

# 承压设备无损检测新技术的标准化进展与对比分析

赵陈陈

河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院焦作分院 河南 焦作 454000

**摘要：**承压设备在能源、石化、化工等关键领域应用广泛，其运行安全关乎产业稳定与公共安全。无损检测是保障其质量与安全的核心技术，虽近年涌现诸多革新成果，但因标准化建设滞后，技术推广受限。本文梳理射线、超声、声发射、电磁等主流无损检测新技术的特性与场景，剖析国内外标准化动态及核心规范。从多维度对比新技术，阐述标准化对提升检测互认性、促进创新、降低风险的作用，为承压设备无损检测新技术标准化完善提供参考，推动行业检测升级与高质量发展。

**关键词：**承压设备；无损检测；新技术标准化

**引言：**工业向高端化、大型化发展，承压设备工况更复杂，对检测技术精准、高效、安全要求提高。传统无损检测技术在应对厚壁设备、微小缺陷、在线监测等场景时局限性渐显。近年来，射线、超声等检测领域新技术不断出现，为承压设备检测提供更优方案。但新技术因缺乏统一标准，检测结果一致性差、跨区域互认难，制约产业化应用。标准化是规范技术、保障质量的核心，其建设影响新技术推广。本文聚焦新技术标准化进展与对比，为行业标准化完善和技术选型提供支撑。

## 1 承压设备无损检测新技术概述

### 1.1 射线检测技术（RT）

射线检测技术凭借穿透性强、成像直观等优势，在承压设备内部缺陷检测中占据重要地位，近年来在数字化与高精度化方向取得显著突破。数字射线检测（DR）与计算机射线照相检测（CR）逐步替代传统胶片射线检测，大幅缩短检测周期，实现检测数据的数字化存储与远程分析。更先进的工业计算机断层扫描（CT）技术可构建设备内部三维模型，精准定位微小缺陷的空间位置与尺寸，适配复杂结构承压设备的检测需求。另外，相控阵射线检测技术通过优化射线束分布，提升了厚壁设备与异形构件的检测效果。该类技术核心优势在于缺陷成像直观、辨识度高，适用于焊缝、铸件等部位的内部缺陷检测，但需严格控制辐射防护，确保检测安全。

### 1.2 超声检测技术（UT）

超声检测技术以其无辐射、检测深度大、成本适中的特点，成为承压设备检测的主流技术之一，新技术聚焦于精准化与智能化升级。相控阵超声检测（PAUT）通过多阵元探头控制声波传播方向与聚焦点，实现对复杂焊缝、曲面构件的全方位检测，大幅提升缺陷检出率<sup>[1]</sup>。时间飞行衍射（TOFD）技术利用衍射波信号对缺陷进行

定量测量，精度远超传统超声检测，适用于厚壁设备的裂纹检测。超声导波检测技术可实现长距离管道的快速检测，无需大面积拆除保温层，显著提升检测效率。智能化超声检测系统结合机器学习算法，可自动识别缺陷类型与尺寸，降低人为判断误差，推动检测流程自动化。

### 1.3 声发射检测技术（AE）

声发射检测技术区别于其他检测技术，可实现承压设备在运行状态下的动态监测，实时捕捉缺陷扩展过程，近年来在在线监测领域应用愈发广泛。该技术通过布置传感器采集设备内部缺陷（如裂纹扩展、应力释放）产生的弹性波信号，结合信号分析算法定位缺陷位置并评估其危险性。新一代声发射检测系统具备多通道信号采集、抗干扰能力强等特点，可适配高温、高压等复杂工况下的检测需求。在大型储罐、压力容器的定期检验与在线监控中，声发射检测技术可有效预警潜在安全风险，避免突发性事故发生。其核心优势在于无需停机检测、可实现全域监测，但对检测环境噪声较为敏感，需配套降噪与信号筛选技术。

### 1.4 电磁检测技术（ET）

电磁检测技术基于电磁感应原理，适用于导电材料制成的承压设备表面及近表面缺陷检测，新技术在检测精度与适用范围上显著提升。涡流检测技术通过优化探头设计与信号处理算法，可检测出微小裂纹与腐蚀缺陷，适配管道、阀门等构件的快速检测。漏磁检测技术则适用于铁磁性材料设备的表面与近表面缺陷检测，无需去除设备表面涂层，检测效率高，广泛应用于油气管道的在役检测。此外，电磁超声检测技术融合了电磁感应与超声检测的优势，无需耦合剂即可实现高温、高速工况下的检测，突破传统超声检测的应用限制。该类技术检测速度快、操作便捷，但对非导电材料及深埋缺陷的检

