

# 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

纪 虎 韩曙光

中石化胜利海上石油工程技术检验有限公司 山东 东营 257000

**摘要：**特种设备焊缝质量直接关系到设备运行安全，超声波相控阵检测技术凭借声束可控、检测精度高、无辐射污染等优势，成为解决复杂焊缝检测难题的关键技术。本文阐述该技术的核心原理、系统组成及关键技术，对比其与传统检测技术的适配性，结合特种设备焊缝检验要求与难点，分析其应用实践，剖析现存问题并提出优化对策，展望未来发展趋势，为特种设备焊缝精准、高效检验提供理论与实践参考。

**关键词：**超声波相控阵检测技术；特种设备；焊缝检验；应用

## 引言

特种设备广泛应用于化工、电力等领域，焊缝作为设备连接核心，其内部缺陷易引发安全事故，焊缝检验是保障设备安全运维的重要环节。传统检测技术在复杂焊缝、微小缺陷检测中存在盲区与精度不足等问题，难以满足行业高标准要求。超声波相控阵技术通过阵元激励控制实现声束灵活调控，可精准识别裂纹、未焊透等缺陷，本文围绕其应用展开探索，助力提升检验质量与效率。

## 1 超声波相控阵检测技术基础理论

### 1.1 超声波相控阵检测技术核心原理

(1) 超声波传播基本特性：超声波在特种设备焊缝材料中以纵波、横波形式传播，会发生反射、折射和散射，其传播速度与焊缝金属材质、晶粒尺寸相关，缺陷处会产生特征反射信号，为缺陷识别提供依据。(2) 相控阵技术核心机制：通过阵元激励延迟法则，控制各阵元发射超声波的时间差，实现声束可控偏转与聚焦，可灵活调整声束角度和焦点位置，精准覆盖焊缝检测区域。(3) 检测信号的接收与处理原理：探头接收缺陷反射信号后，经仪器放大、滤波消除干扰，再通过信号处理转化为可视化图像，完成缺陷的初步识别与信号分析。

### 1.2 超声波相控阵检测系统组成

(1) 相控阵探头：分为线阵、面阵等类型，焊缝检测选型需结合焊缝厚度、形状，优先选择适配声束角度、分辨率高的探头，确保覆盖焊缝全截面。(2) 检测仪器：主机核心功能是控制阵元激励、信号采集与处理，可灵活设置声束参数，具备强大的数据存储和分析能力，支撑缺陷精准判定。(3) 辅助设备：耦合剂用于排除探头与工件间空气，保证声能传递；扫查装置确保探头匀速移动，提升检测稳定性，二者直接影响检测信号的准确性。

### 1.3 超声波相控阵检测关键技术

(1) 声束控制技术：线扫描适用于平面焊缝检测，扇扫描可覆盖复杂焊缝区域，根据焊缝结构选择对应扫查方式，保障检测无盲区。(2) 成像技术：B型成像显示焊缝截面缺陷，C型成像呈现缺陷平面分布，S型成像适配曲面焊缝，结合各类成像特点可精准识别裂纹、未焊透等缺陷。(3) 缺陷定量分析技术：通过声束定位确定缺陷位置，结合反射信号幅度、成像尺寸，采用校准方法完成缺陷尺寸测量，为缺陷评级提供依据<sup>[1]</sup>。

### 1.4 超声波相控阵检测技术与传统检测技术对比

(1) 与常规超声波检测对比：优势是声束可控、检测效率高，不足是设备成本高，常规超声更适用于简单焊缝、低成本检测场景。(2) 与射线、磁粉检测对比：检测效率高于射线，精度优于磁粉，无辐射污染，射线检测更适用于厚焊缝，磁粉检测仅适配铁磁性材料焊缝。(3) 适配性分析：相控阵适用于复杂、高精度要求的特种设备焊缝，常规超声适配简单焊缝，射线、磁粉检测根据材料、厚度按需选用，互补实现全面检测。

## 2 超声波相控阵检测技术在特种设备焊缝检验中的应用实践

### 2.1 特种设备焊缝检验的技术要求与检测难点

(1) 特种设备焊缝的结构特点：特种设备焊缝类型多样，核心包括对接焊缝和角焊缝，其中对接焊缝广泛应用于储罐、压力容器壳体及管道连接，多为全焊透结构，焊缝厚度随设备规格变化；角焊缝主要用于设备法兰、支座与主体的连接，受力复杂且易产生应力集中，此外还有T型接头、环向接头等，部分异形设备还存在斜锥体、夹套管等复杂焊缝结构，增加了检测难度。

(2) 行业标准对焊缝检验的要求：结合GB/T 32563-2016《无损检测 超声检测 相控阵超声检测方法》、NB/T 47013.15-2021《承压设备无损检测 第15部分：相控阵

