

露天矿山多级土质边坡稳定性分析及加固技术

袁 瑞^{1*}, 潘生强¹, 傅家亮¹, 李传振², 黄 河², 强秋平³, 薛兴太³, 曹兴丹³

¹滁州市兴天矿业有限公司, 安徽 滁州

²安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

³华东冶金地质勘查局八一一地质队, 安徽 滁州

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月24日; 发布日期: 2025年9月10日

摘 要

本文基于现场调查、模拟分析、工程实践等, 对天长市谕兴地区建筑用玄武岩矿矿界边坡稳定性进行调查、分析, 分析结果表明: 1、矿界东、南侧形成以+40 m、+30 m、+20 m为平台的三级土质边坡, 坡高7~10 m, 坡度约30~40°; 2、PM1、PM2、PM3三个剖面天然工况下边坡安全系数分别为1.19、1.23、1.17, 暴雨工况下边坡安全系数分别为1.08、1.06、1.02, 表明正常工况下边坡是稳定的, 但暴雨工况下边坡存在失稳风险; 3、多级边坡采取了微型抗滑桩板墙加固工程、坡面加固工程、坡肩加固工程、边坡监测工程等措施, 确保边坡稳定。

关键词

露天矿山, 多级土质边坡, 边坡稳定性, 加固技术

Stability Analysis and Reinforcement Technology for Multi-Level Soil Slopes in Open-Pit Mines

Rui Yuan^{1*}, Shengqiang Pan¹, Jialiang Fu¹, Chuanzhen Li², He Huang², Qiuping Qiang³, Xingtai Xue³, Xingdan Cao³

¹Chuzhou Xingtian Mining Co., Ltd., Chuzhou Anhui

²School of Earth & Environmental Sciences of Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

³Geological Team 811 of East China Metallurgical Geological Exploration Bureau, Chuzhou Anhui

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 24th, 2025; published: Sep. 10th, 2025

*第一作者。

文章引用: 袁瑞, 潘生强, 傅家亮, 李传振, 黄河, 强秋平, 薛兴太, 曹兴丹. 露天矿山多级土质边坡稳定性分析及加固技术[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 934-942. DOI: 10.12677/me.2025.135106

Abstract

Based on field investigations, simulation analysis, and engineering practices, this article investigates and analyzes the stability of the slope boundary of the basalt mine used for construction in the Yuxing area of Tianchang City. The analysis results show that: 1. Three-level soil slopes with platforms at +40 m, +30 m, and +20 m are formed on the east and south sides of the mine boundary, with a slope height of 7~10 m and a gradient of about 30°~40°; 2. The safety factors of slopes under natural conditions for profiles PM1, PM2, and PM3 are 1.19, 1.23, and 1.17, respectively, while the safety factors under rainstorm conditions are 1.08, 1.06, and 1.02, respectively. This indicates that the slope is stable under normal conditions but poses a risk of instability under rainstorm conditions; 3. Measures such as micro-pile sheet wall reinforcement engineering, slope surface reinforcement engineering, slope shoulder reinforcement engineering, and slope monitoring engineering have been adopted for multi-level slopes to ensure their stability.

Keywords

Open-Pit Mine, Multi-Level Soil Slope, Slope Stability, Reinforcement Technology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着工业化进程加快对矿产资源的需求量剧增,露天开采因其产能大、效率高、成本低等优点在矿产开采中占有重要地位。露天开采过程中为了生产需要往往形成大量高陡边坡,常常引发滑坡、崩塌等地质灾害,对矿山作业人员生命安全及生产设备造成严重威胁[1][2]。边坡的安全管理一直是露天矿山日常管理的核心,因此对露天矿山边坡稳定性的研究具有必要性和紧迫性[3]。

露天矿山边坡稳定性问题一直是岩土工程领域一个重要问题,尤其是多级边坡的稳定性备受关注[4]。边坡稳定性主要受矿体成因和赋存条件、岩体性质、区域应力场、地下水和爆破振动等因素影响[5][6]。不同露天矿山由于所处的地质环境不同,边坡设计与开采工艺不同,边坡稳定性差别较大,因此必须对边坡稳定性进行具体分析,必要时采取合理的防护措施,才能确保矿山安全生产与生态文明建设的协调发展[7]。

