

降雨工况下露天矿山边坡滑移风险分析与防控对策

韩 博

内蒙古吉林郭勒二号露天煤矿有限公司 内蒙古 锡林郭勒盟 026299

摘 要: 降雨是诱发露天矿山边坡滑移灾害的核心诱因, 为有效防控边坡失稳风险, 本文系统剖析降雨入渗诱发边坡滑移的力学机理与演化过程, 识别气象、地质、工程人为三大风险因子, 构建多层次风险评价体系, 结合数值模拟完成风险验证与等级划分。从源头、过程、动态、管理四维提出综合防控对策, 形成完整的风险研判与治理体系, 可为矿山边坡安全管控提供理论与工程参考。

关键词: 降雨工况; 露天矿山; 边坡滑移风险; 防控对策

引言: 露天矿山边坡长期受降雨侵蚀作用, 雨水入渗会弱化岩土体力学性能、改变坡体渗流应力状态, 极易引发溜塌、顺层滑移、圆弧滑坡等灾害, 严重威胁矿山开采安全与生产秩序。当前降雨型边坡失稳机理复杂、风险管控针对性不足。为此, 本文聚焦降雨工况, 深入探究边坡滑移机制, 开展风险识别评价, 配套构建全方位防控体系, 旨在精准化解矿山边坡降雨失稳隐患, 提升矿山安全生产保障能力。

1 降雨工况下露天矿山边坡滑移基础理论与机理分析

1.1 露天矿山边坡基础特性

(1) 边坡地质结构特征。露天矿边坡岩土体类型决定其力学强度基础, 软弱夹层分布位置与产状控制潜在滑移面空间展布, 岩层倾角与坡面组合关系影响下滑力大小, 裂隙发育切割岩体降低结构完整性, 上述地质要素共同构成边坡稳定性的内在控制条件。(2) 边坡工程作业特征。爆破震动与机械开挖扰动原岩应力场, 导致岩体松动损伤; 边坡坡率偏陡直接增大下滑分力; 台阶布设或坡脚开挖不合理破坏边坡几何约束与支撑条件, 人为因素与地质弱面耦合加速边坡结构劣化。(3) 边坡初始稳定状态。自然工况下边坡稳定性取决于抗剪强度与下滑力的平衡。通过极限平衡分析可计算初始稳定系数, 结合应力场与位移场圈定剪应力集中区和塑性区, 界定稳定阈值并标定潜在失稳区域, 为降雨工况评价提供基准。

1.2 降雨入渗边坡作用基础理论

(1) 雨水入渗基本原理。雨水在重力与基质吸力驱动下沿岩土孔隙及裂隙入渗, 服从达西定律及非饱和渗流理论。短时强降雨入渗深度有限但表层迅速饱和, 持续降雨则湿润锋稳步下移、地下水位抬升, 二者入渗深度与响应时效差异显著。(2) 有效应力原理。降雨入渗增大孔隙水压力 u , 依据 $\sigma' = \sigma - u$ 有效应力 σ' 衰减, 颗粒间

摩擦与黏结削弱, 按Mohr-Coulomb准则 $\tau_f = c' + (\sigma - u)\tan\varphi'$ 抗剪强度降低, 此为降雨失稳的核心力学机制^[1]。(3) 流固耦合作用理论。渗流场与应力场动态交互, 渗流改变孔隙水压力与体积力, 应力场反致渗透特性改变, 驱动边坡经历变形→微裂纹萌生→裂隙扩展→滑移面贯通的力学演化过程。

1.3 降雨诱发边坡滑移演化机理

(1) 初期入渗软化阶段。降雨初期, 雨水入渗表层岩土体, 沿软弱结构面优先渗透, 遇水后结构面发生物理化学软化, 颗粒间胶结物溶解或润滑, 表层黏聚力降低, 坡面萌生微裂隙, 稳定性开始劣化。(2) 渗流扩容损伤阶段。持续降雨下湿润锋深移, 裂隙水压力增大引发尖端应力集中, 驱动裂隙扩展与贯通, 坡体损伤累积。同时含水率升高增加自重, 滑带抗剪强度持续衰减, 坡面裂缝张开、变形加速。(3) 整体滑移失稳阶段。当滑面处孔隙水压力升至临界值, 有效应力不足以维持极限平衡时, 下滑力全面超越抗滑力, 潜在滑移面完全贯通, 边坡发生突发性整体滑移, 表现为局部垮塌或大规模滑坡灾害。

1.4 边坡滑移典型破坏模式

(1) 表层溜塌模式。多发生于短时强降雨工况, 雨水快速饱和表层松散堆积物或强风化层, 形成厚度一般1~3m的浅层滑动, 破坏范围局限但突发性强、预警时间短。(2) 顺层滑移模式。受岩层产状控制, 当坡面倾向与岩层倾向一致且坡角大于岩层倾角时, 雨水浸润软弱夹层形成连续滑带, 滑体沿层面方向整体滑动, 规模大、滑移远, 危害显著。(3) 圆弧滑坡模式。见于均质土坡或高度破碎岩体, 持续降雨使孔隙水压力场均匀上升, 最危险滑移面近似圆弧形, 滑体绕转动中心发生旋转式坍塌, 破坏范围及厚度均较大。

