

露天矿山边坡失稳模式与支护设计优化策略

戚洛瑞

四川路桥矿业投资开发有限公司 四川 成都 610000

【摘要】：露天矿山边坡在采矿过程中易发生滑移、崩塌等失稳现象，受岩体结构、地质条件及开采应力影响。通过分析边坡失稳模式及力学特性，结合数值模拟和监测数据，提出优化支护设计策略，包括支护形式选择、材料性能评估及加固方案布置。优化策略能够控制裂隙扩展、改善应力分布，提升边坡整体稳定性，同时兼顾施工可行性和经济性，为矿山边坡工程提供科学的风险管理和安全保障方案。

【关键词】：露天矿山边坡；失稳模式；支护设计；优化策略；稳定性分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.017

引言

露天矿山边坡在采矿过程中承受复杂地质应力，常因岩体结构、雨水侵蚀及开采干扰而出现滑坡、崩塌等失稳现象。边坡失稳不仅威胁矿区安全，还会影响生产效率和经济效益。通过分析不同失稳模式及其发生机理，可以识别关键风险区，为支护结构的科学布置提供依据。结合数值模拟与现场工程数据，能够优化支护设计方案，实现对边坡失稳的有效控制，并提高支护结构的适应性与耐久性，从而保障矿区长期稳定运行。

1 边坡失稳类型与影响因素分析

1.1 岩体结构与力学特性对边坡稳定性的影响

边坡岩体结构特征直接决定其力学响应及潜在失稳模式。岩层的层理、节理及断层面分布形成了岩体的各向异性结构，控制滑动面和破坏路径。岩体内部的强度参数、弹性模量和破坏准则共同影响边坡承载能力和变形特征。微裂隙网络及破碎带的存在增加岩体渗透性，导致孔隙水压力集中，削弱摩擦阻力，从而加速局部失稳。不同岩性组合的界面摩擦系数和粘聚力差异，决定边坡在外荷载作用下的破坏机理，形成裂隙扩展、块体滑动或整体滑坡等多种失稳模式。对力学特性参数进行精细测定和模拟，有助于揭示边坡在复杂应力状态下的稳定性变化规律。

1.2 地质条件及气候因素诱发失稳机制

地质构造的不连续性和局部弱面是边坡失稳的潜在触发因素，地层倾角、岩性变化和地下水位波动显著影响剪切强度分布^[1]。降雨、降雪及长期冻融循环引起岩体湿度增加和孔隙压力上升，降低摩擦阻力，加速滑动破坏。地表侵蚀作用导致边坡裸露面扩展，形成应力集中区，同时改变边坡几何形态，增加局部应力梯度。地下水的流动路径和渗透特征对边坡稳定性具有调控作用，局部蓄水可能引发滑动面失稳。结合岩土工程数值模拟与气象-水文动态耦合分析，可量化地质与气候因素的综合影响，为支护设计提供科学依据。

1.3 开采活动与边坡应力变化特征

露天开采过程中，边坡受重力、自重及开采切削影响产生应力再分布，导致原有稳定平衡被破坏。开采台阶高度与坡角的调整直接影响边坡局部应力集中程度，切割作业可能形成滑动楔体或裂隙扩展带。爆破振动与机械荷载作用引发岩体微裂隙扩展，降低整体强度和刚度。边坡表层和内部应力梯度的不均匀变化，使得局部滑移、崩塌和塌落成为潜在失稳模式。采用实时应力监测和数值模拟分析，可以识别高应力区与潜在滑动面，为支护设计优化提供精确参数，实现边坡应力控制与结构安全提升。

2 边坡失稳预测与监测技术应用

2.1 数值模拟方法在失稳预测中的应用

数值模拟方法能够精确再现边坡岩体的力学行为与潜在失稳过程。通过有限元、有限差分及离散元等计算方法，可以建立边坡三维地质模型，重现岩层分布、节理系统和断层结构的空间特征。模拟过程中考虑应力-应变非线性、摩擦滑移及孔隙水压力演变，能够预测边坡在不同外部荷载及地质条件下的变形趋势。高精度模型可对潜在滑动面位置、裂隙发展及块体破坏模式进行量化分析，实现失稳模式分类和危险性评估。结合多场耦合分析，如力学-水文-热力耦合，可揭示环境因素对边坡稳定性的动态影响，为支护设计提供优化依据，并为边坡管理提供科学决策数据，提升安全控制的前瞻性与精确性。

2.2 现场监测技术及数据分析方法

现场监测技术通过实时采集边坡位移、应力、裂隙扩展和地下水位变化等关键参数，建立动态边坡稳定性数据库。监测手段包括高精度全站仪、倾斜计、光纤应变计及地表激光扫描等，能够捕捉微小变形和长期趋势。获取数据通过多维时空分析方法处理，利用统计学与机器学习算法识别异常变化和潜在失稳信号。数据分析过程注重数据完整性与连续性，结合数值模拟结果，实现观测与预测的相互验证，提高失稳判断的可靠性^[2]。实时数据可直接反馈边坡应力与变形变化，为支护方案优化提供量化依据，同时支持工程管理者针对局部高风险区域

