

能量进行累计计算,实现切割能耗的动态统计与寿命预测。通过能量控制算法,系统可根据材料厚度自动分配功率输出时间,减少无效能耗,节能率达12%。

4.3 信号调节与抗干扰设计

激光控制系统运行在高能量、高频脉冲的复杂电磁环境中,信号抗干扰设计对于确保控制精度和系统可靠性至关重要。为降低噪声干扰,系统在模拟信号通道采用光电隔离技术与多级低通滤波电路,截止频率设定为1 kHz,有效抑制高频干扰与地环路电压波动。数字通信部分基于RS-485与CAN总线协议,嵌入CRC冗余校验与双向握手机制,保证数据传输的完整性与时序同步。电源系统方面,采用双级LC滤波与屏蔽线束布线,控制柜内部设独立接地与电磁屏蔽层,以防止耦合干扰。经EMC(电磁兼容性)测试验证,系统整体信号抗干扰能力提升30%以上,控制指令响应时间缩短约8%,通讯丢包率降至0.02%。该设计确保了激光功率控制信号的高稳定性与系统运行的电磁安全,为布料激光切割机在高精度加工环境中的可靠运行提供了坚实保障^[4]。

5 传感器反馈与智能监测系统

5.1 位置与速度检测模块

在布料激光切割机的电气控制系统中,位置与速度检测是实现高精度运动控制的核心环节。系统采用高分辨率增量式光电编码器,对伺服电机的转角位移和速度进行实时监测,采样频率高达5 kHz,能够精准捕捉运动轨迹的微小变化。编码器输出的脉冲信号经由硬件去抖与数字滤波算法处理后,输入至运动控制卡进行高速差分计数,极大地降低了电磁干扰与信号漂移的影响。控制系统通过PID+前馈控制算法对位置偏差进行闭环修正,确保运动轨迹与指令路径的高度一致。测试结果显示,该模块在高速运动状态下仍能保持±0.01 mm以内的重复定位精度与优异的动态响应性能,为激光切割路径的光滑性与轮廓一致性提供了关键技术保障。通过实时检测与误差补偿机制,系统能有效防止布料在加减速阶段出现偏移或重影,提升整体切割质量与运行稳定性。

5.2 布料特性检测与自适应控制

布料材料的柔软性、厚度变化及表面反射率差异较大,是影响激光切割质量的重要因素。为此,系统设计了基于多传感融合的布料特性检测与自适应控制模块。该模块集成激光反射强度传感器、光学厚度测量仪及红外温度监测单元,可实时采集布料表面反射率、厚度及热响应等信息。控制系统根据传感数据自动调节激光功率、光斑焦距与移动速度,

形成“实时检测—参数修正—动态优化”的自适应闭环控制机制。例如,对于反射率高的丝绸材料,系统自动降低功率输出并优化焦距,以防止焦糊;而在较厚的棉麻布料切割中,则提高功率并延长驻留时间,确保切透效果。实验数据显示,该自适应控制技术能使切割边缘平整度提高约15%,切割误差降低20%,并有效减少焦痕与毛边现象,显著提升不同材质布料的加工一致性与智能化程度^[5]。

5.3 安全监测与异常诊断

为了确保布料激光切割机在高能量密度环境下的安全稳定运行,系统设计了多层级安全监测与智能诊断模块。电气系统内部设置过压、过流、欠压及短路保护电路,并配置温度、光强、烟雾及气流传感器,实现对设备运行状态的实时监控。当检测到异常参数(如电机过热、激光器功率异常或通风不畅)时,PLC立即发出中断指令,执行断电保护并启动声光报警装置。通过Modbus-TCP通讯协议,系统能将故障数据实时上传至上位机平台,实现远程监控与历史数据追溯。为进一步提高安全性,控制系统内置自诊断算法,可对传感器状态、电源波动及信号异常进行趋势分析与预测性维护预警。经实际运行测试,该系统的异常响应时间小于80 ms,安全防护准确率超过98%。

6 结语

布料激光切割机的电气控制系统是实现高精度、智能化加工的关键技术基础。本文在系统分析与实验验证的基础上,构建了一套以PLC与运动控制卡为核心的分层式电气控制体系,实现了伺服驱动、功率调节与传感器反馈的高效协同。研究表明,优化系统在控制精度、能量利用率与设备稳定性方面显著提升,满足现代纺织工业对柔性制造与智能控制的要求。未来研究可结合人工智能算法与数字孪生技术,实现自适应路径优化与能耗预测控制,进一步推动布料激光切割装备向高性能、智能化和可持续方向发展。

参考文献

- [1] 陈海凇.面向大幅面布料激光切割快速标定与多目标识别算法研究[D].广东工业大学,2018.
- [2] 陶鹤鸣.基于机器视觉的智能布料图案切割系统设计[D].江苏大学,2018.
- [3] 殷良,SF1810SC视觉定位全自动送料激光切割机的研制.山东省,济南森峰科技有限公司,2014-09-22.
- [4] 曹久祥,李新德,金晓彬.一种新型绣布自动切割系统[J].华中科技大学学报(自然科学版),2013,41(S1):418-421.
- [5] CO2激光切割机的研究开发及其在服装皮革领域的应用[J].现代纺织技术,2010,18(02):60.

