

特种设备无损检测技术与应用实践

陈金威

浙江省特种设备科学研究院，浙江杭州，310000；

摘要：随着工业化和城市化的快速发展，特种设备在能源、交通、建筑、制造业等众多领域扮演着至关重要的角色。它们的安全运行直接关乎公共安全、生产效率以及社会的正常运行。然而，特种设备的复杂结构、高负荷运行以及材料的老化等问题，使得潜在的安全隐患无处不在。传统的人工检测方法虽有一定效果，但效率低下，且容易受到人为因素的影响，无法满足现代工业对设备安全性和可靠性日益增长的要求。因此，研究特种设备无损检测技术并将其应用于实际，不仅是提升设备管理精细化水平的必然趋势，也是保障社会经济稳定与安全的重要举措。

关键词：特种设备；无损检测技术；应用实践

DOI:10.69979/3029-2727.24.04.032

引言

无损检测技术是指在不损坏被检测对象的前提下，利用物理、化学等方法对特种设备进行检测，以发现其内部或表面的缺陷。这种技术在保障特种设备安全运行方面发挥着至关重要的作用。随着科技的进步，无损检测技术也在不断发展，从最初的超声波检测、射线检测，到如今的磁粉检测、渗透检测以及电磁检测等，种类繁多，各有优势。

1 无损检测技术基本原理

无损检测技术，作为一门应用广泛的工程技术，其基本原理基于物理学的多个分支，如声学、光学、电磁学和放射学等。这些原理允许检测人员在不破坏设备完整性的情况下，揭示内部和表面的潜在缺陷。本文将逐一探讨这些关键的无损检测技术原理。

超声波检测（UT）是基于声学原理。它利用高频声波在材料中的传播特性，例如声波的反射、折射和衰减。当声波遇到材料内部缺陷时，部分声波会被反射回来，形成一个回波，通过分析这个回波的信号，可以推断出缺陷的位置、大小和类型。此技术在检测金属、塑料和复合材料的内部缺陷时尤其有效，常用于压力容器和管道的检测。

射线检测（RT）是利用射线，如 X 射线和 γ 射线，穿透材料进行成像。射线在遇到材料内部缺陷时，其穿透能力会受到影响，导致射线强度的改变。通过接收器接收的射线强度变化，可以形成缺陷的二维图像，帮助检测人员判断缺陷的性质和位置。射线检测广泛应用于检测管状和平板结构的内部缺陷，如锅炉和压力容器的焊缝。

磁粉检测（MT）和渗透检测（PT）则主要依赖于电磁学和毛细现象。MT 利用磁性材料在磁场中的行为，通过施加一个磁场，使磁性颗粒集中在裂纹或其他缺陷处，形成明显的可见标记。PT 则是利用渗透剂在毛细作用下渗透进缺陷中，然后通过显影剂显现出来。这两种方法特别适用于检测铁磁性材料的表面和近表面缺陷，如电梯曳引机和起重机的金属结构。

声发射检测（AE）则利用材料在受力过程中的声发射现象来检测内部缺陷。当材料内部存在裂纹或应力集中时，会在局部产生微小的弹性波，这些波可以被敏感的声发射传感器捕捉，通过分析声发射信号，可以了解材料内部的应变状态，预测潜在的失效。

2 特种设备无损检测技术的应用实践

2.1 压力容器的无损检测案例

压力容器是特种设备中的重要组成部分，它们在能源、化工、制药等行业中承担着储存和处理高压、高温介质的任务。因此，确保压力容器的安全运行至关重要。无损检测技术在压力容器的维护和检修中扮演着关键角色，通过精确识别内部或表面的潜在缺陷，预防性地发现并及时处理，以避免可能的灾难性事故。

超声波检测（UT）是压力容器无损检测中的主要手段，它被广泛应用于检查容器的焊接接头、腐蚀区域以及制造过程中的缺陷。超声波在材料中的传播特性使得它能有效探测出内部的裂纹、气孔和疏松等缺陷。在实际操作中，检测人员使用探头将声波能量传递到容器壁，通过接收反射回来的声波信号，形成缺陷的“声像图”，从而判断缺陷的位置、尺寸和性质。例如，对于液化气体储罐，超声波检测能准确识别出罐体和封头焊接区域

的潜在缺陷，如未焊透、夹渣等，这些都是引发泄露的可能原因之一。

射线检测（RT）在压力容器检测中的应用主要集中在焊缝质量的评估上。射线穿透容器壁后，遇到缺陷时射线强度会发生改变，通过 X 射线或 γ 射线成像技术，可以生成清晰的内部缺陷图像。这种方法尤其适用于检查复杂的焊接结构，如封头与筒体的过渡区域，以及那些无法触及的内部焊缝。射线检测对于发现细小裂纹、未熔合和未焊透等缺陷具有极高的敏感性，有助于确保容器的焊接质量。

