

# Discussion on Weld Inspection Technology for Electromechanical Special Equipment Based on Ultrasonic Testing

Yu Cheng

Henan Special Equipment Inspection Technology Research Institute Co., Ltd., Zhumadian, Henan, 463000, China

## Abstract

Mechanical and electrical special equipment is widely used in energy, chemical, metallurgical, construction installation, and urban public service sectors. The quality of welding joints directly impacts equipment load-bearing capacity, sealing performance, and long-term operational safety. Ultrasonic testing, as a critical non-destructive inspection method for welds, offers advantages including strong penetration capability, high detection efficiency, sensitivity to volumetric and partial-area defects, and suitability for field operations. It has become a key technical approach for weld quality control in pressure-bearing equipment, steel structures of lifting machinery, and certain pressure pipelines. Based on practical experiences in weld inspection for China's mechanical and electrical special equipment, this paper systematically analyzes the working principles, key technologies, and implementation processes of ultrasonic testing to provide valuable references and insights for industry professionals.

## Keywords

ultrasonic testing; mechanical and electrical special equipment; weld seam inspection technology

# 基于超声波检测的机电类特种设备焊缝检验技术探讨

程玉

河南省特种设备检验技术研究院有限公司, 中国·河南驻马店 463000

## 摘要

机电类特种设备广泛应用于能源、化工、冶金、建筑安装及城市公共服务等领域,其焊接接头质量直接关系到设备承载能力、密封性能与长期运行安全。超声波检测作为焊缝无损检测的重要方法,具有穿透能力强、检出效率高、对体积型与部分面积型缺陷敏感、适于现场作业等优势,已成为承压设备、起重机械钢结构及部分压力管道焊缝质量控制中的关键技术手段。本文结合我国机电类特种设备焊缝检验实际,围绕超声波检测的作用机理、关键技术以及工艺实施展开系统分析,以供广大同行参考与交流。

## 关键词

超声波检测; 机电类特种设备; 焊缝检验技术

## 1 引言

机电特种设备随着工业技术的不断进步,在各行业得到了越来越广泛地应用。这些设备的安全可靠性直接受到焊缝质量的影响。因此,保证设备安全运行的一个重要课题就是如何高效准确地检测焊缝中的缺陷。本文旨在探讨机电类特种设备焊缝检验中超声波检测技术的具体应用,以期为行业焊缝质量控制提供科学依据。

## 2 超声波检测在焊缝检验中的作用机理

为准确识别机电类特种设备焊缝内部缺陷,超声波检测主要依靠声波在焊接接头中的传播、反射、折射与衰减规律实现缺陷判别。检测时,探头在耦合剂作用下将高频机械

振动稳定传入工件,声束沿焊缝、热影响区及母材连续传播,当其遇到未熔合、未焊透、气孔、夹渣以及裂纹等界面不连续部位时,由于局部声阻抗发生突变,部分声能即返回探头形成缺陷回波,另一部分则继续向前传播或发生波型转换。检验人员依据回波出现的时间位置、波幅高低、波形变化及底波衰减程度,综合判断缺陷的埋藏深度、相对尺寸与分布状态<sup>[1]</sup>。对于焊缝余高、坡口形式和晶粒取向较复杂的接头,还需结合斜探头入射角、声程修正和扫查轨迹控制,使声束能够有效覆盖焊缝根部、熔合线及截面转折区域,减少漏检与误判。

## 3 基于超声波检测的机电类特种设备焊缝检验关键技术

### 3.1 常规脉冲反射法焊缝检验技术

常规脉冲反射法是机电类特种设备焊缝超声检测中应用最广的基础技术,其基本原理是由探头向焊缝区域发射超

【作者简介】程玉(1997-),女,中国河南驻马店人,硕士,初级会计师,从事会计学研究。

声脉冲,当声束遇到缺陷界面或组织突变部位时产生反射回波,检测人员据此对缺陷位置、深度及相对尺寸进行分析判断。该技术的关键首先在于参数匹配,即根据焊缝厚度、坡口形式、接头结构及缺陷类型合理选择探头频率、晶片尺寸和折射角,以保证声束能够有效覆盖焊缝根部、熔合线及中心区域。其次,检测前必须完成标准试块校准和灵敏度调整,确保声程显示准确、回波幅值可比,避免误判和漏判。再次,扫查工艺直接影响检出效果,现场通常采用多角度、双侧或往复扫查方式,提高对未焊透、未熔合、夹渣、气孔及裂纹等缺陷的检出能力。

