

国内焊接缺陷声学无损检测研究综述

迟大钊, 齐聪成

(哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 无损检测是保证焊接构件生产质量及保障其使用安全性的重要技术环节。在众多的无损检测方法中, 应用最为广泛的是基于声学的无损检测方法。主要阐述了超声 C 扫描、超声 TOFD、超声相控阵、声发射及其他相关声学技术的技术特点、在国内焊接领域上的工程应用及科学研究。在此基础上, 结合实验室的研究经历, 简要分析了相关研究方法存在的问题, 并指出了技术优势及亟待解决的问题。进而论述了超声 C 扫描图像识别困难、边界模糊及缺陷面积难以计算、克服检测盲区可拓展超声 TOFD 法的应用范围, 以及排除干扰信号对声发射尤为重要的研究现状。最后展望了基于声学无损检测的未来发展趋势。

关键词: 焊接缺陷; 无损检测; 声学; 综述

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.01.009

中图分类号: TG441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)01-0074-08

Research on NDT Based on Acoustic in Welding Defects Testing in China

CHI Da-zhao, QI Cong-cheng

(State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: Nondestructive testing (NDT) plays an important role in guaranteeing quality and operational security of weld component and structure. Among the nondestructive testing methods, NDT Based on Acoustic is the most widely used in weld defect detection. This paper mainly described technical characteristics, engineering applications and scientific research in domestic welding of ultrasonic C scanning, ultrasonic TOFD, ultrasonic phased array, acoustic emission and other related acoustic technologies. On this basis, in combination with research experience of our laboratory, this paper briefly analyzed the existing problems and pointed out the technological superiority and the urgent problem of relevant methods; and then discussed the fuzzy boundaries and difficulty of image recognition on ultrasonic C scan. Overcoming the detection blind area can expand the application scope of ultrasonic TOFD method. Eliminating interference signal was particularly important for acoustic emission. Finally, the future development trend of acoustic nondestructive testing was forecasted.

KEY WORDS: weld defects; nondestructive testing; acoustics; review

在焊接过程中, 由于焊接材料、施焊环境及工艺偏差等原因, 焊缝中常常会伴有焊接缺陷。焊接缺陷是导致焊接结构发生早期破坏并引发灾难性事故的根本原因之一。为了保证焊接构件的生产质量, 保障其使用安全及避免不必要的经济损失, 实施有效、可

靠的焊接缺陷无损检测十分必要。在广泛运用的无损检测技术中, 基于声学的无损检测技术更适合于焊接结构内部缺陷检测。声学检测技术具有检测范围广、检测深度大、传输速度快、对人体无害且方便使用等优势, 但受限于声学检测问题的复杂性、被检测焊接

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金 (51375002, 51005056)

作者简介: 迟大钊 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为焊接无损检测。

结构的特殊性,基于声学的无损检测方法仍存在很多亟待解决的科学与技术问题。目前,在超声C扫描、超声TOFD、超声相控阵、声发射及导波等方面,国内专家学者开展了大量的研究工作。

1 超声C扫描

超声C扫描可对工件内部的缺陷进行定位及定量检测,且检测精度较高,被广泛运用于钎焊、点焊、激光焊、电子束焊、扩散焊等焊接接头的缺陷检测。

王铮等人^[1]通过对多层钎焊件内层焊缝检测中产生的多重声束路径叠加现象进行详细分析,将信号门放置在合理的位置,实现了对等厚薄板钎焊结构内层焊缝的超声C扫描检测。熊鸿建等人^[2]采用超声水浸C扫描的方法来检测钎焊件焊接时存在的夹杂和未熔合等缺陷。杨蒙瑶等人^[3]采用C扫描实现了钎涂焊料与石墨基体结合情况的检测。罗明等人^[4]采用了C扫描检测了C/SiC复合材料与钛合金薄板钎焊焊接接头的质量。沙正骁等人^[5]针对金属蜂窝钎焊结构超声C扫描检测工艺不规范,难以有效定量评价焊缝质量的问题,开展了超声C扫描定量评价工艺研究。研究发现声束直径在蜂窝尺寸的0.7倍以下能够获得满足定量评价要求的C扫描图像。史立丰等人^[6]采用水浸超声聚焦回波检测法检测铝合金电阻点焊焊核直径。研究发现可以较准确地确定点焊的焊核直径。陈振华等人^[7]采用超声波C扫描成像方法来测量点焊焊核直径。同时,对焊核中常见的几种缺陷如气孔、裂纹、飞溅进行检测,根据C扫描获得的图像和信号特征,判断焊核内部缺陷的形状及类型。张龙等人^[8]基于C扫描图像对焊核直径进行了测量,发现超声波水浸聚焦入射法得到的C扫描图像能有效观测焊核内部形貌特征。研究发现,当焊接电流超过8000A,电极力小于2700N时,C扫描图像中清晰反映出了飞溅、焊穿等缺陷。周庆祥等人^[9]通过分辨薄板激光焊缝熔合区和非熔合区的C扫描图像来显示整条焊缝熔合情况。徐向群等人^[10]将超声波水浸C扫描用于电子束焊焊缝的检测。研究表明能够检测直径大于1mm的平底孔。张弛等人^[11]以钛合金为研究对象来研究超声C扫描对钛合金扩散焊接头小缺陷的检测能力。同时,研究了步进长度和检测频率对检测能力的影响。结果表明,使用较小的步进长度和较高的检测频率,可提高检测的准确度,但扩散焊界面存在大量接触型和微小型缺陷,采用超声C扫描法难以对其进行精确定量。

