

# 特种设备无损检测与防治措施

李雨泓

江西省检验检测认证总院特种设备检验检测研究院鹰潭检测分院 江西 鹰潭 335000

**摘要:** 特种设备在众多关键领域广泛应用,其安全状况至关重要。本文全面阐述特种设备相关内容,包括定义分类及所面临的安全风险,凸显检验的不可或缺性。详细介绍多种无损检测技术,如射线检测能穿透材料成像以发现内部缺陷;超声波检测借助超声反射判断缺陷;磁粉检测利用漏磁场吸附磁粉显示表面及近渗透检测等。深入分析特种设备裂纹的各类类型、形成原因,阐述宏观检查、理化检验及无损检测在裂纹检验中的应用,并提出强化专业操作、完善管理制度、严格审批准入以及加强人员培训等防治措施,为保障特种设备安全运行提供系统的理论与实践指导。

**关键词:** 特种设备;无损检测;防治措施

**引言:** 随着现代工业的迅猛发展,特种设备在能源、化工、交通等诸多领域发挥着举足轻重的作用,像承压的锅炉、储存危险介质的压力容器以及用于垂直升降或水平移动重物的起重机械等均属于特种设备范畴。然而,特种设备往往在高温、高压、高负荷等极端条件下运行,其结构完整性面临巨大挑战,一旦发生故障,极易引发严重的安全事故,如爆炸、泄漏等,不仅会造成巨大的经济损失,还可能危及人员生命安全。因此,对特种设备进行有效的无损检测以及深入研究裂纹等缺陷的防治措施具有极为关键的意义,它是保障特种设备安全运行、推动相关行业稳定发展的重要基石。

## 1 特种设备概述

### 1.1 特种设备的定义与分类

特种设备是指涉及生命安全、危险性较大的设备设施。主要包括锅炉,用于产生蒸汽或热水;压力容器,如各类储罐和气瓶,用于储存压缩气体或液体;压力管道,承担介质输送任务。还有电梯,方便垂直运输;起重机械,实现重物吊运;客运索道,进行人员的空中输送;大型游乐设施,提供娱乐体验;场内专用机动车辆,保障特定区域内的交通运输。

### 1.2 特种设备的安全风险与检验必要性

特种设备运行环境复杂且工况特殊,安全风险极高。锅炉的超压、缺水等问题可能引发爆炸;压力容器的材质劣化、密封失效易导致介质泄漏,造成火灾、中毒等灾害。电梯的电气故障、机械部件磨损会引发困人、坠落事故;起重机械的失稳、零部件损坏可致重物倾落。这些事故会造成大量人员伤亡和巨额财产损失,对社会稳定产生极大冲击<sup>[1]</sup>。

## 2 特种设备无损检测技术

### 2.1 射线检测(RT)

射线检测是一种重要的特种设备无损检测技术。它利用X射线或 $\gamma$ 射线穿透被检测物体,因物体内部不同部位对射线吸收程度的差异,在胶片或探测器上形成影像。对于厚度较大的金属部件,如锅炉的锅筒、压力容器的壳体等,射线检测能够清晰地显示出内部的焊接缺陷,像气孔、夹渣、未焊透等。其优点在于检测结果直观,能提供缺陷的形状、大小和位置信息,检测精度较高,可对缺陷进行定性和定量分析,且有永久性记录可供后续查阅对比。然而,射线检测也存在局限性,它对裂纹等面状缺陷的检出率相对较低,检测过程需要专门的防护措施以避免射线对人体造成伤害,同时设备较为昂贵,检测成本较高,检测速度相对较慢,对检测人员的专业素质要求也较高。

### 2.2 超声波检测(UT)

超声波检测基于超声波在介质中传播时遇到缺陷会产生反射、折射和散射等特性来工作。检测时,将超声探头与被检测物体表面良好耦合,发射超声波,通过接收反射波的时间、幅度、频率等信息来判断缺陷的存在及其特征。在特种设备检测中,常用于检测焊缝内部缺陷以及金属材料的厚度测量等。例如在压力管道焊缝检测中,可快速发现微小的裂纹和夹杂物。其优势明显,检测速度较快,能对大面积的检测对象进行快速扫描;对裂纹等危害性较大的缺陷敏感性高;设备相对便携,操作较为方便;并且对人体无害,检测成本较低。但它对检测人员的技术和经验要求较高,检测结果的直观性不如射线检测,对形状复杂、表面不平整的物体检测难度较大,且难以准确确定缺陷的形状和性质。

