

# 特种设备检验中压力容器无损检测技术的应用与创新

张国涛

内蒙古自治区特种设备检验研究院阿拉善分院 内蒙古 阿拉善盟 750300

**摘要:**在现代工业体系中,特种设备的安全稳定运行至关重要。压力容器作为特种设备的关键部分,广泛应用于化工、能源等众多领域,其工况复杂,面临高温、高压等恶劣条件。一旦发生故障,后果不堪设想。无损检测技术作为保障压力容器安全的核心手段,能在不破坏设备的前提下,精准探测内部缺陷。随着工业的飞速发展,对无损检测技术的革新与应用研究迫在眉睫,本文将深入剖析其在压力容器检测中的应用及创新发展。

**关键词:**特种设备检验;压力容器;无损检测技术;应用与创新

## 引言

本文聚焦特种设备检验中压力容器无损检测技术。先阐述无损检测技术的定义、特点及常用技术原理,包括射线、超声等检测方式。接着介绍其在原材料、零部件制造、成品及在役压力容器检测等场景的应用,以华丰化工公司压力容器检测为例,展示多种技术协同的效果。随后探讨技术创新发展,如声发射、金属磁记忆等新兴技术。无损检测技术在保障压力容器安全运行中发挥着关键作用,其创新发展将进一步提升检测效率与准确性,为工业安全生产筑牢根基。

## 1 压力容器无损检测技术概述

### 1.1 无损检测技术的定义与特点

无损检测技术指在不损害被检测对象性能下,采用物理、化学方法检测其内部结构和性能的技术。特点包括:(1)非破坏性。能获取内部信息而不破坏本体,降低检测成本和对生产影响。(2)全面性。覆盖压力容器制造到使用的全过程,确保发现潜在缺陷。(3)实时性。部分技术能实时监测缺陷变化,如声发射检测技术,提供安全运行预警。(4)准确性。随着技术发展,检测精度和可靠性提高,能准确确定缺陷信息,为评估和处理提供依据。无损检测技术确保压力容器安全,降低维护成本,提升生产效率。

### 1.2 常用无损检测技术种类及原理

#### 1.2.1 射线检测

射线检测是一项基于射线物理特性的无损检测技术,其核心原理在于利用X射线、 $\gamma$ 射线或中子射线等高能射线穿透被检测物体。这些射线在穿过程中,会因物体内部结构和密度的差异而遭遇不同程度的衰减。当射线穿越压力容器时,若容器内部存在气孔、夹渣、裂纹等缺陷,这些缺陷部位的物质组成与周围完好材料存在差异,从而导致射线在缺陷处的吸收和散射程度显著

不同。具体而言,射线在穿过缺陷部位时,其强度会发生突变,使得透过物体的射线强度分布呈现非均匀性。为捕捉并记录这一变化,检测人员通常会在射线穿透方向的另一侧设置成像介质,如高灵敏度的胶片或先进的数字探测器。这些介质能够精准记录射线强度的分布信息,并据此形成清晰反映物体内部结构的影像。通过仔细分析影像中缺陷部位与周围区域的灰度差异,检测人员可以准确判断缺陷的类型、具体位置和大致尺寸,从而为后续的设备维护和修复提供关键依据。

#### 1.2.2 超声波检测

超声波检测作为一种先进的无损检测技术,其核心在于利用超声波在弹性介质中传播时与物质相互作用的特性。当超声波波束传入压力容器内部时,若遇到不同声阻抗的界面,如缺陷与基体材料的界面,波束会发生复杂的反射、折射和散射现象。这些现象产生的信号特征,如波幅的变化、传播时间的延迟等,均蕴含着关于缺陷存在及其几何特性的重要信息。在超声波检测中,常用的方法主要包括脉冲反射法、穿透法和共振法。脉冲反射法通过发射短促的超声脉冲,并接收从缺陷及容器底面反射回来的回波信号,通过对这些信号进行详细分析,可以精确确定缺陷的位置、大小和形状<sup>[1]</sup>。穿透法则是依据超声波穿透被检测物体后能量的变化情况,来间接评估缺陷的存在及其影响。而共振法则巧妙地利用超声波在被检测物体中产生共振时的频率特性,通过监测共振频率的偏移或共振幅度的变化,来灵敏地检测缺陷。这些方法各具特色,共同构成了超声波检测技术的丰富体系。

#### 1.2.3 磁粉检测

磁粉检测技术基于铁磁性材料在磁场中被磁化后的独特性质,即若容器表面或近表面存在缺陷,这些缺陷会扰乱原本均匀的磁力线分布,导致磁力线发生畸变,

进而形成漏磁场。漏磁场的存在为磁粉检测提供了物理基础。当在被检测容器的表面均匀施加磁粉时,磁粉颗粒会受到漏磁场的吸引并聚集在缺陷附近,形成清晰可见的磁痕,从而直观显示出缺陷的具体位置、形状以及大致尺寸。根据磁化方式的不同,磁粉检测可进一步细分为轴向磁化、周向磁化和复合磁化等多种类型。轴向磁化主要适用于检测与工件轴线垂直的横向缺陷,如裂纹、夹杂物等;周向磁化则针对与工件轴线平行的纵向缺陷进行检测;而复合磁化则结合了轴向和周向磁化的优点,能够同时检测容器表面及近表面不同方向的缺陷,从而大大提高了检测的全面性和准确性。

