

# 探究无损检测技术在特种设备检验中的运用

马腾飞 蒋世伟

浙江太宁检测技术有限公司 浙江杭州 310000

**【摘要】**随着我国工业化与城镇化进程的加速，锅炉、压力容器、压力管道、电梯及起重机械等特种设备已渗透到生产生活的各个角落。由于这类设备往往在高温、高压、深冷、高腐蚀等极端工况下运行，其安全性直接关系到社会公共安全。无损检测（NDT）作为特种设备质量保证体系的核心，其技术运用的科学性与精准度至关重要。本文立足于一线检验实践，系统论述了射线、超声、磁粉、渗透及涡流等常规检测技术的应用机理，并重点探讨了相控阵超声（PAUT）、衍射时差法（TOFD）以及声发射（AE）等新技术在复杂工况下的突破。通过对比不同技术的优劣势与适用范围，结合具体工程案例，本文提出了多技术集成的综合检验策略。最后，针对当前检测领域的数字化转型及AI辅助评片趋势进行了展望，旨在为提升我国特种设备检验质量及本质安全水平提供理论支持与实践参考。

**【关键词】**特种设备；无损检测；相控阵超声；质量控制；智能化转型；安全评价

Exploring the Application of Non-Destructive Testing Technologies in Special Equipment Inspection

Ma Tengfei Jiang Shiwei

Zhejiang Taining Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000

**【Abstract】** With the acceleration of China's industrialization and urbanization, special equipment such as boilers, pressure vessels, pressure pipelines, elevators, and lifting machinery have permeated every aspect of production and daily life. Operating under extreme conditions—including high temperatures, high pressures, extreme cold, and severe corrosion—the safety of these devices directly impacts public safety. As the core of special equipment quality assurance systems, the scientific rigor and precision of non-destructive testing (NDT) technologies are paramount. Drawing from frontline inspection practices, this paper systematically examines the application mechanisms of conventional testing methods—including radiography, ultrasonography, magnetic particle testing, penetrant testing, and eddy current testing—and focuses on breakthroughs achieved by advanced technologies such as phased-array ultrasonic testing (PAUT), time-of-flight diffraction (TOFD), and acoustic emission (AE) under complex operating conditions. By comparing the strengths, limitations, and applicable scenarios of various technologies and analyzing specific engineering cases, the study proposes an integrated multi-technology inspection strategy. Finally, it outlines future trends in digital transformation and AI-assisted image interpretation within the testing field, aiming to provide theoretical support and practical guidance for enhancing the quality and intrinsic safety of special equipment inspections in China.

**【Key words】** Special equipment; Non-destructive testing; Phased array ultrasonography; Quality control; Intelligent transformation; Safety evaluation

## 1.引言

在现代工业链条中，特种设备被视为能量转换与介质输送的核心载体。浙江作为制造业强省，特种设备保有量巨大，作为浙江太宁检测技术有限公司的相关技术员，我们在执业过程中深刻感受到：特种设备的检验不仅是技术活，更是良心活。设备内部任何微小的原始缺陷或在役裂纹，在交变应力的诱导下都可能引发灾难性的失效。传统的破坏性试验虽能直接获取物理指标，但其“毁坏式”的特性决定了其无法

应用于特种设备的制造全检及在役巡检。无损检测（Non-Destructive Testing，简称NDT）技术则利用声、光、磁、电、热等物理现象，在不损害被检对象性能的前提下，探测其内部及表面的不连续性。当前，随着新材料（如复合材料、高强钢）和复杂结构（如深坡口大厚壁焊缝）的广泛应用，单一的检测手段已难以满足“高检出、准定性、精定量”的要求。因此，深入探究无损检测技术的多元化运用及前沿演进，具有极强的现实意义。

## 2. 特种设备无损检测的理论核心与战略意义

### 2.1 物理机理与检测可靠性

无损检测的核心在于物理场与材料缺陷的相互作用。无论是射线穿透后的能量衰减,还是超声波在介质界面上的反射,其本质都是通过测量物理量的异常变化来反推缺陷特征。对于我们检验人员而言,理解“缺陷的可检测性”与“检测的可靠性”至关重要。这不仅取决于仪器性能,更取决于材料声阻抗、晶粒度及表面粗糙度等物理参数。

### 2.2 预防本质安全事故

特种设备失效多表现为脆性断裂、疲劳破坏或应力腐蚀开裂。无损检测的作用在于:一是在制造环节消除“先天性”焊接缺陷;二是在安装环节严控接口质量;三是在在役环节实时监控裂纹萌生。通过这种“全寿命周期”的监控,可将事故隐患消灭在萌芽状态。