磁粉检测（MT）主要应用于压力容器的表面和近表面缺陷检测，特别是那些铁磁性材料制成的容器。在检测过程中，容器表面被施加磁粉，任何裂纹或缺陷处都会导致磁场泄漏，磁粉会在这些区域聚集，形成明显的可视化标记，从而帮助识别缺陷。MT 对于识别容器表面的微小裂纹、划痕和氧化层下的腐蚀特别有效。

声发射检测（AE）在压力容器的应用中，主要用于监测容器在承受压力或温度变化时的内部声发射信号。通过安装声发射传感器，可以捕捉到容器内部由于潜在缺陷如裂纹扩展产生的微弱声波信号，从而实时评估容器的健康状态，实现早期故障预警。AE 在评估压力容器的疲劳损伤和预测其剩余寿命方面具有显著优势。

对于复合材料压力容器，由于其独特的结构和材料特性，传统的无损检测方法可能不够有效。因此，采用诸如红外检测（IR）和三维扫描的超声波检测技术来应对挑战。红外检测能识别出复合材料层间脱胶的热信号异常，而三维扫描的超声波则能对不规则表面进行高效检测，使得复合材料的内部缺陷也能得到准确识别。

无损检测技术针对压力容器的材质、结构和工作条件进行选择 and 组合。例如，焊接接头可能需要超声波和射线检测的联合应用以全面评估焊接质量。定期无损检测配合智能分析系统，如人工智能大数据管理系统，可实现动态监测和预测性维护，提升安全管理水平。无损检测技术在确保压力容器安全运行方面至关重要，为特种设备安全性提供保障。随着科技进步，无损检测技术将更智能化，为设备健康管理提供精确实时信息，推动技术创新发展。

2.2 电梯与起重机械的无损检测实践

电梯与起重机械作为特种设备中的关键部分，其安全运行直接影响到公共安全和生产效率。无损检测技术在这些设备的维护和检测中发挥了至关重要的作用，通过非破坏性方法识别潜在的缺陷，确保设备始终处于最佳状态。

电梯系统的检测通常侧重于钢丝绳、曳引轮和曳引机的检查。磁粉检测（MT）和渗透检测（PT）是电梯钢丝绳检测的主要手段，它们能够有效识别出由于疲劳、磨损或制造缺陷导致的表面裂纹和断裂。磁粉检测利用铁磁性材料在磁场中的特性，当钢丝绳表面有裂纹时，磁粉会聚集在裂纹处形成标记，便于肉眼识别。渗透检测则是通过将渗透剂引入表面缺陷，然后使用显影剂来显示缺陷，这种方法对细微裂纹非常敏感。

在曳引轮和曳引机的检测中，涡流检测（ECT）和超声波检测（UT）被广泛采用。涡流检测利用电磁场的变化来检测金属部件的表面和近表面缺陷，特别适合于长条形金属结构，如曳引轮的检查。超声波检测则能够深入检测金属内部的缺陷，如疲劳裂纹和材质不均匀，对于曳引机的轴和轴承检测至关重要。

对于起重机械，如起重机和桥式起重机，无损检测的重点在于钢梁、吊钩、滑轮组以及焊接接头的检测。磁粉检测和渗透检测同样适用于这些设备的表面裂纹和疲劳损伤检测。此外，由于起重机械结构复杂，声发射检测（AE）在监测设备运行时的内部应力状态以及疲劳裂纹的发展方面有着独特优势。声发射技术能够捕捉到材料在受力过程中产生的声发射信号，通过信号分析，可以预测设备的疲劳寿命和潜在故障。

无损检测技术在检测复合材料和异形结构时需创新。例如，激光干涉测量用于监测几何变形，红外热成像用于检测温度异常，这些对识别复合材料内部损伤至关重要。现代科技如 AI 和大数据正在改变电梯和起重机械的无损检测。AI 图像识别技术自动化分析检测结果，提高缺陷识别的准确性和效率。大数据分析大量检测数据，预测设备健康状态，提供定制化维护策略，如基于使用模式的预防性维护。

2.3 大型结构件的无损检测技术应用

在特种设备无损检测领域，大型结构件的检测是一个尤为关键且具有挑战性的环节。这类结构通常因尺寸庞大、形状复杂或材料特性特殊，使得常规的无损检测方法在实施时面临诸多困难。然而，大型结构件的完好性直接关系到整个系统的稳定性和安全性，因此，专门针对大型结构件的无损检测技术应运而生，以满足其独特需求。

大型结构件包括桥梁、船舶、飞机、风力发电机叶片等，其检测通常涉及结构的完整性、疲劳损伤、腐蚀和制造缺陷。针对这些挑战，无损检测技术在大型结构件的检测中呈现出多样化和定制化的趋势。

