

矿山建设工程高陡边坡防护施工技术研究

李靖雯¹, 徐刚刚^{2*}, 徐付强³

- (1. 青岛领略智能科技有限公司, 山东 青岛 266000;
2. 青岛速信易信息咨询有限公司, 山东 青岛 266061;
3. 青岛国道通设计咨询有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要 在矿山建设过程中, 高陡边坡的稳定与否直接影响着整个矿山工程的安全、人员的生命安全以及周围自然环境。随着矿山开采深度加大, 边坡也越来越高, 导致高陡边坡失稳的可能性大大增加。传统的防护方法已不能适应复杂地质条件下对矿山工程的要求。本文主要针对矿山建设中的高陡边坡防护施工技术进行论述, 介绍了边坡防护的意义, 总结了目前常用的防护施工技术和新的防护技术, 并提出相应的建议。结果表明, 通过采用锚固技术、柔性防护网、植被混凝土生态防护以及智能化监控等方式可以大大提高高陡边坡的整体性和耐久性, 从而保证矿山的安全生产。

关键词 矿山建设工程项目; 高陡边坡; 边坡防护; 稳定度管理

中图分类号: TD824.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.035

0 引言

在矿山建设过程中, 高陡边坡普遍存在于露天矿坑、排土场、尾矿库以及道路附近等地带。边坡高度大于30 m, 边坡角度大于50°的高陡边坡, 在地壳运动、爆破振动、雨水下渗以及采掘活动等因素作用下容易出现崩塌、滑坡等现象。近几年来, 高陡边坡失稳引发的各种矿山事故时有发生, 给矿工生命财产造成极大危害, 同时也给矿山企业的正常生产带来严重影响。如何做好高陡边坡防护工作是当前矿山工程地质及岩土工程领域研究热点问题。目前国内外学者对边坡稳定性分析、加固支护以及生态修复等方面已取得一定成就, 但是针对施工方法改进、特殊环境下适用性和整体性应用方案还缺少相关研究内容。本文以高陡边坡防护重要性为基础, 对锚固、防护网及生态防护等关键技术进行详细探讨, 并给出根据实际工程地质条件和施工环境选择合理防护措施的建议, 以期对矿山边坡治理提供借鉴。

1 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术的重要性

1.1 保障矿山施工与作业人员生命安全

高陡边坡一旦出现失稳破坏一般具有突然性、影响面广、覆盖迅速等特点, 容易导致现场工作人员伤亡惨重。露天矿山生产中, 铲装、运输、钻孔等车辆

通常位于坡脚或者坡面上方进行工作, 边坡局部掉落或者全部下滑都会危及人员及机械的安全。因此, 合理有效的高陡边坡防护措施是矿山安全生产的基础保障, 可以大大减少滑坡、崩塌等事故给人们带来的危害。

1.2 维护矿山生产系统与基础设施稳定

矿山生产系统由运输道路、破碎站、胶带输送机以及排水设施构成, 而这些设施大多依附于边坡或者处于坡脚位置。高陡边坡发生位移塌落, 会影响道路正常通行、损坏机械设备、破坏排水系统, 从而导致矿山停产停工^[1]。另外, 如果排土场或者尾矿库边坡失稳还会引起泥石流等地质灾害, 给下面工矿企业和附近村屯带来巨大损失。良好的边坡防护措施可以保证矿山生产系统的正常运转并降低意外停顿所带来的经济损失。

1.3 降低矿山地质灾害与环境破坏风险

矿山高陡边坡失稳导致巨大的经济损失, 同时也带来较为严重的地质灾害以及环境问题。滑坡体会阻塞河流、掩埋植被、占用耕地等; 而持续裸露的边坡遭受雨淋后易发生水土流失。同时, 不稳定边坡也会给矿区内地下水资源以及地表径流带来不良影响。合理使用高陡边坡防护施工工艺可以有效降低地质灾害的发生率, 减小对矿山及其周围环境的影响, 在一定程度上做到经济发展与环境保护相辅相成。

