

# 基于离散元方法的重复采动对顺层岩质边坡稳定性的影响研究

Study on the Influence of Repeated Mining on the Stability of Bedding Rock Slope based on Discrete Element Method

许一川<sup>1</sup>, 周建伟<sup>2</sup>, 李莹<sup>1</sup>, 师永霞<sup>1</sup>, 徐啸川<sup>3</sup>

(1. 河南省地质局生态环境地质服务中心, 郑州 450053; 2. 川藏铁路有限公司, 成都 610094;  
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为研究重复采动对顺层岩质边坡稳定性的影响, 基于离散元的方法, 利用 UDEC 软件建立二维数值模型, 通过分析不同开采深厚比、不同开采位置边坡的力学特征, 得出其力学响应机制。结果表明: 开采深厚比的变化对基底岩层影响十分显著, 随着深厚比的减小, 基底岩层位移不断增大, 剪应力不断减小, 垂直应力不断增大, 层面抗剪强度降低, 进而导致坡体稳定性降低; 开采深厚比的减小, 使陡崖岩体下沉, 进而导致软弱夹层位移量增大; 当深厚比不同时, 软弱夹层水平位移曲线变化规律大致相同, 整体上均呈现“先增大后减小”的变化趋势。研究可为顺层岩质边坡矿山的开采提供参考。

**关键词:** 顺层岩质边坡; 离散元; 重复采动; 稳定性

**中图分类号:** U416.1+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2025)02-0054-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.010

XU Yichuan<sup>1</sup>, ZHOU Jianwei<sup>2</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, SHI Yongxia<sup>1</sup>, XU Xiaochuan<sup>3</sup>

(1. Ecological Environment Geo-Service Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450053, China;  
2. Sichuan-Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610094, China; 3. School of Engineering, China  
University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to study the effect of repeated mining on the stability of bedding rock slope, this paper uses UDEC software to establish a two-dimensional numerical model based on the discrete element method. Through analyzing the mechanical characteristics of the slope under different mining depth ratios and different mining positions, the mechanical response mechanism is obtained. The main conclusions of this paper are as follows: the change of mining depth ratio has a significant impact on the basement rock, and with the decrease of the depth ratio, the displacement of the basement rock stratum is increasing, the shear stress is decreasing, the vertical stress is increasing, and the shear strength of the layer is decreasing, which leads to the reduction of slope stability; The reduction of the mining depth ratio will cause the steep rock mass to sink, and then lead to the increase of the displacement of the weak interlayer; When the depth ratio is different, the horizontal displacement curve of the weak interlayer has the same change rule, and the overall trend is "increase first and then decrease"; The study can provide a reference for the mining of bedding rock slope mines.

**Key words:** bedding rock slope; discrete element; repeated mining; stability

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674099)。

作者简介: 许一川(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 水工环地质。

通信作者: 周建伟(1983—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 隧道桥梁。

收稿日期: 2023-08-03

## 0 引言

随着“十四五”规划以及“一带一路”战略的实施,我国对能源的需求不断增大。在这一背景下,以煤炭为主的能源结构在短期内仍将占据主导地位,成为支撑国民经济发展的支柱。然而大部分矿产资源埋藏于山区地下,重复采动容易诱发严重的地质灾害<sup>[1-3]</sup>。其中开采导致顺层斜坡失稳现象频频发生<sup>[4]</sup>。目前,我国约有4万个矿山位于危险区,若发生地质灾害,国民经济将损失超过130亿<sup>[5]</sup>。为解决国家能源战略问题以及人民群众安全问题,研究矿山开采对边坡稳定性影响迫在眉睫。

