

露天矿并段台阶边坡崩塌诱因分析及治理方案研究^①

刘杨¹, 李京², 张长锁¹, 江科³

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 2. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 3. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 针对某露天矿并段台阶边坡崩塌问题, 综合运用工程地质分析、赤平投影分析及力学分析等手段, 深入探讨诱导边坡崩塌的主要因素, 基于边坡崩塌诱因及失稳特征提出了治理方案, 并进行详细论证。结果表明: 台阶边坡崩塌是在岩体性质及风化裂隙面的控制下受到降雨入渗及开挖并段的共同作用而产生, 采用“重力式挡墙压脚+碎石土回填+锚喷支护”治理方案, 治理后的边坡整体稳定性系数为 1.39, 满足安全标准要求。

关键词: 露天矿; 边坡稳定性; 并段台阶; 边坡崩塌; 重力式挡墙; 锚喷支护; 治理方案; 降雨入渗

中图分类号: TD854

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.005

文章编号: 0253-6099(2025)03-0029-06

Causes and Management Scheme of Slope Collapse at Bench Merging Section in Open-Pit Mines

LIU Yang¹, LI Jing², ZHANG Changsuo¹, JIANG Ke³

(1. BGRIMM Technology Group Co., Ltd., Beijing 100160, China; 2. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: As for the slope collapse at bench merging section in an open-pit mine, engineering geological analysis, analysis with stereographic projection and mechanical analysis were employed to comprehensively explore the main factors inducing slope collapse. Based on the causes and instability characteristics of slope collapse, a management scheme was proposed and thoroughly demonstrated. The results show that the collapse of bench slope occurs under the combined effects of rainfall infiltration and excavation at bench merging section, and induced effects of rock mass properties and weathering fracture surfaces. A management scheme of “gravity retaining wall foot pressure + gravel soil backfilling + shotcrete and rock bolt support” was proposed. The overall stability coefficient of the slope after management is 1.39, meeting the safety standard requirements.

Key words: open-pit mine; slope stability; bench merging section; slope collapse; gravity retaining wall; shotcrete support; management scheme; rainfall infiltration

边坡崩塌是露天采矿活动中频发的工程灾害之一^[1], 在露天采场局部台阶边坡中尤为显著, 尽管此类灾害的规模相对较小, 但其潜在的安全风险仍不容忽视。诱导边坡崩塌的因素众多, 包括区域环境、地质条件、人类活动等^[2-3], 如何精准判别诱导边坡崩塌的原因, 制定经济高效、科学合理的治理方案, 已成为亟待深入探讨与解决的关键问题。

关于矿山边坡崩塌的治理问题, 已有众多学者开展了研究, 针对不同灾害诱因和破坏模式下的边坡问题形成了多样化的边坡治理技术和方法^[4-8]。在边坡治理过程中, 应充分考虑边坡灾害的发育特征和矿山实际作业条件与工作环境, 以确保治理方案的合理性。

本文以某露天矿并段作业后崩塌的台阶边坡为研究对象, 采用工程地质分析、赤平投影分析及力学分析

① 收稿日期: 2024-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(42307252)

作者简介: 刘杨(1995—), 男, 河南漯河人, 工程师, 主要从事矿山岩石力学及采矿设计等方面的工作。E-mail: ly327231883@163.com

通信作者: 李京(1994—), 男, 山西孝义人, 博士(后), 讲师, 主要从事岩石流变力学与露天矿高边坡稳定性分析等方面的研究。E-mail: lijing1994@wust.edu.cn

等多种技术手段,对诱导该台阶边坡崩塌的多种因素进行深入探讨,并结合边坡崩塌特征及矿山现场条件,提出“重力式挡墙压脚+碎石土回填+锚喷支护”的边坡崩塌综合治理方案,依据相关技术规范,进一步采用有限元强度折减法对该治理方案进行验证。

