

软弱夹层地段露天矿边坡稳定性分析与监测措施探析

王 岩

天津矿山工程有限公司 天津 300100

摘 要: 软弱夹层是引发露天矿边坡失稳的核心薄弱结构,受地质、工程及环境多因素耦合影响,易出现滑移、蠕变等破坏问题,严重威胁矿山开采安全。本文依托软弱夹层边坡工程特性与失稳机理,采用极限平衡法结合数值模拟的组合方式,开展多工况边坡稳定性分析,精准定位边坡薄弱区域。同时构建智能化监测与分级预警体系,配套支护、排水及施工优化等防控措施,为同类矿山边坡安全管控提供技术参考。

关键词: 软弱夹层地段; 露天矿; 边坡稳定性; 监测措施

引言: 露天矿边坡普遍存在软弱夹层地质结构,其强度低、遇水软化、受力易变形的特性,大幅提升边坡失稳风险,是矿山滑坡灾害频发的主要诱因。随着露天矿山开采深度与规模持续扩大,边坡受力条件更复杂,降雨、爆破扰动等因素进一步加剧夹层结构破坏,安全隐患日益突出。为有效防控边坡灾害、保障开采作业安全,本文系统分析软弱夹层边坡失稳规律,探究精准的稳定性分析方法与高效监测防控对策,助力矿山安全生产长效推进。

1 软弱夹层地段露天矿边坡工程特性与失稳机理

1.1 露天矿边坡软弱夹层基本特征

(1) 物质组成特征: 软弱夹层主要由泥岩、页岩、破碎岩屑及黏土矿物等松散软弱物质构成,整体胶结能力差、孔隙率较高。相较于完整基岩,其岩体完整性极差,是露天矿边坡岩体结构中典型的薄弱结构带,为边坡失稳埋下先天隐患。(2) 力学特性: 软弱夹层的抗压、抗剪强度指标极低,具备显著的流变、遇水软化特性。在外力扰动、雨水入渗等外界作用下,其力学性能会快速衰减,结构抗变形能力大幅下降,极易产生剪切滑移变形,稳定性极差。(3) 空间分布特征: 软弱夹层多以层状、条带状形态断续分布,整体厚度不均匀、产状变化复杂。其空间分布的倾角、埋深等关键参数,直接决定了露天矿边坡的破坏类型、失稳规模及影响范围。

1.2 软弱夹层地段边坡失稳主要影响因素

(1) 内部地质因素: 是边坡失稳的核心内因,主要包含夹层厚度、倾角、物质成分、岩体风化程度及地下水赋存状态。其中地下水入渗会大幅降低结构面摩擦阻力,弱化夹层力学性能,显著加剧边坡失稳风险。(2) 外部工程因素: 矿山开挖卸荷、爆破振动、机械荷载扰动、开采坡度过大、边坡高度不合理等工程活动,会打破岩体原始应力平衡状态,扰动软弱夹层结构,诱发夹

层滑移、变形,触发边坡失稳。(3) 环境气象因素: 降雨、昼夜温差变化、长期风化侵蚀等自然环境作用,会加速软弱夹层软化、泥化进程,持续破坏岩体结构完整性,降低边坡整体稳定性,是边坡突发性滑坡灾害的重要诱因^[1]。

1.3 软弱夹层地段边坡失稳破坏模式与机理

(1) 主要破坏模式: 边坡失稳主要包含滑移、崩塌、错落、蠕变四种破坏形式。受软弱夹层结构控制,该类地段边坡失稳以顺层滑移、渐进式蠕变失稳为核心特征,破坏过程具有明显的阶段性。(2) 失稳演变机理: 失稳过程分为三个阶段,初始阶段,边坡开挖引发岩体应力重分布,软弱夹层产生细微裂隙;中期阶段,水、力耦合作用促使裂隙持续扩张延伸,夹层逐步软化、结构失效;后期阶段,岩体结构面完全贯通,边坡整体结构失稳,最终发生滑坡、坍塌破坏。

2 软弱夹层地段露天矿边坡稳定性分析

2.1 边坡稳定性分析理论与方法选取

(1) 常规分析理论: 极限平衡法是边坡静态稳定性分析的经典理论,主要包含瑞典条分法、毕肖普法、简布法三类常用方法。其中瑞典条分法计算过程简便,但未考虑条块间作用力,计算精度较低;毕肖普法优化了孔隙水压力影响计算,适用于圆弧滑动边坡;简布法适配不规则滑动面,适用性更广。该类方法可快速完成边坡静态安全系数初步计算,适合前期初步稳定性研判。

(2) 数值模拟分析方法: 数值模拟方法主要包括有限元法与有限差分法,核心是通过离散岩体单元,模拟岩体应力、应变及变形演化全过程。相较于常规方法,该方法可充分适配软弱夹层流变、遇水软化、力学参数动态衰减的特性,能够实现边坡动态稳定性分析,精准还原复杂地质条件下边坡的渐进失稳过程,弥补了传统静态计算的局限性。(3) 分析方法确定: 结合软弱夹层地段

