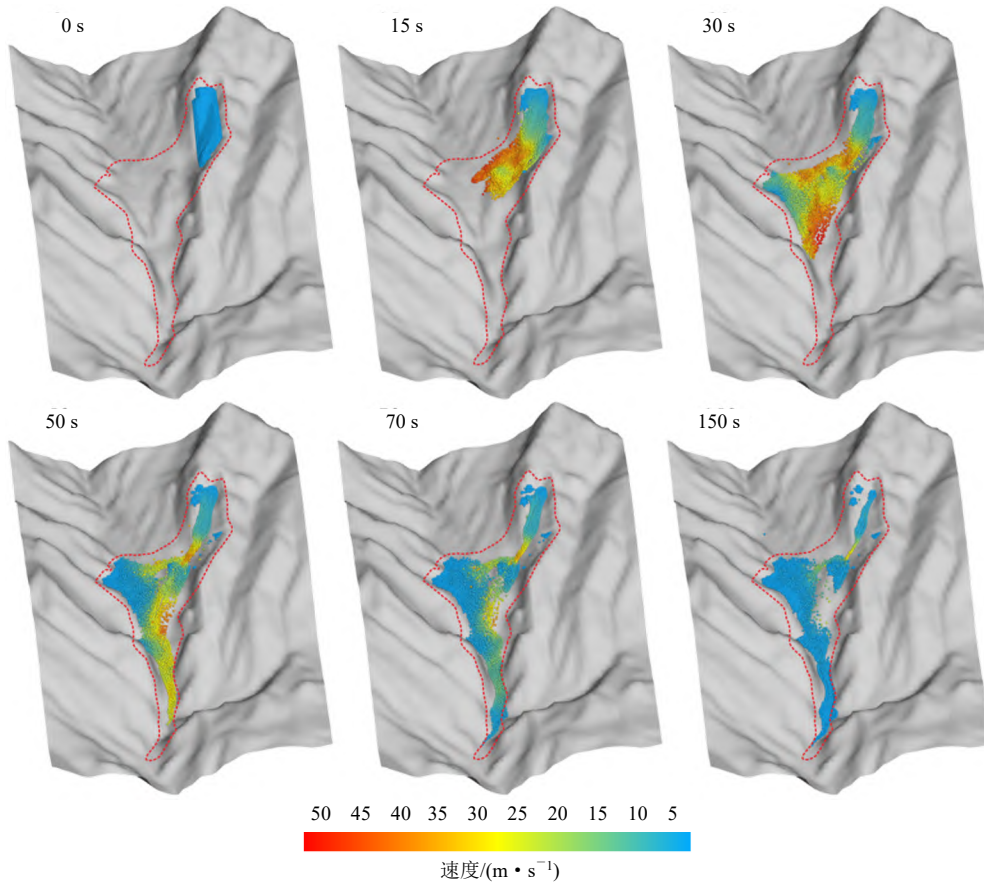


图 6 鸡尾山滑坡运动速度分布结果

Fig.6 Velocity distribution of Jiweishan landslide

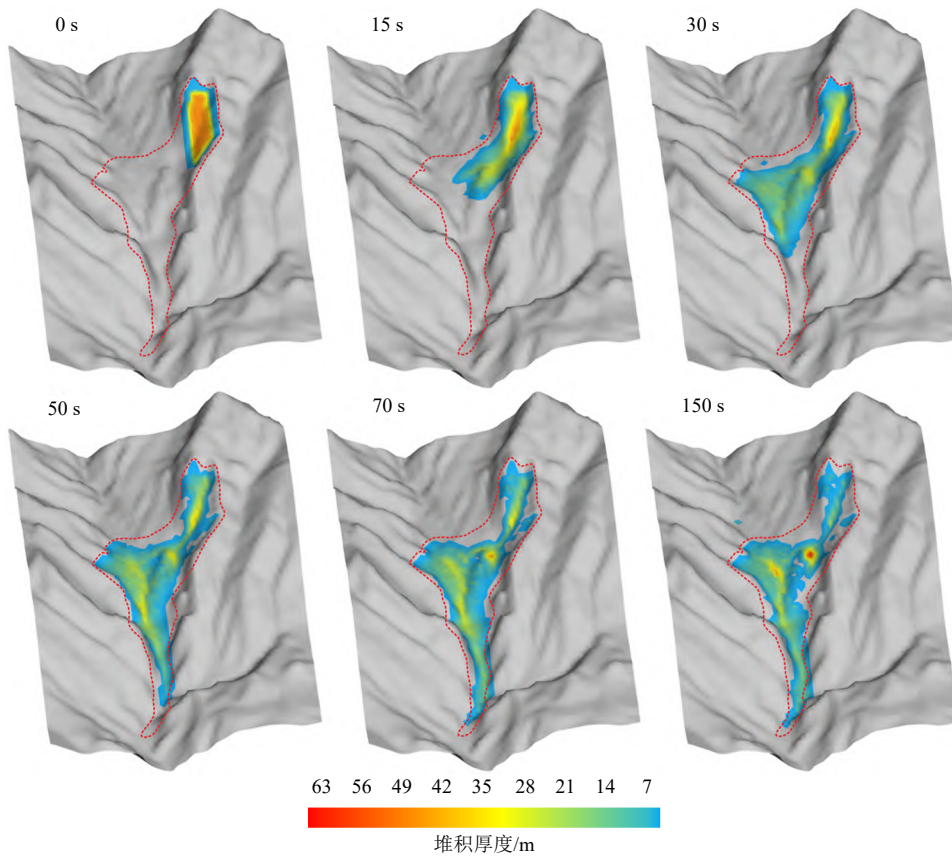


图 7 鸡尾山滑坡运动堆积厚度结果

Fig.7 Accumulation thickness map of Jiweishan landslide

4.4 不同临界体积分数的对比分析

基于 LPF^{3D} 计算模型和同一配置计算机(52 核、104 线程处理器)，针对不同临界体积分影响下滑体运动堆积状态进行对比计算分析，设计 4 种工况(见表 2)，工况 I 为节 4.3 的计算结果(见图 5)，工况 II 和 III 稀疏与超稀疏临界体积分别为 15% 和 30%，工况 IV 为浓密与过渡态体积分数为 80%，计算对比结果如图 8 所示。工况 I 同工况 IV 对比决定浓密态向过渡态转化的体积分越大，表明滑体更容易散开，更快速的从浓密颗粒向稀疏颗粒转化，更适用于风化程度高、结构面密度高、弹性模量大的滑体材料。根据工况 I~III 结果对比，稀疏态向超稀疏态转化的临界体积分越大，超稀疏态(DEM)所占比重越大，各个颗粒离散动力学作用更为明显，连续介质算法比重较小，滑体整体的连续运动特性减弱，故滑坡最终堆积面积减小，颗粒体在相对低洼的沟道堆积增多，堆积厚度增大，最大堆积厚度可达 98 m(见图 8(b))。