2 降雨工况下露天矿山边坡滑移风险识别与评价

2.1 边坡滑移风险因素识别

(1) 气象水文因素。降雨是诱发边坡滑移最直接的外部动力因素,其影响涵盖降雨强度、持续时长与降雨频次三个方面:短时强降雨易引发表层快速饱和,形成暂态饱和区及滞水压力;持续降雨则导致深层入渗与地下水位系统性抬升,降低坡体整体稳定性。区域地下水位的季节性和降雨补给性波动亦显著影响坡体渗流场分布^[2]。(2) 地质岩土因素。地质条件是边坡稳定性的内在控制因素,具体包括岩土体力学强度参数、软弱夹层的空间展布与物理力学特性、裂隙网络的发育密度与贯通程度、岩层产状与坡面的组合关系等。上述因素共同决定了边坡在降雨工况下的易滑禀赋。(3) 工程人为因素。矿山工程活动对边坡稳定性构成直接人为扰动,主要表现为边坡坡率设计不当导致坡体偏陡、开采爆破震动损伤岩体结构、截排水设施不完善致使坡面汇水集中入渗、日常运维管理缺失导致风险隐患未及时处置等。

2.2 风险评价指标体系构建

(1) 指标选取原则。指标选取遵循科学性、针对性、可量化与全面性四项基本原则:科学性确保指标具有明确物理意义与理论依据;针对性聚焦降雨诱发滑移的核心影响要素;可量化保障指标能够有效赋值与计算;全面性则要求覆盖各类风险来源,避免关键信息遗漏。(2) 层级指标确立。建立目标层、准则层、指标层三级评价体系结构:目标层为边坡滑移风险综合评级;准则层涵盖气象、地质、工程、管理四大风险维度;指标层在各准则下细化具体评价因子,形成层次清晰、覆盖完整、互不冗余的递阶层次结构。(3) 指标量化处理。对定性指标采用专家打分与隶属度函数相结合的方法进行标准化赋值,对定量指标开展量纲统一与归一化处理,通过极差变换或Z-score方法消除量纲影响,完成指标数据的规范化预处理,为后续权重计算与综合评价奠定数据基础。

2.3 边坡滑移风险评价模型与等级划分

(1) 评价方法选取。采用层次分析法确定主观权重,反映专家经验与工程认知;结合熵权法修正客观权重,消除人为偏差;综合主客观权重后运用模糊综合评价法构建风险评价模型,实现多指标信息的集成融合与风险特征值的量化输出。(2) 风险等级划分。将边坡滑移风险划分为低风险、中风险、较高风险、高风险四个等级,分别对应稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定四种状态,明确各等级在稳定系数区间、变形速率阈值及降雨工况条件等方面的具体判定标准,确保等级边界清晰可辨^[3]。(3) 风险结果分析。依据评价模型输出结果,

完成矿山整体边坡的风险等级综合评定,明确风险空间分布规律,精准定位高风险区域的具体范围与位置,同时识别影响风险等级的核心诱因,为风险分级管控与工程治理提供科学决策依据。

2.4 边坡滑移风险数值模拟验证

(1) 模型构建。依托MIDAS或FLAC3D等数值模拟软件,依据矿山地质勘探资料与开采设计图,建立反映真实地形地貌与地层结构的露天矿边坡三维地质模型,合理赋予各岩土层物理力学参数,设定符合现场实际的边界条件与初始应力场。(2) 多工况模拟。设置不同降雨强度与不同降雨持时组合下的多工况模拟方案,系统分析各工况条件下边坡渗流场的时空演化规律、应力场重分布特征及位移场响应趋势,重点追踪坡体安全系数随降雨进程的动态衰减路径与临界失稳时刻。(3) 结果验证。将数值模拟揭示的边坡变形破坏特征、潜在滑移面形态与风险评价结论进行系统比对,验证二者在风险等级判定及高风险区划上的一致性程度。分析偏差来源并对评价体系指标权重进行必要修正,确保风险评价结果的准确性与工程适用性。

3 降雨工况下露天矿山边坡滑移综合防控对策

3.1 源头防控: 边坡优化与排水系统完善

(1) 边坡参数优化。源头防控的首要举措在于优化边坡几何设计参数。依据矿山工程地质条件与降雨工况组合,通过稳定性反演计算,合理调整边坡整体坡率、台阶高度与平台宽度,放缓高危区段坡度,缩短单级坡面汇流长度,减少坡面径流汇集与雨水滞留时间,从几何形态上降低雨水入渗的概率与通量,同时减轻坡体自重产生的下滑驱动力。(2) 地表排水工程。地表排水系统遵循“截、排、导”协同原则,在坡顶外围设置截水沟以拦截坡面以上汇水区径流,在各级台阶平台内侧布设排水沟以切断坡面径流连续下泄路径,在坡脚及关键部位设置排水渠以快速引导汇水远离坡体。截水沟与排水沟断面尺寸按设计暴雨强度核算,确保排水能力满足极端降雨工况需求,有效避免坡面积水下渗^[4]。(3) 地下排水治理。地下排水旨在主动干预坡体渗流场,通过在坡面布设仰斜排水孔群、在坡体内部设置集水盲沟与渗水管道,构建深部排水通道,将坡体地下水与孔隙水压力有效疏降。排水孔应穿透潜在滑面并延伸至排水层位,确保滑带附近水压及时消散,从水力学角度显著提升坡体抗滑稳定性。