测效果有限。

## 2 无损检测新技术的标准化进展

### 2.1 国际标准化动态

国际层面高度重视承压设备无损检测新技术的标准化建设,以ISO、ASTM、CEN等为核心的国际组织主导制定了一系列标准规范。ISO/TC 138(承压设备技术委员会)针对无损检测新技术发布多项标准,明确了相控阵超声检测、工业CT检测等技术的操作流程、参数设置及结果评定方法。ASTM标准则聚焦于射线检测与电磁检测新技术的标准化,如ASTM E2900-13规范了数字射线检测的技术要求,ASTM E3080-17明确了涡流阵列检测的应用准则。欧盟CEN/TS系列标准针对声发射检测等新技术制定专项规范,适配欧盟内部承压设备检测的统一需求。国际标准呈现出“技术全覆盖、参数精细化、场景差异化”的特点,为全球范围内新技术的推广应用提供了统一依据。

### 2.2 国内标准化进展

我国承压设备无损检测新技术标准化建设紧密衔接国际标准,同时结合国内产业实际需求不断完善。国家标准化管理委员会与国家能源局主导制定GB/T、NB/T等系列标准,形成了覆盖主流新技术的标准体系。GB/T 19293-2022《无损检测 声发射检测 总则》更新了声发射检测的技术要求与评定方法,适配新技术的应用需求;NB/T 47013.11-2021《承压设备无损检测 第11部分:相控阵超声检测》明确了相控阵超声检测在承压设备焊缝检测中的技术参数与验收标准。此外,行业协会与地方政府也制定了配套技术规范,补充细化特定场景下的标准化要求<sup>[2]</sup>。目前,国内标准已基本覆盖射线、超声、声发射及电磁检测新技术,但部分前沿技术的标准仍处于完善阶段,与国际先进标准的衔接度有待进一步提升。

### 2.3 标准化核心内容

无损检测新技术标准化的核心内容围绕技术规范、操作流程、结果评定及质量控制展开,确保检测过程的规范性与检测结果的可靠性。明确各类新技术的适用范围、设备参数(如射线能量、超声频率、传感器布置)及环境要求,为技术选型提供依据;规范设备校准、探头布置、信号采集等关键环节的操作步骤,降低人为操作误差;制定统一的缺陷分级标准与判定准则,明确不同类型缺陷的验收阈值,确保检测结果的一致性与公正性。另外,标准化内容还涵盖数据存储与共享规范,为检测结果的跨区域互认奠定基础。

## 3 新技术对比分析

### 3.1 检测效率对比

不同无损检测新技术的检测效率存在显著差异,受检测原理、设备特性及操作复杂度影响较大。电磁检测技术中的涡流检测与漏磁检测效率最高,可实现管道等构件的快速扫描检测,单条管道的检测速度可达每小时数十米,且无需复杂的前期准备工作。数字射线检测与相控阵超声检测的效率次之,数字射线检测省去了胶片冲洗环节,检测周期较传统射线检测缩短60%以上;相控阵超声检测可通过一次扫描覆盖多个区域,大幅减少检测时间。声发射检测虽无需停机检测,但前期传感器布置与信号校准耗时较长,且数据处理复杂度高,整体效率相对较低。工业CT检测因需构建三维模型,扫描与数据重建耗时久,适用于高精度检测场景,不适用于大规模快速检测。

### 3.2 检测精度对比

检测精度是衡量无损检测技术性能的核心指标,各类新技术在缺陷定位与定量精度上各有优劣。工业CT检测的精度最高,可实现微米级缺陷的精确定位与尺寸测量,清晰呈现缺陷的三维形态,适用于对检测精度要求极高的核心设备检测。相控阵超声检测与TOFD技术的精度次之,TOFD技术对裂纹深度的测量误差可控制在0.1mm以内,相控阵超声检测可精确定位缺陷的空间位置。数字射线检测的缺陷识别精度优于传统射线检测,但受成像分辨率限制,对微小缺陷的检测能力略逊于超声检测与CT检测<sup>[3]</sup>。声发射检测的优势在于实时监测缺陷扩展,但对缺陷尺寸的定量精度较低,需结合其他技术进行补充检测。电磁检测技术对表面及近表面微小缺陷的检测精度较高,但对深埋缺陷的检测精度有限。

