

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.19

# 超声相控阵技术在 轨道车辆转向架焊缝无损检测中的应用

田 勳, 李 核, 唱晓宇

中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062

**摘 要:** 转向架构架作为铁路客车的主承载部件, 对焊接质量提出了十分严格的要求, 其关键受力焊缝的无损检测技术也逐步提升。结合轨道车辆构架产品的结构特点, 分析和破解轨道车辆构架关键焊缝内部检测工艺难点, 对焊缝进行超声波相控阵检测并在实际检测中得到验证, 超声相控阵技术可以准确检测出该类型焊缝中存在的未熔合、未焊透等内部缺陷, 实现了轨道车辆转向架电机吊架、闸片托吊座、横梁管等关键焊缝检测的全覆盖, 做到了缺陷焊缝的早发现、早消除, 有效保障了轨道客车的行车安全。

**关键词:** 转向架; 相控阵超声波; 焊缝; 缺陷; 无损检测

中图分类号: TG441.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0129-06

## Application of Ultrasonic Phased Array Technology in Weld Detection of Rail Vehicle Bogie

TIAN Meng, LI He, CHANG Xiaoyu

CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China

**Abstract:** As the main load-bearing component of railway passenger trains, the bogie frame has put forward quite strict requirements for welding quality, and the non-destructive testing technology of its key stress welds has gradually improved. Based on the structural characteristics of railway vehicle frame products, the internal inspection process difficulties of key welds in railway vehicle frames were analyzed and solved. Ultrasonic phased array inspection was carried out on the welds, which was verified in practical testing. Ultrasonic phased array technology can accurately detect various internal defects in this type of weld seam, achieving full coverage inspection of key welds on the motor suspension bracket and brake pad support suspension seat of rail vehicle bogies, realizing early detection and elimination of defective welds, and effectively ensuring the safety of rail vehicle operation.

**Keywords:** bogie; phased array ultrasonic; weld seam; defect; nondestructive testing

**引用格式:** 田勳, 李核, 唱晓宇. 超声相控阵技术在轨道车辆转向架焊缝无损检测中的应用[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 129-134.

**Citation:** TIAN Meng, LI He, CHANG Xiaoyu. Application of Ultrasonic Phased Array Technology in Weld Detection of Rail Vehicle Bogie[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 129-134.

## 0 引言

铁路客车的安全运营是轨道交通行业的中中之重, 过去几年里, 中国铁路尤其是高铁呈现出快速发展的态势。与此同时, 转向架构架作为铁路客

车主承载部件, 其关键受力焊缝的无损检测技术也逐步提升, 焊接缺陷直接影响焊接接头的质量。如果焊接接头存在某种缺陷, 就可能在焊接应力和工作应力或其他环境条件的联合作用下逐渐扩展, 深入到母材并最终导致整个结构的提前失效或破断,

收稿日期: 2024-01-09 修回日期: 2024-02-19

作者简介: 田 勳(1972—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事焊缝无损检测的研究。E-mail: 1325832855@qq.com。

严重的危险性缺陷甚至会导致灾难性的事故。超声相控阵技术以多晶片线阵元探头为主<sup>[1-3]</sup>,通过对阵列式换能器发射脉冲相位控制实现平面波斜入射、声波聚焦、聚焦斜入射等目的<sup>[4-7]</sup>。由于压电复合材料、纳秒级脉冲信号可控制、数据处理分析、软件技术和计算机模拟等高新技术在超声相控阵成像领域中的综合应用<sup>[8-10]</sup>,使得超声相控阵检测技术逐渐应用于轨道车辆转向架关键焊缝无损检测领域,主要用于转向架电机吊架、闸片托吊座、横梁管等焊缝,解决了常规超声波无法探伤的难题,确保焊缝质量。超声相控阵检测技术在轨道车辆铝合金车体搅拌摩擦焊质量检测中也有广泛应用。

## 1 试验材料、设备及方法

### 1.1 轨道车辆转向架关键焊缝

如图1所示,转向架电机吊架筋板与下盖板连接焊缝为插接角接焊缝,板材厚度8 mm,坡口角度45°,采用2层2道平焊,如图2所示,焊缝接头形式为HV型。该焊缝如果内部存在未熔合及未焊透缺陷在一定条件下可能成为脆性断裂引发点,会降低该处疲劳寿命,危及行车安全。由于结构限制该焊缝无法进行射线检测,而采用常规超声波技术端部距离短无法全面覆盖该焊缝,因此采用超声相控阵技术对该焊缝检测,保证焊缝内部质量。