1 工程概况

某露天矿有南、北2个采坑,露天境界呈长条状,整体为北偏东走向,南北向长度约2 200 m,东西向宽度约550 m,开采标高为+835~+1 045 m,根据矿体走向及岩性分布,将采场沿中线分为上、下盘;矿区内围岩为绢云母石英片岩、绿泥石英片岩,矿体为石英脉岩,属于块状硬质岩类,矿体顶板围岩以块状岩石为主,受风化作用影响,节理裂隙发育,岩体破碎,其完整性及稳固性较差;矿区为干旱半干旱季风气候,年降雨量少,蒸发量大,多年平均降雨量207.2 mm,主要集中在7~9月,地震峰值加速度为0.05g,地震烈度为Ⅵ度。

该采场南坑下盘一处并段后的台阶边坡在下段采掘区的生产过程中发生崩塌,崩塌位置临近采场最南端,标高为+976~+994 m,破坏高度为18 m,台阶宽度为6 m,坡面角为67°,如图1所示。由于边坡监测系统提前进行了预警,作业人员及时撤离现场,边坡崩塌未造成设备损失及人员伤亡。

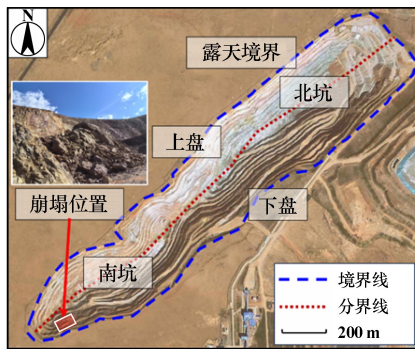


图1 露天采场境界及边坡崩塌位置示意图

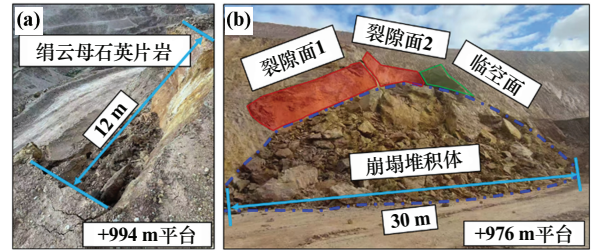
Fig.1 Schematic diagram of open pit boundary and slope collapse position

2 台阶边坡崩塌诱因分析

2.1 台阶边坡崩塌特征分析

失稳台阶边坡岩性为绢云母石英片岩,受风化作用影响,岩体较为破碎,结构性差,崩塌块石多为碎裂状及块状;崩塌块体堆积高度约10 m,底部堆积宽度约30 m,顶部+994 m平台破坏宽度约12 m,堆积方量约1 000 m³。

台阶边坡失稳后,崩塌体后缘揭露出两组风化裂隙面,裂隙面1的产状为305°∠58°,裂隙面2的产状为320°∠83°;同时+994 m平台形成了一处临空危岩体,临空段的长度约6 m,严重影响了周边位置的安全作业。并段台阶边坡崩塌情况如图2所示。



(a) +994 m 平台; (b) +976 m 平台

图2 并段台阶边坡崩塌情况

Fig.2 Slope collapse at bench merging section

2.2 台阶边坡崩塌诱因分析

结合台阶边坡崩塌失稳特征及矿山开采现状,对该并段台阶的崩塌诱因进行分析。

台阶崩塌位置标高为+976~+994 m,处于强~中风化岩层内,岩体质量较差,结构破碎,节理裂隙发育,是造成此次崩塌破坏的根本原因;边坡崩塌后,堆积体后缘揭露出了两组风化裂隙面,利用赤平投影分析法^[7]判断这两组裂隙面对台阶边坡的影响,如图3所示。由图3可知,两组裂隙面与台阶坡面的倾向相同,属于顺层边坡,极点1落在边坡的破坏区域内,说明裂隙面1是控制边坡崩塌的主破坏面,极点2未落在破坏区域内,即仅在裂隙面2的作用下不会造成边坡的滑动破坏,从裂隙面与台阶边坡的空间关系上分析,裂隙面2的倾角接近90°,大于并段台阶的边坡角,定性判断裂隙面2不是边坡崩塌的主滑面,其主要是控制边坡崩塌危岩体的范围及边界。

