

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.15

相控阵超声技术在转向架焊缝检测中的应用研究

靳世旭

天津市特种设备监督检验技术研究院,天津 300192

摘要: 转向架是轨道交通车辆力承载机构,其安全至关重要,焊接质量直接影响结构安全。针对转向架焊缝既有检测方式的不足,分析了转向架焊缝特点和既有检测方式工艺,提出利用相控阵超声波检测技术对转向架焊缝进行检测;对接焊缝采用PA探头单面双侧扫查,利用横波一次波与二次波覆盖检测区域;角焊缝采用双探头组合检测模式,腹板侧配置横波楔块实施扇形扫查,翼板侧采用0°楔块进行电子扫查。通过COMSOL Multiphysics软件建立焊缝多物理场有限元模型,开展声束传播特性与缺陷反射仿真分析,明确声束覆盖范围及回波信号特征。为验证技术可行性,对含自然伤损(夹渣、内部缺陷等)与人工伤损的对接焊缝、角焊缝及构架实际焊缝样件进行检测实验。结果表明:相控阵超声技术实现缺陷100%检出,所有缺陷信噪比均大于12 dB,且缺陷信号与结构干扰信号实现有效区分,检测精度与可靠性显著优于传统方法。该研究验证了相控阵超声技术在复杂焊缝检测中的技术优势,为轨道交通转向架焊缝质量管控提供了高效、精准的无损检测解决方案,对保障轨道交通运营安全具有重要工程应用价值。

关键词: 相控阵超声; 转向架焊缝; 缺陷检测; 无损检测; 焊缝缺陷

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)12-0107-09

Research on the Application of Phased Array Ultrasonic Testing Technology in Weld Inspection of Bogie Frames

JIN Shixu

Tianjin Special Equipment Supervision and Inspection Technology Research Institute, Tianjin 300192, China

Abstract: The bogie, as the force-bearing structure of rail transit vehicles, is critical to operational safety, with weld quality directly influencing structural integrity. To address limitations in existing inspection methods for bogie welds, this study systematically analyzed weld characteristics and conventional detection techniques, proposing phased array ultrasonic testing (PAUT) for defect detection: butt welds were inspected using PA probes in single-side double-side scanning mode, employing both primary and secondary transverse waves to cover the inspection zone; fillet welds adopted a dual-probe combined detection configuration, implementing sector scanning on the web side with an angled wedge generating shear waves, while electronic scanning was performed on the flange side using a 0° wedge. A multiphysics finite element model of the weld joint was established through COMSOL Multiphysics software to simulate acoustic beam propagation characteristics and defect reflection behaviors, thereby determining beam coverage areas and echo signal features. To validate technical feasibility, experimental tests were conducted on actual weld samples including butt welds and fillet welds containing natural defects (slag inclusion, internal flaws, etc.), artificial defects, and frame structures. Results demonstrated that PAUT achieved 100% defect detection rate, with all defect signals exhibiting signal-to-noise ratios exceeding 12 dB. The method effectively distinguished defect signals from structural noise interference, showing significantly improved detection accuracy and reliability compared to conventional approaches. This research validates the technical advantages of phased array ultrasonic technology in complex weld inspections, providing an efficient and precise non-destructive testing solution for quality control of rail transit bogie welds, which holds substantial engineering application value for ensuring operational safety in rail transportation.

Keywords: Phased array ultrasonic testing; bogie weld seam; defect detection; non-destructive testing; weld defects

收稿日期: 2025-08-11 修回日期: 2025-09-08

作者简介: 靳世旭(1990—), 学士, 主要从事无损检测的研究工作。E-mail: 1148482695@qq.com。

引用格式:靳世旭. 相控阵超声技术在转向架焊缝检测中的应用研究[J]. 电焊机, 2025, 55(12): 107–115.

Citation: JIN Shixu. Research on the Application of Phased Array Ultrasonic Testing Technology in Weld Inspection of Bogie Frames[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 107–115.

0 引言

在轨道交通领域,列车的安全与稳定运行至关重要。转向架作为铁道车辆的重要组成部分,起着承载、牵引、走行和制动等多重功能,是决定列车动力学性能及运行安全的核心单元^[1]。在列车长期服役过程中,转向架需持续承受复杂交变载荷的作用^[2],其焊缝部位作为结构力学薄弱环节,极易萌生疲劳裂纹、未焊透、未熔合等缺陷。此类缺陷若未能及时检出并处置,将随服役时间不断扩展,严重削弱焊缝的强度和承载能力,最终可能导致焊缝失效,引发脱轨等重大安全事故,因此对转向架焊缝实施精准、高效的缺陷检测至关重要。

目前,轨道交通领域常用的焊缝检测方法主要包括目视检测、射线检测及常规超声检测等,但这些传统技术在面对转向架构架复杂的结构和焊缝形式时,存在检测效率低、检测精度不足、对缺陷定性和定量困难等问题。射线检测虽能提供直观的缺陷图像,但存在辐射危害、检测成本高、对厚壁构件检测能力有限等缺点;常规超声检测高度依赖于操作人员的经验和技能,检测结果的准确性和可靠性难以保证,且对于复杂形状的焊缝难以实现全面检测。上述技术瓶颈导致传统检测方法难以满足现代轨道交通对转向架焊缝检测“高精度、高效率、高可靠性”的严苛需求。