边坡地质结构复杂、受力条件多变的特点，单一分析方法难以保障结果精准度。因此确定极限平衡理论定量计算结合数值模拟动态验证的组合分析模式，兼顾计算效率与动态模拟精度，有效保障边坡稳定性分析结果的可靠性与全面性。

2.2 边坡稳定性计算参数确定

(1) 岩体物理力学参数：依托矿区工程地质勘察实测数据与试验报告，确定核心计算参数，主要包括基岩与软弱夹层的天然容重、饱和容重、单轴抗压强度、黏聚力、内摩擦角、弹性模量及泊松比等，所有参数均贴合现场岩体真实力学性能，为精准计算奠定基础。(2) 工况条件参数：结合矿山实际生产环境，划分三类典型计算工况。分别为无外界干扰的自然工况、雨水入渗的降雨工况、开采扰动的爆破工况，差异化设定各工况地下水水位、孔隙水压力、振动荷载等参数，贴合矿山复杂生产场景^[2]。(3) 边坡几何参数：依据露天矿开采设计方案与现场勘测数据，确定边坡建模核心参数，包含边坡整体高度、坡面倾角、台阶宽度、台阶高度，同时精准界定软弱夹层的埋深、厚度及分布倾角，确保几何模型与现场实际边坡形态一致。

2.3 不同工况下边坡稳定性结果分析

(1) 自然静态工况稳定性分析：通过计算得到自然状态下边坡安全系数，剖析边坡整体应力、应变分布规律。结果表明自然工况下边坡应力分布均匀，无集中变形区域，安全系数满足规范要求，边坡整体处于稳定状态。(2) 降雨工况稳定性分析：模拟降雨入渗引发的地下水抬升、夹层软化泥化现象，对比分析降雨前后边坡安全系数变化规律。降雨会大幅弱化软弱夹层抗剪性能，导致安全系数持续衰减，可据此界定降雨时长、降雨量对应的边坡失稳临界条件。(3) 爆破扰动工况稳定性分析：探究开采爆破动荷载对软弱夹层结构面的破坏机制，分析振动作用下边坡变形、位移演化特征。动荷载会加剧结构面裂隙扩展，降低岩体整体性，据此可确定矿山爆破施工的安全振动阈值，规避施工诱发失稳风险。

2.4 边坡稳定性薄弱区域与核心问题总结

(1) 结合多工况分析结果，精准定位边坡稳定性薄弱区域，证实软弱夹层分布段落是边坡应力集中、变形最大的核心区域，也是边坡失稳破坏的主要始发位置，为重点防控区域划定提供依据。(2) 综合梳理各工况边坡稳定性特征，总结核心隐患问题。自然工况下边坡整体稳定，降雨、爆破扰动是诱发失稳的主要外因，软弱夹层力学性能薄弱是根本内因，明确不同场景下的失稳风险特征，为后续边坡监测、防护及治理措施设计提供

数据支撑与理论依据。

3 软弱夹层地段露天矿边坡监测措施与防控对策

3.1 边坡监测总体设计原则与监测内容

(1) 监测设计原则：本次边坡监测工作严格遵循针对性、实时性、全面性与经济性四大核心原则。针对软弱夹层边坡易软化、易滑移、扰动敏感的工程特性，聚焦边坡变形、渗水、应力波动等关键风险指标开展监测。兼顾边坡整体稳定性把控与软弱夹层薄弱区域的重点精准监测，在保障监测数据全面、精准、及时的前提下，合理配置监测资源，避免设备冗余投入，实现安全效益与经济效益的平衡统一。(2) 核心监测内容：结合软弱夹层边坡失稳机理与影响因素，确定五大核心监测模块，全面覆盖边坡失稳诱发关键指标。主要包括边坡表面位移监测、岩体深部位移监测、地下水水位动态监测、岩体应力变化监测以及现场环境雨量监测。多维度监测体系可完整捕捉水、力、变形、环境的动态变化，为边坡稳定性研判和风险预判提供全面的数据支撑。

3.2 智能化边坡监测系统布设与实施

(1) 监测点位布设：基于前文稳定性分析结果，以边坡薄弱区域为核心布设监测点位，遵循“整体覆盖、重点加密”的布设思路。在常规边坡区域均匀布置基础监测点位，重点对软弱夹层分布段落、应力集中区域、边坡中下部易变形区域加密监测点位。合理布置表面位移监测点、深部测斜孔、地下水水位监测井及岩体应力传感器，精准把控薄弱区域的变形与参数变化特征。