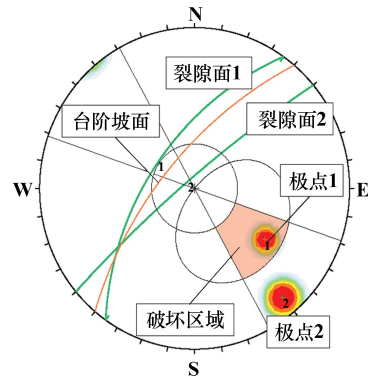


图3 台阶边坡赤平投影分析

Fig.3 Analysis of bench slope with stereographic projection

根据气象资料显示,边坡崩塌时矿区正处在雨季,

且破坏前一周曾连续发生短时间的强降雨,边坡失稳前矿区降雨情况如图4所示。虽然矿山不属于多雨地区,但连续的降雨作用仍会对边坡造成不利影响,短时间的强降雨会快速集聚形成坡面径流,雨水入渗至风化裂隙面内,对危岩体施加额外的静水压力,同时,雨水的入渗进一步弱化了岩体的力学特性,从而增加边坡的安全风险。结合现场踏勘情况,崩塌的块石及碎石土呈现潮湿状态,表明雨水已经渗入了岩体内部。

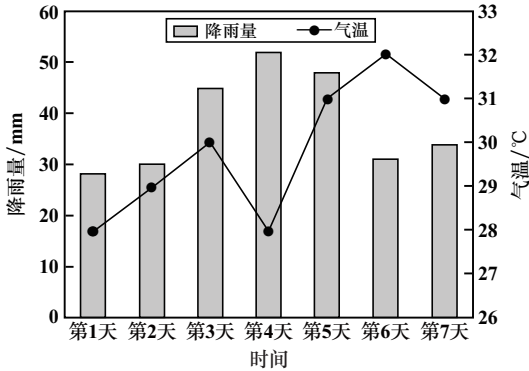


图4 边坡失稳前矿区降雨情况

Fig.4 Precipitation in mining area before slope instability

对降雨入渗后的边坡危岩体进行受力分析^[9-10],结果如图5所示。危岩体除受自身重力 G 及外部荷载 Q 、 G_b 外,两组风化裂隙面分别受到了两组静水压力 U_1 、 U_2 的作用。

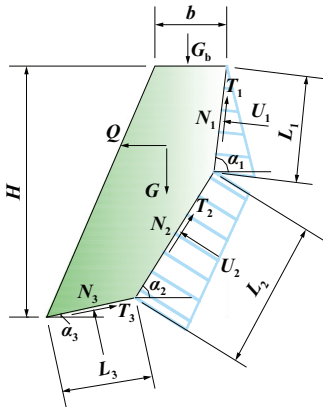


图5 台阶边坡危岩体受力分析

Fig.5 Stress analysis of dangerous rock mass of bench slope

采用不平衡推力传递法对危岩体进行条块划分,单条块的稳定性系数 F_s 按式(1)计算。

$$F_s = \frac{R_i}{T_i} = \frac{[(G_i + G_{bi}) \cos \alpha_i - Q_i \sin \alpha_i - U_i] \tan \varphi_i + c_i l_i}{(G_i + G_{bi}) \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

式中: R_i 为第 i 滑动条块上的抗滑力,kN/m; T_i 为第 i

滑动条块上的下滑力,kN/m; G_i 为第 i 滑动条块的自重,kN/m; G_{bi} 为第 i 滑动条块竖向附加荷载,kN/m; U_i 为第 i 滑动条块水平荷载,kN/m; c_i 为第 i 滑动条块底面的黏聚力,kPa; φ_i 为第 i 滑动条块底面的内摩擦角,(°); l_i 为第 i 滑动条块宽度,m; α_i 为第 i 滑动条块底面与水平面的夹角,(°)。

由式(1)可以看出,静水压力的施加及力学参数的弱化会减小边坡抗滑力,从而降低边坡稳定性系数。

台阶并段后改变了边坡原来的高度及坡面角,台阶高度由9 m提高至18 m,台阶坡面角由60°提升至67°,坡体形态的改变加剧了边坡失稳的风险,并段台阶边坡崩塌诱因分析如图6所示。

