

[电缆终端铅封]

基于超声的电缆终端铅封缺陷检测技术实验研究

文/林龙标 黄宾南 李小刚 谢朝养 饶洪昌
东莞市输变电工程建设有限责任公司

电缆终端铅封在高压电缆的密封和防水中起着至关重要的作用，其可靠性直接关系到电缆系统的安全运行。由于电缆铅封在制造和安装过程中可能出现虚焊、松脱和裂纹等缺陷，传统检测方法难以有效识别这些内部缺陷，增大了电缆发生故障的风险。研究通过超声检测技术，系统地探讨电缆终端铅封缺陷的检测方法和效果。实验采用中科HS PA20超声检测设备，通过柔性探头和耦合介质水囊的设计，提升超声检测准确度和可靠性。实验结果表明，超声检测能够有效识别铅封的层间缺陷和内部缺陷，为电缆终端铅封缺陷的现场无损检测提供了科学依据和技术支持。

电缆终端铅封在高压电缆系统中起到密封和防水作用，是保证电缆系统安全运行的关键部件。随着电力需求不断增长和高压电缆技术的广泛应用，电缆终端铅封的质量和可靠性变得愈发重要^[1-2]。然而，在电缆制造和安装过程中，电缆附件即铅封可能会出现虚焊、松脱和裂纹等各种人工或自然缺陷。这些缺陷在早期难以通过传统检测手段查明，容易在使用过程中引发严重的电缆故障，导致巨大的经济损失和安全隐患。为保证输电线路的稳定运行，确定电缆线路本体及其附件的安全稳定非常重要。因此，开展研究一种高效、精确的铅封缺陷检测方法显得尤为必要。

随着现代工业的迅猛发展，无损检测技术已经逐步丰富，常见的无损检测技术有射线检测、涡流检测和超声检测等^[3-4]。射线检测技术利用射线透过物体时的吸收和散射特性，通过测量射线因缺陷存在而产生的吸收变化来检测缺陷，主要适用于检测气孔、夹渣等体积型缺陷，但对裂纹不敏感。涡流检测技术基于电磁感应原理，通过测量线圈阻抗的变化检测导电材料的表面和近表面缺陷，但在检测复杂形状

构件时可能出现误判。超声波检测技术主要用于检测试件的内部缺陷，通过脉冲反射法，利用超声波在不同介质界面处的反射或折射特性，判断缺陷的位置和性质，适用于检测铅封内部缺陷和铅封与铝护套界面的间隙，具有穿透能力强、灵敏度高等优点^[5]。

文武等人通过开发和测试超声相控阵探头，利用高速ADC采样技术和DAC控制波形，实现了对钢结构焊缝中缺陷的高效率、高灵敏度检测^[6]。林莉等人针对厚壁铸造奥氏体不锈钢（CASS）管道焊缝的超声相控阵检测技术，通过分析PAUT技术难点、关键技术及解决策略，并结合数值模拟、信号处理等现代技术，旨在提高CASS焊缝的检测效率、准确性和可靠性，满足核反应堆安全运行的高标准要求^[7]。郭猛等人为了提高相控阵超声检测系统对大型构件如风电叶片的检测精度，设计并优化喷水耦合喷嘴，利用数值仿真和道格拉斯-普克算法简化复杂曲线，并通过试验验证优化后喷嘴的性能，达到提高射流稳定性和检测准确度的目标^[8]。陆明等人通过分析超声波检测技术的原理和应用，结合具体工程案例，阐述该技术在检测建筑钢结构焊缝

中的缺陷（如裂纹、气孔和夹渣等）的能力，旨在提高焊缝质量控制和结构安全性^[9]。由于电缆终端铅封的特殊材料和结构，超声检测技术在无损检测中的可行性亟需进一步研究。

本文深入分析使用超声波检测技术对电缆终端铅封缺陷的检测方法和效果。实验采用中科HS PA20超声检测设备，设计一种柔性探头，并使用水囊作为耦合介质，以提高检测的准确度和可靠性。经过实验验证，建立超声缺陷检测图谱，并确定最佳检测条件和操作规范。深入研究和应用超声波检测技术为电缆终端铅封缺陷的无损检测提供科学依据和技术支持。

