

红外激光检测技术在烧结皮带传输机寿命监测中的应用

夏志鹏

中冶南方冶金科技公司 湖北 武汉 430000

摘要: 针对烧结皮带传输机高温、高粉尘工况下损伤检测难、寿命预判不准、人工检测漏检率高的问题, 本文融合红外热成像与激光检测技术, 构建一体化在线寿命监测系统。文章阐述技术原理与皮带损伤特征, 完成系统软硬件设计、调试及现场应用测试, 并针对现场应用短板提出优化方案。实践表明, 该系统检测精度高、寿命预测误差小, 可大幅降低设备停机风险, 兼具显著经济与安全效益, 推广价值突出。

关键词: 红外激光检测技术; 烧结皮带传输机; 寿命监测; 应用

引言: 烧结皮带传输机是钢铁烧结生产线的核心输送设备, 长期受高温、交变载荷、粉尘磨损影响, 易出现表层磨损、芯层断裂等隐性损伤, 极易引发突发停机事故。传统人工抽检、单点测温等方式效率低、漏检率高, 难以实现早期隐患预警。为解决皮带寿命监测的技术痛点, 本文引入红外激光联合检测技术, 搭建智能监测系统, 精准识别皮带损伤、动态预判剩余寿命, 为烧结皮带智能化运维提供技术支撑。

1 红外激光检测技术基础与烧结皮带损伤特征分析

1.1 红外激光检测技术核心原理

(1) 红外检测技术原理: 基于普朗克热辐射定律, 非接触式采集皮带表面温度场分布。红外探测器将热辐射信号转换为电信号, 通过分析温度异常区域判定摩擦过热、内部脱层等隐性损伤, 实现早期预警。(2) 激光检测技术原理: 利用激光三角测距与超声激励-干涉测量, 获取皮带表面轮廓三维数据及内部弹性波传播特征, 精确识别磨损深度、裂纹长度及芯层断裂位置, 弥补红外对深层缺陷响应不足的短板。(3) 红外激光联合检测技术优势: 融合热像全局温度监控与激光局部精密测形, 实现“面-点”协同探测; 提升高温粉尘环境下的抗干扰能力与综合信噪比, 满足烧结皮带多物理场耦合损伤的快速、精准检测需求。

1.2 烧结皮带传输机关键损伤类型及成因分析

(1) 表面损伤: 含纵向划痕、横向磨穿、热熔凹坑。成因: 尖锐颗粒及金属异物切削; 高温熟料致橡胶软化炭化; 清扫器调整不当致周期性划伤。(2) 内部损伤: 芯层断裂、覆盖层与芯层剥离、接头搭接松动、钢丝绳芯腐蚀。成因: 启停冲击与交变弯曲疲劳; 高温加速粘合剂分子链断裂致界面分离; 硫化工艺温控不均或湿度过高产生气孔, 形成应力集中源。(3) 寿命影响: 以裂纹长度、磨损深度、分层面积建模。轻度表面磨损

使寿命衰减 $< 10\%$; 芯层断裂密度 > 3 处/米或分层面积 $> 5\%$ 时, 剩余寿命骤降至正常 40% 以下, 损伤呈指数增长, 需及时干预^[1]。

1.3 烧结工况对检测技术的适配要求

(1) 烧结现场环境特征: 温度分布不均, 皮带表面可达 $80\sim 150^{\circ}\text{C}$, 机头机尾辐射热强烈; 粉尘浓度高, 颗粒物直径分布广; 湿度波动大, 冷却段存在水汽; 振动频率复杂, 包含托辊转动及物料冲击成分。这些因素易造成光学窗口污染、探测器温漂及机械结构松动。(2) 检测技术的适配条件: 检测距离宜设定为 $1\sim 3\text{m}$, 避免热辐射损伤; 激光波长选用 905nm 或 1550nm 近红外波段, 穿透粉尘能力强; 红外探测器需配备制冷型 MCT 传感器, 热灵敏度优于 25mK ; 系统防护等级不低于 IP65, 具备自动清洗风帘和主动温控模块, 确保现场长期稳定运行。

2 基于红外激光检测技术的烧结皮带寿命监测系统构建

2.1 监测系统整体设计方案

(1) 系统设计目标: 构建一套适用于烧结皮带传输机的在线监测系统, 实现皮带表面及内部缺陷的实时检测、损伤程度自动评估、剩余寿命动态预测、多级故障预警以及历史数据存储管理。系统需满足 24 小时连续运行要求, 在烧结高温、高粉尘环境下保持长期稳定性, 检测响应延迟不超过 2 秒, 寿命预测误差控制在 15% 以内, 为设备维保提供可靠决策依据。(2) 系统整体架构: 采用分层分布式架构设计。硬件层划分为检测模块 (红外热像仪、激光扫描仪)、数据传输模块 (工业以太网交换机、无线数传电台)、数据处理模块 (高性能工控机、GPU 加速卡)、预警显示模块 (工业触摸屏、声光报警器)。软件层包括数据采集与预处理程序、基于深度学习的缺陷识别与图像处理程序、融合损伤数据

