

超声无损检测技术： 国防船舶焊接的利器

作者：姜建伟；Email: jianwei_124@163.com

随着现代船舶工业的快速发展，船舶海洋结构物日益复杂，而焊接质量直接关系到船舶的结构安全性，因此，对焊接质量的检测和评估是船舶制造业中的重要环节。在众多的无损检测技术中，超声无损检测在船舶焊接检测领域中应用最为广泛。作为一种先进的检测技术，超声无损检测原理在于利用超声波的传播定律来确定存在的缺陷。焊接过程中可能产生各种缺陷，如气孔、夹渣、未熔合、未焊透和裂纹等，如果这些缺陷未被及时发现和处理，可能会在船舶运营过程中引发严重的安全事故。超声无损检测技术不仅能提高焊接质量的检测效率，还能够降低船舶制造和维护的成本，确保船舶的安全运营。未来，超声无损检测技术必将在船舶焊接领域发挥更加重要的作用，为我国国防船舶工业的高质量发展提供强有力的技术支撑。

1. 超声无损检测技术在船舶焊接中的应用现状

超声无损检测技术因其高频率、短波长、强穿透力和良好指向性等特点,在船舶焊接中被广泛应用^[1-4]。该技术主要应用于焊接器件内部缺陷的相关检测,如气孔、夹渣、焊接裂纹、未熔合与未焊透等。超声无损检测技术在船舶电气系统组件、电子设备、轻型结构件的精密焊接中发挥着重要作用^[5]。由于现代船舶制造对高可靠性和减轻重量的需求,超声无损检测技术显得尤为重要。超声无损检测技术具有安全性高、检测角度灵活等优势,非常适合船舶焊接的检测^[6]。目前,船舶焊接的超声无损检测根据超声回波的时域信号以定位焊接区域与评价焊接质量,但受信号噪声与焊接材料材质本身的不均匀等因素影响,超声回波时域信号的波动难以实现焊接质量的精准评价。为此,需要加强对船舶焊接质量超声无损检测技术的研究,以提高船舶焊接缺陷的检测率与检测精度,减少因船舶焊接缺陷造成的损失^[7]。

2. 常见无损检测技术对比分析

2.1 射线检测

射线检测技术是一种利用电磁波或电磁辐射等相关射线穿透材料以检测其内部结构和缺陷的无损检测方法。如图 1 所示,当射线穿透物体时,会与物质发生相互作用,将会导致射线强度削弱。这种

电磁波强度衰减取决于衰减系数和射线在穿透厚度。在工艺流程上,射线检测可通过胶片成像,即射线照射被检测物体后透过的射线使胶片感光,清洗胶片后根据胶片的感光情况判断被检测物的内部质量。另外,数字成像也值得一提,将被检测物品内部质量电子信息转化为数字信号,最后存储、还原显示出来。如表 1 所示,射线检测技术因其优秀的检测能力和广泛的应用场景,在我国的工业以及医疗领域都有着重要的作用。然而,射线检测技术也存在一些缺点,在操作过程中我们需要特别注意辐射防护和环境保护等相关问题^[8-11]。



【图 1】射线检测示意图^[2]

表 1 射线检测技术优缺点比较

分类	解释说明
优点	1. 显示缺陷：利用射线照相法，使用底片为记录介质，可以直观地判断缺陷的性质、数量、尺寸和位置； 2. 适用性广泛：适用于各种材料的检测，包括金属材料、非金属材料 and 复合材料。
缺点	1. 对裂纹类缺陷检出率低：透照角度将会影响，使其不能检出垂直照射方向的薄层缺陷； 2. 检测厚度上限受到限制：射线穿透能力讲会造成限制，例如 420 kV 的 X 射线机能穿透的最大钢厚度为 80 mm。射线照相法检测成本较高，检测速度较慢； 3. 辐射污染：这些射线对人体造成伤害，需要采取相关防护措施；显影定影液回收困难，直接排放会造成严重的环境污染。