从上述的研究现状可以看出,超声C扫描在检测焊接构件的缺陷上运用广泛,检测结果也比较可靠,但超声C扫描也存在技术弊端,如图像识别困难、边界模糊及缺陷面积难以计算等问题。针对上述技术弊

端,国内学者开展了相关研究工作。刘静^[12]采用双三次图像插值细分重建了步长为1000 μm 的扫描图像,不仅提升了分辨率,还提高了扫描效率,可实现点焊接头超声C扫描的快速检测;在此基础上,对插值后的二维扫描图像进行图像增强、边缘检测处理,获得了清晰的熔核边界形貌。孙鑫宇等人^[13]提出了借助C扫描图像的灰度值变化特征测量焊核直径的方法。该方法避免了人为因素的影响,将该方法的测量值和实际值相对比,其结果具有较高的吻合度。刘海强等人^[14]针对C扫描检测钎焊焊缝时缺陷面积难以有效计算的问题,通过设置图像像素灰度值的阈值,将图像边界和周围背景环境进行分割,较好地计算出了钎焊焊缝的缺陷面积。

2 超声TOFD

超声TOFD法具有精度高、定位准以及信号接收不受缺陷位向的约束,能全方位多角度检测焊缝的各种缺陷的特点,被广泛运用于厚壁的焊接结构缺陷的检测。

史俊伟等人^[15]采用手动超声TOFD扫描成像系统对搅拌摩擦焊焊接接头进行超声TOFD扫描。研究发现可以很好地检出焊缝中的缺陷,证实了超声TOFD扫描适用于特种焊接构件,尤其是搅拌摩擦焊构件的缺陷识别和可视化检测技术研究。赵力等人^[16]分别采用了脉冲反射法和TOFD法,对缺陷进行了定位、定量的方法研究。研究发现对于具有方向性的缺陷,相对于常规超声波检测,TOFD检测精度更高;同时研究表明,通过脉冲反射法和TOFD法的技术互补,可获得理想的检测效果。彭国平等人^[17]采用超声TOFD-D扫描,成功表征了焊缝常见缺陷如侧壁未熔合、根部未焊透、气孔、裂纹等缺陷。同时,研究发现将超声TOFD-D扫描图像特征与超声TOFD检测信号特征相结合,可以提高对缺陷类型的识别能力。

虽然TOFD法以其独特的优势为检测人员所接受,但TOFD法也有技术弊端,如复杂几何工件检测困难、粗晶材料检测困难、图像识别和判读受人为因素影响大及存在检测盲区等。针对这些弊端,国内专家学者开展了相关研究,并对常规TOFD法进行有效补充与延伸。针对于TOFD的近表面缺陷的识别问题,胡怀辉^[18]分析了TOFD法的直通波的幅度分布特征,采用人工神经网络技术对近表面的缺陷进行自动识别,并将该技术用于对铝合金搅拌摩擦焊的接头近表面缺陷的检测。研究表明,能够实现准确、有效的缺陷自动识别,有效解决了TOFD法存在近表面缺陷检测盲区的问题。迟大钊等人^[19]提出一种纵波三次反射的TOFDW检测模式。研究发现TOFDW模式能够有效识别近表面缺陷,且对于埋藏深度为1.0mm的

缺陷, TOFDW 具有较高的量化检测精度, 对于近表面缺陷埋藏深度的测量, 平均绝对误差不超过 0.3 mm。励凯宏^[20]通过爬波 TOFD 检测法较好地补充了 TOFD 检测时表面的检测盲区。针对于 TOFD 对奥氏体焊缝的检测困难以及噪声的干扰问题, 张翀^[21]通过优化检测参数, 降低了柱状晶组织超声散射对检测信号的不利影响, 并开发了基于超声 TOFD-D 扫描的合成孔径聚焦算法, 有效地进一步抑制了噪声信号, 改善了缺陷的超声 TOFD-D 扫描成像结果。针对超声 TOFD 图像识别和判读困难的问题, 浙江大学的周红明^[22]采用了基于形态学与分水岭的组合式图像分割算法, 不仅保证了计算效率, 还实现了较高的分割精度, 较好解决了 TOFD 检测薄材焊缝缺陷的图像识别困难的问题。由于 TOFD 法检测信号相位特征的判断受限于检测系统的带宽及噪声信号的干扰, 缺陷信号的相位信息往往不易于识别。针对这一问题, 迟大钊等人^[23]采用一种基于谱外推的改进维纳逆滤波方法对超声 TOFD 法检测信号进行处理。研究表明, 基于谱外推的改进方法能有效提高信号的时间分辨力及提取与缺陷形态相关的相位信息, 从而为缺陷的定性识别及定量测量提供依据。