相控阵技术起源于先进的相控阵雷达,海洋地貌探测和反潜的先进声纳也采用相控阵技术^[3-4],其核心优势在于通过控制阵列换能器各阵元的激励延迟,实现声束的灵活聚焦与角度偏转。该技术自诞生以来已历经 20 余年发展,初期广泛应用于医疗 B 超等领域,随后逐步拓展至工业无损检测场景^[5-6]。在轨道交通领域,德国 Krautkramer 公司与联邦材料研究测试研究所(BAM)联合研发的相控阵火车轮轴检测系统,已实现车轮车轴缺陷的高效检测^[7-9]。与传统超声检测相比,相控阵超声检测技术具有检测速度快、缺陷定量精准、声束覆盖全面及可降低

作业强度等显著优势^[10],为解决转向架复杂焊缝检测难题提供了全新技术路径。根据回波的其他特征,如波幅和波密度等,还可在一定程度上对缺陷进行定性分析^[11]。

基于此,本文针对转向架焊缝的结构特点与检测需求,开展相控阵超声检测的应用研究。通过数值仿真分析,优化检测参数与探头配置方案,并通过含自然缺陷与人工缺陷的样件实验验证技术可行性,进而提供一套精准、高效的转向架焊缝相控阵超声检测方案,提升焊缝缺陷检出率与定性定量精度,为轨道交通转向架的安全服役提供技术支撑,具有重要的工程应用价值与现实意义。

1 实验方案、设备及材料

1.1 转向架焊缝类型及结构特征

转向架构造。板材进行切割与开坡口,板材焊接为侧梁,端梁,横梁。侧梁的立板与上下底板焊接为 T 型焊接,上下底板在中心处有一处对接焊缝,端梁与横梁的立板与上下底板焊接为 T 型焊接,实物如图 1 所示。

根据焊缝类型,可将类型简化为对接焊缝和角焊缝形式,如图 2 所示。常规超声检测时需进行多次不同角度前后扫查方式检测,检测过程较为复杂,依赖于操作人员的经验和技能,检测结果的准确性和可靠性难以保证。

1.2 检测方法

利用相控阵检测技术多角度优势开展检测,利用声束覆盖声线图,在特定位置即可实现多角度声束对焊缝区域的覆盖。

(1)对接焊缝:采用 PA 探头在焊缝两侧检测。探头配置横波楔块,使用横波一次波、二次波进行检测,扫查面为单面双侧部分,坡口存在 V、X、Y 型。图 3 提供 V 型检测模型,其他对接坡口类似。

(2)角焊缝:如图 4 所示,采用两只探头进行沿线检测;其中一只腹板扫 PA 配置横波楔块,置于腹



图 1 焊接实物

Fig. 1 Welding object

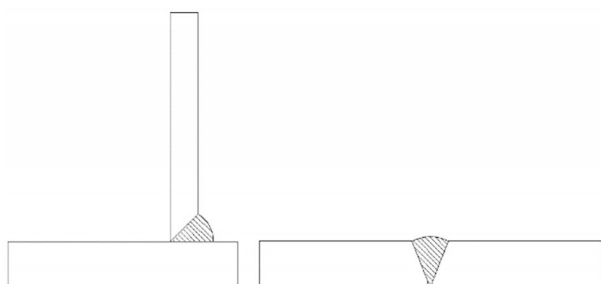


图 2 焊接形式

Fig. 2 Welding form

板侧,使用横波一次波、二次波进行检测,另一只翼板侧扫查配置 0° 楔块,置于翼板侧,使用 0° 电子扫查进行检测。

2 焊缝探头检测多物理场数值模拟

为评估相控阵超声技术在转向架构架焊缝检测中的可行性,采用COMSOL Multiphysics软件建立了焊缝多物理场有限元模型,探究声束覆盖性和回波作用强度。结合转向架焊缝的实际结构尺寸与缺陷分布特点,建立含底部预置缺陷的焊缝二维有限元模型,如图5所示。选用横波相控阵探头,因为横波检测声束以多角度入射,能有效检测垂直于

