

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306100

基于柔性阵列探头的铸铝金具相控阵超声检测技术研究

何成¹, 王宗江¹, 夏玉秀², 张义凤², 丁杰², 薛峰², 蒋建生²

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;
2. 上海材料研究所有限公司上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

[摘要] 针对铸铝金具结构的复杂化, 传统无损检测技术已不能满足不规则形状铸铝金具现场快速检测的需求, 提出一种基于柔性阵列探头的相控阵超声检测方法。首先给出用于柔性阵列探头的相控阵超声动态聚焦算法, 分析 CIVA 无损仿真平台的基础仿真实论; 其次基于 CIVA 无损仿真平台验证动态聚焦算法实现声束的偏转与聚焦, 并通过仿真对柔性相控阵超声探头进行参数优化; 最后通过对典型铸铝金具进行检测, 验证方法的有效性和可行性。结果表明, 对于不规则形状的铸铝金具, 基于柔性阵列探头的相控阵超声检测可满足其出厂检测和现场在役快速检测的需求。

[关键词] 铸铝金具; 蜂窝状缺陷; 相控阵超声; 柔性阵列探头

[引用本文格式] 何成, 王宗江, 夏玉秀, 等. 基于柔性阵列探头的铸铝金具相控阵超声检测技术研究[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 53-62. HE Cheng, WANG Zongjiang, XIA Yuxiu, et al. Research on phased array ultrasonic testing technology of cast aluminum fittings based on flexible array probes[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 53-62.

Research on phased array ultrasonic testing technology of cast aluminum fittings based on flexible array probes

HE Cheng¹, WANG Zongjiang¹, XIA Yuxiu², ZHANG Yifeng², DING Jie²,
XUE Feng², JIANG Jiansheng²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation, Shanghai Research Institute of Materials Co., Ltd., Shanghai 200437, China)

Abstract: The growing complexity observed in the structures of cast aluminum fittings has posed significant challenges to conventional non-destructive testing techniques, rendering them inadequate in fulfilling the requirements for swift on-site inspection of irregularly shaped cast aluminum fittings. Consequently, an ultrasonic testing method based on flexible phased array probes was proposed. Firstly, a dynamic focusing algorithm for flexible phased array ultrasonic probes was introduced, and the basic simulation theory of CIVA multi-technique software platform was analyzed. Then, the dynamic focusing algorithm used to achieve deflection and focusing of ultrasonic beam was verified by simulation with CIVA, and the parameters of the flexible phased array ultrasonic probes were optimized through simulation. Finally, the effectiveness and feasibility of the testing method were verified through the inspection of typical cast aluminum fittings. The results show that phased array ultrasonic testing technology based on flexible array probes can meet the requirements of outgoing quality control and on-site rapid inspection of cast aluminum fittings with irregular shape.

Key words: cast aluminum fittings; honeycomb defects; phased array ultrasound; flexible array probes

电力金具可连接和组合电力系统中的各类装置, 起到连接、支撑和保护的作用^[1]。铸造铝合金

金具在加工制造过程中易产生内部蜂窝状缺陷, 而在使用中造成失效断裂事故。随着金具种类和结

收稿日期: 2023-06-16

基金项目: 国网新疆电力有限公司电力科学研究院科学技术项目 (SGXJDK00DYJS2100102)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute (SGXJDK00DYJS2100102)

第一作者简介: 何成 (1971), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统无损检测技术, xjdkyh@163.com.

构的复杂化,传统超声检测方法在不规则形状的金具耦合效果差,会造成信号衰减及变形,难以准确检出缺陷。相控阵超声检测技术通过控制多阵元的不同发射延时实现声束的动态聚焦与偏转,在同一位置对不同检测区域进行多角度扫描及成像,但常规刚性相控阵超声探头仍面临不规则形状表面所带来的耦合困难问题。

为解决不规则工件表面耦合问题,刚性相控阵超声探头可与定制楔块组合,但无法满足多种类型的应用需求;还可与柔性楔块或水囊相结合,向水囊中注入水作为内部耦合剂,通过硅橡胶薄膜实现接触耦合,在复合绝缘子^[2]、高压电缆终端铅封^[3]等方面均有研究,但声波在多层介质传播产生较多衰减;除刚性相控阵超声探头外,法国原子能委员会(CEA)提出柔性相控阵概念,并经过大量研究和试验研发出一系列柔性相控阵超声探头^[4-7]。

柔性相控阵超声探头的各个阵元能够贴合不规则形状的表面,可有效避免因表面不规则而引起的声束畸变、弯曲、检测灵敏度下降等现象,但柔性相控阵超声探头仍存在由于阻尼片较薄,探头的频带窄,尤其在检测凹面时,出现旁瓣增加,表面盲区较大的问题^[8-9]。目前柔性相控阵超声探头在航空发动机叶片^[10]、工业管道焊缝缺陷检测^[11-12]、航空复材构件R区检测^[13]等方面已有较多应用研究。本文基于柔性相控阵超声探头的柔性贴合优势对铸铝金具疏松等蜂窝状缺陷开展检测研究,通过CIVA仿真平台验证相控阵聚焦法则、检测工艺与探头参数,并在铸铝金具上进行试验验证。

1 相控阵超声聚焦理论

1.1 复杂曲面的相控阵超声检测

相控阵超声检测采用多个阵元组合,通过控制每个阵元按照聚焦法则进行延时激励,调整激励顺序与延时时间,根据惠更斯原理实现超声波的聚焦、平移及偏转^[14-15]。柔性相控阵超声探头通常使用柔性保护膜包裹探头阵元,以适应不规则表面和弯曲部位,实现更好的耦合效果,减少衰减。