近年来,国内外学者对顺层岩质边坡稳定性问题开展了大量的研究。Guo等<sup>[1]</sup>通过数值模拟与室内物理试验相结合的方式,研究了重复开采导致岩层移动和地表沉降的变化规律。在此基础上,Ren<sup>[2]</sup>进一步研究了地表以及采空区围岩的破坏特征。徐廷甫等<sup>[3]</sup>分析了诱发顺层岩质边坡失稳机理,从滑面角度考虑重复采动对顺层岩质边坡稳定性的影响,并基于极限平衡理论提出稳定性系数的估算公式。谭明健等<sup>[6]</sup>从多角度对顺层软硬互层岩质边坡进行了研究,发现顺层岩质边坡更易发生沿软弱夹层滑动;当边坡软弱结构面较多时,容易沿节理贯通面进行破坏。唐雨生等<sup>[7]</sup>采用应变软化本构模型定义软弱夹层,通过极限平衡法与有限差分法相结合的新方法对顺层岩质边坡稳定性展开研究,得出滑坡渐进破坏滑带强度与位移变化规律。刘洋等<sup>[8]</sup>通过振动台试验,研究不同地震烈度下顺层岩质边坡的动力响应特征,研究发现岩质边坡中上部出现不同程度的放大效应。而部分学者对边坡稳定性进行分析,并提出相应治理措施。潘林<sup>[9]</sup>基于FLAC 3D离散元数值模拟软件,建立三维顺层岩质边坡模型,研究了边坡开挖高度与支挡反力之间的关系,结果表明支挡反力随着高度的增加,出现非线性变化趋势。史彧等<sup>[10]</sup>依托京沪高速公路改扩建工程,研究了预应力锚索加固后边坡稳定性变化规律,得出锚索参数对边坡稳定性影响较大,其中锚索预应力>锚索长度>锚索倾角。魏中凯等<sup>[11]</sup>针对特长公路生态防护边坡土体表面应力数据拟合度低的问题,深入研究了考虑土层变形特征的边坡稳定性分析方法。

该方法基于有限元分析并结合极限平衡理论设计了边坡滑动模型,并利用圆弧滑动法计算土体内部应力。经过试验验证,该方法显著提升了土体表面应力数据拟合度。郝广杰<sup>[12]</sup>采用“桩板墙”法对上合院超高黄土斜坡进行防治设计,暴雨工况下,斜坡最不利剩余下滑力达191.47 kN/m,防治后变形速率趋于收敛,稳定性评价指标 $X_s$ 介于0.60~0.92,防治效果达Ⅱ级,提高斜坡稳定性。

尽管已有研究在边坡稳定性分析及支护工程方面取得了显著进展,但对于复杂地质条件下矿山开采引起的边坡失稳问题,仍需进一步深入研究,特别是对于顺层岩质边坡,其特有的地质结构和力学特性使其在开采活动中更容易发生失稳现象。因此,文章系统分析矿山开采对顺层岩质边坡稳定性的影响,探讨其失稳机制和防治措施,以期为顺层岩质边坡矿山的安全生产提供科学依据和实践指导。

## 1 工程概况

研究区为某矿区陡崖,区内主要分布有厚层灰岩,岩层产状为近南北走向,岩层倾角约为23°。陡崖表现为上陡下缓,崖内存在软弱夹层,软岩为泥岩,硬岩为灰岩。陡崖内存在节理,其内部由于风化剥蚀搬运堆积而导致应力-应变不一。该区域存在地表常年性支流,地表水系较为丰富,雨水充足。该地区新构造作用强烈,断裂活动频繁,其地震动峰值加速为0.15g,地震基本烈度为7度。

## 2 顺层岩质边坡二维模型建立

### 2.1 数值模拟方法

采用UDEC离散元软件模拟层状岩体采动破坏过程,通过初始应力平衡、几何简化建模、复合边界设定及裂隙动态演化分析,确保数值计算可靠性<sup>[13]</sup>。

### 2.2 模型的建立

(1) 模型尺寸 图1为数值模拟模型。模型以上覆岩层及陡坡为研究对象,模拟开采过程中坡体的变形和破坏垮落现象。由于研究区域范围较大,因此以研究区域内较为典型的边坡为例,建立数值模型。该模型全长约为600 m,高度155~500 m,危

