

弹性模量 206GPa、泊松比 0.3。聚四氟乙烯弹性模量 0.5GPa、泊松比 0.4。接触应力仿真结果显示,滑动导轨最大接触应力出现在燕尾槽边缘,为 350MPa。滚动导轨滚珠与滚道接触应力呈椭圆分布,最大应力 580MPa,与 Hertz 接触理论计算值误差 < 5%。运用 UMESHMOTION 子程序实现磨损动态更新,仿真 24 小时后,滑动导轨平均磨损深度 0.04mm,滚动导轨 0.012mm,与实验测量值吻合度良好。摩擦热生成率按 $Q = \mu \cdot F \cdot v$ 计算,边界条件设置为对流换热系数 $15W/(m^2 \cdot K)$,温度场仿真显示滑动导轨最高温度 $42^\circ C$,滚动导轨 $38^\circ C$,与红外测量结果偏差 < $3^\circ C$ 。

可见,修正 Archard 模型和有限元仿真均具有较高精度,可用于导轨磨损预测。

3 机床导轨润滑方案优化策略

3.1 润滑剂选型优化

润滑剂选型是制定机床导轨润滑方案的基础。首先,优化基础油黏度。通过正交实验确定 46#、68#、100# 导轨油在不同工况下的性能。结果表明,低速高载工况下,68# 油润滑效果最佳,摩擦系数 0.032,高速低载工况下,46# 油更优,摩擦系数 0.028。100# 油因黏度大导致能耗增加 15%,仅适用于极重载工况。其次,调整添加剂配比。选取硫化异丁烯、二烷基二硫代磷酸锌进行配比优化,采用响应曲面法设计实验,以摩擦系数和磨损量为响应值。得到最优配比为:硫化异丁烯 2.5%、二烷基二硫代磷酸锌 1.8%,此时摩擦系数降至 0.025,比基础油降低 28%,磨损量减少 35%。

3.2 润滑方式改进

以 VMC600 加工中心导轨为对象,围绕油气润滑、固体涂层两个方面,设计实验,改进润滑方式。

油气润滑实验结果显示,油气比最优范围 1:25-1:35,低于 1:25 时油液浪费且污染增加,高于 1:35 时油膜不连续。供油量上,滑动导轨 $0.2mL/min \cdot m$,滚动导轨 $0.15mL/min \cdot m$,比传统滴油润滑节省油量 60%。供油间隔上,根据速度动态调整,0.5m/s 时间隔 2 分钟,1.2m/s 时间隔 1 分钟。优化后油气润滑系统使导轨磨损量从 $0.042mm / 千小时$ 降至 $0.015mm / 千小时$,摩擦系数稳定在 0.02-0.03^[3]。

制备 MoS₂ 和 PTFE 两种涂层,涂层厚度控制在 5-8 μm ,

结合强度通过划格法测试固体润滑涂层性能。摩擦学实验表明:MoS₂ 涂层摩擦系数 0.018,在干燥环境下使用寿命达 500 小时,但湿度 > 70% 时性能下降 40%。PTFE 涂层摩擦系数 0.015,耐湿性好,但耐高温性差。MoS₂ 与 PTFE 按 3:1 的比例混合而得到的复合涂层,兼具两者优势,摩擦系数 0.016,在温湿度波动环境下稳定性优异,使用寿命达 650 小时。

3.3 智能润滑系统构建

数字技术的发展,为机床导轨润滑方案的优化提供了新的支持。可利用数字技术,从监测、控制两个方面,构建智能润滑系统。监测模块集成振动传感器、红外温度传感器、油膜传感器,振动传感器,通过振动幅值判断磨损阶段,红外温度传感器监测摩擦区温度,油膜传感器,实时检测油膜厚度^[4]。控制模块采用 PLC 控制器实现自适应供油,正常状态下,按基础参数供油,预警状态下,供油量增加 20%,供油间隔缩短 30%,故障状态下,立即增加供油量 50%,并触发报警提示维护。仿真实验结果显示,智能润滑系统的构建,能有效提高油液利用率,并实现润滑参数的实时优化。

4 结语

机床导轨是机床运动部件的核心支撑结构,其磨损会直接影响加工精度、设备寿命及生产效率。导轨磨损通常表现为表面粗糙度增加、配合间隙扩大、运行噪音增大,严重时甚至引发振动或卡滞现象。应通过实验,探索机床导轨磨损规律,并通过润滑方案的优化,延缓机床导轨磨损,延长导轨使用寿命。

参考文献

- [1] 李聪波,何娇,杜彦斌.基于 Archard 模型的机床导轨磨损模型及有限元分析[J].机械工程学报,2016(15):106-113.
- [2] 刘元刚.车床导轨磨损与修复措施分析[J].科技风,2017,(11):159.
- [3] 程永丰.机床导轨磨损故障现象及精度恢复实用方法[J].设备管理与维修,2022(22):70-72.
- [4] 王超,胡亚辉,谭雁清,等.边界润滑状态下机床滑动导轨磨损特性及磨损率研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(10):24-27.

