

## 正断层作用下逆倾层状岩质边坡滑坡初步研究

廖信根\*

霍林郭勒古城露天煤业有限责任公司古城露天煤矿 内蒙古自治区霍林郭勒

**【摘要】**随着露天煤矿开采深度增加，断层影响下的逆倾层状岩质边坡稳定性问题日益突出。本文以霍林郭勒古城露天煤矿为工程背景，针对正断层 FD1 作用下的高陡逆倾边坡，采用 MatDEM 离散元数值模拟方法，开展滑坡破坏机制研究。通过构建含正断层的边坡细观模型，结合室内试验数据对泥岩、粉砂岩、褐煤等多类岩层材料进行微观参数标定，并开展重力作用下的动态演化模拟。研究结果表明：在正断层与逆倾层状结构共同作用下，边坡失稳呈现典型的顺层-切层复合滑动模式，滑动面沿断层上盘弱面起裂，并沿煤层底板软弱界面扩展，形成“头大尾小”的整体滑坡形态。该破坏机制揭示了正断层通过扰动应力场和提供滑移通道显著降低边坡稳定性的作用机理。研究成果为复杂地质条件下露天矿边坡稳定性评价与灾害防控提供了理论依据和实践参考。

**【关键词】**露天煤矿；断层；逆倾层状岩质边坡；滑坡；MatDEM

**【收稿日期】**2025 年 7 月 16 日

**【出刊日期】**2025 年 8 月 15 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20250390

### Preliminary study on landslides of the anti-dip layered rock slope under the action of normal faults

Xingen Liao\*

Huolinguole Gucheng Open pit Coal Industry Co., Ltd. Gucheng Open-pit Coal Mine, Huolinguole, Inner Mongolia Autonomous Region

**【Abstract】** With the increasing mining depth of open-pit coal operations, the stability of reverse-inclined layered rock slopes affected by faults has become an increasingly critical issue. Taking the Huolinguole Ancient City open-pit coal mine as the engineering background, this study investigates the landslide failure mechanism of high and steep reverse slopes influenced by the normal fault FD1 using the MatDEM discrete element numerical simulation method. A microscale slope model containing a normal fault was constructed and calibrated based on laboratory test data for mudstone, siltstone, and lignite to obtain the corresponding microscopic parameters. Dynamic evolution simulations under self-gravity were then conducted. The results show that under the combined influence of normal faults and reverse-inclined stratified structures, slope instability typically manifests as a bedding-shear composite sliding mode. The failure surface initiates along the weak plane of the hanging wall of the fault and propagates along the weak interface at the coal seam floor, forming an overall “large-head and small-tail” landslide morphology. This failure mechanism reveals how normal faults significantly weaken slope stability by disturbing the stress field and providing preferential slip pathways. The findings offer valuable theoretical guidance and practical reference for slope stability evaluation and disaster prevention in open-pit coal mines under complex geological conditions.

**【Keywords】** Open-pit coal mine; Fault; Anti-dip layered rock slope; Landslide; MatDEM

### 引言

随着我国露天矿山开采深度不断加大，边坡稳定性问题日益突出，已成为影响矿山安全生产和经济效益的关键因素<sup>[1]</sup>。据统计，我国露天煤矿边坡失稳事故年均发生率高达 12.3%，造成直接经济损失超过 15 亿元。特别是在地质构造复杂的矿区，断层作用对边坡稳

定性的影响不容忽视，而逆倾层状岩质边坡在露天煤矿中广泛分布，其稳定性受断层构造影响更为显著，亟需深入研究<sup>[2]</sup>。

已有研究表明，逆倾层状岩质边坡的稳定性主要受岩层倾角、层理面强度及外部荷载等因素影响<sup>[3]</sup>。然而，大多数研究集中于无断层条件下的边坡稳定性分

\*通讯作者：廖信根（1982-）男，汉族，湖南省新田县，本科，中级工程师，研究方向：露天开采。

析,而对正断层作用下边坡破坏机制的研究仍较为匮乏。现有数值模拟方法难以准确刻画断层带对岩体内部应力分布的扰动效应,导致对断层作用下边坡破坏模式的预测存在较大偏差,难以有效指导工程实践。

本研究旨在通过 MatDEM 离散元数值模拟方法,系统分析正断层作用下逆倾层状岩质边坡的滑坡破坏模式及其影响机制。研究提出两个核心问题:

(1) 正断层如何改变逆倾层状岩质边坡的破坏形态与滑动特征?