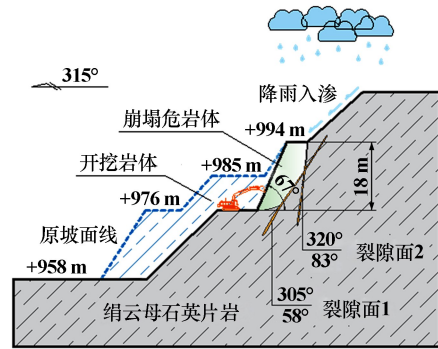


图6 并段台阶边坡崩塌诱因分析

Fig.6 Cause analysis for slope collapse at bench merging section

综上,台阶边坡崩塌失稳是在岩体性质及风化裂隙面的控制下受到降雨入渗及开挖并段的共同作用产生,岩体性质及风化裂隙面的存在是诱导此次边坡失稳的内在因素,降雨入渗、台阶开挖并段是诱导此次边坡失稳的外在因素。

3 治理方案研究

3.1 台阶边坡治理方案

3.1.1 治理方案优选

削坡减载是露天矿普遍使用的边坡治理方法^[11],但该垮落台阶上部的平台均已实施并段,扩展至最终境界,边坡已无向外削坡的空间,因此该方法不再适用。

借鉴建筑边坡中常用的支护手段,考虑使用“采空区回填+挡墙支撑”^[12-13]的治理方式,该方案可利用垮落的块石、碎石堆砌挡墙、回填采空区,相较于其他支护方式,具有明显的成本优势。综合考虑支护成本、安全性及适用性等因素,最终采用“重力式挡墙压脚+碎石土回填+锚喷支护”的方式对该台阶边坡实施治理。

3.1.2 治理方案设计

首先,使用挖机将台阶两侧悬空的危岩体清除,确保施工过程中无块石掉落;其次,利用垮落下来的大块岩石做浆砌石材料,用来堆筑重力式挡墙;将剩余的小块碎石配合矿山开挖的黏性土用作填土料,填充边坡垮塌下的采空区;最后使用锚喷支护对挡墙上部的填土料进行支撑。

施工过程中先进行重力式挡墙的堆砌,之后自下而上进行填土料填充,每填充完一层进行一层的锚杆支护。填土料填充高度 18 m,顶部平台宽度 4 m,挡墙上方填料边坡的坡度 57°;锚杆支护高度 14 m,共设置 6 道锚杆,水平及竖向间距均为 2 m,采用菱形布置,锚杆的钢筋选型为 HRB400, $2\Phi 28$ mm,锚杆倾角 15°,锚固段长 3 m,锚固体直径 0.1 m,第 1 道锚杆长 10 m,第 2 道锚杆长 11 m,第 3~6 道锚杆各长 12 m;填土料坡面喷射 200 mm 厚的 C30 混凝土,采用 HRB300 双层钢筋网,钢筋网设计尺寸为 $\Phi 8$ mm \times 200 mm \times 200 mm,台阶边坡支护方案如图 7 所示。

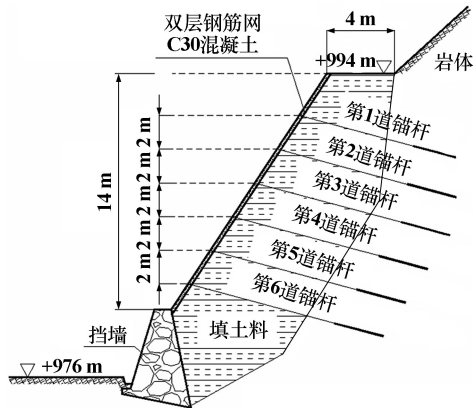


图 7 台阶边坡支护方案

Fig. 7 Support scheme for bench slope

因挡墙后需要填土,设计使用俯斜式重力式挡墙,墙身高 5 m,墙顶宽 1 m,埋深 1 m,墙面倾斜坡度为 1:0.3,墙背倾斜坡度为 1:0.2,采用 1 个扩展墙趾台阶,墙趾台阶宽 0.5 m,高 0.3 m,墙趾面垂直,墙底斜坡率 0.2:1。挡墙墙身使用 M7.5 级水泥砂浆堆砌,墙面用砂浆抹平。为降低降雨入渗的影响,在墙身设置 2 排泄水孔,按“品”字形布孔,水平间距为 3 m,竖向间距为 2 m,泄水孔向外坡度为 5%,墙后孔口设置 300 mm 厚的反滤层,最底部一排泄水孔在墙后设置 300 mm 厚的隔水层,防止雨水下渗;同时,在坡底开挖排水沟,沟深 0.4 m,底宽 0.4 m,坡度 1:0.3,经核算,可满足地表径流排洪的要求。重力式挡墙断面设计如图 8 所示。