3.2 过程防控: 边坡加固工程技术应用

(1) 表层防护加固。针对边坡表层风化层与松散堆积体,采用喷射混凝土封闭坡面形成防渗层,阻断雨水

直接入渗通道；或采用三维植被网结合客土喷播等生态护坡技术，兼顾坡面抗冲刷能力与生态恢复需求；网格护坡（如浆砌片石骨架、混凝土格构）则通过骨架嵌固作用增强表层土体整体性，抵御雨水冲刷与软化破坏。

（2）深部结构加固。针对稳定性系数不足的高危边坡区段，采用锚杆、预应力锚索框架或抗滑桩等深部支护手段。锚杆与锚索穿过潜在滑面锚固于稳定岩层，施加主动预应力以约束坡体变形位移；抗滑桩则依靠桩体抗弯刚度与嵌固段抗力，直接承担滑体推力，大幅提升边坡整体结构强度与抗滑储备。（3）软弱夹层治理。对边坡内部强度低、遇水软化显著的软弱夹层，实施注浆加固以充填裂隙、胶结松散颗粒、提升夹层内聚力与内摩擦角；对于浅层且规模有限的软弱带，可采取换填处理，以高强度材料置换原软弱介质，消除沿结构面渗水滑移的根源性隐患。

3.3 动态防控：监测预警体系构建

（1）全方位监测布设。在边坡关键断面与重点风险区域，系统布设地表位移监测点（GNSS）、深部测斜仪、孔隙水压力计、土压力计及自动雨量站，形成覆盖“地表—深部—水文—气象”的立体监测网络，实现边坡变形响应、渗流动态与降雨输入的同步实时采集。

（2）分级预警机制。综合降雨强度等级、累计雨量、孔隙水压力增幅及变形速率等核心指标，建立蓝、黄、橙、红四级预警标准。蓝色预警代表关注级，黄色预警启动加密监测，橙色预警触发现场巡查与限产措施，红色预警立即停工停产并启动人员撤离与应急处置，各级预警明确触发阈值、响应流程与责任主体，形成闭环管理制度。（3）智能化监测运维。依托物联网通信、云计算与大数据分析技术，构建监测数据自动采集—无线传输—云端存储—智能分析—自动预警的全链条智能化运维平台，实现异常数据的自动识别与预警信息实时推送，推动风险防控从事后应对向事前预判转变，显著提升风险防控的时效性与精准度^[5]。

3.4 管理防控：矿山安全管控体系优化

（1）完善作业管理制度。建立健全降雨天气矿山开采作业规范，明确不同降雨等级下的作业限制要求与停

工标准，极端降雨天气严格执行停工停产制度，并同步启动雨后边坡专项巡查与安全确认程序，严禁在边坡稳定性不明情况下恢复作业。（2）常态化隐患排查。将边坡隐患排查纳入矿山日常安全管理流程，制定标准化巡查清单与巡查频次要求，重点检查排水设施是否通畅、支护结构是否受损、坡面裂隙是否扩展等关键指标，建立隐患登记—评估分级—整改落实—验收销号的闭环治理台账，确保隐患及时消除。（3）应急保障体系建设。编制边坡滑移灾害专项应急预案，明确应急组织指挥体系、险情报告流程、人员撤离路线与抢险救援方案；定期足量储备应急抢险物资并建立专用仓库；每季度组织一次应急演练，检验预案可操作性、锻炼应急队伍协同能力，不断优化应急响应流程，全面提升矿山灾害应急处置综合能力。

结束语

本文完整阐明了降雨工况下露天矿山边坡滑移的演化机理与破坏模式，明确了核心风险诱因，建立了科学可行的风险评价与验证方法，形成多维度协同防控技术与管理体制。研究厘清了降雨诱发边坡失稳的关键力学规律，有效弥补了矿山边坡专项降雨风险管控的短板。研究成果可直接应用于露天矿山边坡治理与安全运维，对防范降雨型滑坡灾害、筑牢矿山安全防线具有重要实践价值。

参考文献

- [1]王磊.雨水作用下缓倾角岩层露天矿边坡变形滑移机理研究[J].中国矿业,2024,33(S1):128-136.
- [2]陈涛,黄浩轩.降雨作用下露天矿山边坡失稳机理与风险特征研究[J].矿产勘查,2025,16(2):210-216.
- [3]刘鑫,周志芳.降雨作用下多软弱夹层露天边坡滑移机理及稳定性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(5):92-99.
- [4]徐伟.降雨诱发露天高陡边坡滑移灾害监测预警技术研究[J].矿产勘查,2024,15(1):189-195.
- [5]张佳伟.降雨工况下露天矿排土场边坡渗流特性与滑移防控措施[J].煤炭科学技术,2023,51(8):178-184.