

重载铁路道岔探伤措施研究

辛建兵

国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司 河北 沧州 062350

摘要: 重载铁路道岔在列车运行中承受复杂应力, 损伤形式多样且隐蔽部位检测难度大。本文分析了道岔损伤机理, 包括表面、内部及隐蔽部位损伤成因; 着重阐述了超声波探伤技术及其发展, 提出多技术融合策略; 从探伤周期、工艺参数、设备工具及环境适应性等方面优化探伤措施; 介绍了探伤数据管理与分析方法, 涵盖数据标准化存储、缺陷智能识别与分类、损伤趋势预测及维护决策支持, 为保障重载铁路道岔安全运行提供全面方案。

关键词: 重载铁路道岔; 损伤机理; 超声波探伤技术; 措施优化; 数据管理

引言: 重载铁路运输具有运量大、效率高的特点, 对国家经济发展意义重大。道岔作为重载铁路线路的关键组成部分, 其结构复杂, 在列车运行过程中承受着复杂的轮轨动态相互作用, 易产生各类损伤。这些损伤若不能及时发现和处理, 将严重影响列车运行安全与运输效率。因此, 深入研究重载铁路道岔探伤措施, 准确检测出道岔的损伤情况, 对于保障重载铁路的安全运营具有重要的现实意义。

1 重载铁路道岔损伤机理分析

1.1 道岔结构特点与受力特性

重载铁路道岔作为线路的关键组成部分, 其几何构造复杂且独特。转辙器部分由尖轨、基本轨及转辙机械等构成, 尖轨在转辙机械带动下实现与基本轨的贴合与分离, 引导列车顺利转换运行方向^[1]。连接部分将转辙器与辙叉相连, 由导轨等部件组成, 确保列车平稳过渡。辙叉部分包含辙叉心、翼轨和护轨, 是列车轮对通过交叉轨道的关键区域, 结构强度与稳定性要求极高。在列车运行过程中, 轮轨动态相互作用使道岔承受复杂应力。列车通过道岔时, 轮对与钢轨接触点不断变化, 导致应力分布不均。在尖轨与基本轨过渡区域、辙叉心等部位, 应力集中现象尤为明显。高轴重列车对道岔产生的冲击力更大, 高密度运行则使道岔承受的交变应力次数显著增加。这种高应力水平与频繁交变应力的共同作用, 加速了道岔的疲劳损伤累积过程, 对道岔结构完整性构成严重威胁。

1.2 典型损伤类型与成因

表面损伤是道岔常见损伤形式之一。接触疲劳裂纹通常在轮轨反复接触摩擦作用下萌生, 随着列车运行次数增加, 裂纹逐渐扩展形成剥落。磨损则是由于轮轨间硬质颗粒的切削作用以及材料塑性变形导致, 在尖轨、辙叉心等部位表现明显。这些表面损伤不仅影响列车运

行平稳性, 还可能引发更严重故障。内部损伤对道岔安全运行危害极大。焊缝缺陷多因焊接工艺不当或焊后处理不完善产生, 在交变应力作用下易成为裂纹源。核伤一般起源于钢轨内部微小缺陷, 在应力作用下裂纹沿轨头横向扩展, 形成隐蔽性较强的内部损伤。孔洞可能由材料制造缺陷或使用过程中腐蚀引起, 应力集中效应会加速孔洞周围裂纹扩展。隐蔽部位损伤检测难度较大。滑床板与心轨、翼轨贴合面在列车运行中承受复杂摩擦与冲击, 微裂纹易在此区域萌生。由于位置隐蔽且受空间限制, 常规检测手段难以有效发现这些早期损伤, 给道岔安全运行带来潜在风险。

2 重载铁路道岔探伤技术体系

2.1 超声波探伤技术原理与优势

超声波探伤是重载铁路道岔检测中应用广泛且效果显著的技术。纵波在介质中传播时, 质点振动方向与波的传播方向一致, 能快速发现与波传播方向平行的缺陷; 横波质点振动方向垂直于波的传播方向, 对垂直于波传播方向的缺陷检测效果较好; 表面波沿介质表面传播, 对表面裂纹等缺陷较为敏感。以铁路某段道岔检测为例, 在该段道岔的辙叉心部位, 使用传统检测方法难以发现内部微小裂纹。而采用超声波探伤技术, 利用纵波和横波相结合的方式, 纵波快速扫描大致区域, 横波对疑似缺陷部位进行精确检测, 成功检测出辙叉心内部一处长度约3mm、宽度约0.5mm的微小裂纹, 避免了可能因裂纹扩展导致的严重事故。超声波探伤凭借其多种波型的特性, 能够适应道岔不同部位、不同类型缺陷的检测需求, 在道岔探伤中发挥着关键作用。然而, 超声波探伤也存在一定局限性。在道岔复杂几何结构处, 如尖轨与基本轨过渡区域、辙叉心等部位, 由于声束传播路径复杂, 易出现反射、折射等现象, 导致部分区域检测困难, 难以发现微小缺陷^[2]。但相较于其他技术, 超声波