采用柔性相控阵超声检测不规则表面金具时,根据复杂曲面的形状将其分为所有阵元都在凹面检测、凹面与凸面均有阵元检测、所有阵元都在凸面检测3种类型^[16]。

图1为一个具有凹面与凸面的复杂曲面构件,其中 O_1 、 O_2 分别为构件凹面和凸面的圆心,凹面半径 R_1 ,凸面半径 R_2 。假设将带有 n 个阵元的柔性相控阵探头放置在工件上,从左到右依次排序 $1-n$, a 为每次激发阵元组开始的阵元序列号, A 为起始阵元位置, x 为第 X 个阵元的序列号, e 为最后一个扫描阵元的序列号, E 为最后1个扫描阵元位置, F 为聚焦点位置, α 为激励阵元组扫描的偏转角, l_{BF} 为聚焦深度, M 为每次激励的阵列孔径, d 为阵元芯距, G 为凹面与凸面的交点位置, g 为 G 点左边紧邻阵元的序列号, l_{FX} 为各阵元到聚焦点的距离, c 为超声纵波在试件中的传播速度,延迟时间计算公式^[17]为:

$$t = \frac{\max(l_{FX}) - l_{FX}}{c} \quad (1)$$

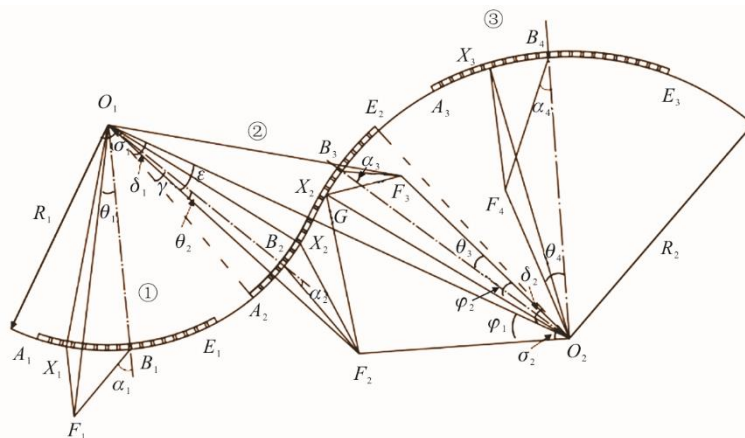


图1 柔性相控阵超声探头各阵元延时计算原理

Fig.1 Principle of delay calculation for each element of flexible phased array ultrasonic probes

为获得柔性相控阵超声探头的聚焦法则,只需要计算不同情况下每个阵元辐射声场的传播路径

l_{FX} 即可。

目前柔性相控阵超声探头在凹面区域①与凸

面区域③(图 1)的聚焦理论已有较多学者研究,为 2 种场景的应用提供理论指导^[18-20],本文重点分析柔性相控阵超声探头同时分布在凹面与凸面的聚焦理论。

1.2 凹凸结合面检测

当凹面与凸面均有阵元扫描时(图 1 区域②), B_2 为激励阵元组在凹面阵元列的中心位置, B_3 为激励阵元组在凸面阵元列的中心位置,由于阵元在凹面与凸面检测时,聚焦计算方法不同,所以对不同位置计算方法分别进行讨论。

1.2.1 阵元在凹面上扫描

阵元在凹面上扫描时 $x \leq g$,分布在凹面部分的阵元对应的圆心角为 δ_1 ,根据弧长公式扫描凹面部分的阵元数为:

$$z = \text{round}\left(\frac{\delta_1}{d/R_1}\right) \quad (2)$$

$$g = z + a \quad (3)$$

式中: round 为对数值进行四舍五入的函数。

传播路径为:

$$l_{F_2X_2} = \sqrt{R_1^2 + l_{O_1F_2}^2 - 2R_1 \cdot l_{O_1F_2} \cdot \cos\left|\theta_2 - \left(x_2 - \frac{M+1}{2}\right) \cdot d/R_1\right|} \quad (4)$$

1.2.2 阵元在凸面上扫描

阵元在凸面上扫描时 $g < x \leq e$,分布在凸面阵元对应的圆心角为 δ_2 ,扫描中凹面部分阵元数为 $M-z$ 。

$$e = M + a \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{(M-1)d - \delta_1 \cdot R_1}{R_2} \quad (6)$$

1) 聚焦点在凹面和凸面圆心连线 O_1O_2 的左侧时, $x > g$,传播路径为:

$$l_{F_2X_2} = \sqrt{R_2^2 + l_{O_2F_2}^2 - 2R_2 \cdot l_{O_2F_2} \cdot \cos(\varphi_1)} \quad (7)$$

$$l_{O_2F_2} = \sqrt{l_{O_1F_2}^2 + l_{O_1O_2}^2 - 2 \cdot l_{O_1F_2} \cdot l_{O_1O_2} \cdot \cos(\varepsilon)} \quad (8)$$

$$l_{O_1O_2} = R_1 + R_2 \quad (9)$$

$$\varepsilon = \delta_1 - \gamma + \theta_2 \quad (10)$$

$$\delta_1 = (g - a + 1)d / R_1 \quad (11)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{l_{B_2F_2} \sin \alpha_2}{l_{O_1F_2}}\right) \quad (12)$$

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{l_{O_1F_2} \sin \varepsilon}{l_{O_2F_2}}\right) + (x_2 - g + 1)d / R_2 \quad (13)$$

$$\gamma = z \cdot d / 2R_1 \quad (14)$$

2) 聚焦点在凹面和凸面圆心连线 O_1O_2 的右侧时, $x > g$,传播路径为:

$$l_{F_3X_2} = \sqrt{R_2^2 + l_{O_2F_3}^2 - 2R_2 \cdot l_{O_2F_3} \cdot \cos(\varphi_2)} \quad (15)$$

$$\varphi_2 = \left|\theta_3 - \left(x_2 - \frac{a+M+g}{2}\right) \cdot d / R_2\right| \quad (16)$$

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{l_{B_3F_3} \sin(\alpha_3)}{l_{O_2F_3}}\right) \quad (17)$$

因此,实际检测时获得超声纵波在金具中的传播速度 c 、激励阵元数目 M 、阵元中心距 d 、偏转角 α 、聚焦深度 l_{BF} 、凹面半径 R_1 、凹面对应的圆心角 σ_1 、凸面半径 R_2 、凸面对应的圆心角 σ_2 ,即可计算各阵元的延时时间,并以此作为聚焦延时法则,通过多通道信号发生器控制各阵元激励信号按照延时聚焦法则进行延时激励,使各阵元发射的声波在聚焦点处进行同相叠加,实现高灵敏度和信噪比的检测效果。

