

露天石灰石矿山边坡稳定性监测与安全管理技术应用

黄 雪

雅安交建集团丹石建材有限公司 四川 成都 611330

摘 要：本文系统梳理了影响露天石灰石矿山边坡稳定性的主要因素，包括岩体结构、水文地质条件、爆破扰动及人为开采活动等；重点阐述了当前主流的边坡稳定性监测技术，涵盖传统监测手段与现代智能监测体系；在此基础上，构建了以“风险识别—动态监测—预警响应—综合治理”为核心的边坡安全管理体系，并结合典型工程案例验证其有效性。最后，文章展望了人工智能、数字孪生等新技术在边坡安全管理中的融合发展趋势，旨在为提升我国露天石灰石矿山本质安全水平提供理论支撑与实践参考。

关键词：露天石灰石矿山；边坡稳定性；监测技术；安全管理体系；智能预警

引言

石灰石作为水泥、冶金、化工等行业不可或缺的基础原料，在国民经济中占据重要地位。我国石灰石资源储量丰富，分布广泛，但受地质构造复杂、开采强度大等因素影响，露天开采过程中边坡失稳事故时有发生。露天石灰石矿山边坡通常具有高度大、坡度陡、暴露面积广等特点，加之石灰岩本身节理裂隙发育、遇水易软化等特性，使其在自然风化、降雨入渗、爆破震动及持续卸荷等多重作用下极易发生变形乃至失稳。传统的边坡管理多依赖经验判断和定期巡检，存在滞后性、主观性强、覆盖范围有限等弊端，难以满足现代矿山安全生产的精细化、智能化需求。因此，系统研究露天石灰石矿山边坡稳定性的影响机制，集成应用先进的监测技术，并构建科学高效的安全管理体系，已成为当前矿山安全领域亟待解决的关键课题。

1 露天石灰石矿山边坡稳定性影响因素分析

1.1 岩体结构与地质构造

石灰岩作为沉积岩，普遍发育层理、节理及断层等结构面，将岩体切割成块状，显著削弱其整体力学性能。当优势节理或断层面产状与边坡走向相近、倾角小于坡角时，易形成潜在滑移面^[1]。此外，岩溶区地下溶洞或溶隙可能引发应力集中或突发塌陷，增加稳定性评估难度。

1.2 水文地质条件

水是诱发边坡失稳的关键外部因素。降雨或地表水沿裂隙入渗后，一方面增大岩体容重，提升下滑力；另一方面降低结构面（尤其泥质充填节理）的抗剪强度，削弱岩块咬合。封闭裂隙中积聚的静水压力与流动状态下的动水压力共同推动岩体向临界失稳状态演化。长期水-岩作用还可能导致方解石溶解或黏土矿物膨胀，造成

岩体强度衰减。南方特别是雅安地区多雨季节的短时强降雨常成为突发滑坡的直接诱因，具有预警时间短、破坏性强的特点。

1.3 爆破与开采扰动

露天矿采用台阶式开采，爆破虽为必要工序，但其冲击波和振动会损伤边坡岩体，激活既有裂隙或诱发新裂纹，降低岩体刚度与强度。若爆破参数不当（如单段药量过大、孔距过密）或临近最终边坡作业，扰动效应尤为显著。此外，不合理的开采顺序、过高台阶、过陡边坡角及安全平台不足等问题，均会破坏原有应力平衡，加速变形发展。部分企业为追求短期效益，存在“采富弃贫”“超挖陡帮”等行为，埋下重大安全隐患。

1.4 人为管理因素

人为管理缺陷亦是边坡失稳的重要诱因。部分中小型矿山存在挂靠专业技术人员，终了边坡坡度、高度等依赖经验，未开展系统稳定性分析与风险评估；排水系统建设滞后或维护缺失，导致坡脚长期受水浸泡；监测体系不健全，难以及时识别变形前兆；即便发现隐患，也因应急机制缺失而错失处置良机。更有无证、越界开采等违法行为，严重破坏矿区整体稳定性。因此，提升管理水平、强化制度执行、落实主体责任，是保障边坡安全的关键环节。

2 边坡稳定性监测技术体系

2.1 传统监测方法

早期露天矿山多采用人工观测方式进行边坡监测，主要包括使用全站仪或水准仪对预设监测点进行周期性位移测量。这类方法成本较低、操作直观，适用于小型矿山或初步排查。然而，其依赖人工操作，效率低下，且受天气、通视条件限制，难以实现连续、实时的数据获取。深部位移监测则通过钻孔安装测斜管，配合测斜