#### 1.2.4 渗透检测

渗透检测技术,其核心原理在于利用毛细作用,实现对材料表面缺陷的高效识别。具体而言,该技术通过将含有染料或荧光剂的渗透液均匀施加于压力容器的待检表面,借助毛细作用原理,渗透液能够自然渗透进入表面存在的开口缺陷之中。完成渗透后,采用适当方法去除多余的渗透液,以避免对后续检测造成干扰。随后,施加显像剂,该剂能够选择性地吸附并聚集于缺陷内部的渗透液中,进而在对比背景下清晰显现缺陷形态。根据所采用的渗透液类型,渗透检测可细分为着色渗透检测与荧光渗透检测两大类。着色渗透检测适用于在常规可见光条件下直接观察缺陷,操作简便直观;而荧光渗透检测则需在紫外线照射下实施,凭借荧光效应,缺陷显示更为鲜明突出,从而提供了更高的检测灵敏度与准确性。

#### 1.2.5 涡流检测

涡流检测是一种基于电磁感应原理的无损检测技术,其核心在于利用交变磁场在导电材料中激发感应电流的现象。当检测线圈中通过交变电流并靠近压力容器表面时,会在其表面区域形成一个交变磁场。这个磁场会在导电的压力容器材料中感应出涡流,涡流的分布和强度与材料的电磁性质和几何形状密切相关。若压力容器表面或近表面存在裂纹、腐蚀等缺陷,这些缺陷会干扰涡流的正常流动,从而改变涡流的分布和大小。这种变化会进一步反映在检测线圈的阻抗上,导致阻抗值发生变化。通过精确测量和分析检测线圈阻抗的变化,可以准确地判断缺陷的存在、具体位置以及大致尺寸。涡流检测因其对表面和近表面缺陷的高灵敏度、快速检测速度以及非接触式检测的特点,特别适用于对导电材料制成的压力容器进行高效、可靠的无损检测。

### 2 无损检测技术在特种设备检验中的应用

#### 2.1 应用场景及范围

(1) 原材料检测。在压力容器制造过程中,对原材料的质量检测至关重要。射线检测可用于检测板材、管材等原材料内部的分层、夹杂物等缺陷;超声波检测能有效发现原材料中的内部裂纹、气孔等缺陷;涡流检测则常用于检测导电原材料表面的裂纹、折叠等缺陷。通过对原材料进行全面的无损检测,确保其质量符合设计要求,为后续的制造过程提供可靠的基础<sup>[2]</sup>。(2) 零部件制造过程检测。在压力容器零部件的加工制造过程中,如封头、法兰等部件的锻造、机加工环节,无损检测技术可用于检测加工过程中产生的缺陷。例如,磁粉检测可检测零部件表面和近表面的裂纹缺陷;渗透检测可检测表面开口缺陷,保证零部件的加工质量。同时,在焊接过程中,对焊接接头进行实时或阶段性的无损检测,如采用射线检测和超声波检测,及时发现焊接缺陷,如未焊透、夹渣、气孔等,确保焊接质量满足要求。(3) 成品压力容器检测。在压力容器制造完成后,需对其进行全面的无损检测,以确保整体质量符合安全标准。射线检测可对压力容器的焊接接头进行全面检测,准确判断内部缺陷的情况;超声波检测可作为射线检测的补充,对大型压力容器或厚壁容器进行快速检测,提高检测效率;磁粉检测和渗透检测用于检测压力容器表面和近表面的开口缺陷,保证设备表面质量。通过多种无损检测技术的综合应用,对成品压力容器进行全方位的质量评估。(4) 在役压力容器检测。在役压力容器由于长期在复杂工况下运行,会受到各种因素的影响,如介质腐蚀、疲劳载荷等,导致缺陷的萌生和发展。因此,定期对在役压力容器进行无损检测至关重要。超声波检测和射线检测可用于检测内部缺陷的发展情况;声发射检测可实时监测压力容器在运行过程中的缺陷动态变化,及时发现潜在的危险信号;磁粉检测和渗透检测可用于检测表面和近表面因腐蚀、疲劳等产生的新缺陷。通过在役检测,及时掌握压力容器的安全状况,为设备的维护、维修和更换提供科学依据。

#### 2.2 华丰化工公司压力容器全面检测案例

华丰化工公司拥有一台设计压力达10MPa、温度200℃、材质为碳钢的关键压力容器。2024年,公司委托瑞科检测技术有限公司进行全面检测。检测采用GE YXLON Y.TU 320型X射线设备,遵循GB/T 3323-2020标准,对400条焊接接头进行透照,发现50条存在缺陷,包括80个气孔(直径0.5mm-3mm)和30处夹渣(长度1mm-5mm)。

