

离散元模拟下排土场失稳机理与灾变演化研究

刘冰焯¹, 文 宇², 房雪明^{1*}

¹昆明理工大学公共安全与应急管理学院 云南昆明

²辽宁工程技术大学矿业学院 辽宁阜新

【摘要】露天煤矿排土场作为矿山工程中最为脆弱的边坡单元，其稳定性直接关系到生产安全与生态环境。为揭示排土场滑坡的孕育与演化机理，基于离散元软件 MatDEM 建立了排土场离散元模型，结合实际工况进行参数赋值与调控。通过数值模拟对排土场在加载条件下的变形破坏过程进行动态追踪，重点分析了滑坡发生前后颗粒接触力链演化、剪切带形成及滑体整体位移场的演变特征。结果表明，排土场滑坡主要表现为底部弱化层的应力集中与破裂贯通所致，剪切带贯通后导致滑体产生整体滑移和局部坍塌，揭示了从局部破坏向整体失稳演化的链式机制。

【关键词】露天煤矿；排土场；MatDEM；滑坡机理；灾害演变

【收稿日期】2025 年 7 月 14 日

【出刊日期】2025 年 8 月 12 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250349

Research on the instability mechanism and catastrophic evolution of the dump field under discrete element method

Bingyang Liu¹, Yu Wen², Xueming Fang^{1*}

¹School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan

²College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning

【Abstract】As one of the most vulnerable slope units in mining engineering, the stability of open-pit coal mine dumps is directly linked to production safety and the ecological environment. To investigate the initiation and evolution mechanisms of dump landslides, a discrete element model was established using the MatDEM software, with parameters calibrated according to actual site conditions. The deformation and failure processes of the dump under loading were dynamically tracked through numerical simulation. The evolution of particle contact force chains, shear zone formation, and overall displacement fields of the sliding body before and after landslide initiation were systematically analyzed. Results indicate that landslides are primarily triggered by stress concentration and rupture of the basal weak layer. Shear zone penetration induces overall sliding and localized collapses of the sliding mass, revealing the progressive failure mechanism from local damage to overall instability.

【Keywords】Open-pit coal mine; Waste dump; MatDEM; Landslide mechanism; Disaster evolution

引言

露天煤矿排土场体量大、结构非均一旦受采挖、降雨及地下水位影响显著，其失稳崩塌常导致严重的人员伤亡、设备损毁与环境污染，因此对排土场滑坡崩塌过程的机理认识与演化规律研究具有重要工程与社会意义。传统基于连续介质的有限元数值方法（以下称为 FEM）在整体稳定性评估方面已被广泛应用，但在描述大变形、块体化破裂、颗粒运动与堆积演化等失稳后过程时存在固有局限。为此，离散元（以下称为 DEM）

因能直接模拟颗粒块体的接触、碰撞、粘结与分离，近年来在矿山排土场、尾矿坝及滑坡过程模拟中获得越来越多的关注。

近年研究重心呈以下趋势：一是将 DEM 与 FEM 或流体耦合如 FEM-DEM、DEM-CFD 等，以同时捕捉应力场、孔隙水作用与颗粒动力学；二是面向大尺度、高分辨率的 DEM 模拟与不确定性概率化分析，以提高数值结果的工程可用性与风险评估能力。尽管耦合方法和大尺度模拟已有示范性研究，但在参数标定、尺度

第一作者简介：刘冰焯（1998-）男，汉族，云南保山人，本科，助理工程师，研究方向：露天开采；

*通讯作者：房雪明（1989-）男，汉族，山东滨州人，博士，讲师，研究方向：岩土体工程灾害治理、风险防控与预警。

可扩展性、计算效率以及现场/试验数据的系统验证方面仍存在显著挑战。

基于上述背景, 本研究以离散元数值模拟为主线, 针对露天煤矿排土场的滑坡失稳过程开展系统数值试验: 通过合理的微观参数标定与宏观指标反演, 建立能够再现裂缝萌生、扩展与块体化演变的 DEM 模型阐述失稳机理和灾害演化路径的影响规律。