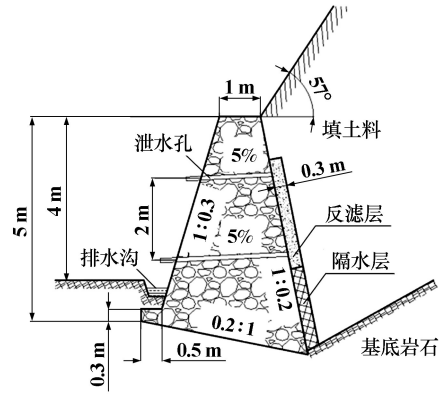


图 8 重力式挡墙断面设计

Fig. 8 Section of designed gravity retaining wall

3.2 治理后台阶边坡稳定性验算

3.2.1 重力式挡墙验算

根据相关技术规范^[13-15],对重力式挡墙进行抗滑移、抗倾覆及地基承载力验算,要求抗滑移安全系数不小于 1.3,抗倾覆安全系数不小于 1.6。根据《建筑边坡工程技术规范》,挡墙墙背粗糙,排水良好,墙背与填土摩擦角取 0.5φ (φ 为墙后填土的摩擦角,取填土料的自然休止角 35°),岩土体物理力学参数见表 1;因挡墙底部为中~强风化岩体,属较软岩,因此墙底摩擦因数取 0.6,挡墙容许应力及地基承载力按照经验参数选取,最终的重力式挡墙验算参数最大允许值如表 2 所示,因挡墙上方的填土料有锚喷支护的作用,取其支护后的等效内摩擦角进行验算,根据经验参数,填土料的等效内摩擦角取 75° 。

表 1 岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of rock and soil masses

名称	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $^\circ$
浆砌石	23.0	—	—
填土料	22.0	50	35
基底岩石	24.0	320	42

表 2 重力式挡墙验算参数最大允许值

Table 2 Maximum allowable values of parameters in checking gravity retaining wall

墙身容许压应力/kPa	墙身容许剪应力/kPa	墙身容许拉应力/kPa	墙身容许弯曲拉应力/kPa	地基承载力特征值/kPa
2 100	110	150	280	500

利用计算软件对重力式挡墙的稳定性进行验算,采用库仑理论计算墙后主动土压力,墙后土压力沿墙背向下呈线性分布^[16],重力式挡墙验算结果如表 3 所

示。由表3可知,重力式挡墙抗滑移及抗倾覆的安全系数均大于安全值,最大土压力小于墙身容许应力值,地基压应力小于地基承载力特征值,即重力式挡墙的设计满足安全标准的要求。

表3 重力式挡墙验算结果

Table 3 Checking results of gravity retaining wall

抗滑移安全系数	抗倾覆安全系数	最大土压力/kPa	地基压应力/kPa
1.9	2.3	89	125

3.2.2 锚杆设计验算

根据相关技术规范^[13-15],对锚杆进行锚固长度及钢筋截面面积验算,其中边坡工程重要性系数取1.10。根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》,锚固岩石属于软岩,因此岩石与锚固体的黏结强度取300 kPa, M30水泥浆与螺纹钢的黏结强度取2.4 MPa;另外根据填土料侧向压力的计算,锚杆轴向拉力的设计值取244 kN, HRB400钢筋抗拉强度设计值取360 MPa。

锚杆设计的验算结果如表4所示,由表4可知,钢筋截面面积的设计值大于验算的最小截面面积,设计的锚固段长度大于验算的锚固体与土层、钢筋与砂浆的锚固段长度,即锚杆的设计参数均满足安全要求。

表4 锚杆设计验算结果

Table 4 Checking results of anchor bolt design

验算内容	钢筋截面面积/mm ²	锚固体与土层的锚固段长度/m	钢筋与砂浆的锚固段长度/m
验算结果	1 044	2.72	1.02
设计值	1 232	3.00	3.00