天长市谕兴地区建筑用玄武岩矿在基建过程中已在矿界形成三级边坡,且主要为土质边坡,边坡的稳定性对后期矿山安全生产造成重要影响。本文主要通过现场调查及综合分析,分析多级土质边坡稳定性,并提出合理的边坡加固技术,为矿山安全生产及绿色矿山建设提供参考。

2. 矿界边坡基本情况

2.1. 矿山基本情况

天长市谕兴地区建筑用玄武岩矿位于天长市金集镇谕兴社区,开采矿种为建筑用玄武岩,开采方法为露天开采。矿山采用公路开拓汽车运输,自上而下水平分台阶开采,生产台阶高度为 15 m (第四系及风化层为 10 m),安全平台宽度 5 m,清扫平台宽度 8 m。终了台阶坡面角 65°,采场最高开采标高+50 m,最低开采标高-70 m,最终边坡角 26°~50°。

矿区地貌类型为波状平原，地形起伏较小，地面标高 43~47 m。据勘查资料揭示，区内地层岩性变化较大，第四系松散层厚度 12~15 m，下覆基岩风化显著，风化层厚度较大，岩体结构多样，水文地质条件较复杂，工程地质性质较差。研究区地震基本烈度为Ⅵ度，地震动峰值加速度为 0.10 g，地震活动不强烈。

目前矿山基建范围主要包括：新修开拓运输道路；形成+40 m、+30 m 剥离工作面及+20 m、+5 m 首采工作面。目前在矿界东、南侧已形成三级边坡，平台标高分别为+40 m、+30 m、+20 m，其中+40 m、+30 m 为安全平台，+20 m 为清扫平台。

2.2. 矿界边坡特点

根据矿区地质环境条件及矿山开采设计，目前已在矿界东、南侧形成三级边坡，即坡顶~+40 m、+40 m~+30 m、+30 m~+20 m，其中+40 m 平台以上坡高约 4~7 m，坡度约 40°；+40 m~+30 m、+30 m~+20 m 边坡坡高均为 10 m，坡度 30°~35°。+40 m 平台、+30 m 平台宽度为 5 m，+20 m 平台宽度为 8 m。矿界南侧坡长约 600 m，东侧坡长约 400 m，坡顶修建截水沟，坡体每隔 100 m 左右自上而下修建一条排水沟。

据勘查资料及实揭地质情况可知，矿区目前形成三级边坡主要为土质边坡(下部局部为风化岩)，坡体自上而下揭露岩土层依次为耕植土、粉质粘土、火山角砾岩、粘土岩、火山角砾岩、粘土岩、玄武岩等，岩土体分布情况参见图 1、图 2。岩土体工程性质具体如下：

粉质粘土层，厚度 12.0~14.0 m，褐色 - 黄褐色，稍湿，主要由粘土矿物组成，液性指数-0.22~0.26，可塑至硬塑状。

火山角砾岩层，在研究区内分上下二层，上层厚度 4.5~7.5 m，下层厚度 3~5 m，灰白色，火山角砾结构、块状构造，砾石主要为玄武岩角砾，含量约 60%，粒径 3~10 cm，分选差，基质主要为火山灰，含量约 40%，胶结性差，遇水易软化，工程性质差。

粘土岩层，也分为上下二层，上层厚度 3.0~4.0 m，局部缺失，下层厚度 3~5 m，灰绿色，泥质结构，粘土构造，主要由膨润土、伊利石等粘土矿物组成，遇水易软化和膨胀，失水后收缩，工程性质差。