采取针对性控制措施，实现预防性风险管理和结构安全监控。

2.3 失稳预警模型与关键指标识别

失稳预警模型以边坡力学特性、环境条件及监测数据为基础，通过风险评估函数和动态阈值算法建立早期警示系统。模型将位移速率、应变变化、裂隙扩展以及地下水压力等参数转化为可量化风险指标，结合多源数据融合技术提高模型精度和响应速度。关键指标识别依托主成分分析、模糊评价和多目标优化方法，提取对失稳敏感的参数组合，实现高灵敏度预警。模型在不同边坡类型和地质条件下能够调整参数权重，形成差异化预警方案，提前识别滑动面萌生及潜在破坏路径，为支护设计优化和施工管理提供科学依据，确保工程运行安全与经济效益的协调提升。

3 支护结构形式选择与设计方法

3.1 常用支护结构类型及适用条件

边坡支护结构类型的选择应基于岩体特性、边坡几何形态以及潜在失稳模式的综合分析。锚杆与锚索系统通过在岩体内部形成预应力网络，能够有效限制裂隙扩展和块体滑移，适用于裂隙发育、局部稳定性较差的岩坡。挡土墙和重力支护结构通过抵抗边坡主动土压力，实现整体支撑，适合中硬岩及砂砾质边坡，同时可调整支撑截面以适应不同坡高和坡角。喷射混凝土和钢筋网组合结构通过增强边坡表层刚度和延长破坏路径，提高表面稳定性，适用于破碎带或风化严重的岩体。每种支护形式需结合地质条件、施工可行性及经济效益进行综合评价，确保支护系统在承载能力、耐久性和施工周期上达到优化平衡，并与边坡应力状态、失稳模式和环境条件形成高效匹配关系，实现结构功能最大化。

3.2 支护材料性能与工程适应性评估

支护材料的力学性能、耐久性和环境适应性是保证边坡安全的关键因素。材料的抗压强度、抗拉强度、弹性模量及延性特征直接影响支护结构对滑移变形的约束能力。材料的耐久性与环境适应性涉及抗腐蚀性、耐磨性及抗冻融性能，可确保在长周期工程运行中保持稳定支撑效果。复合材料与高性能混凝土通过改善强度-韧性比，实现边坡表层和整体支撑的协同作用，提高整体稳定性。材料性能评估需结合现场岩体力学参数、地下水及气候条件进行动态适配，以实现材料选择与边坡应力环境的最优匹配^[3]。通过数值模拟与现场监测数据反馈，对材料布置及加固密度进行迭代优化，确保支护方案在经济性、施工便捷性和结构安全性上均达到综合优化。

3.3 边坡加固方案设计流程及优化原则

边坡加固方案设计以精确识别失稳区域和关键滑动面为基础，通过多层次分析实现结构方案的优化配置。设计流程首先进行岩体力学参数测定与边坡几何特征建模，结合失稳模式预测和监测数据确定加固重点区域。随后选择适合的支护形式

和材料类型，并通过有限元或离散元数值模拟评估加固效果，调整支护布置、间距和预应力参数，确保整体受力均衡。优化原则强调局部控制与整体协调，优先增强潜在滑动面及高应力区，同时兼顾施工可行性和经济投入。设计过程结合环境影响分析和施工安全要求，迭代更新支护参数，实现加固效果最大化与资源最优配置。最终方案能够针对不同边坡类型和复杂地质条件，提供可操作性强、结构稳定性高的支护设计，并在工程实施过程中保持适应性和调整空间，确保长期运行安全。

4 支护设计优化策略与实施效果

4.1 优化设计参数与施工工艺改进

边坡支护设计参数的优化涉及支护结构布置、间距、锚固深度及预应力水平的精确计算，以适应复杂岩体条件和不同失稳模式。通过数值模拟和力学分析，能够量化边坡在各种外载荷作用下的应力分布及潜在变形区域，从而确定最优参数组合。施工工艺改进重点在于增强施工过程的精度与稳定性，降低施工扰动对边坡的影响。包括施工顺序优化、预应力施加控制及材料施工质量监测，确保支护系统在建设过程中形成预期受力状态。采用高效施工技术 with 智能监控手段，可实时反馈施工效果，为参数微调提供依据，同时提高工程安全性和资源利用效率，实现支护设计的精准化和施工的可控性。