### 2.3 磁粉检测(MT)

磁粉检测主要用于检测铁磁性材料表面和近表面的缺陷。当被检测工件被磁化后,若表面或近表面存在缺

陷,磁力线会发生畸变,形成漏磁场,此时撒上磁粉,磁粉会被漏磁场吸附,聚集在缺陷处,从而显示出缺陷的位置和形状。在起重机械的吊钩、链条等铁磁性部件检测中应用广泛。其优点是检测灵敏度较高,能快速、直观地发现表面和近表面的微小缺陷,如裂纹、发纹等;设备简单,操作方便,检测成本较低;可对形状复杂的工件进行检测。不过,磁粉检测只能用于铁磁性材料,对于非铁磁性材料则无法适用;检测后需要对工件进行退磁处理,否则可能会影响工件的后续使用;并且难以检测出埋藏较深的缺陷,对检测环境有一定要求,如避免强磁场干扰等<sup>[2]</sup>。

#### 2.4 渗透检测(PT)

渗透检测是利用液体的毛细作用原理,将含有染料的渗透液涂覆在被检测工件表面,使其渗入表面开口缺陷中,然后去除多余渗透液,再施加显像剂,将缺陷中的渗透液吸附到工件表面,形成清晰可见的缺陷显示。常用于检测非多孔性金属材料及部分非金属材料的表面缺陷,如压力容器的焊缝表面、大型游乐设施的金属构架表面等。该技术的优点是不受被检测工件材料磁性的限制,可检测各种金属和非金属材料;检测操作相对简单,不需要复杂的设备;能检测出细微的表面开口缺陷,如细微裂纹、气孔等。但渗透检测只能检测表面开口缺陷,对于内部缺陷无法检测;检测过程较为繁琐,需要多道工序;检测后需要对工件进行清洗,以去除残留的渗透液和显像剂;对检测人员的操作规范要求较高,否则容易出现误判。

### 3 特种设备裂纹检验及防治措施

#### 3.1 裂纹类型与成因分析

##### 3.1.1 冷、热裂纹

冷裂纹通常在焊接后冷却至较低温度时形成。其产生原因主要是钢材淬硬倾向大,在冷却过程中形成马氏体组织,产生较大的组织应力;焊接接头含氢量较高,氢在应力作用下聚集于缺陷处形成高压导致开裂;焊接接头受到较大拘束应力,限制了焊缝金属的自由收缩。例如在压力容器焊接中,若焊接工艺不当,冷却速度过快,就易出现冷裂纹。热裂纹则在焊接高温过程中产生,是由于焊缝金属中存在低熔点共晶物,在凝固收缩时受拉应力而开裂,常见于含硫、磷等杂质较多的钢材焊接,如一些劣质的建筑用钢焊接时易出现热裂纹。

##### 3.1.2 蠕变裂纹

蠕变裂纹是材料在高温、长时间持续应力作用下发生蠕变变形的结果。在特种设备中,如锅炉的过热器管、蒸汽管道等长期处于高温高压环境,金属原子在热

激活能作用下发生缓慢的定向移动,使材料产生蠕变应变。随着时间推移,当应变累积超过材料的蠕变极限时,在晶界、第二相粒子与基体界面等薄弱部位产生空洞并逐渐连接成微裂纹,进而发展成宏观裂纹。这些裂纹沿晶界扩展,最终导致部件断裂失效,严重影响特种设备的安全运行和使用寿命。

##### 3.1.3 热疲劳裂纹

热疲劳裂纹是由温度的循环变化引起的热应力导致的。特种设备在运行过程中,如发动机的缸体、热交换器等,经常经历加热与冷却的循环过程。由于材料的热膨胀系数不同,当部件表面与内部或不同部位之间存在温度差时,就会产生热应力。在反复的热应力作用下,材料的疲劳强度逐渐降低,裂纹在应力集中区域,如部件的拐角、孔边、焊缝等部位萌生。热疲劳裂纹一般沿晶界扩展,其形态多为网状或龟裂状,会使部件的强度和密封性下降,可能引发泄漏、破裂等严重事故。

##### 3.1.4 机械疲劳裂纹

机械疲劳裂纹是在交变机械载荷作用下产生的。例如起重机械的吊钩、桥梁起重机的大梁等,在长期的起吊、运输过程中,承受着反复的拉伸、弯曲、剪切等交变应力。材料内部存在的微观缺陷,如夹杂物、晶界等,在交变应力作用下成为应力集中点,局部产生塑性变形并逐渐形成微裂纹。随着循环次数的增加,微裂纹不断扩展、连接,形成宏观裂纹。机械疲劳裂纹的扩展方向一般与主应力方向垂直,其扩展速率在裂纹初期较慢,随着裂纹长度增加而加快,最终导致部件断裂,危及特种设备的安全运行。

##### 3.1.5 过烧裂纹

过烧裂纹是由于金属在焊接、热处理等热加工过程中加热温度过高,超过了材料的固相线温度,使晶界局部熔化。在随后的冷却过程中,熔化的晶界重新凝固,由于凝固收缩受到周围未熔化金属的约束,产生较大的拉应力,从而导致裂纹形成。在特种设备制造中,如一些小型工厂焊接工艺不规范,在焊接合金钢时,若焊接电流过大、焊接速度过慢或加热时间过长,就容易出现过烧裂纹。过烧裂纹一旦出现,会严重破坏材料的组织结构和性能,使部件无法正常使用,只能报废处理。

