

北京航空航天大学学报
Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics
ISSN 1001-5965,CN 11-2625/V

《北京航空航天大学学报》网络首发论文

题目：扩散焊超声无损检测与评价方法研究综述
作者：周正干，楚怡淳，周文彬
DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0304
收稿日期：2026-05-22
网络首发日期：2026-09-14
引用格式：周正干，楚怡淳，周文彬. 扩散焊超声无损检测与评价方法研究综述[J/OL]. 北京航空航天大学学报. https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0304



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

扩散焊超声无损检测与评价方法研究综述

周正干，楚怡淳，周文彬✉

（北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191）

*通信作者 E-mail:zhouwb@buaa.edu.cn

摘要 扩散焊凭借焊接精度高、变形小等优势，广泛应用于航空航天等高端制造领域。受到工艺参数及表面状态等因素的影响，扩散焊界面易产生未焊合、微孔洞及弱结合等微观缺陷，严重威胁产品的服役性能。超声检测技术凭借其穿透性强、检测效率高等优点，在扩散焊界面无损检测中有广泛应用。介绍了扩散焊界面常见缺陷的形成机理及超声响应特点，分别总结了单探头水浸超声、相控阵超声及非线性超声在界面缺陷识别中的应用现状，系统阐述了理论建模及仿真研究、超声特征信号提取、界面缺陷识别与性能映射等界面超声信号分析方法，并针对厚度、几何形状、内部组织特殊的扩散焊结构，总结了当前研究的主要技术方法与局限性。总结了当前超声无损检测技术在扩散焊界面质量评价中面临的挑战，并探讨了未来发展趋势。

关键词 [键入文字]扩散焊；无损检测；超声检测；缺陷识别；信号分析

中图分类号 V467；TB553 文献标志码 A DOI: DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2026.0304

Review on ultrasonic nondestructive testing and evaluation methods for diffusion bonding

ZHOU Zhenggan,CHU Yichun,ZHOU Wenbin✉

（1.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China）

*E-mail: zhouwb@buaa.edu.cn

Abstract Diffusion bonding is widely employed in high-end manufacturing fields, such as aerospace, owing to its high dimensional accuracy and minimal deformation. Influenced by process parameters and surface conditions, the bonded interface is susceptible to microscopic defects , such as lack of bonding, micro-voids, and kissing bonds, which severely degrade the service performance of the joints. Ultrasonic testing, characterized by strong penetration capability and high efficiency, is extensively applied to the nondestructive testing of diffusion bonding. This paper reviews the formation mechanisms of typical interfacial defects in diffusion bonding and their ultrasonic response characteristics, and summarizes the current applications of single-probe water immersion ultrasonic testing, phased array ultrasonics, and nonlinear ultrasonics for interfacial defect identification. Ultrasonic signal analysis methods are then systematically elaborated, including theoretical modeling and simulation, feature extraction, defect identification, and interfacial property evaluation. Considering diffusion bonding structures with special thicknesses, geometries, and internal microstructures, the applicability and limitations of current techniques are discussed. Finally, current challenges in ultrasonic nondestructive evaluation of diffusion bonding are summarized, and future research directions are discussed.

Key words diffusion bonding; non-destructive testing; ultrasonic testing; defect identification; signal analysis

扩散焊是一种典型的固相焊接方法，将两待焊母材置于特定的温度与压力条件下，保持紧密接触，使界面发生塑性变形，界面原子间产生互相扩散与键合，最终实现牢固的冶金结合[1-3]。该工艺

收稿日期：2026-05-22

基金项目：国家自然科学基金（52275516）；

Fund：Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52275516)

网络首发时间：2026-09-14 09:10:03 网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20260911.1734.002

被广泛用于钛合金、不锈钢、铝合金、陶瓷等同种或异种材料的连接中，具有焊接精度高、变形小的特点，在理化性能差异大的异种材料的可靠连接中发挥出明显优势，在航空航天、电子等领域中都发挥着不可或缺的作用[1-2,4]。

作为一种对表面状态和工艺参数敏感的焊接方法，扩散焊在制造过程中易受到表面粗糙度、温度、压力等因素的影响，若控制不当，焊接界面将产生未焊合、微孔洞以及弱结合等缺陷。这些缺陷通常具有微小、紧贴、弥散的特征，是力学性能下降与疲劳断裂的主导因素[3,5-6]。扩散焊界面缺陷通常隐蔽性高，常规的破坏性抽检手段难以全面保障扩散焊构件的服役安全性。因此，开发高精度、高可靠性的无损检测（nondestructive testing, NDT）技术以实现扩散焊结构的质量评价具有重要的工程意义。

在众多无损检测技术中，超声无损检测技术（ultrasonic testing, UT）利用超声波在材料内部传播时，与缺陷发生相互作用后，产生的反射、透射、折射、衰减等声学现象，实现对缺陷类型、位置、几何特征等信息的有效表征[7]。该方法不破坏被检对象的理化状态，具有安全、穿透力强、检测效率高等优点，是对焊接界面进行检测与评估的良好手段[8]。在扩散焊的主要界面缺陷中，毫米级的宏观未焊合缺陷由于脱开高度更明显，含有较大的空气隙，会产生更明显的超声回波，通常通过超声回波幅值变化即可被检测出。然而，扩散焊界面也易出现间隙仅为微米级的脱开[9]，此时界面在宏观上通常仍处于物理紧密贴合的状态，声波在经过时其幅值变化与良好焊接界面相比不会产生明显差异，因此通常难以通过传统的 C 扫描成像与声波幅值曲线实现精确识别，针对这两者的识别与表征，是扩散焊超声检测的一个研究重点。在异种金属扩散焊中，母材间的声阻抗失配会产生强烈的结构回波，极易掩盖微弱的缺陷信号[10-11]。此外，随着工业构件日益向薄壁结构、变截面几何结构以及强各向异性内部组织材料等发展，这些对象所带来的声束混叠、几何伪影以及声束畸变现象，使得常规的超声检测方法面临挑战。

近年来，为突破上述检测难点，扩散焊超声检测技术正围绕界面声学特性发掘、超声检测与成像技术创新、界面信号提取与分析等多个方面不断研究发展。为了系统梳理该领域的研究进展与发展情况，本文围绕扩散焊界面缺陷的超声无损检测与评价技术展开综述。从扩散焊主要的缺陷类型及形成机理出发，探讨了扩散焊界面的超声响应特性，围绕主要的超声检测技术（水浸、相控阵、非线性）、界面质量信号分析方法（理论建模、特征提取、力学映射、缺陷分类）进行梳理，同时面对厚度受限、复杂几何以及各向异性组织等特殊扩散焊结构，总结了主要的超声检测技术方法，并对未来发展趋势进行了展望。本文旨在为扩散焊结构的高精度超声无损评价、信号处理算法优化以及工业应用提供参考。

1 扩散焊界面典型缺陷及其超声响应特性

1.1 扩散焊原理与缺陷形成机理

扩散焊焊接界面的形成本质上是微观孔隙在温度和压力作用下逐渐闭合的过程[4,12-14]。如图 1 所示，待焊表面微观不平整处局部物理接触，再在特定温压场中产生塑性变形并实现紧密贴合，界面两侧原子发生相互扩散与晶界迁移，形成金属键，在这种持续的扩散作用下，微观间隙消除，组织之间实现均匀化与牢固连接[9]。

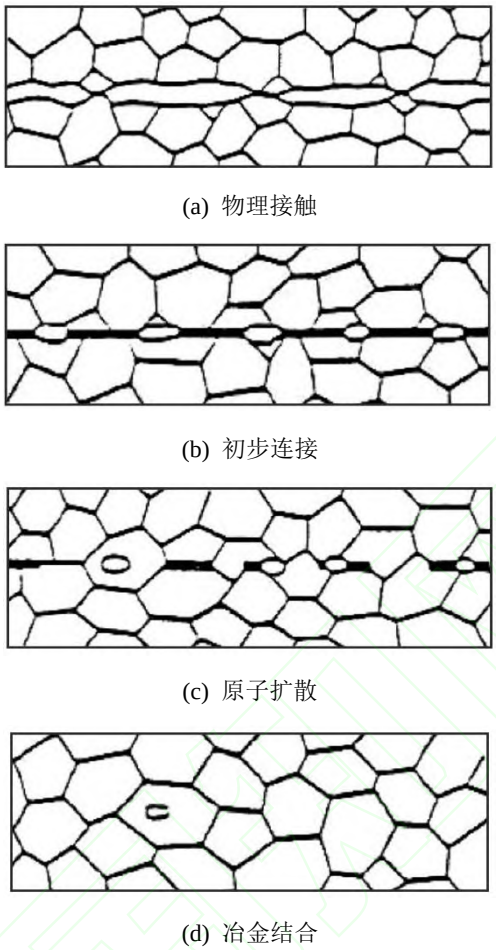


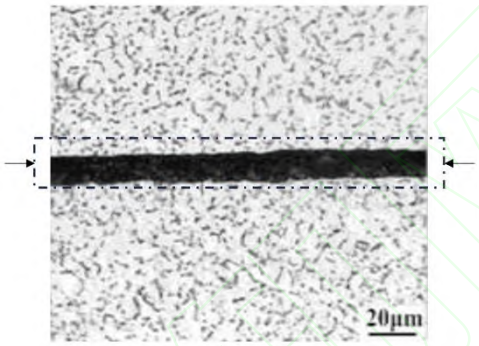
图 1 扩散焊过程[9]
Fig.1 Diffusion welding process[9]

扩散焊最终的结合质量受到元素扩散行为与界面塑性变形能力的直接影响，Suresh Kumar 等在探讨纯铜扩散焊接头质量时，结合 Pilling 孔洞闭合理论对焊接过程中的界面微观孔洞闭合情况进行分析，结果表明，接头界面微孔洞的闭合主要由晶界的扩散机制主导，塑性塌陷的贡献相对更小[15]。焊接过程中，焊接界面的结合质量依赖于温度、压力、扩散时间等工艺参数，并受到母材表面粗糙度与组织状态的影响[1,16]。焊接压力主要影响界面的初始接触面积与变形能力。压力过低时，待连接面缺乏足够的微观塑性变形，粗糙微凸处的初始物理接触不足，界面处易残留大面积的未焊合区与微观孔洞；压力过高时，母材易产生明显变形，同时界面易发生局部动态再结晶与晶粒粗化，破坏结构的精密性与组织的均匀性[6,17-19]。温度主要影响材料屈服强度、原子扩散能力及元素的固溶行为。温度过低时，原子扩散不充分，两界面间的微观不平间隙未被完全填充，同时受限于较低的元素固溶能力，易发生偏聚并产生脆性合金相，成为服役过程中的薄弱环节[20]；温度过高时，原子扩散剧烈，界面易产生过度的化学反应，且会引发扩散速率失衡，出现微孔及晶粒异常长大[21]。母材的表面粗糙度会影响界面微观间隙的尺寸及焊接过程中的塑性变形量，若待焊表面的平整度不足或表面粗糙度过大，也易导致上述未焊透或微观紧贴型缺陷的产生[22-23]。L. Yuan 等建立了扩散焊过程中焊接面孔隙闭合的理论模型，结果验证了表面粗糙度、扩散时间、温度等对缺陷形成的影响[19]。钛合金、铝合金等存在氧化现象的材料，会因焊前清理不彻底、工艺参数不当、或扩散焊真空炉的真空度不足、保护气体不纯等原因，在界面处残留或生成氧化膜，形成微小氧化物颗粒[24-25]。以铝合金为例，其表面易形成致密且稳定的氧化膜，若在扩散焊过程中氧化膜未被有效破碎或溶解，会残留在界面上形成典型的弱结

