

研山铁矿顺倾含水岩质边坡稳定性与生态修复技术研究*

白宇鑫¹, 严加驹¹, 赵森¹, 夏冬^{1, 2, 3}, 吴朝松⁴

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;

2. 华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山市 063210;

3. 河北省矿区生态修复产业技术研究院, 河北 唐山市 063210;

4. 首钢滦南马城矿业有限责任公司, 河北 唐山市 063701)

摘要: 顺倾边坡是矿区生态修复与重建的重点与难点区域,为实现顺倾含水岩质边坡的安全稳定与快速复绿,以研山铁矿东帮边坡为研究对象,在对不同饱水时间条件下边坡稳定性分析的基础上,提出适宜的技术进行生态修复。结果表明:长期饱水对岩体的抗剪强度参数和边坡稳定性均产生显著影响,黑云变粒岩、白云母片岩的黏聚力由天然状态时的 221.2 kPa、92.2 kPa 下降到饱水 90 d 时的 192.3 kPa 和 66.4 kPa,内摩擦角由 38.3°、37.1° 下降到 33.2° 和 31.2°;饱水 15 d、30 d、45 d、60 d、75 d 和 90 d 后,在安全系数为 1.25 的情况下,最终边坡角分别为 37.5°、36.8°、36.1°、35.7°、35.4° 和 35.2°。根据边坡稳定性分析结果,结合坡面岩体结构特征,提出适宜于顺倾含水岩质边坡的生态修复技术——钻孔-钢管植藤生态修复技术。

关键词: 顺倾岩质边坡;水岩耦合;稳定性分析;生态修复

0 引言

边坡稳定是露天矿安全有序开采的前提,顺倾和地下水联合作用对岩质边坡的安全稳定极为不利^[1],开展顺倾含水岩质边坡稳固技术研究对指导矿山安全生产具有重要的实际应用价值。同时,岩质边坡生态修复是绿色矿山建设的重要组成部分^[2]。因此,在确保顺倾含水岩质边坡安全稳定的基础上,采取行之有效的生态修复技术,对矿山的安全生产和绿色矿山的建设具有重要的指导意义。

众多学者在层理倾角、地下水对边坡稳定性影响方面做了大量的研究工作,如郭明珠等^[3]对强震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡的动力响应规律进行了试验研究,揭示了含软弱夹层顺层岩质斜坡在强震作用下的动力响应规律;曾胜等^[4]的研究成果表明,在降雨渗流及干湿循环作用下,红砂岩顺层边坡的稳定性系数降低了约 60%;邱天琦等^[5]采用数值模拟的方法分析了不同坡角对应的最危险岩层倾角,结果显示,最危险岩层倾角下的破坏均为整体顺

层滑移破坏;杨肖锋等^[6]对板裂结构顺层岩质边坡滑移-弯曲破坏机制进行了系统分析,提出了板裂结构顺层岩质边坡潜在弯曲破坏点的预测模型;刘新荣等^[7]对频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性进行了分析;唐雨生等^[8]对含软弱夹层的顺层岩质滑坡渐进破坏进行了数值模拟研究,并提出相应的加固治理措施。

上述研究成果为顺层含水岩质边坡稳定性分析与加固方案的设计奠定了基础。在露天矿全寿命周期内,为实现绿色矿山建设的总体目标,需要对立地条件极端恶劣的岩质边坡进行生态修复与重建^[9]。当前,边坡生态修复大多采用喷播类^[10]、飘台法^[13]、植生袋法^[14]、爆破燕窝法^[15]、藤本护坡^[16]等较为成熟的技术,这些技术的应用,对指导露天矿岩质边坡生态修复具有重要的借鉴意义。地下水、岩体产状对边坡稳定性与生态修复技术方案的选取均有重要的影响。研山铁矿东帮为顺倾含水边坡,为实现边坡的安全稳定与生态复绿,本文在分析地下水长期作用对顺倾边坡稳定性影响规律的基础上,采取疏