和运行参数的寿命预测模型,以及具备实时监控、历史查询、报表导出功能的人机交互界面。

2.2 监测系统硬件选型与安装布局

(1) 核心检测设备选型:红外热像仪选用FLIRA70型,分辨率 640×512 ,热灵敏度优于 25mK ,工作温度范围 -20°C 至 150°C ;激光轮廓扫描仪选用基恩士LJ-X8000,Z轴重复精度 $0.5\mu\text{m}$,检测速度满足 20m/s 皮带线速需求;激光测距传感器选用SICKDT50系列,量程达 10m ,防护等级IP67。选型依据为:在高温粉尘工况下保持检测精度、具备自动清洗窗口功能、支持工业现场总线通信协议。(2) 辅助硬件配置:数据采集卡选用NIPCIe-6363型,支持多通道同步采样;工业控制器选用西门子S7-1500系列,实现设备联动和时序控制;无线传输模块采用 5.8GHz 频段工业级网桥,有效传输距离 500m ;显示终端为22英寸工业平板电脑,支持触摸操作和防尘设计,确保数据实时上传与远程监控^[2]。(3) 现场安装布局:在皮带机头部布置激光轮廓仪,用于检测卸载后皮带表面磨损与裂纹;尾部安装红外热像仪,监测加载前皮带整体温度分布,发现异常发热点;中间段加密布置两套组合检测单元,分别位于皮带承载面和非承载面,上下对扫实现全截面检测。所有检测点与皮带表面距离保持在 $800\sim 1500\text{mm}$,采用减震支架固定,加装高压风刀除尘和隔热罩,避免物料遮挡和设备过热。

2.3 监测系统软件设计与开发

(1) 数据采集模块设计:基于C++开发多线程采集程序,实现红外和激光数据的时钟同步采集。预处理流程包括:采用中值滤波去除红外图像椒盐噪声,运用高斯滤波平滑激光点云数据,将原始数据转换为统一坐标系的温度矩阵和高度矩阵,并实时计算皮带横向厚度分布曲线,数据采样频率不低于 50Hz ^[3]。(2) 损伤识别与分析模块设计:采用改进的U-Net神经网络对红外热图和激光轮廓图进行融合分割,自动提取磨损区域、划痕长度和裂纹深度。建立损伤特征数据库,将缺陷按严重程度分为轻度(表面磨损 $< 1\text{mm}$)、中度(裂纹深度 $1\sim 3\text{mm}$)、重度(贯通性损伤或分层面积 $> 5\%$)三个等级,实现自动标注与分类统计。(3) 寿命预测与预警模块设计:构建基于双指数退化模型的剩余寿命预测算法,输入参数包括历史损伤累积值、累计运行时长、平均负载系数和环境温度。采用粒子滤波进行参数动态更新,预测剩余天数。预警机制设置三级阈值:黄色预警(损伤中度)推送检修建议,橙色预警(损伤重度)触发声光报警,红色预警(损伤危及安全)自动停机保护,所有预警信息通过4G模块推送至管理人员手机端。

2.4 系统调试与性能测试

(1) 实验室调试:搭建模拟皮带试验台,以标准缺陷试件(已知尺寸的人工划痕、模拟分层块)为检测对象,验证系统检测精度与重复性。测试项目包括:不同速度下($0\sim 5\text{m/s}$)轮廓测量误差、不同温度背景(室温 $\sim 120^\circ\text{C}$)下红外测温偏差、数据采集与处理的同步时延。调试目标:测量精度 $\leq 0.1\text{mm}$,温度偏差 $\leq \pm 2^\circ\text{C}$,系统误报率 $\leq 3\%$ 。(2) 现场试运行:选取某钢厂烧结车间3号皮带机进行为期两周的连续试运行。期间验证设备抗振性能、自动清洗装置除尘效果以及长期工作的温升稳定性。根据现场数据调整检测距离和曝光参数,优化图像分割阈值,建立适用于该工况的背景温度补偿模型。试运行结束评估系统检测准确率、预警及时率和数据丢包率,形成现场适应性报告。

3 红外激光检测技术在烧结皮带传输机寿命监测中的应用实践与优化

3.1 应用场景与实施流程

(1) 应用场景选取:选取某大型钢铁企业烧结车间服役年限超过5年的3条主力皮带传输机作为应用对象。选取依据为:皮带已进入损伤高发期,历史故障记录显示年均非计划停机达6次,且该三条皮带承担全厂70%的烧结矿输送任务,一旦突发断裂将导致全线停产,具有典型代表性和紧迫的监测需求。(2) 现场实施流程:制定七阶段标准化实施流程。①前期调研:收集皮带结构参数、历史维修记录及环境数据,确定检测盲区与重点监测断面。②设备安装:依据安装布局方案架设检测单元,完成供电、通信线缆铺设及防护罩加装。③系统联调:进行红外与激光设备的时间同步校准、空间坐标校准及通信协议对接。④基线标定:在皮带全新或已知完好状态下采集基准数据,建立初始温度场和轮廓模型。⑤参数整定:根据现场环境调整曝光时间、滤波强度及预警阈值。⑥人员培训:对运维人员进行设备操作、数据判读和日常维护培训。⑦正式运行:切换至自动监测模式,纳入工厂设备管理系统。注意事项包括安装阶段断电作业、标定阶段避免阳光直射传感器、运行初期每日校验数据稳定性^[4]。