4.2 工程案例分析及效果验证

工程案例分析通过对实际露天矿边坡加固项目进行系统数据采集、数值模拟比对及效果评估，验证优化设计的有效性。对比施工前后的边坡位移、裂隙发展及应力变化，可量化支护结构对潜在失稳模式的约束效果。案例分析同时评估不同支护形式和材料性能在实际环境条件下的适应性与可靠性，为设计参数和施工方法的调整提供依据^[4]。结合长期监测数据，可识别局部薄弱区域和潜在风险点，实现支护系统的动态优化。通过工程实践验证，能够建立支护效果与设计参数之间的定量关系，为未来边坡加固设计提供参考标准和经验积累，提高设计策略在复杂地质条件下的适用性和科学性。

4.3 设计策略对边坡稳定性的提升效果

优化设计策略能够通过调整支护结构类型、布置密度和材料性能，实现边坡整体稳定性的显著提升。策略强调针对关键滑动面和高应力区域进行局部强化，同时保持整体边坡结构的力学协调，减少局部应力集中和裂隙扩展风险。通过数值模拟和监测数据对比，可以精确评估策略实施后的位移减少量、应力分布改善及失稳概率下降情况。优化策略在施工工艺和材料选择上实现迭代改进，使边坡加固效果长期稳定，并降低维护成本和安全隐患。同时，策略支持多因素耦合分析，将岩体力学、环境条件和施工干扰整合入设计决策，实现边坡稳定性提升的科学性、可靠性和可持续性。

5 边坡稳定管理与持续优化措施

5.1 风险区管理及监控体系构建

边坡风险区的管理依赖于科学划分潜在失稳区域及建立多层次监控体系。通过结合地质勘查、数值模拟和现场监测数据,对边坡不同区域进行稳定性评估,明确高风险区、次高风险区和一般风险区的边界及防控优先级。监控体系涵盖位移、应力、裂隙发展、地下水位和环境变化的实时监测,采用多源数据融合与动态分析技术,实现异常变化的快速识别与响应。高精度传感器、自动数据采集及智能分析算法能够对关键参数的时空演变趋势进行量化评估,为风险区管理提供科学依据。通过建立完善的监控和预警体系,能够动态调整支护和维护策略,确保风险区边坡稳定性在不同外部条件和作业阶段得到有效控制,实现安全管理与工程运营的协同优化。

5.2 支护方案长期维护与改进机制

边坡支护方案的长期维护需建立科学的检测、评估及改进机制,确保支护结构在整个生命周期内保持设计功能。定期检测包括结构位移、裂隙扩展、锚固预应力及材料性能变化,通过数据分析识别局部衰减或潜在失效区域。维护策略强调局部强化与整体协调,对支护构件的材料性能和施工质量进行动态评估,并结合数值模拟进行加固优化^[5]。改进机制利用监测数据和历史性能反馈,调整支护密度、预应力参数及施工工艺,

增强结构适应性和抗干扰能力。通过建立系统化维护和优化流程,实现边坡支护的可持续运行,提高边坡稳定性和安全保障能力,同时兼顾经济成本和施工资源的有效利用。

5.3 安全管理与经济效益综合评价

安全管理与经济效益评价通过对支护结构成本、施工周期及运行维护投入进行系统分析,实现稳定性提升与资源优化的平衡。评价指标包括边坡稳定性指标、潜在失稳风险、支护材料消耗及维护费用,通过量化方法建立风险-成本-效果关系模型。综合分析边坡加固效果、施工效率及长期运行成本,能够优化支护方案设计,实现高安全性和经济性协同提升。动态调整评价体系,根据监测数据反馈及环境变化修正参数权重,实现安全管理与经济效益的持续优化。该方法不仅提高边坡整体稳定性和作业安全,还能够在保证投资合理性的前提下,最大化边坡加固的工程效益和资源利用效率。

6 结语

露天矿山边坡失稳模式分析与支护设计优化策略的系统构建,有助于增强边坡稳定性控制能力。对失稳机理、预测方法及支护方案的深度融合,不仅提升了边坡风险管理水平,还推动了边坡设计向智能化和精准化演进。优化策略在实践中展现出显著的稳定效果并提升了安全与经济效益,为矿山边坡工程提供了坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 覃如海.露天矿山边坡稳定治理与生态修复技术分析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(10):111-114.
- [2] 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(3):205-209.
- [3] 王秀蓉,王邦民,黄亚军.降雨作用下露天矿山边坡失稳机理研究[J].矿产勘查,2025,16(2):412-421.
- [4] 文义明,付学会,赵仁山,程涌,王发龙,刘章振,卢萍.基于FLAC^{2D}与Geo-Slope 露天矿山边坡稳定性研究[J].昆明冶金高等专科学校学报,2025,41(3):13-22.
- [5] 敖选毕.露天矿山边坡沉降监控与防洪排水工程协同设计研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(6):094-097.