

无损检测技术应用研究分析

王 东 刘 爽 王永宝

天津市达安特工程检测有限公司 天津 300350

摘 要：无损检测技术是在不破坏被检测物体结构的前提下，通过超声、射线、涡流等技术手段实现缺陷检测与性能评估的重要工业技术。本文系统分析了当前主流无损检测技术，包括超声检测的高精度定位、射线检测的穿透性成像、涡流检测的电磁感应特性等关键技术原理；探讨了其在机械制造、航空航天、能源电力及交通运输等领域的实际应用；并从多技术融合智能化、新型检测技术研发、标准规范完善等方面，展望了无损检测技术的未来发展趋势，为该技术的工程应用与创新提供参考。

关键词：无损；检测；技术；应用；研究

引言：在现代工业领域，材料与构件的安全性、可靠性检测至关重要。无损检测技术凭借非破坏性、高效性和可重复性等优势，成为保障工业产品质量的核心手段。随着航空航天、能源装备等高端制造领域的发展，对构件内部缺陷检测的精度、效率提出了更高要求。传统单一检测技术已难以满足复杂工况需求，亟需通过技术融合与创新实现突破。基于无损检测技术的应用现状，梳理关键技术原理与应用场景，剖析行业发展痛点，旨在为推动无损检测技术的智能化、标准化发展提供理论与实践参考。

1 无损检测技术概述

无损检测技术是一种在不损害或不影响被检测对象使用性能的前提下，对其内部及表面缺陷、性能、状态等进行检测和评价的技术手段。它融合了材料科学、物理学、电子学、计算机科学等多学科知识，通过声、光、电、磁等物理现象与材料特性的相互作用，实现对缺陷的定性、定量分析。与破坏性检测相比，无损检测具有显著优势。一方面，它能够保留被检测对象的完整性，避免因检测造成的资源浪费，适用于成品、在制品及服役构件的检测；另一方面，可实现对同一对象的多次重复检测，动态监测缺陷的发展变化，为设备维护与寿命评估提供数据支撑。此外，无损检测技术还具有快速、高效的特点，能够满足现代工业大规模生产中的质量控制需求。随着工业技术的发展，无损检测技术不断迭代更新，从早期单一的目视检测，发展到如今涵盖超声、射线、涡流、磁粉等多种检测方法的技术体系^[1]。

2 无损检测的关键技术

2.1 超声检测技术

超声检测技术基于超声波在介质中传播时，遇到声阻抗差异界面会发生反射、折射和散射的特性实现缺陷

检测。当超声波进入被检测物体后，若内部存在裂纹、气孔等缺陷，声波会在缺陷处产生反射回波，通过接收和分析回波信号的时间、幅度和波形，即可确定缺陷的位置、大小和形状。该技术具有检测灵敏度高、适用范围广的特点，可检测金属、非金属等多种材料，尤其擅长检测内部缺陷，在焊缝质量检测、锻件内部缺陷排查中广泛应用。同时，超声检测设备便携、操作简便，能实现快速检测。不过，它对形状复杂、表面不平整的工件检测效果欠佳，且检测结果受检测人员经验影响较大，需通过专业培训确保检测准确性。此外，对于声衰减大的材料，超声波传播距离受限，也会影响检测效果。

2.2 射线检测技术

射线检测技术利用X射线、 γ 射线等穿透被检测物体，基于不同物质对射线吸收程度的差异，使透过物体的射线强度分布发生变化，通过成像设备将这种变化转化为图像，从而直观显示出物体内部的缺陷信息。当材料中存在气孔、夹渣等缺陷时，相应区域的射线吸收量减少，在成像底片或数字探测器上呈现出灰度差异，以此判断缺陷的位置和形态。射线检测的突出优势在于能获得直观的缺陷图像，检测结果准确性高、可追溯性强，常用于航空航天、压力容器等对质量要求极高的领域，检测焊缝、铸件等部件的内部缺陷。但该技术也存在明显不足，射线具有放射性，对人体健康有危害，需严格的防护措施；设备成本高，检测过程复杂，检测效率相对较低，且对薄板材料的检测灵敏度更高，对于厚壁工件，射线穿透能力会受到限制，可能导致缺陷漏检。