2 CIVA 超声仿真

2.1 CIVA 超声仿真实论

2.1.1 声场计算

CIVA 声场仿真中的声场分布计算基于 Pencil 法修正的瑞利积分模型,通过对超声探头上每个离散点的声压进行积分计算来确定声场中任意位置的声压值^[21]。

单个探头时,纵波的速度(标量)势可用瑞利积分表达为^[22]:

$$\varphi(r, t) = V_n(t) \cdot \iint_T \frac{\Gamma_n(r_T, t - |r - r_T|/c)}{2\pi|r - r_T|} dS(r_T) \quad (18)$$

相控阵超声探头时,介质中任一点的速度势:

$$\varphi(r, t) = V_n(t) \cdot \sum_i \iint_{T_i} \frac{\Gamma_i(r_T, t - \tau_i - |r - r_T|/c)}{2\pi|r - r_T|} dS(r_T) \quad (19)$$

式中: $\varphi(r, t)$ 为传播介质中点 r 在 t 时刻的速度势; r_T 为点源在探头表面的位置; $V(t)$ 为探头点源在时刻 t 的振动速度; c 为超声波在介质中的声速; $r - r_T$ 为点源到计算点 r 之间的距离; $dS(r_T)$ 为探头点源 r_T 的面积。

2.1.2 缺陷响应

缺陷响应过程如图 2 所示, 图 2a)为超声波从探头发射, 入射到缺陷上, 图 2b)为缺陷和声场相互作用产生散射场, 图 2c)为超声探头接收缺陷的反射回波并合成最终的接收信号。

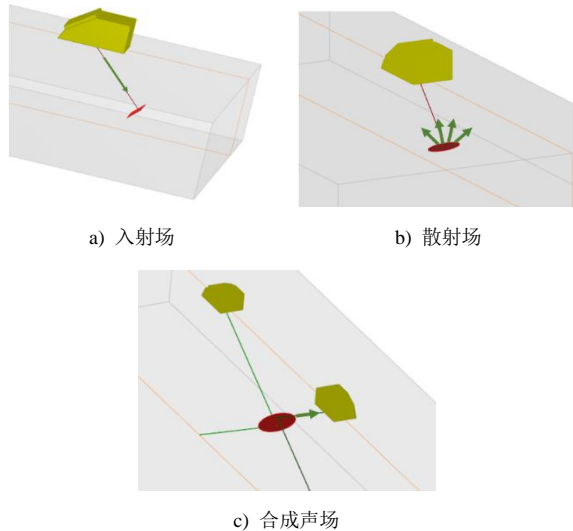


图 2 缺陷响应声场计算过程

Fig.2 The acoustic field calculation process of defect response

发射声束、缺陷散射、接收声束在缺陷点处相互作用, 计算如下:

$$S_{ER}(t) = \sum_M A_R(M) A_E(M) [B(M) \cdot \mathbf{e}_E^{i\varphi} \cdot \mathbf{e}_R^{i\varphi}] S(t - T_E - T_R) \quad (20)$$

式中: M 为缺陷上离散点; $A_E(M)$ 为入射声束幅值; $A_R(M)$ 为接收声束幅值; T_E 为入射声束的延时时间; T_R 为接收声束的延迟时间; $B(M)$ 为散射系数, 其与选用的近似缺陷散射模型相关, 而缺陷散射模型应根据不同的缺陷类型选取, 如空心体积型缺陷或平面状的裂纹缺陷, 多采用基尔霍夫散射模型 (Kirchhoff), 类似裂纹缺陷的端角衍射波模拟采用几何衍射理论模型 (geometrical theory of diffraction, GTD), 夹渣等实心体积模型的模拟采用修正波恩近似模型 (Born) [23-25]; 下标 E 代表入射方向, 下标 R 代表接收方向。

2.2 CIVA 仿真模拟试验

利用柔性相控阵超声探头检测不规则形状铸铝金具时, 由于铸铝金具表面曲率发生变化, 构件中声束传播特性复杂, 使用 CIVA 仿真平台进一步研究不规则形状铸铝金具内部声场聚焦特性及分布规律。建立带有凹面与凸面的零件三维模型如

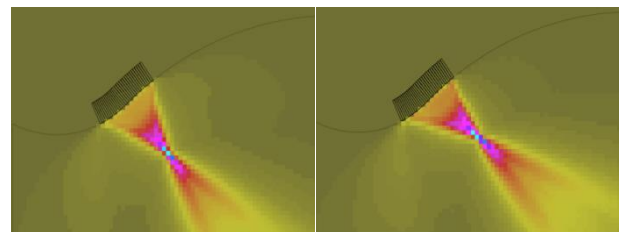
图 3 所示, 模型中凹面半径为 25 mm, 凸面半径为 75 mm, 厚度为 50 mm, 凹面圆心角为 65°, 凸面圆心角为 40°, 材质选用铝合金 2024, 将其导入 CIVA 仿真平台进行仿真模拟分析。



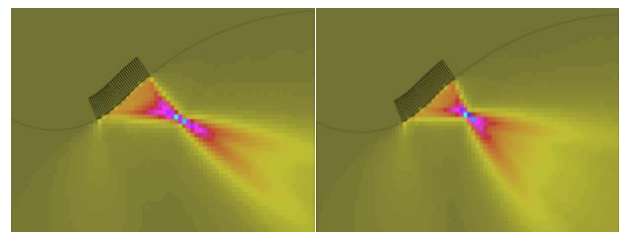
图 3 仿真零件三维模型
Fig.3 3D simulation model

2.2.1 验证柔性相控阵探头的偏转与聚焦

以情况最复杂的凹面与凸面相交区域为例进行模拟研究, 建立了不同偏转角与聚焦深度的 4 组对比仿真模型。采用 7.5 MHz 柔性相控阵纵波超声直探头, 其包含 32 个阵元晶片, 探头长 16.00 mm, 宽 5.00 mm, 阵元中心距 0.50 mm, 阵元间隙 0.05 mm, 单次激发阵元数为 8 个, 初始激发阵元为第 1 阵元, 仿真结果如图 4 所示。由图 4 可见, 无论是在凹面区域、凹面与凸面结合区域还是在凸面区域, 使用柔性相控阵超声探头均能实现声束在复杂曲面铸铝金具中声束的动态偏转与聚焦, 验证了在复杂曲面上相控阵聚焦算法的有效性。



a) 偏转角 0° 聚焦深 15 mm b) 偏转角 15° 聚焦深 15 mm



c) 偏转角 30° 聚焦深度 15 mm d) 偏转角 30° 聚焦深度 10 mm

图 4 不同偏转角与不同聚焦深度声束聚焦仿真结果
Fig.4 Simulation results of beam focusing with different deflection angles and focus depths