作者简介: 李靖雯(1993-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑防护。

***通信作者**: 徐刚刚(1988-), 男, 专科, 工程师, 研究方向: 矿山建设。Email: 1048144705@qq.com

2 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术

2.1 高陡边坡预应力锚固施工技术

预应力锚固是防治高陡边坡深层滑动的主要措施。它是利用在边坡潜在滑面之后的岩土体内钻孔, 插入高强度钢绞线或者钢筋束, 施加预应力后锚固到稳定的地层上形成一种主动抗滑力^[2]。其施工工艺有钻孔、清孔、锚筋加工及安装、灌浆、张拉锁定以及封锚等工序。对于高陡边坡而言, 则要使用跟管钻进以克服破碎地层易塌孔的问题; 还要用二次高压注浆以增加锚固体与地层之间的黏结力。预应力锚固可以有效地防止边坡变形, 把滑动力转移到较深处较为稳固的岩石中去, 因此适合用于岩质高陡边坡或较大规模的滑坡体进行深层次加固。在具体应用时还需要结合具体情况来确定合理的锚固角度和锚固长度并且设立长期预应力监测制度, 通过对预应力损失情况进行定期检查来进行必要的补拉, 使边坡在整个使用期内都处于安全的状态。因此, 在高陡边坡工程中, 预应力锚固不仅是一种关键的主动加固手段, 更需要结合地质条件与长期监测进行动态设计与维护, 才能充分发挥其抗滑稳定作用。

2.2 高陡边坡柔性防护网系统施工技术

柔性防护网系统用于防治高陡边坡表面掉落小块岩石和石块。其主要由钢柱、支撑绳、钢丝绳网、环形网以及减压环构成, 具有方便快捷、便于施工、能够承受较大坡度变化、吸能效果优良等特点。施工要点是: 按设计要求在坡面上布置锚固基座, 然后安装钢柱并使其保持一定倾角状态, 再施加张力支撑绳。形成主动或者被动防护方式。主动防护网贴近坡面利用预张力阻止坡面表层岩土体运动; 而被动防护网位于坡面中部或下部用来阻拦滚落石头。对较高较陡边坡, 则需要利用无人机配合放线法高空布置柔性防护网, 保障施工人员安全以及柔性防护网良好拉伸状态。另外, 还需根据落石轨迹预测合理布置柔性防护网高度及等级, 在重要部位放置减压环降低冲击力, 并及时清除柔性防护网上方堆积物, 避免柔性防护网超载而损坏。

2.3 高陡边坡植被混凝土生态防护施工技术

植被混凝土生态防护技术集成了工程防护和生态修复双重作用, 可用于岩质高陡边坡上。该技术是在边坡上铺设镀锌铁丝网或者土工格室之后, 在其上喷射具有种植土、水泥、有机物、保水剂以及草灌种子等成分的植被混凝土基材, 从而得到具有一定强度并且有利于植物生长的防护层^[3]。其主要施工技术要点有: 基材配合比要综合考虑抗冲刷性和植物发芽率,

采取干喷或者湿喷的方式分层喷射, 保证喷射厚度在 8 厘米~12 厘米并留有通气孔以便坡体内渗水排出。这种方法可使坡面迅速被植物所覆盖, 在此基础上通过根系加固及叶片挡雨提高边坡表层稳定性, 同时也可美化矿山环境。为了进一步提高其效果, 要选择适应性强、耐旱耐瘠薄的本地草灌类植物混播, 在养护期内还需用滴灌或者喷灌的方法保证幼苗成活, 最终达到与周围自然环境融为一体的效果。

3 矿山建设工程高陡边坡防护施工技术的应用策略

3.1 基于地质勘察的边坡稳定性分级与防护方案优选

矿山高陡边坡防护施工前要进行系统的工程地质和水文地质勘察。勘察内容有地层岩性、地质构造、结构面产状、地下水分布和岩体风化程度等。根据勘察结果, 采用定性分析和定量评价相结合的方法, 将边坡稳定性分为稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定四个等级。根据不同的边坡等级, 采取不同的防护措施, 稳定边坡以监测为主, 基本稳定边坡用柔性防护网加排水措施, 欠稳定边坡用预应力锚固和框架梁组合支护, 不稳定边坡优先削坡减载, 再辅以综合加固。

