

无损检测技术在特种设备检验工作中的应用探讨

朱佳乐 王超宇 白 雪

内蒙古自治区特种设备检验研究院包头分院 内蒙古 包头 014030

摘 要: 特种设备运行工况复杂, 结构损伤隐患会随服役时长不断累积, 常规检验手段难以精准排查设备隐蔽缺陷与深层损伤。无损检测凭借非破坏性的作业优势, 适配各类特种设备的精细化检验场景, 本文结合各类无损检测的技术原理与性能特点, 梳理技术在设备内部缺陷筛查、表面损伤排查、焊缝检测及长期状态监测中的具体应用形式, 结合当下检验工作的实际短板, 从操作流程、设备工艺、技术融合及专业能力多个维度, 梳理技术优化的具体路径, 持续提升特种设备检验工作的精准度与规范性。

关键词: 特种设备; 无损检测; 检验技术; 缺陷排查; 工艺优化

引言: 特种设备广泛应用于工业生产与公共服务领域, 设备结构复杂、运行荷载波动大, 长期服役状态下容易产生各类结构性损伤, 直接影响运行稳定性与使用安全性。传统检验方式多以外观筛查为主, 对设备深层、隐蔽位置的缺陷识别能力较弱, 难以满足现阶段特种设备精细化、常态化的检验需求。无损检测具备无损伤、高精度、适配性强的优势, 能够适配各类复杂工况的设备检验作业。依托多样化无损检测手段落实检验工作, 可以有效弥补传统检测模式的不足, 为特种设备安全稳定运行提供技术支撑。

1 特种设备检验与无损检测技术基础特性

1.1 特种设备检验的作业特征

特种设备多服务于工业生产与公共服务场景, 整体结构体系复杂, 长期处于荷载交变、环境多变的运行状态。这类设备承载负荷大, 运行频次高, 部件磨损、结构损耗、内部损伤等隐患会随使用时长逐步累积。检验工作针对设备整体结构与关键零部件开展, 重点排查结构完整性与运行稳定性。检验作业需要覆盖设备生产投入、日常运行及周期维保的全流程环节, 对作业细致度与专业性有着较高要求。多数特种设备安装位置固定, 部分设备处于密闭、高空或承压工况环境, 检验操作空间受限。作业过程不能对设备原有结构造成破坏, 也不能随意中断设备正常运行节奏, 整体作业具备约束性强、覆盖面广、精细化要求高的突出特点。

1.2 无损检测技术的基本属性

无损检测是一类针对性较强的技术手段, 核心应用原则为不破坏被测设备的结构本体, 不影响设备原有使用性能^[1]。该技术依托物理探测原理开展作业, 通过

专属设备捕捉构件内部与表面的状态信息, 精准识别构件存在的各类缺陷。技术应用流程具备独立性, 可单独完成单项检测任务, 也可根据检测需求适配不同作业场景。技术探测维度较为全面, 能够捕捉肉眼无法辨识的内部细微损伤, 弥补传统外观检查的局限性。整体操作流程简便灵活, 适用范围广泛, 可适配多种材质、多种结构形式的工业设备检测工作, 能够适配不同工况下的检测作业需求。

1.3 无损检测与特种设备检验的适配性特征

特种设备检验的核心目标, 是保障设备结构完整、运行状态稳定, 从源头规避设备运行隐患。常规检测手段难以深入设备内部结构, 无法精准判定隐蔽性缺陷的实际状态。无损检测的技术特性能够适配特种设备检验的核心作业需求, 可深入探测设备构件内部及隐蔽部位的损伤情况。技术应用不会对特种设备的结构与性能造成损耗, 完全适配特种设备不停机、不拆机的检测作业要求。检测作业灵活度较高, 可适配各类特种设备的复杂结构与受限作业空间。技术探测精度稳定, 能够精准捕捉不同类型、不同深度的结构缺陷, 为特种设备检验工作提供可靠的技术支撑, 满足特种设备常态化、精细化的检验作业标准。

2 特种设备检验中常用无损检测技术类型及原理

2.1 超声波无损检测技术原理与技术特点

超声波无损检测以固体介质的声波传播特性为核心检测依据。高频超声波束射入特种设备金属构件内部, 传播路径遇到材料界面或内部缺陷时会发生波形反射与偏移。检测仪器收集传回的超声信号, 结合波形特征与传播时长, 精准定位构件内部缺陷的具体位置与形态范

围。该技术拥有极强的穿透性能，能够覆盖大厚度金属构件的深层检测区域。检测灵敏度优异，现场作业节奏快，配套设备体积小、便于携带，可适配各类户外及受限作业场景，适配特种设备现场检测的多数工况^[2]。