2.2.2 柔性相控阵缺陷检测仿真试验

在图 3 所示的复杂曲面三维模型中分别在凹面区域、凹面与凸面相交区域、凸面区域 3 处各预埋一组直径为 $\Phi 2\text{ mm}$ ，长度为 3 mm 的横孔缺陷和 $\Phi 2\text{ mm} \times \Phi 2\text{ mm} \times \Phi 1\text{ mm}$ 的球形夹渣缺陷，其中，横孔缺陷的法向深度为 10 mm，球形夹渣缺陷的法向深度为 15 mm，缺陷预埋位置如图 5 所示。采用 2.2.1 节中所述的探头参数对缺陷进行仿真扫描，分别采取无延时与 $0^\circ \sim 45^\circ$ 扇形扫描延时 2 种延时方式，扫描仿真结果如图 6、图 7 所示。图 6、图 7 的仿真结果表明，对于不同曲面类型、不同深度与不同类型的缺陷均能够有效检出，进一步证明

了柔性相控阵超声探头在复杂曲面金具检测中的可靠性。

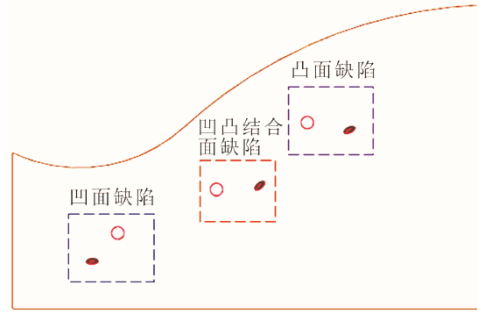


图 5 仿真构件缺陷预埋位置
Fig.5 The locations of pre-embedded defects in simulated components

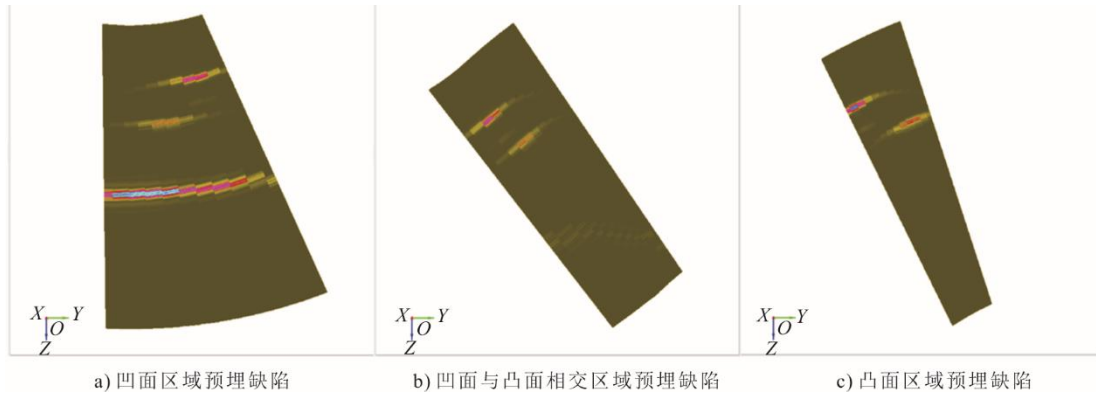


图 6 3 个典型场景发射无延时扫描仿真结果
Fig.6 Simulation results of three typical scenes with no-delayed scanning

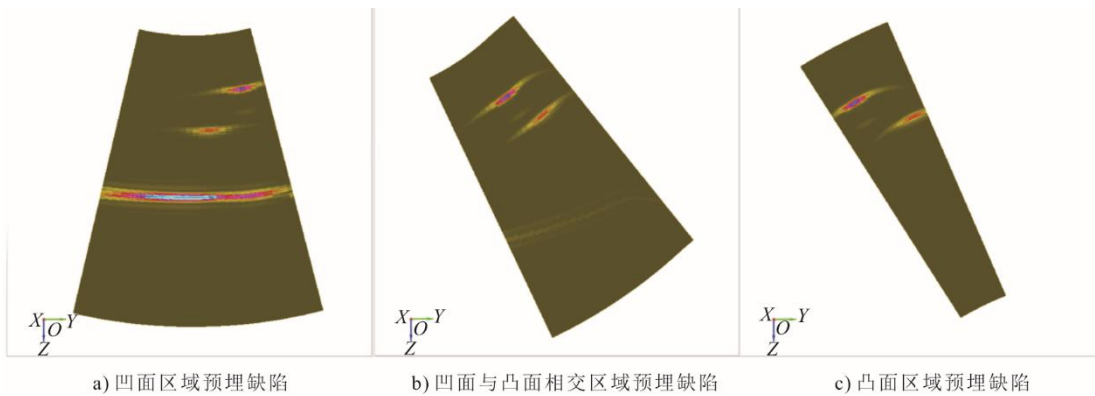


图 7 3 个典型场景 $0^\circ \sim 45^\circ$ 扇形扫描仿真结果
Fig.7 Simulation results of three typical scenes with delay of $0^\circ \sim 45^\circ$ sector scanning

以 $\Phi 2\text{ mm}$ 横孔回波为例，分析在 3 个不同曲面场景，相同法向深度预埋缺陷使用不同延时法则的回波幅值情况，仿真结果如图 8 所示。图 8 的仿真结果表明：无延时得到的 A 扫信号凸面检测效果最好，而凹面回波幅值最低，相同灵敏度下 2 个位置回波幅值相差 26%；而使用扇扫延时得到的 A 扫信号

