

风化岩体条件下露天矿山边坡滑坡诱因及综合治理研究

韩 博

内蒙古吉林郭勒二号露天煤矿有限公司 内蒙古 锡林郭勒 026299

摘 要: 风化岩体结构松散、力学性能薄弱, 露天矿山开采作业进一步加剧边坡结构损伤, 极易引发滑坡地质灾害, 严重影响矿山施工安全与场地稳定。本文结合风化岩体边坡的结构、力学及变形发育特征, 系统梳理岩体劣化、结构缺陷、自然环境及工程扰动四类滑坡诱发因素, 针对性搭建排水防控、岩体加固、体型规整、生态防护相结合的综合治理体系, 同时结合边坡差异化病害特征, 优化多因素适配、分区治理、技术融合及长效管护的治理思路, 可为风化岩质露天矿山边坡的常态化治理提供科学参考。

关键词: 风化岩体; 露天矿山; 边坡滑坡; 失稳诱因; 修复治理

引言: 露天矿山边坡长期裸露于自然环境中, 岩体经长期风化作用会出现结构破碎、强度衰减等问题, 整体稳定性大幅下降。矿山持续开挖、施工扰动及复杂气象水文条件, 会持续加剧边坡岩体损伤, 促使裂隙不断发育贯通, 进而引发滑坡、坍塌、滑坡等病害, 直接制约矿山工程施工有序开展。为有效管控风化岩体边坡失稳风险, 改善矿山边坡防护现状, 结合风化岩质边坡的基础特性与滑坡发育规律, 深入剖析各类失稳诱因, 探索科学完善的综合治理技术与优化思路, 对保障露天矿山边坡稳定具有重要现实意义。

1 风化岩体露天矿山边坡基础特征

1.1 风化岩体结构构造特征

露天矿山边坡的风化岩体受长期自然风化作用改造, 原生岩体的完整结构被持续破坏。岩体内部原生节理、裂隙不断扩张、延伸, 新生细碎裂隙密集发育, 整体呈现碎裂状、散体状结构形态。浅层边坡岩体风化程度最深, 原有岩层层理结构完全消解, 岩块尺寸细小且分布杂乱。中层岩体保留部分原生结构轮廓, 裂隙贯通性较强, 会形成不规则块状组合结构。深层岩体风化程度较弱, 结构完整性偏高, 仅表层存在少量风化裂隙。边坡岩体结构面分布无固定规律, 倾角、走向存在明显差异, 结构面内部多填充泥质、碎屑物质。这类填充物质质地松散, 大幅降低岩体结构面的咬合强度, 让边坡岩体整体结构稳定性持续下降^[1]。露天开采的开挖扰动会进一步切割岩体结构, 打破原生应力平衡, 促使裂隙持续拓展贯通。

1.2 风化岩体物理力学属性特征

风化岩体的物理指标随风化程度变化呈现明显梯度差异。重度、密实度会随风化深度变浅逐步降低, 孔隙率、含水率持续升高。浅层风化岩体孔隙发育, 吸水能力强, 雨水渗透速度快, 储水性能突出。深层完整岩体质地密实, 孔隙占比极低, 透水性能微弱。力学性能层面, 风化作用持续消解岩体颗粒间的胶结力, 岩体抗压强度、抗剪强度大幅衰减。浅层散体状岩体几乎无整体强度, 受力后易发生颗粒滑移、松散坍塌。中层块状风化岩体强度存在明显各向异性, 沿结构面方向抗变形能力极差, 垂直结构面方向可承受小幅荷载。岩体弹性模量随风化程度提升不断减小, 受力后变形量大, 残余变形占比高, 无法快速恢复初始形态。