(2) 正断层对边坡稳定性的影响程度如何量化?

本文以某典型露天煤矿为研究对象,建立含正断层条件下的逆倾层状岩质边坡离散元模型,通过数值模拟

揭示断层作用下的边坡破坏机理。

### 1 露天矿区概况

霍林郭勒古城露天煤业有限公司古城露天煤矿,处于霍林河煤田沙尔呼热露天精查区西北部 15 号勘探线~27 号勘探线区间。目前该露天煤矿开采至 10 煤层,其上部分的 4、6、8 号煤层可采区域已开采完毕,由于正断层 FD1 的存在,矿区的西北帮已然形成了高、大且陡峭的逆倾层状岩质边坡,考虑到继续向下延申会导致边坡的高度继续增加,所以急需对现存的边坡进行可靠的稳定性分析。

采用矿山专业软件 3Dmine 以及工科软件 CAD 对该区域的边坡进行建模如下:

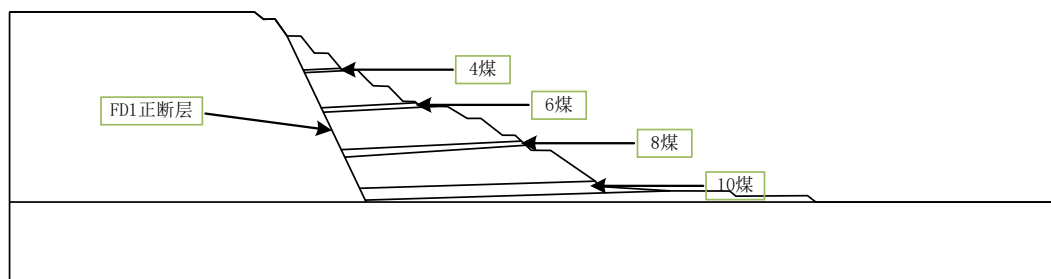


图 1 研究区域边坡形态

由上图可知 FD1 断层位于矿区的西北部,贯穿全区,呈北东-西南展布,倾向南东。根据北边帮的走向,确定为顺倾断层,该区域边坡属于逆倾边坡,从理论上分析边坡稳定性应优于其他位置边坡,但是由于该断层倾角较大,断层弱层面贯穿基底面,一定程度上导致边坡极易失稳。

### 2 MatDEM 离散元模拟

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。该软件的基本原理在此不加赘述,详细请参考文献<sup>[4]</sup>。

#### 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。为提高计算的精度以及可靠度,数值模型构建采用颗粒直径为 1.6~2.4 m 随机分布的小球,含断层的逆倾层状边坡数值模型如下图 2。

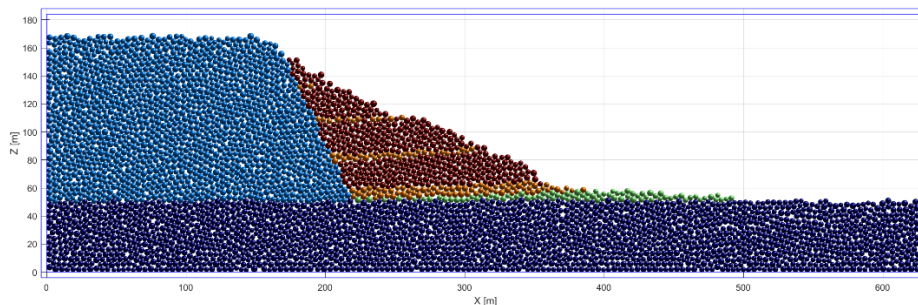


图 2 含断层逆倾层状边坡模型

## 2.2 参数标定

参数标定的核心原理是建立细观参数与宏观力学指标之间的定量关系。通过数值模拟,使 DEM 模型的宏观力学行为与实际岩土体的力学特性一致,从而确保数值模拟结果的可靠性<sup>[5]</sup>。露天采场涉及到的岩土体材料包括泥岩、粉砂岩、细砂岩、褐煤、和基岩五种地质材料参数,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,开发了三维单轴压缩模型,参数标定原理见公式 1。为了减小误差,本研究采用颗粒直径 1.6~2.4 m 的简化模型,尽管与实际粒径不符,但在保证力学相似关系与参数标定合理性的前提下,可用于揭示整体失稳演化规律。模型高度为