凹面与凹凸面结合面的幅值相等，凸面的幅值最高，与另 2 个位置的信号幅值相差 5%之内，说明应用延时法则可以弥补不同曲率的复杂曲面由于曲率不同、凹凸方式不同所产生的声波衰减。所以，在实际检测复杂曲面金具时，采用一定的延时法则可以弥补由于曲面结构而造成的衰减，更适用于实际检测。

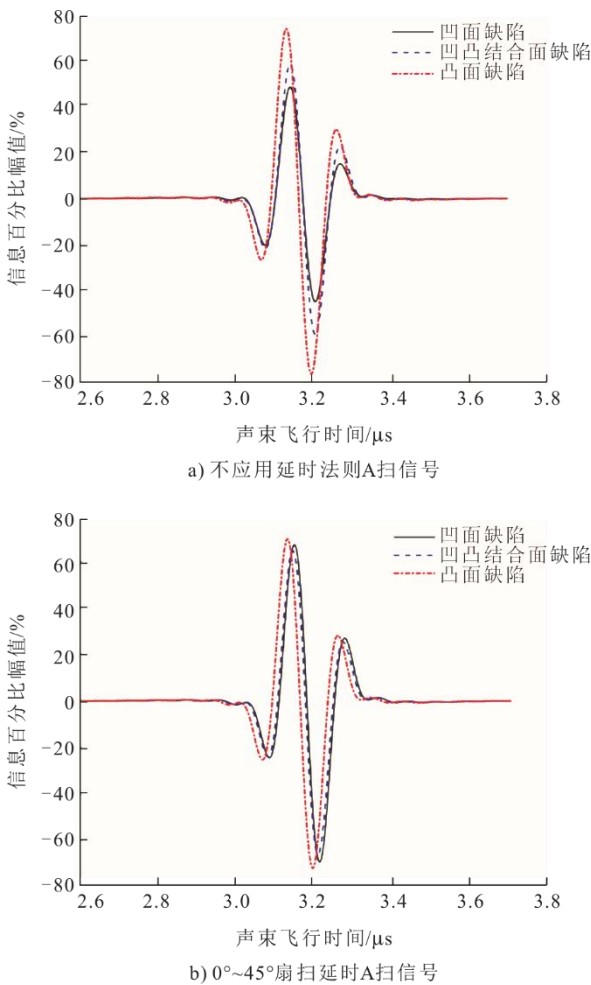


图 8 $\Phi 2$ mm 横孔缺陷使用不同延时法则的回波 A 扫信号幅值对比

Fig.8 Comparison of echo A-scan signals amplitude for $\Phi 2$ mm transverse hole defect with different delay laws

2.2.3 柔性相控阵探头参数仿真试验

采用图 5 中凹凸结合区域的一组预埋缺陷进行不同激励阵元数量的模拟研究，采用 2.2.1 节中所述的探头参数，探头阵元数量为 32，分别对发射阵元 $0^\circ \sim 45^\circ$ 扇扫激励的 3、8、12、16 个激发阵元进行仿真，结果如图 9 所示。不同激励阵元数量对同一

缺陷的仿真对比结果表明，随着激励阵元数的增加，聚焦能力增强，检出缺陷的形状越接近实际缺陷，但当激励阵元数过大时，聚焦区域变小，并且增加声波传播的复杂性，故认为当激励阵元数为 8 或 12 时，可以获得较好的聚焦结果和检测结果。

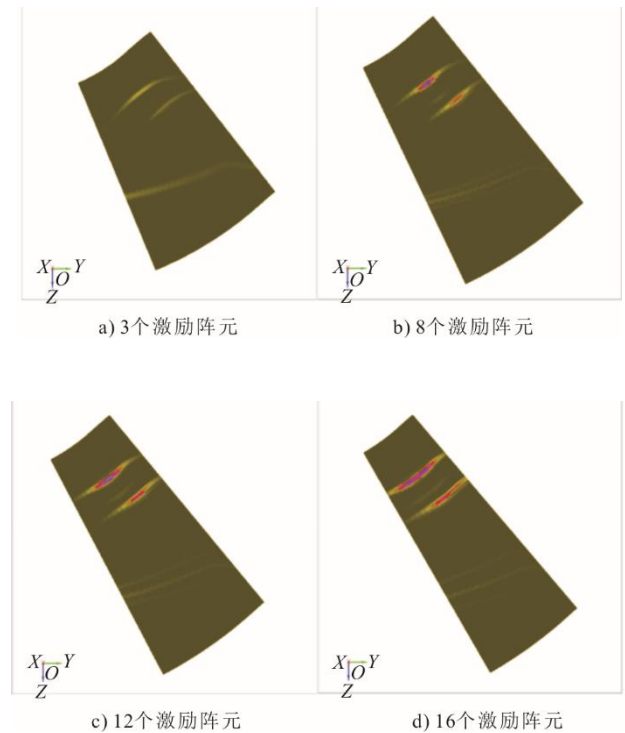


图 9 不同激励阵元数量对凹凸结合区域预埋缺陷仿真结果
Fig.9 Comparison of simulation results for pre-embedded defects in concave-convex junction area with different number of excitation elements

3 试验验证

3.1 人工预埋缺陷相控阵超声检测试验

试验采用多浦乐 PHASCAN 便携式相控阵检测仪，以及多浦乐柔性相控阵超声探头，探头参数见表 1，柔性相控阵超声探头阵元排布及实物如图 10 所示。

表 1 柔性相控阵超声探头参数

Tab.1 Parameters of flexible phased array ultrasonic probe

探头类型	通道数 n	阵元中心距 p /mm	阵元隔槽 g /mm	有效孔径 A /mm	阵元长度 E /mm	中心频率/MHz	带宽 (-6 dB) /%
线阵	32	0.50	0.05	16.00	5.00	7.5	60

为验证本文提出的基于柔性阵列探头的相控阵超声检测方案对铸铝金具缺陷检出能力，以典型的电力铸铝金具线夹进行检测，在线夹上预设人工

缺陷，分别加工深度为 2 mm 和 5 mm，直径 $\Phi 2$ mm 平底孔，实物如图 11 所示，采用柔性相控阵超声探头对不规则检测面进行超声检测（图 12）。