2.2 磁粉检测

磁粉检测是一种工业上使用的无损检测技术,它的基本原理为:利用磁场的物理性质检测铁磁性材料表面、近表面的缺陷。当铁磁性材料或相关器件被外加磁场磁化,若材料表面、近表面存在缺陷,在该处将形成漏磁场。此漏磁场能够吸引、聚集检验过程中施加的特殊磁粉,从而形成缺陷显示部分。磁粉检测能够检测到极其微小的缺陷,如裂纹、夹渣和气孔等,最小可检测缺陷宽度可达 $0.1\ \mu\text{m}$ 。如图 2 所示,设备相对简单,操作人员经过培训后可以快速掌握检测技巧。磁粉检测仅适用于检测铁磁性材料及其器件,无法应用使用在如铝、铜等非铁磁性材料上。且磁粉可能对操作人员和环境造成污染。磁粉检测技术被广泛应用于航空、航天、机械装备、军事、造船、冶金和城市轨道等领域^[12]。它在设备制造、维护、运营、产品质量保证、生产率提高和成本控制等行业发挥着越来越大的促进作用^[13]。

2.3 超声检测

超声检测技术是一种利用超声波在材料中传播的特性来检测材料内部缺陷的无损检测方法。如图 3 所示,它通过发射超声波到被检测材料中,利用超声波在不同介质中的反射、干涉波转化为电子数字信号,实现对材料内部结构的无损探伤。适用于金属、非金属和复合材料等多种材料的检测。可对较大厚度范围内的试件内部缺陷进行检测。对面积型缺陷的检出率较高,灵敏度高。设备轻便,对人体及环境无害,现场使用较方便。超声检测不产生电离辐射,对操作人员和环境安全。超声检测技术因其高灵敏度、低成本和对人体无害的特点,在工业和医疗领域得到了广泛的应用。尽管存在一些局限性,但随着技术的发展,这些局限正在逐步被克服。

3. 超声无损检测技术工作原理



①【图 2】磁粉检测装置^[3]



①【图 3】船舶焊缝超声波无损检测示意图^[7]

3.1 工作原理

超声无损检测技术 (Ultrasonic non-destructive testing, 简称 UT) 是一种利用超声波在材料中传播的特性来检测材料内部缺陷的非破坏性检测方法。其工作原理主要分为超声波的产生和电子信号处理两大步骤。

3.1.1 超声波的产生:

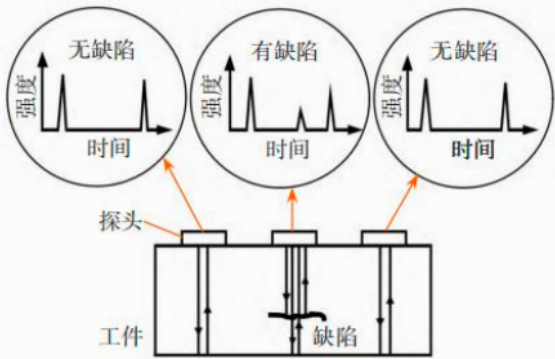
超声波是通过超声探头 (换能器) 产生的。探头内部有一个压电晶体, 当给它施加电脉冲时, 晶体会振动产生超声波。超声波从探头发射出来后, 进入被检测材料中。超声波在材料中的传播速度取决于材料的密度和弹性特性。

3.1.2 电子信号处理：

仪器接收到的电信号经过放大、滤波和模数转换等相关处理，将导入计算机系统。计算机根据信号的时间、幅度等特征，对缺陷进行定位、定量和定性分析。根据反射波的到达时间和强度，可以判断被检测缺陷的大小及位置。如图 4 所示，根据超声波在不同材料中的传播速度不同的物理性质，可以测量超声波从发射到接收的时间，可以计算出缺陷的深度。通过分析接收到的波形，可以识别不同类型的缺陷。例如，裂纹通常会在波形上产生一个明显的峰值。

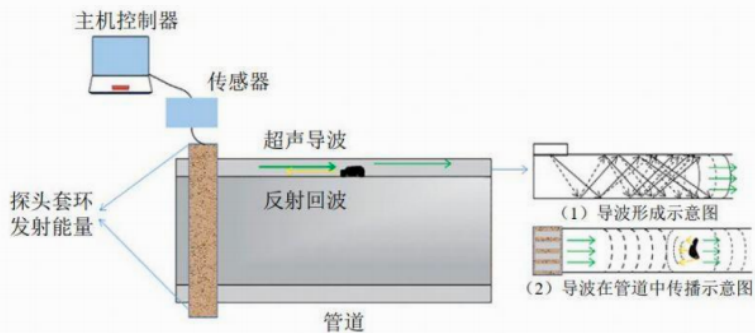
3.2 实验装置

如图 5 所示，这些设备和组件共同构成了超声无



【图 4】工件焊接质量超声无损检测原理示意图 [5]

损检测技术实验装置，它们在实验中相互配合，以实现
对材料内部结构和缺陷的准确检测。如表 2 所示，超
声无损检测技术实验装置通常包括以下几个主要部分。



【图 5】超声无损检测技术实验装置示意图 [6]