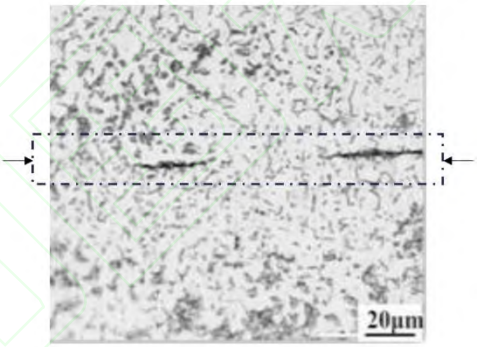
合区域，严重削弱焊接件的服役性能[23]，部分扩散焊紧贴型缺陷的微观本质，也正是极薄的连续氧化物层。

1.2 常见缺陷类型及超声检测特性

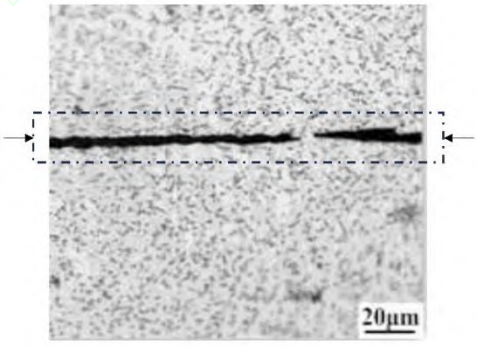
图 2 为焊接界面几种典型缺陷，受限于焊接工艺及母材状态，扩散焊焊接界面易衍生出未焊合、弱结合、微孔等面积型、紧贴型、弥散型缺陷。未焊合缺陷表现为界面未形成有效连接，存在明显的空气隙，典型的宏观未焊合缺陷的开口间隙可达几十微米至几百微米，而微孔与弱结合缺陷对应的开口间隙通常都仅有几微米，两者在分布特征上有一定的区分。微孔表现为界面中弥散分布的微观孔洞区域，弱结合缺陷表现为界面之间处于紧密的接触状态，但原子扩散不充分，未形成有效的冶金结合[4,26-27]。此外，在部分相关文献中，也将脱开间隙为微米级，物理形态上紧密贴合的界面缺陷统称为紧贴型缺陷[28-29]。



(a) 未焊合



(b) 微孔



(c) 弱结合

图 2 扩散焊常见缺陷类型[13]
Fig.2 Common defect types of diffusion welding[13]

界面微观缺陷会直接威胁焊接件的疲劳寿命与力学性能。邓武警等对 Ti-6Al-4V 合金扩散焊的研究表明，界面缺陷会引发明显的应力集中效应，成为疲劳裂纹萌生源，在动态交变载荷下，含 Φ4mm 当量未焊合缺陷试样的中值疲劳强度（393MPa）明显低于表面起裂试样（423MPa） [26]。在力学性能方面，界面存在大面积未焊合与孔洞缺陷的扩散焊接头，其剪切强度仅为母材强度的 20%左右，在异种合金扩散焊中，界面中含 10μm 的脆性合金相的焊接头易发生脆性断裂，其强度仅为正常接头的 60%左右[4]。Zhang 等针对 TC4 扩散焊界面的研究表明，界面冲击韧性对缺陷极为敏感，结合率为 72%的存在未焊合的样品，其平均冲击韧性仅为母材的 12%左右，而结合率达到 98%，且抗拉能力与母材相当的样品，其中的弱结合缺陷，仍会使样品的平均冲击韧性跌至母材的 64%左右[27]。此外，也有研究表明，焊接界面的贯穿性未焊合是导致密封结构失效的主要原因，如 Chen 等在铝合金冷板的制备研究中发现，焊接面质量直接决定了组件是否存在介质泄漏的风险[30]。

扩散焊界面的微观缺陷显著影响构件的剪切强度、冲击韧性、疲劳寿命等，因此，实现界面质量的可靠无损评价是关键。超声无损检测技术在扩散焊质量评价中有广泛应用。由于扩散焊是一种低于母材熔点条件下的固相连接技术，其界面的声学特性与传统熔焊存在明显差异。超声波与界面的相互作用，受到母材本身声学特性的影响，在同种与异种金属扩散焊中表现出不同的响应特点。对于同种金属扩散焊而言，面对理想的冶金结合界面，声波易完全透射，当界面存在缺陷时，缺陷导致的局部声阻抗差异会导致更明显的反射回波；对于异种金属扩散焊而言，声波在传播到焊接界面时，由于焊接界面两侧母材的声阻抗差异，界面本身会产生固有的超声反射，与缺陷回波混叠[31]。此外，扩散连接常用的母材多为钛合金、镍基高温合金或奥氏体不锈钢等材料，这些材料内部组织多为粗晶，具有明显的各向异性，当声波在其中传播时，晶界界面会引发强烈的散射、衰减，削弱了到达连接界面的有效声能，同时产生结构噪声，使得缺陷特征的提取变得困难。扩散焊界面的缺陷通常十分微小，界面处的声学连续性往往并未被完全破坏，间隙为微米级别的紧贴型缺陷甚至难形成明显的声反射，因此，常规的超声脉冲回波法往往难以捕获此类缺陷信号，极易发生漏检。为便于理解扩散焊界面缺陷的特点，简要归纳了典型缺陷的界面特征与超声检测特征，如表 1 所示。

表 1 扩散焊主要缺陷类型及检测特点

Table 1　Major defect types and their characteristics in diffusion bonding

缺陷类型	界面特征	超声检测特征
未焊合	界面未有效连接，存在明显空气间隙	声阻抗差异明显，声波反射率高，检测难度较低
弱结合	界面紧密接触，但原子扩散不充分	声波易完全透射，回波极弱，难以识别
微孔	界面处弥散分布的微观孔洞	单个孔洞尺寸远小于波长，间隙极小，难以识别

随着超声理论与技术的发展，目前，利用高频脉冲超声以突破分辨率局限、采用非线性响应参数进行高灵敏度识别、通过多源信号分析方法实现缺陷信号的提取、采用高分辨率成像方法进行缺陷识别，是扩散焊界面超声检测主要的研究方向。

2　扩散焊界面超声检测关键技术与评价方法

近年来，超声无损检测技术在扩散焊界面缺陷的检测与识别中被广泛应用，研究重点从未焊合缺陷的常规检出，逐步演进为紧贴型缺陷的精确识别、缺陷特征的有效分类、以及针对复杂特殊结构的适应性检测。

2.1 焊接界面超声缺陷检测技术

针对扩散焊界面缺陷不同的超声响应特性，以及焊接件固有的结构、组织特征，目前的研究主要通过软硬件检测系统研制、声场参数优化、检测方案创新等多个方面，提高检测分辨率与灵敏度，推动了缺陷的检测能力由宏观未焊合缺陷的检出向弱结合及微米级孔洞的精确检测。在检测技术方面，高频水浸式超声、相控阵超声、非线性超声等被主要应用，以实现界面微观缺陷的识别。

2.1.1 单探头水浸超声

水浸式超声检测耦合稳定、易实现自动扫查。相较于直接接触法，水浸法以流体作为均匀耦合介质，有效消除了探头与试件表面因耦合剂厚度不均及机械扰动带来的声学干扰，也为高频声波的传播与透镜聚焦创造了条件，有利于扩散焊界面微小缺陷的识别，在扩散焊超声检测中有着良好应用。

结合自动化运动控制系统，超声水浸 C 扫描通过合理规划扫查轨迹，在指定检测区域内逐点采集超声回波信号，提取回波特征参数，即可实现特定平面内缺陷的自动化扫查成像，如图 3 所示。常规水浸超声 C 扫描方法就能识别较为明显的宏观未焊合缺陷，陈鑫等研制了水浸式超声 C 扫描检测系统，成功实现了对电工纯铁与不锈钢异种扩散焊接头的扫查成像，并制定了适用于线圈骨架扩散焊缝的超声 C 扫描判定准则[32]。王学权等针对铍/铜扩散焊接头，通过设计专用的水浸点聚焦单晶直探头，结合焦点、焦距等聚焦参数优化，有效降低了界面反射的干扰，实现了 Φ1.5mm 当量未焊合缺陷的可靠检测[11]。

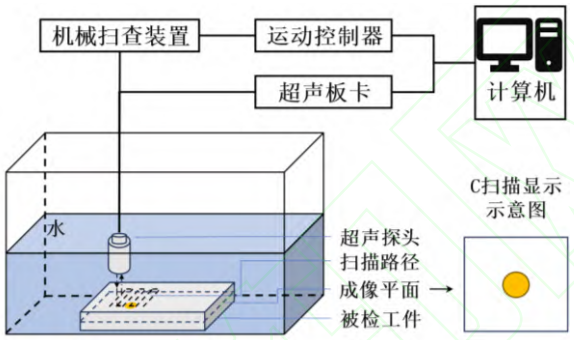


图 3 水浸超声 C 扫描原理

Fig.3 Schematic diagram of immersion ultrasonic C-scan

在常规超声检测的基础上，针对界面弱结合及微孔等具有紧贴、弥散、微小特征的缺陷，通常需提高检测频率以实现分辨力的提高[33]，因此，高频超声展现出了优势。Yusa 等利用扫描声学显微镜（Scanning Acoustic Microscope, SAM）开展了 15 MHz 至 50 MHz 的多频率对比研究，验证了高频超声在实现微小缺陷成像方面的潜力[34]。刘波等通过优化高频点聚焦探头参数、水距及灵敏度设置，验证了 25 MHz 高频探头在支板扩散焊接头 Φ0.4 mm 当量缺陷检出方面的有效性[23]。Levin 等利用高频脉冲超声显微技术，实现了对扩散焊接头界面缺陷及薄层结构的高分辨表征[35]。张明波等通过采用 30MHz 的高频聚焦探头，结合超声反射准静态模型，对微小间隙的反射声压进行了理论计算与灵敏度增益补偿，有效提升了对微米级紧贴型缺陷的检出能力[36]。