同时，4 种工况的计算用时也有不同，以颗粒体 90% 运动速度为 0 m/s 作为计算停止标准得到了不同工况下的实际计算用时，超稀疏体积分越小计算效率越高，DEM 计算占比越少，计算用时越短。

传统离散单元法 DEM 追踪每个颗粒的运动轨

迹，以颗粒的离散特性描述颗粒体的动力行为，计算量较大。大量研究表明颗粒动力学理论将离散元思想和连续介质算法结合，既可得到颗粒各自运动状态，又可追踪颗粒间的相互作用，计算效率高^[39-41, 64]。当体积分小于 60%，摩擦作用较低时，基于宏观连续介质的颗粒动力学算法可以等同于离散元算法，既提高了计算效率，也更适用于滑坡整体性运动特征。通过文献对比，并结合目前数值试验分析，LPF^{3D} 临界体积分设置建议：(1) 浓密态 - 过渡态临界体积分宜设置为 60%~80%，可根据滑体地质条件在区间范围内进行调整。(2) 为保证计算精度和提高计算效率，充分利用连续介质算法(KTGF)，稀疏态临界上限为 60%，通常为 50%^[63]。(3) 超稀疏颗粒状态考虑滑体边界位置处为独立滚石颗粒的惯性作用，不考虑颗粒和颗粒之间相互作用，DEM 计算效果最好，参照 DPM 算法建议^[59]，将稀疏态 - 超稀疏态临界体积分数值设置为 <10%。