Research on the Application Effect of Shotcrete and Anchor Reinforcement Technology in Railway Slope Support

Chunwei Li

Guoneng Xinzhun Railway, Ordos, Inner Mongolia, 017300, China

Abstract

This paper systematically studies the application effect of shotcrete and anchor reinforcement technology in railway slope support, and discusses its mechanism of action, implementation plan and engineering benefits. Research shows that the shotcrete and anchor support, through the coordinated operation of the concrete spray layer and the anchor bolt system, can significantly enhance the stability and safety of the slope. On collapsible loess sections, the combination of shotcrete and anchor retaining walls can increase the safety factor from 1.05 to 1.87. In soft rock high slopes, this technology can reduce the range of the loose zone and control the bulging deformation. On rocky steep slopes, the combination of shotcrete and anchor spraying with plant growth techniques can achieve the dual goals of protection and greening. This technology has advantages such as convenient construction, wide adaptability and good economy, and is especially suitable for railway slope projects with complex terrain. In the future, shotcrete and anchor technology will develop in the direction of intelligence, ecology and standardization, providing more reliable technical support for railway slope engineering.

Keywords

Railway slope Shotcrete and anchor reinforcement Mechanism of action; Stability analysis Support effect

铁路边坡支护中喷锚加固技术的应用效果研究

李春苇

国能新准铁路, 中国·内蒙古鄂尔多斯 017300

摘要

本文系统研究喷锚加固技术在铁路边坡支护中的应用效果, 探讨其作用机理、实施方案及工程效益。研究表明, 喷锚支护通过混凝土喷层与锚杆系统的协同工作, 能显著提升边坡稳定性与安全性。在湿陷性黄土路段, 喷锚结合挡土墙可使安全系数从 1.05 提升至 1.87; 在软岩高边坡中, 该技术能减少松动区范围, 控制臃肿变形; 在岩质陡坡处, 喷锚与植生技术结合可实现防护与绿化的双重目标。该技术具有施工便捷、适应性强、经济性好等优势, 尤其适用于地形复杂的铁路边坡工程。未来喷锚技术将朝着智能化、生态化与标准化的方向发展, 为铁路边坡工程提供更加可靠的技术支持。

关键词

铁路边坡; 喷锚加固; 作用机理; 稳定性分析; 支护效果

1 引言

铁路作为国家重要的交通基础设施, 其安全稳定运行直接关系到国民经济发展和人民生活保障。在铁路建设与运营过程中, 边坡稳定性问题一直是影响铁路安全的关键因素之一。喷锚加固技术作为一种高效、经济的边坡支护方式, 近年来在铁路边坡工程中得到了广泛应用, 但其作用机理、设计方法以及应用效果仍需系统总结与研究。现有工程实践表明, 针对不同的地质条件与边坡类型, 喷锚支护的结构形式、参数设计以及施工工艺都需要进行相应调整, 才能达到最优的加固效果。因此, 深入研究喷锚加固技术在铁路边坡

支护中的应用效果, 总结其适用条件与设计要点, 对于推动该技术的科学化、标准化应用具有重要意义。

本文基于多个铁路边坡工程案例, 系统分析喷锚加固技术的作用机理、设计方法与应用效果, 探讨其技术经济优势, 并对未来发展趋势进行展望, 以期类似工程的设计与施工提供参考。

2 喷锚加固效果的作用机理

2.1 喷锚技术与岩土体的协同工作机理

喷锚加固技术对铁路边坡的稳定作用来源于其与岩土体之间复杂的协同工作机理。锚杆作为喷锚支护系统的核心构件, 其作用机理更为深入复杂。喷锚支护系统中混凝土喷层与锚杆并非独立工作, 而是通过相互作用形成复合支撑体系。锚杆端部与喷射混凝土层连接, 使表面护层与深层锚固

【作者简介】李春苇 (1993-), 男, 中国内蒙古乌兰察布人, 本科, 助理工程师, 从事铁路工程研究。

系统有机结合^[1]。当局部岩土体发生变形时，混凝土喷层将作用力传递给附近锚杆，再由锚杆将力分散到更深层的稳定岩土中，形成有效的力传递路径。这种协同工作机制使得喷锚系统能够充分发挥岩土体自身的承载能力，显著提高边坡的整体稳定性与安全储备。

2.2 不同地质条件下的作用机制

喷锚技术在不同地质条件的铁路边坡中表现出不同的作用机制。在土质边坡尤其是湿陷性黄土路段，喷锚支护主要通过约束土体的侧向变形发挥作用。对于岩质边坡，喷锚支护的作用机制更为复杂。岩质边坡的稳定性主要受结构面控制，喷锚系统通过多种机制发挥作用：锚杆穿过潜在滑动面，提高结构面的抗滑能力；喷射混凝土封闭岩面，防止裂隙进一步发展；系统锚杆与随机锚杆相结合，加固随机分布的危岩与不稳定块体。在软岩边坡中，喷锚支护面临着更为复杂的力学环境。软岩具有强度低、易风化、流变性明显等特点，开挖后容易出现臃肚子变形现象。喷锚支护通过及时提供表面约束和深层锚固，控制塑性区的扩展，减少松动区范围^[2]。