如图3、图4所示,转向架闸片托吊座材质为S355J2+N,执行标准为EN10025-2,闸片托吊座焊接到构架侧梁上,上部与侧梁上盖钢板焊接,该焊缝为HV型对接焊缝、板材厚度14 mm、立板为侧梁上盖板板材厚度方向断面,HV型坡口,采用4层4道平焊,闸片托吊座与侧梁上盖板连接焊缝区域存在未熔合及未焊透缺陷,在一定条件下可能成为脆性断裂引发点,危及行车安全,焊缝需要进行内部探伤检测保证焊接质量。而采用常规超声波技术无法全面覆盖该焊缝且极易造成误判,因此采用超声相控阵技术进行检测。

如图5所示,转向架构架环焊缝位置在横梁钢管和侧梁对接位置,横梁管一端内壁机加工,插入侧梁的横梁座中,图6是转向架构架环焊缝接头。该焊缝为关键焊缝,焊接难度大,其焊接质量关系

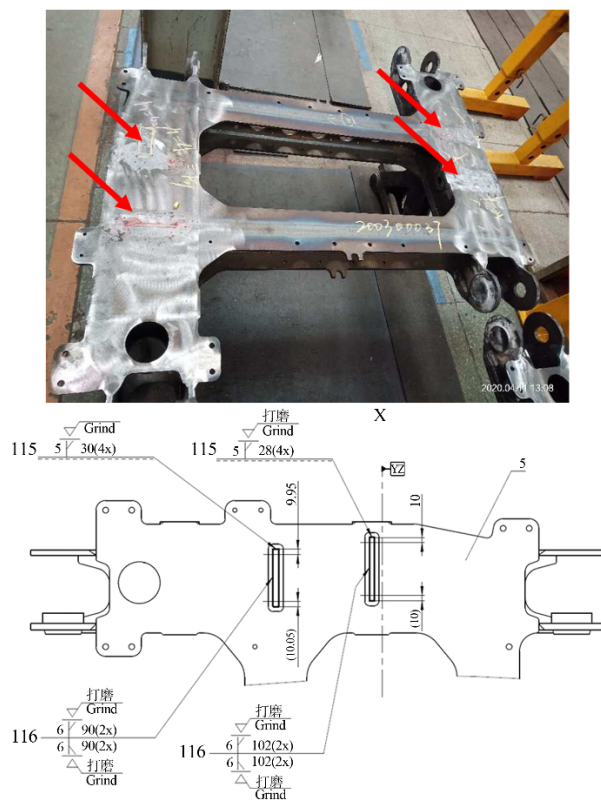


图1 转向架电机吊架焊缝位置

Fig. 1 Location of the weld on the bogie motor bracket

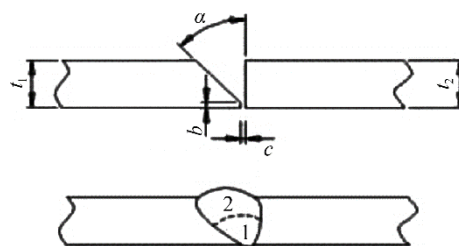


图2 转向架电机吊架焊缝接头

Fig. 2 Diagram of the weld joint on the bogie motor bracket



图3 转向架闸片托吊座焊缝位置

Fig. 3 Location of the weld on the bogie brake pad support bracket

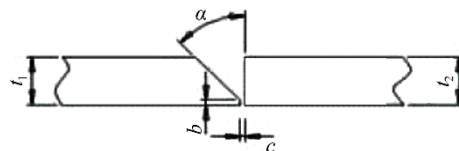


图4 转向架闸片托吊座焊缝接头

Fig. 4 Simplified diagram of the weld joint on the bogie brake pad support bracket