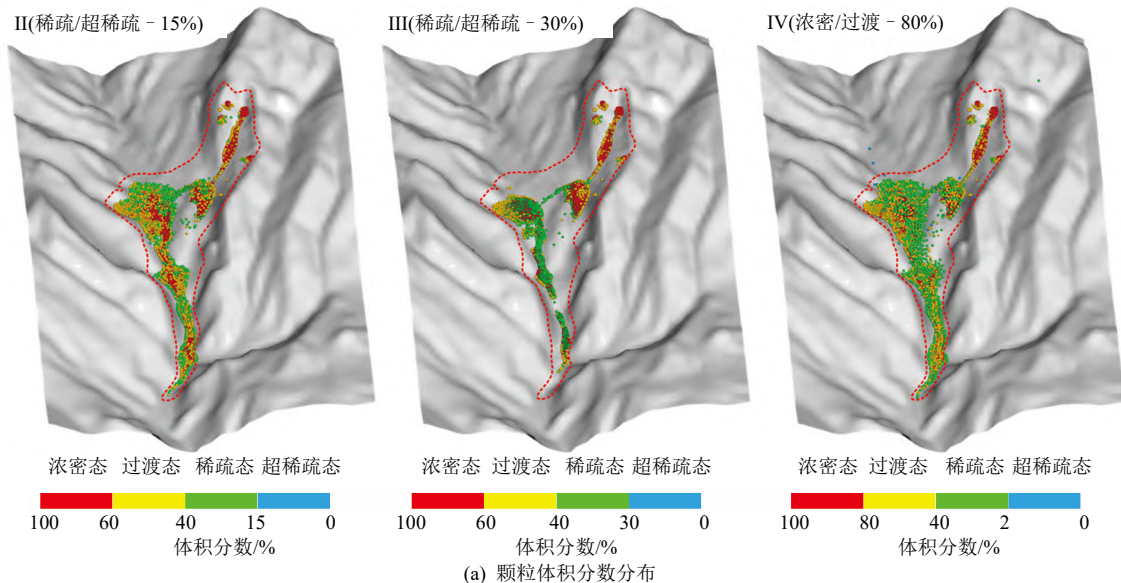
5 讨论

滑坡运动过程是极为复杂的，通过选用颗粒流模型(PFC^{3D})和等效流体模型(DAN^{3D})单态算法对鸡尾山滑坡进行模拟，同 LPF^{3D} 计算中采用多态转化

表 2 鸡尾山滑坡临界体积分数工况及结果数据对比

Table 2 Comparison of the critical volume fraction conditions and results of Jiweishan landslide

计算工况编号	浓密/过渡/稀疏/超稀疏临界体积分/%	堆积面积/m ²	平均堆积厚度/m	最大速度/(m · s ⁻¹)	实际计算用时/min	堆积结果评价
I	60/40/2	4.0 × 10 ⁵	12.5	40	100	基本匹配
II	60/40/15	3.0 × 10 ⁵	16	49.4	105	范围偏小
III	60/40/30	2.1 × 10 ⁵	24	120	范围偏小	
IV	80/40/2	4.2 × 10 ⁵	11.9	54	105	部分颗粒超出堆积范围