超声 TOFD 适合大型长、环焊缝的快速成像检测, 并在厚壁焊缝的检测中得到了很好的应用。通过开发基于超声 TOFD 的新方法, 可有效克服检测盲区以及图像识别困难等问题, 从而实现 TOFD 对大型薄壁及复杂结构焊缝的快速成像检测, 不仅拓展了这一先进技术的应用范围, 还提升了大型焊缝检测的有效性。

3 超声相控阵

超声相控阵由于其灵活的声束偏转及聚焦性能, 非常适合复杂几何工件的检测。上海航天精密机械研究所的王飞等人^[24]针对薄壁构件搅拌摩擦焊锁底焊缝结构件装机状态下检测空间狭小、焊缝厚度薄且结构复杂的检测难题, 采用内置 30°楔块的相控阵探头对该焊缝结构件进行检测。研究表明, 该方式能实现 3 mm 厚铝合金搅拌摩擦焊锁底结构焊缝内部缺陷的检测。沈阳航空航天大学的易冠英等人^[25]采用扇形扫描方式对搅拌摩擦焊焊缝进行检测, 确定了低通-高通滤波及激发晶片数等关键参数, 实现了隧道缺陷及未焊透缺陷的检测, 且在隧道缺陷的深度检测上, 误差仅有 2%左右。首都航天机械公司的张丽娜等人^[26]采用超声相控阵对典型的搅拌摩擦焊的焊缝缺陷进行了检测。结果表明, 对于搅拌摩擦焊焊缝缺陷, 超声相控阵检测技术检测能力强, 可准确检测出面积型缺陷及体积型缺陷。南车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司的万升云等人^[27]研究发现, 超声相控阵检测

技术能够可靠地检测联轴节电子束焊焊缝内部缺陷和熔透深度。

在对相控阵检测所得图像的处理研究上, 福州大学的黄跃鑫等人^[28]将超声相控阵检测所得图像所对应的信号进行小波分析, 有效抑制了图像中部分干扰信号的影响, 同时比较完整地保留图像中熔合界面和冷焊特征线的位置信息, 实现了聚乙烯管道电熔接头冷焊缺陷的自动识别。南昌航空大学的汪良华^[29]通过相控阵检测图像在缺陷特征、位置和 A 扫波形等方面的差异分析, 归纳总结了每一类缺陷的相控阵检测图谱, 成功识别了承压设备对接焊缝的气孔、裂纹及未焊透等缺陷。刘志浩^[30]将超声相控阵技术与三维可视化成像技术有机结合, 并基于区域增长技术的混合绘制法来实现三维缺陷重构, 实现了对接焊缝典型缺陷的图谱特征的判别, 为超声相控阵三维成像检测技术的普及和发展提供参考。

在常规超声法难于检测的摩擦焊, 特别是搅拌摩擦焊的接头缺陷检测上, 相控阵技术是潜在的行之有效的方法, 但相关研究还需进一步深入。随着超声相控阵检测效率及检测精度的不断提升, 定会使相控阵检测技术在工程上发挥更重要的作用。

4 声发射

声发射检测技术不同于常规检测方法, 其原因是能够动态地检测缺陷的形成, 比如焊接过程中裂纹的形成及扩展等, 且能够获得缺陷形成过程中实时、连续的信号^[31]。另外, 声发射检测的材料种类范围广, 大多数材料都可以成为声发射源。

袁少波^[32]通过分析焊接裂纹声发射信号的频率谱, 发现裂纹元的形成与声发射波形的密集程度有直接关系。重庆理工大学的朱洋等人^[33]利用焊接过程检测到的结构负载声发射信号来表征激光和微束等离子弧两种热源复合的稳定性特征和复合效果。研究表明, 声发射信号的时域特征波形与焊接过程表现出良好的相关关系。华东理工大学的孙国豪等人^[34]对含气孔、条渣、未焊透及无缺陷试样进行了声发射信号的计数、能量和幅值的分布特点及其相关性的分析, 得出了不同缺陷的特征参数分布特点和各参数之间的相关性。北京化工大学的柏青等人^[35]将声发射技术用于摩擦叠焊焊接工艺监测并利用声发射技术监测焊接过程的平稳性来保证焊接质量。

声发射检测技术能否成功地应用于焊接构件, 在于能否除去声发射检测信号中的干扰噪声信号, 只显示有价值的信息。针对这一问题, 重庆大学的吴小俊^[36]用信号处理手段来分析钢焊接接头和铸铁件的声发射信号, 根据裂纹信号的特征, 设计了滤波函数排除了较明显的干扰频率, 并进行了小波分解和重构,

为实现声发射检测技术应用于焊接过程的裂纹监测提供了良好基础。湖南科技大学的周志鹏^[37]将同步压缩小波算法与连续小波变换分别用于焊接过程裂纹声发射信号的处理, 研究表明同步压缩小波算法较小波分析能够更加真实地反映信号的时间-频率关系, 较好解决了时频图分辨率精度不足等问题。福州大学的熊亚飞^[38]通过对比不同的时频分析方法, 发现虽然他们在时域和频域上表征出相似的信号特征, 但在时频分辨率上相差很大, 而由于较高的时频聚集性以及对于干扰信号的有效排除, 希尔伯特-黄变换在时频分辨率和局部的时频特性表现能力上更具优势。