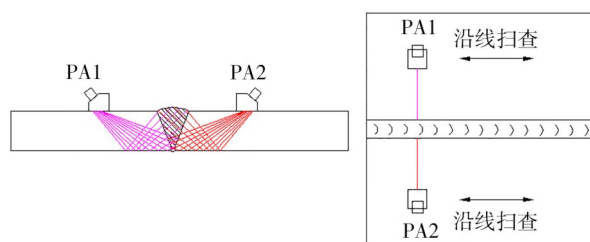


图 3 对接焊缝检测模型

Fig. 3 Butt weld detection model

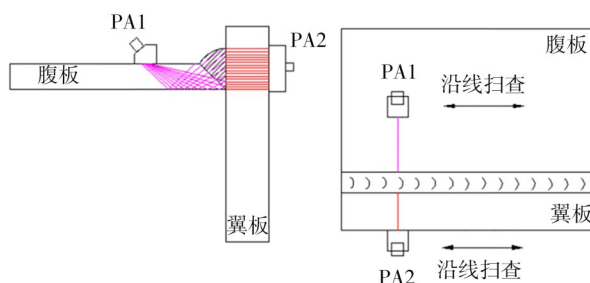


图 4 角焊缝检测模型

Fig. 4 Fillet weld detection model

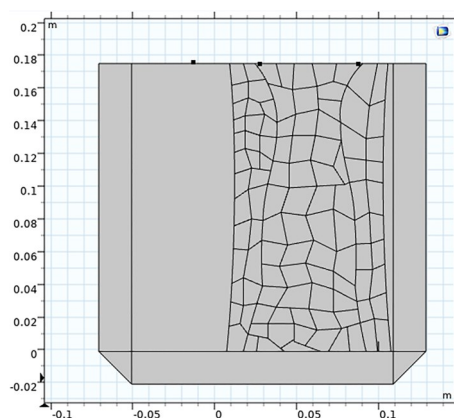


图 5 底部预置缺陷焊缝的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of weld seam

或接近垂直于检测声束面的缺陷,参考常规工业检测中2~5MHz的探头频率选择范围,初步选择5L16相控阵探头。

(1)设置物理场属性(载荷和边界条件)。焊缝是仿真超声在固体中的传播过程,其物理场选择“弹性波,时域显式”。其物理场属性设置如图6设置。

首先,在定义中选“弹性波,时域显式”模型,依次设置吸收层和一致映射边界,选中图6a蓝色的区域,再右键选择吸收层;在设置中选取图6b蓝色线,设置一致映射边界。随后对弹性波进行设置,时域显式模型设置指定速度,如图7所示。将焊缝

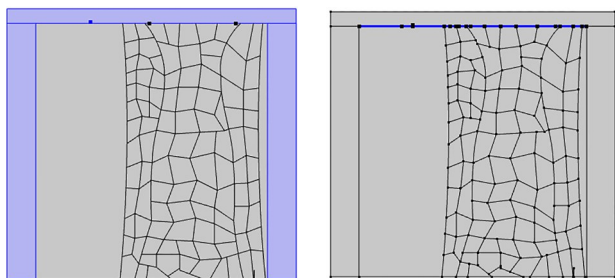


图6 焊缝物理属性设置(传出):(a)吸收层设置;(b)一致映射

Fig. 6 Weld physical property settings (outgoing)

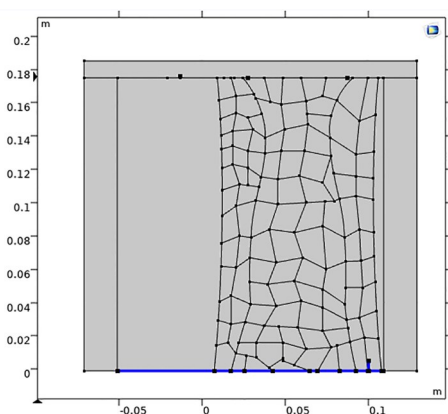


图7 焊缝激励速度设置(传出)

Fig. 7 Weld excitation speed setting (transmitted)

传入模型仿真计算结果导入焊缝传出模型,作为其激励信号的输入,选择全局坐标系,指定速度如下:

$$V_{0x} = \text{comp3. idmap3}(\text{withsol}('sol3', v3x, \text{setval}(t, t)))$$

$$V_{0y} = \text{comp3. idmap3}(\text{withsol}('sol3', v3y, \text{setval}(t, t)))$$

(2)网格划分。定制化网格。选择自由三角形网格,设置最大单元大小为声波传播波长的2/3,最小单元大小为声波传播波长的1/2,最大单元增长率为1.3,曲率因子为0.4,狭窄区域分辨率为1。网格划分如图8所示。

(3)求解。计算求解中,首先在研究中进行瞬态计算,设置时间单位为s,容差由物理场控制,设置参数,点击计算即可。

(4)后处理绘图。

超声横波在焊缝传入模型中的传播过程如图9所示。通过传播动画可以分别观察超声波在焊缝顶部,中心和底部的传播情况,入射以后波阵面变宽,向底部传播逐渐发散来覆盖检测区域。

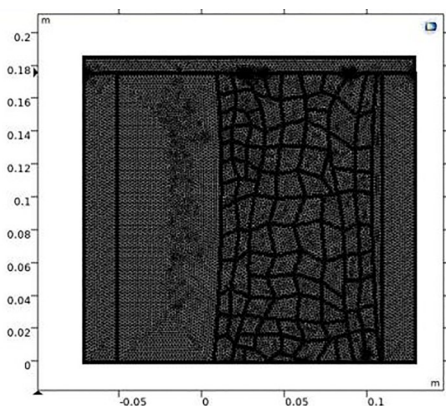
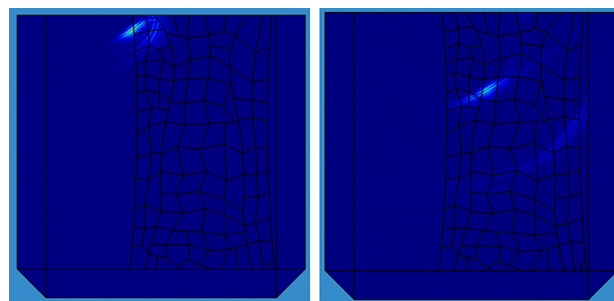