# 岩土力学

岩体高 90 m，模型整体倾角为 23°，开采位置位于两侧边界各 100 m 内。

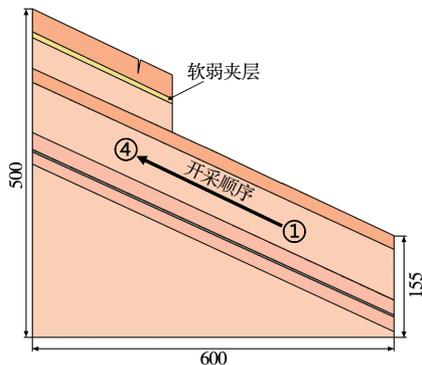


图 1 顺层岩质边坡模型

Fig. 1 Bedding rock slope model

(2) 边界条件 ①模型两侧施加位移边界条件。

②模型底部为自由面，采用位移固定边界；③模型上部为自由面，采用位移固定边界，将自重施加于模型上部。

(3) 本构关系 模型根据实际工程情况，块体模型选用摩尔-库仑模型，而节理模型选用面接触库仑滑移模型。

(4) 参数确定 数值模拟的正确性取决于细观参数的确定，室内力学试验直接获得了宏观力学参数，包括抗压强度、内摩擦角、黏聚力等。而 UDEC 的数值模拟软件并未给出细观力学参数与宏观力学参数之间的定量关系表达式，因此基于实际勘察资料以及相关规范对岩体细观参数进行确定，岩体参数确定结果见表 1、表 2。

(5) 二维模型建立 考虑现实的计算条件，将模型分成数块。模型全长约为 600 m，最大高度 500 m，危岩体高 90 m，模型整体倾角为 23°。

表 1 岩石细观力学参数

Table 1 Meso-mechanical parameters of rock

岩性	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	摩擦角 / (°)	黏聚力 /MPa	剪切模 量/GPa	体积模 量/GPa	抗拉强度 /MPa
灰岩 A	2 712	59.4	1.48	3.17	4.12	4.96
软弱夹层	1 933	16.1	0.23	0.89	2.99	0.98
灰岩 B	2 599	37.9	4.89	1.28	4.29	5.11
泥岩	2 765	18.7	1.19	7.50	16.12	1.19
黏土层	2 543	34.1	3.69	10.12	19.13	2.98
矿层 1	1 350	31.4	1.08	5.45	8.47	1.96
矿层 2	1 350	31.4	1.08	5.45	8.47	1.96
矿层 3	1 350	31.4	1.08	5.45	8.47	1.96

表 2 节理面参数

Table 2 Joint surface parameters

岩性	摩擦角 / (°)	黏聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa	法向刚度 /GPa	剪切模量 /GPa
灰岩 A	35.4	1.49	0.041	90.1	35.2
软弱夹层	14.9	0.03	0.395	1.3	0.5
灰岩 B	30.8	1.12	0.074	83.9	38.4
泥岩	14.7	0.86	0.029	73.6	23.8
黏土层	23.8	0.71	0.019	35.7	11.6
矿层 1	27.2	0.08	0.004	3.8	1.7
矿层 2	21.3	0.06	0.002	3.6	1.5
矿层 3	21.3	0.06	0.002	3.6	1.5
底板岩层	34.6	2.11	0.132	118.5	73.5

## 3 不同开采顺序对陡崖稳定性的影响

不同煤层开采顺序为由煤层 1 至煤层 2，最后开采煤层 3，同煤层下开采顺序依次为先开采区段 1，最后开采区段 4，开挖深度分别为 1、2、3 m，煤层距陡崖 238 m，因此开采深厚比分别为 238:1、119:1、79:1。

### 3.1 基底岩体位移分析

图 2 (a) 为不同开采深厚比基底岩体位移下沉量变化曲线。不同开采深厚比下，基底岩层位移下沉曲线变化规律基本一致，均表现为缓-陡-缓(平稳-下沉-平稳)的“S”形变化趋势。当开采位置位于基底 50 m 范围时，坡体基本不受采动的影响，基底岩层下沉量较小。当开采位置位于基底 50~170 m 时，基底岩层下沉量曲线出现非线性增长，此时坡体受采动影响较大，地下开采导致滑面下沉量增大，于 200 m 处下沉量趋于稳定，在稳定状态时，开采深厚比 238:1、119:1、79:1 的下沉值分别为 0.7、2.2、3.0 m。