2.2 射线无损检测技术原理与技术特点

射线无损检测依托射线穿透固体材料的物理特质开展检测工作。射线穿过特种设备构件本体的过程中，密实完好的材料区域和存在缺损的区域会形成不一样的射线吸收强度。成像设备可完整记录射线穿透后的强度差异，生成清晰的影像图谱，直观展现构件内部气孔、夹渣、未焊透等结构性缺陷。技术成像清晰度高，缺陷形貌呈现直观，对焊缝、铸锻构件内部的体积型缺陷识别效果稳定，能够为构件内部质量判定提供直观的图像依据。

2.3 磁粉无损检测技术原理与技术特点

磁粉无损检测适用于各类铁磁性金属特种设备，核心依托电磁磁化原理完成缺陷筛查。对金属构件实施磁化处理后，完整结构的磁力线分布均匀规整。构件表层或浅层存在裂纹、缺口等缺陷时，磁力线分布会出现断裂外溢的情况，形成独立漏磁场。散落的磁粉会在漏磁场区域聚集成型，勾勒出缺陷的具体轮廓。整套操作流程简便易懂，投入成本较低，对浅层细微裂纹类缺陷识别精度高，多用于铁磁性构件表面质量筛查工作。

2.4 渗透无损检测技术原理与技术特点

渗透无损检测利用液体毛细渗透的物理特性完成表面缺陷检测。对特种设备构件表面做清洁干燥处理后，均匀涂抹专用渗透液，液态介质会顺着构件表层开口缺陷向内渗透滞留。清除表层多余渗透液并涂抹显像材料后，滞留介质会缓慢析出显色，清晰凸显开口缺陷的分布轨迹与形态。技术适用材质覆盖面广，可匹配金属与多种非金属构件，对肉眼难以分辨的细微开口缺陷有着稳定的识别能力。

2.5 涡流无损检测技术原理与技术特点

涡流无损检测基于电磁感应涡流效应实现检测作业。交变磁场靠近金属构件表面时，构件表层会感应生成闭合涡流回路。构件表层出现损伤、材质不均或结构变异的情况，涡流分布密度和运行状态都会产生明显变化。检测探头捕捉这类参数波动并完成数据分析，即可判定表层及浅层隐蔽缺陷。检测环节无需接触构件表面，作业流程简洁高效，对金属构件表层细微损伤的筛查工作具备良好适用性。

3 无损检测技术在特种设备检验中的具体应用维度

3.1 特种设备构件内部缺陷检测应用

特种设备核心承重及承压构件长期承接复杂交变力学荷载，内部结构会在长期受力作用下产生各类隐蔽性损伤。这类损伤深藏于构件深层结构内部，不会在设备表面呈现明显痕迹，常规目视检查和简易检测手段无法完成有效识别。无损检测技术依托专属物理探测原理穿透构件实体结构，精准捕捉构件成型和运行过程中产生的裂纹、空洞、材质夹杂等各类结构性缺陷。检测作业可覆盖厚壁承压构件、大型铸锻构件等关键设备主体，全面筛查深层结构存在的质量问题，精准锁定缺陷具体位置和损伤范围^[3]。能够精准甄别内部结构隐患，为后续缺陷处置和质量核验提供可靠检测依据。

3.2 特种设备表面损伤排查应用

特种设备在现场安装、日常运维和长期服役的过程中，外部结构会持续受到环境腐蚀、机械摩擦、外力撞击等多重因素影响，滋生各类细微结构性损伤。表层产生的微裂纹、腐蚀凹坑、表面破损等问题会随运行时间不断延展扩大，持续削弱设备整体结构强度与使用性能。无损检测系列技术可以适配各类构件表层缺陷的精细化筛查需求，高效捕捉常规检测难以发现的微米级开口损伤。检测范围能够覆盖设备全部外露结构、棱角边缘及易损耗部位，实现全方位、无死角的细致排查。可提前发现初期表层损伤，阻止微小缺陷持续扩展演化成重大结构隐患。

3.3 特种设备焊接部位检测应用

焊接结构是特种设备零部件装配衔接的核心载体，也是设备整体结构中稳定性偏弱、故障高发的关键区域。焊接施工受工艺操作、环境条件、材料性能等因素影响，容易出现未焊透、密集气孔、焊接裂纹、金属夹渣等工艺型缺陷，大幅降低设备连接刚度和密封性能。无损检测技术可针对各类焊接接头、对接焊缝、角焊缝等关键部位开展专项探测，系统排查焊接施工遗留的结构性瑕疵。检测模式能够适配不同厚度、不同造型的焊缝结构，精准区分各类焊接质量缺陷类型。可客观判定焊缝成型质量与结构可靠性，排查焊接薄弱部位带来的设备运行风险。