1 离散元基本原理

FEM 与 DEM 作为两种主流的数值模拟技术, 在理论基础、处理对象和计算方法上存在本质区别。有限元法基于连续介质理论, 将复杂几何区域离散为简单单元, 通过单元集成和方程组求解模拟介质行为, 适用于连续材料的线性/非线性问题。而离散元法则基于不连续介质理论, 模拟离散单元间的接触力学, 通过牛顿第二定律和时间积分算法求解单元运动。

离散元方法中最基本且应用最广泛的模型是线性弹性模型。在该模型中, 颗粒通过法向和切向弹簧与相邻颗粒相连, 这些弹簧可以发生断裂, 颗粒间的连接方式如图 1 所示。

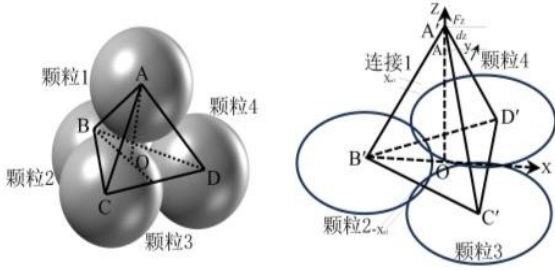


图 1 离散元颗粒连接示意图

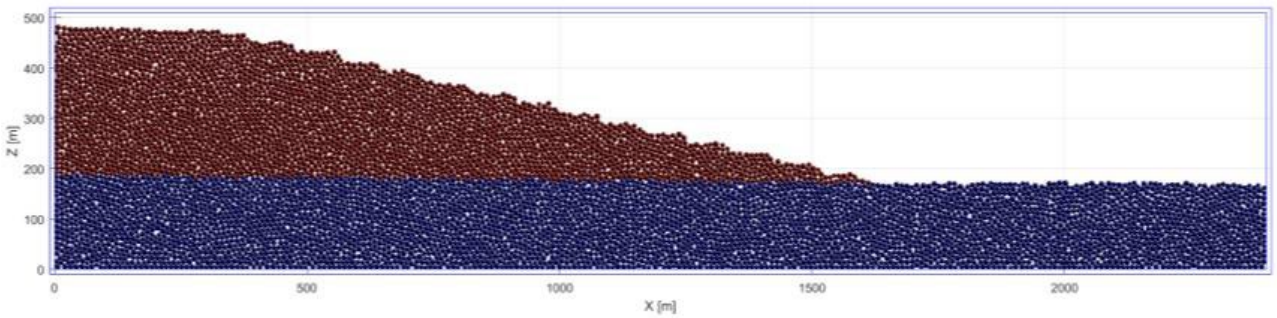


图 2 离散元颗粒模型

2.2 参数标定

排土场涉及到的岩土体材料包括排弃物、煤层、和基岩三种地质材料参数, 其中的宏观力学参数无法直接用于数值模拟, 因此首先需要对数值模型的微观参数进行校准, 采用单轴压缩试验进行参数校准, 开发了

模型的数值模拟过程通常是通过对特定颗粒施加外力, 使颗粒间的法向和切向弹簧发生变形, 然后利用时间步进行迭代算法来观察该模型的受力、变形或损伤情况。

$$\begin{cases} F_{n1} = K_n \cdot X_{n1} \\ F_{s1} = K_s \cdot X_{s1} \\ F_{n2} = K_n \cdot X_{n2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_n 表示法向力, K_n 表示法向刚度, X_n 表示法向相对位移。当两个相邻颗粒间的法向相对位移小于或等于断裂位移时, 颗粒处于受压或受拉状态。当法向相对位移超过断裂位移时, 颗粒间的法向弹簧发生断裂, 颗粒间的法向力消失。

2 MatDEM 矩阵离散元模拟

某露天煤矿位于新疆, 由于征地原因目前内排土场台阶增高并与外排土场相连接形成复合边坡, 考虑到排土场物料为矿场各岩层破碎后混合堆积而来, 使用离散元模拟更能提高精度。

2.1 模型构建

矩阵离散元方法克服了宏观连续性的假设, 适用于模拟岩石的大变形或开裂等非线性行为, 可以较好的模拟出岩石破碎和颗粒之间的相互作用行为, 从而达到全面了解边坡滑坡后灾害影响和破坏范围的目的。