玄武岩层，主要分布在+15 m 标高以下，呈灰黑色，间粒结构，致密块状构造。矿物成分主要为基性斜长石、普通辉石、少量橄榄石等，强度高，工程性质良好。

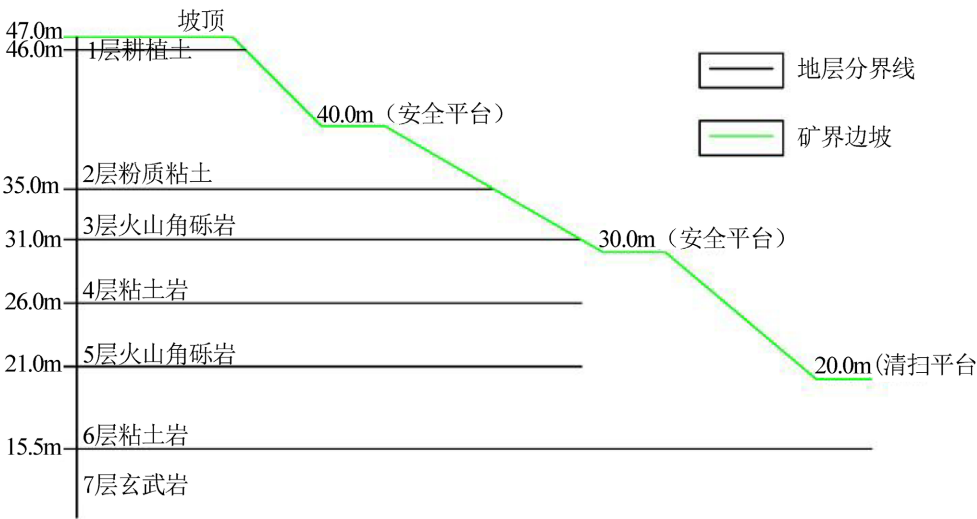


Figure 1. Schematic diagram of the slope morphology and soil layers of the mining boundary
图 1. 矿界边坡形态及坡体土层示意图

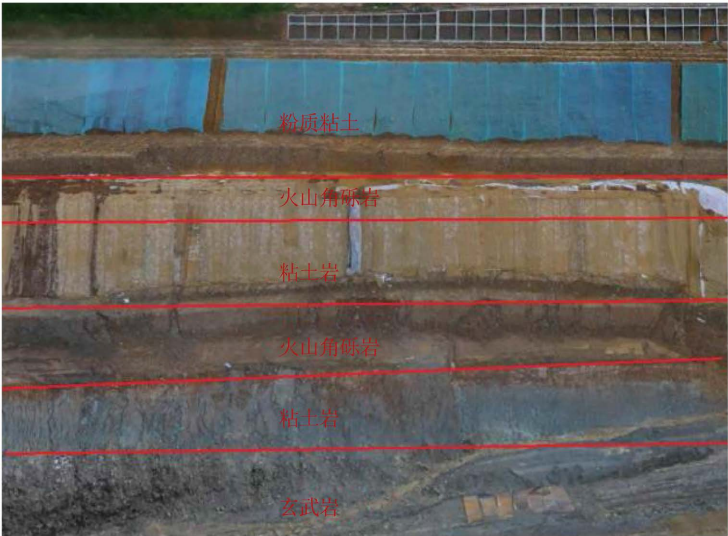


Figure 2. Image of the actual exposed strata on the slope of the mining boundary
图 2. 矿界边坡实揭地层影像图

3. 边坡稳定性分析

3.1. 计算参数测试与选取

Table 1. Parameters for various rock and soil masses in stability calculation
表 1. 边坡稳定性计算岩土体参数

岩土名称	密度(g/cm ³)		内摩擦角(°)		粘聚力(kPa)	
	自然	饱和	自然	饱和	自然	饱和
耕植土	1.80	2.00	8.0	6.8	12.0	9.5
粉质黏土	1.97	2.08	18.9	13.5	50.9	28.0
粘土岩	1.95	2.07	18.3	13.4	60.9	30.0
火山角砾岩	1.96	2.05	19.2	10.0	61.8	18.0
玄武岩	2.59	2.66	18.3	15.0	28310.0	26000.0