无人机搭载的无损检测设备已成为一种有效手段，

特别是对于高空、远距离或难以到达的部位。无人机配备了高分辨率的超声波、射线、磁粉或渗透检测设备，能够在安全距离进行非接触式检测，减少人工操作风险，并提高检测效率。例如，在桥梁的钢梁检测中，无人机可以携带超声波探头进行内部缺陷检测，同时通过图像识别技术辅助分析检测结果。

基于物联网和无线传感器网络的远程监测系统在大型结构件的检测中也逐渐崭露头角。这些系统通过安装在结构件上的传感器，持续收集结构的振动、温度、应变等参数，利用大数据和人工智能技术对这些数据进行实时分析，实现对结构健康状态的持续评估和早期故障预警。例如，在风电叶片的检测中，通过监测振动模式的变化，可以预测出潜在的裂纹扩展。

对于复合材料制成的大型结构件，如飞机蒙皮和风力发电机叶片，无损检测技术通常需要结合多种方法，如超声波、热红外、激光多普勒测速（LDV）和声发射检测。超声波能够穿透复合材料，检测内部的分层和裂纹；热红外检测则用于查找热异常，识别潜在的内部损伤；LDV 技术通过监测声频响应，可以检测振动模式的异常，对复合材料的损伤进行早期诊断。

3D 扫描和 CT 技术在检测大型结构件方面越来越重要。3D 扫描快速获取结构几何信息，对比设计模型，发现制造缺陷。CT 技术生成内部三维图像，检测内部缺陷如铸造缺陷、裂纹或孔隙。这些技术的成功应用需要多学科融合，包括结构工程、材料科学、数据分析和人工智能。定制化检测方案结合实时监测和数据分析，可以精确评估和预防性维护大型结构件，确保其安全可靠运行。随着技术进步，无损检测将在大型结构件的安全性和寿命管理中扮演关键角色，为特种设备领域提供精准解决方案。

2.4 无损检测技术的挑战与解决方案

无损检测技术在特种设备的应用虽然取得了显著的进步，但仍面临诸多挑战，这些挑战不仅涉及技术层面，也包括操作规范、数据管理以及人员培训等方面。理解并解决这些挑战对于推动无损检测技术的进步和特种设备的安全运行至关重要。

复杂结构和异形设备的检测挑战是无损检测的一大难题。传统的检测方法往往难以适应这些设备的特殊形状和结构，造成检测的不完整或误差。为解决这个问题，研究人员正在开发基于人工智能的图像处理技术，

如深度学习算法，用于处理和解析复杂结构下的检测数据，提高检测的精度和完整性。同时，三维扫描技术的结合，如结合超声波的 3D 探头，能够提供更全面的内部结构信息，提高检测的覆盖面。

特殊材质的检测，特别是复合材料和纳米材料，对无损检测提出了新的要求。这些材料的性质往往使得传统方法难以适用，例如，复合材料的内部缺陷可能不直接在表面表现。为克服这一挑战，科研人员正在研究新型的检测技术，如红外热成像与声发射的结合，以及利用激光诱导的热塑性变形等非传统检测手段，以提高对这些特殊材料的识别能力。

数据管理与标准化面临挑战，需高效处理无损检测产生的大量复杂数据，以支持实时决策。大数据和云计算技术可提升数据处理效率，预测设备状态，实现预防性维护。统一检测标准和数据格式有助于确保结果的可比性和一致性，推动技术应用。人员培训和技能提升对无损检测技术的有效应用至关重要，需持续学习新知识以适应技术发展。通过教育和培训提高技术水平和应用能力，确保检测准确性。便携式和智能化检测设备的推广可提高检测效率和准确性，减轻人员工作负担。

3 结语

总而言之，特种设备无损检测技术在保障安全、提升效率及促进科技进步等方面发挥着重要作用。随着技术的不断进步和应用场景的不断拓展，无损检测将更加深入地融入特种设备的全生命周期管理，为社会经济的持续稳定运行提供更为坚实的技术保障。未来，无损检测技术将继续挑战极限，解决现有难题，为特种设备的安全监管和预防性维护提供更为先进和精准的解决方案。

参考文献

- [1] 聂杨. 特种设备检验检测中的无损检测技术应用[J].《品牌与标准化》,2024 年第 3 期 136-138,共 3 页
- [2] 蒋剑超. 无损检测技术在承压类特种设备检验中的应用与发展[J].《化工设计通讯》,2024 年第 3 期 60-62,共 3 页
- [3] 戴西斌. 无损检测技术在特种设备检验中的应用与分析[J].《设备管理与维修》,2024 年第 2 期 111-114,共 4 页