水浸式超声凭借其稳定的耦合环境，结合高频探头，在扩散焊界面缺陷的高分辨力 C 扫描成像中独具优势。然而，单探头水浸超声在扩散焊微小缺陷识别与高质量成像中仍存在局限性。由于固液界面固有的声阻抗差异，对于近表面微小缺陷存在明显的识别盲区，此外，传统的基于单一时域幅值的成像算法，对于微小缺陷效果不佳，通过提高检测频率虽然能提高空间分辨力，并使界面微小缺陷的响应特征更加明显，但也伴随着高衰减与噪声敏感的问题，面对表面形貌复杂，以及内部组织为粗晶等强结构噪声干扰的扩散焊接件时，实际的检测与成像效果仍受到限制[37]。

2.1.2 相控阵超声

相控阵超声技术（phased array ultrasonic testing, PAUT）是一种先进的多通道超声无损检测技术，通过电子控制的方式实现声束的灵活偏转与动态聚焦[38-39]，如图 4 所示。相较于单探头方法，PAUT 可实现较大范围的成像覆盖，在检测效率、灵活性上都具有明显优势，适合扩散焊界面微小缺陷的检出。同时，PAUT 多角度的声束偏转，结合定制化的发射-接收法则，能在复杂扩散焊结构特定空间位置缺陷的检测中发挥优势。

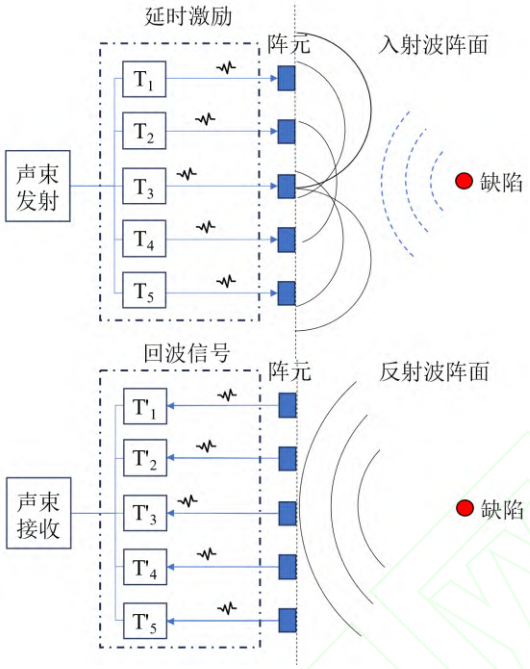


图 4　相控阵超声原理图
Fig.4 Principle of ultrasonic phased array beam steering and focusing

针对扩散焊界面缺陷尺寸微小、分布复杂的特点，研究者们在 PAUT 成像算法、专用检测工艺设计等方面展开了不同的工作。杨宸旭等利用频域合成孔径的相位迁移算法（focus scan phase shift migration, FS-PSM），结合小波包自适应阈值降噪技术，实现了对平面钛合金扩散焊试样中 Φ0.2mm 当量微孔的高信噪比成像，并进一步针对曲面扩散焊界面的声束畸变问题，提出了虚拟源映射与错列叠加声束合成方法，在仿真层面上有效修正了界面伪影、定位误差[12,40]。陆铭慧等提出了一种基于光线投射算法的相控阵三维成像方法，实现了铝合金扩散焊试样中不同埋深空气缺陷的三维成像，如图 5 所示[41]。

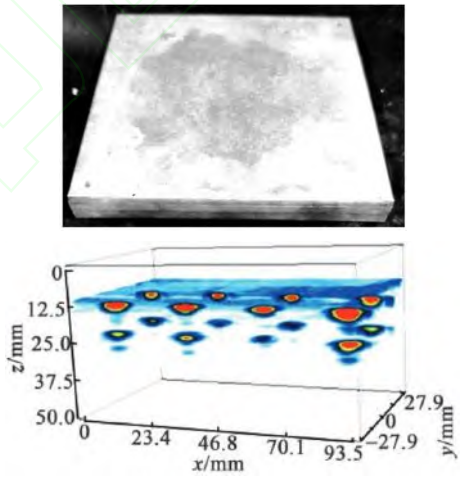


图 5 预埋分层缺陷（埋深 4mm, 13mm，每层数量为 8）的铝合金扩散焊试样及缺陷三维成像结果[41]
Fig.5 Aluminum alloy diffusion-bonded specimen with embedded delamination defects and its 3D imaging results (defect depths: 4 and 13 mm, 8 per layer)[41]

通过对声束收发的合理控制，PAUT 能在一定程度上突破空间限制，增加声波的可达性，如李文涛等针对焊缝缺陷取向与声束不垂直的情况，设计了专用的双阵列聚焦法则，通过探头横波“一发一收”的模式，实现了对 Φ2mm 当量未焊合缺陷的检测成像相较于单晶超声检测，提升了圆柱面焊接

结构中缺陷的检出能力[42]，如图 6 所示。

PAUT 凭借其动态聚焦、声束偏转及多维成像能力，拓宽了扩散焊缺陷超声检测的适用范围。然而，现有针对扩散焊的 PAUT 研究中，在微米级缺陷的检出方面，仍局限于平板件，对于复杂曲面、大深度位置的检测，受限于声束畸变与能量衰减等的影响，已有研究的有效检出结果仍为毫米级的未焊合缺陷。因此，面对更严苛的微小缺陷检测需求，仍需进一步结合高分辨力的超声反演算法、多源信号融合成像等技术，突破现有的分辨力与信噪比局限性。

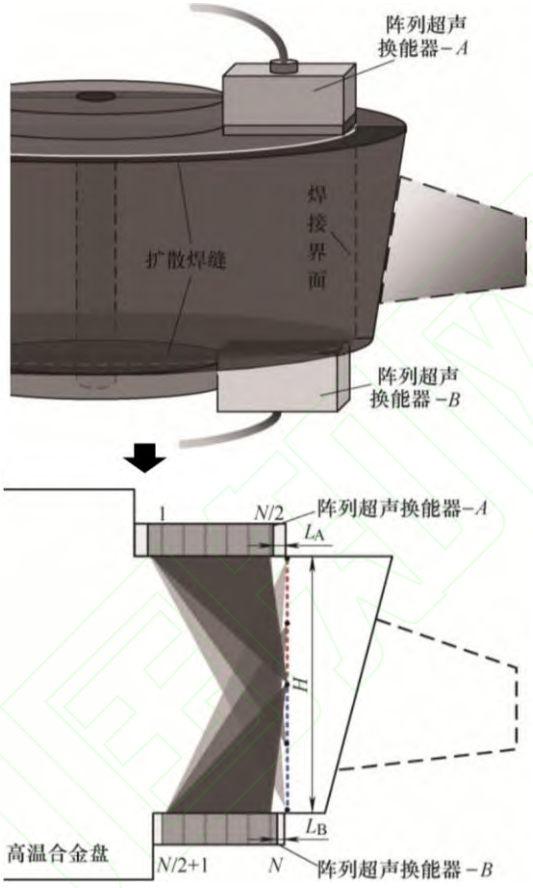


图 6 高温合金盘焊缝的一发一收相控阵超声检测[42]

Fig.6 Pitch-catch phased array ultrasonic testing of superalloy disk welds[42]

2.1.3 非线性超声

传统的线性超声主要通过声阻抗失配产生的反射或透射信号来实现缺陷的识别，面对扩散焊中的紧贴型缺陷时，由于界面接触紧密，声波几乎会完全透射，回波极弱，存在自身固有的检测局限性[43]。相较于线性超声，非线性超声技术（Non-linear Ultrasonic, NLU）通过提取声波与材料微观结构或界面相互作用时产生的非线性响应特征，实现微小缺陷的识别表征[44]。如图 7 所示，当声波与扩散焊界面微小缺陷相互作用时，会产生接触声学非线性（contact acoustic nonlinearity, CAN）效应，即在声波交替的拉压应力作用下，缺陷界面出现周期性的张开闭合，声波出现局部非对称性，从而导致高次谐波等非线性声学特征出现，这种机制能显著放大对微弱界面不连续性的检测灵敏度。因此，NLU 在扩散焊紧贴型缺陷的识别中存在明显优势[45]。当前，主要通过谐波法与混频表征法，实现扩散焊界面微小缺陷的有效检出。

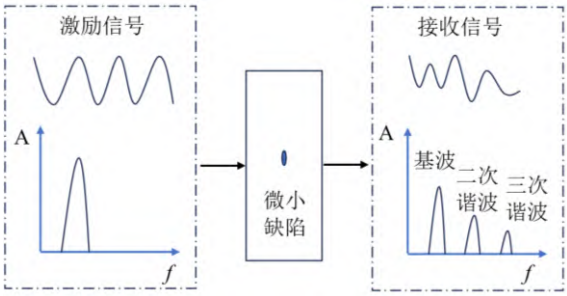


图 7 非线性超声原理
Fig.7 Schematic diagram of nonlinear ultrasonic propagation principles

在直接提取高次谐波参数对界面缺陷进行识别表征的研究中，Delrue 等采用了聚焦斜入射剪切波检测方法，通过脉冲反转技术，提取出了弱结合缺陷引发的二次谐波信号[46]。Zabbal 等利用二次谐波生成的非线性参数 β 有效表征了界面的微观黏附质量，其灵敏度远高于基于波幅的线性评价指标，验证了非线性声学参量在评估金属板结合质量，以及预测界面失效强度方面的潜力[47]。传统的非线性检测多采用长周期的猝发波进行激发，但由于脉冲过长，不仅限制了纵向分辨力，也使得从回波中提取非线性特征实现 C 扫描成像变得困难。为此，Zhang 等提出了一种基于宽带脉冲波激励的双探头非线性检测方案，通过提取界面回波的基波和二次谐波特征，表征局部接触状态，有效克服了信号混叠问题，实现了弱结合缺陷的高对比二维可视化，该方法有效弥补了线性超声常规 C 扫描成像的检测盲区[43,48]。

尽管高次谐波法对微小缺陷非常敏感，但易受到激发系统、放大器及耦合剂等系统非线性干扰。而混频表征方法利用不同频率声波与缺陷相互作用后产生的和频与差频信号进行缺陷识别，能在一定程度上降低上述影响。Escobar-Ruiz 等提出了基于非共线混波的检测方法，实现了钛合金扩散焊界面的检测，如图 8 所示，利用两束剪切波在界面交汇产生和频纵波，凭借其在频谱、波模态与空间传播上的三重分离特性，实现了跨界晶粒生长率（the Cross-Boundary Grain Growth，CBGG）70%以上界面中微弱缺陷的有效区分[49]。Alston 等利用缺陷界面刚度的不对称性，诱导两束特定角度的入射横波发生非线性相互作用，产生可被独立接收的纵波信号，该方法能有效规避系统噪声，实现了对弱结合区域的高灵敏度检测[50]。