表 2 实验装置组成及其作用介绍

组成	作用
超声波发射和接收主机	这是实验装置的核心部分，负责产生和接收超声波信号。
超声波探头	包括直探头、斜探头和可变角探头等，可用于实验样品上发射和接收超声波。探头的类型和角度的选择取决于被检测材料的特性和缺陷检测的具体要求。
示波器与耦合剂	用于观察和分析发射和接收到的超声波信号，以便对信号进行进一步的处理和分析。在非接触式超声波检测技术中，耦合剂用于减少超声波在探头与检测面之间的损耗，提供较好的穿透能力，获得更好的检测效果。
超声波检测智能系统	包括模块化水浸检测系统、盘环件水浸检测系统、相控阵板材水浸检测系统、机器人式复合材料检测系统、复杂型面水浸检测系统和复合材料检测系统等。自动化超声波检测系统是以专业技术为基础的交钥匙解决方案，用于提高检测的自动化程度和效率。

4. 结论与展望

超声无损检测技术是一种在工业领域内广泛使用的非破坏性检测方法，以其高灵敏度、高分辨率和能够提供缺陷详细信息的特点，在船舶焊接等关键领域中发挥着重要作用。现已经发展出多种高级技术，如相控阵技术和衍射时差（TOFD）技术，这些技术提高了检测的灵活性、分辨率和准确性。实验装置包括超声波发射和接收主机、探头、实

验样品、示波器和耦合剂等，这些设备和组件共同构成了超声无损检测技术实验装置，它们在实验中相互配合，以实现材料内部结构和缺陷的准确检测。未来超声无损检测技术将继续融合新的科技，如人工智能、大数据和云计算，以提高检测的自动化和智能化水平，实现更快速、更准确的缺陷识别功能。随着技术的不断进步和创新，超声无损检测技术将为船舶工业领域带来更多的可能性。

参考文献

- [1] 孙健, 孙曲. 电站锅炉高合金钢材质安装焊接接头金相检测解析[J]. 冶金管理, 2021(13): 43-44.
- [2] 曾慧敏, 高向东, 张南峰, 等. 焊接裂纹无损检测方法[J]. 热加工工艺, 2019(12): 13-16.
- [3] 封秀敏, 刘丽婷. 焊接结构的无损检测技术[J]. 焊接技术, 2021, 40(6): 51-54.
- [4] 于凤坤, 赵晓顺, 王希望, 等. 无损检测技术在焊接裂纹检测中的应用[J]. 无损检测, 2017(6): 353-355.
- [5] 黄钧, 王国荣, 李国进, 等. 焊接结构水下无损检测技术及其进展[J]. 无损检测, 2015(4): 207-211.
- [6] Wei Q, Zhu L, Zhu J, et al. Characterization of impact fatigue damage in CFRP composites using nonlinear acoustic resonance method[J]. Compos Struct, 2020: 112804.
- [7] Yin J, Wei Q, Zhu L, et al. Nonlinear frequency mixing of Lamb wave for detecting randomly distributed microcracks in thin plates[J]. Wave Motion, 2020, 99(1): 102663.
- [8] Wei Q, Han M, Zhu J, et al. Experimental and numerical investigation on detection fatigue crack in metallic plate by vibro-thermography[J]. Infrared Phys Technol, 2022, 126: 104347.
- [9] He J, Wei Q, Zhang L, et al. Detection and quantification of artificial delaminations in CFRP composites using ultrasonic thermography[J]. Infrared Phys Technol, 2023(130): 104579.
- [10] Li W, Wei Q, He J, et al. Nonlinear frequency mixing of counter-propagating collinear A0-S0 mode Lamb waves for delamination detection in CFRP composite plate[J]. Nondestruct Testing Eval, 2023, 38(6): 21.
- [11] Wei Q, He J, Zhao J, et al. Experimental investigation on detection of coating debonds in thermal barrier coatings using vibro-thermography with a piezoceramic actuator[J]. NDT E Int, 2023, 4: 102859.
- [12] Li B, He J, Zhao J, et al. Barely visible impact damage detection in CFRP composite using vibro-thermography with narrow band sweep excitation[J]. Infrared Phys Technol, 2024, 2: 105339.
- [13] Li X, Wei Q, Li F, et al. Experimental and numerical investigation on detection of BVID in CFRP composite plates using vibro-acoustic modulation[J]. Nondestruct Testing Eval, 2024, 6: 2384615.