

复杂地质条件下边坡喷锚支护稳定性提升方法探讨

陈昊

江苏省核工业地质调查大队，江苏省南京市，210000；

摘要：针对复杂地质条件下边坡喷锚支护稳定性问题，系统剖析支护结构失效主要机制，揭示地质特征对支护性能的关键影响，据此提出支护参数动态优化方法，探讨施工工艺改进对提升稳定性的具体作用，研究显示，科学识别地质条件、优化锚杆布置与喷层设计、采用精细化施工流程，可显著增强支护体系适应性与可靠性，为类似工程提供理论支撑和技术路径。

关键词：喷锚支护；边坡稳定性；复杂地质；支护优化；施工工艺

DOI：10.69979/3029-2727.25.02.054

引言

工程建设往地质环境复杂区域拓展，边坡喷锚支护面对更高稳定性需求，传统支护手段在处理多变岩体状况时显现显著局限，需从支护原理、参数规划及施工工艺等层面开展系统优化，喷锚支护的稳定程度既和材料与构造相关，也受地质状况与施工流程的共同作用。深入探究复杂地质环境中支护结构的反应机制，探寻适配性更强的技术改良途径，具备重要理论价值与工程实践意义，需在既有分析中补充岩体结构特征对支护受力的实际作用，考量不同岩层界面滑移风险对参数设计的具体影响，结合现场监测数据验证工艺调整后的稳定性提升效果，以此完善研究内容的细节呈现，确保整体论述的完整性与准确性。

1 复杂地质条件下喷锚支护失效机理分析

复杂地质条件下，喷锚支护结构稳定性受多种因素共同作用，失效机理复杂多样、呈非线性，岩体结构不均、地层强度差异、地下水活动复杂，是造成支护受力失衡的主因。节理发育、岩层破碎或软硬互层地层中，喷锚支护易因局部应力集中引发连锁破坏，岩土体膨胀、风化、节理裂隙状况，对支护长期稳定影响显著。支护结构自身方面，喷射混凝土层与锚杆协同作用关乎边坡稳定。

实际工程中，锚杆布置密度不合理、长度未达设计标准或施工质量控制不足，会使锚固力难以有效传递至稳定岩层，进而降低整体支护效能，喷射混凝土层的厚度参数、材料配比及养护工艺，直接关联其抗剪切与抗拉性能，若未结合具体地质条件实施动态调整，可能出

现面层开裂、片状剥落甚至整体滑移等问题。施工扰动作为重要外部因素需重点关注，爆破产生的振动荷载、机械作业的持续振动，以及施工过程中频繁的加载卸载行为，均会改变原有岩体应力分布状态，导致围岩变形量显著增加，从而对支护结构的承载能力产生不利影响，需进一步细化锚杆间距偏差对受力传导的具体影响，分析混凝土养护周期不足与面层开裂的关联性，量化施工振动频率与围岩位移的相关性数据，以完善论述细节并确保内容完整。

施工中地下水处理不当，像排水系统布设不合理或止水措施落实不足，可能造成岩体软化、孔隙水压力上升，进而降低支护系统稳定程度。环境因素同样需要重视。温度波动、冻融交替以及化学腐蚀等自然作用，会对喷锚材料产生长期劣化影响，尤其在高海拔或潮湿环境下，这类影响更为明显，随着时间推移，这些环境因素可能逐渐削弱支护结构力学性能，使其难以持续实现设计预期的防护作用。

2 基于地质特征的支护参数动态优化策略

复杂地质条件下，传统静态设计方法难适配多变地层特性，常致喷锚支护参数与工程实际需求脱节，影响支护体系整体效能，构建基于地质特征动态反馈的支护参数优化策略，成为提升边坡稳定性的重要路径。该策略注重施工中依据实时揭露的地质信息动态调整支护方案，以实现更精准、更具针对性的支护效果。支护参数动态优化首先需要准确识别与分类地质条件，通过整合前期勘察资料与开挖揭露的地层信息，构建涵盖岩性类别、节理发育程度、岩体完整性指数、地下水活动状