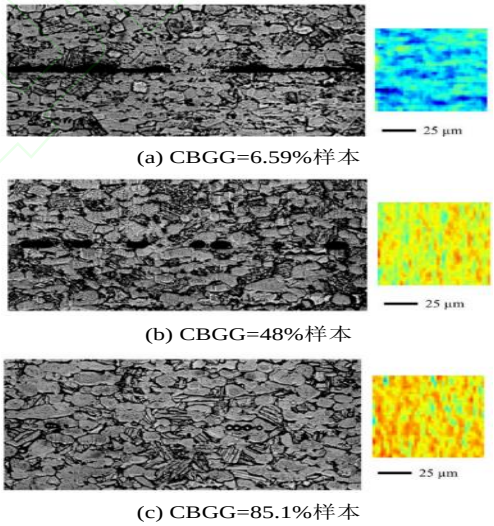


图 8 不同 CBGG 的 Ti-6Al-4V 扩散焊界面显微结构（左）及非线性响应图（右）[49]
Fig.8 Microstructures (left) and nonlinear ultrasonic responses (right) of Ti-6Al-4V diffusion bonding interfaces with different initial CBGG structures[49]

除了界面接触状态，焊接过程中的材料微观结构变化也会表现出非线性特征，如 Xiang 等对 30Cr2Ni4MoV 不锈钢焊接接头的检测研究表明，相对声学非线性参量会随塑性应变的积累呈单调递增趋势，且焊缝区域的非线性参量激增幅度显著高于母材和热影响区[51]。

非线性超声技术在扩散焊的微观紧贴型缺陷检测中具有显著优势。然而，非线性技术仍存在一定的局限性，界面非线性信号微弱，易被晶界散射噪声或系统本身的非线性特征所干扰，此外，现有非线性表征方法多通过归一化等获得相对指标，缺乏实现量化的绝对标准，这就导致与界面结合情况建立可靠的映射关系较为困难。在已有研究的基础上，还需继续开发更稳定的信号提取算法，结合数值仿真，对谐波、混频、相移等特征信号，进行深度分析与融合，实现扩散焊界面结合质量的精确评估。

结合当前单探头水浸超声、相控阵超声、非线性超声在扩散焊界面缺陷检测中的发展应用，表 2 归纳总结了三种超声检测方法的技术特点，及其在扩散焊检测中的针对性研究方向。

表 2 扩散焊缺陷主要超声检测技术特点与发展应用

Table 2 Characteristics, development, and applications of ultrasonic testing techniques for diffusion bonding defects

检测技术	技术特点	扩散焊检测中的主要研究
水浸式单探头超声	耦合稳定，便于多轴 C 扫描成像；通常结合高频探头实现高分辨力扫查成像。	常用于未焊合缺陷的常规扫查成像；通过优化扫查步进、聚焦参数、检测频率等，提高微小缺陷的检出。
相控阵超声技术	多通道电子控制，能实现声束灵活偏转、动态聚焦；信噪比与聚焦性能优于单探头。	侧重于结合虚拟源映射、双阵列聚焦等算法，实现缺陷空间位置、焊接结构特殊对象的检测，突破几何、尺寸限制下的微小缺陷检测极限。
非线性超声技术	提取声波在界面处微观非对称作用下的高次谐波或混频特征；对紧贴型缺陷敏感。	侧重于利用二次谐波等非线性参数评估微损伤，采用宽带双探头、非共线混波技术等实现非线性信号更精准提取。

2.2 焊接界面超声理论建模及信号分析方法

扩散焊焊接界面的组织噪声、几何结构噪声、以及异种材料焊接的声阻抗失配等问题，会导致检测时缺陷信号与背景噪声混叠。传统的基于时域幅值进行表征的方法，在缺陷尺寸大于声束焦斑时效果明显。但该种方法在面对微米级紧贴型缺陷时，通常难以分离出有效的信息[23,52]。因此，优化信号分离及降噪算法，发展多维度超声特征提取方法，以及引入机器学习来实现特征融合与缺陷智能识别，是提升扩散焊界面微观缺陷检测精度的关键。

2.2.1 界面理论建模与仿真研究

扩散焊界面的微观特征与超声波的相互作用机制复杂，在揭示超声信号与界面结合质量之间的关联关系时，通常需要对处于非完美结合状态的扩散焊界面进行理论建模。当前研究中，可将不完美的扩散焊接界面等效表征为一个弹性薄层。弹簧模型的表达式为[53-54]

$$r=\frac{\left(\frac{Z_1-Z_2}{Z_1+Z_2}\right)\left(1-\frac{m\omega^2}{4\kappa}\right)+i\omega\left[\frac{Z_1Z_2-m\kappa}{(Z_1+Z_2)\kappa}\right]}{\left(1-\frac{m\omega^2}{4\kappa}\right)+i\omega\left[\frac{Z_1Z_2}{(Z_1+Z_2)\kappa}+\frac{m}{Z_1+Z_2}\right]} \tag{1}$$

式中：r 为界面反射系数，Z_1 和 Z_2 分别为界面两侧母材的声阻抗值，ω 为声波角频率，m 为该薄层单位面积质量，κ 为界面劲度系数。该公式反映了超声反射系数与用弹簧薄层等效表征的界面结合质量之间的关系。界面劲度系数 κ 的值会随焊接面结合质量的降低而减小，界面完美结合时，κ 趋向于无穷大。由于扩散焊界面缺陷主要为残留的微孔隙，其等效质量 m 约为 0。因此，在用弹簧模型构建扩散焊界面等效缺陷层时，其表达式可简化为

$$r=\frac{Z_1-Z_2+i\omega\left[\frac{Z_1Z_2}{\kappa}\right]}{Z_1+Z_2-i\omega\left[\frac{Z_1Z_2}{\kappa}\right]} \tag{2}$$

将该模型与有限元仿真结合，可实现不同检测条件下的声场分析与理论计算。例如，Yang 等在钛合金曲面构件的扩散焊超声检测研究中，将焊接界面等效为一个弹性薄层，利用超声缺陷回波信号的相位信息推导界面法向刚度，并通过有限元仿真得到该值与界面的结合率成正相关，与微孔隙尺寸

成负相关。为验证模型的有效性，他们针对带激光烧蚀微缺陷的 TC4 扩散焊试样与复杂曲面扩散焊试样进行了检测实验，结果证明，相较于传统幅值成像，基于弹簧模型的界面劲度系数成像对微小缺陷有更精确的成像结果，如图 9 所示[55]。

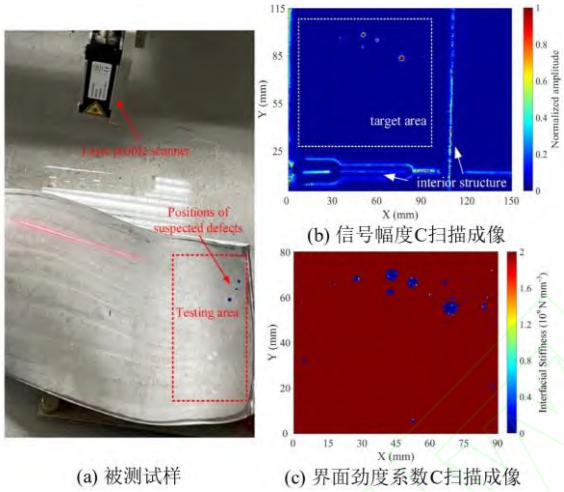


图 9 利用界面劲度系数 κ 实现扩散焊界面微小缺陷 C 扫描成像[55]

Fig.9 Interfacial stiffness κ-based C-scan imaging for the detection of micro-defects in diffusion bonding[55]

王斌等同样基于弹簧模型，推导了超声反射系数、界面劲度系数与界面脱开间隙的函数关系，成功建立了反射率分布与界面缺陷尺寸之间的数学映射，如图 10 所示，该结果实现了 Ti-6Al-4V 扩散焊界面 0~20μm 间隙的超声定量评估与可视化[56]。除了将焊接界面整体等效为连续分布弹簧外，针对界面的缺陷几何特征进行声学散射建模，也是进行超声响应研究的有效手段。Teng 等针对 TC4 扩散焊界面的微小间隙，构建了具有衰减特征的液固耦合声场半解析模型，将界面的微小缺陷等效为椭球体模型，结合基尔霍夫近似计算离散点的镜面反射回波，建立了缺陷的超声响应模型，建立微米级间隙与超声反射回波幅值之间的映射，并实验验证了理论响应曲线的准确性[57]。

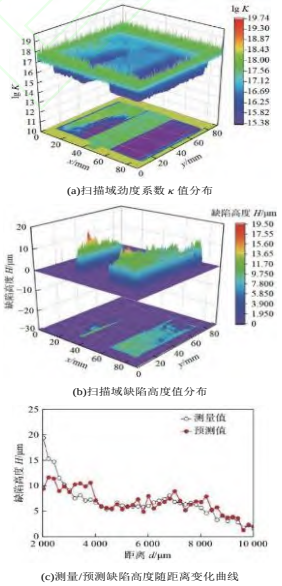


图 10 Ti-6Al-4V 扩散焊界面劲度系数确定缺陷高度[56]

Fig.10 Determination of defect height using interfacial stiffness coefficient in Ti-6Al-4V diffusion bonds[56]

上述理论与仿真模型从不同物理角度阐明了声波与扩散焊非连续界面的响应机制。这些研究内容

为扩散焊界面结合质量的高精度、定量化评估提供了理论基础。然而，现有的数值模型仍依赖于规则的几何假设，未来可继续结合真实界面中的随机形貌特征，获得鲁棒性更强的结果。

2.2.2 信号降噪与多维特征提取

针对微弱的界面缺陷信号常被几何噪声及晶粒噪声掩盖的问题，为有效实现噪声剥离与缺陷特征信号提取，当前研究在对原始信号进行有效分解的基础上，主要围绕时频域信号分析、多源信号融合、以及图像重建等方面展开。

在时频信号解析的层面，在单一时域波幅的基础上，引入频域等多维度的信号，是提升缺陷识别能力的有效途径。Yilmaz 等提出了一种基于频谱形状差异的特征提取算法，计算频谱偏度、峰度等统计学特征，相较于时域幅值评价方法，对弱结合区域的检测灵敏度提升了 10.26%[58]。Li 等结合小波包分解与功率谱密度分析，提取了重叠回波中不同频段节点的能量比特征[59]。Song 等系统对比了 TC4 扩散焊界面不同尺寸缺陷的特征信号表达效果，分别利用时域信号振幅、主频及功率谱幅值作为特征参数重构了 C 扫描图像，如图 11 所示，结果表明，以功率谱主频振幅作为特征参量，能显著提升近焦斑尺寸缺陷的定量精度[60]。这种时频综合分析方式从不同维度放大了未焊合、弱结合、微孔隙等不同界面状态的差异，为后续的质量评价与缺陷分类提供了数据支撑。除时频域综合分析外，采用多源数据融合同样能实现信息互补的效果，王海登等将回波频谱特征与非线性参数相结合，通过这种多参数联合表征的方法有效提升了紧贴型缺陷的检测精度[61]。Yilmaz 等则将超声波界面反射幅值特征与感应热成像的主成分分析（principal component analysis, PCA）特征进行联合，实现信息互补，有效降低了单一信号的噪声干扰，提升了界面脱黏的检测可靠性[62]。