Improvement of the hot vulcanization process for steel cord rubber belt bonding

Yuwei Yang Fei Liu

Shaanxi Binchang Hujiuhe Mining Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 712000, China

Abstract

In view of the problems of insufficient strength and bubble delamination in the hot vulcanization joints of steel wire rope core rubber belts, process optimization is used to improve the joint quality and construction efficiency. This article uses a multi-center point positioning method to improve the alignment accuracy, develops a gate-shaped frame vulcanization platform to shorten the disassembly and assembly time by 1 hour, and optimizes the rubber slurry formula and graded vulcanization process parameters. The research results show that the improved joint strength is increased to over 90% of the original belt, the construction period is compressed from 3 days to 1 day, and the bubble defect rate is reduced by 60%. It can be seen that through the triple improvement of equipment, materials, and processes, a safe and reliable connection of high-strength rubber belts is achieved, providing technical support for long-distance transportation in coal mines.

Keywords

steel wire; rope core; rubber belt; thermal vulcanization; bonding process

钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺的改进

杨玉伟 刘非

陕西彬长胡家河矿业有限公司, 中国·陕西 咸阳 712000

摘要

针对钢丝绳芯胶带热硫化接头存在的强度不足、气泡分层等问题, 通过工艺优化提升接头质量与施工效率。本文采用多中心点定位法改进找正精度, 开发门形架硫化平台缩短拆装时间1小时, 优化胶浆配方及分级硫化工艺参数。研究表明: 改进后接头强度提升至原带90%以上, 施工周期从3天压缩至1天, 气泡缺陷率下降60%。由此可见, 通过设备、材料、流程三重改进, 实现了高强度胶带的安全可靠连接, 为煤矿长距离运输提供技术支撑。

关键词

钢丝; 绳芯; 胶带; 热硫化; 胶接工艺

1 引言

钢丝绳芯胶带作为现代工业输送系统的核心部件, 在冶金、矿山、港口等领域承担着长距离、高负荷物料运输任务。随着全球钢丝绳市场规模持续扩大, 其应用需求日益增长^[1]。热硫化胶接工艺作为钢丝绳芯输送带接头处理的关键技术, 目前仍存在接头强度不足、外观缺陷(鼓包、分层)等技术瓶颈, 严重影响设备安全运行和使用寿命。近年来, 国内外研究聚焦于材料改进(如专用胶浆配方优化)、工艺创新(分级硫化技术)和设备升级(智能化温控系统), 但施工效率低、环境适应性差等问题仍未根本解决^[2]。本研究旨在通过综合改进硫化平台结构、优化胶接材料体系、标准化施工流程等方案, 实现接头强度提升至原带90%以上、

施工周期缩短至1天的目标, 为工业输送系统安全高效运行提供技术支撑。

2 钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺原理

2.1 热硫化基本概念

钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺是通过热力学作用实现橡胶分子交联的化学过程。其核心原理是在特定温度(通常145-150°C)、压力(1.5-2.0MPa)和时间(60-90分钟)条件下, 硫化剂促使橡胶分子链间形成硫桥键, 实现从热塑性向热固性转变^[3]。该工艺包含三个关键阶段: 首先通过电热板对输送带粘接面分段预固化, 消除内部气泡并初步建立粘接界面; 随后在恒温阶段完成芯胶与钢丝绳的化学键合, 镀锌钢丝与橡胶通过硫化反应形成牢固的金属-橡胶复合结构; 最后通过压力维持确保胶料充分填充钢丝绳间隙, 形成致密的一体化接头。工艺成功依赖于材料匹配性, 必须使用与原带成分相同的芯胶、面胶及硫化剂, 避免因材料相容性差异导致界面裂纹。

【作者简介】杨玉伟(1987-), 男, 中国河南永城人, 本科, 工程师, 从事煤矿主运输系统机电设备管理研究。

2.2 工艺过程

钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺的核心在于通过硫化反应实现橡胶与钢丝绳的牢固粘合。其粘合机制包含三个关键过程：首先，在预处理阶段，钢丝绳表面保留的微量橡胶层经打磨后形成粗糙界面，与专用热硫化胶浆（如 SK823）发生物理吸附，形成初步结合力^[4]。其次，在硫化过程中，生胶（如 RIT 芯胶/面胶）在 140-150℃ 的温度下发生交联反应，线性橡胶分子转化为三维网状结构，同时硫化剂促使橡胶分子与钢丝绳表面氧化物形成化学键合。最终，在压力作用下，橡胶熔体渗入钢丝绳间隙，形成机械互锁结构，其粘接强度表现为单位长度钢丝绳从橡胶中拔出所需的力，当嵌入长度超过临界值时，拉力将超过钢丝绳自身断裂强度。该过程通过物理吸附-化学键合-机械互锁三重机制，实现接头强度达到原带 90% 以上的可靠连接。