超声检测实验原理和技术路线

1. 超声检测原理

超声波检测是一种利用超声波在材料中的传播特性来检测内部缺陷的无损检测技术，广泛应用于

工业和工程领域。其基本原理是，通过超声波探头发射高频超声波脉冲，脉冲在材料中传播时，当遇到不同的介质或内部缺陷（如裂纹、气孔和夹杂物等）时，会发生反射、折射或衍射。探头既充当发射器也充当接收器，当反射波返回探头时，通过测量反射波的时间和强度，确定缺陷的位置、大小和性质。超声波在介质中传播时的波型有多种，包括横波、纵波和表面波等。使用超声检测的优势在于：穿透能力强，可以穿透包括金属和非金属在内的多种介质，检测深度可达数米，适用于厚壁材料和大型结构件的内部缺陷检测；灵敏度高，能够发现直径仅为几毫米的缺陷，非常适合用于检测细小裂纹、气孔和夹杂物等微小缺陷；准确性高，超声波检测能够精确确定缺陷的位置、大小和形状；实时性好，能够提供即时的检测结果，检测过程中无需等待，结果可实时显示。超声检测缺陷过程如图1所示。

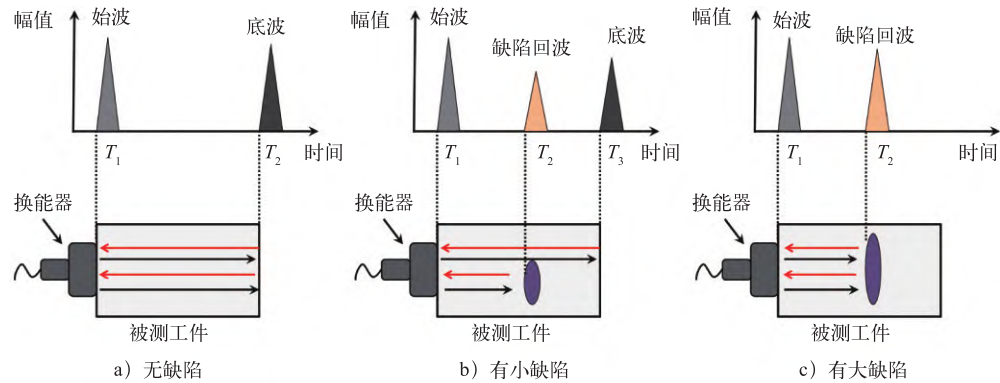


图1 超声检测缺陷过程示意图

2. 实验技术路线

电缆铅封缺陷检测研究路线如图2所示。本文主要探究超声检测电缆铅封缺陷的实验研究，首先明确电缆铅封缺陷的类型，分别设置铅封表面、内部以及层间三种缺陷类型，以保证实验的完整性；明确铅封缺陷类型之后，针对上述三种缺陷类型分别进行仿真建模并完成仿真内容，为后续开展实验研究做铺垫。实验部分：制作不同类型缺陷的铅封样品、利用超声检测实验对铅封样品进行检测，对于超声检测的实验结果，与仿真结果进行对比以验证超声检测电缆铅封缺陷技术的可行性和实用性，最终达到预期的实验目标，即证实基于超声的电缆终端铅封缺陷检测技术可行。

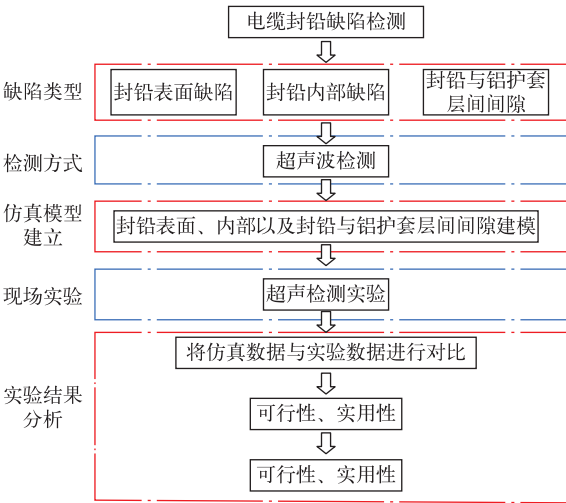


图2 电缆铅封缺陷检测研究路线

电缆终端铅封缺陷实验

1. 实验样品的制作

在本次实验中，共制造三种模拟电缆铅封在实际运行中可能遇到的缺陷情况的样品。这些样品包括：单独的铅封内部缺陷、单独的铅封与铝护套层之间的缺陷，以及铅封内部和层间缺陷同时出现的复合型缺陷。电缆终端铅封样品缺陷位置示意图和试样实物图如图3和图4所示。