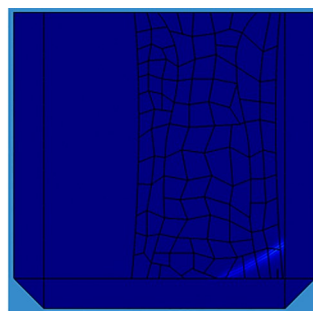
图8 焊缝网格划分图(传出)

Fig. 8 Weld grid subdivision diagram (transmitted)



(a)进入焊缝

(b)在焊缝中传播



(c)传播到伤损和焊缝底部

图9 声束声波在焊缝传入模型中不同时刻传播效果

Fig. 9 Propagation effect diagram of sound beam and sound wave at different moments in the weld seam transmission model

超声横波在焊缝传出模型中传播时,三个不同时刻声波传输情况如图10所示,声波经过缺陷或者底部反射后,发散传播范围变大,最后回传到探头,缺陷回波和底部回波在时序上错开。

为了探究超声探头接收的伤损的最高反射声压,对接收结果进行线积分得到探头声压图。如图11所示,探头接收到的第三个信号即为伤损的反射信号,其最高反射声压为12.6 Pa,其他波包均为焊缝的边界反射信号。

通过模拟仿真分析,超声在焊缝中波阵面扩散

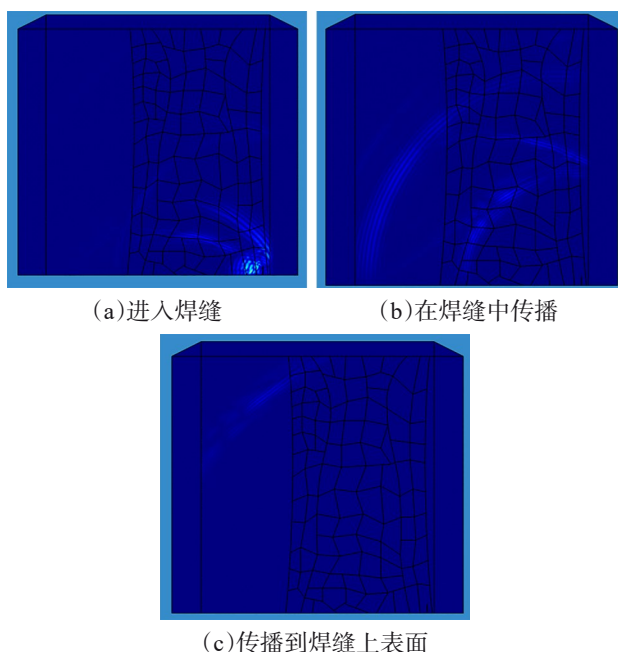


图 10 声波在焊缝传出模型中不同时刻传播效果

Fig. 10 Propagation effect diagram of sound waves at different moments in the weld seam transmission model

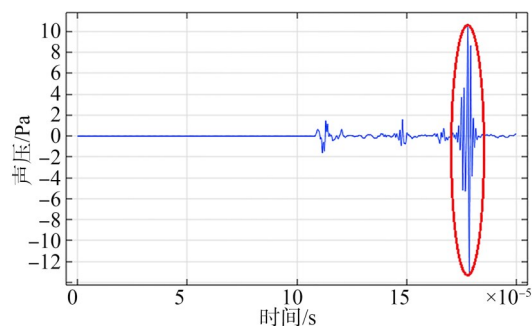


图 11 反射信号

Fig. 11 Reflected signal diagram

覆盖,缺陷波和结构波回波强度差异显著,超声技术在转向架构架焊缝检测中的可行性得到验证。

3 试验验证和结果分析

对实物试块和模拟试块进行检测分析,采用自然缺陷和人工加工缺陷来试验验证。

3.1 对接焊缝检测试验

实验采用尺寸为 400 mm×400 mm×42 mm 的 X 型坡口 (坡口宽度 40 mm) 平板对接焊缝试块,其中包含自然夹渣 (1#) 和未焊透 (2#) 两种典型缺陷。检测仪器为相控阵实验平台,检测探头为 5L16N55 S,检测方式为扇形扫查。试块实物如图 12 所示。

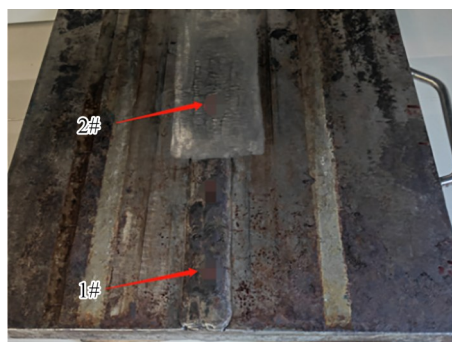


图 12 对接焊缝实物

Fig. 12 Physical image of butt weld

检测结果如图 13、图 14、表 1 所示。数据显示,预设缺陷均被检出,缺陷信噪比均大于 12 dB,表明相控阵超声波检测技术结合双侧扫查对夹渣和未焊透缺陷检出的良好检出,缺陷信号和杂波信号独立分离区分。