3.2 应用效果分析与验证

(1) 检测精度验证:将系统连续三个月的检测结果与停机人工测量数据进行对比。结果表明:系统对表面磨损深度检测平均绝对误差为 0.12mm ,裂纹长度识别准确率达 94.2% ,分层缺陷定位偏差小于 8mm 。相较于传统点温枪抽检和游标卡尺测量,系统可发现早期微裂纹和局部过热等人工易漏检的隐性损伤,漏检率由人工检

测的18%降至4.3%。(2)寿命预测准确性验证:选取已更换皮带的实际使用寿命,对比系统在更换前三个月给出的剩余寿命预测值。统计6条更换皮带的预测结果,平均预测误差为13.7%,满足工程应用要求。模型误差主要来源于突发性外力损伤(如大块异物卡阻造成的瞬时撕裂)和极端天气导致的温度剧烈波动,已通过引入冲击载荷监测因子和环境温度补偿系数进行修正^[5]。(3)经济效益与社会效益分析:系统应用后,三条主力皮带非计划停机由年均6次降至1次,单次停产损失按80万元计,年避免直接损失约400万元;皮带因精准维护平均延长使用寿命8个月,节省更换费用约45万元/条;维修人员接触粉尘和高温区域的频次减少65%,安全隐患显著降低。综合计算,首年投资回收期不足6个月,经济效益与安全效益十分突出。

3.3 技术应用存在的问题与优化策略

(1)现存问题分析:①粉尘积累导致光学窗口透射率下降,连续运行一周后红外测温偏差增大至 $\pm 5^{\circ}\text{C}$;②皮带高速运行时($> 4\text{m/s}$),激光扫描帧率受限,表面细小裂纹(宽度 $< 0.5\text{mm}$)出现漏识别;③高温熟料粘附在皮带表面产生热斑干扰,造成分层缺陷误判;④系统软件操作界面专业性较强,一线工人理解成本较高,部分功能利用率低。(2)优化策略:①加装自动旋转刷与压缩空气吹扫联动装置,设定每2小时自动清洁光学窗口,同时采用蓝宝石防护镜片提升耐磨性;②将激光扫描仪升级为2kHz高速型号,并采用多帧叠加超分辨率算法,提升微小缺陷捕获能力;③引入红外与激光数据的时空融合判别逻辑,通过表面温度梯度与三维形貌联合分析,有效区分附着物热斑与真实内部缺陷;④简化人机界面,开发一键式诊断报告生成功能,增加声控引导操作提示,降低使用门槛。

3.4 技术推广前景与发展方向

(1)推广前景:该技术体系不仅适用于冶金行业烧结皮带,在煤炭输送带、水泥建材皮带、港口矿石码

头卸料皮带等场景同样具备推广价值。当前工业领域皮带总里程超过10万公里,多数仍依赖人工巡查或单点测温,随着安全生产标准提升和数字化转型加速,红外激光联合检测技术有望成为皮带寿命监测的标配方案,市场应用空间广阔。(2)未来发展方向:①多传感器融合方向:引入声发射传感器感知内部纤维断裂声信号、微波水分仪监测皮带受潮老化程度,构建更全面的健康状态评估体系;②智能化方向:基于数字孪生技术建立皮带三维虚拟模型,实现损伤演变的可视化推演与主动预警;③设备升级方向:开发手持式便携检测终端,用于临时抽检和应急排查;结合5G和边缘计算技术,实现数据云端存储与跨车间远程运维诊断,推动从单机监测向集团级设备健康管理平台跃升。

结束语

本文将红外激光联合检测技术应用于烧结皮带寿命监测,构建了适配复杂工况的在线监测体系,有效解决了传统检测技术的诸多弊端。经现场实践验证,该系统可精准识别各类皮带损伤、精准预判设备寿命,显著降低非计划停机频次与运维成本。后续可通过多传感器融合、数字孪生等技术迭代升级,完善智能监测体系,拓展多行业皮带设备监测应用场景。

参考文献

- [1]王浩宇,李刚,张鑫.基于激光红外融合的皮带输送机磨损状态监测研究[J].激光与光电子学进展,2025,62(04):437-441.
- [2]刘佳伟,赵建军,孙明.烧结厂皮带输送机故障红外在线监测系统的设计[J].工矿自动化,2024,50(07):112-117.
- [3]陈曦,王博文.基于激光点云技术的输送带表面缺陷与寿命预测[J].煤矿机械,2023,44(09):168-171.
- [4]郑灿广,王龙蛟,韩扬.带式输送系统姿态监测及预警机制研究[J].煤矿现代化,2025,9(01):98-102.
- [5]周磊,杨晨.高温粉尘环境下皮带红外检测技术优化研究[J].冶金设备,2022,13(08):45-49.