2.3 涡流检测技术

涡流检测技术基于电磁感应原理，当载有交变电流的检测线圈靠近导电材料时，线圈周围产生交变磁场，使材料表面感应出涡流。若材料表面或近表面存在缺

陷,会破坏涡流的均匀分布,进而改变检测线圈的阻抗,通过测量阻抗变化即可判断缺陷的存在及特征。涡流检测具有非接触、检测速度快的特点,尤其适用于导电材料表面及近表面缺陷的快速筛查,如金属管材、棒材的在线检测。它对微小裂纹、折叠等缺陷十分敏感,且检测结果受材料表面粗糙度、形状等因素影响较小。然而,涡流检测的检测深度有限,通常只能检测到几毫米的深度;检测结果受材料电导率、磁导率等物理性能影响较大,难以对缺陷进行准确定量分析,且不同类型缺陷可能产生相似的信号,增加了缺陷识别的难度。

2.4 低应变检测技术

低应变检测技术主要应用于桩基完整性检测,通过在桩顶施加瞬态激振力,产生应力波沿桩身向下传播。当应力波遇到桩身截面变化、断裂、离析等缺陷或桩底时,会发生反射,被安装在桩顶的传感器接收。通过分析反射波的波形、传播时间等参数,可判断桩身缺陷的位置、程度及桩身完整性。该技术操作简便、检测成本低、检测速度快,能在短时间内对大量桩基进行普查,在建筑工程领域广泛应用。它对桩身浅部缺陷检测灵敏度高,且无需对桩头进行复杂处理。但低应变检测受桩长、桩径、地质条件等因素影响较大,对于长桩、大直径桩,应力波衰减严重,检测精度会下降;同时,难以准确判断缺陷的具体类型和严重程度,检测结果需结合工程经验进行综合分析,存在一定的主观性。

2.5 探地雷达检测技术

探地雷达检测技术利用高频电磁波以宽带短脉冲形式由发射天线送入地下,经地下不同介质界面反射后,被接收天线接收。根据反射波的双程走时、幅度、波形等信息,结合介质的电磁特性,可推断地下介质的结构、分布及埋藏物的位置和性质。该技术具有非侵入式、检测速度快、分辨率高的特点,能在不破坏地面的情况下,对地下管道、电缆、空洞、地下建筑物等进行快速探测,广泛应用于地质勘查、道路检测、考古等领域。它可直观显示地下结构的二维或三维图像,便于分析解读。但探地雷达的检测深度与分辨率相互制约,检测深度越深,分辨率越低;其检测效果受土壤湿度、介电常数等因素影响显著,在高电导率介质中,电磁波衰减快,检测距离大幅缩短,且检测结果的解释需要专业知识和丰富经验,以避免误判^[2]。

3 无损检测技术的应用领域

3.1 机械制造领域

在机械制造领域,产品质量直接影响设备的性能、寿命和安全性,无损检测技术是保障生产质量的关键环

节。机械零部件在锻造、铸造、焊接等加工过程中,易产生内部裂纹、气孔、夹渣等缺陷,若未经检测投入使用,可能导致机械故障甚至安全事故。超声检测技术凭借高灵敏度和对内部缺陷的精准定位能力,常用于大型锻件、机械轴类零件的内部缺陷检测,确保关键部件的结构强度;射线检测技术则在复杂铸件的质量检测中发挥重要作用,通过成像直观呈现铸件内部的缩孔、疏松等缺陷,便于及时修正工艺。涡流检测技术常用于金属零部件表面微小裂纹的快速筛查,如汽车发动机缸体、齿轮表面检测,提升产品表面质量。此外,无损检测还能对机械制造过程中的焊接接头进行质量评估,保障焊接结构的可靠性,助力机械制造行业实现高精度、高质量生产。

3.2 航空航天领域

航空航天领域对零部件的质量和可靠性要求近乎苛刻,任何微小缺陷都可能引发严重的飞行事故。无损检测技术作为保障飞行器安全的核心技术,贯穿从零部件制造到整机服役的全生命周期。在航空发动机制造中,高温合金叶片承受极端工况,超声相控阵检测技术可实现对叶片复杂结构内部缺陷的多角度、高分辨率检测;射线数字成像技术能快速检测发动机机匣、飞机蒙皮等部件的内部缺陷,确保材料的均匀性和结构完整性。涡流检测与红外热成像技术结合,可高效检测飞行器表面裂纹及复合材料的分层缺陷。此外,在飞行器定期维护中,无损检测技术用于检测机身结构、起落架等关键部件的疲劳损伤,提前发现潜在风险,保障航空航天设备的安全可靠运行,对推动航空航天技术的创新发展意义重大。