制作高压电缆终端铅封的步骤：首先剥除外护套，并用喷火枪清除铝护套表面的污渍，再用棉布擦拭干净，使表面光滑。然后将终端尾管放置在铅封位置，并将尾管和铝护套表面打磨光滑。接着使用喷火枪将铅块融化，并用抹布将融化的铅涂抹在终端与铝护套连接处，确保牢固连接。铅涂抹完成后，需要在铅封内部制作模拟缺陷，实际操作中通常使用其他材料代替空气间隙。

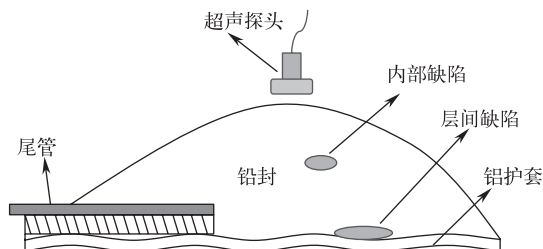


图3 铅封缺陷位置示意图



图4 铅封试样实物图

2. 实验平台搭建

电缆终端铅封缺陷检测实验装置的框图如图5所示。实验系统由电缆终端铅封样品、超声探头、电源、数字控制器和显示系统组成。在检测过程中，超声探头与铅封表面之间涂有一层较薄的耦合剂，确保超声波能够有效传导进铅封。超声波进入铅封样品内部之后，遇到样品内部的结构、缺陷等会发生反射。反射信号经过数字控制器处理后，转换为

波形并显示在系统界面上，操作人员可以根据波形特征进行分析和判断，从而实现对铅封的检测和评估。这一过程中，超声探头、耦合剂和数字控制器共同作用，确保检测过程的准确性和可靠性。

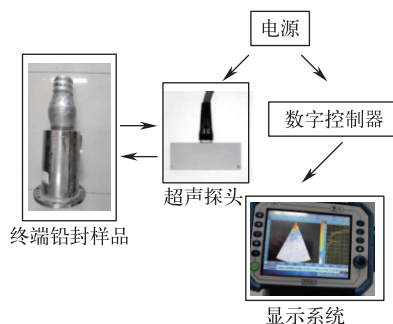


图5 铅封缺陷检测试验原理图

3. 超声柔性探头设计

由于超声波在空气中传播时衰减非常严重，因此在进行检测时，必须借助耦合介质以提高声波传递的效率。传统超声检测方式需要将检测件完全浸入水中，以水作为耦合介质来进行超声检测。然而，高压电缆终端铅封在电网运行中，周围环境为高压，因此实现超声检测必须脱离实验室中的水槽。为此，可以设计一种水囊，将水注入后密封，把探头与柔性水囊连接在一起，形成一个封闭的结构。柔性探头装置模型如图6所示。

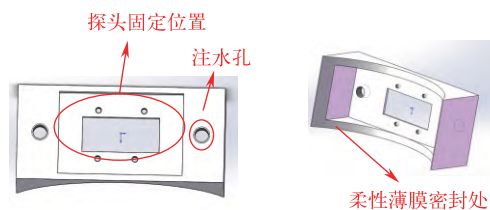


图6 柔性探头装置模型

因为铅封表面不是平滑的，而是曲面的，使用普通的超声探头不能使超声探头与铅封表面耦合完全，无法将缺陷检测出来或者导致检测不准确。本次实验需要制作柔性探头，使超声探头与铅封表面完全耦合，检测出来的结果才会准确。

柔性探头的主要制作材料是铝壳，铝壳上端留有挖孔用以固定超声探头，并使探头的声波能够不受阻碍地向下传播以通过水囊。铝壳的下端用硅橡胶薄膜封闭，封闭之后在铝壳内部填充水作为耦合剂。填充耦合剂的目的一是为了降低超声波传播过程中的衰减度；二是为了使柔性探头能够更好地与

被测铅封工件贴合。在铝壳底部薄膜的选择上，选用0.1 mm厚度的硅橡胶薄膜，因为这种材料与绝缘子护套的材质相近，相同的材质可以减少超声波的反射，有利于超声的传播。固定装置如图7所示。



图7 相控阵柔性探头实物图

4. 实验开展

首先采用注水装置对柔性耦合装置进行注水。采用注水装置向探头注水时，为了获得合适的压力，选用注射器进行注水。注水装置如图8所示，耦合装置左右两侧有两个注水口，注水前，将两个注水口打开，目的是排除气泡，气泡的存留会影响检测结果。连接注射器的阀门打开，气泡排除后，再将阀门与注水口关闭，注水结束。