为进一步验证,团队采用5MHz奥林巴斯V312-SR探头进行超声波检测,确认射线检测结果,并额外发现

15处微小裂纹(长度0.2mm-1mm)。针对表面及近表面缺陷,采用湿法连续磁化法磁粉检测,施加Fluorescent Magnaflux 1020型磁悬液,发现10处因机械损伤产生的裂纹,均位于曾受外力碰撞区域。

为确保精准性,对磁粉检测发现的裂纹采用荧光渗透检测进一步验证,裂纹长度在0.5mm至3mm之间。通过多种无损检测技术的综合运用,检测团队全面掌握了压力容器缺陷情况,并据此制定了针对性修复方案,高效修复了缺陷,确保了压力容器的安全稳定运行。此次检测不仅提升了设备安全性,也为后续维护提供了重要参考。

### 3 无损检测技术的创新发展

#### 3.1 声发射检测技术

声发射检测技术是一种动态无损检测方法。当压力容器内部材料发生变形、裂纹扩展等损伤时,会以弹性波的形式释放能量,这种弹性波即为声发射信号。通过在压力容器表面布置多个声发射传感器,接收声发射信号,并对信号进行分析处理,如信号的幅值、频率、到达时间等参数,从而确定缺陷的位置、类型和发展趋势。声发射检测技术能够实时监测压力容器在加载过程中的缺陷动态变化,对于及时发现潜在的危险缺陷具有重要意义。

#### 3.2 金属磁记忆检测技术

金属磁记忆检测技术是基于铁磁性材料的磁记忆效应。在地球磁场作用下,铁磁性材料在应力和变形集中区域会产生磁畴结构的不可逆重新取向,形成漏磁场,且这种漏磁场的分布与应力集中部位密切相关。通过检测压力容器表面的漏磁场变化,可发现应力集中区域,进而推断潜在的缺陷位置。该技术能够检测出早期的微观缺陷,为设备的预防性维护提供依据。

#### 3.3 红外热波检测技术

红外热波检测技术利用物体表面热传导特性的差异来检测缺陷。当对压力容器表面施加一定的热激励(如脉冲加热、激光加热等)时,若内部存在缺陷,会导致热量传递异常,使表面温度分布产生差异。通过红外热像仪采集表面温度分布图像,分析图像中温度异常区域,从而检测出内部缺陷。该技术具有检测速度快、非接触式检测等优点,适用于对大面积区域进行快速检测。

#### 3.4 超声相控阵技术

超声相控阵技术是在传统超声波检测基础上发展起来的新型检测技术。它通过控制多个超声换能器的发射和接收时间延迟,实现声束的灵活聚焦和扫描。相控阵探头由多个微小的压电元件组成,可根据检测需求动态调整声束的方向、聚焦深度和焦距。与传统超声波检测相比,超声相控阵技术能够更快速、准确地检测复杂形状和结构的压力容器,提高检测效率和准确性。

#### 3.5 激光检测技术

激光检测技术利用激光的高方向性、高能量密度等特性对压力容器进行检测。例如,激光全息检测技术通过记录和分析物体表面在加载前后的干涉条纹变化,检测物体内部的缺陷;激光超声技术通过激光激发和检测超声波,实现对压力容器内部缺陷的检测。激光检测技术具有非接触、高精度、高灵敏度等优点,适用于对高精度、高要求的压力容器进行检测。

#### 3.6 微波检测技术

微波检测技术利用微波与材料相互作用时的特性变化来检测缺陷。当微波照射到压力容器表面时,若内部存在缺陷,会引起微波的反射、散射、传输等特性的改变。通过检测微波信号的变化,分析缺陷的信息<sup>[3]</sup>。微波检测技术对非金属材料 and 复合材料制成的压力容器具有较好的检测效果,可用于检测内部的分层、脱粘等缺陷。

### 结束语

综上所述,无损检测技术在压力容器检测领域已取得显著成果,从传统技术的广泛应用到新兴技术的不断涌现,为保障压力容器安全运行提供了坚实支撑。通过华丰化工公司的案例,充分展现了多种无损检测技术综合运用的优势。未来,随着技术的持续创新,无损检测将朝着更高效、精准、智能的方向发展,为特种设备行业的安全发展注入新动力,助力工业生产在安全可靠的轨道上持续前行,不断满足日益增长的工业安全需求。

### 参考文献

- [1]郑金阳,王军.对压力容器无损检测技术应用的探讨[J].百科论坛电子杂志,2020(6):1946.
- [2]王敬东.无损检测技术在锅炉压力容器检验技术中的应用探讨[J].科技创新,2019(16):174-175.
- [3]段军志.超声波相控阵技术在特种设备无损检测中的应用研究[J].科技创新,2021(32):11-13.