能进行实时监测是声发射检测技术的优势所在, 但由于在焊接过程中, 该技术容易受到干扰噪声的影响又限制了其运用。若在焊接缺陷监测过程中对排除干扰信号进行更为深入的研究, 将会使声发射检测技术更广泛地运用于焊接缺陷的检测。

5 其他声学方法

5.1 超声导波

超声导波检测由于传播距离长、无盲区、且可实现全方位检测的特点, 引起了世界范围内广泛的研究。无损检测中的超声导波主要有 Lamb 波、Rayleigh 波、棒波等^[39—40]。由自身特性所决定, 导波适合用于薄板焊接结构缺陷的检测。清华大学的朱新杰等人^[41]通过设置合理斜楔角度、压电晶片频率及尺寸等导波换能器的重要参数, 设计研发了导波换能器。研究发现, 该导波换能器有效减弱了内部的回波干扰, 提高了检测效果, 可实现对焊缝及 T 型焊缝的检测, 能够准确地检测到焊接构件中与导波的波长尺寸量级相当的缺陷, 为开展较大尺度焊接结构超声导波成像检测奠定了基础。南昌航空大学的盛华吉^[42]采用导波对轨底铝热焊缝中缺陷进行检测。研究表明, 当焊缝中存在缺陷时, 其导波反射回波具有与余高不同的信号频谱特征, 且采用横向振动模态轨底导波比垂直振动模态导波更容易检测出焊缝中的缺陷。江苏大学的张伟^[43]建立了导波检测系统, 并基于导波模态对称检测理论设计了模态对称算法, 用于管道近焊区缺陷的识别。由于导波中的 Lamb 波频散及多模态特性, 在用于检测复杂的焊接构件颇具难度。针对这一问题, 哈尔滨工业大学的刘强^[44]通过激励单一模态的 Lamb 波, 发现 A_0 模态对薄壁栅格激光焊接接头的检测效果最为理想, 能有效识别 $0.01\text{ mm} \times 0.8\text{ mm}$ 的未焊透缺陷。导波检测技术还存在很多难题, 如频散、多模态以及与缺陷体作用后的模态转换问题等, 使导波不能最大限度地用于工程实际, 并且当焊接缺陷较多时, 导波回波信号将变得难以识别。在导波理论、检

测机理深入研究的基础上, 对焊接缺陷检测回波进行信号分析及模式识别, 将会提升导波在焊接结构缺陷检测中的应用价值。

5.2 非线性超声

非线性超声检测技术能够用来检测可以引起线性声学性质变化的缺陷, 可适用于复杂形状的零件、复合材料结构以及大型结构的检测, 且可以用来预测材料失效行为, 有效地补充和扩展了传统线性超声检测技术的应用范围。由于非线性超声对材料中的损伤如位错、滑移等较敏感, 华东理工大学的张剑锋^[45]将之运用于奥氏体不锈钢等工程结构材料和设备的检测。通过对奥氏体不锈钢的疲劳、拉伸以及棘轮损伤的检测研究, 为非线性超声技术用于奥氏体不锈钢设备的损伤早期检测与评价提供了基础。哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室开展了非线性超声焊接缺陷检测研究。刚铁等人^[46]采用非线性超声来扩散焊接头的缺陷, 研究发现, 能够用来检测弱结合缺陷, 且非线性效应最高, 而焊接良好界面和未焊合缺陷的超声非线性响应较弱。赵立彬等人^[47]对 6061 铝合金板多层多道对接弧焊接头进行非线性超声检测, 发现垂直透射时对裂纹检测不敏感, 而闭合裂纹的端面透射和倾斜透射法非线性效应较高。万楚豪等人^[48]对 U71Mn 钢闪光对焊接头的疲劳损伤进行非线性超声检测, 研究表明母材的非线性系数低于焊接接头, 说明非线性超声响应的程度与组织是否均匀有关, 并利用非线性超声对轨道钢材和接头的疲劳损伤程度做出评估, 这对目前的铁路安全运行具有重要意义。非线性超声检测技术目前正处于发展的关键阶段, 在复杂焊接结构的缺陷定性定量检测以及如何运用于工程实际等方面还具有广阔的研究空间。

5.3 非接触式超声

非接触式超声无需耦合剂, 能灵活地产生各类波形, 对被探工件表面质量要求不高, 使该检测技术具有较好的发展前景。目前用于检测焊接缺陷的非接触式超声方法主要是激光超声和电磁超声。上海交通大学的郑德根等人^[49]采用激光超声对 2219 铝合金 FSW 焊缝的根部未焊合、隧道孔这两种典型缺陷进行检测。研究表明, 基于激光超声检测的时、频域特征能够对这两种典型缺陷进行有效识别, 从而为铝合金 FSW 缺陷检测提供一种技术途径。南京航空航天大学的曾伟等人^[50]针对常规的超声波成像方法不能有效检测奥氏体不锈钢焊缝边界及焊缝中缺陷的问题, 采取了离散正弦/余弦变换和希尔伯特变换相结合的激光超声波成像技术对该焊缝进行检测。结果表明, 该技术不仅能直观、高效地检测出焊缝边界, 且对焊缝中的缺陷位置、大小及形状等也能有效检测。中国