同时可以发现开采深厚比与下沉量之间呈反比，当开采深厚比从 238:1 减小至 79:1 时，基底岩体位移下沉量明显增大，下沉量从 0.7 m 增大至 3.0 m，深厚比 79:1 时基底岩体的下沉量为 238:1 的 3.3 倍。

图 2 (b) 为不同开采深厚比基底岩体水平位移变化曲线。当深厚比不同时，其基底岩层水平位移曲线变化规律大致相同，均呈现“增大-减小-缓增-平缓”的变化趋势。在 90 m 左右，水平位移曲线达到最大值；在 50 m 处，水平位移曲线明显增大，这是由于此处岩层受开挖影响出现变形；在 100 m 处，水平位移达到峰值；在 200 m 处，水平位移曲线明显减小，水平位移量达到最低值，随后水平位移曲线将趋于

平稳状态。基岩水平位移的不断波动主要是由于数值模拟过程中出现块体翻转的现象, 该现象导致水平位移减小。

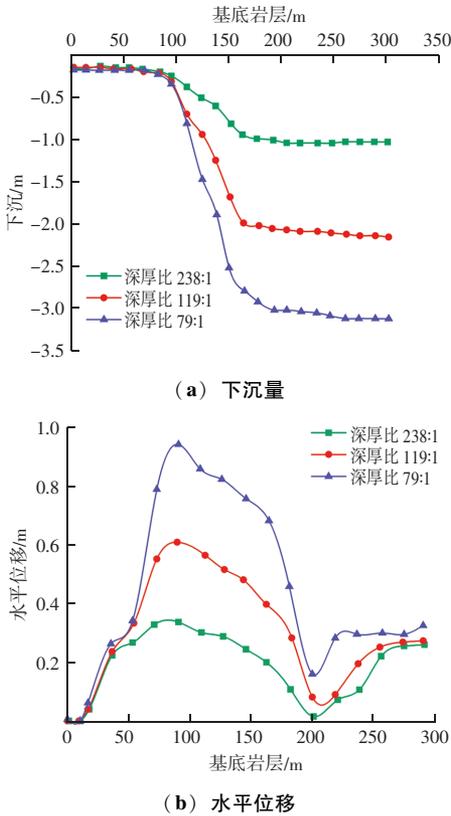


图2 基底岩体位移变化曲线

Fig. 2 Basement rock displacement change curve

图3 (a) 为不同开采深厚比基底岩层垂直应力变化曲线。当深厚比不同时, 其基底岩层垂直应力曲线变化规律大致相同, 均呈现“减小-增大-减小”的变化趋势。模型受到边界效应的影响导致左边界垂直应力达峰值, 垂直应力不断波动。当位于100 m时, 基底岩层垂直应力较小, 因此说明此时边坡受开采影响相对较小; 当位于180 m时, 垂直应力处于峰值状态, 出现该现象是由于开采导致陡坡向采空区转移, 进而导致压应力明显增大; 当位于275 m时, 上覆岩层减少, 垂直应力接近0。由上述可知, 随着深厚比的减小, 垂直应力显著增大, 陡坡稳定性急剧下降。

图3 (b) 为不同开采条件下深厚比变化剪应力变化曲线。当深厚比不同时, 其基底岩层剪应力曲线变化规律大致相同, 均呈现“反S形”的变化趋势。在180 m附近剪应力最小, 在220 m附近时剪应