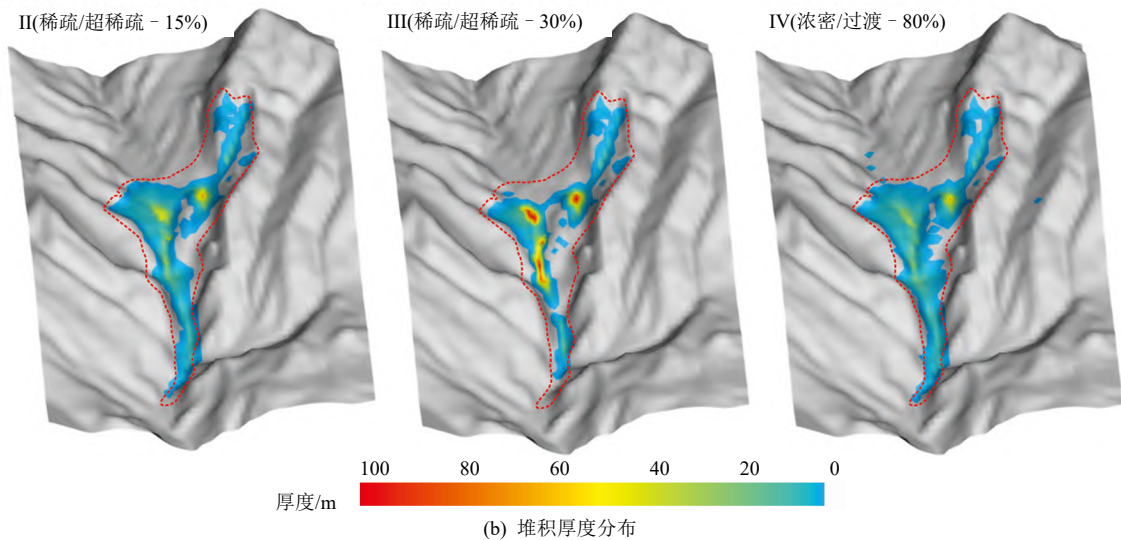


图 8 不同临界体积分数工况下鸡尾山滑坡堆积结果对比

Fig.8 The sensitivity analysis diagram of the volume fraction of the Jiweishan landslide

模型进行对比，计算中采用相同计算机，对比结果数据见表 3。3 种计算方法分别采用自身计算优势，几何模型、材料参数和动力学参数设置为相同。结果对比显示：(1) 计算效率方面：单一状态等效流体模型算法计算效率最高；离散元颗粒流模型计算量最大，颗粒数太多导致对计算机的要求太高^[26]；多态转化模型(LPF^{3D})介于两者之间，计算量可以达到几十万个计算粒子，提高了计算精度，同时又能实现真实颗粒数量的计算，并增加了计算结果的收敛和稳定性。(2) 堆积状态：颗粒流模型重点考虑了碰撞作用，运动距离偏大；等效流体模型主要考虑基底剪切阻力模型的深度积分假三维计算，忽略了滑体内部碰撞和惯性作用，运动距离和堆积范围较大；多态算法结合前两者的优点，通过体积分数控制滑体状态，同时体现摩擦和碰撞的作用方式，运动结果同实际滑坡最为接近(见表 3)。(3) 参数影响：连续介质算法同离散质点法对比，具有可以直接赋值材料属性，提升了材料计算的可靠性。多态的转化计算改善了摩擦因数恒定导致速度和运动距离偏大的问题^[65]。多状态算法采用实际滑体的物理力学参数，摩擦因数和转化临界值对运动影响关键，虽然 SPH 里面的算法参数较多，研究中已通过数次数值试验进行了固定，计算中只需要输入滑体的物理力

学参数和动力学参数即可。

颗粒体多态转化模型和 SPH 算法的结合，很好模拟了高位远程滑坡碎屑流运动距离和堆积形态。在考虑滑坡运动中材料内部作用力和基底阻力作用下，模拟结果同实际滑坡堆积情况基本一致。同连续介质方法软件和离散颗粒流方法软件比较，实现了真三维过程和考虑实际颗粒数量高效的模拟计算。采用体积分数的运动实现了滑体状态从浓密态 - 稀疏态 - 超稀疏态的识别与转化。从图 9 可以看出，基于颗粒体多态转化理论的宏观连续介质算法的 LPF^{3D} 数值模拟模型，可以很好还原远程滑坡运动全过程和堆积形态，同时有效提高了计算结果收敛和稳定性。但是模拟中也存有一些问题，将在后面的研发中加以考虑，例如：实际鸡尾山滑坡下滑运动过程具有明显冲击铲刮特性，目前尚未考虑，在后续工作中将进一步开展研究。另外，SPH 粒子方法中具有有一定拉伸不稳定的问题，人工应力的赋值可以适当解决，但是当遇到黏聚力特别大的岩质滑体材料时，容易引起滑体的收缩变形，所以目前的模拟计算是模拟了滑体解体之后运动全过程，后续工作也将引入有限元实现完整滑体 - 浓密颗粒体 - 稀疏颗粒体 - 超稀疏颗粒体的计算，以实现多算法耦合适应滑坡全过程运动的模拟计算。