167 米,宽度为 644 米,总共有 1.6 万个颗粒组成。

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

将实验室试验得到的材料物理力学参数赋给所建立的模型后,进行三轴试验以及直剪试验,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<sup>[6]</sup>。随后,再次重复该操作,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褐煤模型;表 1 列出了五种材料数值模型标定完成后的微观参数。

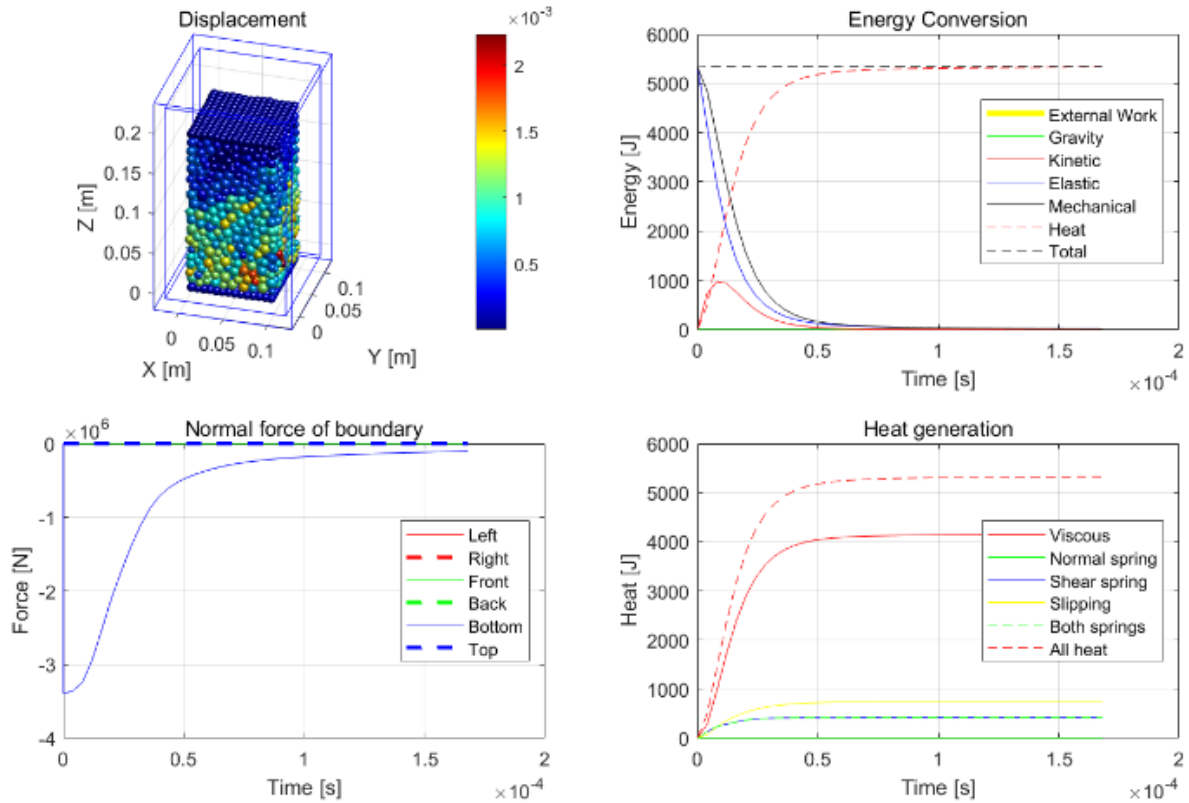


图 3 参数标定模型

表 1 不同岩性材料的微观参数

微观参数	泥岩	粉砂岩	细砂岩	褐煤	基底
正向刚度 $k_n$	7.71E+08	9.32E+07	4.23E+08	1.62E+10	1.83E+11
切向刚度 $k_s$	3.80E+08	7.560E+07	2.87E+08	1.02E+10	9.75E+10
断裂位移 $X_b$	2.95E-04	6.37E-04	5.84E-04	4.87E-04	4.14E-04
初始抗剪力 $F_{s0}$	6.54E+07	5.42E+07	5.61E+07	1.61E+09	3.67E+09
摩擦系数 $\mu_p$	0.1786	0.0857	0.0794	0.0976	0.3964
单元质量 $M_p$	1.80E+05	1.34E+05	1.21E+05	1.40E+05	2.69E+05