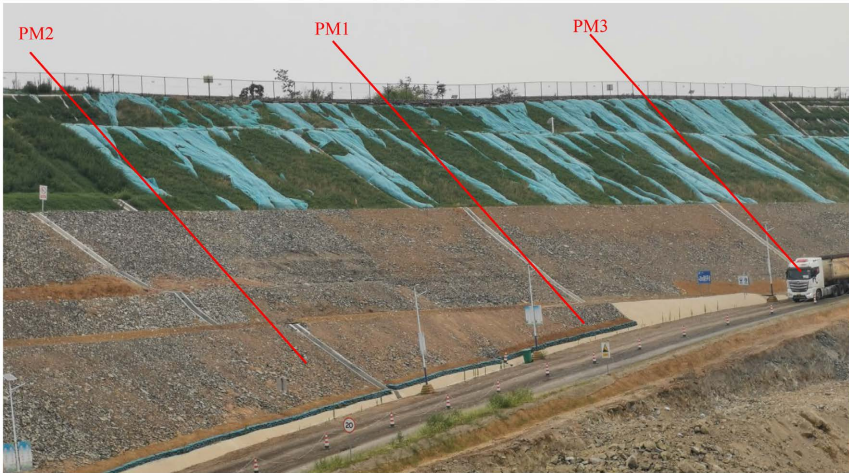


Figure 3. Schematic diagram of section line position
图 3. 剖面线位置示意图

本次稳定性计算采用南京库仑软件技术有限公司开发的计算软件“土质边坡稳定分析 GEO5”。本次研究利用现场勘查采取的岩土样，依据《土工试验方法标准》GB/T50123-2019 进行了岩土样室内测试分析，并进行分层统计分析，获取各岩土层物理力学指标。计算时岩土参数以统计值为基础，以反算值进行校核；饱和岩土体参数将主要计算指标进行折减取值，综合选取边坡稳定性计算岩土体参数，具体如表 1 所示。根据矿界边坡变形特征选取矿界南部边坡 PM1、PM2、PM3 三个剖面作为边坡稳定性计算剖面，分别计算一般工况下及暴雨工况下边坡稳定性系数。剖面线位置详见图 3。

3.2. 稳定性计算

依据三个剖面实揭地层情况建立地质模型，结合表 1 中各岩土体相关岩土参数进行边坡稳定性分析。分析结果详见图 4~9 及表 2。

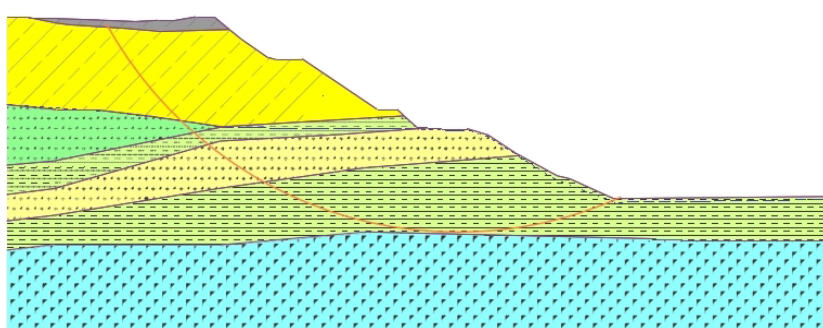


Figure 4. Calculation result diagram under natural operating conditions of PM1
图 4. PM1 天然工况条件下计算结果图

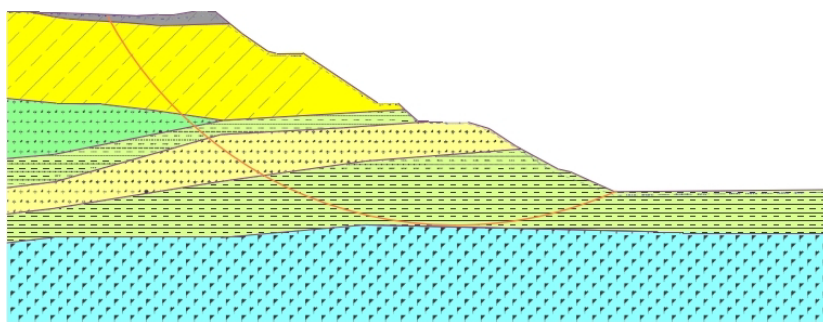


Figure 5. Calculation result diagram under PM1 rainstorm condition
图 5. PM1 暴雨工况条件下计算结果图

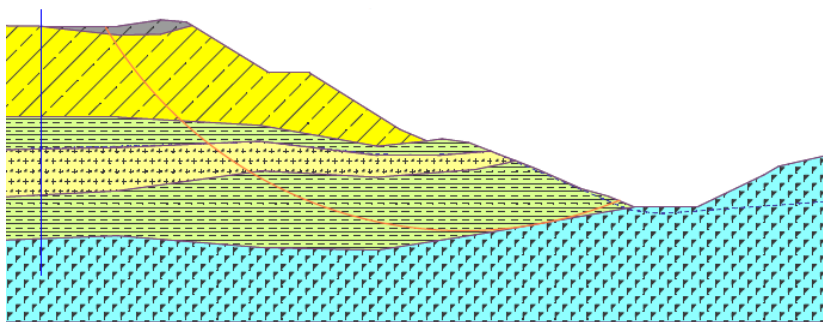


Figure 6. Calculation result diagram under natural operating conditions of PM2
图 6. PM2 天然工况条件下计算结果图