2.3 关键参数

钢丝绳芯胶带热硫化胶接是通过温度、压力和时间三要素协同作用实现橡胶交联与钢丝粘接的化学过程。温度是核心反应条件，145±5℃ 的硫化温度可激活硫化剂与橡胶分子的交联反应，温度每升高 8-10℃ 反应速率倍增，但超过 160℃ 易导致橡胶链断裂^[5]。压力（1.5-2.0MPa）确保胶料致密填充钢丝间隙，排除气泡并增强界面粘附力，压力不足易产生明疤，过高则可能破坏钢丝结构。硫化时间需根据胶带厚度动态调整，通常按“基分+厚度×1.5”计算，8mm 胶带需 75 分钟恒温硫化，时间不足会导致交联不完全，过长则引发过硫返原。三要素需精准协同：高温需匹配适当压力防止焦化，厚胶带需延长硫化时间确保热量渗透，最终形成橡胶-钢丝一体化结构，接头强度可达原带 90% 以上。

3 现有工艺存在的问题分析

钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺在实际应用中仍存在系统性缺陷，主要体现在施工准备、工艺执行和质量控制三个环节。

3.1 施工准备阶段问题

施工前的准备工作直接影响后续工艺效果。首先，接头中心线找正不准确会导致硫化过程中胶带受力不均，易产生应力集中；其次，硫化平台固定不牢易在加压阶段发生位移，造成硫化压力分布异常；此外，材料（如胶浆、芯胶）准备不充分会中断施工流程，延长停机时间，尤其在高湿度环境下，未及时启用的材料可能提前失效。

3.2 工艺执行阶段问题

工艺执行中的问题更为复杂。空气湿度过高会导致硫化时水汽滞留，形成内部气泡；胶浆未充分干燥直接硫化时，溶剂挥发不彻底同样引发气泡缺陷。硫化压力和温度分布不均则与设备精度相关，局部过热或欠硫化会显著降低接头强度^[6]。此外，钢丝绳表面的锈蚀或油脂未彻底清除，会破坏橡胶与金属的粘接界面，这是接头强度不足的主因之一。

3.3 质量控制问题

现有工艺的接头强度通常仅为原带的 75%-80%，难以满足高强度输送需求。外观缺陷如鼓包、分层不仅影响美观，更是内部粘接不良的表征。更关键的是，施工人员的技术水平差异导致工艺稳定性不足，缺乏标准化操作培训和质量追溯机制，使得同类问题在不同班组重复发生。

4 钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺改进方案

4.1 具体改进方案

4.1.1 设备改进方案

针对传统硫化平台拆装效率低、胶带易损伤等问题，提出以下设备优化措施：（1）门形架硫化平台设计：采用模块化钢结构框架，通过螺栓快速组装，取消传统焊接工艺。平台底部增设液压调节支腿，可适应不同地形，使拆装时间从 2 小时缩短至 1 小时，同时提升平台稳定性，减少硫化过程中的位移风险^[7]。（2）专用卡具开发：设计弧形橡胶垫片的铝合金卡具，通过弹簧锁紧机构固定胶带边缘，避免传统夹具对胶带表面的压痕损伤。卡具内嵌导热铜片，确保硫化温度均匀分布，提升接头粘合强度。（3）温度压力监测系统：集成无线传感器网络，实时采集硫化板各区域温度（精度±1℃）和压力（精度±0.1MPa），数据通过蓝牙传输至手持终端。系统配备自动报警功能，当参数偏离设定范围（如温度低于 140℃ 或压力不足 1.5MPa）时触发提示，确保工艺一致性。

4.1.2 工艺参数优化方案

在钢丝绳芯胶带热硫化胶接工艺中，多中心点定位法的实施显著提升了找正精度。该方法通过在胶带两侧对称设置 3-5 个定位点，采用激光对中仪辅助校准，使接头中心线与输送机中心线的偏差控制在 ±1mm 以内。定位后使用专用卡具固定，有效避免了传统单点定位导致的胶带偏移问题，为后续硫化工序奠定了精准基础。该技术特别适用于带宽 1800mm 以上的大型输送带，可将找正时间缩短 40%，同时减少因定位不准导致的材料浪费。分级硫化工艺根据胶带类型和强度要求，采用差异化的搭接形式与参数控制。对于 ST/S1000 以下的中低强度输送带，采用一级或二级搭接，硫化温度控制在 140-145℃，压力 1.4MPa，保温时间 60 分钟；而 ST/S1000 以上的高强度带则适用三级或四级搭接，温度提升至 145-150℃，压力增至 1.6MPa，并延长保温时间至 90 分钟。该工艺通过阶梯式升温曲线（前 10 分钟 5℃/min，后续 2℃/min）和分段加压技术，确保钢丝绳与橡胶的充分融合，使接头强度达到原带 90% 以上。环境控制措施通过温湿度协同管理优化硫化质量。施工前需搭建防雨帐篷，将环境湿度控制在 60% 以下，温度维持在 15-30℃ 范围内。采用除湿机与加热器联动系统，确保硫化平台周围空气相对湿度 ≤55%，避免胶浆涂刷时因湿度过高产生气泡。针对冬季低温环境，预热输送带至 25℃ 以上，并采用保温棉