到铁路客车的行车安全。由于曲面影响超声波入射路径,且常规超声波技术单一角度探头无法完全覆盖焊缝,因此采用超声相控阵技术进行检测。



图5 转向架构架环焊缝位置

Fig. 5 Weld position of bogie frame ring

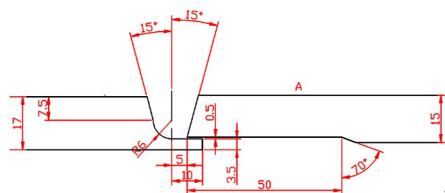


图6 转向架构架环焊缝接头

Fig. 6 Welded joint of bogie frame ring

## 1.2 试验设备

采用ISONIC 3510型便携式相控阵超声波检测仪器,如图7所示,该系统具有32个检测通道,检测结果显示为模拟图像,可以显示缺陷位置,减少误判。闸门的位置、宽度及高度任意可调,检测结果以A扫描、B扫描及C扫描显示,以及三维立体形式显示。



图7 超声波相控阵检测仪

Fig. 7 Ultrasonic phased array testing instrument

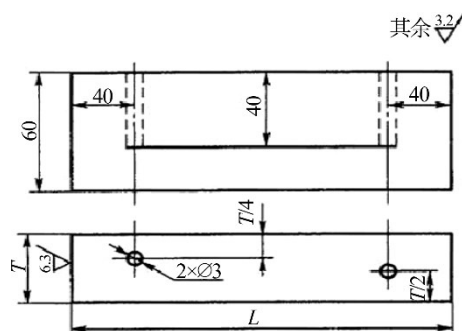
## 1.3 试验方法

(1)检测系统采用一个5 MHz、32晶片的线形相控阵探头。使用扇形扫描方式进行检测,扇形角度范围为35°~75°。

(2)相控阵探头型号 104379W36。探头楔块表

面形状与被检工件表面曲率相匹配。

(3)校准试块采用CSK-IA试块,并且制作了参考试块用于制作距离-波幅曲线,参考试块见图8。



(注: L—试块长度,由使用的声程确定。尺寸的误差不大于±0.05mm)

图8 超声波相控阵检测参考试块

Fig. 8 Reference test block for ultrasonic phased array testing

(4)检测工艺:①清理扫查区母材,确保其表面无锈蚀、氧化皮、油污及其他外部杂质;②耦合剂选用纤维素;③根据图纸输入焊缝信息,编制焊缝仿真图,确保焊缝全面扫查;④分别在参考试块上反射体的位置选择1/4T、1/2T的位置,制作完成距离-波幅曲线;⑤将相控阵探头放在CSK-IA试块上,找到R100的圆弧面上的最大反射波,将其调整到满幅度的80%,然后从35°依次修正到75°;⑥采用相控阵探头距焊缝边缘一定距离沿焊缝方向做平行于焊缝的线形扫查方式,扫查速度小于100 mm/s。

(5)检测标准。

超声波检测标准ISO17640规定了超声波检测的人员要求、检测技术、检测等级和评估。转向架焊缝缺陷超声波验收标准按照ISO11666(见表1)2级执行,即技术1(横孔)验收等级2执行。检验标准:ISO17640焊缝的无损检测—焊缝接头的超声波检测。评定标准:ISO11666焊缝的无损检测—焊缝接头超声检测验收等级。