### 3.3 适用性对比

各类新技术的适用性受设备材质、缺陷类型及工况条件的限制,需结合具体检测需求选型。射线检测技术中的工业CT检测适用于复杂结构构件与微小内部缺陷的检测,尤其适配铸件、焊缝等部位的缺陷检测,但对非导电材料的检测效果较差。超声检测技术适用性最广,相控阵超声检测与TOFD技术适用于厚壁设备的裂纹检测,超声导波检测适用于长距离管道检测,可适配多种材质与结构的承压设备。声发射检测适用于设备运行状态下的动态监测,尤其适用于大型储罐、压力容器等设备的缺陷扩展预警,可在高温、高压等复杂工况下工作。电磁检测技术仅适用于导电材料制成的设备,且主要检测表面及近表面缺陷,对深埋缺陷与非导电材料设备的适用性较差。

### 3.4 成本与安全性对比

成本与安全性是新技术推广应用的重要考量因素,各

类技术在设备购置、运维及安全风险上差异明显。成本方面,工业CT检测设备购置成本最高,单台设备造价可达数百万元,且运维成本高;相控阵超声检测与数字射线检测设备成本次之,适用于规模化应用;电磁检测与声发射检测设备成本相对较低,其中涡流检测设备性价比最高。安全性方面,射线检测技术存在辐射安全风险,需严格划定辐射防护区域,配备专业防护设备;声发射检测与超声检测无辐射风险,安全性较高;电磁检测技术操作过程安全,无明显安全隐患,但需注意设备电磁干扰对周边精密仪器的影响。从运维成本来看,射线检测因需定期更换耗材,运维成本高于超声、电磁等检测技术。

#### 4 标准化对行业的影响

##### 4.1 提升检测结果互认性

标准化建设是提升检测结果互认性的核心保障,有效解决了传统检测模式下“各自为战”的问题。统一的技术规范与结果评定标准,确保不同检测机构、不同区域采用相同技术得出的检测结果具备一致性与可比性,打破了区域壁垒与机构壁垒。例如,相控阵超声检测标准化实施后,不同检测机构对同一焊缝缺陷的检测结果误差大幅降低,检测报告可在行业内跨企业、跨区域互认。这不仅减少了重复检测带来的资源浪费,还提升了检测效率,为承压设备的跨区域运维与质量监管提供便利<sup>[4]</sup>。同时,标准化推动国内标准与国际标准衔接,助力我国承压设备检测结果获得国际认可,提升行业国际竞争力。

##### 4.2 促进技术创新与产业升级

标准化为无损检测新技术的研发与推广提供了明确方向,倒逼企业加大技术创新投入,推动产业升级。标准化过程中对技术参数、性能指标的明确要求,引导企业聚焦核心技术突破,提升产品质量与技术水平。例如,数字射线检测标准化后,企业纷纷加大对高分辨率成像技术的研发力度,推动设备性能不断提升。同时,标准化降低了新技术的推广门槛,规范的操作流程与评定标准使企业更易掌握新技术应用方法,加速新技术从实验室走

向工程实践。标准化催生了检测设备制造、检测服务等相关产业的发展,形成完整的产业链条,推动行业向智能化、高端化转型。

##### 4.3 降低安全风险与运维成本

标准化通过规范检测流程、提升检测精度,有效降低承压设备的安全风险与运维成本。统一的检测标准确保检测过程全面覆盖设备关键部位,减少缺陷漏检概率,及时发现潜在安全隐患并进行整改,避免突发性安全事故发生。例如,声发射检测标准化后,大型储罐的缺陷预警准确率显著提升,有效降低了泄漏、爆炸等风险。同时,标准化提升检测效率,减少设备停机检测时间,降低了因停机带来的生产损失。检测结果的互认性减少重复检测,降低检测成本;精准的缺陷定位与定量则为维修方案制定提供科学依据,避免过度维修与维修不足,大幅降低运维成本。

#### 结束语

承压设备无损检测新技术的发展与标准化建设相辅相成,新技术为检测行业注入活力,标准化则为技术推广保驾护航。未来,需进一步加强国内外标准协同,补齐标准缺口,完善标准化体系;同时,推动标准化与智能化技术融合,提升标准的科学性与前瞻性。相信通过技术创新与标准化建设的深度融合,将持续提升承压设备检测水平,推动行业高质量发展,为工业安全运行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]蔡景明,续宏毅,付志强,等.无损检测技术在承压设备接头检测中的应用研究[J].中国特种设备安全,2023,39(11):42-46.
- [2]刘博强,罗成,杨林.承压设备基于风险检验的无损检测探讨[J].中国设备工程,2021(10):161-162.
- [3]张沛.锅炉承压类特种设备检验中的问题及解决措施[J].中国设备工程,2020(03):162-163.
- [4]韩世勋.特种设备检验中无损检测技术的应用分析[J].甘肃科技,2020,36(24):24-25+3.