在图像处理层面，基于数字图像处理技术，结合降噪算法，能有效实现缺陷超声 C 扫描图像的特征增强。如常青等提出了一种基于小波变换的超声 C 扫描图像融合算法，结合引导滤波与改进同态滤波对图像进行增强，有效克服了背景噪声与不当波门设置的干扰，界面微小缺陷的识别误差明显降低 [63]。吕洪涛等开发了基于阈值分割与形态学运算的图像处理算法，实现了扩散焊接头中微小缺陷面积占比的高精度计算[64]，Yang 等则将中值滤波与形态学算法应用于全聚焦（total focusing method, TFM）图像中，成功实现了 Φ0.2mm 微孔的清晰成像，将未焊合及紧贴型缺陷的定位误差控制在 5%以内[65]。

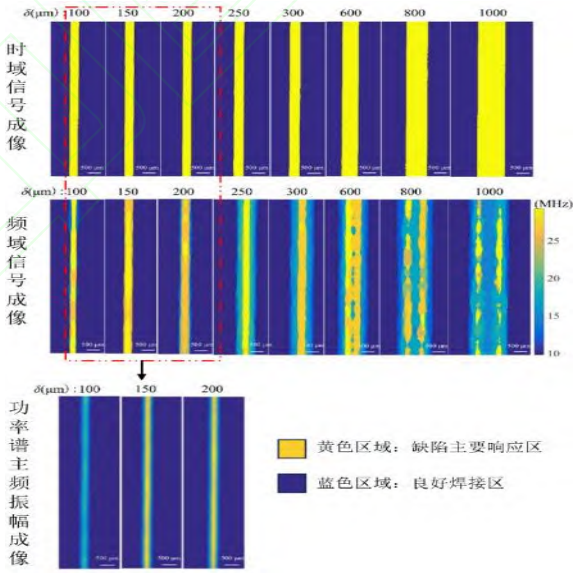


图 11 不同大小界面缺陷时域、频域、功率谱主频率振幅 C 扫描成像结果[60]

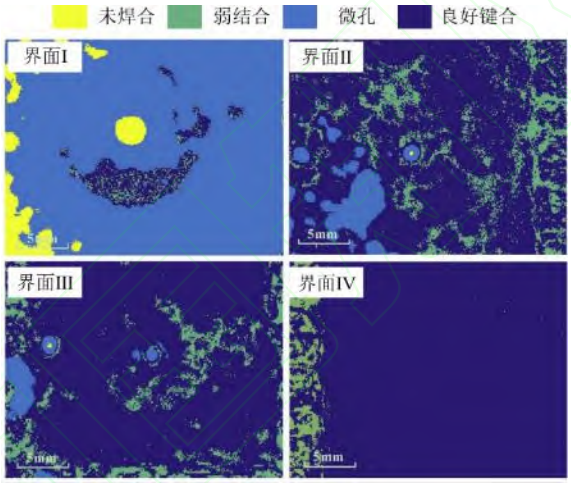
Fig.11 C-scan imaging results of diffusion-bonded interfaces with various defect sizes based on time-domain, frequency-domain, and power spectrum peak amplitude[60]

2.2.3　界面结合质量评估

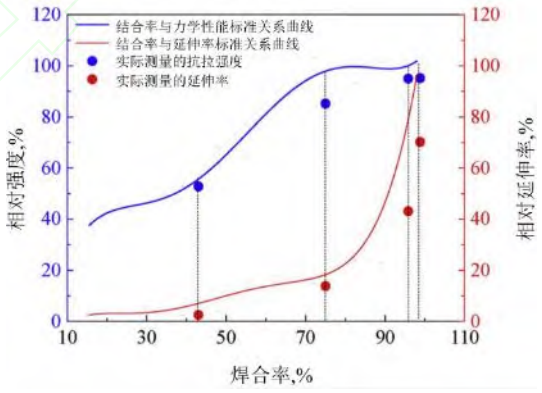
在获取高质量的多维声学特征的基础上，建立其与焊接界面结合状态、物理性能之间的映射关系，是扩散焊质量评价的核心目标。

基于单一声学特征的直接映射是常规有效的评估方法[13,66]。例如，Zhang 等利用超声反射系数法建立了双金属扩散焊界面结合率的定量计算模型[67]。Kumar 等则在含镍中间层的铜-铜扩散焊接头的检测中，系统提取了超声 C 扫描获取的界面反射系数和结合面积占比，并与破坏性拉伸试验获得的强度比建立了一元线性回归经验模型，初步实现了声学特征向接头强度的定量映射[68]。之后，他们将该评价方法扩展至铜镍异种扩散焊的检测中，进一步引入了超声纵波与横波声速实现杨氏模量推算，并验证了该弹性参量与拉伸强度的高度正相关性，为利用声学参数预测扩散焊接头的承载能力提供了可靠依据 [69]。

然而，通过反射系数来评估结合质量的方法，受限于声束物理分辨率，对于亚焦斑尺寸的微小紧贴缺陷难以实现精确评价，结合回波的频谱特征分析能提供更精准的依据。Xiong 等综合利用超声波的时域幅值与频域波形特征，实现了 TC4 扩散焊接头中界面未焊合、弱结合、微孔洞、良好焊合区域的精确区分，并构建了声学响应与界面焊合率的计算模型，其结合率计算结果，与接头实际拉伸测试的力学性能高度符合[70]，如图 12 所示。



(a)界面缺陷分布图（在 850℃下保温 10min，20min，30min，40min）



(b) 结合率定量评估结果与真实力学性能的对比

图 12 结合超声时频特征实现扩散焊接头界面结合状态评估与力学性能预测[70]

Fig.12 Evaluation of bonding states and mechanical property prediction for diffusion bonded joints based on ultrasonic time-frequency features[70]

面对多维的超声数据，依赖人工设定阈值的评价方法在处理复杂边界问题时容易失效，模式识别与机器学习算法成为实现界面高可靠缺陷判定的重要方法。栾亦琳等综合提取超声信号的幅频和相频特征，构建了二叉树支持向量机（Support Vector Machine, SVM）缺陷识别模型，在异种金属扩散焊界面中，实现了未焊合、紧贴型及微孔缺陷的高精度分类[71]。刘祥等则提出了一种基于 PCA 与粒子群算法（Particle Swarm Optimization, PSO）优化的支持向量机识别框架，通过融合时域、频域及经验模态分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）能量等多维特征，成功将小直径柱体扩散焊界面的缺陷识别准确率从 95.5%提升至 100%[52]。

以上研究内容均为扩散焊界面中缺陷特征信号的分离提取、识别评价提供了宝贵的指引。通过时频域信号的分析融合，结合机器学习算法，当前的超声信号分析方法针对传统脉冲反射法所面临的对紧贴型缺陷不敏感、异种金属声阻抗失配导致误判等痛点问题，已取得了实质性进展。但现有算法模型的对象大多仍为实验室特定工艺下的标准试样，还缺乏充分的工程验证。

2.3 特殊结构扩散焊的超声检测应用

在航空航天等领域中，扩散焊结构往往不是理想的平板对接，而是带有薄壁、深腔、曲面等结构特征，以及强各向异性等内部组织特征。这些特殊的几何与材料属性会带来声波路径干扰、结构噪声、几何伪影等问题，对检测方法与信号处理提出差异化的要求。下面将从特殊厚度、几何结构复杂及材料各向异性结构三个方面，对扩散焊超声检测的相关研究进行展开陈述。

2.3.1 薄壁结构与大厚度结构

对于薄壁件扩散焊而言，由于材料厚度极小，超声波在极短时间内即穿透材料，导致缺陷处的反射回波与试件表面、底面回波混叠。同时，薄壁扩散焊界面缺陷通常不是明显脱开状态，而是处于紧密机械贴合的状态，因此常规的超声幅度反射检测方法将失效[52,72]。面对薄壁扩散焊中紧贴型缺陷特点，可以利用高频超声增强微小间隙的声反射，如刘松平等利用 50MHz 高频聚焦超声实现了钛合金薄壁扩散焊中弥散紧贴缺陷的扫描成像[29]。在当前的研究中，还普遍基于时频域及模态能量等多方面特征的提取与降维融合，结合参数寻优与分类算法，剥离混叠的信号，从而实现对薄壁扩散焊界面中微小缺陷的识别[52,58]。

除此之外，Li 等创新性地采用了超声共振技术对母材厚度为 1.2mm 的扩散焊铜铝薄电极片进行焊接质量评估，该方法未依赖时频域波形分析，而是通过分析共振频谱的带宽变化计算共振衰减系数，最终成功建立了共振衰减系数与不同有效焊接面积、机械拉伸力之间的关系[72-73]。当入射超声波在薄板内传播过程中，若板厚满足半波长的整数倍，内部会形成驻波，产生共振现象。当焊接界面存在微小缺陷时，该区域的局部弹性模量和泊松比将发生改变，进而改变整个多层结构原有的振动模式，共振频带将变窄或发生偏移。超声共振法即利用了这一特性，并通过共振声衰减系数来有效表征共振能量的损耗与带宽变化，如下：

$$\begin{cases} d = \dfrac{N\lambda}{2} = \dfrac{c}{2f_0} = \dfrac{c}{2\left(f_n - f_{n-1}\right)} \\ \alpha = \dfrac{20}{d}\lg\dfrac{\Delta f}{\pi\Delta f_h}(dB/cm) \end{cases} \tag{3}$$

式中：d 为厚度，N 为正整数，λ 为波长，c 为声速，f_0 为被测对象固有频率，f_n 与 f_{n-1} 为相邻的两共振频率，α 即为共振衰减率，Δf 为两者的差值，Δf_h 为半功率共振点之间的带宽。

当焊接质量较差时，超声共振的能量损耗与带宽变化更明显，声衰减系数更大。超声共振法在增材制造点阵结构的无损评价中被广泛使用，在复杂薄壁的微小缺陷识别中表现出潜力[74-75]，但目前在扩散焊中的研究应用较少，相关机理与算法还需更深入地发掘与验证。

对于大厚度高温合金扩散焊结构，其晶界散射与高声衰减特性极大限制了检测的有效深度与分辨率。常规高频超声在面对大厚度结构所带来的严重衰减时通常会失效，而降低频率则易导致微小缺陷的漏检。例如，Selby 等利用水浸式环形阵列探头对 Incoloy 800H 扩散焊换热器进行了检测研究，结果表明，尽管相较于常规接触式探头，阵列探头能提供更优的聚焦方法与分辨能力，但其穿透能力仍