## 2 结果与讨论

### 2.1 转向架电机吊架筋板与下盖板连接焊缝超声波相控阵检测分析

转向架电机吊架筋板与下盖板连接焊缝焊缝经超声波相控阵检测结果与位置如图9所示。在显示图中,除根部回波外,还存在部分区域二次回波

表 1 技术 1、2、3、4 的验收等级 2 和验收等级 3

Table 1 Acceptance levels 2 and 3 for technologies 1, 2, 3, and 4

| 技术(根据<br>ISO17640) | 评定等级                             |                                  | 验收等级 2(AL2)                                                    |                                                                                                             | 验收等级 3(AL3)                                        |                                                                                                             |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    | 验收等级 2                           | 验收等级 3                           | 8 mm≤t<15 mm                                                   | 15 mm≤t<100 mm                                                                                              | 8 mm≤t<15 mm                                       | 15 mm≤t<100 mm                                                                                              |
| 1(横孔)              | $H_0-14\text{dB}$                | $H_0-10\text{dB}$                | $l \leq t$ 时: $H_0-4\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-10\text{dB}$ | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0-6\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-10\text{dB}$             | $l \leq t$ 时: $H_0$<br>$l > t$ 时: $H_0-6\text{dB}$ | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0+4\text{dB}$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0-2\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-6\text{dB}$   |
| 2(平底孔)             | $H_0-8\text{dB}$<br>按表 D.3 或 D.4 | $H_0-4\text{dB}$<br>按表 D.3 或 D.4 | $l \leq t$ 时: $H_0+2\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-4\text{dB}$  | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0+6\text{dB}$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0$<br>$l > t$ 时: $H_0-4\text{dB}$              | $l \leq t$ 时: $H_0+6\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0$ | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0+10\text{dB}$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0+4\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0$             |
| 3(矩形槽)             | $H_0-14\text{dB}$                | $H_0-10\text{dB}$                | $l \leq t$ 时: $H_0-4\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-10\text{dB}$ | —                                                                                                           | $l \leq t$ 时: $H_0$<br>$l > t$ 时: $H_0-6\text{dB}$ | —                                                                                                           |
| 4(串列技术)            | $H_0-22\text{dB}$                | $H_0-18\text{dB}$                | —                                                              | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0-8\text{dB}$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0-14\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-18\text{dB}$ | —                                                  | $l \leq 0.5t$ 时: $H_0-4\text{dB}$<br>$0.5t < l \leq t$ 时: $H_0-10\text{dB}$<br>$l > t$ 时: $H_0-14\text{dB}$ |

注:记录等级=相应验收等级-4dB,  $H_0$ =参考等级。

异常,这些区域的 A 超显示波幅已超出判废线,在表面以下深度 3.8 mm 处存在反射波,此时探头前端距立板水平距离为 3.2 mm,可判断此缺陷处于在焊缝区域内。经剖磨验证为焊缝坡口未熔合危害性缺陷,见图 10。按改进措施焊缝修补后复探合格,见图 11。

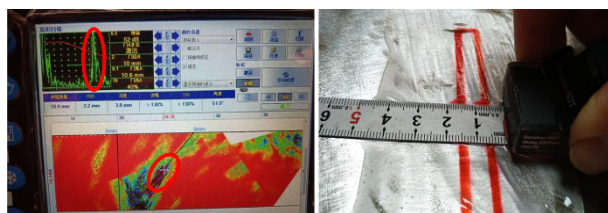


图 9 超声相控阵检测结果与位置

Fig. 9 Ultrasonic phased array detection results and positions



图 10 焊缝剖磨后缺陷照片

Fig. 10 Photos of defects after weld seam grinding

分析原因:未熔合缺陷一般是因为焊接热输入太低、电弧发生偏吹、操作不当、坡口侧壁有锈蚀或污物、焊层间清理不彻底等。此电机吊架焊缝的接头形式为 HV 型,其缺陷产生与操作者操作不当有直接关系。

改进措施:该焊缝焊接时横向应保证焊枪角度处于坡口两侧的角平分线上,约为  $22.5^\circ$ ,并指向焊

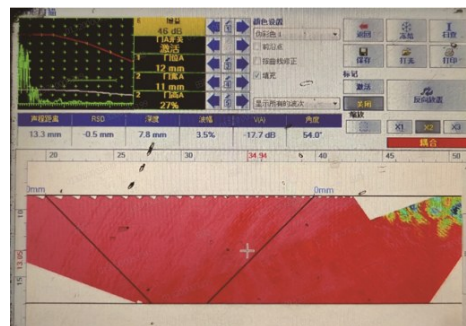


图 11 焊缝修补后复探合格

Fig. 11 Retest qualified after weld repair

缝根部,若枪角度或指向存在偏移,会造成另外一侧侧壁未熔合,焊枪纵向应前倾约  $20^\circ$  左右。此外应严格控制焊道每层的厚度,避免单层焊道过厚。

## 2.2 转向架闸片托吊座与侧梁上盖板连接焊缝超声波相控阵检测分析

转向架闸片托吊座与侧梁上盖板连接焊缝超声波相控阵检测结果与位置如图 12 所示。除根部回波以及固有结构回波外,还存在部分区域一次波异常,这些区域的 A 超显示波幅已超出判废线,在表面以下深度 11.2 mm 处存在反射波,此时探头前端距立板水平距离为 15 mm、长度 10 mm,可判断此缺陷处于在焊缝区域内靠近侧梁上盖板一侧。根据 ISO1166 验收等级 2 级标准要求不合格。焊缝经剖磨验证为坡口未熔合危害性缺陷,见图 13。按改进措施焊缝修补后复探合格,见图 14。