石油天然气管道通信电力工程总公司的杨依光等人^[51]为了实现油气管道焊缝缺陷的快速准确检测,提出了利用脉冲激光激励超声的焊缝缺陷检测方法。研究表明,该超声检测装置可有效抑制低频环境振动引起的信号噪声,对粗糙表面的超声波信号具有很高的探测灵敏度。中国石油天然气股份有限公司的赵万里等人^[52]提出一种低频振动环境下,基于激光超声的油气管道焊缝缺陷检测方法。研究表明,该方法能够对油气管道中的缺陷位置、大小做出精确的判断和检测。西北核技术研究所的吕香慧等人^[53]采用电磁超声换对 16MnR 带有机涂层的人工裂纹试件和预埋有焊接缺陷的焊缝试件进行检测。结果表明,随着涂层厚度的增加,缺陷波幅值明显降低,可能会导致缺陷的漏检。西安交通大学的肖盼等人^[54]采用了数值模拟的方法对钨块-铜管热等静压焊接界面进行管外施加偏置磁场的电磁超声检测,研究表明纵波探头更适合用来检测该焊接界面的缺陷。为电磁超声信号对缺陷进行定量的检测提供了一种途径。虽然激光超声和电磁超声无需耦合,且能适应恶劣的条件具有很好的发展前景,但也存在技术弊端,如激光能量到超声能量的转换效率问题、激光超声信号检测灵敏度问题以及电磁超声的激发和接受的效率较低,尚需进行更加深入的研究,才能使激光超声技术和电磁超声技术的发展和前景更加广泛。

6 结论

声学无损检测技术作为快速、有效、绿色环保的焊接缺陷检测方法,在现代工业中得到了广泛的应用,为焊接结构设计及使用安全性提供了技术支持。随着现代工业对焊接质量要求的不断提升,声学检测技术也在不断地深入研究及推广应用。随着计算机、信号图像处理以及人工智能技术的发展,通过将声学检测技术与先进的信息处理、自动控制等技术进一步结合,将促使焊接质量无损检测自动化、智能化及实时性的发展进程。基于声学的无损检测技术在未来的工业建设中将发挥更为重要的作用。

参考文献:

- [1] 王铮, 史亦韦. 多层钎焊结构件超声 C 扫描信号特征分析[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 357—358.
WANG Zheng, SHI Yi-wei. Characteristic Analysis of Ultrasonic C Scanning Signals for Multilayer Brazed Structures[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 357—358.
- [2] 熊鸿建, 涂俊, 邬冠华, 等. 破碎机用铸铁与钢衬板钎焊层钎着状态的超声检测[J]. 无损检测, 2017, 39(2): 13—17.
- [3] 杨蒙瑶, 陈焕文, 郭建军, 等. 石墨/镍基金属钎涂层界面结构分析及性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 120—124.
YANG Meng-yao, CHEN Huan-wen, GUO Jian-jun, et al. Interface Structure Analysis and Properties of Graphite/Nickel Based Metal Brazing Coating[J]. Journal of Welding, 2017, 38(2): 120—124.
- [4] 罗明, 张颖, 吴时红, 等. 超声 C 扫描在 C/SiC 复合材料与钛合金薄板钎焊质量中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(6): 87—90.
LUO Ming, ZHANG Ying, WU Shi-hong, et al. Application of Ultrasonic C Scanning in Brazing Quality of C/SiC Composite and Titanium Alloy Sheet[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(6): 87—90.
- [5] 沙正晓, 梁菁, 史亦韦. 金属蜂窝钎焊结构焊缝质量的超声 C 扫描定量评价工艺[J]. 焊接学报, 2016, 37(12): 110—114.
SHA Zheng-xiao, LIANG Jing, SHI Yi-wei. Ultrasonic C Scanning Quantitative Evaluation Process for Weld Quality of Metal Honeycomb Brazed Structures[J]. Journal of Welding, 2016, 37(12): 110—114.
- [6] 史立丰, 郑祥明, 史耀武. 超声 C 扫描检测铝合金电阻点焊的焊核直径[J]. 无损检测, 2004, 26(1): 34—36.
SHI Li-feng, ZHENG Xiang-ming, SHI Yao-wu. Determination of Nugget Diameter of Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy by Ultrasonic C Scanning[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(1): 34—36.
- [7] 陈振华, 史耀武, 赵海燕. 薄镀锌钢板点焊超声成像分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 274—278.
CHEN Zhen-hua, SHI Yao-wu, ZHAO Hai-yan. Ultrasonic Imaging Analysis of Spot Welding of Thin Galvanized Steel Sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 274—278.
- [8] 张龙, 曾凯, 何晓聪, 等. SUS304 奥氏体不锈钢板点焊接头的超声成像分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 65—68.
ZHANG Long, ZENG Kai, HE Xiao-cong, et al. Ultrasonic Imaging Analysis of Spot Welded Joint of SUS304 Austenitic Stainless Steel Plate[J]. Journal of welding, 2017, 38(6): 65—68.
- [9] 周庆祥, 韩晓辉, 詹发福, 等. 基于超声 C 扫描成像检测薄板搭接激光焊缝的研究[J]. 金属加工(冷加工), 2016(S1): 238—240.
ZHOU Qing-xiang, HAN Xiao-hui, ZHAN Fa-fu, et al. Study on Laser Lap Welding of Sheet Metal Based on Ultrasonic C Scanning Imaging[J]. Metal Processing (Cold Working), 2016(S1): 238—240.
- [10] 徐向群, 倪培君, 张唯国. 电子束焊焊缝超声 C 扫描检测技术研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(4): 70—74.
XU Xiang-qun, NI Pei-jun, ZHANG Wei-guo. Research