为了对现有边坡进行准确评估, 针对现场边坡失稳性定量评价以及数值模拟的结果, 并结合对其失稳机制的分析, 综合考虑选取出的剖面, 根据此剖面进行潜在滑动面的失稳演化分析。

三维单轴压缩模型, 参数标定原理见公式 2。该模型由直径为 4 米至 6 米的颗粒堆叠而成的, 模型高度为 500 米, 宽度为 2400 米, 总共有 5 万个颗粒组成。

$$E = \sigma_{zz} / \varepsilon_{zz} = \frac{6\sqrt{2}K_n(K_n + K_s)}{d(5K_n + K_s)} \quad K_n = \frac{\sqrt{2}Ed}{4(1-2\nu)} \quad (2)$$

将材料的物理力学参数赋给所建立的模型后, 进行单轴压缩模型的压缩试验模拟, 将模拟结果与材料的宏观力学参数进行比较, 并根据对比结果对模型的细观参数进行重新标定。随后, 再次进行压缩和拉伸试验的模拟。重复该操作, 直至数值模拟得到的力学参数与砂岩的实际物理力学参数一致, 表明数值模型的细观参数标定完成。图3代表参与参数标定的基底模型; 表1列出了三种材料数值模型标定完成后的微观参数。

2.3 数值模拟

30 次循环加载后的滑坡现状如下图所示, 排土场的滑坡模式为浅圆弧滑动, 能量在滑坡初期出现增加, 随后聚集, 在模拟的 5s 后能量趋于稳定; 在此次模拟中为了使得模拟的更加精准, 没有预设墙单元, 所以在边界受力曲线中几乎为 0; 观察其热量变化曲线可得, 该滑坡的圆弧滑裂带形成在加载的前几次循环, 后面循环趋于稳定。

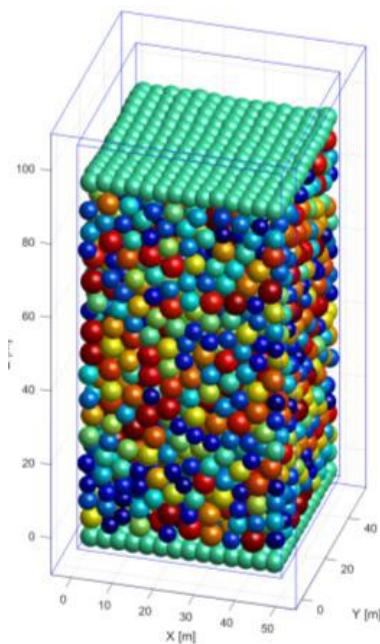
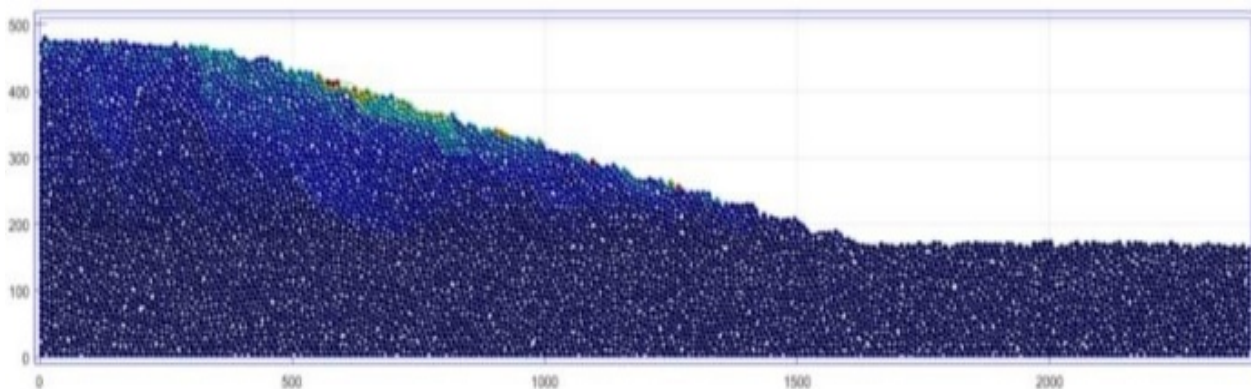