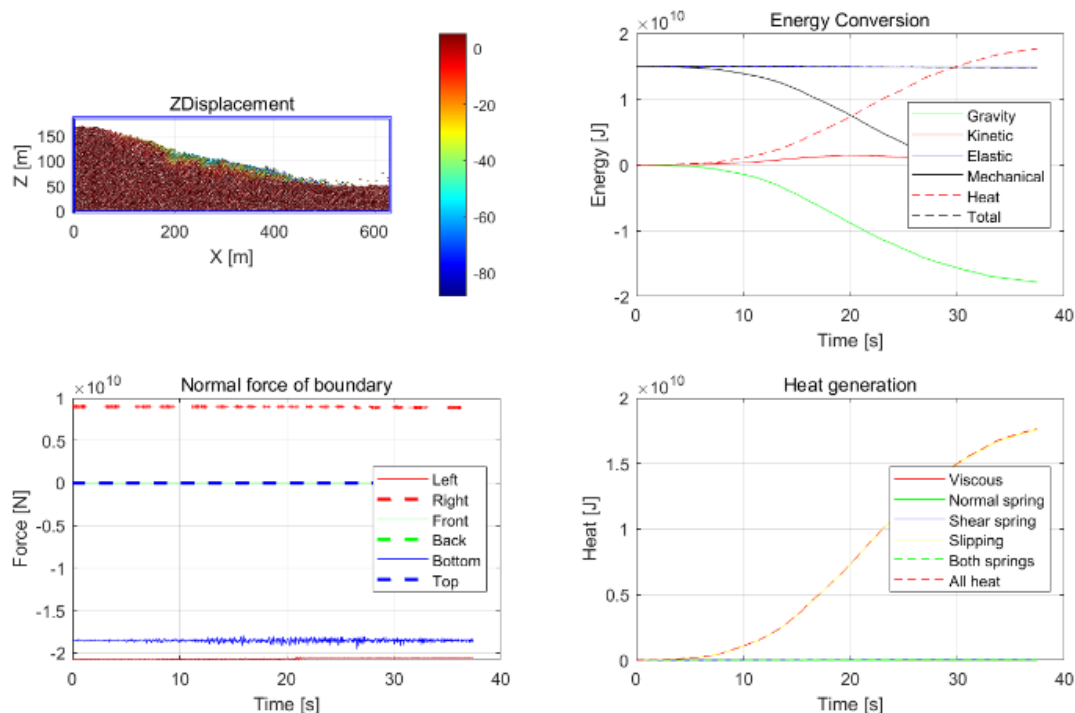


图4 顺层-切层滑坡颗粒模型

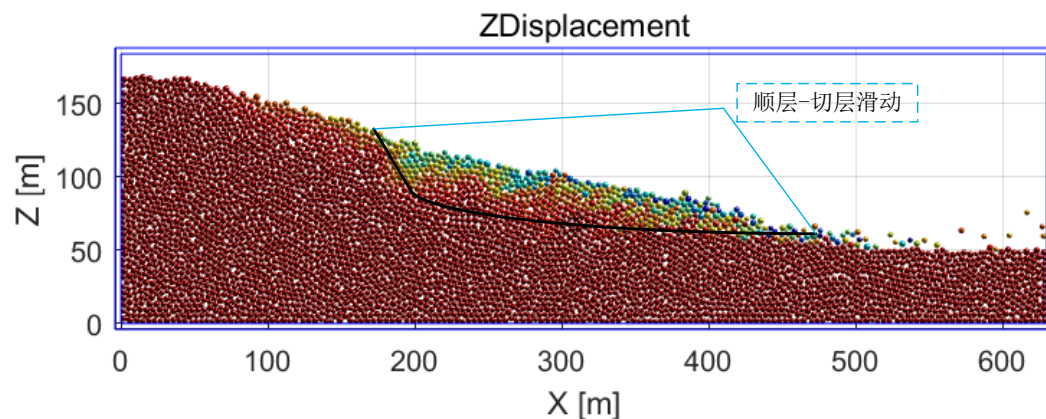


图5 数值模拟滑坡结果

### 2.3 数值模拟

模型上部不施加任何荷载以模拟自然条件下重力加速度对于滑坡的驱动力,每次循环计算时间为0.5 s,共加载80次,边界条件为底部固定、两侧约束水平位移<sup>[7]</sup>。80次循环加载后的滑坡现状如下图所示,正断层排土场的滑坡模式表现为顺层-切层滑动,初期能量快速积聚,随后逐渐趋于稳定,在模拟的8s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。

### 3 结果分析

如图5所示为80次循环下滑坡状态,结合图4分析得到。

滑坡破坏模式呈现出典型的复合特征:滑动面沿正断层上盘边缘发育,同时与煤层底板界面形成协同作用,导致滑坡体沿顺层与切层复合路径发生失稳。具体而言,滑坡体首先沿正断层上盘的断裂带(作为弱面和应力集中区)启动,随后沿煤层底板界面(即煤层与下伏灰岩或砂岩的接触面)延伸扩展,同时在滑动过程中切割上覆岩层,形成明显的顺层(沿岩层面)与切层(切割岩层)复合滑动特征。这种破坏模式的形成机制主要源于正断层活动性导致的岩体结构扰动与煤层底板的弱面性质共同作用,断层带显著降低了岩体抗剪



强度,而煤层底板则提供了易于滑动的软弱界面。滑坡体在重力作用下沿该复合路径发生整体失稳,前缘出现明显拉裂和鼓胀变形,后缘形成贯通性拉裂缝,整体滑坡形态呈现“头大尾小”的典型特征,与逆倾层状岩质边坡在正断层作用下的破坏机理高度一致。

#### 4 结论与展望

本研究通过 MatDEM 离散元数值模拟方法,系统分析了正断层作用下逆倾层状岩质边坡的滑坡破坏机制,得出以下主要结论:(1)正断层显著改变了边坡的破坏模式,滑动面沿断层上盘边缘与煤层底板软弱界面协同发育,形成典型的顺层-切层复合滑动特征;(2)断层带作为应力集中区和弱面结构,极大降低了岩体抗剪强度,成为滑坡启动的关键控制面;(3)在重力驱动下,滑坡体呈现“头大尾小”的整体失稳形态,后缘拉裂、前缘鼓胀的变形特征明显,揭示了断层-层状结构耦合作用下的失稳演化规律。

文章目前只是针对正断层对于逆倾岩质边坡进行了初步的研究,未来将进一步开展多断层组合、动态荷载(如爆破振动、降雨入渗)等复杂工况下的边坡稳定性研究,以提升模型的工程适用性<sup>[8]</sup>。同时,为了增加数值模拟的可说明性需要结合现场监测数据进行反演分析,实现数值模拟与实际工况的动态耦合,为露天矿边坡的智能预警与主动防控提供技术支撑。

#### 参考文献

- [1] 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.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Mao M ,Yang X ,Liu C , et al.Deformation monitoring at shield tunnel joints: Laboratory test and discrete element simulation[J].Deep Underground Science and Engineering,2025,4(01):149-157.
- [7] 张合勇,王雪冬,朱永东,等.冻融循环作用下露天煤矿内排土场土体力学特征及强度劣化机理[J].煤田地质与勘探,2023,51(11):119-131.
- [8] 王玉峰,明杰,冯止依,等.乱石包高速远程滑坡流态化运动模式及摩擦热效应研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(S2):3174-3188.

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/>

