

铁路货车车辆轮对故障分析及改进措施

赵 敏

中国铁路呼和浩特局集团有限公司包头西车辆段 内蒙古 包头 014000

摘 要: 铁路货车轮对作为关键部件,其故障直接影响行车安全与效率。本文剖析了轮对磨损、裂纹、组装等常见故障类型,从设计制造、运用维护、环境因素及故障传播机理等方面分析了成因。提出通过高强度材料应用、结构优化、运维管理改进及智能运维系统构建等改进措施,以提升轮对可靠性,实现故障早发现、早预防,保障铁路货车安全高效运行。

关键词: 铁路货车车辆; 轮对故障; 改进措施

引言: 铁路货车在货物运输中扮演着至关重要的角色,轮对作为其关键承载与行走部件,性能状态直接关系到行车安全与运输效率。然而,受设计制造、运用环境、维护管理等多方面因素影响,轮对故障时有发生,如磨损、裂纹等,不仅影响货车正常运行,还可能引发严重安全事故。因此,深入分析轮对故障成因,并针对性地提出改进措施,具有重要的现实意义。

1 铁路货车轮对结构与故障类型分析

1.1 轮对基本结构与功能

(1) 车轮由轮缘、踏面、辐板和轮毂组成,轮缘限制轮对横向位移防脱轨,踏面与轨道接触传递载荷,辐板缓冲振动,轮毂与车轴过盈配合传递扭矩;车轴为实心圆轴,连接左右车轮,承受垂向、横向和纵向载荷,是力传递核心部件;轴承安装在车轴两端轴颈处,减少车轴与轴箱摩擦,保证轮对灵活转动,降低运行阻力。(2) 轮对与轨道相互作用遵循轮轨接触力学原理,运行时踏面与钢轨顶面形成滚动接触,传递车辆重量与牵引力、制动力;轮缘与钢轨侧面在曲线运行或横向偏移时接触,产生导向力,同时轮轨间存在滑动摩擦,引发磨损与振动,二者相互作用需匹配几何参数与材料特性,保障行车稳定。

1.2 轮对常见故障类型及分类

(1) 磨损类故障中,轮缘磨耗因轮缘与钢轨频繁接触导致,过度磨耗会削弱导向能力;踏面擦伤多由制动过猛或轮轨黏着不足引发,形成局部凹陷,加剧运行振动与冲击。(2) 裂纹类故障里,车轴裂纹常产生于轴颈、防尘板座等应力集中部位,若未及时发觉易引发断轴;车轮辐板裂纹多因疲劳载荷导致,在辐板与轮毂、踏面连接处易萌生扩展。(3) 组装故障方面,轴承松动源于组装间隙过大或锁紧装置失效,会导致轴承异常磨损发热;压装缺陷表现为车轮与车轴压装力不足或过盈量不

当,影响力传递,严重时引发轮轴分离。(4) 其他故障中,热轴由轴承润滑不良、摩擦加剧导致,需及时处理防轴箱烧毁;轮对脱轨多因轮缘磨耗超限、轨道变形或运行速度过快引发,是严重行车安全事故^[1]。

2 铁路货车车辆轮对故障成因分析

2.1 设计制造因素

(1) 材料缺陷是轮对故障的先天隐患。车轴钢若存在非金属杂质、成分偏析等问题,会降低材料力学性能,在载荷作用下易形成应力集中点,为裂纹萌生提供条件;车轮材质若硬度不足或均匀性差,会加剧踏面磨耗速度,缩短车轮使用寿命,同时使轮缘在与钢轨接触时更易出现塑性变形。(2) 加工工艺问题直接影响轮对质量。车轴热处理不当会导致硬度、韧性失衡,在运行中易因疲劳产生裂纹;车轮踏面加工精度不足会使轮轨接触面积不均,增加局部磨耗与冲击载荷;轮轴压装工艺精度低,若过盈量控制不当,会导致压装不牢固或车轴内部产生额外应力,为后续组装故障埋下隐患。

2.2 运用维护因素

(1) 超载与偏载运行会显著增加轮对负荷。超载时轮对承受的垂向载荷远超设计标准,加速车轮踏面磨耗与车轴疲劳损伤;偏载则使轮对横向受力不均,轮缘与钢轨侧面接触压力增大,加剧轮缘磨耗,同时可能导致轮对运行轨迹偏移,增加脱轨风险。(2) 线路条件对轮对故障影响显著。小半径曲线线路中,轮对需频繁转向,轮缘与钢轨内侧摩擦加剧,易引发轮缘磨耗与踏面擦伤;钢轨表面若存在磨耗、擦伤或轨距超标等问题,会使轮轨接触状态恶化,增加轮对振动与冲击,加速故障产生。(3) 检修周期与保养不足会导致故障累积。未按规定周期对轮对进行探伤检测,易遗漏早期裂纹等隐蔽故障;轴承润滑油老化或补充不及时,会增加轴承摩擦阻力,导致热轴故障;轮对几何参数(如轮径差、轮缘厚度)未及时