* 收稿日期: 2023-04-26

基金项目: 河北省科技厅重点研发项目(223754402D);河北省大学生创新创业训练计划项目(X2023207)。

作者简介: 白宇鑫(2002—),男,山东济宁人,主要从事岩石力学方面的研究,E-mail: baiyuxin@ncst.edu.cn。

通信作者: 夏冬(1981—),男,河北隆化人,博士,副教授,主要从事岩石力学方面的研究,E-mail: dianjiahan@163.com。

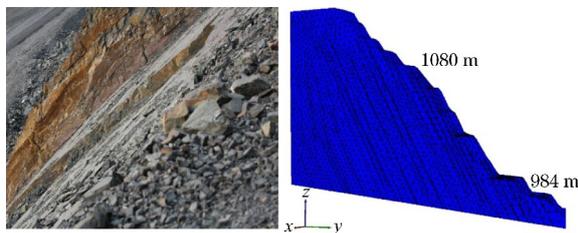
干排水技术措施提高边坡的稳定性,之后采取有针对性的生态修复技术实现边坡复绿。

1 工程概况

研山铁矿东帮为顺倾岩质边坡,边坡岩体以不同风化程度的黑云变粒岩为主,岩体倾角多在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间,与边坡坡面角基本一致。边坡临近新河,该河多年平均径流量为 $31\text{ m}^3/\text{s}$,虽在部分区域采取堵水帷幕等技术措施堵截地下水的渗流,但受新河渗流的影响,局部地区仍有地下水渗出。矿山开采现状、局部滑坡与岩层产状分别如图1和图2所示。



图1 研山铁矿开采现状



(a) 顺层滑坡 (b) 岩体产状

图2 局部滑坡与岩层产状

2 顺层含水边坡稳定性分析

边坡稳定是开展边坡生态修复的前提,根据边坡与新河的相对位置关系,选择距新河较近的N24、N26和N28勘探线剖面进行长期饱水作用下的边坡稳定性分析,因3个剖面的分析方法相同,故仅以N26勘探线剖面为例,进行边坡稳定性计算,简化后的N26剖面各岩体的层位关系如图3所示。

2.1 岩体强度参数计算

东帮边坡主要由第四系表土层、石英砂岩、不同风化程度的黑云变粒岩、白云母片岩和磁铁石英岩组成,各岩体在天然状态下的容重与抗剪强度参数见表1。

研究表明,受开采扰动的岩体在地下水的长期作用下,其强度随饱水时间的延长而降低^[1]。由水

文地质勘察资料可知,边坡中黑云变粒岩、白云母片岩在矿山开采过程中可能长期处于含水或饱水状态。为分析长期饱水对边坡岩石抗剪强度的影响规律,对饱水时间分别为15 d、30 d、45 d、60 d、75 d和90 d的黑云变粒岩和白云母片岩进行直剪试验,其黏聚力和内摩擦角与饱水时间关系曲线如图4所示。

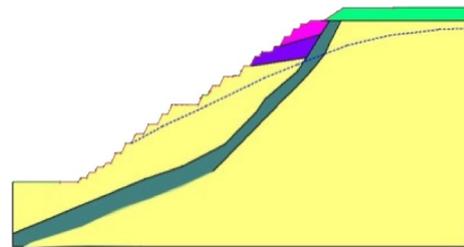
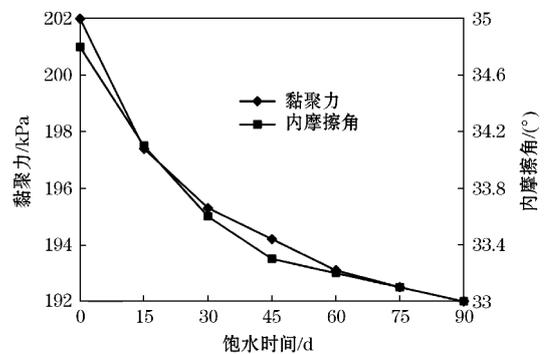