#### 3.2 裂纹检验方法

##### 3.2.1 宏观检查

宏观检查是裂纹检验的基础手段。检验人员凭借肉眼或借助低倍放大镜直接观察特种设备表面状况。查看是否有明显的裂纹、变形、磨损及腐蚀痕迹等。例如在锅炉的外表面检查中,可发现因长期运行产生的鼓包处

是否伴有裂纹。对于大型游乐设施的金属构架,能快速识别出因碰撞或疲劳产生的表面开裂。通过对焊缝外观的检查,可初步判断焊接质量,如焊缝是否饱满、有无咬边等缺陷,从而为进一步深入检测提供线索与方向。

### 3.2.2 理化检验

理化检验主要通过对材料的物理和化学性质分析来检测裂纹。包括金相检验,对金属微观组织结构进行观察,分析晶界状态、晶粒大小等,判断是否存在因热处理不当或长期服役导致的组织变化进而引发裂纹,如在压力容器的检测中,可发现蠕变裂纹在晶界的萌生。化学分析则测定材料中各种元素含量,某些元素超标可能影响材料抗裂性能。力学性能测试如拉伸、弯曲试验,检测材料强度、韧性等指标,评估其在应力作用下产生裂纹的可能性。

### 3.2.3 无损检测技术的应用

无损检测技术在裂纹检验中应用广泛。超声波检测通过超声探头发射和接收超声波,依据反射波特征判断裂纹位置、大小和深度,如在压力管道焊缝检测中高效发现内部裂纹。射线检测利用射线穿透物体成像,清晰呈现内部裂纹形态,适用于厚壁部件。磁粉检测用于铁磁性材料,磁化后裂纹处漏磁场吸附磁粉显示裂纹,常用于起重机械部件。

## 3.3 裂纹防治措施

### 3.3.1 强化专业操作与技术管控

强化专业操作与技术管控是防治裂纹的关键。在特种设备的制造、安装与维修环节,必须严格遵循相关标准与规范进行操作。例如,焊接过程要依据材料特性、厚度等精准设定焊接电流、电压与速度等参数,确保焊缝成型良好且无缺陷。采用先进的焊接技术,如自动焊接、激光焊接等,提高焊接质量稳定性。对热处理工艺严格把控,防止因温度、时间控制不当导致材料性能劣化产生裂纹。

### 3.3.2 完善特种设备管理制度

完善的管理制度是防治裂纹的重要保障。建立涵盖设备全生命周期的管理制度,包括设计审核制度,确保设计方案充分考虑抗裂因素,对结构强度、应力分布等进行精确计算与模拟分析。在制造阶段,实施质量追溯制度,从原材料采购到成品出厂,每一步骤均可查,便

于及时发现裂纹源头。运行维护制度规定定期巡检周期与内容,如对承压设备定期进行压力测试与无损检测,及时发现并处理潜在裂纹隐患。

### 3.3.3 严把特种设备审批、准入关卡

严把审批、准入关卡可从源头上减少裂纹风险。在特种设备设计方案审批时,组织专家团队对设计的合理性、安全性进行全面评估,重点审查结构设计是否利于应力释放,选材是否符合工况抗裂要求等。制造企业准入方面,严格审核其资质、生产工艺与质量控制体系,只有具备先进生产设备、成熟工艺与完善质量管控的企业才允许生产特种设备。

### 3.3.4 加强人员培训与安全意识提升

加强人员培训与安全意识提升是防治裂纹的内在动力。针对特种设备相关人员开展专业技能培训,如对操作人员进行设备操作规程、日常维护要点培训,使其熟悉设备运行特性,及时察觉异常情况,避免因误操作引发裂纹。对检测人员进行检测技术培训,提高裂纹检测准确性与效率。维修人员则需掌握先进维修工艺与裂纹修复技术,强化安全意识教育,通过案例分析、安全讲座等形式,让全体人员深刻认识裂纹引发事故的严重性,树立严谨的工作态度,从思想上重视裂纹防治工作,保障特种设备安全运行<sup>[3]</sup>。

## 结束语

在特种设备的安全保障领域中,无损检测技术与防治措施犹如坚实的壁垒。通过深入探究射线、超声、磁粉、渗透等检测手段,我们得以精准洞察设备内部的细微瑕疵。对各类裂纹成因、检验方法的剖析以及相应防治策略的制定,为设备的稳定运行筑牢根基。持续强化专业操作规范、完善管理制度、严格审批流程并提升人员素养,将有效降低安全风险。

## 参考文献

- [1]马艳南,张弘强.承压类特种设备无损检测技术分析[J].中国高新区,2021,(05):12-13.
- [2]殷一鸣.探析无损检测技术在承压类特种设备检验中的应用[J].中国金属通报,2021,(04):112-113.
- [3]皮昌鹏.无损检测技术在承压类特种设备检验中的运用分析[J].2021,(10):152-153.