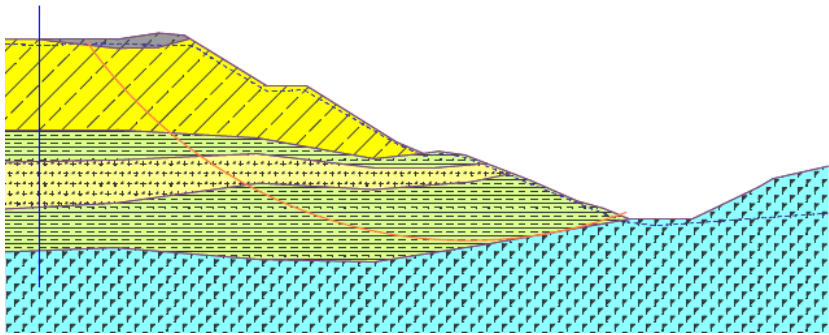


Figure 7. Calculation result diagram under PM2 rainstorm condition
图 7. PM2 暴雨工况条件下计算结果图

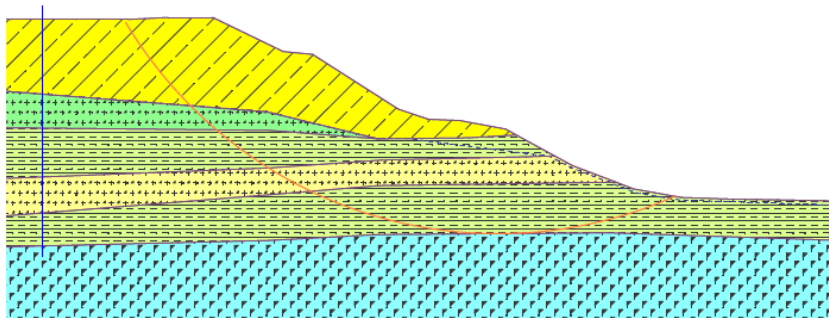


Figure 8. Calculation result diagram under natural operating conditions of PM3
图 8. PM3 天然工况条件下计算结果图

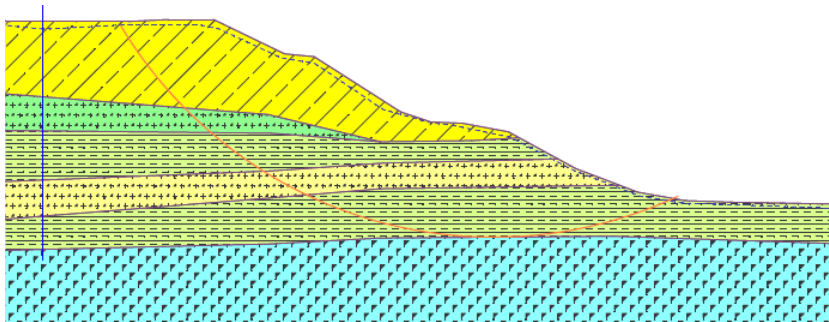


Figure 9. Calculation result diagram under PM3 rainstorm condition
图 9. PM3 暴雨工况条件下计算结果图

Table 2. Calculated values of slope safety factor
表 2. 边坡安全系数计算值

剖面编号	安全系数 F_s	
	天然工况	暴雨工况
PM1	1.19	1.08
PM2	1.23	1.06
PM3	1.17	1.02

3.3. 结果讨论

根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T32864-2020)滑坡稳定性评价分级标准详见表 3。

Table 3. Classification of landslide stability status
表 3. 滑坡稳定性状态划分

安全系数 F_s	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < 1.15$	$F_s \geq 1.15$
稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

由 PM1~PM3 三个剖面边坡稳定性计算结果可知，天然工况下边坡稳定性系数为 1.17~1.23，均大于 1.15，处于稳定状态。暴雨工况下 PM1、PM2 边坡稳定性系数为 1.08、1.06，介于 1.05~1.15 之间，处于基本稳定状态，PM3 边坡稳定性系数 1.02，介于 1.00~1.05 之间，处于欠稳定状态。由三个剖面边坡稳定性系数计算结果分析，矿界边坡在天然工况下均处于稳定状态，但在暴雨工况下稳定性显著降低，甚至出现失稳可能性，因此应采取合理的加固措施，确保暴雨工况下边坡也具有较好的稳定性。

