

露天采石场边坡稳定性分析及防治

梁海

广西冠桂爆破科技有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17107

[摘要] 露天采石场边坡稳定性是保障生产安全与运营效率的关键。文章从内在地质因素与外在人为及环境因素入手,分析影响边坡稳定的核心要素,运用地质勘察、极限平衡分析、数值模拟、监测数据等方法评估稳定性风险,提出优化设计参数、改良开采工艺、实施加固处理、完善排水系统、建立监测预警体系等防治策略,为降低边坡失稳隐患、实现安全高效开采提供支撑。

[关键词] 露天采石场; 边坡稳定性; 影响因素; 稳定性评估; 防治策略

中图分类号: TD804 **文献标识码:** A

Slope Stability Analysis and Prevention in Open-Pit Quarries

Hai Liang

Guangxi Guangui Blasting Technology Co., Ltd.

[Abstract] The stability of slopes in open-pit quarries is crucial for ensuring production safety and operational efficiency. This article analyzes the core factors affecting slope stability from the perspectives of intrinsic geological conditions and external human and environmental factors. Methods such as geological surveys, limit equilibrium analysis, numerical simulation, and monitoring data are applied to assess stability risks. Prevention strategies are proposed, including optimizing design parameters, improving mining techniques, implementing reinforcement measures, enhancing drainage systems, and establishing monitoring and early warning systems. These strategies aim to reduce the risk of slope instability and support safe and efficient mining operations.

[Key words] Open-Pit Quarry; Slope Stability; Influencing Factors; Stability Assessment; Prevention Strategies

引言

露天采石场在开采过程中形成的边坡结构,其稳定性直接关系到作业安全、设备人员安全及周边环境安全。随着开采深度与规模扩大,边坡失稳风险上升,可能引发安全隐患与经济损失。因此,系统剖析边坡稳定性影响因素,构建科学评估方法,制定有效防治措施,成为采石场运营管理的重要课题,对推动行业安全发展具有重要意义。

1 露天采石场边坡稳定性的影响因素分析

露天采石场边坡稳定性受多维度因素综合作用,可分为内在地质因素与外在人为及环境因素两大类。内在地质因素中,岩体结构是核心,岩层的岩性、产状、节理裂隙发育程度直接影响边坡抗滑能力,如层状岩体易沿层面产生滑动,破碎岩体则因整体性差更易失稳;地质构造如断层、褶皱等会削弱岩体完整性,形成潜在滑动面,增加失稳风险;岩土体物理力学性质,包括抗压强度、抗剪强度、黏聚力等,决定了边坡自身的承载与抗滑能力,性质较差的岩土体难以维持高陡边坡稳定。

外在因素方面,开采工艺对边坡稳定性影响显著,如开挖顺序不合理、坡率设计过陡、爆破震动过大等,会破坏岩体原有平

衡状态,诱发边坡变形;降水是重要环境诱因,雨水渗入岩土体后,会降低岩体黏聚力与内摩擦角,增加孔隙水压力,削弱边坡抗滑力;长期风化作用会使岩体结构逐渐松散,强度衰减,进一步加剧边坡失稳风险。此外,地震等自然现象产生的震动荷载,也可能打破边坡平衡,引发失稳灾害^[1]。

2 露天采石场边坡稳定性的评估方法

2.1 地质勘察与调查法

地质勘察与调查是边坡稳定性评估的基础工作,通过现场踏勘、地质测绘、钻探取样等手段,获取边坡区域的地质资料。现场踏勘可直观观察边坡形态、岩体露头、节理裂隙分布及现有变形迹象,初步判断边坡稳定状态;地质测绘需绘制详细的地质剖面图与平面图,标注岩层产状、断层位置、软弱夹层分布等关键信息,明确潜在滑动面的可能位置;钻探取样则能获取岩土体样本,通过室内试验测定其物理力学参数,为后续定量分析提供数据支撑。该方法注重实地数据采集,可全面掌握边坡地质背景,为稳定性评估奠定可靠基础。

2.2 极限平衡分析法

极限平衡分析法是评估边坡稳定性的经典方法,核心思路

是假设边坡沿某一潜在滑动面发生滑动,通过计算滑动面上的抗滑力与滑动力,确定边坡稳定系数,判断其稳定状态。常用的计算模型包括圆弧滑动法、直线滑动法、折线滑动法等,需根据边坡岩体结构特点选择适配模型。例如,对于均质土坡或破碎岩体边坡,多采用圆弧滑动法;对于层状岩体边坡,直线滑动法或折线滑动法更贴合实际滑动模式。该方法计算原理清晰,操作简便,能快速评估边坡稳定程度,广泛应用于露天采石场边坡初步设计与稳定性验算,但对岩体非均质性与应力应变关系的考虑相对简化。