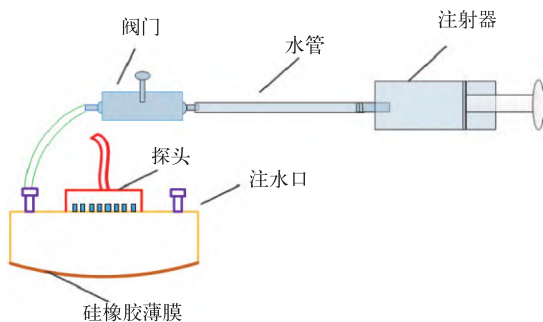


图8 水囊柔性耦合装置注水系统

将没有包裹热缩管的铅封试样放置在薄膜正下方，探头中心与铅封正下方对齐。由于水囊自身的重力，或者检测时施加一个力，在力的作用下水囊与铅封能够实现良好的接触。首先对铅封外没有包裹热缩管的试样进行测试，现场测试图如图9所示。



图9 无热缩管测试图

为了验证铅封包裹热缩管后铅封缺陷检测效果，将热缩管用热风枪加热包裹在铅封外表面，然后将探头放置在待检测位置正上方，现场测试图如图10所示。



图10 有热缩管测试图

实验结果

1. 铅封层间缺陷实验

考虑到电缆铅封的实际情况，实验设计并验证铅封外有无热缩管对检测结果的影响，对不同缺陷情况下以及有无热缩管铅封进行检测。

首先，采用超声相控阵设备对铅封层间缺陷进行检测，分别设置50 V、100 V、150 V和200 V的探头反射电压，对铅封外部有热缩管和没有热缩管两种情况进行超声检测，观察其超声检测图像和缺陷波形。检测结果如图11~图18所示。图11和图12是激励电压50 V时有热缩管和无热缩管对应的检测结果；图13和图14调整激励电压为100 V；图15和图16调整激励电压为150 V；图17和图18调整激励电压为200 V。

图11~图18中，右边是相控阵扇扫（S扫）图像，图像左边是超声波脉冲回波反射（A扫）图像。纵轴回波幅度百分比为回波幅度与最大幅值的比值，当前屏显示的最大幅值为1，即满屏显示。

