

数字射线检测技术（DR）在铁路客车铝焊缝检测中的应用

李德鹏¹, 陈亚明², 高忠良¹, 孙滨¹

1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062
2. 上海中车申通长客轨道交通车辆有限公司, 上海 201106

DOI: 10.61369/SSSD.2026050018

摘 要： 随着铁路交通向高速化、轻量化方向发展，铝合金材料因强度高、密度小等优势被广泛应用于铁路客车车体制造，其焊缝质量直接决定车体结构安全与使用寿命。数字射线检测技术（DR）作为一种先进的无损检测技术，凭借实时成像、高灵敏度、数字化存储等核心优势，逐渐替代传统射线检测技术成为铝焊缝检测的主流方案。基于此，本文针对DR在铁路客车铝焊缝检测中的应用展开研究，结合铁路客车铝结构焊缝的检测需求与特点，阐述DR技术的具体应用场景与实施要点，为铁路客车制造与运维中的焊缝检测提供技术参考。

关 键 词： 数字射线检测（DR）；铁路客车；铝焊缝；无损检测

Application of Digital Radiography (DR) Technology in Aluminum Weld Inspection of Railway Passenger Cars

Li Depeng¹, Chen Yaming², Gao Zhongliang¹, Sun Bin¹

1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062
2. Shanghai CRRC Shentong Changke Rail Transit Vehicle Co., Ltd., Shanghai 201106

Abstract： With the development of railway transportation towards high speed and lightweight, aluminum alloy materials are widely used in the manufacturing of railway passenger car bodies due to their advantages of high strength and low density. The quality of their welds directly determines the structural safety and service life of the car bodies. As an advanced non-destructive testing technology, Digital Radiography (DR) has gradually replaced traditional radiography technology to become the mainstream solution for aluminum weld inspection, thanks to its core advantages such as real-time imaging, high sensitivity and digital storage. Based on this, this paper conducts research on the application of DR in aluminum weld inspection of railway passenger cars. Combined with the inspection requirements and characteristics of aluminum structure welds of railway passenger cars, it elaborates on the specific application scenarios and implementation key points of DR technology, providing technical reference for weld inspection in the manufacturing, operation and maintenance of railway passenger cars.

Keywords： digital radiography (DR); railway passenger cars; aluminum welds; non-destructive testing

引言

铁路客车铝焊缝进行精准、高效的检测，是保障车体制造质量与运维安全的关键环节。传统射线检测技术（如胶片射线照相检测）曾长期应用于焊缝检测，但存在检测周期长、胶片消耗成本高、图像存储与追溯困难、缺陷识别依赖人工经验等弊端，已难以满足现代铁路客车规模化生产与高效运维的需求。DR基于数字探测器阵列（DDA）实现射线信号的实时转换与数字化处理，不仅弥补了传统技术的不足，还在检测精度、效率与智能化水平上实现了质的飞跃。因此，本文将重点探讨DR技术的技术特性、核心优势及其在铁路客车铝焊缝检测中的具体应用，具有重要意义。