受制于声学物理极限，随检测深度的增加，信号信噪比急剧下降，在 78mm 深度处，采用 4 MHz 的环形阵列探头已无法分辨 Φ1mm 及以下的微小未焊合缺陷，仅能检出 Φ2mm 以上的大尺寸缺陷[76]。面对这一检测难题，刘松平等建立了基于非线性高阶谐波超声成像模型，利用宽带入射波在微小未焊合界面的非线性响应，成功实现了 70 mm 厚钛合金扩散焊接头内缺陷的可视化检测[77]。针对大厚度扩散焊检测的研究内容较少，仍受限于高频检测的强衰减与低频检测的分辨率问题，需要继续发掘新机制，同时结合先进的阵列算法等，突破深层紧贴型缺陷的检测瓶颈。

2.3.2 复杂几何结构

带有内腔、加强筋或曲面特征等复杂几何结构的扩散焊构件，极易在检测时产生强烈的几何结构回波，受限的检测空间也为探头的排布带来了挑战，如图 13 所示。前文提及的 Yang 等人通过激光扫描仪与六轴机械臂对复杂曲面扩散焊进行几何重建与超声扫描轨迹规划，结合界面理论建模，在超声波法向入射且扩散焊界面倾角不大于 14° 的条件下，实现了钛合金复杂曲面扩散焊界面微小缺陷的成像[55]。

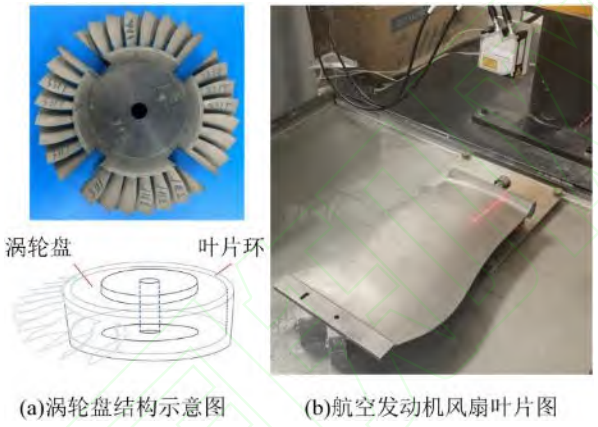


图 13 几何复杂扩散焊结构示例图[42,55,78]

Fig.13 Example of diffusion bonded structures with geometric complexity[42,55,78]

此外，在特殊几何结构扩散焊检测中，相控阵超声凭借其灵活的声束偏转与动态聚焦能力，结合信号处理实现有效滤波以及成像优化，发挥出了明显优势。孔庆茹等在钛合金扩散焊加强筋的检测中，通过引入相位相干加权（Phase Coherence Weighting）的相控阵成像技术，利用缺陷散射信号与几何结构噪声在相位一致性上的差异，实现了复杂腔型结构中反射噪声的有效抑制，使所测窄焊缝区域中 Φ0.4mm 缺陷的有效检测偏转角阈值从 19° 降低至 13°[79]。针对涡轮盘等表面复杂，焊缝与探头成角度的对象，定制阵列收发方式、聚焦方法、探头设计等是空间受限、耦合困难、声束发散等问题的主要解决方法。李文涛等设计的双阵列换能器一发一收的协同工作方式，有效规避了高温合金盘涡轮盘的结构阻挡[41]，在此基础上，Teng 等进一步完善，提出了一种专用的合成声束收发算法，建立了复杂边界条件下的阵列声束偏转与焦点延时法则，实现了大跨度深度范围（18.3 ~28.3 mm）内焊缝未焊合缺陷的高信噪比成像[78]。面对极窄空间的检测，沙正骁等利用了 90° 声反射镜组件，将超声波信号垂直折射到盘件内孔孔壁，成功实现了双合金整体叶盘连接界面中 Φ2mm 当量缺陷的检测[80]。孙浩然等则研制了一种曲率半径与双金属涡轮盘小直径狭窄内孔相适配的凸面相控阵探头，通过精确的曲面匹配设计成功实现了内孔表面下 Φ1mm 当量缺陷的有效聚焦成像[81]。当前，针对不同几何结构扩散焊接件的超声检测仍旧处于探索阶段，尽管在一定程度上突破了空间受限与结构遮挡的限制，但检出极限仍为毫米级的明显未焊合缺陷，可以继续深入研究曲面等复杂几何结构的声场适应性补偿方法，以及复杂结构下微弱缺陷信号的提取方法。

2.3.3 材料各向异性结构

粗晶材料通常具有内部晶粒粗大、各向异性明显的特征，如图 14 所示[8]，该类材料作为扩散焊的母材时，声波需在其组织内部传播到达焊接界面，易发生严重的声束畸变及衰减，焊接界面微小的

缺陷信号极易被粗晶背景噪声淹没。

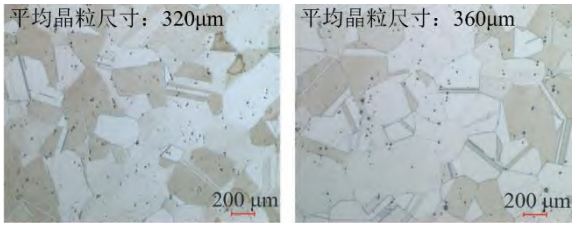


图 14 1100℃ （左）1150℃（右）热处理的镍基高温合金 GH4169 晶粒组织金相图[8]
Fig.14 Metallographic micrographs of grain structure of Ni-based superalloy GH4169 after heat treatment at 1100 ℃ (left) and 1150 ℃ (right)[8]

面对强衰减粗晶材料的检测，超声波的入射路径也会影响缺陷的检出率，检测路径的物理寻优与多次底波分析是提升检出率的直接手段。Hwang 等对核电异种金属焊缝进行水浸超声声学特性评估时，定量表征了隔离层的高衰减与声束畸变特性，并证实了通过优化超声入射路径以规避高散射区，可有效提升接头根部微小缺陷的检出率[82]。Roccella 等则采用内孔水浸超声脉冲回波法，通过分析二次回波信号，结合多模式成像，实现了高衰减材料未焊合区域的有效检出与尺寸评估[83]。Escobar-Ruiz 等在针对存在强各向异性的六方密排晶体钛合金扩散焊时，采用了单面真实相位测量技术，通过焊前精确提取带有材料晶粒纹理特征的参考相位，在焊后测量中予以对消，有效剥离了粗晶散射带来的随机相位扰动，成功实现了对界面结合质量的定量评估[49]。

扩散焊超声检测正逐渐从实验室机理验证阶段向实际工程应用发展。研究对象不再局限于理想的平板对接试样，逐渐面向复杂结构与特殊材料，通过几何降噪方法优化、定制化检测方案等，突破尺寸效应、几何形貌及内部组织结构的限制，拓宽了超声检测在航空航天等高端制造领域的应用范围。

3 结束语

扩散焊技术对于航空航天工业等高端制造领域极为重要，而超声无损检测是其质量评估的主流方法。本文针对目前扩散焊超声检测中的紧贴型缺陷检测精度低、微观结合质量评价难等痛点，系统综述了检测技术手段、信号分析与质量评价策略。从当前研究可以看出，依靠常规的时域幅值分析方法虽然能有效检出宏观未焊合缺陷，但对于微米级孔隙、弱结合界面、异种金属声阻抗失配以及复杂几何与粗晶结构时，实际效果受到限制。因此，当前研究方向正逐渐朝多维度的信号特征提取、对微观结构敏感的声学机制挖掘、复杂波阵面调控以及引入机器学习实现智能化评估等方向发展。随着研究的不断深入，研究者已能从超声信号中实现微弱缺陷信号的识别与提取，构建焊接界面不同区域的缺陷识别与成像结果，并能建立超声不同信号特征与焊接件力学性能之间的初步映射关系，展现出了超声检测技术在扩散焊质量评价中的巨大工程应用潜力。在未来，为了满足更复杂的精密制造需求，还可以在以下几个方面进行更深入的研究发展：

1）深化界面微观组织及复杂微观形貌的超声影响机制研究。目前的超声检测方法已能实现部分界面微小缺陷的检出，但声波与界面微观形貌特征，以及与组织变化的交互机制尚不完全明确。在扩散焊接头的实际应用中，尽管拉伸强度达标，其冲击韧性仍可能因微观组织因素而显著下降。因此，未来可进一步研究扩散焊微观组织（如晶粒度、界面析出相等）对超声波的影响边界，进一步提升检测的可靠性。

2）发展多源信号融合，实现界面微小缺陷更精确的特征提取与评价。尽管现有的超声信号分析手段已能在特定条件下提取出区分未焊合、微孔隙、弱结合的特征信号，但应用场景有限，且不同检测技术在应用过程中均存在需突破的局限性。可探究将多源的检测数据进行融合，实现优势互补，开发更具鲁棒性的降噪与特征融合算法，建立对界面微小缺陷更可靠、精准的评价策略。

3）提升不同场景中缺陷识别模型的泛化能力。现有基于机器学习的缺陷评价方法多依赖特定材料的预制样本，迁移学习的能力不足。未来，需优化网络架构，建立更强大的模型框架，结合群体智能与信号分解算法等，降低现有缺陷智能评价方法对小样本的依赖性。

4）推进针对复杂几何结构与内部各向异性结构的声场调控与自适应检测方法。目前，针对带有内腔、曲面、加强筋等复杂结构的扩散焊质量评价，仍局限于较明显未焊合缺陷的检出。未来，可结合先进的三维建模与多物理场仿真，模拟实际工程构件中更复杂的三维拓扑结构，深入探究形貌适应的声场调控、轮廓追踪、几何降噪方法。针对大厚度、粗晶母材扩散焊结构的检测，可结合阵列声场调控与抗声束畸变的自适应算法，突破粗晶晶界处的强散射噪声及深层声波穿透力不足的限制。

5）探索严苛环境下扩散焊工艺的监测技术。扩散焊过程处于高温、高压及真空的极端环境，常规压电传感器无法直接应用，未来，可探索耐高温超声波导杆、声发射等能适应极端环境的技术，尝试对扩散焊过程中的界面塑性变形、孔隙闭合及原子扩散实现全周期监测。

参考文献（References）

[1] 吴磊，滕俊飞，吕彦龙，等. GH3230 合金 TLP 扩散连接动力学实验研究[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50（8）：2595-2600.
WU L, TENG J F, LYU Y L, et al. Experimental study on kinetics of TLP diffusion bonding of GH3230 alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(8):2595-2600(in Chinese).

[2] 刘祥. 基于多特征融合的小直径柱/板扩散焊界面超声检测方法[D]. 南昌：南昌航空大学，2024：1-9.
LIU X, Multi-feature fusion ultrasonic detection of diffusion welding interface between small diameter column and plate[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2024:1-9(in Chinese).

[3] BRANDO G, DISTEFANO F, DI CAROLO F, et al. Dissimilar welded joints and sustainable materials for ship structures[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(12): 2296.

[4] 吴凡. 1420/7b04 异种铝合金扩散连接界面组织及性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2019：8-21.
WU F. Study on microstructure and properties of 1420/7B04 dissimilar aluminum alloy diffusion bonding interface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 8-21(in Chinese).