图3 参数标定模型

表1 不同岩性材料的微观参数

微观参数	排弃物	煤层	基底
正向刚度 k_n	7.71E+08	1.62E+10	1.83E+11
切向刚度 k_s	3.80E+08	1.02E+10	9.75E+10
断裂位移 X_b	2.95E-04	4.87E-04	4.14E-04
初始抗剪力 F_{s0}	6.54E+07	1.61E+09	3.67E+09
摩擦系数 μ_p	0.1786	0.0976	0.3964
单元质量 M_p	1.80E+05	1.40E+05	2.69E+05



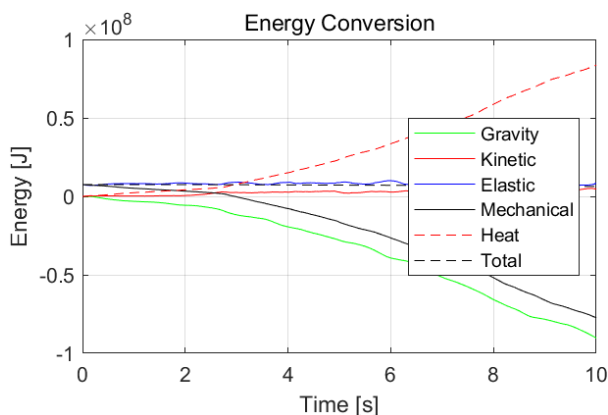


图4 滑坡后离散元颗粒模型

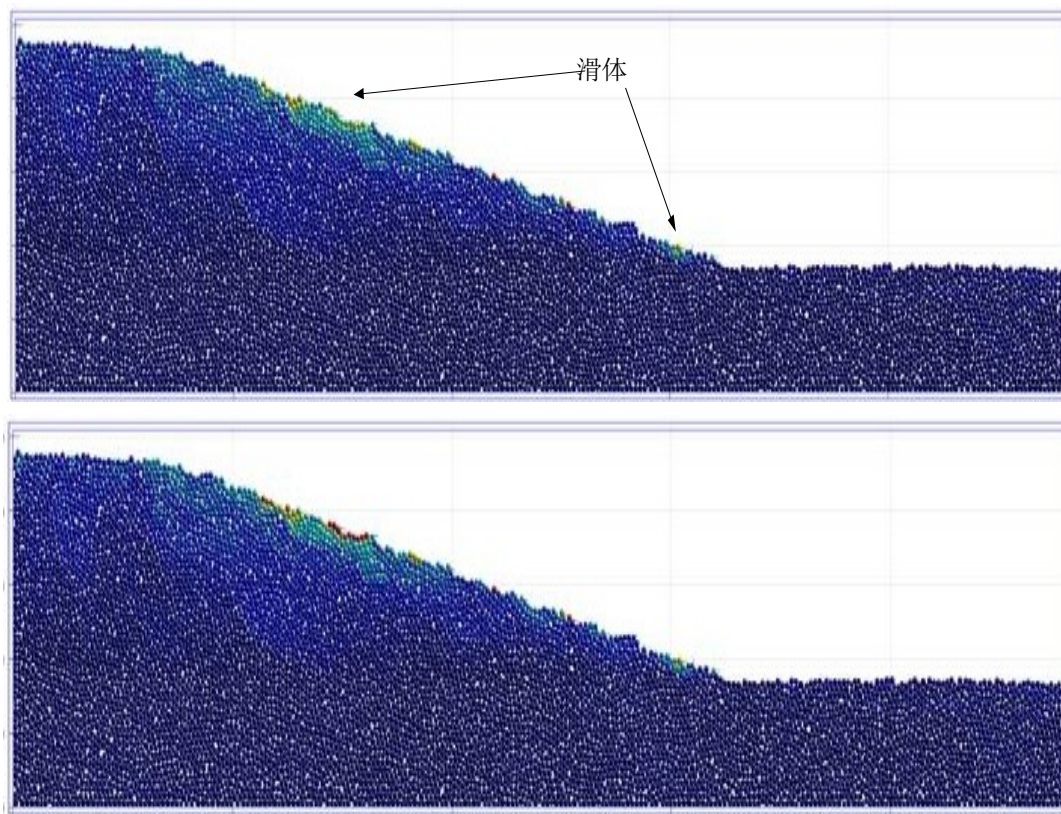


图5 滑坡随时间变化

3 结果分析

如图4所示为滑坡不同时刻的整体速度随时间的变化关系,在滑坡开始初期,边坡出现了滑移的趋势,只有少量速度较大的粒子出现在斜坡顶部附近,表明局部区域出现了较为活跃的运动迹象,但整体速度仍然较低。随着时间的推移,速度较快粒子的数量和分布范围逐渐增加,尤其出现在边坡的中部和底部,表明了滑坡活动正在逐步加剧,边坡中下部的滑移速度显著加快。随着滑坡现象的进一步发展,滑坡活动达到一个高峰,大量高速粒子分布在斜坡的中下部,显示出强烈

的运动趋势,滑坡体可能已经进入快速移动阶段。在滑坡进行至15秒时,滑坡活动开始减缓,高速粒子仅存在于斜坡的底部,表明滑坡体的速度开始降低。最终阶段,高速粒子完全消失,显示出滑坡活动基本结束,边坡趋于稳定。整体上滑体的速度呈现出先增加后降低的趋势。

4 结论与展望

本研究基于MatDEM离散元方法,系统分析了露天煤矿排土场在循环加载条件下的失稳机理与灾变演化规律。通过微观参数标定和宏观指标反演,建立了能

够真实再现裂隙萌生、扩展及滑体整体滑移的离散元模型。数值模拟结果表明,排土场滑坡主要由上部弱化层的应力集中引发,剪切带贯通后导致滑体快速失稳,并表现为从局部破坏向整体滑移演化的链式过程,揭示了滑坡灾变的时空演化特征。

研究进一步表明,滑坡演化过程中颗粒接触力链、位移场和速度场呈现明显的阶段性变化特征:初期局部区域活跃、能量缓慢积聚;中期剪切带贯通、整体速度快速上升;末期滑体运动逐渐衰减并趋于稳定。这一规律不仅为判别排土场失稳临界状态提供了科学依据,也为滑坡灾害的早期预警与风险控制提供了理论支持。