3.3 能源电力领域

能源电力行业中,设备长期处于高温、高压、高腐蚀等恶劣环境,无损检测技术是确保设备安全稳定运行、预防灾难性事故的重要手段。在火力发电领域,超声检测与射线检测用于锅炉管道、压力容器的内部缺陷检测,及时发现因高温蠕变、疲劳导致的裂纹和腐蚀;磁粉检测则对汽轮机叶片、发电机转子等部件的表面缺陷进行精准识别。在核电领域,对设备安全性要求极高,相控阵超声检测和数字射线检测技术可实现对核反应堆压力壳、管道焊缝的高精度检测,保障核设施安全。在新能源领域,风电叶片的无损检测采用超声导波和红外热成像技术,检测叶片复合材料的分层、脱粘缺陷;光伏组件的无损检测通过红外热像仪,排查电池片隐裂、热斑等问题,助力能源电力行业安全、高效发展。

3.4 交通运输领域

交通运输领域中,车辆、船舶、轨道交通等工具的安全性关乎公众生命财产安全,无损检测技术是保障交通基础设施可靠性的重要支撑。在汽车制造中,超声检测用于发动机缸体、变速箱壳体等铸件的内部缺陷检测,涡流检测和磁粉检测则对汽车零部件表面裂纹进行快速筛查,提升整车质量。船舶制造过程中,超声检测和射线检测技术对船体钢板、焊缝进行全面检测,确保船体结构强度;声发射检测技术可实时监测船舶在航行过程中结构的损伤情况。轨道交通领域,超声检测和涡流检测对钢轨、车轮进行在线检测,及时发现疲劳裂纹和磨损缺陷;低应变检测技术用于桥梁桩基完整性检测,保障桥梁结构安全。

4 无损检测技术的发展趋势

4.1 多技术融合与智能化发展

随着工业检测需求日益复杂,单一无损检测技术的局限性愈发凸显,多技术融合与智能化成为必然趋势。超声、射线、涡流等传统技术通过数据融合与算法优化,可弥补单一技术在缺陷识别上的不足,例如超声与红外热成像结合,既能定位内部缺陷又能分析表面温度异常,提升检测准确性。同时,人工智能与机器学习技术深度应用,实现缺陷自动识别、分类及预测。例如,基于深度学习的图像分析系统可快速处理射线检测图像,降低人为误判风险;机器人搭载多模态检测设备,能在复杂环境下自主完成检测任务,显著提升检测效率与智能化水平,满足高端制造领域对质量控制的严苛要求。

4.2 新型检测技术研发与应用

为突破传统检测技术的瓶颈,新型无损检测技术不断涌现并加速应用。太赫兹检测技术凭借穿透性强、成像分辨率高的优势,在复合材料分层检测、半导体芯片缺陷排查中崭露头角;声发射断层成像技术通过捕捉材料内部应力变化产生的弹性波,实现对动态缺陷的实时监测,适用于压力容器、桥梁结构的健康评估。此外,微机电系统(MEMS)传感器与纳米技术的结合,推动检测设备向微型化、高灵敏度方向发展,可实现对微小

构件或微观缺陷的精准检测。这些新型技术不仅拓宽了无损检测的应用边界,也为解决复杂材料和结构的检测难题提供了新路径。

4.3 检测标准与规范的完善

随着无损检测技术的广泛应用和快速发展,检测标准与规范的完善成为行业健康发展的关键。各国及国际组织正加快制定和修订检测标准,以适应新型技术、复杂工况和新材料的检测需求。例如,国际标准化组织(ISO)针对增材制造构件、新能源电池等新兴领域,推出专项无损检测标准;国内也在航空航天、核电等高端装备制造领域细化检测规范,统一检测方法、评定流程和质量等级。同时,数字化技术的应用促使检测标准向信息化、智能化方向升级,通过建立标准化数据接口和评价模型,推动检测结果的互认与共享,保障无损检测的规范性和可靠性^[3]。

结束语

无损检测技术作为现代工业质量控制的核心手段,在保障产品安全、推动技术革新中发挥着不可替代的作用。从传统技术的深度应用到多技术融合与智能化突破,从新型检测技术的研发创新到标准规范的完善,其发展始终紧密贴合工业升级需求。未来,随着新材料、新工艺的不断涌现,无损检测技术将持续向高精度、智能化、标准化迈进,为航空航天、能源电力等关键领域提供更可靠的质量保障,成为推动制造业向高端化、数字化转型的重要支撑力量,在工业高质量发展进程中释放更大价值。

参考文献

- [1]迟嘉陵.无损检测技术在道路桥梁试验检测中的应用分析[J].运输经理世界,2024(4):100-102.
- [2]王喜珠.桥梁检测中无损检测技术的应用分析[J].北方建筑,2022,7(6):26-30.
- [3]何敏.无损检测技术在桥梁桩基检测中的应用研究[J].居业,2021(4):66-67.