定性分析依靠岩体结构面特征以及边坡坡面组合情况, 利用赤平极射投影法判定结构面切割所造成的楔形体及其滑动趋向。定量评价用极限平衡法计算边坡安全系数, 根据滑动面形态选择毕肖普法或简布法, 稳定系数大于 1.25 的边坡归入稳定等级, 介于 1.15 至 1.25 之间为基本稳定, 介于 1.05 至 1.15 之间为欠稳定, 小于 1.05 则为不稳定^[4]。对基本稳定的边坡, 用柔性防护网做主动网覆盖坡面, 网孔尺寸控制在 8 厘米左右, 锚固点间距不大于 4 米, 排水措施为坡顶截水沟和坡面泄水孔相结合。欠稳定边坡的预应力锚固用直径 28 毫米的钢筋锚杆, 锚固段长度不小于 4 米, 设计锚固力控制在 200 千牛到 300 千牛之间, 框架梁采用钢筋混凝土现浇, 梁截面尺寸 30 厘米×30 厘米。不稳定边坡削坡减载时, 每级坡高控制在 15 米以内, 坡率放缓到 1:1~1:0.75 之间, 综合采用抗滑桩和预应力锚索相结合的方式加固。根据分级优选原则, 不采用相同强度的加固措施, 保证安全的同时控制工程造价。

3.2 施工全过程质量控制与动态监测反馈调整

高陡边坡防护施工质量控制要覆盖材料进场、工序施工、验收检验等各个环节。锚杆锚索施工时, 要严格控制钻孔角度、深度、注浆饱满度, 锚索张拉分阶段加载并记录伸长量, 防护网施工时要保证网片搭接长度和锚固点连接强度, 生态防护中要控制基材喷

射厚度和种子分布均匀性。同时建立边坡变形动态监测系统,在地表布置地表位移监测点,在深部布置深部位移孔和锚固力监测传感器。

锚杆钻孔角度允许偏差为设计角度的正负两度以内,深度允许超深50厘米但不允许欠深,用全站仪或导向仪逐孔校核。注浆用水泥砂浆或纯水泥浆,水灰比控制在0.45~0.50之间,注浆压力0.5兆帕~1.0兆帕,当孔口返浆、浆液比重与注入浆液相同时认为注浆饱满。锚索张拉采用穿心式千斤顶分阶段进行,每个阶段持荷5分钟,记录实际伸长量与理论伸长量之差,超过10%就找原因。防护网网片搭接长度不小于20厘米,锚固点用直径16毫米钢筋锚杆固定,锚固深度不小于2米,每平方米网面锚固点不少于4个。生态防护基材喷射厚度按照设计要求进行控制,允许偏差为正负两厘米,种子分布均匀性用随机取样检验,每平方米取样3个点,种子数量偏差不超过30%。边坡变形动态监测系统在地表沿边坡倾向布设监测断面,每个断面不少于3个监测点,用全球定位系统或者全站仪进行周期性观测;深部位移孔钻孔深度大于潜在滑动面以下5米,用测斜仪每两周测量一次;锚固力传感器安装在关键受力锚杆上,实时监测锚固力的变化。将监测到的数据实时传送到分析平台,当变形速率达到2毫米/日或者累计位移达到设计允许值的70%以上时就发出报警信号。当监测值达到预警阈值时,平台会发出报警信号,现场停止施工并组织技术分析,按照分析结果调节施工参数或者增添加固手段,从而实现施工、监测、反馈、改善的闭环控制,保证边坡在施工期间以及运营期的长久稳定。