力达到峰值。随着深厚比的减小, 剪应力不断减小, 层面抗剪强度降低, 进而导致坡体稳定性降低。

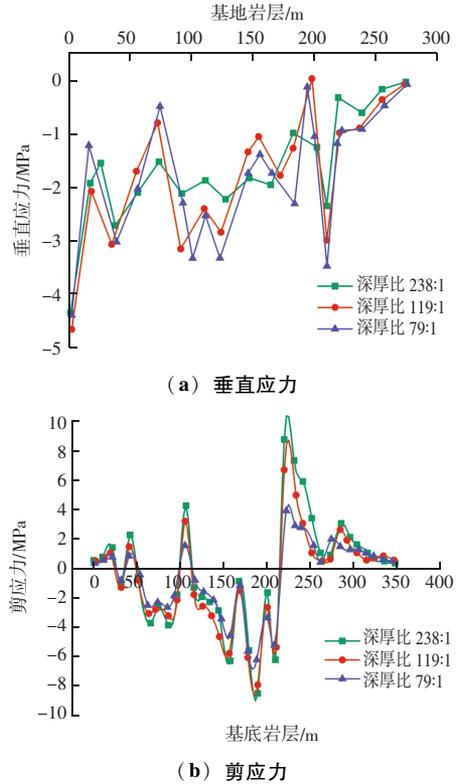


图3 应力变化曲线

Fig. 3 Stress change curve

为量化开采顺序的影响, 表3对比了不同开采阶段的位移增量。第三阶段(深厚比79:1)下沉量占三个阶段总位移的45%, 表明重复采动对基底岩体的累积损伤效应显著。此外, 基底水平位移在90 m处达到峰值(图2b), 与下沉曲线的拐点位置一致, 进一步验证了采动引起的岩体转移以剪切-拉裂复合模式为主。

表3 不同开采阶段基底岩体位移增量对比

Table 3 Comparison of basal rock displacement increments in different mining stages

开采阶段	深厚比	下沉量增量/m	水平位移增量/m
第一阶段	238:1	0.7	0.32
第二阶段	119:1	1.5 (+114.3%)	0.85 (+165.6%)
第三阶段	79:1	1.8 (+20.0%)	1.12 (+31.8%)

### 3.2 软弱夹层位移分析

图4 (a) 为不同开采深厚比下软弱夹层下沉曲线。软弱夹层下沉曲线变化规律与基底岩层下沉曲线类似, 在不同开采深厚比条件下, 下沉曲线呈现出“平缓-急剧增加”的变化趋势。当位于50 m

## 岩土力学

时, 软弱夹层下沉量较小, 此时受采动影响小。深厚比的减小会导致下沉量的增大, 此时采动会影响陡崖, 使陡崖岩体下沉。

图 4 (b) 为不同开采深厚比下软弱夹层水平位移曲线。当深厚比不同时, 软弱夹层水平位移曲线变化规律基本一致, 整体上呈现出“先增大后减小”的趋势。软弱夹层在 40 m 范围内受开采影响较小, 水平位移近似为 0; 在 200 m 附近时, 水平位移曲线达到最大值, 说明该处受开采影响较大, 软弱夹层出现明显位移。此外深厚比的减小, 会导致软弱夹层水平位移量增大。

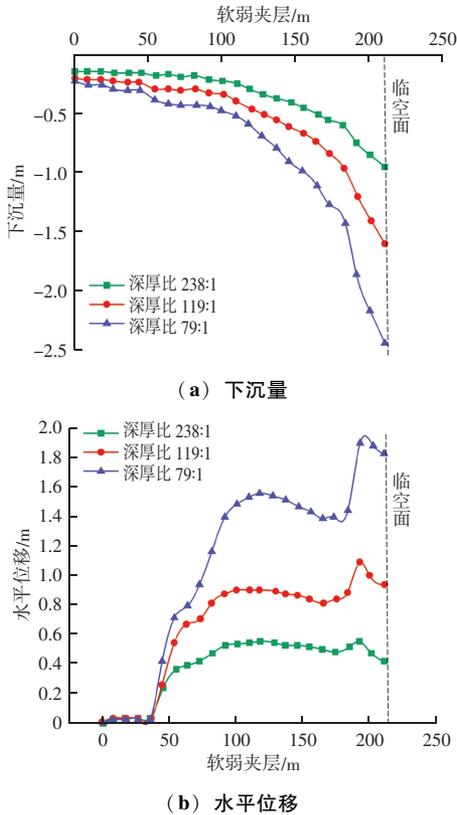


图 4 软弱夹层位移曲线  
Fig. 4 Weak interlayer displacement curve

### 3.3 陡崖岩体位移分析

在崖顶布设 6 个监测点, 监测崖顶岩体的水平 X 位移以及竖向 Y 位移, 监测点布设如图 5 (a) 所示。

将开采分为 3 个阶段: 深厚比为 238:1 时定义为开采第一阶段, 深厚比为 119:1 时定义为开采第二阶段, 深厚比为 79:1 时定义为开采第三阶段。

图 5 (b) 和 (c) 分别为陡崖监测点的竖向与水平位移时程曲线。结果表明, 测点 1~4 (位于卸

荷带附近) 的竖向位移在第三阶段达到 3.2 m, 较测点 5~6 (远离卸荷带) 高 76.4%。水平位移同样呈现显著的空间分异性, 测点 1~2 的位移峰值 (1.8 m) 为测点 3~6 的 2.3 倍。