### 3.2 斜探头横波与多角度扫查技术

在机电类特种设备焊缝超声检验中,斜探头横波与多角度扫查技术是提升缺陷检出率和定位精度的关键手段。其基本思路是利用斜探头将纵波转换为一定折射角的横波,使声束以斜入射方式进入工件内部,从而更有效地覆盖焊缝根部、熔合线、热影响区及焊缝中心等敏感部位。相较于直探头检测,横波对未熔合、未焊透、裂纹等平面型缺陷更为敏感,尤其适用于中厚板对接焊缝及承压部件关键焊接接头检验。实际应用中,检验人员需依据母材厚度、坡口形式、焊缝余高和可能缺陷分布,合理选用 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 等不同折射角探头,并通过单面双侧、双面双侧及前后往复扫查等方式,形成交叉覆盖。对于结构回波复杂或焊缝成形不规则部位,还应结合摆动扫查和转角扫查分析回波变化规律,区分几何反射与真实缺陷信号。因此,该技术不仅要求探头参数选择准确,还要求扫查路径、步距控制和回波判读规范统一,才能切实提高机电类特种设备焊缝检验的可靠性与工程适用性。

### 3.3 相控阵超声检测技术

在机电类特种设备焊缝检验中,相控阵超声检测技术是在常规超声基础上重要提升,其核心在于利用多阵元探头分组激发与延时控制原理,实现声束偏转、聚焦和动态扫查,从而提高复杂焊缝区域的覆盖能力与缺陷成像效果。相较于单晶斜探头检测,该技术可在一次布置中完成多角度声束发射,能够对焊缝根部、侧壁、熔合线及热影响区实施连续性扫查,尤其适用于厚壁压力容器、压力管道及异形接头等几何条件复杂的检验对象。实际应用中,检测人员需结合工件厚度、坡口形式、材质声速及预期缺陷类型,合理设置阵元孔径、焦点深度、扫描角度范围和步进参数,以保证对未熔合、未焊透、裂纹、夹渣等缺陷的有效响应。其技术优势不仅体现在检出率提高,还体现在可生成S扫、B扫等图像,便于对缺陷位置、长度、埋深和指向性进行直观判读,减少对单一回波经验判断的依赖。但该技术对工艺方案设计、校准试块选取、数据分析能力和人员资质要求较高,现场实施时必须严格控制探头耦合、扫查轨迹和数据校验过程,才能真正发挥相控阵超声在机电类特种设备焊缝精细化检验中的技术优势<sup>[2]</sup>。

### 3.4 衍射时差法超声检测技术

在机电类特种设备焊缝检验中,衍射时差法超声检测技术是一种以缺陷端点衍射信号为判据的定量检测方法,其技术重点是通过测量缺陷上、下端点衍射波到达接收探头的时间差,对缺陷高度和埋藏位置进行计算与评定。相较于常规脉冲反射法,TOFD技术对裂纹、未熔合、未焊透等危险性较大的平面型缺陷具有较高的检出灵敏度,尤其适用于压力容器、压力管道及锅炉承压焊缝的全厚度检测。实际应用中,检测人员需根据工件厚度、焊缝形式和检测范围合理选择发射与接收探头间距、探头角度及扫描步距,并通过标准试块校准横波声速、时间基线和盲区范围,保证缺陷定量结果的准确性。该技术的突出优势在于检测速度较快、检测结果重复性较好,且能够较为直观地给出缺陷高度信息,弥补传统回波法在缺陷定高方面的不足。但TOFD对近表面盲区、晶粒粗大材料及复杂几何结构部位仍存在一定局限,现场检验时通常需与脉冲反射法或相控阵技术配合使用,以提高对全焊缝区域的覆盖能力和综合判定可靠性。

## 4 机电类特种设备焊缝超声检测的工艺实施要点

### 4.1 检测前技术准备

为保证后续扫查与缺陷判读建立在可靠基础之上,机电类特种设备焊缝超声检测在实施前必须把技术准备工作做细做实。检测人员应先系统核对施工图样、焊接工艺评定、产品标准、验收等级及返修记录,明确母材类别、焊缝形式、坡口尺寸、板厚范围、热处理状态和检测比例,据此确定声束入射方式、扫查面位置、探头折射角、工作频率及灵敏度调节基准,避免检测方案与构件实际状态脱节。随后应结合焊缝余高、表面成形、咬边及两侧母材可达性,对检测面进行修磨、除锈、去油和清理飞溅物处理,使探头移动区域平整连续,必要时提前划定基准线、焊缝中心线和缺陷定位参照线<sup>[3]</sup>。仪器与试块准备阶段应重点检查探头晶片状态、连接线稳定性、时基线性、分辨力和声程覆盖能力,并选用与工件材质、厚度相匹配的标准试块或对比试块进行校准。

### 4.2 扫查实施与缺陷信息获取

扫查实施是焊缝超声检测由技术准备转入缺陷识别的核心环节,其关键不在于机械移动探头,而在于通过规范扫查实现焊缝有效声束覆盖与异常回波准确捕获。第一,检测人员在进入正式扫查后,应按焊缝中心线两侧分区组织探头运行,并依据坡口形式、母材厚度与热影响区宽度确定扫查带覆盖范围,使声束既能穿过焊缝根部,又能兼顾熔合线附近的敏感区域。扫查过程中应控制探头移动速度、前后间距和摆动幅度,避免因走位跳跃、压接不稳或耦合状态波动造成回波漏检。对余高未完全修整、表面局部不平整或曲率变化较大的部位,检测人员应缩短步进距离,采用小范围往返扫查和定点停留观察相结合的方式,确保同一可疑部位至少