表 3 计算结果数据对比

Table 3 Comparison of the calculation results and data

对比项	摩擦因数	颗粒半径/m	碰撞恢复系数	颗粒数目/个	浓密/稀疏/超稀疏 颗粒流体积分数/%	实际计算用 时/min	最大运动 距离/m	最大堆积 厚度/m
PFC ^{3D}	0.22	6	0.6	27 048	-	420	2 700	41
DAN ^{3D}		-	-	2 000	-	5	2 750	43
LPF ^{3D}		6	0.6	26 500	60/40/2	100	2 180	60
真实滑坡				-			2 200	55

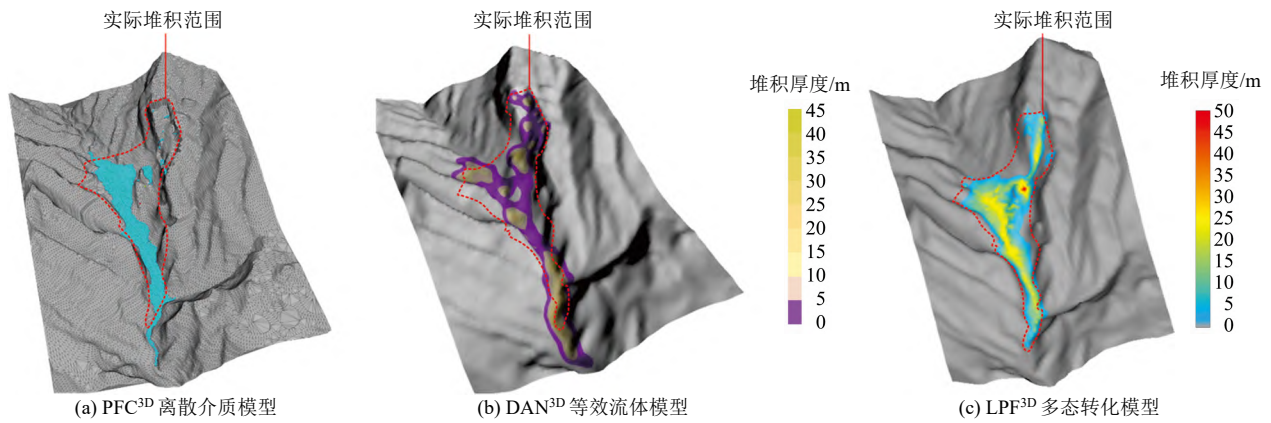


图 9 鸡尾山滑坡不同动力学数值模型模拟计算结果

Fig.9 Simulated numerical results of Jiweishan landslide under different dynamics models

6 结 论

高效、精准、可视化的模拟高位远程滑坡碎屑流运动堆积过程一直是地质灾害防灾减灾领域关注的重点问题之一。本文通过调查研究、地质模型建立和数值算法开发，揭示高位滑坡破坏后运动过程中多态转化的运动特征，基于 SPH 算法体积分数判别和状态本构模型转化提出了自主研发的滑坡破坏后运动(LPF^{3D})数值模拟模型，并得到以下结论：

(1) 高位远程滑坡碎屑流运动地质模型：通过实际滑坡视频记录和颗粒体滑槽试验分析，揭示了滑坡运动过程中颗粒运动状态是时刻发生变化的，主要呈现了浓密态、稀疏态、超稀疏态。浓密颗粒状态的作用方式多以摩擦方式为主，当颗粒处于稀疏态时，作用方式多以碰撞方式为主。颗粒体的浓密态、稀疏态、超稀疏态分别服从准静态黏塑性本构、颗粒动力学本构和离散质点动力学本构。

(2) 高位远程滑坡碎屑流数值计算模型：采用体积分数作为颗粒数量和颗粒状态转化的判别标准，提出了基于 SPH 离散算法和离散元法相结合，解决实际物理力学过程的连续宏观介质算法，并对该临界体积分数值进行总结。