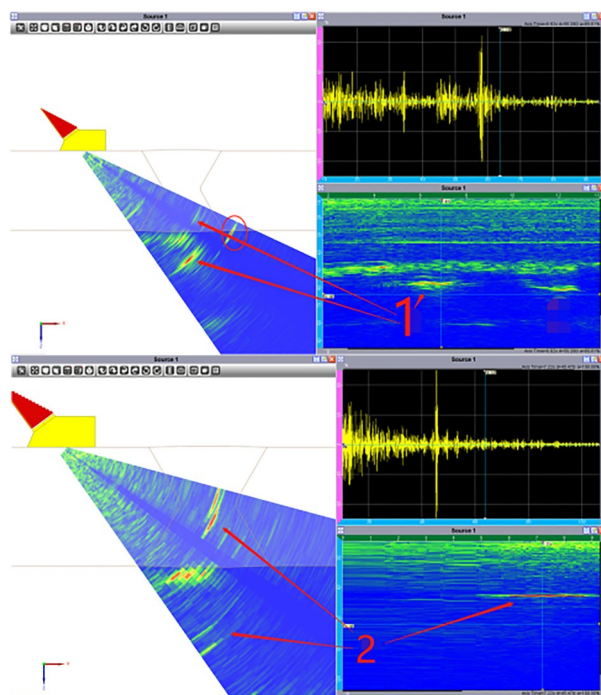


图 13 焊缝右侧检测结果

Fig. 13 Inspection results on the right side of the weld seam

3.2 角焊缝检测试验

角焊缝检测采用厚度为 20 mm 的 Y 型坡口 T 形接头试块 (坡口形式为 45°+10 mm 平台,如图 15 所示)。据第 1.2 节提出的双探头组合检测模式,实验配置如下:PA1 探头 (腹板侧)——采用 5L16 探头配置 N55S 横波楔块,置于腹板侧,进行 35°~65°扇形扫查;PA2 探头 (翼板侧)——采用 5L64 线阵探头配

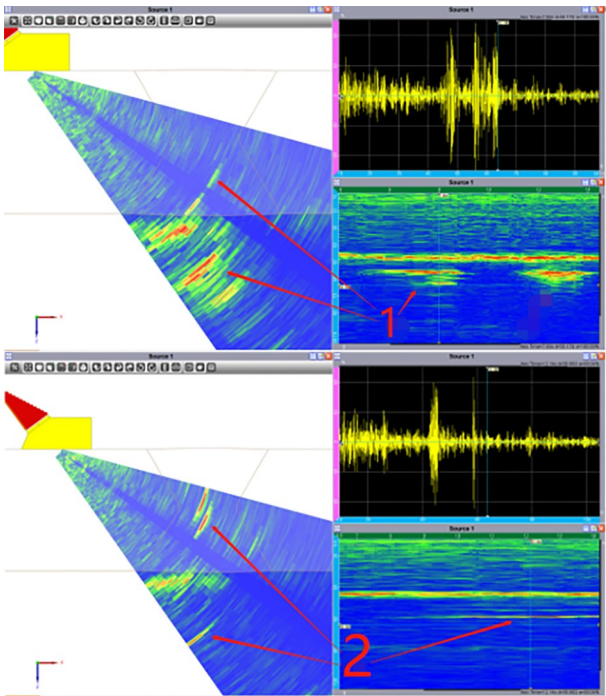


图 14 焊缝左侧检测结果

Fig. 14 Inspection results on the left side of the weld seam

表 1 对接焊缝测试

Table 1 Test Table for Butt Weld Seam									
缺陷 编号	缺陷 类型	检测 面	缺陷 幅值/%	噪声 幅值/%	信噪 比/dB	深度 /mm	一次 波	二次 波	
1#	夹渣	右	87	17	14.18	26	√	√	
		左	>100	25	>12.04	28	√	√	
2#	未焊透	右	>100	18	>14.89	21~26	√	√	
		左	89	18	13.8	20~26	√	√	

置0°楔块,置于翼板侧,进行0°线性扫查。

检测结果如表2及图16、图17所示,气孔类缺陷检出性良好,信噪比超过12 dB,缺陷信号和噪声信号均能有效识别,在存在结构影响的情况下,角焊缝腹板检测存内部钝角固定回波淹没缺陷信号,不能进行检测,也可以通过不同结构面进行检测,避免缺陷的检测失效,有力证明了相控阵检测技术的检测适应性。

3.3 构架对接焊缝测试

为评估技术在真实部件上的适用性,本实验对某型转向架构架的V形坡口对接焊缝(板厚15 mm)进行了检测。检测方式与3.1节相同,使用5L16-N55S探头进行扇形扫查。