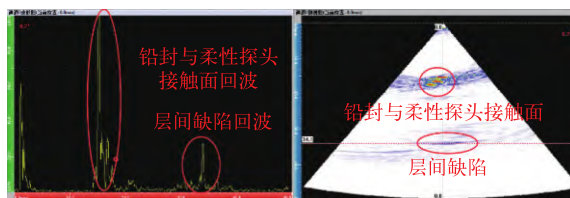


图11 无热缩管，激励电压50 V

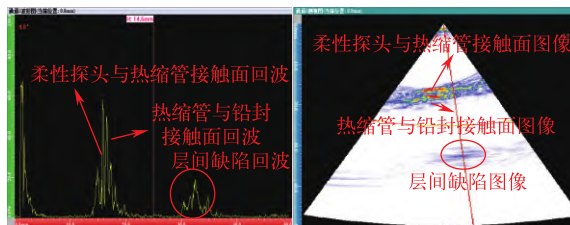


图12 有热缩管，激励电压50 V

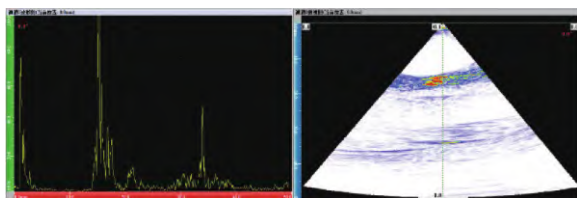


图13 无热缩管, 激励电压100 V

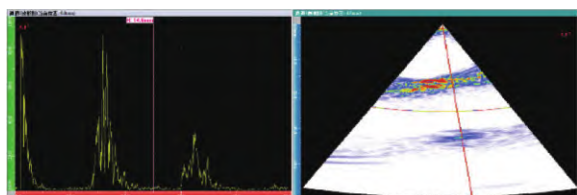


图14 有热缩管, 激励电压100 V

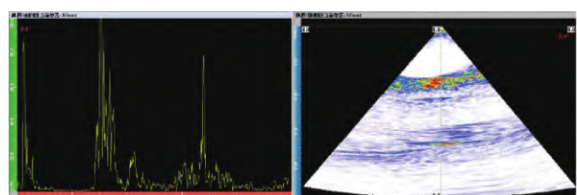


图15 无热缩管, 激励电压150 V

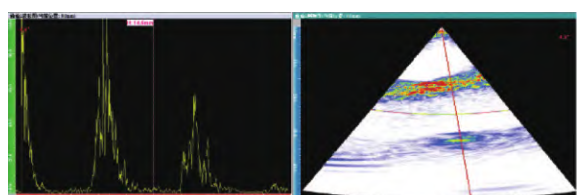


图16 有热缩管, 激励电压150 V

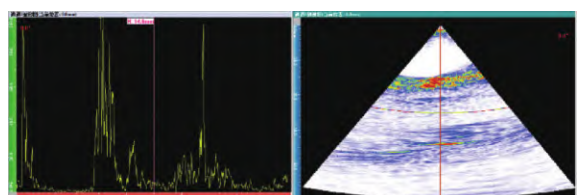


图17 无热缩管, 激励电压200 V

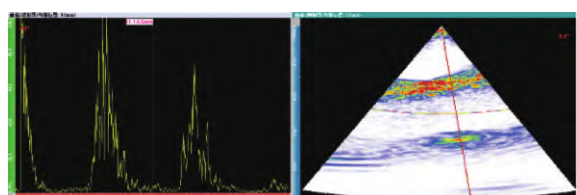


图18 有热缩管, 激励电压200 V

可以观察到, 未加装热缩管时, 2~15 mm深度范围内未检测到回波信号; 而在15 mm深度处记录到显著高幅值的回波, 说明该位置为铅封与柔性探

头硅胶膜的界面。在34 mm深度处检测到一个清晰的回波, 这对应于铅封的层间缺陷, 且缺陷与界面的距离与实际测量结果一致, 证实了水囊柔性耦合方法在检测铅封层间缺陷方面的有效性。

对于加装热缩管的情况, 在2~15 mm深度范围内同样未观察到回波; 在16~17 mm深度处检测到两个幅值很高的回波, 两个回波分别对应于柔性探头薄膜与热缩管的界面以及热缩管与铅封的界面。在35 mm深度处, 同样发现一个明显的回波, 回波表征的是铅封的层间缺陷, 该缺陷与界面的距离与实际测量结果相符。验证了即便在铅封外部有热缩管的情况下, 水囊柔性耦合方法依然适用并有效。

从检测结果可以看出, 随着所加激励电压的增加, 铅封外部在有热缩管和没有热缩管的两种情况下, 缺陷回波幅值明显增加, 缺陷图像颜色深度明显加深。通过对比可以发现, 在铅封外部没有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为100 V检测效果最佳; 在铅封有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为150 V检测效果最佳。说明铅封在有热缩管包裹的情况下, 热缩管对超声传播具有一定的衰减作用。

2. 铅封内部缺陷实验

与铅封层间缺陷实验一样, 为验证相控阵超声检测方法对铅封内部缺陷效果, 分别对铅封外部有热缩管和没有热缩管两种情况下进行超声检测, 设置四种不同的激励电压, 观察其超声检测图像和缺陷波形。

实验数据表明, 在无热缩管时, 2~12 mm深度内未发现回波, 13 mm深度处的明显回波显示了铅封与探头膜的界面, 而30 mm处的回波表征的是铅封内部缺陷, 证实了水囊柔性耦合技术的有效性。有热缩管时, 2~13 mm深度内无回波, 14~16 mm深度处的两个强烈回波分别对应膜与热缩管、热缩管与铅封的界面, 31 mm处的回波确认为内部缺陷, 表明该技术即使在有热缩管的情况下也适用。

从检测结果可以看出, 随着所加激励电压的增加, 铅封外部在有热缩管和没有热缩管的两种情况下, 缺陷回波幅值明显增加, 缺陷图像颜色深度明显加深。通过对比可以发现, 在铅封外部没有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为100 V检测效果最佳; 在铅封有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为150 V检测效果最佳, 说明铅封在有热缩管包裹的情况下, 热缩管对超声传播具有一定的衰减作用。

3. 铅封内部与层间缺陷实验

为验证相控阵超声检测方法对铅封内部与层间缺陷同时存在的检测效果, 分别对铅封外部有热缩管和没有热缩管两种情况下进行超声检测, 设置不同的激励电压, 观察其超声检测图像和缺陷波形。