(3) 数值计算与实际滑坡碎屑流案例对比：基于多态转化理论和新的数值算法反演分析了重庆武隆鸡尾山滑坡碎屑流，运动堆积的模拟结果同实际滑坡基本一致。

(4) LPF^{3D} 数值计算模型：在模拟滑坡破坏后运动中，模拟实际颗粒数量、实现实际滑体状态转化、提高计算效率和稳定性方面，具有较大优势。

综上所述，在高位远程滑坡碎屑流风险调查与动力过程研究分析中，应当充分考虑滑体颗粒状态变化和实际颗粒数量的影响，滑坡破坏后运动

LPF^{3D} 数值计算模型为高位远程滑坡的风险评估预测分析，提供了符合实际物理力学过程的高效和定量化可选方法。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 730 - 741. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and format on mechanism of the largest scale landslide at Dagungbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 730 - 741.(in Chinese))
- [2] 殷跃平, 王文沛, 张楠, 等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 827 - 841.(YIN Yueping, WANG Wenpei, ZHANG Nan, et al. Long runout geological disaster initiated by the ridge-top rockslide in a strong earthquake area: a case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 827 - 841.(in Chinese))
- [3] 许强, 李为乐, 董秀军, 等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2 612 - 2 628.(XU Qiang, LI Weile, DONG Xiujun, et al. The Xinmocun landslide on June 24, 2017 in Maoxian, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2 612 - 2 628.(in Chinese))
- [4] 高杨, 李滨, 冯振, 等. 全球气候变化与地质灾害响应分析[J]. 地质力学学报, 2017, 23(1): 65 - 77.(GAO Yang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Global climate change and geological disaster response analysis[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(1): 65 - 77. (in Chinese))
- [5] HUNGR O. A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 610 - 623.
- [6] JOHNSON P C, NOTT P, JACKSON R. Frictional-collisional equations of motion for participate flows and their application to chutes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 210: 501 - 535.
- [7] CAMPBELL C S, CLEARY P W, HOPKINS M. Large-scale landslide

- simulations: Global deformation, velocities and basal friction[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B5): 8 267 - 8 283.
- [8] IVERSON R M, DENLINGER R P. Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2001, 106(B1): 537 - 552.
- [9] JOHNSON C G, KOKELAAR B P, IVERSON R M, et al. Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117: F01032.
- [10] DUFRESNE A, BÖSMEIERS A, PRAGER C. Sedimentology of rock avalanche deposits—case study and review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 234 - 259.
- [11] YIN Y, LI B, GAO Y, et al. Geostuctures, dynamics and risk mitigation of high-altitude and long-runout rockslides[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(1): 66 - 101.
- [12] TAYYEBI S M, PASTOR M, STICKLE M M, et al. SPH numerical modelling of landslide movements as coupled two-phase flows with a new solution for the interaction term[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2022, 96: 1 - 14.
- [13] 邢爱国, 高广运. 大型高速滑坡近程空气动力学效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 778 - 783.(XING Aiguo, GAO Guangyun. Study on aerodynamics effect of large highspeed landslide at the short-range stage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(5): 778 - 783.(in Chinese))
- [14] 程谦恭, 王玉峰, 朱 圻, 等. 高速远程滑坡超前冲击气浪动力学机理[J]. *山地学报*, 2011, 29(1): 70 - 80.(CHENG Qiangong, WANG Yufeng, ZHU Qi, et al. Dynamics of the airblasts generated by rock avalanches[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(1): 70 - 80.(in Chinese))
- [15] 高 杨, 殷跃平, 李 壮, 等. 高位远程岩质滑坡动力解体效应研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(10): 1 958 - 1 970.(GAO Yang, YIN Yueping, LI Zhuang, et al. Study on the Dynamic disintegration effect of high position and long runout rock landslide[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(10): 1 958 - 1 970.(in Chinese))
- [16] BOWMAN E T, TAKE W A, RAIT K L, et al. Physical models of rock avalanche spreading behaviour with dynamic fragmentation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(4): 460 - 476.