1.3 风化岩质边坡变形发育特征

风化岩质边坡变形依托岩体结构缺陷逐步发育, 变形模式具备明显阶段性。边坡表层岩体长期暴露在自然环境中, 最先出现表层剥落、松散掉块等浅表变形现象。降雨、温度交替变化会加速表层岩体崩解, 细碎岩屑持续脱落, 逐步形成浅层凹坑、沟槽。随着开采作业持续推进, 边坡高度、坡度不断增大, 岩体内部应力持续调整, 深层裂隙逐步贯通扩展。边坡中部及坡脚位置应力集中现象显著, 会出现岩体挤压、鼓胀等变形表现。裂隙持续扩张后, 边坡岩体易出现局部滑移、垮塌问题。变形发育范围会从表层逐步向岩体深部延伸, 变形速率受降雨、开采扰动影响明显。雨水入渗会软化结构面填充物质, 加剧岩体滑移趋势, 大幅提升边坡失稳的发生概率。

2 风化岩体露天矿山边坡滑坡诱发因素

2.1 岩体风化内在影响因素

岩体长期遭受风化侵蚀,岩性会出现不可逆的劣化损伤。水、大气长期作用于岩体内部矿物,坚硬原生矿物逐渐蚀变为松软泥质矿物。颗粒之间的胶结介质不断流失,岩体整体变得疏松多孔、质地脆弱^[2]。不同岩性的抗风化能力存在差异,边坡岩体风化程度分布不均,坡体内部形成多处强度薄弱带。软弱风化层承载性能不足,无法稳定承接上部岩体的自重压力。风化过程持续弱化岩体抗破坏、抗变形能力,坡体内部隐性损伤不断累积。岩体完整程度持续下降,结构稳定性逐步变差,为边坡滑坡灾害的发生创造了条件。

2.2 岩体结构缺陷影响因素

岩体内部各类结构缺陷是诱发边坡滑坡的关键内因。原生节理、构造裂隙、层理面等结构面交错穿插,将完整岩体切割成大量独立块体。结构面缝隙内填充松散碎屑物质,抗剪强度极低。坡面与结构面形成不利组合倾角时,岩体极易顺着软弱结构面发生剪切滑动。密集分布的裂隙相互贯通,形成连续破损通道,彻底割裂岩体的整体结构性。倾斜发育的结构面会大幅降低坡体整体稳定性,破碎岩块之间咬合力度不足。外界荷载出现小幅波动时,局部岩体就会松动脱落,变形持续扩张后最终形成整体滑坡。

2.3 自然环境外在影响因素

自然环境变化会持续扰动露天矿山边坡的稳定状态。大气降水是最主要的外部致灾因素,雨水渗入岩体裂隙后,长期浸泡软化软弱结构层,大幅降低结构面摩擦阻力。裂隙充水后产生渗透压力,推动岩体块体发生错位、滑移。昼夜温差和四季气温波动让岩体反复胀缩变形,有效促进裂隙延伸、扩张。大风、强光暴晒会加速表层岩体风化崩解,持续损耗坡体稳定储备。矿区多发的短时强降水会快速改变坡体含水状态,加剧岩体软化程度,显著提升边坡滑坡的发生概率。

2.4 矿山工程扰动影响因素

矿山工程施工活动会打破边坡岩体原始的应力平衡状态。机械开挖、爆破作业产生的冲击荷载会破坏岩体结构,催生大量新生裂隙,同时激活原本闭合的老旧裂隙。台阶开挖会重塑边坡形态,增大坡面坡度和临空面范围。坡体自重应力和构造应力重新分配,坡脚、坡面等关键区域频繁出现应力集中。施工振动、运输设备往复荷载会持续扰动坡体结构,加剧岩体松动破损。长期持续的工程作业不断累积岩体损伤,让边坡稳定状态持续衰减,最终诱发岩体失稳、滑坡等灾害。