2.3数值模拟分析法

随着计算机技术发展,数值模拟分析法在边坡稳定性评估中应用愈发广泛,可更精准地模拟边坡受力状态与变形过程。常用的数值模拟方法包括有限元法、离散元法、边界元法等。有限元法能将边坡离散为多个单元,计算各单元的应力、应变分布,分析边坡内部变形规律,识别潜在失稳区域;离散元法适用于模拟破碎岩体边坡,可考虑岩体间的接触作用与相对运动,展现边坡从局部变形到整体失稳的演化过程;边界元法仅需对边坡边界进行离散,减少计算量,适用于大范围边坡稳定性分析。数值模拟分析法能综合考虑岩体非均质性、复杂地质构造及不同荷载条件,为边坡稳定性评估提供更详细、全面的力学分析结果,助力优化边坡设计参数^[2]。

2.4监测数据分析法

监测数据分析法通过对边坡变形、应力、渗压等指标的实时监测,动态评估边坡稳定性状态。常用的监测手段包括位移监测、应力监测、渗压监测等。位移监测可采用GNSS定位、测斜仪、全站仪等设备,获取边坡表面及深部的位移数据,分析变形速率与趋势,判断边坡是否处于稳定状态;应力监测通过在边坡关键部位布设应力传感器,监测岩体应力变化,识别应力集中区域,预警潜在失稳风险;渗压监测则通过监测边坡内部孔隙水压力变化,掌握降水入渗等因素对边坡稳定性的影响。该方法能实时捕捉边坡动态变化,及时发现稳定性异常,为边坡安全预警与防治措施调整提供依据,是露天采石场边坡长期稳定性管理的重要手段。

3 露天采石场边坡失稳的防治策略

3.1优化边坡设计参数

优化边坡设计是从源头降低失稳风险的关键,需结合采石场地质条件、开采规模与工艺,合理确定边坡坡率、台阶高度与平台宽度。在坡率设计上,应根据岩体物理力学性质差异,采用分级设计原则,对稳定性较好的岩体可适当采用较陡坡率,对软弱岩体或破碎岩体则需放缓坡率,必要时设置马道,减少边坡整体下滑力;台阶高度需综合考虑开采效率与安全,避免因台阶过高导致岩体自重过大,超出抗滑能力,通常结合钻机钻孔深度、爆破效果与边坡稳定性要求确定;平台宽度应满足设备作业需求与边坡稳定缓冲需求,避免因平台过窄导致边坡侧向约束不足,同时预留足够空间布设监测设备与防护设施。此外,边坡走向设计需避开断层、褶皱等不良地质构造,减少地质缺陷对

边坡稳定的不利影响,通过科学的设计参数,构建稳定的边坡结构体系^[3]。

3.2改良开采工艺与爆破技术

合理的开采工艺与爆破技术可减少对边坡岩体的扰动,维持边坡原有稳定性。在开采顺序上,应遵循“自上而下、分层开采”原则,避免下部岩体过早开挖导致边坡失稳,同时采用“先剥离后采矿”的方式,清除边坡表面的软弱覆盖层与风化岩体,减少外部荷载与渗透通道;在开挖方式上,对稳定性较差的边坡区域,优先采用机械开挖替代爆破开挖,降低对岩体的震动破坏,机械开挖可精准控制开挖范围与深度,减少超挖、欠挖现象,保护边坡岩体完整性。在爆破技术改良方面,需优化爆破参数,控制爆破震动强度与频率,避免超出岩体承受极限。可采用微差爆破技术,通过合理设置炮孔起爆顺序与时间间隔,减少同时起爆的炸药量,降低爆破震动峰值;采用预裂爆破或光面爆破技术,在边坡轮廓线处先形成预裂面,减少后续主爆区爆破对边坡岩体的破坏,形成平整、稳定的边坡面;合理调整炮孔深度、间距、装药量等参数,确保爆破后岩体块度均匀,避免出现大块体滚落与边坡岩体松动。此外,爆破作业前需对边坡岩体进行详细勘察,明确不良地质体分布,避开断层、裂隙发育区域,减少爆破诱发边坡失稳的风险。

3.3实施边坡加固处理

对已存在潜在失稳风险或稳定性较差的边坡,需采取针对性加固措施,提升边坡抗滑能力与整体稳定性。常用的加固方法包括锚杆(索)加固、挡土墙加固、注浆加固、植被加固等,需根据边坡地质条件与失稳类型选择适配方案。(1)锚杆(索)加固通过在边坡岩体中植入锚杆或锚索,利用其抗拉强度对岩体施加预紧力,将松散岩体或潜在滑动体与稳定岩体连接,限制岩体变形与滑动。锚杆适用于浅层岩体加固,锚索则因抗拉强度更高,适用于深层岩体或大型潜在滑动体加固,施工时需确保锚杆(索)锚固深度与角度合理,充分发挥锚固作用。(2)挡土墙加固适用于边坡下部存在软弱夹层或潜在滑动面的情况,通过在边坡坡脚设置挡土墙,提供侧向支撑力,阻挡边坡岩体下滑。挡土墙材料可选择浆砌石、混凝土等,需根据边坡下滑力计算确定挡土墙的截面尺寸与强度,确保其承载能力满足要求,同时做好挡土墙排水设计,避免雨水浸泡导致墙体强度降低。(3)注浆加固通过向边坡岩体的节理裂隙、孔隙中注入水泥浆、化学浆液等,填充岩体空隙,提高岩体黏聚力与内摩擦角,增强岩体整体性与强度。该方法适用于破碎岩体、裂隙发育岩体边坡,注浆范围与浆液浓度需根据岩体破碎程度确定,确保浆液充分渗透,形成稳定的加固体。(4)植被加固适用于边坡表面风化、水土流失严重的区域,通过种植根系发达、适应性强的植物,利用植物根系的固土作用与枝叶的防风固土作用,减少雨水冲刷与风化作用对边坡的影响。植被加固不仅能提升边坡稳定性,还能改善生态环境,适用于稳定性较好、坡度较缓的边坡区域,需选择与当地气候、土壤条件适配的植物品种,确保植被存活与生长^[4]。