可以发现, 在没有热缩管的情况下, 在深度为2~13 mm没有回波产生; 在深度为16 mm处出现幅值很高的回波, 表明该处为铅封与柔性探头硅橡胶薄膜的分界面; 在32.5 mm和36.5 mm有四处比较明显的回波, 为铅封内部缺陷和层间缺陷, 缺陷与两界面的距离跟实际结果相符, 证明水囊柔性耦合剂, 对同时存在铅封内部缺陷和层间缺陷的检测具有可行性。

有热缩管的情况下, 在深度为2~13 mm没有回波产生; 在深度为14~16 mm处出现幅值很高的两处回波, 前面为柔性探头薄膜与热缩管分界面, 后面为热缩管与铅封的分界面。在27.5 mm和29.5 mm处有四处比较明显的回波(与没有热缩管存在差距的原因在于, 柔性薄膜内部的冲水量和柔性薄膜与热缩管接触紧密程度不一样), 为铅封内部缺陷和层间缺陷, 缺陷与两界面的距离跟实际结果相符, 证明水囊柔性耦合剂对铅封外部有热缩管时, 同样具有可行性。

从检测结果可以看出, 随着所加激励电压的增加, 铅封外部在有热缩管和没有热缩管的两种情况下, 缺陷回波幅值明显增加, 缺陷图像颜色深度明显加深。通过对比可以发现, 在铅封外部没有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为100 V检测效果最佳; 在铅封有包裹热缩管的情况下, 激励电压设置为150 V检测效果最佳, 说明铅封在有热缩管包裹的情况下, 热缩管对超声传播具有一定的衰减作用。在对铅封内有内部缺陷和层间缺陷进行检测时, 可以明显看出缺陷回波和缺陷图像, 验证相控阵超声检测方法对铅封内部含有多种缺陷检测的可行性。

结束语

通过实验结果可以发现, 铅封外没有包裹热缩管时, 会有比较明显的缺陷反射回波, 同时缺陷图像以及缺陷回波也能够显示出来。通过观察缺陷图像和回波的位置, 也可以知道实际缺陷存在的位置及其缺陷类型。施加激励电压的不同, 缺陷图像清晰度和缺陷回波幅值也会不同。在实际测试过程中, 施加激励电压越大, 超声设备耗能也会更大。

因此, 在测试铅封层间缺陷(无热缩管)时, 可以选用100 V激励电压。

铅封外包裹有热缩管时, 可以发现薄膜与热缩管、热缩管与铅封都会产生反射界面, 会使层间缺陷反射回波幅值明显减小, 与铅封没有包裹热缩管相比, 施加相同的激励电压, 缺陷回波幅值更小, 缺陷图像清晰度更低, 说明热缩管对超声有衰减作用。为了使缺陷图像和缺陷回波更加明显, 因此, 在测试铅封层间缺陷(有热缩管)时, 可以选用150 V的激励电压。EA

(收稿日期: 2024-08-06)

参考文献

- [1] 敬人可, 李建增, 周海林. 超声无损检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7): 28-30+34.
- [2] 凡丽梅, 董方旭, 安志武, 等. 橡胶/铝合金粘接构件脱粘缺陷非线性超声检测技术研究[J]. 中国测试, 2020, 46(8): 15-21+43.
- [3] HOWARD R, CEGLA F. On the probability of detecting wall thinning defects with dispersive circumferential guided waves[J]. NDT & E International, 2017(86): 73-82.
- [4] 李小娟, 王黎, 高晓蓉, 等. 超声无损检测成像技术[J]. 现代电子技术, 2010, 33(21): 120-122.
- [5] 岳经凯. 碳纤维复合材料的超声相控阵无损检测研究[J]. 合成纤维, 2024, 53(7): 66-70.
- [6] 文武. 超声相控阵在钢结构检测中的应用[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(5): 172-174.
- [7] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12-20.
- [8] 郭猛, 班伟, 刘露露, 等. 相控阵超声检测用喷水耦合喷嘴的优化设计[J]. 无损检测, 2022, 44(5): 1-5.
- [9] 陆明. 超声检测在建筑钢结构焊缝无损检测中的应用[J]. 中国高新科技, 2024, (7): 118-120.
- [10] 高英, 梁曦东, 薛家麒, 等. 超声脉冲检测硅橡胶内部缺陷的研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 19-21.