[5] 李鸣申，李淳，司晓庆，等. 异种金属材料扩散连接研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报，2025，57（12）：81-106.
Li M S, Li C, Si X Q, et al. Research Progress on diffusion bonding of dissimilar metal materials[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025,57(12): 81-106(in Chinese).

[6] 吴迪，岳喜山，权银洙，等. 扩散焊工艺参数对 Ti2AlNb 焊接接头组织性能与变形的影响[J]. 航空制造技术，2025，68（13）：65-71.
WU D, YUE X S, QUAN Y Z, Effect of Diffusion Welding Process Parameters on Microstructure, Properties and Deformation of Ti2AlNb Joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 65-71(in Chinese).

[7] 郑晖，林树青主编. 超声检测 第 2 版[M]. 北京：中国劳动社会保障出版社，2008：9-10.
ZHENG H, LIN Q S. Ultrasonic testing[M]. 2rd ed. Beijing: China Labor and Social Security Press, 2008: 9-10(in Chinese).

[8] 杨功鹏，周正干，马腾飞，等. 粗晶组织材料的超声检测有限元仿真[J]. 北京航空航天大学学报，2025，51（12）：4235-4245.
YANG G P, ZHOU Z G, MA T F, et al. Finite element simulation for ultrasonic testing of materials with coarse-grained tissue[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(12): 4235-4245(in Chinese).

[9] 高文静，雷君相. 扩散连接技术在钛合金加工中的应用及研究进展 [J]. 上海有色金属，2017，38（004）：239-46.
GAO W J, LEI J X. Application and research progress of diffusion bonding technology in titanium alloy processing [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(004): 239-46(in Chinese).

[10] 曹军中，陆标，潘廷龙，等. 超声波扫描技术的缺陷检测分析及声阻抗研究[J]. 电声技术，2023，47（10）：1-3.
CAO J Z, LU B, PAN T L, et al. Defect Detection Analysis and Research on Acoustic Impedance of Ultrasonic Scanning Technology[J]. Audio Engineering, 2023, 47(10): 1-3(in Chinese).

[11] 王学权，任俊波，刘健，等. 铍铜焊接件焊接质量超声检验技术研究[J]. 核动力工程，2018，39（4）：80-82.
WANG X Q, REN J B, LIU J, et al. Reasearch of Ultrasonic Quality Inspection Technology for Berylium Copper Welder Workpiece[J]. 2018, 39(4): 80-82(in Chinese).

[12] 杨宸旭. 基于超声相控阵的钛合金扩散焊内部缺陷检测研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2022：2-80.
YANG C X. Research on internal defect detection in titanium alloy diffusion bonding using ultrasonic phased array[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022: 2-80(in Chinese).

[13] 张钦差. 钛合金扩散连接质量超声检测技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2016：31-34.
ZHANG Q C. Research on ultrasonic detection of diffusion bonding(DB)of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 31-34(in Chinese).

[14] BAROSS T, BERECZKI P, JÁNOSI L, et al. Diffusion bonding experiments of 316L steels in a gleeble 3800 thermomechanical simulator for investigation of non-destructive inspection methods[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 160: 111768.

[15] SURESH KUMAR S, RAVISANKAR B. Destructive and non-destructive evaluation of copper diffusion bonds[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 23: 13-20.

[16] 翟智梁，赵汉宇，任海水，等. TiAl 基合金焊接与连接的国内外研究现状与发展趋势[J/OL]. 材料工程，1-23[2026-08-27]. https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20250827.1535.002. CUI Z L, ZHAO H Y, REN H S, et al. Research progress and development of welding and joining of TiAl-based alloy[J/OL], Journal of Materials Engineering, 1-23[2026-08-27]. https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20250827.1535.002（in Chinese）.

[17] ZHU F, PENG H, Li X, et al. Dissimilar diffusion bonding behavior of hydrogenated Ti2AlNb-based and ti-6Al-4V alloys[J]. Materials & Design, 2018, 159: 68-78.

[18] 徐玉松，范继，仇潞，等. 以镀层铜为中间层的 Cu-0.15Zr/GH3030 扩散焊接头组织性能分析[J]. 焊接学报，2017，38（1）：125-128，134.
XU Y S, FAN J, QIU L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion-Bonded Cu-0.15Zr/GH3030 Joints with a Copper

Coating Interlayer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(1): 125-128, 134(in Chinese).
[19] YUAN L, XIONG J, PENG Y, et al. Modeling void closure in solid-state diffusion bonding of TC4 alloy[J]. Vacuum, 2020, 173: 109120.
[20] SAADATI A, MALEKAN M, KHODABAKHSHI F. Under glass transition temperature diffusion bonding of bulk metallic glass and aluminum[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 269: 124758.
[21] 刘晓芸， 郝定， 巴特， 等. GH4099 和 GH3128 异质高温合金 TLP 扩散焊接头组织与性能演化[J]. 铸造技术， 2026， 47（1）： 39-49.
LIU X Y, HAO D, BA T, et al. Microstructural and Mechanical Property Evolution of GH4099 and GH3128 Dissimilar Superalloy Joints by TLP Diffusion Bonding[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 39-49(in Chinese).
[22] KUMAR S, KARTHIK H S, KUMAR K S, et al. Experimental study on diffusion bonding of OFHC cu for vacuum tube applications[C]//2025 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS). Chennai, India: IEEE, 2025: 1-4.
[23] 刘波， 李玲， 何春双， 等. 对开式扩散焊钛合金空心支板水浸超声 C 扫描检测方法研究[J]. 航空精密制造技术， 2024， 60（3）： 6-9.
LIU B, LI L, HE C S, et al. Study on Immersion Ultrasonic C-scan Inspection of Split Type Diffusion Welded Titanium Alloy Hollow Support Plate Blade[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2024, 60(3): 6-9(in Chinese).
[24] NACHTNEBL P, KOLAŘÍK L, FOREJTOVÁ L, et al. Ultrasonic testing of diffusion bonded joints of AlMg3[J]. Manufacturing Technology, 2018, 18(2): 289-294.
[25] VARADHARAJ R, BRIGHT R J, TALAWAR S V. Defect prediction on aluminum-stainless steel bimetallic castings using non-destructive testing with machine learning algorithm[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2024, 24(6): 2924-2936.
[26] 邓武警， 陈玮， 李志强， 等. 扩散连接界面缺陷对 Ti-6Al-4V 合金力学性能的影响[J]. 航空制造技术， 2017（18）： 74-78.
DENG W J, CHEN W, LI Z Q, et al. Effect of diffusion bonding defect on mechanical properties of Ti–6AI–4V alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(18): 74–78(in Chinese).
[27] ZHANG H, LI J, MA P, et al. Study on microstructure and impact toughness of TC4 titanium alloy diffusion bonding joint[J]. Vacuum, 2018, 152: 272-277.
[28] LUAN Y, SUN T, FENG J, et al. Ultrasonic evaluation of TiAl and 40Cr diffusion bonding quality based on time-scale characteristics extraction[J]. NDT & E International, 2011, 44(8): 789-796.
[29] 刘松平， 郭恩明， 谢凯文， 等. 钛合金扩散焊中紧贴型缺陷的超声波检测[J]. 无损检测， 2004（2）： 62-65.
LIU S P, GUO E M, XIE K W, et al. Evaluation of kiss defect in diffusion welding of titanium alloy by ultrasonic pulse-echoes[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(2): 62-65(in Chinese).
[30] CHEN X, ZHANG C, LIU B, et al. Study on vacuum diffusion welding process of cold plate for small channel assembly[J]. IET Conference Proceedings, 2022, 2022(13): 1331-1333.
[31] BARAT V, MARCHENKOV A, BARDAKOV V, et al. Assessment of the structural state of dissimilar welded joints by the acoustic emission method[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7213.
[32] 陈鑫， 刘明举， 单政， 等. 电工纯铁与不锈钢扩散焊接头自动超声 C 扫检测技术研究[J]. 电焊机， 2025， 55（1）： 115-121.
CHEN X, LIU M J, SHAN Z, et al. Research on Automatic Ultrasonic C-scan Inspection Technology for Diffusion Welded Joints between Electrical Pure Iron and Stainless Steel[J] . Electric Welding Machine, 2025, 55(1): 115-121(in Chinese).
[33] 张驰， 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， 90， 132.
ZHANG C, LUAN Y L, LUO Z W, et al. Analysis of ultrasonic C-scan detectability on diffusion bonding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(9): 83 – 86(in Chinese).
[34] YUSA N, SUZUKI R, FURUKAWA T, et al. Application of high-frequency ultrasonic test to the non-destructive inspection of W-cu bonded interface[J]. Plasma and Fusion Research, 2022, 17(0): 2405013-2405013.
[35] LEVIN V M, MOROKOV E S, PETRONYUK Y S. Ultrasonic microscopy of contact joints[J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, 81(8): 950-955.
[36] 张明波. 金属板扩散焊接超声 C 扫描检测关键技术[J]. 无损探伤， 2014， 38（6）： 41-43.
ZHANG M B. Key Techniques for Ultrasonic C-Scan Inspection of Diffusion-Bonded Metal Sheets[J]. Nondestructive Testing Technology, 2014, 38(6): 41-43.
[37] FARIDAFSHIN M, YUSA N, CHEN W. The applicability of high-frequency ultrasonic testing for the inspection of the bonded interface between a divertor’s mono-block and screw pipe[J]. Fusion Engineering and Design, 2024, 205: 114535.
[38] 周正干， 王俊， 李洋， 等. 多层黏接结构的阵列超声检测评价方法[J]. 北京航空航天大学学报， 2023， 49（12）： 3207-3214.
Zhou Z G, WANG J, LI Y, et al. Ultrasonic array testing and evaluation method of multilayer bonded structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(12): 3207–3214(in Chinese).
[39] 徐娜， 许路路， 何方成. 各向异性增材制造构件的超声阵列全聚焦成像[J]. 北京航空航天大学学报， 2023， 49（5）： 1063-1070.
XU N, XU L L, HE F C. Total focusing imaging in anisotropic additive manufacturing components using ultrasonic array[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(5): 1063-1070(in Chinese).
[40] 杨宸旭， 李秋锋， 沈佳卉， 等. 钛合金扩散焊水浸超声相控阵相位迁移成像方法[J]. 传感技术学报， 2021， 34（11）： 1489-1494.
YANG C X, LI Q F, SHEN J H, et al. Ultrasonic phased array phase shift migration imaging method for titanium alloy diffusion welding[J].Chinese Journal of Sensors and Actuators,2021,34(11): 1489-1494(in Chinese).
[41] 陆铭慧， 刘元钰， 何新军， 等. 相控阵线阵换能器的三维成像方法研究[J]. 压电与声光， 2021， 43（2）： 225-230.
LU M H,LIU Y Y,HE X J, et al. Study on 3D imaging method of linear array phased array transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021,43(2): 225- 230(in Chinese).
[42] 李文涛， 周正干. 一种复杂结构件圆柱面扩散焊缝阵列超声检测方法[J]. 机械工程学报， 2020， 56（22）： 1-7.
LI W T, ZHOU Z G. Ultrasonic array detection method on cylindrical surface diffusion weld of complex structural parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(22): 1-7(in Chinese).