调整,会使轮轨配合失衡,加剧磨损与故障风险^[2]。

2.3 环境因素

(1) 腐蚀性环境会破坏轮对材料结构。在化工园区、沿海等区域,空气中的化学物质(如二氧化硫、盐分)或雨水会对轮对金属表面产生腐蚀,形成锈蚀坑,降低材料强度,同时腐蚀产物会加剧轮轨摩擦磨损,加速故障发展。(2) 温度变化会影响轮对材料性能。冬季低温环境下,轮对金属材料韧性下降、脆性增加,在承受冲击载荷时易产生裂纹;夏季高温则会使轴承润滑油脂黏度降低、润滑效果减弱,增加轴承发热风险,同时高温还可能导致轮对金属热胀冷缩,影响轮轴配合精度。

2.4 故障传播机理

(1) 单点故障易引发连锁反应。例如踏面擦伤故障产生后,轮对运行时擦伤部位与钢轨接触会产生周期性冲击,一方面加剧自身磨损,另一方面冲击载荷会传递至车轴,使车轴应力集中部位萌生裂纹;若踏面擦伤未及时修复,持续的冲击会导致轴承受力不均,增加轴承磨损与发热,进而引发热轴故障,形成“踏面擦伤—车轴裂纹—轴承热轴”的连锁故障链。(2) 多因素耦合作用会加速故障恶化。如材料缺陷(车轴钢杂质)与运用维护不当(超载运行)耦合时,车轴在先天强度不足的情况下,承受额外载荷,会大幅缩短疲劳寿命,加速裂纹萌生与扩展;再如腐蚀性环境(盐分腐蚀)与线路条件差(钢轨磨耗)耦合,会使轮缘在腐蚀削弱材料强度的同时,承受更大摩擦载荷,双重作用下轮缘磨耗速度显著加快,快速发展为故障。

3 铁路货车车辆轮对故障检测与诊断技术

3.1 传统检测方法

(1) 人工目视检查是基础检测手段,依赖工作人员通过肉眼观察轮对表面状态,可初步识别踏面擦伤、轮缘磨耗、轮毂变形等明显故障,但受主观经验、光线条件影响大,难以发现车轴内部裂纹、轴承隐性损伤等隐蔽问题,且检测效率低,不适用于大规模快速排查。(2) 定期探伤检测是关键无损检测方式,磁粉探伤通过磁粉聚集显示轮轴表面及近表面裂纹,适用于车轴防尘板座、车轮辐板等部位;超声波探伤利用声波反射原理探测车轴内部缺陷,可发现材料内部裂纹。但该方法需车辆停运拆解,检测周期固定,无法实时监控故障发展,且对检测人员技术水平要求高。

3.2 现代智能检测技术

(1) 在线监测系统可实现实时动态监控,轴温检测通过轴箱温度传感器实时采集温度数据,超限时自动报警,预防热轴故障;振动分析系统通过安装在轮对或轴

箱的振动传感器,捕捉异常振动信号,分析判断轴承磨损、轮轨接触不良等问题,无需中断车辆运行。(2) 机器视觉与图像识别技术通过轨道旁高清相机拍摄轮对图像,结合AI算法自动识别踏面擦伤、轮缘厚度异常等故障,检测速度快、精度高,可适应不同光照条件,减少人工干预。(3) 大数据分析故障预测模型整合历史检测数据、运行数据,通过算法挖掘故障规律,预测轮对剩余寿命,提前安排检修,变“事后维修”为“预防性维修”,降低故障突发风险。

3.3 检测技术对比与优化建议

(1) 传统方法适用于小范围精准检测,但效率低、覆盖有限;现代智能技术实时性强、效率高,但成本高,复杂环境下易受干扰(如雨水影响图像识别)。(2) 建议采用多技术融合方案,以在线监测系统实时预警,机器视觉快速筛查表面故障,定期探伤补充检测内部缺陷,结合大数据模型预测故障趋势,形成“实时监控—快速识别—精准检测—预测维护”的全流程检测体系,提升故障检测效率与准确性。

4 铁路货车车辆轮对故障改进措施与优化设计

4.1 材料与工艺改进

(1) 高强度、抗疲劳材料应用是提升轮对可靠性的核心。车轴制造可采用微合金化高强度钢,如加入铬、镍等元素优化成分,减少非金属杂质含量,通过细化晶粒提升材料韧性与抗疲劳性能,使车轴在长期载荷作用下不易产生裂纹;车轮可选用贝氏体钢等耐磨材料,其硬度可达HB380-HB420,相比传统珠光体钢,踏面磨耗速率降低30%以上,同时增强轮缘抗塑性变形能力,延长车轮使用寿命。此外,轴承滚动体可采用陶瓷复合材料,具备低密度、高强度、耐高温的特性,减少摩擦损耗,降低热轴故障风险^[3]。(2) 优化热处理与压装工艺可消除制造缺陷。车轴热处理采用“调质+局部感应淬火”工艺,调质处理确保整体力学性能均匀,局部感应淬火强化轴颈、防尘板座等应力集中部位,硬度提升至HRC58-HRC62,增强抗磨损与抗疲劳能力;车轮热处理通过精准控制加热温度与冷却速度,避免出现硬度不均、内部组织疏松等问题,保证踏面硬度梯度合理。轮轴压装采用数控精密压装设备,实时监测压装力与位移曲线,确保过盈量控制在0.15mm-0.25mm的合理范围,避免因压装力不足导致松动,或过盈量过大引发车轴内部应力集中。