3.4 特种设备长期运行状态检测应用

特种设备大多处于连续运转、荷载多变、环境复杂的服役工况，结构性能会随运行时长逐步衰减，疲劳形变、材质老化、结构劳损等问题不断堆积累积。无损检测可作为常态化、周期性的检验手段，针对设备核心受力结构、关键承压部件开展规律性探测。持续掌握设备

内部与表层结构的损伤演变趋势,梳理结构性能的衰减变化规律。依托多阶段检测数据完成状态研判,精准识别材质老化、长期疲劳引发的隐性结构损伤。可以动态掌握设备结构性能变化情况,为设备周期化检验和针对性维护提供有效技术参考。

4 特种设备检验中无损检测技术的优化与发展方向

4.1 无损检测技术操作流程的优化思路

无损检测现场操作流程,直接关乎特种设备检验的整体质量。传统检测模式流程繁琐,多余作业环节较多,现场操作缺乏统一规范,容易出现作业秩序混乱、关键检测环节把控不严的问题。流程优化需要结合特种设备各类现场作业的实际工况,梳理并删减不必要的重复操作。规范前期准备、现场探测、数据采集、资料归档等全流程作业内容,根据不同设备结构明确对应的检测侧重点。细化各环节标准化操作步骤,减少人为操作引发的流程误差^[4]。梳理清晰通顺的作业逻辑,规范现场检测行为,提升特种设备检验工作的规范性与作业效率。

4.2 无损检测设备与工艺的升级方向

现阶段特种设备的结构样式、制作材料持续更新迭代,传统检测设备与老旧工艺已经无法适配新型设备的精细化检测需求。设备升级可以从检测精度、便携性能以及复杂环境适配能力三个维度开展优化。更换高精密探测元器件,提升设备对构件微小损伤的识别能力,契合高端特种设备的质检标准。工艺升级可依据设备自身结构特征,调整探测角度、作业参数与检测手段,妥善解决复杂结构检测难度大、信号干扰强的常见问题。持续更新适配新型材质构件的检测工艺体系,适配各类新型特种设备的现场检验场景。

4.3 无损检测技术的多元化融合发展趋势

单一无损检测技术存在一定应用短板,很难独立完成复杂特种设备的全方位质量排查工作。行业技术发展已经逐步转向多种检测手段相互补充、融合运用的发展模式。依托各类无损检测技术的独特优势,补齐单一检测方式存在的技术短板,搭建可以覆盖构件表层、浅层及深层结构的完整探测体系。结合不同技术的探测特

点,针对异形结构、特殊材质的特种设备搭建复合型检测模式。丰富无损检测的应用形式,拓展技术在复杂检验场景中的适用范围,让特种设备质量检测更加全面细致、精准可靠。

4.4 无损检测专业化应用能力的提升路径

无损检测技术的实际应用效果,依托作业人员的专业素养与实操能力支撑。人员专业水平不足,会大幅限制无损检测技术的实际应用价值。行业发展过程中,需要持续开展检测人员专业化培养工作,夯实从业人员的理论基础与实操技能。加强复杂工况下的实操演练,锻炼工作人员应对各类特种设备检测场景的处置能力。搭建常态化技能提升机制,帮助从业人员熟练掌握新型检测设备操作方式与前沿技术知识。强化人员对缺陷类型、工况条件、技术选型的综合判断能力,从实操层面保障无损检测技术在特种设备检验中的应用质量^[5]。

结束语

无损检测是特种设备检验工作中不可或缺的关键技术,各类检测手段凭借差异化的技术特性,可针对性解决设备不同位置、不同类型的结构缺陷问题。结合特种设备多样化的检验场景与持续更新的设备结构,对检测操作流程、设备工艺进行完善,推动多类检测技术融合应用,同步提升一线作业人员的专业应用能力。多维度的优化升级能够切实提升特种设备检验的精细化水平,减少结构损伤带来的安全隐患,为特种设备安全服役提供坚实的技术保障。

参考文献

- [1] 刘军.先进无损检测技术在特种设备检验中的应用[J].大众标准化,2025(15):168-170.
- [2] 袁松松,陈丹,李朋.承压类特种设备检验中无损检测技术的应用[J].中国科技纵横,2025(23):100-102.
- [3] 张翔令.探讨锅炉压力容器检验中无损检测技术的应用[J].中国设备工程,2024(1):140-142.
- [4] 俞燕.浅谈无损检测技术在锅炉压力容器检验中的应用[J].品牌与标准化,2025(5):183-185.
- [5] 杨健,赵静雅.无损检测技术在承压类特种设备检验中的应用探讨[J].商品与质量,2022(10):91-93.