[43] ZHANG C, PAN Q, LIU T, et al. Nonlinear ultrasonic C-scan imaging for contact-type defects in diffusion-bonded joints—a case study[J]. Materials, 2024, 17(6): 128.
[44] 任强， 孙文龙， 陶立翔， 等． 非线性超声检测技术研究现状与展望[J]． 声学技术， 2024， 43（3）： 299-309．
REN Q, SUN W L, TAO L X, et al. Research status and prospect of nonlinear ultrasonic detection technique[J]. Technical Acoustics, 2024, 43(3): 299-309(in Chinese).
[45] 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， 118．
YE J L, GANG T. Ultrasonic nonlinear imaging in diffusion bonding of 304 stainless steel[J]. Transactions of the China Weld- ing Institution, 2014, 35(5): 95 – 99(in Chinese).
[46] DELRUE S, TABATABAEIPOUR M, HETTLER J, et al. Applying a nonlinear, pitch-catch, ultrasonic technique for the detection of kissing bonds in friction stir welds[J]. Ultrasonics, 2016, 68: 71-79.
[47] ZABBAL P, RIBAY G, JUMEL J. Evaluation of metallic bonded plates with nonlinear ultrasound and comparison with destructive te sting[J]. NDT & E International, 2021, 123: 102514.
[48] 张驰． 钛合金扩散焊接头贴合型缺陷的非线性超声检测技术研究[D]． 哈尔滨：哈尔滨工业大学， 2016：11-51．
ZHANG C. Research of nonlinear ultrasonic test- ing method for kissing bond in titanium alloy diffusion bonding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 11-51(in Chinese).
[49] ESCOBAR-RUIZ E, RUIZ A, HASSAN W, et al. Non-linear ultrasonic NDE of titanium diffusion bonds[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(2): 187-195.
[50] ALSTON J, CROXFORD A, POTTER J, et al. Nonlinear non-collinear ultrasonic detection and characterisation of kissing bonds[J]. NDT & E International, 2018, 99: 105-116.
[51] XIANG Y X, ZHU W J, DENG M X, et al. Experimental and numerical studies of nonlinear ultrasonic responses on plastic deformat ion in weld joints[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 024303.
[52] 刘祥， 滕俊飞， 吕彦龙， 等． 薄壁小直径柱/板扩散焊界面超声信号特征分析与缺陷智能识别[J]． 失效分析与预防， 2024， 19（5）： 319-326．
LIU X, TENG J F, LYU Y L. Ultrasonic Signal Characteristic Analysis and Intelligent Defect Identification of Thin-wall Small-diameter Column/Plate Diffusion Welding Interface[J]. Failure Analysis and Prevention, 2024, 19(5): 319-326(in Chinese).
[53] LAVRENTYEV A I, BEALS J T. Ultrasonic measurement of the diffusion bond strength[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1-8): 513-516.
[54] MILNE K, CAWLEY P, NAGY P B, et al. Ultrasonic non-destructive evaluation of titanium diffusion bonds[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2011, 30(4): 225-236.
[55] YANG G, ZHOU Z, MA T, et al. Non-destructive testing of interfacial stiffness based on spring model for diffusion bonding interface of titanium alloy components with complex surface[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 15686.
[56] 王斌， 李升， 朱富慧， 等． 基于超声无损检测的扩散连接界面缺陷尺寸评估[J]． 焊接学报， 2020， 41（8）： 34-38．
WANG B, LI S, ZHU F H, et al. Evaluation on interfacial defect size of diffusion bonding based on ultrasonic non-destructive testing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 34-38(in Chinese).
[57] TENG L, ZHOU Z. A Method for Prediction of Ultrasonic Detectability of Interface Gap Defects on TC4 Diffusion-Bonded Joints[J]. Nanomaterials, 2022, 12(6): 911.
[58] YILMAZ B, JASIŪNIENĖ E. Advanced ultrasonic NDT for weak bond detection in composite-adhesive bonded structures[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 102: 102675.
[59] Li S, HOU H, YUN H, et al. Research on the quality evaluation method of copper and aluminum diffusion bonding[M]. In Review, 2024.
[60] SONG W, REN J, HE P, et al. Quantitative determination of the defects in TC4 diffusion bonded joints via ultrasonic C-scan[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 1476-1483.
[61] 王海登， 鄂楠， 张智柏， 等． 扩散焊缺陷超声波检测信号特征[J]． 焊接技术， 2021， 50（2）： 92-95， 106．
WANG H D, E N, ZHANG Z B, et al. Signal characteristics of ultrasonic testing for diffusion weld defect[J]. Welding Technology, 2021, 50(2): 92-95(in Chinese).
[62] YILMAZ B, BA A, JASIUNIENE E, et al. Evaluation of bonding quality with advanced nondestructive testing (NDT) and data fusion [J]. Sensors, 2020, 20(18): 5127.
[63] 常青， 杨程伟， 罗彬杰， 等． 基于小波变换的扩散焊超声 C 图像融合算法[J]． 郑州大学学报（工学版）， 2023， 44（4）： 54-59， 87．
CHANG Q,YANG C W,LUO B J, et al. Ultrasonic C image fusion algorithm for diffusion welding based on wavelet transform[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(4): 54-59, 87(in Chinese).
[64] 吕洪涛， 李锋， 刘志毅， 等． 基于超声 C 扫描数字图像处理的缺陷面积分析[J]． 无损检测， 2022， 44（12）： 37-41，71．
LYU H T, LI F, LIU Z Y, et al. Defect area analysis based on ultrasonic C-scan digital image processing[J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(12): 37-41(in Chinese).
[65] YANG C, HUANG L, DONG D, et al. PSM imaging method for water immersion ultrasonic phased array inspection of diffusion welding of titanium alloy[C]//2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture. Manchester United Kingdom: ACM, 2021: 380-386.
[66] 吕彭民， 吴玉文， 宋年波． 钢桥面铺装层粘接强度超声波无损检测技术研究[J]． 郑州大学学报（工学版）， 2017， 38（5）： 55-60．
LYU P M,WU Y W,SONG N B. Research on the ultrasonic non-destructive test technology of bonding strength for the steel bridge deck pavement layer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(5): 55-60(in Chinese).
[67] ZHANG Q, LI S, LIU J, et al. Study of a bimetallic interfacial bonding process based on ultrasonic quantitative evaluation[J]. Metals, 2018, 8(5): 329.
[68] KUMAR S S, KRISHNAMOORTHI J, RAVISANKAR B, et al. Assessing quality of diffusion bonded joints with interlayer using ultrasonic/ultrasound[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 242: 139-146.
[69] KUMAR S S, PADMAPREETHA R, RAVISANKAR B. Mechanical and ultrasonic characterisation of copper-nickel diffusion bonded joints[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8(2): 1560-1574.
[70] XIONG J T, SUN J R, WANG J C, et al. Evaluation of the bonded ratio of TC4 diffusion bonded joints based on ultrasonic C-scan[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 47: 238-243.

[71] 栾亦琳， 刚铁， 张驰． TiAl/40Cr 扩散焊接头强度评价与预测[J]． 焊接学报， 2016， 37（4）： 35-38， 130．
LUAN Y L,GANG T, ZHANG C. Strength evaluation and prediction of Ti Al and 40Cr diffusion bonding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(4): 35-38(in Chinese).
[72] Li S, HOU H, YUN H, et al. Ultrasonic non-destructive evaluation study of molecular diffusion bonding of thin copper-aluminum electrode sheets[J]. Materials Research Express, 2024, 11(3): 036501.
[73] 李声涛． 基于高频超声的铜铝焊接强度无损评价实验研究[D]． 上海：上海应用技术大学， 2024：34-48．
LI S T. Experimental Research on Nondestructive Evaluation of Copper and Aluminum Welding Strength Based on High-Frequency Ultrasound[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2024: 34-38(in Chinese).
[74] 孙朝明， 孙凯华， 王国伟， 等． 增材制造点阵结构的超声共振谱性能表征[J]． 浙江大学学报（工学版）， 2021， 55（11）： 2076-2083．
SUN Z Y, SUN K H, WANG G W, et al. Resonant ultrasound spectroscopy evaluation of additively manufactured lattice structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(11): 2076-2083(in Chinese).
[75] OBATON A F, WANG Y, BUTSCH B, et al. A non-destructive resonant acoustic testing and defect classification of additively manufactured lattice structures[J]. Welding in the World, 2021, 65(3): 361-371.
[76] SELBY G, AAKRE S, FAN Z. Non-destructive examination of diffusion-bonded compact heat exchangers[C]//Volume 3: Design and Analysis. Virtual, Online: American Society of Mechanical Engineers, 2020: V003T03A025.
[77] 刘松平， 李乐刚， 刘菲菲， 等． 大厚度扩散焊 NLU 成像检测技术[J]． 航空制造技术， 2017（5）： 34-37， 48．
LIU S P, LI L G, LIU F F, et al. Evaluation of thick diffusion bonds by using NLU imaging method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(5): 34-37, 48(in Chinese).
[78] TENG L, ZHOU Z. A novel non-destructive testing method for turbine disks using dual array ultrasonic transducer[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 9427.
[79] 孔庆茹， 陈尧， 马啸啸， 等． 含型腔扩散焊零件加强筋的相控阵超声检测[J]． 失效分析与预防， 2023， 18（6）： 362-368， 399．
KONG Q R, CHEN Y, MA X X, et al. Phased Array Ultrasonic Testing for Stiffeners in Diffusible Welding With Cavity[J]. Failure Analysis and Prevention, 2023, 18(6): 362-368, 399(in Chinese).
[80] 沙正骁， 梁菁， 韩波． 双合金整体叶盘连接界面的超声检测实验研究[J]． 数据采集与处理， 2020， 35（2）： 231-238．
SHA Z X, LIANG J, HAN B. Experiment on ultrasonic evaluation of bonding interface of dual-alloy blisk[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(2): 231-238(in Chinese).
[81] 孙浩然， 陆铭慧， 伏翔， 等． 双金属结合面缺陷的凸面相控阵超声检测[J]． 无损检测， 2021， 43（2）： 37-42．
SUN H R, LU M H, FU X, et al. Convex phased array ultrasonic testing of bimetallic junction surface defect[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(2): 37-42.
[82] HWANG Y I, SUNG D, KIM H J, et al. Propagation and attenuation characteristics of an ultrasonic beam in dissimilar-metal welds[J]. Sensors, 2020, 20(21): 6259.
[83] ROCCELLA S, CACCIOTTI E, CANDURA D, et al. Ultrasonic test of carbon composite/copper joints in the ITER divertor[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9-10): 1802-1807.