一、数字射线检测技术介绍

DR技术使用的数字平板的正规名称是数字探测器阵列（Digital Detector Array），简称DDA。所谓DR技术是指：使

用探测器阵列将穿透工件的射线转换为离散模拟信号阵列，并即将这些信号阵列数字化，在传输至电脑，形成和显示出与系统输入端射线能量的区域变化相对应的数字化影像的技术。

在数字射线检测技术的核心构成要素当中，数字探测器阵列

(DDA)是影响检测性能的关键部件,其分类主要按照成像机理来划分,其中,间接转换型 DDA 把 X 射线变成可见光信号借助闪烁体,然后利用光电二极管把信号转变成电信号输出,因为制造成本比较低而且应用范围很广,受到广泛关注^[1];直接转换型 DDA 依靠半导体材料把辐射能直接转化成电荷,在空间分辨率和动态响应速度方面具有明显优势,特别适合做高精度检测任务,比如电子元件和精密机械零件的质量检测等等。依托核心技术创新成果和配套支撑平台,DR 技术已经在航空航天、石油化工、汽车制造、电力能源等众多领域实现了规模化应用^[2]。比如航空工业里,该技术的运用重点在于发动机叶片和机身结构件内部缺陷的探测,在石化行业当中,主要运用于油气输送管道以及承压设备焊缝无损探伤,以此来保障设施运转的安全性和可靠性;汽车产业中,也可用于缸体或者变速箱壳体之类的重要零部件批量检验质量。伴随技术研发逐步深入,数字射线检测技术朝着更高精度、更大覆盖范围、更低辐射剂量的方向不断发展,并且将来或许会拓展到微型器件检测乃至实时动态监测等新领域当中^[3]。

二、DR 检测技术的优势

DR 检测技术是一种由射线接收/转换装置(平板探测器)和监视器来代替传统射线照相中的胶片得到射线图像的新型无损检测技术。使用射线接收/转换装置将不可见的 X 射线转换为数字或模拟信号,经过图像处理显示在显示器上,显示的图像能提供有关材料内部缺陷性质、大小、位置等的信息,按照有关标准对检测结果进行快速的缺陷等级评定,即可达到检测的目的。

与传统检测技术相比,DR 检测技术具有四大核心优势。

一是实时成像,检测结果可即时显示,无需胶片冲洗等后续流程,大幅缩短检测周期。传统胶片射线检测要经过曝光、暗房显影、干燥、底片解读等好几道程序,耗时几小时甚至更多,根本无法满足铁路客车大规模生产对时效性的严格要求。而 DR 检测技术却能做到影像采集和数据传输高度同步,从启动到得到清晰图像,只需要几秒到几十秒,而且马上就能在显示屏上显示出来,技术人员可以立即看到结果,对缺陷特征进行分析,做出初步判断,特别在车钩座焊缝、底架牵引装置连接件焊接区以及其他重要部件的关键部位,缩短批量检验时间,这样就能有效改善作业流程,降低由于延误造成的质量隐患和经济损失风险^[4]。

二是高灵敏度与分辨率,空间分辨率可达 0.1—0.3mm,能精准识别微小裂纹与内部夹杂缺陷,满足铁路客车精密部件检测需求。铁路客车铝焊缝缺陷通常呈现为微小气孔、细裂纹(宽度多小于 0.5 毫米)及细微夹杂,这对成像系统空间分辨能力的要求较高。DR 技术由于其极高的空间分辨率(0.1 ~ 0.3 毫米),相比传统胶片法提高了一到两个数量级,且通过 12 ~ 16 位灰阶量化方法,能够将复杂结构信息呈现出来^[5]。改进后的图像处理算法可使 DR 技术准确识别直径 0.2mm 以上气孔、1mm 以上长微细裂纹,0.1mm 以上厚未熔合等铁路客车关键部件上各种重要缺陷,检测精度完全符合质量标准。

三是数字化存储与传输,检测图像可通过网络实时上传至云

端平台,便于数据追溯、远程分析与历史对比。传统胶片检测底片存在占用空间较大,易受环境因素影响造成图像退化等弊端,长期保存时有诸多弊端,而且限制了信息追溯能力;而通过实物运输完成跨区域分析效率明显低于 DR 技术生成的数字影像,其数字影像可以通过硬盘、U 盘等介质本地存储,也可以经企业内部网络或者互联网迅速上传至云端服务器,存储成本大幅缩减,数据存取灵活性得以提高^[6]。技术人员可以利用网络平台随时调阅相关资料进行远程诊断工作,而且方便历史记录对比,评判缺陷演变规律,给铁路客车维护给予精确依照,该系统可以将各要素,车辆编号、焊接位置、检验日期整合到统一数据库创建起完整的技术档案体系,方便后期质量核查和责任划分。