4. 边坡加固措施

由于边坡在暴雨工况下安全系数较低，甚至局部可能产生失稳。为了矿山安全生产考虑，须对矿界边坡采取必要的加固措施。结合矿界边坡变形破坏特点及工程经验，除了必要的截排水工程外，对矿界边坡宜采取微型抗滑桩板墙加固工程、坡面加固工程、坡肩加固工程、边坡监测等措施，具体施工工艺参见图 10~13。



Figure 10. Image of mine boundary slope
图 10. 矿界边坡影像图



Figure 11. Reinforcement project using micro-anti-slide pile and slab wall
图 11. 微型抗滑桩板墙加固工程



Figure 12. Slope shoulder reinforcement project
图 12. 坡肩加固工程



Figure 13. Slope reinforcement project
图 13. 坡面加固工程

微型抗滑桩板墙加固工程，主要目的是加固+20 m~+30 m 之间边坡，在+20 m 平台坡脚内侧设置一排微型抗滑桩板墙进行加固。微型桩采用 22b 型工字钢，桩间距 3.0 m，桩径 0.3 m，桩基础嵌入岩土体 3.0~11.0 m，底部嵌入玄武岩基岩 3.0 m；板墙采用 C30 细石混凝土浇筑，高度 2 m，墙后采用粘性土进行填充、压实。

坡面加固工程，主要在+30 m、+40 m 平台以上边坡采用蜂巢护坡土工格室并进行复绿，利用蜂窝状网格体系，减轻水流对坡面的冲蚀。蜂巢护坡土工格室采用高分子纳米复合材料，格室高度 20 cm，格室尺寸 400 mm × 400 mm，将蜂巢护坡土工格室展开后铺设在平台和坡面上，将其固定后进行填土种草，填土高度高于格室 5 cm。草籽可选用适宜当地生长的狗牙根、高羊茅、刺槐、蔷薇等；此外在+20 m 平台及以上局部边坡敷设一层块石，粒径 5~20 cm，敷设厚度 30~50 cm，实现对坡面土体加固及防冲刷的目的。

坡肩加固工程，在+30 m 平台、+20 m 平台坡肩处打入一排预制混凝土桩，桩间距 0.8 m，对平台进行加固，桩截面尺寸 20 cm × 20 cm，长度 4.0 m，进入硬塑粘土 0.5 m 为止，预制板混凝土为 C30，4 根

12 mm 主筋, 箍筋不小于 8 mm。

边坡监测, 在矿界边坡上布设一定数量的变形监测点, 采用 RTK 卫星定位系统定期进行监测, 及时了解矿界边坡变形特征, 为保障矿山安全生产提供技术支撑。

5. 结论

本次针对天长市谕兴地区建筑用玄武岩矿界边坡, 通过现场调查、勘探及测试, 查明边坡形态特征及工程地质条件, 分析了多级土质边坡稳定性。PM1、PM2、PM3 三个剖面天然工况下边坡安全系数分别为 1.19、1.23、1.17, 暴雨工况下边坡安全系数分别为 1.08、1.06、1.02, 表明正常工况下边坡是稳定的, 但暴雨工况下边坡稳定性变差, 存在局部失稳风险。针对矿界边坡存在的失稳风险, 可通过采取微型抗滑桩板墙加固工程、坡面加固工程、坡肩加固工程、边坡监测等措施, 确保矿界边坡稳定。

参考文献

- [1] 陈阳, 吕辉, 毕莹, 等. 国内外典型露天矿山坍塌事故案例分析与启示[J]. 中国煤炭, 2024, 50(4): 63-67.
- [2] 王尧. 露天矿山崩塌地质灾害的形成机理及防治研究[J]. 冶金与材料, 2024, 44(1): 178-180.
- [3] 朱涛, 许汉华, 赵绍兴, 等. 云南某露天煤矿排土场边坡稳定性分析[J]. 江西建材, 2022(3): 100-102.
- [4] 谢荣福, 李亮, 赵炼恒. 土体参数对多级均质边坡滑动面的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1023-1031.
- [5] 邓焱, 郝喆, 尹亮亮, 等. 露天矿逆层高边坡稳定性及滑坡机理分析[J]. 采矿技术, 2021, 21(3): 73-76.
- [6] 张秋燕. 露天矿山边坡稳定性研究现状及稳控技术[J]. 现代矿业, 2024(3): 7-12.
- [7] 黄莹. 露天矿山高边坡地质环境治理模式探讨[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S2): 243-247.