检测结果统计如表3、图18、图19所示,构架对接焊缝中的自然内部缺陷(4#)被成功检出。

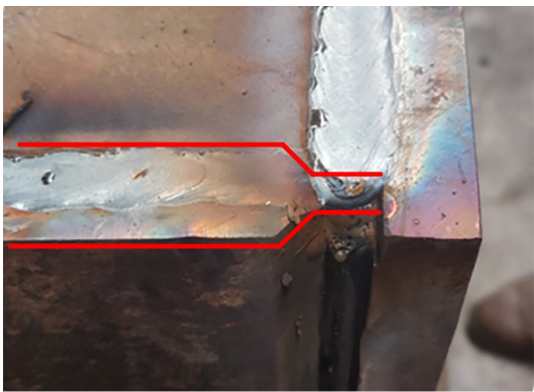


图 15 Y形坡口焊接实物与示意

Fig. 15 Physical and schematic diagram of Y-shaped groove welding

表 2 角焊缝测试

Table 2 Fillet Weld Test Form							
缺陷 编号	缺陷 类型	探头	检测 面	缺陷 幅值/%	噪声 幅值/%	信噪 比/dB	深度 /mm
3#	气孔	PA1-5L16	腹板	—	—	—	—
		PA2-5L64	翼板	73.5	17	12.71	24.91

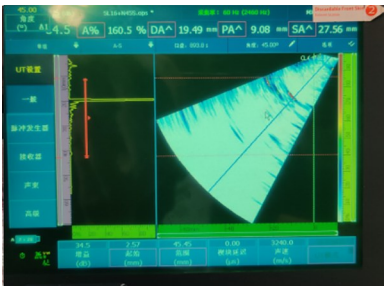
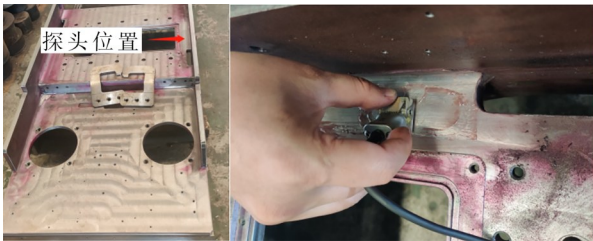


图 16 T形角焊缝腹板侧检测

Fig. 16 Side inspection of T-shaped fillet weld belly plate

缺陷信号仅通过二次波被清晰检出,上、下表面扫查的信噪比分别为14.86 dB和12.46 dB。一次

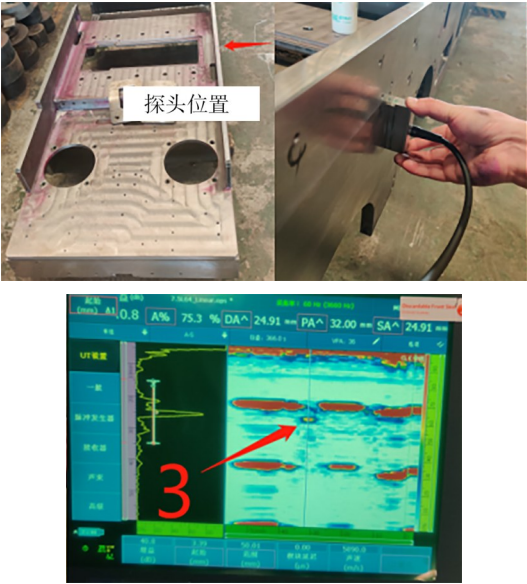


图 17 T 形角焊缝翼板侧检测

Fig. 17 Side inspection of T-shaped fillet weld wing plate

表 3 构架对接焊缝测试表

Table 3 Structural docking weld test table

缺陷 编号	缺陷 类型	检测 面	缺陷 幅值/%	噪声 幅值/%	信噪 比/dB	深度 /mm	一次 波	二次 波
4#	内部 缺陷	上	83	15	14.86	5	×	√
		下	84	20	12.46	6	×	√

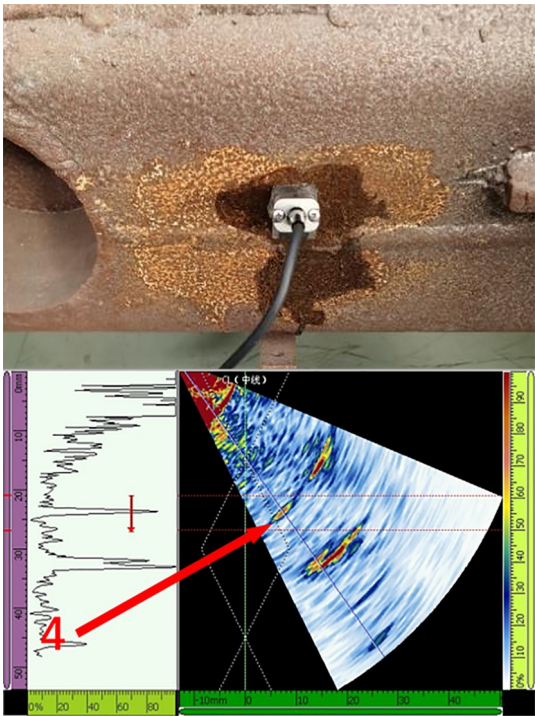


图 18 构架对接焊缝上侧检测

Fig. 18 Inspection of the upper side of the welding seam of the frame-work docking