### 2.3 降本增效与数字化转型

无损检测的广泛运用,使设备能够实现“带病观察”或“靶向维修”,避免了盲目更换部件带来的资源浪费。同时,随着数字化射线(DR)和全聚焦成像(TFM)的应用,检测数据已成为设备数字化孪生系统的核心组成部分,为智慧化管理打下基础。

## 3. 常规无损检测技术的深度运用分析

### 3.1 射线检测技术(RT)的精细化应用

射线检测是特种设备检验中最直观的方法,尤其在判定缺陷性质(如气孔、夹渣、裂纹)方面具有天然优势。在技术机理中,利用X射线或 $\gamma$ 射线穿透金属时,由于缺陷部位密度与母材存在差异,导致透射强度不同,使底片或传感器感光。实际运用过程中,尤其在压力容器纵环焊缝的抽检中,我们常采用高电压X射线机以确保穿透力。针对户外长输管线, $\gamma$ 射线源因其无需电源、体量小而得到广泛应用。从优缺点方面来剖析,RT最大的优点是结果可长期追溯(底片存档),对体积型缺陷检出率极高。但其局限性也明显:对面积型缺陷(如未熔合)易漏检,且辐射防护成本高,检测效率相对较低。

### 3.2 超声检测技术(UT)的代际跨越

超声检测是目前应用范围最广的技术。传统的A型脉冲反射法虽已成熟,但在复杂焊缝面前显得力不从心。其中,常规UT适用于厚度大于8mm的碳钢件。通过换能器发射高频声波,观察回波信号的水平位移和波幅。其灵敏度高,但由于扫手法差异,容易受人为主观因素影响。衍射时差法(TOFD)是一种基于缺陷端部衍射波的定量技术。它不再

依赖波幅,而是通过时间差确定深度。在检测厚壁压力容器时,TOFD具有极高的裂纹检出率,且能实现扫查数字化,是目前大厚度焊缝检验的首选。相控阵超声(PAUT)是NDT领域的“革命性”技术。它通过控制换能器阵元的激发延迟,实现声束的扇形扫描或动态聚焦。在浙江太宁的多个电厂管座检测项目中,我们利用PAUT的S扫功能,成功解决了传统探头无法覆盖的死角问题,极大提升了检测效率。

### 3.3 磁粉检测(MT)与渗透检测(PT)的协同效应

表面缺陷检测是防止应力集中的关键环节。其中磁粉检测(MT)主要针对铁磁性材料。在检验大型球罐、起重机主梁焊缝时,MT能灵敏地发现表面及近表面0.5mm-3mm处的细微裂纹。我们常采用荧光磁粉,在紫外线下观察,其信噪比远高于普通黑磁粉。渗透检测(PT)主要适用于非孔隙性材料,如不锈钢容器、钛合金管件。PT利用毛细管作用原理,通过渗透液进入裂纹,再由显像剂吸附。虽然PT操作简便,但由于其只能检测表面开口缺陷,在实际检验中常作为MT的补充。

### 3.4 涡流检测(ECT)在换热管中的应用

在石油化工企业中,存在大量的热交换器。其内部成百上千根细长的导电金属管,若发生点蚀或磨损,极易引发介质互串。涡流检测通过感应电流的变化来判断管壁完整性。其优点是无需耦合剂、检测速度极快,且能透过防腐层进行检测。目前,我们已引入脉冲涡流(PEC)技术,专门解决带保温层压力管道的腐蚀监测,无需拆卸保温层,实现了停工周期的缩减。

## 4. 特种设备检验中的新技术突破与综合策略

### 4.1 声发射技术(AE)的动态监控

与前述“静态”检测不同,声发射属于“动态”检测。当特种设备在加载过程中,内部缺陷发生扩展或塑性变形,会释放弹性波。在实战应用中,尤其在大型储罐的完整性评价中,我们布设传感器阵列,通过声发射信号的定位,可以实时判定活动性缺陷的危险程度,从而实现对罐体的实时分级管理。

### 4.2 红外热成像技术(IRT)的全局预警

红外热成像能够将不可见的温度分布转化为热图像。在检测锅炉炉墙耐火材料破损、压力管道局部减薄时,红外技术表现出色。例如当管道内部存在严重腐蚀变薄时,表面的热导率会发生改变,红外像仪能迅速捕捉到异常温升点,为后续精准检测指明方向。