未来研究可从三个方面展开:一是引入 FEM-DEM 或 DEM-CFD 耦合模拟方法,进一步考虑地下水渗流、降雨及震动等多场耦合作用,以提高结果的工程适用性;二是结合遥感监测、倾斜摄影和现场监测数据,实现模型的动态校准与实时预测;三是探索大规模、高分辨率的并行计算方法,提高长时序、复杂边坡失稳模拟的效率与精度,为露天煤矿排土场的安全设计和灾害防控提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] Liu C, Xu Q, Shi B, et al. Mechanical properties and energy conversion of 3D closepacked lattice model for brittle rocks[J].Computers & Geosciences. 2017.103(C):12-20.
- [2] Wen, Y., Song, Z., Fan, J. et al. Research on controlled mining of end slope fire-burned area in open-pit mine. Sci Rep 14, 21152 (2024).
- [3] Song, Z., Wen, Y. & Jia, Z. Analysis of the impact of rock joint cracks on blastability of burnt rock in Xinjiang open pit coal mines. Sci Rep 15, 16179 (2025).
- [4] 宋子岭,贾正昭,文字.煤矿火烧岩爆破破碎机理及爆破参数优化[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(05):556-564.
- [5] 秦岩,刘春,张晓宇,等.基于 MatDEM 的砂土侧限压缩试验离散元模拟研究[J].地质力学学报,2018,24(05):676-681.
- [6] 梁立唯,刘春,秦岩,等.基于 MatDEM 的盾构滚刀破岩离散元建模与数值模拟[J].隧道与地下工程灾害防治,2019,1(03):116-122.
- [7] 刘文坊,文字,王健.基于 AHP 的露天矿连续采煤工艺适用性分析[J].煤炭技术,2025,44(07):130-135.
- [8] 范观盛,黄儒欢,刘春,等.基于 MatDEM 的岩石应力波传播与衰减特性敏感性分析[J].高校地质学报,2023,29(03):479-486.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