仪逐段读取不同深度的水平位移,能够有效识别潜在滑动面的位置与深度,常用于重点隐患区域的精细化监测。此外,裂缝计和伸缩仪被广泛用于监测已有裂缝的开合变化,虽不能反映整体稳定性,但能直观反映局部变形趋势,是辅助判断的重要手段。总体而言,传统方法在精度、时效性和自动化程度方面已难以满足现代大型矿山的安全管理需求。

2.2 现代智能监测技术

随着信息技术的发展,边坡监测已迈入智能化、网络化新阶段。全球导航卫星系统(GNSS)技术通过在边坡关键位置布设接收机,可实现毫米级精度的三维位移实时监测,具备全天候、广覆盖、自动传输等优势,特别适用于高陡边坡的长期稳定性跟踪。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)则利用卫星遥感影像反演大范围地表形变,空间分辨率高、无需地面布设设备,虽时间分辨率相对较低,但可作为宏观风险筛查的有效工具。三维激光扫描(LiDAR)与无人机摄影测量技术的结合,使得边坡表面形态的高精度重建成为可能。通过多期点云数据对比,可定量识别厘米级的剥落、坍塌或整体位移,为阶段性安全评估提供精细依据。微震监测技术则从岩体内部入手,通过捕捉岩石破裂释放的弹性波信号,反演损伤演化过程,实现对边坡“内伤”的早期诊断^[2]。当前,越来越多的矿山正将上述多种技术集成,构建“空—天—地”一体化的智能传感网络,并依托物联网平台实现数据融合、自动分析与可视化展示,为边坡安全决策提供坚实支撑。

3 边坡安全管理体系构建

3.1 风险分级与隐患排查

科学的风险识别是安全管理的起点。矿山应基于详尽的地质勘察资料、历史变形监测数据、开采进度规划及区域构造背景,对整个边坡系统开展系统性风险评估与分区。通常可将边坡划分为高风险区、中风险区和稳定区。高风险区主要包括:结构面组合不利(如存在顺层滑动条件)、临近最终开采境界、下方存在老采空区或岩溶发育带等区域。此类区域应作为重点管控对象,配置更高密度的监测点位,并实施更严格的作业限制。隐患排查需常态化、精细化。除关注宏观位移、裂缝扩展等明显征兆外,还应细致检查排水系统是否畅通、锚固结构是否存在锈蚀或松动等细节问题。通过建立电子化隐患台账,实行“发现—登记—整改—验收—销号”的全流程闭环管理,并结合无人机巡检、三维激光扫描等新技术提升排查效率与精度,确保隐患早发现、早研判、早处置。

3.2 动态监测与数据分析

现代边坡安全管理高度依赖精准、连续、智能的监测体系。矿山应整合GNSS地表位移监测、InSAR遥感形变反演、深部位移测斜仪、微震监测系统、孔隙水压计等多种技术手段,构建“空—天—地”一体化的立体监测网络。所有监测数据应统一接入边坡安全数据中心,进行标准化清洗、时空对齐与多源融合建模。在此基础上,运用时间序列分析、趋势外推、突变点检测及机器学习算法(如LSTM、随机森林等),深度挖掘数据背后的演化规律。例如,当某监测点位移速率由长期缓慢蠕变突然转为较大甚至指数级增长,或出现“加速—减速—再加速”的典型破坏前兆模式时,系统应自动触发预警信号^[3]。同时,可构建“变形—降雨量—爆破振动—地下水位”等多因素耦合模型,量化各外部诱因对边坡稳定性的影响权重,为优化爆破参数、调整开采顺序、安排雨季生产计划等提供科学决策支持。

3.3 多级预警与应急响应机制

预警机制是连接监测数据与现场行动的关键枢纽。应依据边坡变形特征、历史滑坡案例及数值模拟结果,科学设定黄、橙、红三级预警阈值。黄色预警表示变形速率超过正常背景值但整体可控,此时应加密监测频次、加强人工巡查、暂停邻近高风险作业;橙色预警意味着边坡进入加速变形阶段,存在较高失稳风险,须立即停止相关区域一切生产活动,组织地质、岩土、采矿等多专业专家会诊,制定临时加固或人员撤离预案;红色预警则代表边坡已处于临滑状态,必须启动最高级别应急预案,迅速疏散人员与设备,封锁危险区域,并采取喷锚、削方减载或注浆等紧急支护措施。预警信息应通过短信、企业微信、移动APP、现场声光报警器等多渠道同步推送,确保信息传达“零延迟、全覆盖、可追溯”。同时,定期开展应急演练,检验预案可行性,提升全员应急处置能力。