探伤在道岔检测中的综合优势更为突出,因此成为道岔探伤的主要技术手段。

2.2 新型超声波探伤技术发展方向

2.2.1 多频超声波技术

多频超声波技术采用宽频带探头,能发射多种频率超声波。不同频率超声波对不同深度、不同尺寸缺陷具有不同检测特性,宽频带探头可适应道岔复杂几何结构,提高对微小缺陷检测能力,减少漏检情况发生。该技术能够有效克服传统超声波探伤在复杂结构部位检测精度不足的问题,进一步提升道岔探伤的准确性。

2.2.2 相控阵超声波技术

相控阵超声波技术通过控制多个阵元发射与接收超声波,实现多角度聚焦与成像。该技术能灵活调整声束方向与聚焦深度,对道岔隐蔽部位缺陷具有良好识别能力,可清晰显示缺陷位置、形状与尺寸,为道岔损伤评估提供准确依据。在道岔的一些隐蔽区域,如滑床板与心轨、翼轨贴合面等,相控阵超声波技术能够发挥出独特的优势,有效检测出早期微小损伤。

2.2.3 激光超声波技术

激光超声波技术是一种非接触式检测技术,利用激光脉冲激发超声波,通过检测超声波信号实现缺陷检测。该技术可在道岔运行过程中进行实时监测,无需接触道岔表面,避免对道岔造成干扰,对道岔动态损伤监测具有巨大潜力。在不影响列车正常运行的情况下,激光超声波技术能够实时获取道岔的损伤信息,为道岔的安全运行提供及时保障。

2.3 多技术融合探伤策略

虽然超声波探伤技术在道岔检测中占据主导地位,但为了进一步提高检测的全面性和准确性,可采用超声波与其他技术融合的探伤策略。例如,超声波与红外热成像技术联合检测。红外热成像技术基于热辐射原理,通过检测道岔表面热应力分布,分析损伤热信号与正常热信号差异。道岔存在缺陷时,热应力分布会发生变化,红外热成像技术可捕捉这种变化,实现对道岔内部损伤的间接检测。将超声波探伤与红外热成像技术相结合,超声波探伤能够检测出道岔内部较为明确的缺陷,而红外热成像技术则可以从热信号的角度对道岔的整体损伤状况进行评估,两者相互补充,提高检测的可靠性。

3 重载铁路道岔探伤措施优化

3.1 探伤周期与频次优化

重载铁路道岔损伤受多种因素影响,基于损伤累积模型制定动态探伤周期是科学合理的做法。损伤累积模型综合考虑列车轴重、运输密度、道岔使用年限等因

素,通过建立数学模型模拟道岔损伤发展过程。依据模型分析结果,可精准预测不同阶段道岔损伤程度,进而确定与之匹配的探伤周期。对于新铺设道岔,初始阶段损伤发展较慢,可适当延长探伤周期;随着使用时间增长,损伤加速累积,则需缩短探伤周期。关键部件如辙叉心,因承受列车轮对频繁冲击,损伤风险较高^[3]。采用分级探伤频次调整策略,根据辙叉心使用状况与损伤程度划分不同等级。对于损伤较轻、运行状况良好的辙叉心,可按常规频次探伤;对于出现早期损伤迹象或运行环境恶劣的辙叉心,增加探伤频次,以便及时发现损伤发展趋势并采取相应措施。

3.2 探伤工艺参数优化

在超声波探伤中,探头频率、耦合剂性能与扫描速度相互关联。探头频率影响检测分辨率与深度,高频探头分辨率高但检测深度浅,低频探头则相反。耦合剂性能影响超声波传播效率,优质耦合剂可减少声能损失。扫描速度过快可能导致缺陷漏检,过慢则降低检测效率。针对朔黄铁路重载工况,需先按道岔部位划分检测分区,对辙叉心等应力集中区优先采用5MHz高频探头,对尖轨与基本轨过渡区则选用2.5MHz低频探头以兼顾深度;同时选用专用低温耦合剂,将扫描速度控制在12-18mm/s区间,通过现场正交试验逐步迭代,确定三者最佳匹配关系,在保证检测质量前提下提高检测效率。

3.3 探伤设备与工具改进

专用探伤小车针对道岔复杂曲面设计自适应检测机构。该机构可根据道岔不同部位曲面形状自动调整探头位置与角度,确保探头与被检表面良好贴合,提高检测信号质量。便携式探伤仪轻量化与智能化升级是发展趋势。轻量化设计便于探伤人员携带与操作,智能化升级赋予探伤仪数据实时传输与远程诊断功能。探伤人员可将检测数据实时上传至监控中心,专家通过远程诊断及时给出检测结果与处理建议,提高探伤工作效率与准确性。自动化探伤系统开发结合机械臂与机器视觉协同定位技术。机械臂可实现探伤探头精确移动与定位,机器视觉可快速识别道岔关键部位与缺陷位置,二者协同工作可实现道岔自动化、高精度探伤,减少人工操作误差。