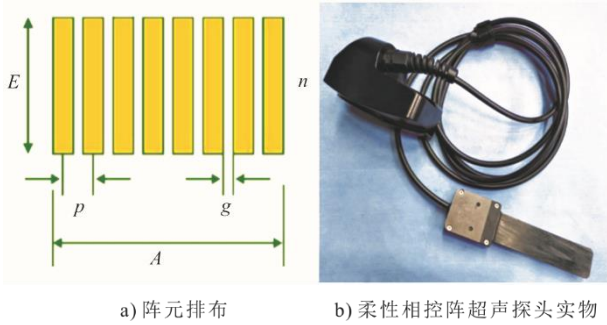


图 10 柔性相控阵超声探头
Fig.10 Flexible phased array ultrasonic probe

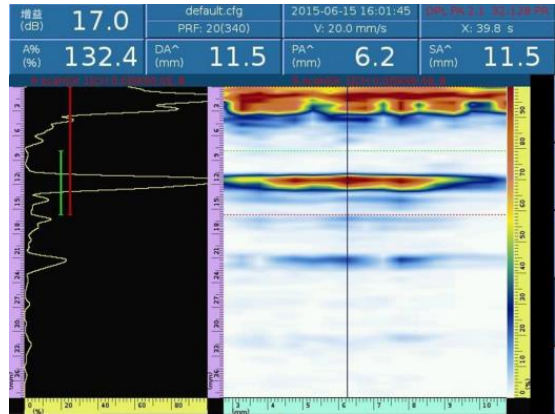


图 13 无缺陷位置的检测结果
Fig.13 Detection result at defect-free position



图 11 预埋人工缺陷的线夹
Fig.11 Clamp with artificial defects

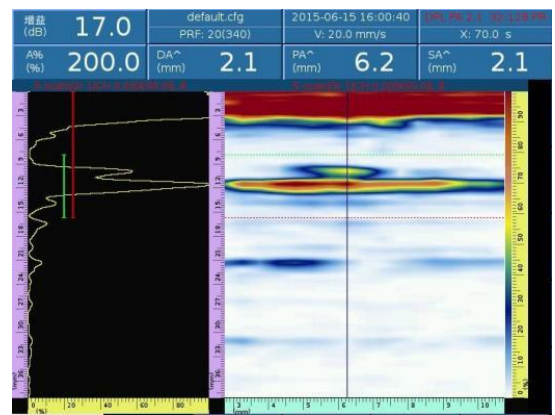


图 14 有缺陷（深 2 mm， $\Phi 2$ mm 平底孔）位置的检测结果
Fig.14 Detection result at defect position (depth 2 mm, diameter 2 mm flat-bottom hole)



图 12 使用柔性相控阵超声探头检测线夹
Fig.12 Clamp detection with flexible phased array ultrasonic probe

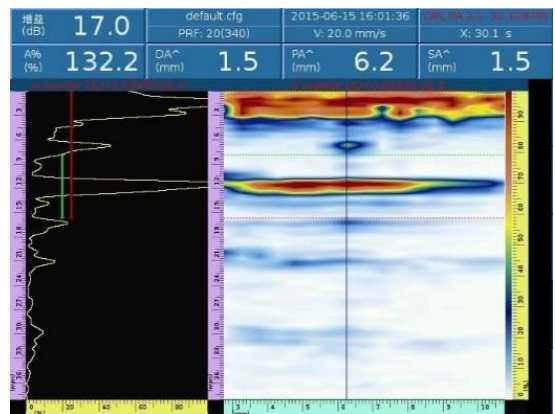


图 15 有缺陷（深 5 mm， $\Phi 2$ mm 平底孔）位置的检测结果
Fig.15 Detection result at defect position (depth 5 mm, diameter 2 mm flat-bottom hole)

3.2 人工预埋缺陷检测结果分析

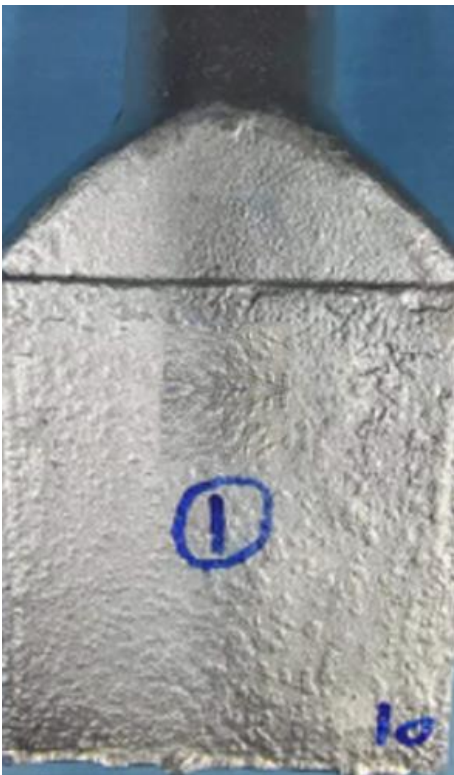
使用上述柔性相控阵超声探头对线夹工件的无缺陷位置与预埋缺陷位置分别进行检测，结果如图 13—图 15 所示。其中，无缺陷位置 A 扫描和 S 扫描图像如图 13 所示，缺陷位置（深度 2 mm， $\Phi 2$ mm 平底孔）的 A 扫描和 S 扫描图像如图 14 所示，缺陷位置（深度 5 mm， $\Phi 2$ mm 平底孔）的 A 扫描和 S 扫描图像如图 15 所示。检测结果表明：工件底波清晰可见，工件内部情况直观清楚；预埋缺陷均可有效检出，证明了超声相控阵探头参数符合检测要求，进而验证了基于柔性阵列探头的相控阵超声检测技术可用于检测复杂曲面的铸铝金具内部缺陷。