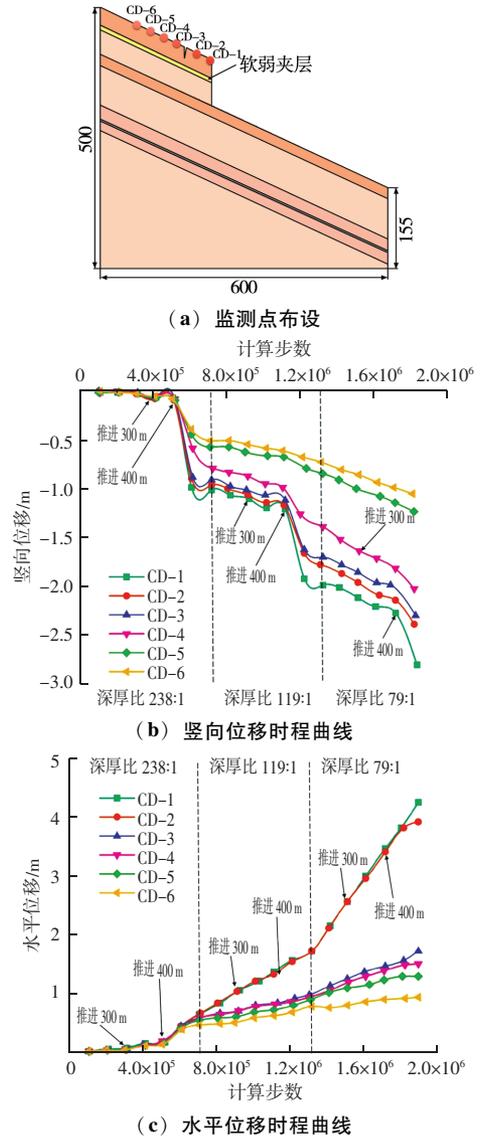


图 5 监测点布设及位移时程曲线  
Fig. 5 Layout of monitoring points and displacement time-course curves

通过位移速率指标 (表 4) 发现, 第三阶段的水平位移速率为 0.12 m/d, 较第一阶段提升 4 倍, 表明重复采动显著加速了危岩体的滑移进程。

表 4 监测点位移速率的比较

Table 4 Comparison of monitoring point displacement rates		
监测点	竖向位移速率/(m/d)	水平位移速率/(m/d)
1~4	0.08→0.21	0.03→0.12
5~6	0.05→0.09	0.01→0.04

## 4 结论

基于离散元方法，利用 UDEC 软件建立二维数值模型，针对研究区厚层灰岩顺层岩质边坡，模拟了不同开采深厚比和开采位置开采过程对边坡稳定性的影响，得到主要结论如下：

(1) 开采深厚比的变化，对基底岩层的应力以及变形影响显著，随着深厚比的减小，剪应力不断减小，垂直应力不断增大，层面抗剪强度降低，进而导致坡体稳定性降低。

(2) 随着深厚比的减小，由于卸荷作用以及煤层反复开采，导致软弱夹层下沉量以及水平位移量在不断增大。

(3) 在不同开采区段，卸荷带附近均受到开采影响而出现下沉，下沉幅度大于陡崖中下部。

## 参 考 文 献

- [1] GUO G L, ZHA J F, MIAO X X, et al. Similar material and numerical simulation of strata movement laws with long wall fully mechanized gangue backfilling [J]. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2009, 1 (1): 1089–1094.
- [2] REN W Z, GUO C M, PENG Z Q, et al. Model experimental research on deformation and subsidence characteristics of ground and wall rock due to mining under thick overlying terrane [J].