3.4 探伤环境适应性提升

低温环境下,耦合剂性能可能发生变化,导致超声波传播效率降低。可采用特殊配方耦合剂,保证在低温条件下仍具有良好流动性与耦合性能。同时,对探伤设备进行预热处理,使设备在正常工作温度下运行,避免低温对设备精度与稳定性影响。粉尘与潮湿环境中,探伤设备易受污染与腐蚀,检测信号易受噪声干扰^[4]。可对

探伤设备进行密封防护处理,防止粉尘与水分进入设备内部。采用先进信号处理技术对检测信号去噪,如小波变换去噪法,它能根据信号和噪声在不同频率上的分布特性,将噪声从信号中分离出来,提高信号信噪比,确保检测结果准确性。

4 探伤数据管理与分析方法

4.1 探伤数据标准化存储

在重载铁路道岔探伤工作中,对缺陷特征参数进行标准化存储是数据有效利用的基础。缺陷位置、尺寸、类型等特征参数需通过数字化编码规则实现精准记录。位置参数可依据道岔几何坐标体系,将道岔划分为若干区域,对每个区域进行唯一编码,再结合缺陷在该区域内的相对位置坐标,精确确定缺陷位置。尺寸参数根据缺陷长、宽、高等维度,设定统一量纲与精度标准进行编码。类型参数则按照常见缺陷分类,赋予不同类别唯一数字标识。多源探伤数据来自超声波等多种探伤技术,数据格式差异较大。为实现数据统一管理与分析,需构建统一格式数据库。将不同探伤技术获取的数据转换为统一数据结构,包含缺陷基本信息、探伤设备信息、探伤时间等字段。采用关系型数据库管理系统,对数据进行高效存储、查询与更新,确保数据完整性与一致性。

4.2 缺陷智能识别与分类

基于深度学习的缺陷图像识别模型训练是提升缺陷识别准确率的关键。收集大量包含各类缺陷的道岔探伤图像,对图像进行预处理,如去噪、增强对比度等,提高图像质量。采用卷积神经网络等深度学习架构,构建缺陷图像识别模型。通过大量标注缺陷图像对模型进行训练,调整网络参数,使模型学习到缺陷特征与图像之间的映射关系。利用验证集与测试集对模型性能进行评估,不断优化模型结构与参数,提高模型泛化能力。缺陷严重程度分级标准需设计量化指标。根据缺陷尺寸、位置、类型等因素,确定不同因素对缺陷严重程度影响权重。例如,尺寸较大缺陷对道岔结构完整性影响更大,赋予较高权重;位于关键部位缺陷风险更高,同样赋予较高权重。通过加权计算得到缺陷综合严重程度评

分,依据评分划分缺陷严重程度等级,为后续维修决策提供依据。

4.3 损伤趋势预测与维护决策支持

基于时间序列分析构建损伤扩展模型,可预测道岔损伤未来发展趋势。收集道岔历史探伤数据,以时间为序列,分析缺陷尺寸、数量等随时间变化规律。采用自回归移动平均模型等时间序列分析方法,建立损伤扩展数学模型。通过模型拟合历史数据,预测未来一段时间内缺陷发展情况,提前发现潜在安全风险^[5]。挖掘探伤数据与维修记录关联性对优化维护策略具有重要意义。分析探伤发现缺陷与后续维修措施之间关系,确定不同类型缺陷最佳维修时机与方法。例如,对于轻微表面缺陷,可适当延长维修周期;对于严重内部缺陷,需及时安排维修。同时,结合损伤趋势预测结果,对维修计划进行动态调整,根据未来一段时间内缺陷发展情况,提前准备维修资源,确保在缺陷发展到影响道岔安全运行前进行维修,提高维修资源利用效率,保障道岔安全运行。

结束语

重载铁路道岔探伤措施研究涉及多个方面,通过对损伤机理的剖析、超声波探伤技术的优化、数据管理与分析方法的完善,构建了一套较为系统的道岔探伤体系。这一体系有助于及时发现道岔潜在损伤,为道岔的维修与养护提供科学依据,从而有效提升重载铁路道岔的安全性与可靠性,保障重载铁路运输的顺畅进行,推动重载铁路事业持续发展。

参考文献

- [1]张明华,李志强.高速铁路道岔故障诊断技术研究[J].铁道学报,2021,43(5):112-118.
- [2]曲玉福.高速可动心轨道岔伤损分析和养护维修[J].铁道技术监督,2021,49(3):51-55.
- [3]刘伟东,赵永明.铁路道岔智能监测系统应用分析[J].铁道工程学报,2023,40(2):78-84.
- [4]孙浩然.大数据驱动下的铁路基础设施智能运维体系研究[J].交通运输系统工程与信息,2022,22(4):56-63.
- [5]周海涛,吴迪.人工智能在铁路轨道维护中的应用前景与挑战[J].中国铁道科学,2023,44(1):134-142.