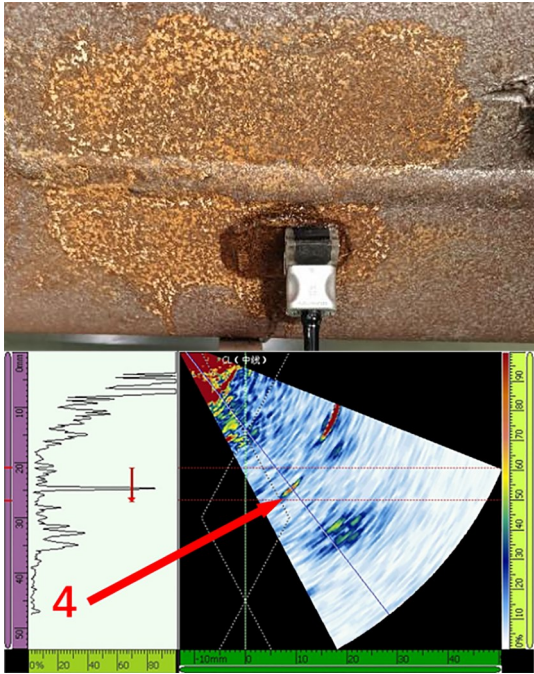


图 19 构架对接焊缝下侧检测

Fig. 19 Inspection of the underside of the welded joint in the frame-work

波未能检出缺陷,其原因是该缺陷距离检测面较浅(约5~6 mm),其反射信号落入探头的表面盲区,被初始脉冲所淹没。

3.4 构架角焊缝测试

实验对象为构架上的K形坡口T形角焊缝(板厚15 mm)。检测方式与3.2节中腹板侧检测方案一致,使用5L16-N55S探头在腹板侧进行扇形扫查。

结果如表4、图20所示,位于腹板侧深度6 mm的自然内部缺陷(5#)被成功检出,缺陷幅值82%,信噪比为12.05 dB,结构信号和缺陷信号角度差异较大,在图谱中可以有效识别缺陷信号。翼板侧探头放置位置被遮挡,存在位置局限,从翼板侧不能进行检测。

表 4 构架角焊缝测试表

Table 4 Test Table for Frame Angle Weld Seam

缺陷 编号	缺陷 类型	探头	检测 面	缺陷 幅值/%	噪声 幅值/%	信噪 比/dB	深度 /mm
5#	内部 缺陷	PA1-5L16	腹板	82	23	12.05	6
			翼板	—	—	—	—

综上,对于对接焊缝,采用5L16相控阵进行单面双侧扇扫方式,能有效检出内部缺陷,定位准确,信噪比高,技术方案成熟。对于角焊缝的检测,单

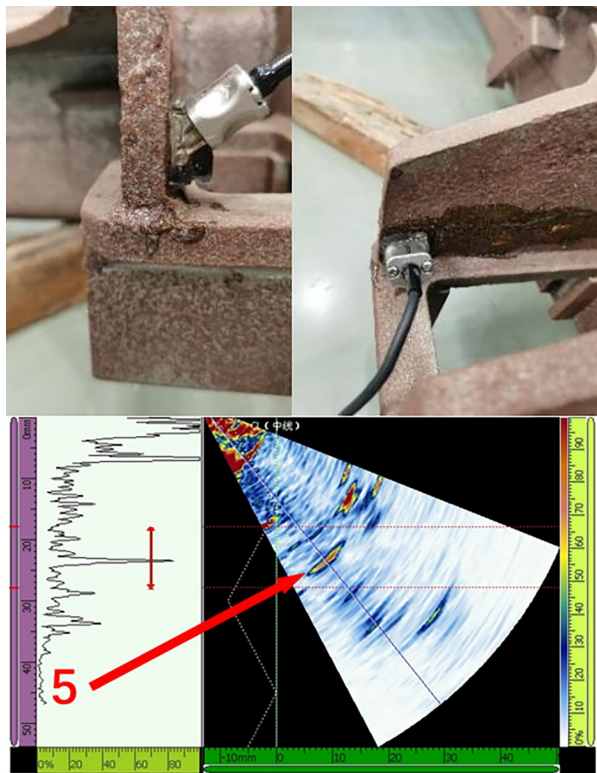


图 20 构架角焊缝腹板侧检测

Fig. 20 Inspection of the belly plate side of the frame corner weld seam
一检测方法难以应对所有情况。翼板侧 0° 线性扫查能够对整个焊缝进行检测,缺陷检测结果良好;腹板侧扇形扫查,尤其是利用二次波,则是对其重要补充;双探头组合是提高角焊缝检出率的优出方案。

4 结论

本研究探讨了相控阵超声检测技术在轨道交通构架焊缝检测中的创新运用,针对转向架构架焊缝的复杂结构和检测需求,提出了基于相控阵超声技术的检测方案。主要结论如下:

(1)针对对接焊缝,采用PA探头单面双侧扫查,利用横波一次波与二次波覆盖检测区域;针对角焊缝,采用双探头组合检测模式,腹板侧配置横波楔块实施扇形扫查,翼板侧采用 0° 楔块进行电子扫查。

(2)建立了焊缝多物理场有限元模型,仿真了声束在焊缝中的传播路径和缺陷反射信号,明确了声束覆盖范围及回波信号特征,为实际检测提供了

理论基础。

(3)对含自然伤损(夹渣、内部缺陷等)与人工伤损的对接焊缝、角焊缝及构架实际焊缝样件进行检测实验,结果表明:相控阵超声技术实现了缺陷100%检出,所有缺陷信噪比均大于12 dB,且缺陷信号与结构干扰信号实现有效区分,检测精度与可靠性优于传统方法。