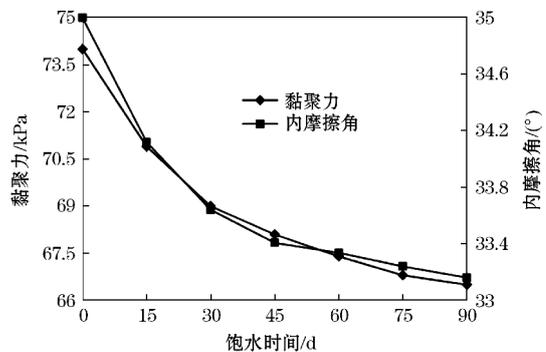
图3 N26剖面各岩石层位关系

表1 研究区域岩体力学参数

岩体	天然容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)
第四系	21.4	41.3	18.4
石英砂岩	28.2	51.4	37.2
黑云变粒岩	36.1	221.2	38.3
强风化黑云变粒岩	33.2	11.3	35.7
中风化黑云变粒岩	33.1	122.1	38.4
白云母片岩	33.2	92.2	37.1
磁铁石英岩	39.4	413.6	40.1



(a) 黑云变粒岩



(d) 白云母片岩

图4 岩石黏聚力、内摩擦角与饱水时间关系曲线

由图4可以看出,黑云变粒岩、白云母片岩的黏聚力和内摩擦角均随饱水时间的增大而减小,上述参数的降低,将对边坡的稳定性产生不利影响,因此,在进行边坡生态恢复与重建工程施工之前,需要分析边坡的稳定性。

2.3 边坡稳定性分析

根据边坡的实际情况,参照相关设计规范,根据对边坡工程地质条件的认知程度,考虑服务年限和边坡类型等因素,将1.25作为东帮边坡的安全储备系数。依据N26勘探线剖面的工程地质、水文地质条件,建立该剖面边坡稳定性分析模型,并采用有限元软件对所选剖面的边坡稳定性进行分析,首先分析自然与疏干排水状态下,边坡保持稳定的最小边坡角。所建立的自然与疏干排水状态下的边坡稳定性分析力学模型如图5所示。

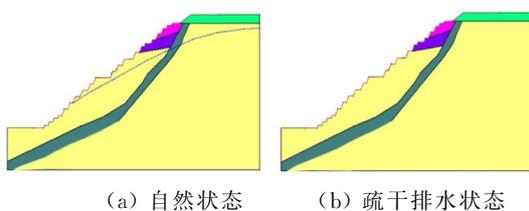


图5 边坡稳定性分析模型

根据边坡稳定性分析模型,结合各层位岩体物理力学参数(自然状态时黑云变粒岩、白云母片岩采用饱水时的物理力学参数,其他岩体采用天然状态下的物理力学参数;疏干排水状态时,各岩体均采用天然状态下的物理力学参数)。通过计算可知,当边坡安全系数为1.25时,天然与疏干排水状态下边坡的最终边坡角分别为 38.4° 和 41.3° 。自然、疏干排水状态下,边坡发生滑坡的整体与局部滑动面分别如图6和图7所示。

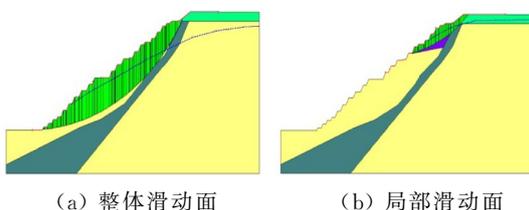


图6 自然状态下边坡整体与局部滑动面

为分析饱水时间对边坡角的影响规律,计算黑云变粒岩、白云母片岩饱水15 d、30 d、45 d、60 d、75 d和90 d后最终边坡角的大小。根据计算结果可知,当边坡岩体在饱水15 d、30 d、45 d、60 d、75 d和90 d后,边坡在安全系数为1.25的情况下,最终边

坡角分别为 37.5° 、 36.8° 、 36.1° 、 35.7° 、 35.4° 和 35.2° ,因岩体在不同饱水时间情况下,边坡的破坏模式与岩体处于自然状态相似,在此不全部列出。

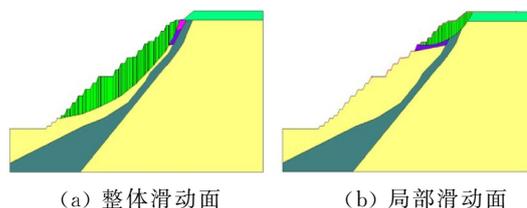


图7 疏干排水状态下边坡整体与局部滑动面

通过上述分析可知,长期饱水是影响边坡稳定的重要因素之一。目前,通常采用堵水帷幕、疏干排水或二者综合应用的方式降低地下水对边坡稳定性的影响。根据边坡最终境界与新河的相对位置关系及后继边坡生态重建的需求,采用疏干排水的方式降低地下水对边坡稳定性的影响。疏干排水采用平孔排水技术措施,其具体技术指标为:排水孔直径为100 mm,孔内设直径为80 mm的滤水套管,以防孔壁坍塌堵死。

