

高陡边坡稳定性分析及机械化修整工艺创新

王孝林，李栋

栾川龙宇铝业股份有限公司

摘要：高陡边坡广泛存在于公路、水利、矿山等工程建设领域，其稳定性直接决定工程施工安全、运营寿命及周边环境安全。本文结合工程实践，系统分析高陡边坡稳定性的影响因素，总结常用稳定性分析方法的应用要点，针对传统修整工艺效率低、安全风险高、质量可控性差等问题，提出机械化修整工艺创新方案，优化施工流程与设备配置，通过工程应用验证工艺的可行性与优越性，为高陡边坡工程施工提供技术参考。

关键词：高陡边坡；稳定性分析；机械化修整；工艺创新；边坡施工

1 引言

随着我国工程建设向山区、丘陵地带延伸，高陡边坡工程数量大幅增加。高陡边坡具有坡度陡、高差大、岩体破碎、受力复杂等特点，易受地质条件、环境因素及施工扰动影响，发生滑坡、崩塌等地质灾害，威胁施工人员安全、损毁工程设施，造成巨大经济损失。传统高陡边坡修整多采用人工配合小型机械作业模式，存在作业效率低、劳动强度大、安全防护难度高、修整精度不足等弊端，难以满足现代工程对施工质量、效率及安全的高标准要求。因此，开展高陡边坡稳定性系统分析，创新机械化修整工艺，实现边坡修整的高效化、安全化、精准化，具有重要的工程实践意义与应用价值。

2 高陡边坡稳定性影响因素分析

地质因素是影响高陡边坡稳定性的核心内在因素，主要包括岩体岩性、地质构造及岩体结构。岩体岩性决定边坡的基本承载能力，硬质岩体整体性好、抗剪强度高，边坡稳定性较强；软质岩体胶结程度差、遇水易软化，强度大幅

降低，易引发边坡失稳。地质构造中的断层、褶皱会破坏岩体完整性，断层带内岩石破碎，充填软弱物质，抗剪强度极低，易形成边坡滑动面；褶皱核部岩体受挤压拉伸作用，节理裂隙发育，强度下降，成为边坡不稳定区域。岩体结构中，节理、裂隙等结构面将岩体分割为不规则块体，削弱岩体整体性，结构面的产状、粗糙度及充填物性质，直接影响边坡抗滑能力，顺坡向发育的结构面易导致顺层滑坡。

环境因素主要包括降雨、地震及风化作用，是引发边坡失稳的重要外在诱因。降雨时，雨水渗入岩体裂隙，增加岩体重度，增大下滑力，同时软化岩体及结构面充填物，降低抗剪强度，雨水积聚产生的动水压力与静水压力，进一步削弱边坡稳定性，暴雨天气易引发边坡崩塌、滑坡。地震产生的地震波会对边坡岩体施加水平与垂直地震力，改变岩体应力状态，使结构面张开、错动，破坏岩体整体性，原本处于临界稳定状态的边坡易发生失稳。风化作用长期作用于边坡岩体，物理风化使岩体产生裂隙、逐渐破碎，化学风化改变岩体化学成分、降低强度，生物风化进一步加剧岩体破损，长期风化导致边坡稳定性持续下降。

施工因素对高陡边坡稳定性的影响具有突发性与可控性。传统人工修整过程中，不合理的开挖顺序、过度开挖会破坏边坡应力平衡，导致岩体应力集中，引发边坡变形；爆破施工的震动会损伤岩体结构，加剧裂隙发育；支护措施滞后或施工质量不达标，无法及时约束边坡变形，易导致边坡失稳。

3 高陡边坡稳定性常用分析方法

工程地质类比法是最基础、应用最广泛的定性分析方法，核心是结合已建同类高陡边坡工程的地质条件、施工经验及稳定状态，对比分析当前边坡的稳定性。该方法操作简便、效率高，无需复杂计算，适用于边坡初步勘察与稳定性快速评估，能为后续分析与施工提供基础参考。