3.2.3 边坡整体稳定性验算

采用有限元软件建立模型,边坡岩土体材料赋予Mohr-Coulomb模型,锚杆材料赋予线弹性模型,单元网格划分选择4节点平面应变单元,对模型左右两侧进行水平位移约束,底部进行水平及垂直位移约束,初始应力状态为原始边坡开挖后的应力水平,并赋予模型重力荷载;基于有限元强度折减法^[17]对治理后的边坡进行数值模拟及稳定性验算,危岩体使用饱和状态下的物理力学参数(见表1),最终模拟结果如图9~10所示。

由图9可知,锚杆应力分布总体沿轴向呈现先增大后减小的趋势,其峰值应力多出现在锚杆自由段,锚头及锚固段所受的应力水平较小;第6道锚杆的峰值应力位于锚头,应力分布沿轴向呈现降低趋势;对比分析

六道锚杆的受力情况,锚杆1到锚杆6所受的应力水平(峰值应力)逐步增大且受力端逐步靠近锚头;六道锚杆所受的最大拉应力为29.1 MPa,主要集中在第6道锚杆的锚头区域,该值远小于锚杆的抗拉强度,锚杆结构整体稳定。

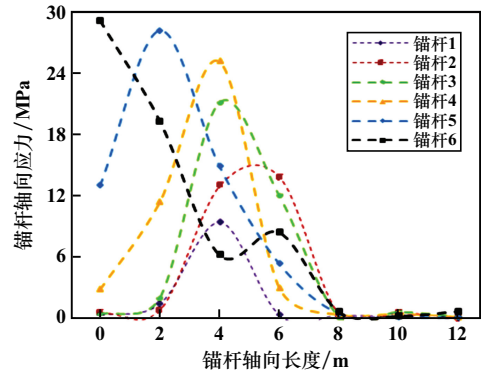
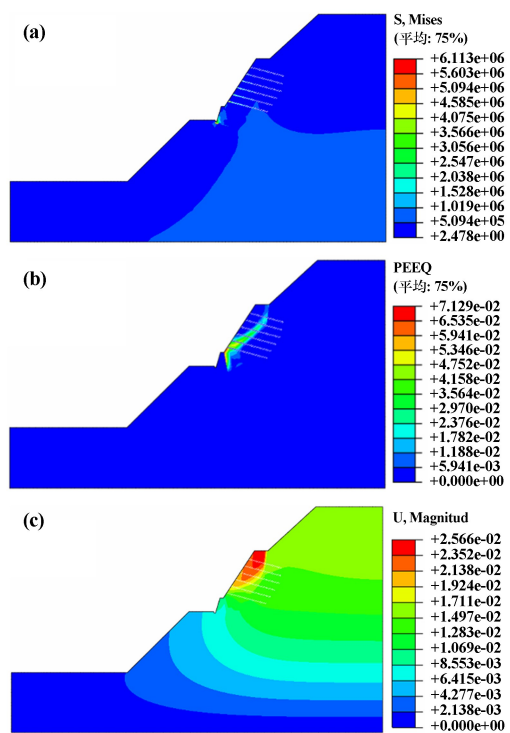


图9 锚杆轴向应力分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of axial stress in bolt



(a) 应力分布云图; (b) 塑性应变分布云图; (c) 位移分布云图

图10 治理后边坡整体稳定性模拟

Fig. 10 Simulation of overall stability of supported slope

治理工作完成后,填土料与支护结构相互作用,边坡应力重新分布。由图10(a)可知,重分布的应力主要在锚杆及重力式挡墙的墙趾内,应力整体分布均匀,并未产生较大的应力集中现象,重分布的应力达到平衡状态;由图10(b)可知,边坡的塑性应变主要发生在挡墙上方的填土料内,填土料是边坡潜在的破坏区域,

塑性区自挡墙背向上逐渐延展至后缘裂隙面内,但由于整体的塑性应变较小,边坡整体较为稳定;由图10(c)可知,边坡的位移主要在+994 m平台以下位置,最大位移量为2.566 cm,变形量较小,边坡无变形破坏的风险。

根据《非煤露天矿边坡工程技术规范》,该并段台阶边坡整体高度为50 m,边坡危害等级为Ⅱ级,确定边坡的安全等级为Ⅲ级,选取该边坡的安全系数为1.10;由强度折减法计算的边坡稳定性系数为1.39,治理后的边坡稳定性系数显著高于安全标准要求,说明边坡处于稳定状态。