经过不同方向声束重复覆盖。第二,在缺陷信息获取环节,检测人员不能仅凭单次异常波形作出判断,而应围绕回波出现位置、波幅变化、指示长度和动态包络特征进行连续判读。对于疑似未焊透、未熔合、夹渣和气孔等常见缺陷,应通过改变探头入射方向、调整声程覆盖区间和对比相邻区域底波衰减情况,提取更具区分度的反射信息。若异常回波在探头前后移动时呈现稳定再现,且其显示位置与焊缝结构特征不符,则应进一步锁定缺陷边界,测定其最大响应点、起止显示范围和相对埋藏深度,避免将焊趾成形波、根部几何反射或组织不均引起的杂波误判为缺陷指示。第三,扫查发现异常后,检测人员应立即开展定位复核与信息补充,不宜只保留单一角度结果。现场通常应从焊缝两侧分别复测,并结合缺陷最大回波对应的探头位置、声程值与表面基准点进行换算,形成较完整的平面位置和深度信息。对于指示长度较长或波形展宽明显的部位,还应沿焊缝轴向连续测读,区分连续性缺陷与离散性缺陷。记录时应写明扫查面、探头参数、缺陷显示区段、最大波高位置及复测结果,使后续评定建立在可复核、可对比的原始信息基础上。

### 4.3 缺陷评定与结果判定

为保证机电类特种设备焊缝超声检测结论具有可复核性和可执行性,缺陷评定与结果判定必须建立在缺陷性质识别、当量定量和验收分级相互衔接的基础上。

首先,检测人员应先依据回波位置、声程分布、波形稳定性和探头前后左右移动时的动态变化,对缺陷性质作出初步区分,重点判别其属于裂纹、未熔合、未焊透、夹渣还是密集气孔等类型。对于危险性较高的平面型缺陷,检测人员不能仅凭单次最高波幅作出判断,还应结合缺陷指示长度、端部回波衰减特征以及不同折射角复测结果进行综合分析,防止将根部几何反射、余高影响或焊缝组织杂波误判为真实缺陷。其次,检测人员应严格按照工艺卡和现行检验规则确定基准灵敏度、评定灵敏度及定量方法,并在同一检测面、同一声程条件下完成缺陷当量比较。对连续性反射指示,应优先测定其实际指示长度和对应埋藏深度。对离散型反射指示,则应核查相邻缺陷间距、分布密度和组合效应。若同一区域存在多处相近回波,检测人员应按缺陷群进行评定,不能简单按单个小缺陷分别放行,以免低估焊接接头的实际风险。再者,检测人员应将缺陷性质、当量大小、指示长

度和所在部位与对应产品标准、设计文件及验收级别逐项对照,形成合格、复验、返修或进一步处理的明确结论。对位于应力集中区、厚薄过渡区和承载敏感区的缺陷,即使波幅未明显超限,也应从严核定。

### 4.4 检验报告与质量闭环

为保证焊缝超声检测结果能够被有效采用并形成持续纠偏,检验报告编制与后续质量处置必须实行结果可核查、责任可追溯、整改可复验的工艺控制要求。检验人员在出具报告时,应当以原始记录、扫查标记、回波特征、缺陷定量结果和判定依据为基础,完整载明设备名称、构件编号、焊缝部位、母材与焊材类别、检测时机、探头参数、耦合条件、扫查面、检测比例及执行标准,避免仅给出合格与不合格的结论性表述。对于发现的超标缺陷,报告中应明确缺陷性质判别倾向、指示长度、埋藏深度、当量大小规律、对应焊缝分区及返修建议范围,使焊接、质检和监检人员能够据此实施定点处置。返修后复验不得沿用首次检测结论替代实际复查结果,复验报告应单独标注返修次数、复验部位、缺陷消除情况及最终判定状态。对连续出现同类缺陷的焊缝接头,检验机构还应同步提出工艺复审要求,督促施工单位核查坡口加工、组对错边、焊接电流、层间清理和焊工操作稳定性,并将复验结果、原因分析、纠正措施和复核意见一并归入质量档案,形成从检出、处置、复验到归档的闭环控制。

## 5 结语

综上所述,基于超声波检测的机电类特种设备焊缝检验技术,已经形成由常规脉冲反射法、斜探头横波检测、相控阵超声检测和衍射时差法超声检测等共同构成的多层次技术体系。对于我国机电类特种设备焊缝质量控制而言,未来工作的重点不应只是单纯提高检测数量,而应着力提升工艺适配性、结果可追溯性、缺陷评定一致性和全过程质量闭环水平。

### 参考文献

- [1] 马辉.机械类特种设备焊缝无损检测实操技术研究[J].行车指南, 2023(8):0044-0045.
- [2] 叶志成.探索超声波相控阵检测技术在特种设备焊缝检验中的应用[J].今日制造与升级, 2023(11):195-197.
- [3] 段晓美,王晨阳.压力管道焊缝缺陷的相控阵超声检测技术研究[J].今日制造与升级, 2025(5):87-89.