四是宽动态范围,可同时清晰呈现部件低对比度与高对比度区域,避免重叠结构对缺陷识别的干扰。铁路客车铝焊缝构造复杂,局部存在重叠现象(车钩座与底架连接),传统检测手段受限于较低动态范围,难以精准体现高对比区域(焊缝与基材交界面)以及低对比信息(细微裂纹),DR 技术凭借 10⁴ ~ 10⁵ 的动态范围更大优势,较普通胶片增益达 10~100 倍,可更完整吸取不同级别能量变化信息,正确识别和判定各种焊接缺陷极其细微差异,对平面焊缝或者曲面异形焊缝,DR 技术均能完成高效数据收割,而且全部铝合金焊缝检查范畴都可适用^[7]。

同时,该技术也存在设备成本较高、需严格辐射防护等特点,需通过科学配置与规范操作加以管控。尽管 DR 技术有很多优势,但其发展还是面临很大的困难。在硬件方面,需要购置一套包括射线源、高精度 DDA 探测器和智能化图像处理模块的专业铁路客车铝焊缝检测系统,这套设备的采购成本至少要比传统胶片摄影设备高 3 到 5 倍。在操作方面需要遵守放射防护规范,否则会对工作人员造成潜在的辐射风险,这就需要配备专门的屏蔽设施或者移动防辐射服以保证安全。对上述问题可采用规模化采购降低单台设备的成本压力,优化资源配置提升综合效益,并健全监管机制定期组织人员开展辐射防护教育培训,以促进该技术实现可持续发展^[8]。

三、铁路客车车体铝结构焊缝的射线检测

高铁、动车、地铁等的车体都是采用铝合金材质焊接而成,焊接质量直接影响到车体的使用安全和使用寿命。常用的铝焊接件有车钩座焊缝,底架牵引梁组成焊缝等。铝合金材质具有密度小、高强度等优势,尽管材料有很多优点,但是焊接过程中依然存在着气孔、未焊透和热裂纹这类典型缺陷难题,由于铝和铝合金对于射线的吸收系数比较低,这就使得无损检测技术的要求更高。车钩座属于连接车身与转向架构件的关键部件,在列车运行时要承受相当大的冲击负荷,其焊接质量的好坏直接影响到整辆车的安全性能;底架牵引装置中的一些重要焊缝承担着主要的承载任务,所以对其焊接质量的要求就更高,而且需要制定出更加系统化的检验程序来保障整个结构的可靠性^[9]。

DR 技术具备高分辨率和精准识别能力,它在铁路客车铝制结构焊缝探伤方面应用优势十分明显,考虑到铝合金材料特性方面

的需求,就要选取恰当的射线能量参数和探测器选择方案,并且借助先进的图像处理算法来提升缺陷成像效果。具体执行中,把平板探测器安放在待检工件表面一侧,射线源从另一侧发出辐射束穿透工件之后,会收到探测器采集到的信号数据,最后形成数字化的影像信息,以此达成无损检测的目的,经过专业人员对这些数字图像实施系统的分析评定,可以准确判断出各种潜在缺陷的具体类型、尺寸范围以及分布特点,从而全方位满足轨道交通装备制造行业的高质量检验标准。

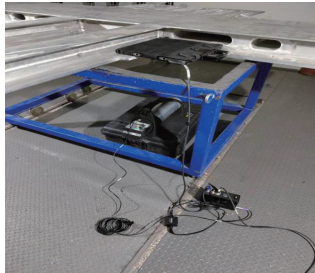
DR 技术因为实时动态扫描和数据电子化存储的突出优点,符合铁路客车制造及运营维护领域的特定要求。在生产环节里,该技术能够做到焊接过程中的在线监测,并且及时给予焊缝质量方面的信息反馈,从而给工艺参数的改进提供帮助;而在运维阶段,经由数字化归档功能创建起完备的焊缝历史数据库,方便长久以来的跟踪与对比分析,为车辆检修工作形成科学根基,保障铁路客车行车的安全与平稳^[10]。