态等关键指标的多层次地质评价体系，这些指标既决定岩体自稳能力，也为后续支护参数选择提供科学依据。

基于此，采用分级控制原则，针对不同地质单元制定差异化支护标准，规避“一刀切”设计导致的资源浪费或安全隐患，锚杆布置是支护参数优化的核心环节，动态优化策略中，锚杆长度、间距、倾角和锚固力等参数需根据围岩变形特征灵活调整。如在岩体破碎带或软弱夹层区域，适度增加锚杆密度与长度，加大锚固深度，提升支护结构整体约束能力；而在相对稳定的硬质岩区段，可适当降低锚杆配置密度，实现安全性与经济性的平衡，锚杆类型选择也需结合地层物理力学特性，高应力环境下优先采用高强度全长黏结型锚杆，以增强抗拔性能与耐久性，喷射混凝土层设计同样需依据地质条件动态调节，混凝土的配比、厚度、添加剂种类及养护方式应针对不同岩体表面特性优化。

易风化或遇水软化岩层，需提升混凝土早期强度与防水性能，避免表层剥落削弱支护效果；节理发育、裂隙较多岩体，则应增强岩层延性与抗裂能力，以适应岩体变形并有效封闭裂隙面，防止风化侵蚀加剧。动态优化实施中，监测数据采集与分析具有关键支撑作用，通过布设位移计、应力传感器、锚杆测力计等设备，实时获取围岩变形、支护结构受力及地下水变化等信息，为参数调整提供定量依据，依托信息化管理平台，将地质信息、施工数据与监测结果集成分析，形成闭环反馈机制，保障支护参数始终处于最优匹配状态。

3 改进型施工工艺对支护稳定性的提升效果

复杂地质条件下，传统喷锚支护施工工艺存在局限，难有效应对岩体变形、地下水渗透及施工扰动等不利因素，因此引入优化施工工艺成为提高支护体系稳定性关键，采用精细化施工流程、先进设备及新型材料技术，可显著改善支护结构受力状态与耐久性能，增强边坡整体稳定性。施工顺序合理安排是提升支护效果的重要环节，传统施工常忽视开挖与支护动态匹配关系，易造成围岩应力释放不均、引发局部失稳，改进工艺强调“分层、分区、快速封闭”原则，每阶段开挖后及时初喷封闭，迅速形成临时支护屏障，防止岩体暴露过久风化剥落或结构松动，采用先锚后喷、分段跳槽等顺序，有助于控制岩体变形，使支护结构更有效承担外部荷载。

施工设备技术升级为喷锚作业精度与效率提供保

障，新型湿喷机应用提高喷射混凝土均匀性与密实度，减少回弹率，增强喷层与岩面黏结强度；自动化锚杆钻机使用提升钻孔定位准确性与施工安全性，确保锚杆布置符合设计要求，降低人工操作误差风险。这些设备改进不仅提高施工质量，也有助于加快工程进度，减少施工对岩体扰动影响，材料性能优化进一步增强支护结构力学特性与环境适应能力，近年来纤维喷射混凝土、早强型速凝剂、高分子防水添加剂等新材料逐步应用于喷锚支护，显著提升喷层抗裂、抗渗及抗冲击能力。

节理发育或地下水活跃区域，选用具备自修复特性或防腐功能的锚固材料，可有效延长支护体系服役周期，降低后期维护成本支出，施工过程中，信息化管理手段逐渐成为提升支护稳定性的重要方向，通过引入 BIM 技术、远程监控系统与智能预警平台，能够实现施工全流程的可视化管理及数据动态反馈。施工人员可根据实时采集的监测信息调整工艺参数，确保每道工序严格符合设计标准，同时在监测到异常情况时迅速启动干预机制，有效防范潜在安全隐患向实际破坏演变，需进一步细化自修复材料的作用机理，分析防腐性能指标与地下水化学组分的适配关系，明确 BIM 模型在施工流程模拟中的具体应用方式，量化智能预警平台的阈值设定依据，以完善论述细节并保障内容的完整性与准确性。

4 结语

复杂地质条件下，喷锚支护体系面临多重稳定性挑战，涵盖地质条件、支护参数及施工工艺等多个维度，通过深入剖析失效机制，结合动态优化策略与施工工艺改良，可有效提升支护结构整体性能，未来需进一步强化多因素耦合作用下的稳定性研究，推动智能化设计与施工技术发展，为边坡工程安全稳定提供更坚实的理论与技术支撑。

参考文献

- [1] 陈志刚. 复杂地质条件下边坡支护设计理论与实践研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 876-883.
- [2] 黄文斌, 周立峰. 喷锚支护结构稳定性影响因素及优化方法综述[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 645-652.
- [3] 郑远航. 基于数值模拟的边坡喷锚支护优化设计研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 301-309.