(2) 监测设备与技术选型：依托智能化矿山监测技术，选用高精度自动化监测设备构建全天候监测体系。采用GNSS自动化位移监测设备实时捕捉边坡表面微小位移，搭配深部位移监测仪监测岩体内部变形情况，通过智能水位传感器动态监测地下水升降变化，结合全自动雨量监测站记录实时降雨数据。所有设备可实现24小时不间断数据采集、自动传输，摆脱人工监测的滞后性与局限性^[3]。(3) 监测数据处理与分析：搭建自动化数据处理机制，所有监测数据实时上传至信息化平台，自动完成整理、筛选与分类分析。工作人员定期复盘监测数据、编制监测报告，精准识别边坡微小变形、参数异常波动等细微变化，结合软弱夹层流变、软化特性，预判边坡稳定性演变趋势，提前捕捉失稳前兆特征，为风险防控预留处置时间。

3.3 边坡失稳预警机制构建

(1) 预警指标阈值设定：结合边坡稳定性计算结果、现场工程地质条件及矿山长期生产经验，分级设定各类监测指标预警临界值。建立四级预警体系，分别为

绿色安全、黄色预警、橙色警戒、红色险情，明确位移、水位、雨量、应力等各项指标的分级阈值，保障预警标准贴合现场实际，精准区分边坡稳定风险等级。

(2) 分级预警响应机制：针对四级预警等级制定差异化响应方案，形成标准化险情处置流程。黄色预警阶段加强现场常态化巡查、加密监测频次；橙色警戒阶段严控边坡施工活动，管控爆破、开挖等扰动作业；红色险情阶段立即停止周边生产作业，组织人员设备撤离，落实停产整改措施，实现险情分级、快速、高效处置^[4]。

(3) 预警信息推送机制：搭建一体化信息化预警平台，构建多渠道信息推送体系。当监测数据超出预警阈值时，系统自动触发预警，通过手机终端APP、短信、现场声光报警装置同步推送预警信息，确保管理人员与现场施工人员第一时间接收险情通知，杜绝信息滞后导致的安全隐患，保障预警响应及时落地。

3.4 边坡稳定性防控与治理优化措施

(1) 工程支护加固措施：针对软弱夹层力学性能差、易滑移的核心问题，采用多元化综合支护加固技术。通过锚杆锚索支护、挂网喷浆提升表层岩体整体性，搭配挡土墙增强边坡整体抗滑移能力，对岩体破碎、夹层软弱区域实施注浆加固，填充岩体裂隙、固化软弱夹层，强化结构面抗剪强度，从根本上提升边坡整体稳定性。(2) 排水防护措施：水害是诱发软弱夹层失稳的核心诱因，需构建全方位排水体系。在边坡顶部及坡面修建截水沟、排水沟，阻断地表雨水径流与入渗通道；布设地下排水盲沟与导水管道，疏通地下水渗流路径，快速排出岩体内部积水，降低地下水对软弱夹层的软化、泥化作用，减小水压力对边坡结构的破坏^[5]。

(3) 施工优化管控措施：优化矿山开采施工工艺，从源头降低工程扰动影响。合理调整边坡开挖顺序、开采

坡度与台阶高度，遵循分层分段开挖原则；采用微差爆破、预裂爆破技术，有效削弱爆破振动对岩体及软弱夹层的扰动破坏；规范施工机械作业范围与荷载标准，避免集中荷载造成边坡局部变形损伤。(4) 常态化运维管控措施：建立边坡长期安全运维管理制度，落实定期巡查、设备维保、数据复盘工作机制。定期检查边坡支护结构、排水设施完好状态，维护校准监测设备，保障监测系统稳定运行；动态汇总监测数据，更新边坡稳定性数据库，结合季节、开采进度变化优化防控方案，实现边坡长期常态化安全管控。

结束语

本文系统梳理了软弱夹层地段露天矿边坡的失稳机理，通过多工况稳定性分析，明确降雨与爆破扰动是主要失稳诱因，夹层自身力学缺陷是核心内因。针对性搭建全方位智能化监测预警体系，配套完善工程防护、排水治水及施工管控等综合防控措施。研究成果可有效解决软弱夹层边坡稳定性管控难题，提升矿山边坡灾害防控能力，为露天矿安全、高效、可持续开采提供坚实保障。

参考文献

- [1]张宇,王磊.含软弱夹层露天矿边坡失稳机制与动态监测技术研究[J].煤炭工程,2024,56(7):112-117.
- [2]易富,孟兴涛,赵文华,等.基于因素空间的露天采坑边坡稳定性评价[J].地质科技通报,2023,42(5):91-95.
- [3]刘阳,陈凯.软弱夹层赋存特征对露天矿边坡稳定性的影响及防控对策[J].金属矿山,2023,24(8):188-193.
- [4]李金典.软岩边坡露天煤矿多级旋转滑坡失稳机理研究[J].煤矿安全,2025,56(11):150-156.
- [5]赵文涛.露天矿软弱夹层边坡精细化监测体系构建及预警模型研究[J].矿山测量,2022,50(4):98-103.