

降雨入渗对露天矿边坡稳定性影响分析

金富国

云南华联锌铜股份有限公司 云南 文山 663701

【摘要】：降雨入渗对露天金属矿边坡稳定性具有显著影响，其通过改变岩土体含水状态及孔隙水压力分布，导致抗剪强度降低并诱发失稳风险。基于典型露天金属矿边坡工程条件，分析降雨入渗过程中水分迁移规律及其对边坡应力场的影响机制，探讨不同降雨强度与持续时间下稳定性变化特征。结果表明，入渗深度与孔压累积是控制边坡安全系数降低的关键因素，持续降雨条件下边坡稳定性呈明显衰减趋势。针对分析结果提出相应排水与防护措施，为露天金属矿边坡安全管理提供依据。

【关键词】：降雨入渗；露天金属矿；边坡稳定性；孔隙水压力；抗剪强度

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.088

引言

露天金属矿开采过程中形成的大型边坡结构长期暴露于自然环境之中，降雨作用成为影响其稳定性的关键因素之一。雨水通过裂隙与孔隙不断渗入坡体内部，使原有应力与水分状态发生改变，进而影响岩土体力学性质。实际工程中，多起边坡失稳事件与强降雨过程密切相关，表现出明显的时间滞后性与突发性特征。不同岩性条件、结构面发育程度以及排水条件，使入渗过程及其影响呈现复杂变化规律。深入分析降雨入渗条件下边坡内部水力与力学响应，对于揭示失稳机理及提高安全控制水平具有重要价值，同时也为工程设计与运行阶段提供可靠依据。

1 降雨入渗条件下露天金属矿边坡失稳机理分析

降雨入渗作用下，露天金属矿边坡内部水文与力学条件发生显著耦合变化，成为诱发失稳的重要内在因素。雨水通过节理裂隙、结构面及松散堆积层不断渗入坡体，使原本处于非饱和状态的岩土体逐渐向饱和或高含水状态转变，基质吸力明显降低，导致有效应力减小。与此同时，入渗水在坡体内部形成不均匀分布，局部区域易产生滞水带，促使孔隙水压力逐步累积，对边坡稳定性产生持续削弱作用。在露天金属矿边坡中，岩体结构普遍发育不均，节理裂隙与断层构造为降雨入渗提供了优先通道。水分沿结构面快速下渗并在低渗透层之上形成暂时性积水层，使滑动面附近孔隙水压力升高，抗剪强度参数中的黏聚力与内摩擦角均出现不同程度衰减。特别是在软弱夹层或风化带发育区域，含水量的增加会显著降低岩土体的结构稳定性，使潜在滑移面逐渐贯通。

降雨持续时间与强度共同影响入渗深度及水力响应特征^[1]。短时强降雨往往导致表层迅速饱和，形成浅层滑移条件；而长时间降雨则使水分逐步向深部迁移，引起深层孔隙水压力上升，进而影响整体稳定状态。坡体内部渗流场与应力场的耦合作用，使局部应力集中区发生重新分布，滑动力逐渐增大，

当抗滑力不足以抵抗剪切作用时，边坡进入失稳临界状态。在实际露天金属矿工程中，开采活动改变了原有地形与应力平衡，边坡高度增加、坡角加大，使其对降雨入渗更加敏感。排水系统不完善或表面防护措施不足时，雨水更易在坡面汇集并渗入内部，加剧不利水力条件的发展，最终形成复杂的水—力耦合失稳机制。

2 降雨强度与入渗过程对边坡稳定性的影响规律

降雨强度直接决定入渗速率及坡体水分迁移方式，是影响露天金属矿边坡稳定性的关键外部条件。在较低降雨强度下，降水主要以均匀渗透形式进入坡体，水分沿毛细通道缓慢扩散，非饱和区逐步缩小，基质吸力逐渐减弱，边坡内部应力状态发生平缓变化。此类条件下，稳定性降低过程具有滞后性，安全系数呈缓慢下降趋势，局部结构面附近可能出现剪切强度弱化现象。

当降雨强度接近或超过岩土体渗透能力时，坡面易形成径流与快速入渗并存的状态，裂隙与节理成为主要导水通道，水分沿优势路径迅速进入深部区域。此时，坡体内部渗流场发生明显重构，局部区域孔隙水压力迅速升高，导致有效应力显著降低^[2]。强降雨条件下，浅层岩土体易迅速达到饱和状态，形成不稳定的软化层，滑动面可能在较短时间内被激活，表现出突发性失稳特征。入渗过程的时程特征同样对边坡稳定性产生重要影响。持续性降雨使水分逐渐向坡体深部推进，形成由表及里的湿润锋面，渗流路径不断延伸，深层结构面逐步受水影响。随着时间延长，孔隙水压力在坡体内部累积并向潜在滑动面集中，导致深层滑移条件逐渐成熟。此类情况下，边坡稳定性衰减表现为渐进性变化，但一旦达到临界状态，整体滑移范围往往较大。