排水孔施工完毕后,需将排出的地下水汇集于蓄水池,为后期生态修复工程提供滴灌水源。在垂直方向上每隔2个平台修筑1个蓄水池,每个蓄水池的容积不小于 20 m^3 。在水平方向上,相邻2个蓄水池之间的距离为80~100 m。上下两个蓄水池之间用槽形排水沟或管道相连,如上一级蓄水池中水满之后,水会沿排水槽或排水管道流到下一级,各蓄水池全部注满水之后,水会沿排水槽或排水管道汇集于坑底,最后统一排出坑外。

3 边坡生态重建技术研究

岩质边坡因立地条件极为恶劣,而成为矿山生态修复与绿色矿山建设的重点与难点区域。研山铁矿东帮边坡主要由顺倾黑云变粒岩组成,该边坡的生态修复工程主要由顺倾坡面和平台两部分组成。边坡生态防护施工方法如图8所示。



图8 边坡生态防护施工方法

坡面生态修复技术:因边坡岩体层理与台阶坡面角顺倾,台阶坡面角约为 60° ,台阶较高、坡面较光滑,喷播类生态修复技术不适用于该类边坡。根据边坡的顺倾特点,结合其所处的环境条件,经多方论证后,开发出适宜于顺倾含水岩质边坡生态修复技术——钻孔-钢管植藤生态修复技术。该技术的具体施工工艺如下。

(1) 坡面清理与喷浆。采用人工与机械相结合的方式清除坡面上的浮石、伞岩,用清水将清理完的坡面冲洗干净后,为防止坡面岩体风化,在坡面上喷水泥灰比为 $1:2.5$ 的水泥浆。

(2) 钻孔与无缝钢管安装。采用钻机垂直于层理面钻凿直径为 200 mm 的钻孔,钻孔贯穿潜在滑动面的长度以不小于 1 m 为宜,且孔底避免与结构面重合。钻孔内的岩屑清理干净后,将外径为 200 mm 的无缝钢管嵌入到钻孔内,钢管的长度与孔深相同,钢管的外壁应与钻孔孔壁贴合紧密。钢管长度如超过 800 mm ,超过部分应填入细沙,细沙顶面到孔口填入营养土,如钢管长度未超过 800 mm ,则钢管内直接填入营养土,钢管纵横向间距、距坡顶和坡底的间距均为 2 m ,呈梅花形布置,钻孔植藤施工过程如图9所示。



图9 钻孔植藤施工过程

(3) 藤本植物栽植。营养土填充完成后,在每个钻孔中栽植一年生爬山虎 1 株,栽植完成后需要及时浇水养护,确保植株的成活率,钻孔植藤生态修复初期效果如图10所示。



图10 钻孔植藤生态修复初期效果

平台生态修复技术:平台为矿山开采后形成的

安全平台、清扫平台和运输平台,在进行生态修复工程施工前,需要对平台进行去浮石处理,保证平台表面相对平整。平台生态修复具体的技术方案如下。

(1) 修筑挡土墙。在坡脚处修筑浆砌毛石挡土墙,挡土墙底部距台阶坡脚的距离为 1 m ,墙高为 0.8 m ,挡土墙内侧覆 0.6 m 厚的土层,覆土后栽植爬山虎和侧柏,爬山虎和侧柏的栽植间距均为 1 m ,且在栽植时二者错开,即在 2 株侧柏的中间位置栽植 1 株爬山虎,栽植后加强浇水养护。

(2) 铺设防渗层。在边坡平台上铺设黏土防渗层,黏土层的压实厚度不小于 100 mm ,防渗层铺设应均匀,不应有岩石出露。

(3) 修筑挡土埂。在坡肩处修筑挡土埂,挡土埂断面为底边不小于 1.2 m 、顶边不小于 0.6 m 、高不小于 0.6 m 的梯形,挡土埂需要分层填筑、压实,每层铺土厚度不大于 0.2 m 。挡土埂顶面每隔 1 m 栽种 1 株 2 年生的滚地柏,其他区域覆盖无纺布后种植多年生黑麦草。