3.3 自然缺陷相控阵超声检测试验

为进一步验证检测效果，选取 1 组带有自然缺陷的铸铝金具用柔性相控阵超声探头进行超声检测及工业计算机断层扫描（computed tomography, CT）检测，带有自然缺陷铸铝金具的实物如图 16 所示。



a) 带自然缺陷铸铝金具 1



b) 带自然缺陷铸铝金具 2

图 16 带有自然缺陷的铸铝金具
Fig.16 Cast aluminum fittings with natural defects

3.4 自然缺陷检测结果分析

带自然缺陷铸铝金具 1 相控阵超声检测结果如图 17 所示，工业 CT 检测结果如图 18 所示。由图 18 工业 CT 检测结果可以看出，该金具内部含有长度约为 21 mm 的蜂窝状缺陷。

带自然缺陷铸铝金具 2 相控阵超声检测结果如图 19 所示，工业 CT 检测结果如图 20 所示。由图 20 工业 CT 检测结果可以看出，检出的最小缺陷长度为 2.13 mm，同时也是该组铸铝金具中检出的最小缺陷。

相控阵超声检测缺陷位置与基于 X 射线的工业 CT 检测位置十分接近，均可准确检出工件的自然缺陷，进一步验证了相控阵超声检测结果的准确性和可靠性。根据铸铝金具的使用要求不允许存在大于 $\phi 5$ mm 平底孔当量的缺陷及指示长度大于 50 mm 的线状缺陷，本组试验最小缺陷达到金具检测要求，并且超声相控阵检测操作简单，图像直观清晰，适用于铸铝金具的出厂检测和现场快速检测。

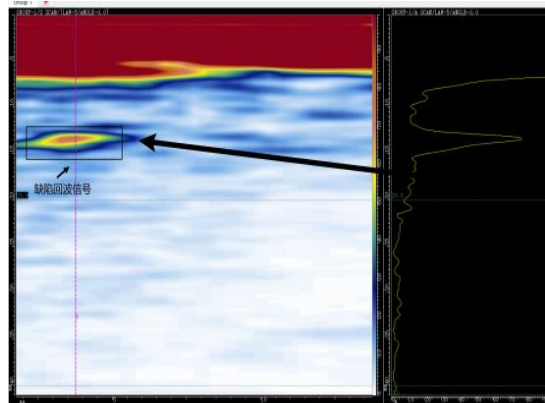


图 17 铸铝金具 1 相控阵检测结果
Fig.17 Detection result of phased array detection for aluminum casting fitting 1

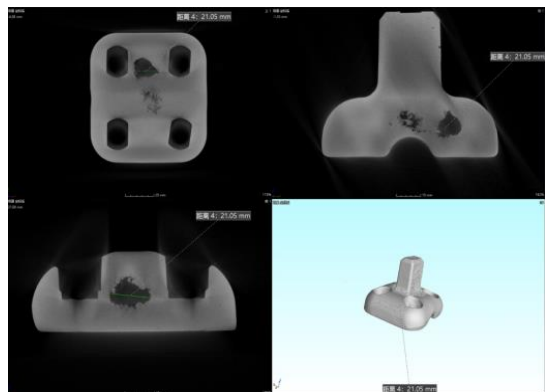


图 18 铸铝金具 1 工业 CT 检测结果
Fig.18 Detection result of industrial CT for aluminum casting fitting 1

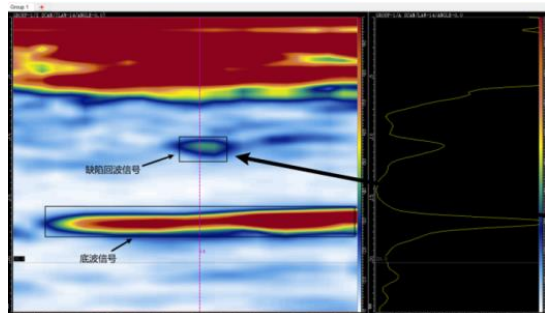


图 19 铸铝金具 2 相控阵检测结果
Fig.19 Detection result of phased array detection for aluminum casting fitting 2

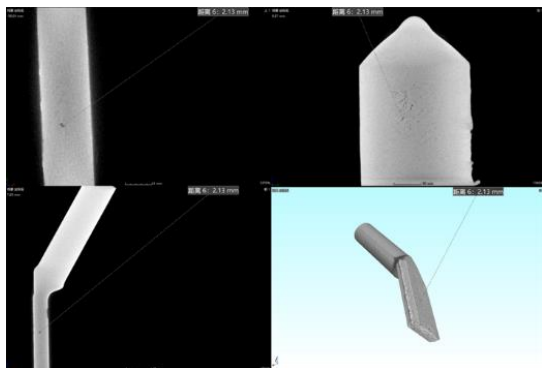


图 20 铸铝金具 2 工业 CT 检测结果

Fig.20 Detection result of industrial CT for aluminum casting fitting 2

4 结 语

本文提出采用柔性相控阵超声探头检测不规则形状的铸铝金具,给出相控阵动态聚焦方法,使用 CIVA 仿真软件对不同曲面类型、不同曲率半径铸铝金具模型进行声场仿真,分析典型缺陷的缺陷响应。仿真结果表明,采取扇扫的发射激励延时能够弥补不同曲面所造成的辐射声波衰减,并进一步对柔性相控阵探头检测工艺进行优化。最后通过对带有预埋缺陷及 1 组带有自然缺陷的铸铝金具进行试验验证,证明所选探头参数可有效检出铸铝金具的蜂窝状缺陷,并使用工业 CT 检测技术对相控阵超声检测技术的有效性和可行性进行了验证。为进一步提高缺陷的检出率、改善不规则形状铸铝金具的出厂检验及现场快速检测提供了新思路。