- on Ultrasonic C Scanning Testing Technology of Electron Beam Welding Seam[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2007, 30(4): 70—74.
- [11] 张弛, 栾亦琳, 罗志伟, 等. 扩散焊接头缺陷超声 C 扫描检测能力分析[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 83—86.
ZHANG Chi, LUAN Yi-lin, LUO Zhi-wei, et al. Ultrasonic C Scanning Capability Analysis of Diffusion Welded Joint Defects[J]. Journal of Welding, 2016, 37(9): 83—86.
- [12] 刘静. 不锈钢电阻点焊质量超声波定量及智能化检测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 35—103.
LIU Jing. Ultrasonic Quantitative and Intelligent Testing of Stainless Steel Resistance Spot Welding[D]. Changchun: Jilin University, 2015: 35—103.
- [13] 孙鑫宇, 曾凯, 张龙. 点焊接头超声 C 扫描图像分析及焊核直径测量[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(1): 77—80.
SUN Xin-yu, ZENG Kai, ZHANG Long. Spot Welding Joint of Ultrasonic C Scanning Image Analysis and Nugget Diameter Measurement[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(1): 77—80.
- [14] 刘海强, 董德秀. 钎焊超声 C 扫描图像缺陷面积计算方法[J]. 无损检测, 2014, 36(2): 53—55.
LIU Hai-qiang, DONG De-xiu. Calculation Method of Defect Area in Brazed Ultrasonic C Scanning Images[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(2): 53—55.
- [15] 史俊伟, 刘松平. 搅拌摩擦焊焊缝超声 TOFD 检测与缺陷评估方法[C]// 全国无损检测学术年会, 2010: 1—3.
SHI Jun-wei, LIU Song-ping. Ultrasonic TOFD Testing and Defect Evaluation Method for Friction Stir Welding[C]// National Conference on Nondestructive Testing, 2010: 1—3.
- [16] 赵力, 马毛东. SSAW 焊管超声检测试验研究[J]. 辽宁化工, 2014(11): 1398—1400.
ZHAO Li, MA Mao-dong. Experimental Study on Ultrasonic Testing of SSAW Welded Pipe[J]. Liaoning Chemical Industry, 2014(11): 1398—1400.
- [17] 彭国平, 陈振华, 叶伟文, 等. 钢制对接焊缝内部缺陷类型的超声 TOFD-D 扫描图像表征[J]. 失效分析与预防, 2016, 11(5): 293—299.
PENG Guo-ping, CHEN Zhen-hua, YE Wei-wen, et al. Characterization of Internal Defects in Steel Butt Welds by Ultrasonic TOFD-D Scanning Images[J]. Failure Analysis and Prevention, 2016, 11(5): 293—299.
- [18] 胡怀辉. 基于超声 TOFD 的搅拌摩擦焊近表面缺陷识别与检测信号特征研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014: 25—38.
HU Huai-hui. Identification and Detection of Near Surface Defects in Friction Stir Welding based on Ultrasonic TOFD[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014: 25—38.
- [19] 迟大钊, 刚铁, 姚英学, 等. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 25—28.
CHI Da-zhao, GANG Tie, YAO Ying-xue, et al. A Near Surface Defect Detection Model Based on Ultrasonic TOFD Method[J]. Journal of Welding, 2011, 32(2): 25—28.
- [20] 励凯宏. 衍射时差法超声检测技术在压力容器检验中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016: 11—41.
LI Kai-hong. Application of Ultrasonic Testing of TOFD in Testing of Pressure Vessel[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016: 11—41.
- [21] 张翀. 奥氏体不锈钢焊缝超声 TOFD 检测的关键技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016: 23—50.
ZHANG Chong. Study on Key Technologies of Ultrasonic TOFD Testing for Austenitic Stainless Steel Weld Seam[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016: 23—50.
- [22] 周红明. 薄材焊缝自动化超声 TOFD 成像检测关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 38—98.
ZHOU Hong-ming. Research on Key Technologies of Automatic Ultrasonic TOFD Imaging for Thin Welding Seam[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 38—98.
- [23] 迟大钊, 刚铁, 高双胜. 超声 TOFD 法检测信号相位识别技术[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 17—20.
CHI Da-zhao, GANG Tie, GAO Shuang-sheng. Phase Identification Technique of Signal by Ultrasonic TOFD Method[J]. Journal of Welding, 2011, 32(9): 17—20.
- [24] 王飞, 涂俊, 危荃, 等. 某薄壁构件搅拌摩擦焊锁底焊缝的超声相控阵检测[J]. 无损检测, 2017, 39(5): 17—20.
WANG Fei, TU Jun, WEI Quan, et al. Ultrasonic Phased Array Testing of the Bottom Welding Seam of Friction Stir Welding of a Thin Wall Component[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(5): 17—20.
- [25] 易冠英. 铝合金搅拌摩擦焊接头缺陷的无损检测研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016: 35—49.
YI Guan-ying. Nondestructive Testing of Friction Stir Welded Joint Defects of Aluminum Alloy[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016: 35—49.
- [26] 张丽娜, 赵衍华, 朱瑞灿, 等. 2219 铝合金搅拌摩擦焊焊缝相控阵超声波无损检测[J]. 焊接, 2016(7): 44—47.
ZHANG Li-na, ZHAO Yan-hua, ZHU Rui-can, et al. Ultrasonic Phased Array Nondestructive Testing of Friction Stir Welding of 2219 Aluminum Alloy[J]. Welding, 2016(7): 44—47.
- [27] 万升云, 章文显, 刘仕远, 等. 联轴节电子束焊缝超声相控阵检测技术[J]. 电焊机, 2011, 41(11): 84—87.
WAN Sheng-yun, ZHANG Wen-xian, LIU Shi-yuan, et al. Ultrasonic Phased Array Testing Technology for Joint Electron Beam Welding Seam[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(11): 84—87.
- [28] 黄跃鑫, 钟舜聪, 伏喜斌, 等. 基于小波分析的聚乙烯管道电熔接头冷焊缺陷识别[J]. 无损探伤, 2015, 39(1): 6—10.
HUANG Yue-xin, ZHONG Shun-cong, FU Xi-bin, et al. Wavelet Analysis of Polyethylene Pipe Welding Joints Cold Welding Defect Recognition[J]. Nondestructive Inspection, 2015, 39(1): 6—10.
- [29] 汪良华. 承压设备对接焊缝超声相控阵检测图谱分析