*International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47 (4): 614–624.

- [3] 徐廷甫, 尹志明, 邓月华. 地下采动条件下顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7 (6): 1241–1245, 1262.
- [4] 沈宁, 宗亮, 李萌, 等. 岩体扰动对岩石边坡稳定性影响 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2024, 38 (4): 40–46, 58.
- [5] 刘健. 变质岩类顺层边坡破裂迹象及边坡开挖失稳范围研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2024, 38 (3): 91–96.
- [6] 谭明健, 周春梅, 孙东, 等. 软硬互层顺层岩质边坡破坏试验 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41 (2): 274–281+324.
- [7] 唐雨生, 苏培东, 马云长, 等. 含软弱夹层的顺层岩质滑移渐进破坏研究 [J]. *自然灾害学报*, 2021, 30 (6): 155–165.
- [8] 刘洋, 马素健, 张良, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力稳定性研究 [J]. *铁道建筑*, 2020, 60 (12): 97–100.
- [9] 潘林. 地震作用下顺层岩质边坡桩锚支护体系动力响应研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [10] 史彧, 李兴华, 赵瑞欣, 等. 顺层岩质边坡锚索锚固参数与优化设计分析 [J]. *公路*, 2022, 67 (10): 1–8.
- [11] 魏中凯, 杨智强, 李锐鹏. 超高黄土不稳定斜坡的防治设计及效果评价 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2023, 37 (3): 58–65.
- [12] 郝广杰. 考虑土层变形特征的边坡稳定性分析方法研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2023, 37 (2): 62–67.
- [13] 许明, 余小越, 赵元平, 等. 顺倾层状碎裂结构岩质边坡地震动力响应及破坏模式分析 [J]. *岩土力学*, 2023, 44 (2): 362–372.

(上接第 36 页)

## 参 考 文 献

- [1] 郑溢雯, 吴俊, 杨爱武, 等. 采用固体硅酸钠激发的一步法地质聚合物在软土固化中的适用性研究 [J]. *岩土力学*, 2024, 45 (7): 2072–2084.
- [2] 赵金钰, 夏蕾, 张扬. 环氧树脂掺杂对地质聚合物木材胶黏剂性能的影响 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46 (8): 15–24.
- [3] 余金虎, 李强, 刘学应, 等. 地质聚合物混凝土抗氯离子渗透性能研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2024, 43 (7): 2503–2513.
- [4] 杨兴春, 吴渊, 孙志高, 等. 富镁镍渣-粉煤灰基多孔地质聚合物性能研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2023, 37 (3): 77–83.
- [5] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. *粉煤灰综合利用*, 2022, 36 (5): 58–66.
- [6] 张逸超, 杨昊霖, 吴晓鑫, 等. 地质聚合物混凝土力学性能、耐久性及微观结构综述 [J]. *混凝土*, 2024 (11): 84–87, 92.

- [7] 龙庆辉, 李曙光, 章本本, 等. 地质聚合物固化软土的力学特性及微观机理分析 [J]. *铁道建筑*, 2024, 64 (7): 136–142.
- [8] 王新富, 赵恒, 吴求刚, 等. 粉煤灰/磷尾矿地质聚合物的制备及性能表征 [J]. *材料科学与工程学报*, 2024, 42 (6): 999–1006.
- [9] 王志航, 白二雷, 周俊鹏, 等. 玄武岩纤维增强地质聚合物混凝土的动态力学性能 [J]. *振动与冲击*, 2024, 43 (19): 134–144.
- [10] 田崇霏, 王亚洲, 刘晓海, 等. 钢纤维对粉煤灰-矿渣地质聚合物工作性及力学性能的影响研究 [J]. *混凝土*, 2024 (6): 121–125, 133.
- [11] 李洁, 伊元荣, 刘伟, 等. 氢氧化钠对地质聚合物制备及高温力学性能影响 [J]. *环境科学与技术*, 2024, 47 (5): 46–54.
- [12] 王家河, 何宇轩, 华颖, 等. 碱激活法制备轻质牡蛎壳地质聚合物的结构与性能 [J]. *陶瓷学报*, 2023, 44 (6): 1231–1239.