原因分析:侧壁未熔合缺陷一般是因为焊接热输入太低、电弧发生偏吹、操作不当、坡口侧壁有锈

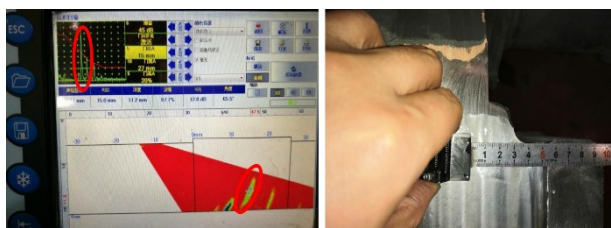


图12 超声相控阵检测结果与位置

Fig. 12 Ultrasonic phased array detection results and positions



图13 焊缝打磨后缺陷照片

Fig. 13 Photo of defects after weld seam grinding

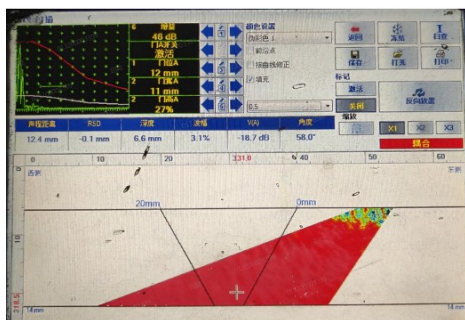


图14 焊缝修补后复探合格

Fig. 14 Retest qualified after weld repair

蚀或污物、焊层间清理不彻底等,与能量未能充分覆盖坡口区域有关。在焊接过程中由于操作原因导致焊枪角度或指向变化,导致单侧坡口受热不足而出现上述缺陷。特别是摆动填充时,若侧壁停留时间不足也会产生未熔合缺陷。该坡口为HV型,坡口角度小,母材厚,焊枪角度稍有偏差将导致电弧热量难以均匀分布在焊缝根部及两侧壁,进而导致根部未熔合。

改进措施:严格按工艺要求执行,提高操作者质量意识。注意摆动时在闸片托吊座侧坡口的停留时间相对增加,保证电弧能量充分加热待焊坡口区域。注意道间坡口及边缘范围的清理;除了正确选择焊接参数外,还要注意控制焊枪高度避免干伸长过长;提高操作者操作技能。

### 2.3 转向架构架环焊缝超声波相控阵检测分析

如图15所示,受工件结构限制检测空间有限,

仅能从横梁管侧单面进行检测,横梁管曲面会影响超声波入射路径,常规超声检测需要采用不同角度的探头进行多次检测,采用相控阵技术中的扇形扫描检测该焊缝,一次扫描即可检测整个焊接接头,图16是超声相控阵发现缺陷的三维视图,图17是对焊缝打磨发现焊接裂纹缺陷,按改进措施焊缝修补后复探合格。

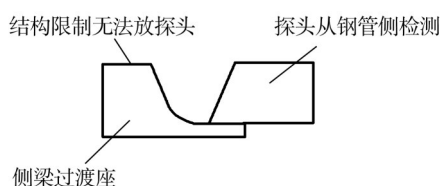


图15 探头检测位置

Fig. 15 Probe detection position



图16 超声相控阵检测三维视图

Fig. 16 Three dimensional view of ultrasonic phased array detection



图17 焊缝打磨后缺陷照片

Fig. 17 Photo of defects after weld seam grinding

原因分析:因结构原因焊道弯曲,焊接操作有一定焊接难度,其产生缺陷的主要原因与操作者操作不当有直接关系。

改进措施:焊接时确保焊缝均匀受热,严格执行工艺要求的焊接参数,焊接弯道时保证焊枪指向与角度,特别是坡道位置,注意熔池受力变化,相应的调整焊枪倾角使之匹配,另外进一步提高操作者操作技能和质量意识。