- [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014: 17—53.
- WANG Liang-hua. Analysis of Ultrasonic Phased Array Testing Pattern for Butt Welding Seam of Pressure Equipment[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014: 17—53.
- [30] 刘志浩. 对接焊缝的超声相控阵检测及三维成像分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016: 21—59.
- LIU Zhi-hao. Ultrasonic Phased Array Testing and 3D Imaging Analysis of Butt Welding Seam[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016: 21—59.
- [31] ZHANG Z L, THAULOW C, DEGARD J. A complete Gurson model approach for ductile fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 67(45): 155—168.
- [32] 袁少海. 手工电弧焊焊后裂纹声发射监测分析[J]. 中国特种设备安全, 2008(9): 48—53.
- YUAN Shao-hai. Monitoring and Analysis of Acoustic Emission from Welding Cracks after Manual Arc Welding[J]. China Special Equipment Safety, 2008(9): 48—53.
- [33] 朱洋, 罗怡, 谢小健, 等. 激光-微束等离子弧复合焊接过程的结构负载声发射信号表征[J]. 焊接学报, 2016, 37(9): 96—100.
- ZHU Yang, LUO Yi, XIE Xiao-jian, et al. Structural Acoustic Emission Signal Characterization during Laser-Microbeam Plasma Arc Welding[J]. Journal of Welding, 2016, 37(9): 96—100.
- [34] 孙国豪, 柏明清, 王希, 等. 缺陷试板拉伸过程声发射信号特性的相关性分析[J]. 无损检测, 2010, 32(8): 623—626.
- SUN Guo-hao, BO Ming-qing, WANG Xi, et al. Acoustic Emission Characteristic Relativity Analysis of Defective Plate During Tensile Test[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(8): 623—626.
- [35] 柏青, 周灿丰, 高辉, 等. 摩擦叠焊工艺中声发射技术的应用前景[J]. 新技术新工艺, 2014(7): 73—76.
- BO Qing, ZHOU Can-feng, GAO Hui, et al. Application Prospect of Acoustic Emission Technology in Friction Welding Process[J]. New Technology and Process, 2014(7): 73—76.
- [36] 吴小俊. 声发射技术在焊接裂纹检测中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 16—58.
- WU Xiao-jun. Application of Acoustic Emission Technique in Welding Crack Detection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008: 16—58.
- [37] 周志鹏. 同步压缩小波变换在焊接裂纹声发射信号检测中的应用[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016: 33—64.
- ZHOU Zhi-peng. Application of Synchronous Compression Wavelet Transform in Acoustic Emission Signal Detection of Welding Crack[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016: 33—64.
- [38] 熊亚飞, 李强, 叶辉. Q345R 钢焊接缺陷声发射信号的时频分析[J]. 无损检测, 2014, 36(9): 19—24.
- XIONG Ya-fei, LI Qiang, YE Hui. Time and Frequency Analysis of Acoustic Emission Signals for Welding Defects of Q345R Steel[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(9): 19—24.
- [39] 刘镇清. 超声无损检测中的导波技术[J]. 无损检测, 1999(8): 367—369.
- LIU Zhen-qing. Guided Wave Technology in Ultrasonic Nondestructive Testing[J]. Nondestructive Testing, 1999(8): 367—369.
- [40] CHEONG Y M, LEE D H, JUNG H K. Ultrasonic Guided Wave Parameters for Detection of Axial Cracks in Feeder Pipes of PHWR Nuclear Power Plants[J]. Ultrasonics, 2004, 42(1): 883—888.
- [41] 朱新杰, 陈以方, 韩赞东, 等. 一种用于焊接结构超声成像检测的 SH 导波换能器[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 17—21.
- ZHU Xin-jie, CHEN Yi-fang, HAN Zan-dong, et al. A SH Guided Wave Transducer for Ultrasonic Imaging Testing of Welded Structures[J]. Journal of Welding, 2013, 34(2): 17—21.
- [42] 盛华吉. 钢轨轨底斜裂纹及焊缝的导波检测方法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016: 41—69.
- SHENG Hua-ji. Research on Rail Bottom Rail Oblique Crack and Weld Wave Guided Wave Detection Method[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016: 41—69.
- [43] 张伟, 姜银方, 严有琪, 等. 基于导波模态对称曲线的管道近焊区缺陷识别[J]. 电子科技, 2015, 28(8): 160—163.
- ZHANG Wei, JIANG Yin-fang, YAN You-qi, et al. Defect Identification in Near Welding Zone of Pipeline Based on Guided Wave Modal Symmetry Curve[J]. Electronic Technology, 2015, 28(8): 160—163.
- [44] 刘强. 不锈钢薄板激光焊接接头的 Lamb 波检测与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 9—10.
- LIU Qiang. Detection and Simulation of Lamb Wave in Laser Welded Joint of Stainless Steel Sheet[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 9—10.
- [45] 张剑锋. 奥氏体不锈钢服役损伤的非线性超声检测与评价研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 36—90.
- ZHANG Jian-feng. Nonlinear Ultrasonic Testing and Evaluation of Austenitic Stainless Steel Service Damage[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014: 36—90.
- [46] 叶佳龙, 刚铁. 304 不锈钢扩散焊界面的超声非线性成像[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 95—99.
- YE Jia-long, GANG Tie. Ultrasonic Nonlinear Imaging of 304 Stainless Steel Diffusion Bonding Interface[J]. Journal of Welding, 2014, 35(5): 95—99.
- [47] 赵立彬. 铝合金焊接接头疲劳损伤的非线性超声检测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 30—58.
- ZHAO Li-bin. Nonlinear Ultrasonic Testing of Fatigue Damage of Aluminum Alloy Welded Joint[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 30—58.
- [48] 万楚豪. U71Mn 钢焊接接头疲劳损伤的非线性超声检测[D]. 哈尔滨工业大学, 2016: 63—108.
- WAN Chu-hao. Nonlinear Ultrasonic Testing of Fatigue Damage of Welded Joint of U71Mn Steel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 63—108.