- [17] POLLET N, SCHNEIDER J L M. Dynamic disintegration processes accompanying transport of the Holocene Flims sturzstrom(Swiss Alps)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 221(1/4): 433 - 448.
- [18] POLLET N. Contribution à l'analyse des mouvements gravitaires rapides de grande ampleur par la comparaison des matériaux sources et des dépôts: exemples alpins[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2004, 63(4): 353 - 365.
- [19] BRYANT S K, TAKE W A, BOWMAN E T. Observations of grain-scale interactions and simulation of dry granular flows in a large-scale flume[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(5): 638 - 655.
- [20] BRYANT S K, TAKE W A, BOWMAN E T, et al. Physical and numerical modelling of dry granular flows under Coriolis conditions[J]. *Géotechnique*, 2015b, 65(3): 188 - 200.
- [21] BOWMAN E T, TAKE W A, RAIT K L, et al. Physical models of rock avalanche spreading behaviour with dynamic fragmentation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(4): 460 - 476.
- [22] 肖锐铨, 陈红旗, 冷洋洋, 等. 贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(1): 3 - 9.(XIAO Ruihua, CHEN Hongqi, LENG Yangyang, et al. Preliminary analysis on the failure process and mechanism of the August 28 Collapse in Nayong County Guizhou Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(1): 3 - 9.(in Chinese))
- [23] HRENNIKOFF A. Solution of problems of elasticity by the framework method[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1941, 8: 615 - 715.
- [24] COURANT R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations[J]. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1943, 49: 1 - 23.
- [25] LIU G, LI J. A Three-dimensional discontinuous deformation analysis method for investigating the effect of slope geometrical characteristics on rockfall behaviors[J]. *International Journal of Computational Methods*, 2019, 16(08): 455 - 471.
- [26] 张 龙, 唐辉明, 熊承仁, 等. 鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC^{3D} 模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增 1): 2 601 - 2 611.(ZHANG Long, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Movement process simulation of high-speed long-distance Jiweishan landslide with PFC^{3D}[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Supp.1): 2 601 - 2 611.(in Chinese))
- [27] WU Z, WONG L. Underground rockfall stability analysis using the numerical manifold method[J]. *Advances in Engineering Software*, 2014, 76: 69 - 85.
- [28] ZHANG Y, WANG J, XU Q, et al. DDA validation of the mobility of earthquake-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2015, 194: 38 - 51.
- [29] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47 - 65.
- [30] LIU C, XU Q, SHI B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D close-packed lattice model for brittle rocks[J]. *Computers and Geosciences*, 2017, 103: 12 - 20.
- [31] 潘 青, 张清照, 李艺灵. 基于 EDEM 的碎屑流运动规律及冲击性能研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(5): 1 057 - 1 065.(PAN Qing, ZHANG Qingzhao, LI Yiling. Discrete element simulation study of debris flow movement law and impact performance[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(5): 1 057 - 1 065.(in Chinese))
- [32] VARNES D. Slope movement types and processes[J]. *Special Report*, 1978, 176: 11 - 33.
- [33] HUNGR O, LEROUEIL S, PICARELLI L. The Varnes classification of landslide types, an update[J]. *Landslides*, 2014, 11(2): 167 - 194.
- [34] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Smoothed grains hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1977, 181(3): 375 - 389.
- [35] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and*