3.4 工程治理与生态修复

对于已确认存在失稳风险的边坡,必须采取“治本为主、防治结合”的工程措施。首要任务是可通过削坡减载降低边坡高度或放缓最终边坡角,有效减小下滑力矩,提升整体稳定性。针对结构面控制型滑坡,常采用预应力锚索、格构梁、抗滑桩或挡土墙等主动支护结构,增强抗滑阻力^[4]。其次,完善水文控制系统:在坡顶设置截水沟拦截地表径流,在坡面布设排水孔和盲沟疏排裂隙水,从源头上削弱水对岩体强度的劣化作用。在确保工程安全的前提下,应同步推进生态修复。对已完成治理的稳定边坡,实施植被复绿工程,优选根系发

达、耐贫瘠的本地植物，利用植物根系固持表土、减少雨水冲刷、改善微气候。这不仅有助于长期稳定边坡，还能逐步恢复矿区生态系统功能，实现“安全生产”与“绿色发展”的有机统一，助力矿山可持续发展与生态文明建设。

4 工程应用案例分析

湖南省某县石灰石矿作为省级重点示范项目，采用“软硬结合”智能化监测体系，实现边坡安全动态防控。项目布设10套北斗GNSS接收机沿主剖面分布，通过多基站联合解算将定位精度提升至毫米级，配套雨量计与高清摄像头构建“位移-降雨-视频”三维监测网络。技术亮点体现在动态监测策略：边坡稳定时采用1次/小时低频采样，变形加速时自动切换为1次/分钟高频采集，兼顾精度与能耗平衡。系统内置阈值触发机制，当雨量或位移超阈值时激活全系统报警，功耗降低40%。2023年汛期，G7点位单日水平位移达7.89mm（超阈值150%），AI平台立即生成红色预警并推送至责任人手机，12小时后该区域发生局部坍塌，因及时疏散实现零伤亡。该项目通过湖南省应急管理厅智能化示范矿山验收，其“空天地一体化”架构被纳入《湖南省矿山智能化建设指南》。监测数据实时接入省级监管平台，支持四级预警机制与风险热力图可视化，形成“监测-预警-处置”闭环管理。该案例证明，毫米级位移监测、智能阈值触发与多元数据融合技术可显著提升露天矿山边坡安全防控能力，为同类项目提供可复制的技术范式。

5 发展趋势与展望

未来露天石灰石矿山边坡安全管理将深度融合新一代信息技术，迈向更高层次的智能化。人工智能技术，特别是深度学习模型，将在海量监测数据中自动挖掘边坡变形演化规律，实现从“经验预警”到“模型预测”

的跨越。数字孪生技术将构建与物理边坡完全映射的虚拟模型，集成地质、监测、气象、开采等多维数据，支持在虚拟环境中模拟不同工况下的边坡响应，为优化开采顺序、评估治理效果提供决策支持。无人化巡检装备如自主飞行无人机、爬壁机器人等，将替代人工进入高危区域，实现全天候、全自动的状态感知。更重要的是，边坡安全管理理念将从“事后处置”转向“全生命周期防控”，贯穿于矿山规划、设计、建设、生产直至闭坑的全过程，真正实现本质安全。

结语

露天石灰石矿山边坡稳定性受岩体结构、水文条件、开采扰动及管理行为等多重因素耦合影响，其安全管理是一项复杂的系统工程。研究表明，构建以多源智能监测为基础、风险分级管控为核心、多级预警响应为保障、工程治理与生态修复为支撑的综合安全管理体系，是提升矿山本质安全水平的有效路径。通过典型案例验证，该体系在风险识别、动态预警与应急处置方面展现出显著成效。面向未来，随着人工智能、数字孪生等技术的深度应用，露天矿山边坡安全管理将实现从“被动防御”向“主动智控”的根本转变，为矿业高质量、可持续发展筑牢安全基石。

参考文献

- [1]贾明波.某石灰石露天矿山边坡稳定性研究[J].现代矿业,2025,41(03):205-209.
- [2]余洋,吴通达.丽江古城石灰石矿露天开采边坡安全监测设计[J].现代职业安全,2023,(07):78-81.
- [3]胡敏,姚煜国,常剑,等.某露天石灰石矿采场边坡稳定性研究[J].现代矿业,2022,38(12):136-140.
- [4]董武斌,张春荣,赵国成.孟县马家沟石灰石矿露天边坡安全管理技术[J].工业安