- [49] 郑德根, 陈华斌, 王继锋, 等. 基于激光超声的铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷检测及分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 35—38.
ZHENG De-gen, CHEN Hua-bin, WANG Ji-feng, et al. Laser Ultrasonic Testing and Analysis of Typical Defects in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy[J]. Journal of Welding, 2015, 36(7): 35—38.
- [50] 曾伟, 王海涛, 田贵云, 等. 激光超声波成像技术在奥氏体不锈钢焊缝检测中的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 67—71.
ZENG Wei, WANG Hai-tao, TIAN Gui-yun, et al. Research on Laser Ultrasound Imaging in Detection of Austenitic Stainless Steel Weld[J]. China Laser, 2014, 41(7): 67—71.
- [51] 杨依光, 赵锋, 王飞, 等. 管道壁厚及焊缝缺陷激光超声检测技术[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 751—754.
YANG Yi-guang, ZHAO Feng, WANG Fei, et al. Laser Ultrasonic Detection Technology of Pipe Wall Thickness and Weld Defects[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 751—754.
- [52] 赵万里, 李灿, 吴桐. 油气管道焊缝缺陷的激光超声检测[J]. 激光杂志, 2017(8): 24—27.
ZHAO Wan-li, LI Chan, WU Tong. Laser Ultrasonic Testing of Weld Defects in Oil and Gas Pipelines[J]. Laser Journal, 2017(8): 24—27.
- [53] 吕香慧, 张宇, 楼森, 等. 带涂层焊缝的电磁超声检测[J]. 煤矿机械, 2012, 33(3): 267—269.
LYU Xiang-hui, ZHANG Yu, LOU Miao, et al. Electromagnetic Ultrasonic Testing of Coated Welding Seam[J]. Coal Mine machinery, 2012, 33(3): 267—269.
- [54] 肖盼, 杨桂才, 裴翠祥, 等. 钨块-铜管热等静压焊接界面电磁超声检测的数值模拟[J]. 无损检测, 2015, 37(11): 18—21.
XIAO Pan, YANG Gui-cai, FEI Cui-xiang, et al. Numerical Simulation of Electromagnetic Ultrasonic Testing of Tungsten Block Copper Tube Under Hot Isostatic Welding[J]. Nondestructive testing, 2015, 37(11): 18—21.