4 结论

1) 该并段台阶边坡的崩塌失稳是在岩体性质及风化裂隙面的控制下受到降雨入渗及开挖并段的共同作用产生的。

2) 采用“重力式挡墙压脚+碎石土回填+锚喷支护”的方案进行台阶边坡治理,设计俯斜式重力式挡墙高6 m,墙顶宽1 m,墙后回填高度18 m,台阶顶宽4 m,坡度 57° ,填土料由六道锚杆支护,锚杆间距2 m,锚固段长3 m,倾角 15° 。

3) 验证结果表明重力式挡墙及锚杆的设计均满足相关技术规范的要求,治理后的边坡应力分布均匀,无较大的塑性应变及位移变形,稳定性系数为1.39,大于安全系数,边坡整体稳定,治理方案切实可靠。

参考文献(References):

- [1] 宋子贺,李学锋,齐发富,等. 露天矿山危岩崩塌事故成因分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021,46(1):159-165.
SONG Zihe, LI Xuefeng, QI Fafu, et al. Analysis of the triggering factors for dangerous rockfall accident in open pit mine[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2021,46(1):159-165.
- [2] 李延超,王飞飞,姜安民,等. 含断层构造露天边坡变形破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):150-154.
LI Yanchao, WANG Feifei, JIANG Anmin, et al. Deformation and failure characteristics and stability of open-pit slopes with fault structure[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):150-154.
- [3] 方庆红,胡斌,盛建龙,等. 含软弱夹层露天矿高边坡台阶宽度及台阶坡面角协同优化研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):5-9.
FANG Qinghong, HU Bin, SHENG Jianlong, et al. Collaborative optimization of bench width and bench face angle for high slope with weak interlayer in open-pit mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):5-9.
- [4] 王旭,杨志一,马增,等. 软破岩质高陡边坡治理方案优化研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2024,76(2):102-107.
WANG Xu, YANG Zhiyi, MA Zeng, et al. Optimization of treatment

- scheme for high and steep slope with soft broken rock[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2024,76(2):102-107.
- [5] 林丽萍,蒋鑫,李军伟,等. 长江某大桥高峰岸锚碇基坑边坡应力变形及支护效果数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):164-168.
LIN Liping, JIANG Xin, LI Junwei, et al. Numerical simulation analysis of stress deformation and anchoring support effect of foundation pit slope for one bridge on Gaofeng bank of Yangtze River[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):164-168.
- [6] 刘建,彭府华,王春毅,等. 多级框架锚索与微型抗滑桩组合加固边坡技术[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020,31(2):87-93.
LIU Jian, PENG Fuhua, WANG Chunyi, et al. Application of slope reinforcement technology of combination of multi-level lattice beams with pre-stressed anchor cable and anti-slide micropiles[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020,31(2):87-93.
- [7] 胡斌,杨为,李京,等. 露天矿滑坡应急治理的爆破排险研究[J]. 有色金属工程, 2021,11(10):108-113.
HU Bin, YANG Wei, LI Jing, et al. Research on blasting and risk elimination of emergency treatment of open-pit landslide[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021,11(10):108-113.
- [8] 刘杨,王海军,张长锁,等. 基于赤平投影分析的露天矿高边坡台阶坡面角优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024,44(8):83-90.
LIU Yang, WANG Haijun, ZHANG Changsuo, et al. Study on optimization of bench slope angle of high slope in open-pit mine based on stereographic projection analysis[J]. Mining Research and Development, 2024,44(8):83-90.
- [9] 李博文,李克钢,吴苏,等. 坡面张裂缝充水对平面滑动边坡稳定性影响[J]. 有色金属工程, 2022,12(7):163-171.
LI Bowen, LI Kegang, WU Su, et al. Effect of slope surface tension crack filling on the stability of plane sliding slope[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022,12(7):163-171.
- [10] 李伟,詹良通,王康. 水力作用下平面滑动岩质边坡极限倾角解析计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(4):876-886.
LI Wei, ZHAN Liangtong, WANG Kang. Analytical calculation of the critical inclination of rock slopes with a planar failure surface under water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(4):876-886.
- [11] 古德生. 采矿手册[M]. 长沙:中南大学出版社,2023.
GU Desheng. Mining Handbook[M]. Changsha: Central South University Press, 2023.
- [12] 唐晓松,郑颖人,陈佳,等. 高切坡挡墙整体稳定性和工作性能的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022,18(增刊2):910-915.
TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, CHEN Jia, et al. Numerical analysis on overall stability and working performance of high cut slope retaining wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022,18(S2):910-915.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范: GB 50330—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building slope engineering: GB 50330—2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.