3 风化岩体露天矿山边坡滑坡综合治理技术

3.1 边坡水害防控治理技术

水体侵害是风化岩体边坡失稳的重要诱因,水害防控从截水、排水、隔水多个维度系统推进。边坡顶部布设封闭式截水沟,有效拦截山体汇水,阻止地表水流向坡面渗透汇集。坡面布置网状排水沟槽,顺应边坡起伏走势施工,快速疏导坡面漫流,缩短雨水滞留时间。坡体深部钻进竖向排水孔,穿透浅层松散风化层,及时导出内部积水,有效降低孔隙水压力。裂隙密集发育区域采用注浆封堵工艺,填充岩体缝隙,阻断水体渗透通道^[3]。坡脚配套修建集水井和排水暗沟,统一收集坡面渗水与地下水并有序排出,持续减轻水体对软弱岩体的软化和侵蚀作用。

3.2 破损岩体加固处置技术

根据风化岩体破损程度的差异,现场采用分级、分类的加固处置方案。坡面浅层松散岩体、松动危石先通过人工清坡方式彻底清理,规整坡面基础形态,消除浅表脱落隐患。中度破损的碎裂岩体采用锚杆与喷射混凝土联合支护工艺,锚杆深入完整基岩,牢牢拉结破碎岩体,提升整体整体性。喷射混凝土面层封闭裸露裂隙,隔绝空气和雨水,阻断岩体持续风化。深部裂隙发育区域采用压力注浆技术,浆液渗透填充岩体内部空隙,固化松散颗粒,重塑岩体胶结结构。破碎程度较高的局部区域加设钢筋网片,提升防护层抗变形、抗冲击能力,克制边坡微小变形引发的结构破损。

3.3 边坡体型规整改造技术

边坡体型规整通过优化坡体几何形态,改善内部应力分布,从源头规避滑坡风险。针对坡度过陡、临空面偏大的边坡,实施分级削坡处理,逐级放缓坡面坡度,减小上部岩体自重带来的滑移推力。统一规整开采台阶的宽度和高度,打磨坡面凸起部位、填平凹陷沟槽,消除坡面不规则形态带来的应力集中。彻底清理坡面及平台堆积的松散弃土、危岩,避免额外堆积荷载压迫坡体结构。对承载力薄弱的坡脚区域开展回填压实作业,夯实边坡基础承载体系,强化坡体支撑性能。规整施工全程控制开挖量,避免大规模扰动引发二次岩体损伤,保障坡体应力状态稳定。

3.4 边坡生态防护适配技术

边坡生态防护兼顾工程稳固与生态修复需求,适配风化岩质边坡的地质条件。破损严重、稳定性较差的坡面采用客土喷播工艺,选取耐旱、固土性能优良的乡土草种与灌木种子,搭配有机附着基质均匀覆盖坡面,逐

步形成稳定植被覆盖层。风化程度适中、结构完整的坡面铺设生态植草毯,快速固定表层细碎岩块与松散土体,抵御坡面雨水冲刷。坡顶、坡脚及边坡平台位置成片栽植耐旱灌木,搭建多层立体植被防护体系,强化固土护坡效果。成型植被可以削弱雨水冲刷强度,调节坡面温湿度,减缓岩体风化速度,实现边坡长期稳定与生态恢复的双重目标。

4 风化岩体露天矿山边坡治理体系优化思路

4.1 多因素耦合下治理适配思路

露天矿山风化边坡的工况条件较为复杂,稳定性会受到地质基底、自然环境、工程施工多重条件的交叉影响。单独采用某一种治理方式,只能处理局部浅表病害,很难适配坡面复杂的损伤状态。岩体风化松散、内部裂隙发育是边坡失稳的核心内因,雨水下渗、气温反复、持续开挖等外界条件,会不断加剧岩体损伤,推动边坡病害持续发展^[4]。优化治理方案时,需要细致区分各类影响条件的作用强度,辨别主次病害诱因,依据现场实际情况精准施策。岩体颗粒松散、胶结性差的区域,优先开展结构加固作业,补足岩体强度缺陷。水系活跃、渗水问题突出的区域,重点完善排水和隔水设施,削减水害带来的负面作用。