超声检测》等标准，要求焊缝检测需覆盖全截面，缺陷检出率不低于95%，对裂纹、未焊透、未熔合等危险性缺陷需精准定位、定量，同时需记录检测数据，确保可追溯，不同类型特种设备焊缝需根据材质、厚度制定专项检测方案。（3）特种设备焊缝检验的核心难点：一是复杂结构制约，如弯管、斜锥体等异形焊缝，声束传播路径复杂，易产生检测盲区；二是缺陷类型多样，焊缝中可能存在裂纹、气孔、夹渣等多种缺陷，且部分缺陷尺寸微小、形态不规则，识别难度大；三是设备工况影响，部分特种设备处于高温、高压或户外环境，对检测设备稳定性和操作规范性要求极高<sup>[2]</sup>。

## 2.2 超声波相控阵检测技术在典型特种设备焊缝检验中的应用

（1）在钢制承压设备焊缝检验中的应用：主要用于储罐、压力容器等设备，检测前通过声场仿真模拟声束在不同厚度焊缝中的传播路径，优化探头布置和参数设置，再通过工艺验证确保检测方案可行性。检测时重点排查壳体对接焊缝、封头与筒体连接焊缝的危险性缺陷，可精准检出常规检测难以发现的内部微小裂纹，有效防范承压设备泄漏风险。（2）在压力管道焊缝检验中的应用：涵盖直管对接、弯管、环向对接接头等场景，针对直管焊缝采用线扫描方式，确保焊缝全长度覆盖；针对弯管焊缝，通过声束偏转技术，避开管道曲率对检测的影响，精准检测弯管内壁、外壁及熔合区缺陷；针对环向对接接头，采用扇扫描结合聚焦技术，提升缺陷定位精度，适配管道安装后的现场检测需求<sup>[3]</sup>。（3）在特种设备异形焊缝检验中的应用：针对斜锥体夹套管纵缝、设备法兰与接管连接等复杂异形焊缝，结合焊缝结构特点选用面阵探头，通过多角度声束组合扫描，弥补传统检测技术的盲区缺陷。例如斜锥体夹套管纵缝，通过调整声束聚焦深度和偏转角度，实现焊缝全截面检测，有效解决异形结构焊缝检测不全面的问题。

## 2.3 超声波相控阵检测工艺优化与实施流程

（1）检测前准备工作：先对试件表面进行处理，去除铁锈、油污、焊渣等杂物，确保表面粗糙度符合检测要求；根据焊缝材质、厚度、结构类型，选用适配的线阵或面阵探头；通过标准试块进行参数校准，调整声速、灵敏度等参数，确保检测精度，同时检查检测仪器、扫查装置及耦合剂的性能，保障检测顺利开展。（2）检测工艺参数优化：探头频率根据焊缝厚度调整，薄焊缝选用高频探头提升分辨率，厚焊缝选用低频探头增加穿透能力；楔块角度结合焊缝坡口角度设定，确保声束精准入射至焊缝熔合区；聚焦深度根据焊缝厚度设

定，使焦点落在焊缝中心区域，提升缺陷反射信号强度，减少干扰信号。（3）现场检测实施流程与操作规范：按照预设方案采用线扫描、扇扫描等方式匀速扫查，扫查速度控制在合理范围，避免漏检；耦合剂选用高粘度、声阻抗匹配的类型，确保探头与试件表面良好耦合；实时记录检测数据和图像，对疑似缺陷区域进行重复扫查，确认缺陷信息，严格遵循操作规范，避免人为误差。

## 2.4 应用实例分析

（1）实例概况：本次检测对象为某化工企业在用立式储罐，材质为Q345R，储罐直径8m、高度12m，对接焊缝厚度16mm，检测环境为户外常温，主要检测焊缝内部裂纹、未焊透等缺陷，同时与常规超声波检测进行比对验证。（2）检测过程与结果分析：采用线阵探头，设定频率5MHz、楔块角度60°，聚焦深度8mm，通过扇扫描方式开展检测，共检出3处微小裂纹，最大长度2.5mm、深度1.8mm，经定量分析均符合标准允许范围；与常规超声波检测比对，相控阵检测检出缺陷数量更多、定位精度更高，且可通过成像直观呈现缺陷形态，验证了检测结果的准确性。（3）实例总结：该实例验证了超声波相控阵检测技术在钢制储罐焊缝检验中的有效性和实用性，可精准检出微小缺陷，降低安全隐患。针对检测中发现的户外耦合剂易流失问题，建议选用耐高温、抗流失型耦合剂；同时优化扫查路径，进一步提升复杂环境下的检测效率，为后续同类特种设备焊缝检验提供参考。