不同岩性条件下，降雨强度与入渗过程的耦合作用表现出明显差异。致密岩体中水分渗透受限，主要沿结构面传播，稳定性变化受结构控制明显；而在风化破碎带及松散堆积区，渗

透系数较高,水分易快速扩散,孔隙水压力响应更加敏感。开采过程中形成的台阶边坡与采场帮坡,使坡面几何形态复杂,局部汇水效应增强,进一步改变入渗分布特征。排水条件对降雨入渗影响具有调节作用。完善的截排水系统可降低坡面水量汇集程度,减缓入渗速率;反之,排水不畅会导致水体在坡面及坡内滞留,加剧孔隙水压力累积。降雨强度与入渗过程在时间与空间上的共同作用,使露天金属矿边坡稳定性呈现出明显的非线性变化特征。

3 露天金属矿边坡防渗排水与稳定性控制措施

露天金属矿边坡在降雨入渗条件下的稳定性控制,需从防渗与排水两方面协同优化,通过调控坡体水力环境降低不利水压力的形成与发展。坡面防渗处理是控制雨水入渗的前提环节,针对风化较强或结构破碎区域,可采用喷射混凝土、浆砌片石或复合防渗膜等措施构建隔水层,减少降水沿坡面直接渗入的通道。同时,对坡面裂隙及张开结构进行封闭处理,有助于削弱优势渗流路径,降低水分向深部迁移的可能性。在排水系统构建方面,应结合露天金属矿台阶式边坡特征,形成多级排水体系。坡顶区域设置截水沟以阻断外部汇水进入坡体范围,减少地表径流对边坡的直接冲刷与入渗补给;坡面布设纵横排水沟,将降水迅速导出,避免局部积水形成集中入渗区。对于坡体内部,应根据岩土体渗透特性布置水平排水孔或倾斜排水孔,降低潜在滑动面附近孔隙水压力,恢复有效应力水平。排水孔间距与深度需依据水文地质条件合理确定,以确保排水效果与结构安全之间的协调。

针对深部渗流影响显著的边坡,可结合帷幕注浆技术对关

键部位进行加固处理。通过在结构面发育区或软弱夹层周边实施注浆,提升岩体整体密实度与抗渗性能,阻断水分向不利区域集中迁移^[1]。对于存在高渗透通道的边坡段,可采用分区注浆方式控制渗流路径,使地下水流向趋于稳定。边坡稳定性控制还需与支护结构协同实施。在排水与防渗措施基础上,结合锚杆、锚索及抗滑桩等加固手段,提高坡体整体抗剪能力。锚固结构的布置应避免主要渗流通道,并兼顾排水系统布设,避免因结构干扰影响排水效果。对于高陡边坡区域,可通过减缓坡角或优化台阶宽度,降低重力作用对滑动面的驱动效应,从结构层面增强稳定性。

监测手段在防渗排水体系中具有重要支撑作用。通过布设孔隙水压力计、渗压计及位移监测设备,实时掌握坡体内部水力与变形响应特征,及时识别异常变化趋势。降雨过程中的监测数据可用于分析入渗与排水效果之间的关系,为后续措施调整提供依据。在露天金属矿实际生产环境中,采剥活动持续改变边坡形态,需动态调整防渗与排水布置方案。针对不同开采阶段的边坡高度与结构变化,合理优化截排水设施与支护体系,使其始终与当前工程条件相匹配,从而维持边坡在复杂水力条件下的稳定状态。

4 结语

降雨入渗改变露天金属矿边坡内部水力与力学状态,孔隙水压力累积及抗剪强度衰减成为失稳的重要诱因。不同降雨强度与入渗过程对稳定性影响表现出明显差异。结合防渗处理、排水体系及支护措施的协同配置,可有效改善坡体受水条件并提升整体稳定水平。

参考文献:

- [1] 魏宸昌,袁阳,解联库,刘建东,罗志雄,高原.基于流固耦合作用的降雨条件下某露天矿边坡稳定性分析[J].有色金属(中英文),2025,15(4):701-709.
- [2] 祖华.不同降雨条件下露天矿边坡的稳定性分析[J].四川水泥,2025(9):67-69.
- [3] 杨涛,张秀丽,田湖南.水弱化作用下某露天矿富含节理岩质边坡稳定性分析[J].安全与环境工程,2025,32(3):188-196.