(4)焊缝结构复杂且多样化,尤其是结构影响容易漏判和误判,未来的研究可进一步研究复杂结构焊缝的超声波传播特性和结构影响,丰富检测样件类型,开发更加先进的检测工艺,如自动化扫查和自动伤损识别等。通过不断的研究和创新,相控阵超声检测技术将在轨道交通构架焊缝检测中发挥更加重要的作用,为轨道交通安全运行提供更加可靠的保障。

参考文献:

- [1] 刘均. 高速货车转向架结构设计及构架强度分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
LIU J. Structural Design and Frame Strength Analysis of High-Speed Freight Truck Bogies [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [2] 袁博. 高速动车组转向架关键部件性能分析[D]. 辽宁: 大连交通大学, 2012.
YUAN B. Performance Analysis of Key Components in High-Speed EMU Bogies [D]. Liaoning: Dalian Jiaotong University, 2012.
- [3] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 7-25.
- [4] 冯诺. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 879-889.
- [5] 李云龙, 余国民, 张鸿博, 等. 自动超声相控阵技术在海洋敷管环焊缝检测中的应用[J]. 焊管, 2006, 29(5): 40-45.
LI Y L, YU G M, ZHANG H B, et al. Application of Automatic Ultrasonic Phased Array Technology in Girth Weld Testing of Offshore Pipeline Installation [J]. Welded Pipe and Tube, 2006, 29(5): 40-45.
- [6] 钟志民, 梅德松. 超声相控阵技术的发展及应用[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 69-72.
ZHONG Z M, MEI D S. Development and Application of Ultrasonic Phased Array Technology [J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(2): 69-72.
- [7] Erhard A, Bertus N, Montag H J, et al. Ultrasonic

- Phased Array System for Railroad Axle Examination [J]. Journal of Nondestructive Testing, 2003, 8(3): 1-6.
- [8] Wustenberg H, Erhard A, Bertus N, et al. Recent advances in ultrasonic inspection of railway axles and wheels [J]. Insight, 2001.
- [9] Hansen W, Hintze H. Ultrasonic testing of railway axles with phased array technique [J]. Journal of Nondestructive Testing, 2002, 7(10): 5.
- [10] 单宝华, 喻言, 欧进萍. 海洋平台结构超声相控阵检测成像技术的发展及应用 [J]. 海洋工程, 2005(02): 104-107.
- SHAN B H, YU Y, OU J P. Development and Application of Ultrasonic Phased Array Testing and Imaging Technology for Offshore Platform Structures [J]. The Ocean Engineering, 2005(02): 104-107.
- [11] 田勐. 相控阵超声波技术在构架环焊缝检测上的工艺研究 [J]. 电焊机, 2019, 49(03): 25-27.
- TIAN M. Process Research on Phased Array Ultrasonic Technology for Girth Weld Testing of Framework Joints [J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(03): 25-27.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 90 页

- num Steel Pressure Vessel [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(07): 94-96.
- [5] 和卫平, 邓晚平, 唐敏, 等. 消应力热处理对 12CrNi5MoV 锻钢组织与性能影响研究 [J]. 材料开发与应用, 2024, 39(03): 51-55.
- HE W P, DENG W P, TANG M, et al. Effect of Stress Relieving Heat Treatment On Microstructure and Properties of 12CrNi5MoV Forged Steel [J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(03): 51-55.
- [6] 范阳阳, 缪兴平, 楚成刚. 加氢反应器用 2.25Cr-1Mo-0.25V 钢焊条的研制 [J]. 电焊机, 2021, 51(01): 23-27+119.
- FAN Y Y, LIAO X P, CHU C G. Development of welding electrode of 2.25Cr-1Mo-0.25V steel used for hydrogenation reactor [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(01): 23-27+119.
- [7] 戈兆文. NB/T 47015《压力容器焊接规程》的技术基础 [J]. 中国特种设备安全, 2013, 29(01): 53-55.
- GE Z W. The technical foundation of NB/T 47015 "Welding Code for Pressure Vessels" [J]. China Special Equipment Safety, 2013, 29(01): 53-55.
- [8] 赵金凤. 浅谈铬钼钢的回火脆性及控制 [J]. 世界有色金属, 2017(22): 214-215.
- ZHAO J F. Temper brittleness and control of chromium molybdenum steel [J]. World Nonferrous Metals, 2017(22): 214-215.
- [9] 黄思懿. 钢厂高温环境下机械设备耐用性及维护技术研究 [J]. 冶金与材料, 2024, 44(11): 65-67.
- HUANG S R. Research on the Durability and Maintenance Technology of Mechanical Equipment in High-Temperature Environments in Steel Plants [J]. Metallurgy and Materials, 2024, 44(11): 65-67.
- [10] 马宏伟, 徐武德, 马芳兰, 等. Cr-Mo 钢材料韧脆转变温度曲线拟合方法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021(03): 51-54.
- MA H W, XU W D, MA F L, et al. Fitting method for ductile brittle transition temperature curve of Cr-Mo steel material [J]. Automation & Instrumentation, 2021(03): 51-54.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>