## 3 超声波相控阵检测技术应用中的问题与优化对策

### 3.1 技术应用中存在的主要问题

（1）设备成本与维护问题：超声波相控阵检测设备整体价格较高，一套标准检测系统（含探头、主机、扫查装置）成本远高于常规超声波检测设备，对中小企业造成较大资金压力。同时，设备核心部件精密，维护难度大，需专业技术人员进行定期检修，维护费用偏高，且部分进口部件采购周期长，易影响检测工作的正常开展。（2）检测人员专业能力不足：相控阵检测技术涉及声学原理、设备操作、参数设置、缺陷识别等多个领域，对人员专业素养要求较高。目前部分检测人员缺乏系统培训，操作技能不熟练，参数设置不合理，难以根据焊缝结构和工况优化检测方案，且对复杂缺陷的识别能力不足，易出现漏检、误判等问题，影响检测结果的准确性。（3）复杂工况下的检测局限性：在特种设备焊缝检测中，部分设备处于高温、高腐蚀、强粉尘等复杂工况，严重影响检测效果。高温环境会导致探头性能下

降、耦合剂失效,腐蚀表面会干扰声束传播,强粉尘则会影响探头与试件的耦合效果,导致检测信号失真,难以精准识别缺陷,甚至无法开展正常检测工作。(4)标准规范与实际应用的适配问题:现有超声波相控阵检测标准多为通用性规范,针对部分特殊场景(如异形焊缝、高温高压设备焊缝、特殊材质焊缝)缺乏针对性的检测标准和操作指南。实际检测中,检测人员难以根据标准明确检测参数和判定依据,导致检测流程不统一,检测结果缺乏可比性。

### 3.2 针对性优化对策

(1)设备成本控制与维护优化:积极推广便携式、经济型相控阵检测设备,降低设备采购成本,适配中小企业的检测需求。建立完善的设备定期维护机制,明确维护周期、内容和标准,培养专业维护人员,减少对进口部件的依赖,同时建立备件储备库,缩短维修周期,降低维护成本,保障设备稳定运行。(2)检测人员专业培训体系建设:构建标准化培训体系,结合理论教学与实操演练,重点培训声学原理、设备操作、参数优化、缺陷识别等内容,邀请行业专家开展专题讲座。建立常态化考核机制,通过理论考试、实操考核检验培训效果,考核合格后方可上岗,同时开展定期复训,及时更新知识储备,提升检测人员的专业能力。(3)复杂工况检测技术改进:加大技术研发投入,研发适配高温、腐蚀等特殊环境的专用探头和耦合剂,提升设备在复杂工况下的适应性。优化检测工艺,采用高温适配的扫查方式和参数设置,减少环境因素对检测信号的干扰,同时结合防护措施,保障检测人员和设备的安全,确保复杂工况下检测工作的顺利开展和检测结果的准确性。(4)完善相关标准规范:结合工程实践,联合行业协会、科研机构和企业,补充完善特殊场景下的针对性检测标准,明确检测参数、操作流程和缺陷判定依据。推动标准与实际应用深度融合,细化不同类型特种设备焊缝的检测要求,实现检测工作的标准化、规范化,提升检测结果的可比性和权威性。

### 3.3 超声波相控阵检测技术的发展趋势

(1)智能化发展方向:结合人工智能、机器学习技术,研发智能检测系统,实现检测信号的自动分析、缺陷的自动识别与分级,减少人为干预,降低漏检、误判概率,提升检测效率和准确性。同时,通过大数据分析,实现检测数据的智能化管理和趋势预判,为特种设备安全运维提供数据支撑。(2)小型化与集成化发展:随着电子技术的进步,便携式、一体化检测设备将成为发展主流,设备体积缩小、重量减轻,便于现场移动检测,适配高空、狭小空间等复杂检测场景。同时,实现探头、主机、扫查装置的集成化设计,简化操作流程,提升检测的便捷性和灵活性。(3)多技术融合发展:推动超声波相控阵技术与TOFD检测、射线检测、磁粉检测等技术的融合应用,发挥各类技术的优势,弥补单一技术的局限性。例如,相控阵与TOFD结合,可提升缺陷定量精度;与射线检测结合,可实现内部缺陷的全面检测,进一步提升特种设备焊缝检验的可靠性。

### 结束语

综上所述,超声波相控阵检测技术在特种设备焊缝检验中优势显著,可有效解决传统技术难以应对的复杂结构、微小缺陷检测难题,在各类特种设备焊缝检验中展现出良好实用性与有效性。尽管目前该技术在设备成本、人员能力等方面仍有不足,但通过针对性优化,可逐步完善应用体系,未来其将在特种设备安全检验领域发挥更重要作用,为设备安全运行保驾护航。

### 参考文献

- [1]陈杨新.超声波相控阵检测技术在承压特种设备焊缝检验中的应用探讨[J].中国金属通报,2023,16(10):231-235.
- [2]张俊超.特种设备检验中无损检测技术应用研究[J].中国设备工程,2021,24(18):104-108.
- [3]薛鹏.无损检测技术在特种设备检验中的运用探讨[J].科技风,2022,7(29):85-87.