- method based on information entropy and fuzzy decision theory[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2018,37(3):166-170.
- [19] 唐川林,汪志能,胡东,等. 基于小波包与Elman神经网络的气力提升装置流型识别技术研究[J]. 振动与冲击, 2016,35(15):149-153.
- TANG Chuanlin, WANG Zhineng, HU Dong, et al. Flow pattern identification for airlift devices based on wavelet packet and Elman neural network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(15):149-153.
- [20] 计时鸣,胡科东,谭大鹏,等. 基于小波包的固液两相流流型识别方法[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2012,34(3):88-92.
- JI Shiming, HU Kedong, TAN Dapeng, et al. Pattern recognition of the soft abrasive flow based on wavelet packet[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2012,34(3):88-92.
- [21] 盛碧霞,冀海峰,王保良,等. 基于新型C⁴D的小管道气液两相流流型辨识方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2017,43(11):2273-2279.
- SHENG Bixia, JI Haifeng, WANG Baoliang, et al. Flow pattern identification method of gas-liquid two-phase flow in ductule based on new C⁴D[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017,43(11):2273-2279.
- [22] 孙斌,刘天栋,周云龙. 小波包主成分分析在气液两相流流型识别中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009,39(6):1532-1537.
- SUN Bin, LIU Tiandong, ZHOU Yunlong. Application of principal component analysis of wavelet packet on flow regime identification of gas-liquid two-phase flow[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009,39(6):1532-1537.
- [23] 王杰,李爱蓉. 小波包分析识别气液固三相流流型[J]. 石油化工, 2020,49(1):62-69.
- WANG Jie, LI Airong. Identification of gas-liquid-solid three-phase flow patterns by wavelet packet analysis[J]. Petrochemical Technology, 2020,49(1):62-69.
- [24] 何小宇,张霖,唐德东,等. 拉曼光谱小波阈值去噪最佳分解层数自适应确定方法的研究[J]. 自动化与仪表, 2023,38(6):61-65.
- HE Xiaoyu, ZHANG Lin, TANG Dedong, et al. Research on adaptive determination of optimal decomposition layers for wavelet threshold denoising of Raman spectroscopy[J]. Automation & Instrumentation, 2023,38(6):61-65.
- 引用本文:陈立,杜燕连,彭甫森,等. 基于改进小波阈值法的气液两相流特征提取及流型识别[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):35-43.
- CHEN Li, DU Yanlian, PENG Fusen, et al. Feature extraction and flow pattern recognition of gas-liquid two-phase flow based on improved wavelet thresholding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):35-43.

(上接第34页)

- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for non-coal open-pit mine slope engineering: GB 51016—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范:GB/T 38509—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
- State administration for market regulation, National standardization administration. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020[S]. Beijing: Standards Press for China, 2020.
- [16] 代雪,张家明. 某场地边坡稳定分析方法的比较研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021,17(11):119-124.
- DAI Xue, ZHANG Jiaming. Comparative study on analysis methods of slope stability at a certain site[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021,17(11):119-124.
- [17] 王思源,童小东. 基于动态强度折减-改进矢量和法的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2023,45(7):1384-1392.
- WANG Siyuan, TONG Xiaodong. Stability analysis of slopes based on dynamic strength reduction improved vector sum method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023,45(7):1384-1392.
- 引用本文:刘杨,李京,张长锁,等. 露天矿并段台阶边坡崩塌诱因分析及治理方案研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):29-34.
- LIU Yang, LI Jing, ZHANG Changsuo, et al. Causes and management scheme of slope collapse at bench merging section in open-pit mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):29-34.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2025年6月