极限平衡法是工程中常用的定量分析方法，核心原理是假定边坡失稳时，潜在滑动面上的抗剪强度与滑动体下滑力达到平衡，通过计算边坡安全系数，判断边坡稳定状态。该方法计算思路清晰、结果直观，能明确边坡潜在滑动面位置及安全程度，适用于各类岩质、土质高陡边坡的稳定性分析，尤其适用于

初步设计与快速评估。

有限元法是一种高精度数值分析方法，通过将边坡岩体离散为有限数量的单元，结合岩体力学参数，模拟边坡岩体的应力、应变状态，预测边坡变形趋势与失稳风险。该方法能精准反映边坡内部应力分布规律，考虑岩体非线性特性及多种因素的耦合影响，适用于复杂地质条件下高陡边坡的精细化分析，能为边坡修整与支护设计提供精准的数据支撑。

4 高陡边坡机械化修整工艺创新

机械化修整工艺创新以“安全优先、质量可控、效率提升”为核心，依托专用机械化设备，替代传统人工与小型机械作业，优化施工流程，减少高空人工作业，降低安全风险；通过精准控制修整参数，提升边坡修整精度，减少施工扰动，保护岩体完整性，保障边坡稳定性；整合开挖、修整、支护等工序，实现协同作业，缩短施工工期，降低施工成本。

结合高陡边坡修整需求，优化设备配置，形成“专用设备+协同作业”的机械化装备体系。选用高支架钻孔机替代人工作业，实现高危钻孔工序的机械化操作，该设备可灵活调整作业角度与高度，适应不同坡度、高差的高陡边坡，钻孔精度高、效率高，减少对岩体的扰动。配置湿喷台车实现边坡喷护机械化，替代传统人工喷护，该设备喷射均匀、效率高，能有效提升喷护质量，避免人工喷护存在的厚度不均、密实度不足等问题。配备开槽框架梁安装综合作业车，搭载铣挖装置与多自由度机械手，可精准开挖定向、定深沟槽，配合锚固台车完成钻孔、注浆、预制格构梁安装等工序，实现支护结构施工机械化。同时，配置全站仪等精准测量设备，实时监测修整参数，确保边坡坡度、平整度等指标符合设计要求。

优化高陡边坡机械化修整施工流程，形成“前期准备—边坡开挖—精准修整—支护施工—质量检测”的闭环作业流程。前期准备阶段，完成地质勘察、稳定性分析及设备调试，明确修整参数与施工要求；边坡开挖阶段，采用分层分段开挖模式，依托机械化设备控制开挖坡度与深度，避免过度开挖，减少对边坡岩体的扰动，开挖过程中实时监测边坡变形；精准修整阶段，利用高支架设备与精准测量设备，对边坡坡面进行精细化修整，确保坡面平整度、坡度符

合设计标准，清除坡面松动岩体，减少边坡失稳隐患；支护施工阶段，采用机械化支护设备，同步开展锚杆、喷护、格构梁安装等作业，实现开挖与支护协同推进，缩短工序衔接时间，及时约束边坡变形；质量检测阶段，采用专业检测设备，对边坡修整精度、支护质量及稳定性进行全面检测，不合格部位及时整改，确保工程质量。

5 结论

本文通过对高陡边坡稳定性影响因素及分析方法的系统研究，结合工程实践，提出了高陡边坡机械化修整工艺创新方案，得出以下结论：高陡边坡稳定性受地质、环境、施工等多因素耦合影响，地质因素是核心，环境与施工因素是重要诱因；工程地质类比法、极限平衡法、有限元法是常用的稳定性分析方法，结合使用可提升分析结果的可靠性；创新后的机械化修整工艺，通过优化设备配置与施工流程，有效解决了传统工艺的弊端，提升了施工安全、效率与质量，经工程应用验证具有良好的可行性与优越性。

参考文献

[1]何俊.矿山高陡边坡稳定性分析与生态修复协同治理技术[J].中国金属通报,2025(12):237-239