【参 考 文 献】

- [1] 陆旭, 罗汉武, 李文震, 等. 电力金具图像故障状态评估[J]. 红外技术, 2020, 42(7): 632-636.
LU Xu, LUO Hanwu, LI Wenzhen, et al. Estate evaluation of image fault of electric power fittings[J]. Infrared Technology, 2020, 42(7): 632-636..
- [2] 陈海燕, 李亮, 夏正武, 等. 复合绝缘子内部缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1274-1280.
CHEN Haiyan, LI Liang, XIA Zhengwu, et al. Inspection of internal defects of composite insulators by ultrasonic phased array method based on flexible coupling[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1274-1280.
- [3] 方春华, 胡冻三, 陶玉宁, 等. 高压电缆终端铅封缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 29-37.
FANG Chunhua, HU Dongsan, TAO Yuning, et al. Ultrasonic phased array flexible coupling detection of lead-sealing defects in high voltage cable terminals[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 29-37.
- [4] CHATILLON S, CATTIAUX G, SERRE M, et al. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible phased array transducer[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 131-134.
- [5] CASULA O, POIDEVIN C, CATTIAUX G, et al. Control of complex components with Smart Flexible Phased Arrays[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 647-651.
- [6] ROY O, MAHAUT S, CASULA O. Control of the ultrasonic beam transmitted through an irregular profile using a smart flexible transducer: modelling and application[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1): 243-246.
- [7] TOULLELAN G, CASULA O, ABITTAN E, et al. Application of a 3D smart flexible phased-array to piping inspection[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 975(1): 794-800.
- [8] NAKAHATA K, TOKUMASU S, SAKAI A, et al. Ultrasonic imaging using signal post-processing for a flexible array transducer[J]. NDT & E International, 2016, 82: 13-25.
- [9] 陈虎, 黄辉, 陈定岳, 等. 超声相控阵探头的形式以及专用相控阵探头的开发应用案例[J]. 无损检测, 2018, 40(3): 66-72.
CHEN Hu, HUANG Hui, CHEN Dingyue, et al. The forms of ultrasonic phased array probe and special phased array probe development and application cases[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(3): 66-72.
- [10] LI W, ZHOU Z, LI Y. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 75-82.
- [11] LIM S J, KIM Y L, CHO S, et al. Ultrasonic inspection for welds with irregular curvature geometry using flexible phased array probes and semi-auto scanners: a feasibility study: applied sciences[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 748.
- [12] TOULLELAN G, CASULA O, ABITTAN E, et al. Application of a 3D smart flexible phased-array to piping inspection[J]. AIP Conference Proceedings, 2008, 975(1): 794-800.
- [13] 罗忠兵, 曹欢庆, 林莉. 航空复材构件 R 区相控阵超声检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 67-75.
LUO Zhongbing, CAO Huanqing, LIN Li. Progress in study of phased array ultrasonic testing on CFRP radii in aerospace component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 67-75.
- [14] 徐春广, 李卫彬. 无损检测超声波理论[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 336.
XU Chunguang, LI Weibin. Ultrasonic theory of non-destructive testing[M]. Beijing: Science Press, 2020: 336.
- [15] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.
- [16] ZHENG Y, ZHAO X, SONG S, et al. Beam generating and sound field modeling of flexible phased arrays for inspecting complex geometric components[J]. Wave Motion, 2020, 94: 102494.
- [17] 郑艳芳, 张建海, 孙书博. 复杂曲面构件的超声柔性相控阵检测方案研究[C]. 2018 远东无损检测新技术论坛, 厦门, 2018.
ZHENG Yanfang, ZHANG Jianhai, SUN Shubo. Research on ultrasonic flexible phased array detection scheme for complex curved surface components[C]. The Proceedings of the 2018 Far East Nondestructive Testing New Technology Forum, Xiamen, 2018.
- [18] 丛晨日, 张凯胜, 孙慧霖. 基于柔性超声波相控阵的轴承套圈内部缺陷检测研究与分析[J/OL]. 轴承: 1-7. (2022-10-13)[2023-06-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/>

- detail/41.1148.TH.20221012.1732.004.html.
 CONG Chenri, ZHANG Kaisheng, SUN Huilin. Research and analysis of bearing internal defect detection based on flexible ultrasonic phased array[J/OL]. Bearing: 1-7. (2022-10-13)[2023-06-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1148.TH.20221012.1732.004.html>.
- [19] 李晓利, 陈岩, 王俊, 等. 曲面工件柔性线阵聚焦和仿真方法[J]. 无损检测, 2019, 41(3): 13-16.
 LI Xiaoli, CHEN Yan, WANG Jun, et al. Focusing and simulation method of curved workpiece with flexible line array[J]. Nondestructive Testing, 2019, 41(3): 13-16.
- [20] 王中亚, 刘欣平, 史猛, 等. 柔性相控阵动态聚焦理论与仿真[J]. 声学技术, 2019, 38(5): 585-589.
 WANG Zhongya, LIU Xinping, SHI Meng, et al. Dynamic focusing theory and simulation study of flexible phased array[J]. Technical Acoustics, 2019, 38(5): 585-589.
- [21] 余超, 季昌国, 张鹏鲲, 等. 基于相控阵超声的电力线夹检测技术研究[J]. 材料导报, 2022, 36(增刊 1): 587-592.
 YU Chao, JI Changguo, ZHANG Pengkun, et al. Research on power clamp detection technology based on phased array ultrasound[J]. Materials Reports, 2022, 36(Suppl.1): 587-592.
- [22] 边成亮. 基于背散射信号递归分析的挤压棒材超声无损检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1.
 BIAN Chengliang. Research on ultrasonic nondestructive testing technology of extruded bars based on recursive analysis of backscattered signal[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1.
- [23] 单洪彬, 李明, 陈怀东, 等. 国外超声检测仿真软件的研究进展[J]. 无损检测, 2008(7): 446-450.
 SHAN Hongbin, LI Ming, CHEN Huaidong, et al. The development of overseas simulation software for ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2008(7): 446-450.
- [24] 赵仑, 蔡晖, 孙璞杰, 等. CIVA 仿真模拟风机变桨轴承的相控阵超声检测[J]. 热力发电, 2022, 51(7): 30-35.
 ZHAO Lun, CAI Hui, SUN Pujie, et al. Phased array ultrasonic detection of cracks in wind turbines pitch bearings by CIVA simulation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(7): 30-35.
- [25] 张超才, 韩军, 龙晋桓, 等. 基于超声相控阵的小径薄壁管座角焊缝检测 CIVA 仿真[J]. 中国测试, 2021, 47(7): 19-25.
 ZHANG Chaocai, HAN Jun, LONG Jinheng, et al. CIVA simulation of fillet weld inspection of small diameter and thin-walled pipe base based on ultrasonic phased array[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(7): 19-25.

(责任编辑 邓玲惠)