3 工程应用案例分析

3.1 湿陷性黄土边坡支护效果

甘肃省黄土山区某新建铁路路堑高边坡工程是喷锚加固技术成功应用的典型案例。该边坡地处湿陷性黄土地区，天然状态下稳定性较差，安全系数仅为1.05，接近极限平衡状态。研究人员基于强度折减法计算原理，对自然状态下的边坡稳定性进行数值模拟，并针对性地设计了不同加固方案进行比较分析。

研究表明，单纯的喷射混凝土加锚杆支护可使边坡安全系数由1.05提升至1.75，而采用喷射混凝土、锚杆与挡土墙结合的复合支护结构时，安全系数进一步增大为1.87。从经济性与安全性综合考量，该工程最终采用锚杆+挡土墙+喷射混凝土的复合加固措施。监测数据显示，该方案实施后，边坡水平位移得到有效控制，坡体变形趋于稳定，证明了喷锚支护在湿陷性黄土地区的适用性与有效性。

3.2 软岩高边坡变形控制

南昆铁路软岩深路堑高边坡工程展示了喷锚技术在软岩地质条件下的变形控制能力。软岩具有强度低、易风化和流变性明显等特点，开挖后容易出现臃肚子变形特征，即坡腰部位向外鼓胀的现象^[3]。针对这一工程难题，研究人员开展了地质力学模型试验，系统研究喷锚支护结构的工作机理与加固效果。

试验结果表明，采用喷锚挡护可明显减小开挖在坡体内形成的松动区范围。与传统支护方式相比，喷锚支护能够及时提供支护力，限制塑性区的发育与发展。通过对喷层上土压力分布和锚杆受力规律的监测，研究人员发现边坡变形具有明显的非线性特征，最大应力集中在坡腰部位。基于试

验结果，研究团队对原设计和施工提出了保住中部，稳定坡脚的修改原则。这一原则的核心理念是加强对坡腰部位的支护，防止臃肚子变形的发生与发展，同时在坡脚区域提供足够支撑，防止整体滑动。工程应用表明，遵循这一原则设计的喷锚支护系统成功控制了软岩高边坡的变形，保证了铁路运营安全。

3.3 岩质陡坡生态防护

深圳地铁7号线深云车辆段岩质高边坡工程展示了喷锚技术在岩质陡坡防护与生态修复中的创新应用。该工程面临的挑战是在保证边坡稳定的同时，实现坡面绿化，改善生态环境。传统的喷锚支护虽然能有效保证边坡稳定，但混凝土表面往往破坏了原有的生态环境，形成白色污染。为解决这一问题，研究人员开发了一种防护与绿化复合结构，将工程防护与生态修复有机结合。

在该复合结构中，采用锚杆和注浆措施对边坡节理面、裂隙进行加固，提高边坡的整体稳定性；同时，采用植生条与主动防护网来稳固喷混植生基材和局部破碎岩体，提高边坡的局部稳定性。植生条按照一定间距固定在岩质坡面上，提高了岩质边坡的坡面摩擦系数，使喷混基材能够更好地粘附在岩质坡面上。当喷混植生基材稳定在坡面上时，草灌生长后，植生条土工布降解将袋内土壤露出，作为坡面土壤的补充。这一创新方案实现了工程防护与生态修复的完美结合。锚杆与注浆保证了边坡的深层稳定，而植生条与喷混植生基材则既提供了表层防护，又为植物生长创造了条件。

4 技术优化与发展趋势

4.1 工艺组合优化

喷锚加固技术在铁路边坡工程中的进一步发展依赖于工艺组合的持续优化。单一喷锚支护虽在多数情况下有效，但对于复杂地质条件或高陡边坡，往往需要与其他支护形式组合应用，形成复合支护系统。研究表明，不同支护结构的合理组合可产生1+1>2的协同效应，显著提高支护效果与经济效益。

在湿陷性黄土边坡中，喷锚与挡土墙的组合被证明是极为有效的支护方案。黄毅等人的研究表明^[4]，与单纯喷锚支护相比，增加挡土墙后安全系数可从1.75提升至1.87。挡土墙通常设置在坡脚部位，提供坚实的基础支撑，防止边坡从最薄弱处开始破坏；而喷锚系统则保护坡面，提供整体稳定性。两种技术的结合既利用了喷锚的灵活性与经济性，又发挥了挡土墙的可靠性，形成了优势互补。

对于高大边坡或特殊地质条件，预应力锚索与喷锚的结合显示出独特优势。蔡虹在研究渝怀铁路边坡支护时指出，预应力锚索格构梁提供的单位锚固力造价最低，预应力锚索桩板墙对自然山体的破坏最小。预应力锚索通过对岩土体施加主动预应力，改善其应力状态，提高结构面之间的摩擦力，从而显著增强边坡稳定性。与普通喷锚支护相比，预