4.2 结构优化设计

(1) 抗磨损轮缘形状设计可改善轮轨接触状态。将传统直角轮缘优化为“圆弧过渡+渐变斜率”结构,轮缘顶部圆弧半径增大至15mm-20mm,减少与钢轨侧面的摩

擦面积,同时轮缘内侧采用1:20的渐变斜率,使曲线运行时轮缘与钢轨接触点更平滑,降低磨损速率。此外,在车轮踏面设置1/40的锥度,增强轮对自导向能力,减少轮轨滑动摩擦,缓解踏面擦伤问题。(2)防裂纹扩展的车轴结构改进可阻断故障发展路径。在车轴轴颈与防尘板座过渡处采用大圆弧过渡结构,圆弧半径从传统的5mm增大至12mm-15mm,降低应力集中系数,减少裂纹萌生概率;在车轴中部设置“环形缓冲槽”,槽深3mm-5mm、宽度10mm-15mm,当车轴出现微小裂纹时,缓冲槽可改变裂纹扩展方向,阻止裂纹向轴身核心区域延伸。同时,在车轮辐板与轮毂、踏面连接处增加加强筋,厚度5mm-8mm,增强辐板抗疲劳强度,预防辐板裂纹。

4.3 运维管理优化

(1)制定科学检修周期与标准需结合运行工况。根据轮对运行里程、载荷等级制定差异化检修计划:重载货车轮对每运行8万公里进行一次全面探伤检测,普通货车每12万公里检测一次;将轮缘厚度磨损限值从23mm调整为25mm,踏面擦伤深度限值从1.5mm收紧至1.0mm,提前预警故障风险。同时,建立“故障分级处理”标准,轻微踏面磨损采用轮对旋修修复,裂纹深度超3mm的车轴直接报废,避免故障扩大。(2)加强线路条件监测与维护可减少轮对损伤。在小半径曲线(半径 $< 300\text{m}$)路段,每季度测量钢轨磨损量,当侧面磨损超12mm时及时更换钢轨;定期调整轨距,将轨距偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内,避免轮缘与钢轨过度挤压;在钢轨接头处铺设护轨,减少轮对通过时的冲击载荷,降低踏面擦伤概率。(3)培训提升检修人员技能水平是保障检修质量的关键。开展“理论+实操”培训,内容涵盖轮对探伤技术、轴承拆装规范、故障判断方法等;定期组织技能考核,考核不合格者需重新培训,确保检修人员能准确识别车轴裂纹、轴承异响等故障;建立“师徒带教”制度,由经验丰富的技师指导新员工,传承实战经验,提升整体检修团队能力^[4]。

4.4 智能运维系统应用

(1)构建轮对全生命周期管理平台可实现全程追溯

与管控。平台整合轮对制造、组装、运用、检修、报废全流程数据:制造阶段记录材料成分、热处理参数、加工精度等信息;运用阶段实时采集运行里程、载荷分布、轴温变化等数据;检修阶段记录故障类型、维修措施、更换部件等信息。通过大数据分析生成轮对健康状态评估报告,预测剩余使用寿命,为轮对更换、检修计划制定提供决策支持,避免“过度维修”或“维修不足”问题。(2)基于物联网的实时监测与预警系统可实现故障早发现、早处理。在轮对轴箱安装温度传感器、振动传感器,在车轮踏面安装位移传感器,传感器通过5G网络实时上传数据至监控中心;系统内置智能分析算法,当轴温超过 80°C 、振动频率异常(偏离正常范围 $\pm 20\%$)、踏面磨损速率突增时,自动触发预警信号,推送至运维人员手机端与监控大屏,同时生成故障定位报告,指引运维人员快速排查故障。此外,系统可与铁路调度系统联动,若轮对出现严重故障,自动建议调度中心调整列车运行计划,避免故障扩大引发安全事故。

结束语

铁路货车轮对故障的全面剖析与有效改进,是保障铁路运输安全、提升运营效率的关键所在。通过深入探究故障成因,我们明确了设计、制造、运用及维护等环节的优化方向。而所提出的改进措施,涵盖材料升级、结构优化、管理强化以及智能技术应用等多方面。未来,需持续关注轮对运行状态,不断完善改进策略,让轮对以更可靠的状态助力铁路货车稳定、高效地驰骋于铁道线上。

参考文献

- [1]王化君,刘天傲.关于铁路货车车辆轮对故障分析及解决方案的研究[J].科技视界,2022,(25):60-61.
- [2]李剑兵.浅析铁路货车车辆轮对故障及处理[J].内燃机与配件,2020,(11):163-164.
- [3]杨浩.铁路货车车辆轮对故障原因、危害分析及解决措施研究[J].技术与市场,2020,25(05):62-63.
- [4]王海山.铁路货车车辆滚动轴承运用中的故障分析及改进措施[J].民营科技,2021,(12):141-143.