### 3 结语

轨道车辆转向架构架作为铁路客车主承载部件,对焊接质量提出了相当严格的要求,其关键受力焊缝的无损检测技术也逐步提升。针对轨道车辆转向架电机吊架、闸片托吊座、构架环焊缝等关键焊缝复杂结构,分析了产品结构特点,采用超声相控阵技术,通过实际检测中的验证结果可以得出,超声相控阵技术可以准确检测出该类型焊缝中存在的各类内部缺陷,实现了轨道车辆转向架电机吊架和闸片托吊座关键焊缝检测的全覆盖,实现了缺陷焊缝的早发现、早消除,有效保障了轨道客车的行车安全。目前全聚焦超声相控阵检测技术已经逐渐进入轨道交通领域,后续针对轨道车辆零部件全聚焦超声相控阵技术应用进行进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 林彤,姚欣. 管板与筒体接头相控阵超声检测技术应用[J]. 无损检测, 2018, 40(12):31-36.  
LIN T, YAO X. Application of Phased Array Ultrasonic Detection Technology for Tube Sheet and Tube Joint [J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(12):31-36.
- [2] 原可义,吴开磊,杨齐,等. 相控阵超声检测中的近场和远场选择[J]. 无损检测, 2019, 41(3):1-5.  
YUAN K Y, WU K L, YANG Q, et al. Near Field and Far Field Selection in Phased Array Ultrasonic Testing [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(3):1-5.
- [3] 王丽萍,田勤,蔡瑞明,等. 超声相控阵技术在高速动车组转向架焊缝检测中的应用[J]. 电焊机, 2020, 50(3):80-85.  
WANG L P, TIAN M, CAI D M, et al. Application of phased array ultrasonic technology in weld detection of high-speed bullet train bogie[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3):80-85.
- [4] 沈建民,张子健,许波,等. 基于几种常用超声方法的承压设备对接焊缝检测比对[J]. 电焊机, 2021, 51(6): 75-80+91.  
SHEN J M, ZHANG Z J, XU B, et al. Comparison of butt weld detection of pressure equipment based on several common acoustic methods [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(6): 75-80+91.
- [5] 康新刚. 超声相控阵对小径管焊缝检测研究[J]. 科学管理, 2020(11): 280-281.  
KANG X G. Study of Ultrasonic Phased Array for Detection of Small Diameter Welding Pipes [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020(11): 280-281.
- [6] 孟永乐. 超声相控阵对小径管焊缝检测研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(3): 633-636.  
MENG Y L. Study of Ultrasonic Phased Array for Detection of Small Diameter Welding Pipes [J]. Foundry Technology, 2018, 39(3): 633-636.
- [7] 沙正骁,梁青,李彦. 基于超声环阵相控阵的变孔径聚焦检测技术[J]. 失效分析与预防, 2019, 14(2): 84-89+95.  
SHA Z X, LIANG Q, LI Y. Vari-aperture Focusing Inspection Technique Based on Ultrasonic Annular Phased Array [J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(2): 84-89+95.
- [8] 杨晶,杨康东,张文泽. 小径管对接焊接接头的相控阵超声检测[J]. 无损检测, 2019, 41(3): 58-60.  
YANG J, YANG K D, ZHANG W Z. Phased Array Ultrasonic Testing of Small Diameter Pipe Butt Welded Joints [J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(3):58-60.
- [9] 吴永毅,杨军,赵亚宇. 超声相控阵检测钢混组合结构界面饱满度研究[J]. 广州建筑, 2023, 51(4): 5-8.  
WU Y Y, YANG J, ZHANG Y Y. Research on the Detection of Interface Fullness of Steel-Concrete Composite Structure by Ultrasonic Phased Array [J]. Guangzhou Architecture, 2023, 51(4): 5-8.
- [10] 吕明轩,张斌,周超. 螺旋焊缝超声波相控阵检测系统参数调试[J]. 焊管, 2023, 46(1):37-41.  
LV M X, ZHANG B, ZHOU C. Research on Parameters of Spiral Welds Phased Array Ultrasonic Automatic Flaw Detection Equipment [J]. Welded Pipe and Tube, 2023, 46(1): 37-41.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>