3.3 施工环境适应性改良与多技术协同应用

矿山高陡边坡所处的环境比较复杂多变,施工技术的应用要考虑气候、水文和开采扰动等各方面因素。在降雨充足的地方,在坡顶处设置截水沟、坡面布设排水孔和泄水槽,减小雨水入渗对边坡稳定性的破坏。冻融频繁地区的锚固注浆材料要加入防冻剂,植被混凝土用耐寒植物品种。高度大于100米的超高陡边坡,单一种类的防护措施不能达到要求,需要采用多种技术共同配合使用。

降雨充沛地区的截水沟沿坡顶外围布置,断面尺寸为底宽40厘米、深50厘米,纵向坡度不小于1%,将坡顶汇水引至天然沟渠。坡面排水孔孔径为50毫米~80毫米,孔深3米~5米,间距3米~5米,孔内插入打孔塑料管并包裹土工布防止堵塞。泄水槽沿坡面纵向布置,每20米设一道,槽体用混凝土浇筑,断面尺寸20厘米×20厘米,与坡脚排水系统相接。冻融频繁地区,注浆材料中掺入水泥用量为3%~5%的防冻

剂,选用亚硝酸钠或氯化钙等具有早强和防冻双重功能的添加剂,注浆后覆盖保温材料养护不少于7天^[5]。植被混凝土用羊茅、早熟禾等耐寒草种和紫穗槐等灌木种子混合播种,播种时间在春季解冻后或秋季初冻前。超高陡边坡多技术协同的方案中,坡体深层用预应力锚索抗滑,锚索长度为30~50米,锚固力设计值为800千牛~1200千牛,锚索间距4米~5米。坡面浅层用主动柔性防护网约束,网型为D0/08/300型钢丝绳网,网孔尺寸30厘米×30厘米,钢丝绳直径8毫米。坡脚设被动柔性防护网拦截落石,网高5米~6米,立柱间距10米,能量等级不小于500千焦。局部破碎带用喷射混凝土封闭,喷射厚度5厘米~8厘米,强度等级C20。坡面绿化用植被混凝土,喷射厚度为8厘米~12厘米,由种植土、水泥、有机质、保水剂和植物种子组成混合基材。多技术协同构成深部锚固、浅层约束、坡面防护、生态恢复的立体防护体系,各个技术层次互相补充而不是简单叠加,锚索给深层滑移提供抗滑力,主动网约束浅层块体脱落,被动网拦截坡脚落石,植被混凝土修复坡面生态,四者有机组合达到超高陡边坡全方位控制的目的。

4 结束语

矿山建设工程高陡边坡防护施工技术是矿山安全、可持续发展的重要组成部分。研究表明,高陡边坡防护不是单一技术的简单叠加,而应该根据工程地质条件来建立分层、分级、立体化的综合防护体系。预应力锚固解决深层滑动问题,柔性防护网控制浅层掉块,植被混凝土完成生态修复,三者在中互相配合、相互促进。随着智能传感技术和自动化施工设备的发展,高陡边坡防护施工将向着越来越精确、越来越智能化的方向发展,进而促进矿山建设工程的安全、绿色、高效发展。

参考文献:

- [1] 孙宇辉.石材矿山高陡边坡稳定性监测预警技术研究与应用[J].石材,2026(04):31-33.
- [2] 朱末琳,杨建新,李岩,等.关于南方露天矿山高陡边坡生态修复技术研究[J].世界有色金属,2026(05):118-120.
- [3] 李明和,杨晓涵,闫晓波,等.废弃矿山生态修复高陡岩质边坡复绿的可行性研究:以苔藓为例[J].科技创新与应用,2026,16(05):86-91.
- [4] 陈明,侯勇,黄涛,等.半干旱地区露天废弃矿山生态治理应用研究[J].中国资源综合利用,2026,44(01):174-178,184.
- [5] 丘小强,陈昌山,卢猛,等.基于边坡雷达监测的高陡边坡反倾岩层变形破坏特性研究[J].中国安全科学学报,2025,35(S2):203-209.