- Engineering, 1994, 118(1-2): 179 - 196.
- [36] 王 沁. 格子 Boltzmann 方法理论及其在泥石流研究中的应用[博士学位论文][D]. 西南交通大学, 2007.(WANG Qin. The theory of lattice Boltzmann method and the application of to debris flow[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.(in Chinese))
- [37] 许 强, 黄润秋, 殷跃平, 等. 2009 年 6·5 重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 433 - 444.(XU Qiang, HUANG Runqiu, YING Yuepin, et al. The Jiweishan Landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 433 - 444.(in Chinese))
- [38] QIANG H F, HAN Y W, WANG K P, et al. Numerical simulation of water filling process based on new method of penalty function SPH[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 245 - 250.
- [39] ROUX J N, COMBES G. Quasistatic rheology and the origin of strain[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, (3): 131 - 140.
- [40] GOLDBIRSCHE I. Rapid granular flows[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35: 267.
- [41] FORTERRE Y, POULIQUEN O. Flows of dense granular media[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2008, 40(1): 1 - 24.
- [42] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 217 - 226.(YIN Yueping. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 217 - 226.(in Chinese))
- [43] ZHANG M, MCSAVENEY M J. Is air pollution causing landslides in China?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 481: 284 - 289.
- [44] 殷跃平, 朱继良, 杨胜元. 贵州关岭大寨高速远程滑坡——碎屑流研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 445 - 454.(YIN Yueping, ZHU Jiliang, YANG Shengyuan. Investigation of a high speed and long run-out rockslide-debris flow at Dazhai in Guanling of Guizhou Province[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 445 - 454.(in Chinese))
- [45] XING A, WANG G, LI B, et al. Long-runout mechanism and landsliding behaviour of large catastrophic landslide triggered by heavy rainfall in Guanling, Guizhou, China[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 52(7): 971 - 981.
- [46] FAN X, XU Q, SCARINGI G, et al. The “long” runout rock avalanche in Pusa, China, on August 28, 2017: a preliminary report[J]. Landslides, 2019, 16(1): 139 - 154.
- [47] 郑 光, 许 强, 巨袁臻, 等. 2017 年 8 月 28 日贵州纳雍县张家湾镇普酒村崩塌特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 223 - 240.(ZHENG Guang, XU Qiang, JU Yuanzhen, et al. The Pusa rock avalanche on August 28, 2017 in Zhangjiawan Nayongxian, Guizhou: characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 223 - 240.(in Chinese))
- [48] CUI M, CHEN F, BU F. Multiphase theory of granular media and grains simulation method for projectile penetration in sand beds[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157: 103962.
- [49] CHEN F, YAN H. Constitutive model for solid-like, liquid-like, and gas-like phases of granular media and their numerical implementation[J]. Powder Technology, 2021, 390: 369 - 386.
- [50] MIDI G D V. On dense granular flows[J]. The European Physical Journal E, 2004, 14(4): 341 - 365.
- [51] JOHNSON P C, NOTT P, JACKSON R. Frictional-collisional equations of motion for particulate flows and their application to chutes[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 210: 501 - 535.
- [52] CHIALVO S, SUNDARESAN S. A modified kinetic theory for frictional granular flows in dense and dilute regimes[J]. Physics of Fluids, 2013, 25(7): 070603.
- [53] 高 杨, 殷跃平, 邢爱国, 等. 鸡尾山高速远程滑坡——碎屑流动力学特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 46 - 51.(GAO Yang, YIN Yueping, XING Aiguo, et al. Jiweishan rapid and long run-out landslide-debris flow dynamic characteristics analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 46 - 51.(in Chinese))
- [54] 李 晓, 张年学, 盛祝平, 等. 武隆鸡尾山滑坡发生机制与裂缝成因分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 1 - 12.(LI Xiao, ZHANG Nianxue, SHENG Zhuping, et al. Sliding Mechanisms and Fracture Genesis of Jiweishan Landslide in Wulong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 1 - 12.(in Chinese))
- [55] YAMADA M, MANGENEY A, MATSUSHI Y, et al. Estimation of dynamic friction and movement history of large landslides[J]. Landslides, 2018, 15(10): 1963 - 1974.
- [56] GAO Y, YIN Y, LI B, et al. Characteristics and numerical runout modeling analysis of the Jiweishan landslide, Chongqing, China[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2018, 24(4): 413 - 423.
- [57] ZOU Z, TANG H, XIONG C, et al. Kinetic characteristics of debris flows as exemplified by field investigations and discrete element simulation of the catastrophic Jiweishan rockslide, China[J]. Geomorphology, 2017, 295: 1 - 15.
- [58] JOPP, FORTERRE Y, POULIQUEN O. A constitutive law for dense granular flows[J]. Nature, 2006, 441: 727 - 730.
- [59] MEZHERICHER M, BROSH T, LEVY A. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods[J]. Particulate Science and Technology, 2011, 29(2): 197 - 208.
- [60] SELA N, GOLDBIRSCHE I. Hydrodynamic equations for rapid flows of smooth inelastic spheres, to Burnett order[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1998, 361: 41 - 74.
- [61] SAHA S, ALAM M. Non-Newtonian stress, collisional dissipation and heat flux in the shear flow of inelastic disks: a reduction via Grad's moment method[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 757: 251 - 296.
- [62] KIM S, KAMRIN K. Power-law scaling in granular rheology across flow geometries[J]. Physical Review Letters, 2020, 125(8): 088002.
- [63] PÁHTZ T, DURÁN O, DE KLERK D N, et al. Local rheology relation with variable yield stress ratio across dry, wet, dense, and dilute granular flows[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(4): 048001.
- [64] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. Granular solids, liquids, and gases[J]. Reviews of Modern Physics, 1996, 68: 1259 - 73.
- [65] LEGROS F. The mobility of long-runout landslides[J]. Engineering Geology, 2002, 63(3/4): 301 - 331.