4.2 边坡分区针对性治理思路

露天矿山边坡覆盖范围广、竖向分层多,各区域岩体风化程度、结构完整度及受力状态均存在差异。全域套用统一治理标准,会出现治理不足或施工冗余的问题,浪费工程资源。依据岩体完整度、表层破损状况、应力分布及水文条件,可对边坡实施分区治理。表层强风化岩体松散易碎,抗冲刷性能差,日常易发生掉块、剥落,施工以表层封闭、清坡固土、防冲刷防护为核心。中部中风化岩体裂隙贯通性强,结构整体性不足,通过注浆充填、锚杆支护强化岩体内部联结,提升坡面结构强度。坡脚及深部岩体承受主要上部荷载,应力集中现象显著,通过优化坡体形态、夯实基础结构,提升边坡承载性能。

4.3 多元治理技术融合思路

单一边坡防护技术存在明显短板,刚性支护韧性不足,长期服役易产生开裂、变形问题。纯生态防护结构强度有限,无法单独处置岩体破碎、结构失稳等高危病害。治理体系优化依托多技术融合思路,整合不同工艺优势,构建复合型防护体系。采用锚杆、喷射混凝土、压力注浆等刚性技术,修复岩体结构性损伤,稳固边坡主体框架,抵

抗自重与外力变形破坏。配套排水沟槽、裂隙封堵等柔性措施,疏导坡体积水,缓解渗水压力对软弱岩体的侵蚀。结合客土喷播、灌木栽植等生态工艺,恢复坡面植被覆盖,抑制表层风化与雨水冲刷,改善矿区坡面环境。根据不同坡面防护等级组合施工工艺,合理排布工序,让各类防护技术相互配合、协同作用。

4.4 边坡长期防护维护思路

边坡防护具备长期性特征,单次治理施工无法彻底根除边坡安全隐患。环境更替、雨水冲刷、持续矿山开挖会不断改变坡体应力与岩体结构,持续催生新的病害问题。边坡治理需要摒弃重建设、轻管护的传统模式,建立常态化巡查养护机制。日常作业重点排查裂隙扩张、岩体松动、排水设施淤积等隐患,及时处置局部微小破损,遏制病害持续发育。根据季节变化调整管护重点,雨季提前疏通排水通道,减少雨水集中入渗引发的岩体软化问题。旱季强化植被养护与表层防护,减缓岩体风化进度^[5]。贴合矿山开采进度预判边坡变形与应力转移规律,提前布设防护措施。依托现场运维数据持续调整防护方案,适配边坡动态变化的稳定状态。

结束语

风化岩体露天矿山边坡滑坡问题由多重因素共同作用形成,岩体自身结构与性能劣化为失稳提供基础条件,自然环境与工程活动则加速病害发育进程。各类针对性治理技术可从控水、固岩、改形、生态修复等多个维度改善边坡运行状态,分区施策、多元融合、长期管护的治理模式,能够有效弥补单一防护技术的应用短板。完善的综合治理体系可持续弱化各类致灾因素的负面影响,稳固风化岩体边坡结构,保障露天矿山生产过程的安全有序开展。

参考文献

- [1] 李荟,韩晓飞,朱万成,等.基于多源信息融合的矿山边坡滑坡灾害研究现状与展望[J].工矿自动化,2024,50(6):6-15.
- [2] 宋来臣,林毅斌.边坡雷达在露天矿山边坡滑坡预警的应用研究[J].煤炭技术,2021,40(7):119-121.
- [3] 高继章.降雨入渗下矿山破裂结构岩质边坡滑坡成灾机理分析[J].矿产勘查,2025,16(9):2178-2184.
- [4] 杨传江.矿山地质灾害治理中边坡稳定性与滑坡治理技术[J].中国金属通报,2025(16):71-73.
- [5] 周尚栋.矿山地质灾害治理中边坡稳定问题及滑坡治理方法[J].中国金属通报,2026(5):86-88.