(4) 挡土墙与挡土埂间平台绿化。挡土墙与挡土埂间覆土后进行绿化,覆土厚度不小于 300 mm ,覆土层中不应含有影响后续种植植物的大石块,覆土后应进行整平,在覆土层上撒播灌木和豆科牧草种子,以实现覆土层的快速绿化。

4 结论

(1) 长期饱水对岩石抗剪强度参数影响显著,饱水 90 d 后,黑云变粒岩、白云母片岩的黏聚力由天然状态时的 221.2 kPa 、 92.2 kPa 分别下降到 192.3 kPa 和 66.4 kPa ,内摩擦角由 38.3° 、 37.1° 分别下降到 33.2° 和 31.2° 。

(2) 饱水时间对边坡稳定性具有显著影响,随着饱水时间的增加,边坡安全系数呈降低趋势,当边坡岩体饱水 15 d 、 30 d 、 45 d 、 60 d 、 75 d 和 90 d 后,边坡安全系数为 1.25 的情况下,最终边坡角分别为 37.5° 、 36.8° 、 36.1° 、 35.7° 、 35.4° 和 35.2° 。

(3) 在岩体结构特征分析、顺层含水边坡稳定性计算的基础上,提出一种适宜于顺层含水边坡生态修复技术——钻孔-钢管植藤生态修复技术。该技术在快速实现岩质边坡复绿的同时,对顺倾边坡起到一定的加固作用。

参考文献:

- [1] 吴朝松,夏冬,贾清斐,等.水岩耦合作用下研山铁矿东帮顺倾边坡稳定性研究[J].矿业研究与开发,2019,39(6):47-52.

- [2] 夏冬,李富平,袁雪涛,等.露天矿岩质边坡生态重建技术研究现状及发展趋势[J].金属矿山,2018(1):1-10.
- [3] 郭明珠,谷坤生,张合,等.强震作用下含软弱夹层顺层岩质斜坡动力响应规律试验研究[J].岩土力学,2022,43(5):1306-1316.
- [4] 曾胜,李振存,韦慧,等.降雨渗流及干湿循环作用下红砂岩顺层边坡稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(6):1536-1540.
- [5] 邱天琦,杨军,吴志轩,等.复理石顺层边坡最危险岩层倾角及简化的单一层面模型[J].工程力学,2019,36(增刊1):217-221.
- [6] 杨肖锋,鲁祖德,陈从新,等.板裂结构顺层岩质边坡滑移-弯曲破坏机制的力学模型研究[J].岩土力学,2022,43(增刊1):258-266.
- [7] 刘新荣,许彬,刘永权,等.频发微小地震下顺层岩质边坡累积损伤及稳定性分析[J].岩土工程学报,2020,42(4):632-641.
- [8] 唐雨生,苏培东,马云长,等.含软弱夹层的顺层岩质滑坡渐进破坏研究[J].自然灾害学报,2021,30(6):155-165.
- [9] 莫春雷,宁立波.高陡岩质边坡植被修复的立地条件研究[J].安全与环境工程,2014,21(1):17-21.
- [10] 张丙涛,刘艳章,李海龙,等.朝国露天矿动态复垦模式研究[J].金属矿山,2015(4):61-65.
- [11] 夏振尧,许文年,王乐华,等.植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J].岩土力学,2011,32(6):1719-1724.
- [12] 解伟.青海省互助县柏木峡矿山环境问题及防治对策[J].绿色科技,2016(1):122-126.
- [13] 顾卫,邵琪,戴泉玉,等.基于坡面植被恢复的岩质边坡分类及生境再造技术研究[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(10):745-758.
- [14] 陈冀川,辜彬.论植生袋在岩质边坡上的景观应用[J].中国水土保持,2014(5):32-35.
- [15] BEIKIRCHER B, FLORINETH F, MAYR S. Restoration of rocky slopes based on planted gabions and use of drought-preconditioned woody species [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4):421-426.
- [16] RICHARDSON P J, HORROCKS J, LARSON D W. Drought resistance increases with species richness in restored populations and communities[J]. Based and Applied Ecology, 2010,11(3):206-215.