四、检测过程

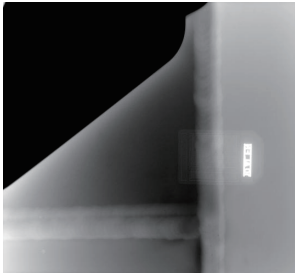
执行检测技术标准:ISO 17636.2/ISO10675-2 1级。

(一) 牵枕缓组成焊缝检测过程

使用50脉冲,对牵引梁与枕梁焊缝进行DR检测。见图1和图2。



检测示意图 1



检测结果图 2

(二) 车钩检测过程

使用曝光时间70脉冲对焊缝进行一次透照。见图3和图4。



车钩检测示意图 3



检测结果图 4

牵枕缓组成焊缝要求像指剂单丝:标准要求:W12实际:W14

(三) 在检测过程中如遇到薄厚差异较大的公称壁厚时

可采用厚度测量中的检测模式进行检测,分别对薄、厚两种厚度分别选取采集信息所需脉冲数,最后集成为一张图像,使检测结果图像更为清晰。

五、结语

DR 检测技术在铝车体焊缝结构上应用比较方便,检测效率高,于常规射线机检测,提高了现场的生产效率。未来 DR 检测技术在铁路客车上的应用将朝着“智能化、集成化、便携化”方向发展。技术层面,碳纳米管 X 射线源、柔性探测器等新型设备的研发将进一步提升成像质量与检测灵活性,高分辨率探测器与先进图像重建算法将实现微米级缺陷识别;应用层面,DR 检测系统将与轨道综合检测车、车载实时监测平台深度集成,实现客车运行状态的动态化、全覆盖检测,结合5G技术实现检测数据的实时传输与远程诊断;安全层面,智能化辐射防护技术与低剂量成像方案将不断优化,在保障检测效果的同时降低安全风险。

参考文献

- [1] 岳贤强, 马君鹏, 李夕强, 等. 基于 FPV 飞行技术的耐张线夹无人机数字射线检测技术 [J]. 无损检测, 2024, 46(12): 86-92.
- [2] 罗云鹏, 王丹丹. 数字射线检测技术给压力罐做“体检”[N]. 科技日报, 2024-09-03(005).DOI: 10.28502/n.cnki.nkjrb.2024.005598.
- [3] 赵书毅, 牛帅, 孟令民, 等. 关于低温管道在役数字射线检测技术应用的研究 [J]. 设备管理与维修, 2024, (02): 57-61.DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2024.01D.19.
- [4] 欧阳顺. 数字射线检测技术在压力管道检测中的应用研究 [J]. 设备管理与维修, 2022, (13): 32-34.DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2022.07.14.
- [5] 叶超杰, 牛桂英. 浅析管道环焊缝数字射线检测技术 [C]// 重庆铸造行业协会, 重庆市机械工程学会铸造分会. 2022 重庆市铸造年会论文集. 重庆日联科技有限公司; 2022: 368-369. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.008801.
- [6] 刘三伟, 唐勇明, 周卫华, 等. 基于数字射线检测技术的电缆接头主绝缘缺陷研究 [J]. 湖南电力, 2022, 42(02): 55-58.
- [7] 刘书宏, 汤陈怀, 王胜辉, 等. 夹套内管的不停车在线数字射线检测技术研究 [J]. 西部特种设备, 2021, 4(02): 36-39.
- [8] 唐飞阳亮, 王恒, 张立斌, 等. 相控阵超声与数字射线检测技术在锅炉水冷壁焊缝检测中的应用对比 [J]. 无损检测, 2019, 41(08): 58-61+72.
- [9] 江柏红, 于士章, 高晓进, 等. 多孔 C/SiC 复合材料数字射线检测技术研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2019, (07): 73-77.
- [10] 刘仕远, 圣兆兴, 顾彬, 等. 高铁铝合金齿轮箱数字射线检测技术研究 [J]. 铁路技术创新, 2019, (02): 5-9.DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2019.02.005.
- [11] 吕新昱, 李维, 周广言, 等. 油气管道环焊缝数字射线检测与胶片法射线检测技术对比分析 [J]. 无损检测, 2019, 41(02): 48-51.