### 4.3 “多技融合”的检验策略:以球形储罐为例

在实际工作中,我们通常不依赖单一技术。以一台3000

立方的液化气球罐为例：宏观检查上，首先进行内外部宏观观测，确定重点腐蚀区域。表面检测时，对受力复杂的支腿焊缝及所有内侧纵环焊缝进行 100% 荧光磁粉检测（MT）。内部核查时，对 MT 发现的疑似裂纹处，采用 PAUT 进行深度复核与定量分析。体积抽查方面，对所有焊缝交汇点及 T 字接头进行射线检测（RT）或 TOFD 检测，确保内部质量。在厚度评价时，利用超声测厚仪进行网格化测厚，评估整体腐蚀余量。

通过这种“面、线、点”结合的立体检测网络，方能确保检验结果的万无一失。

### 5. 特种设备无损检测面临的挑战与管理建议

特种设备往往位于高空、密闭空间或强辐射区。这对仪器的稳定性、电池续航能力及信号无线传输提出了极高要求。从“人控”到“机控”的质量跨越角度看，无损检测的质量高度依赖于操作者的评片水平。由于工作强度大、环境恶劣，人为疲劳导致的漏检时有发生。因此，提升检测工作的自动化程度迫在眉睫。建议企业加大对自动爬行者、数字化扫查架的投入，将检测过程从“手工艺”转向“标准化作业”。在检验人员的技术素养与职业道德方面，检测技术应作为基石，而职业操守是不可突破的底线。因为无损检测具有“滞后性”和“隐蔽性”，报告上的一枚印章背后是沉甸甸的安全责任。所以必须完善人员的持证管理及持续教育机制，确保每一位检验人员都能紧跟新技术的发展。

### 6. 无损检测技术的未来演进趋势

#### 参考文献

- [1]赵毅,张钺.超声波无损检测技术在钢管检测中的应用研究[J].中国新通信,2012,(02):141.
- [2]崔翠.压力容器焊接缺陷的无损探伤识别与评价[J].科技与企业,2012,(05):22.
- [3]梅林,张广明,王裕文.红外热成像无损检测技术的应用现状及发展前景[J].无损检测,1999,(03):97.
- [4]强天鹏.射线检测(第3版)[M].北京:中国标准出版社,2017.
- [5]郑晖,林树海.超声波检测(第2版)[M].北京:中国标准出版社,2016.
- [6]王广丰,钟海娜.数字化涡流无损检测技术的发展趋势[J].煤矿机械,2005,(04).
- [7]张林潮.论无损检测技术在特种设备检验中的深度应用分析[J].中国设备工程,2019.
- [8]李薇.特种设备检验中无损检测技术的应用现状及挑战[J].世界有色金属,2018,(11):220-221.
- [9]贺建华.无损检测人员培训与资格鉴定的现状思考[J].压力容器,2020.
- [10]浙江省质量技术监督局.浙江省特种设备安全管理手册[M].杭州:浙江科学技术出版社,2021.

作者简介：马腾飞，出生年月：1995-12-13，男，汉族，籍贯：河南郑州，学历：本科，研究方向：压力管道、压力容器等特种设备检验检测。

在数字化全聚焦成像（TFM/FMC）领域，相控阵技术正向全聚焦方向演进。通过采集每一个晶片对的信号，实现图像的实时重建。其分辨率将达到亚毫米级，能清晰勾勒出缺陷的几何形貌，实现从“发现缺陷”到“缺陷建模”的飞跃。而在人工智能（AI）辅助判伤方面，通过大数据训练，AI模型已在射线底片自动评定、超声信号自动识别领域取得突破。未来，检验员的角色将更多地转变为“AI结果的终审确认者”，极大减轻重复劳动压力，消除人为判断的离散性。未来，智能机器人载体的发展也备受关注，磁吸附爬行者、多旋翼无人机搭载轻量化 NDT 模块，将成为石化厂区、风电塔筒巡检的新常态。实现“人不动、仪动”的非接触式高效检验。

### 7. 结论

特种设备的安全运行是现代社会和谐发展的基石。无损检测技术作为这一领域的“火眼金睛”，其运用已不局限于单纯的质量检验，而是向着寿命预测、健康管理、智慧运维的方向深度延伸。综上所述，常规检测技术（RT、UT、MT、PT、ECT）在当下仍是支撑，但 PAUT、TOFD、AE 及红外成像等新技术的崛起，为解决复杂工况下的检验难题提供了利器。作为浙江太宁检测技术有限公司的一名高级工程师，我认为未来的发展核心在于：通过多技术的有机集成，构建基于风险的检测（RBI）体系，结合 AI 与数字化管理平台，实现特种设备检验从“被动应对”向“主动预警”的跨越。唯有不断探索新技术的运用边界，恪守专业精神，方能筑牢特种设备安全生产的坚实堤坝。