3.4完善边坡排水系统

水是诱发露天采石场边坡失稳的重要因素,完善的排水系统可有效减少雨水入渗与地下水对边坡稳定性的不利影响。排水系统设计需遵循“截、排、导相结合”的原则,构建全面的排水体系,包括地表排水与地下排水两部分。地表排水主要针对大气降水,通过设置截水沟、排水沟、急流槽等设施,将边坡表面及周边区域的雨水拦截并导出边坡范围。截水沟应布设在边坡顶部边缘外侧,防止雨水直接流入边坡;排水沟沿边坡平台、坡脚布设,收集平台积水与坡面汇水,引导至排水出口;急流槽用于处理坡度较大区域的排水,避免雨水冲刷坡面。地表排水设施需确保坡度合理、断面尺寸足够,避免排水不畅导致积水渗入边坡岩体。地下排水用于降低边坡内部孔隙水压力,减少地下水对岩体强度的削弱。常用的地下排水设施包括排水孔、排水盲沟、排水廊道等。排水孔可在边坡岩体中钻孔,设置透水管,引导地下水排出;排水盲沟布设在边坡潜在滑动面或地下水富集区域,填充透水性材料,收集并排出地下水;排水廊道适用于深层地下水丰富或大型边坡,通过在边坡内部开挖廊道,设置排水设施,实现大规模地下水排出。地下排水系统需根据边坡水文地质条件设计,确保排水效果,降低地下水对边坡稳定性的威胁。

3.5 建立边坡动态监测与预警体系

建立边坡动态监测与预警体系是保障露天采石场边坡长期稳定的重要手段,通过实时监测边坡变形、应力等指标,及时发现稳定性异常,发出预警信号,为防治措施调整与人员设备撤离争取时间。监测体系构建需明确监测指标与频率,核心监测指标包括边坡位移、应力、孔隙水压力、爆破震动等。位移监测应覆盖边坡表面与深部,表面位移可采用GNSS定位系统,实现全天候、自动化监测,数据采样频率根据边坡稳定状态调整,稳定边坡可适当降低频率,变形活跃边坡需提高频率;深部位移采用测斜仪,监测边坡内部不同深度的位移变化,识别潜在滑动面位置。应力监测与孔隙水压力监测需在边坡关键部位布设传感器,

实时采集数据,掌握边坡受力与渗压变化规律;爆破震动监测需在爆破作业时,对边坡及周边敏感区域进行震动数据采集,确保爆破震动符合安全标准。预警体系需制定科学的预警阈值,根据监测数据变化趋势与历史数据,设定不同等级的预警指标,如蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警,对应不同的应急响应措施。当监测数据达到预警阈值时,及时通过短信、平台通知等方式向管理人员发出预警信号,启动相应应急预案,如暂停开采作业、撤离人员设备、调整防治措施等。此外,需定期对监测数据进行分析总结,评估边坡稳定性变化趋势,优化预警阈值与防治策略,实现边坡稳定性的动态管理^[5]。

4 结语

露天采石场边坡稳定性分析及防治需综合考量地质、工艺、环境等多方面因素,通过科学评估识别风险,针对性制定防治策略,可有效降低失稳概率,保障生产安全。实际应用中需结合采石场具体条件灵活适配方案,持续优化管理。未来应进一步推动技术创新,提升边坡安全管理水平,助力采石行业实现安全、可持续发展。

[参考文献]

- [1]蒋艳群.露天采石场边坡稳定性分析及防治[J].价值工程,2025,44(19):4-7.
- [2]聂正,张电吉,周昌育.露天矿排土场边坡稳定性分析与滑坡防治[J].武汉工程大学学报,2025,47(4):461-466.
- [3]江建鹏.青龙山 I 号采石场边坡稳定性分析及治理措施研究[J].广东建材,2025,41(2):114-116.
- [4]高玉倩,陈彦亭,荣辉.冀东地区露天采场土质边坡稳定性分析和治理方案研究[J].矿业工程,2025,23(1):15-20.
- [5]李志国,徐涛,刘永杰.露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(1):116-123.