

解析特种设备检验中无损检测技术应用

张福华

西双版纳傣族自治州检验检测认证院 (西双版纳傣族自治州重点产业技术研究院) 云南 西双版纳
666100

摘 要: 特种设备长期处于复杂载荷与工况环境中, 结构损伤会直接影响设备运行稳定性与使用安全性。本文梳理超声波、射线、磁粉、渗透、涡流五类主流无损检测技术的核心工作原理, 结合承压类、机电类、移动式特种设备的结构特性, 区分不同设备的技术适配特征, 划分各类检测技术的差异化应用场景。同时结合现场作业规范, 梳理无损检测实操关键要点, 明确多技术组合搭配的应用思路, 结合复杂工况特性梳理技术优化与升级路径, 为特种设备无损检测工作的规范化、精细化开展提供有效参考。

关键词: 特种设备; 无损检测; 技术原理; 场景应用; 技术适配

引言: 特种设备广泛应用于工业生产、民生服务等各个领域, 设备结构复杂、运行工况特殊, 长期服役过程中易产生内部裂纹、表层损伤、壁厚损耗等各类缺陷, 隐患积累易引发设备运行故障。无损检测凭借非破坏性、高精度、安全性强的优势, 成为特种设备质量核验与日常检验的核心技术手段。不同检测技术的适配范围与功能属性存在明显差异, 各类特种设备的结构特点与损伤规律也各不相同。精准匹配检测技术与设备类型、应用场景, 规范现场作业流程, 是提升特种设备检验质量、保障设备安全运行的关键所在。

1 特种设备检验常用无损检测技术基本原理

1.1 超声波检测技术原理

超声波检测是特种设备内部缺陷检测的主流技术, 依托高频声波的传播特性完成检测工作。设备探头会向特种设备构件内部发射高频超声波, 声波在均匀、致密的金属材质内部匀速传播, 传播路径保持稳定。当声波遇到构件内部的裂纹、气孔、夹渣等不连续缺陷时, 传播界面会发生突变, 部分声波会产生反射、折射或散射现象。探头可实时接收反射回来的声波信号, 检测仪器将声波信号转化为可视化波形数据。通过分析波形的幅值、位置和数量, 可精准判断构件内部缺陷的埋藏深度、尺寸大小和分布位置^[1]。这项技术对金属厚壁构件检测适配性极强, 常应用于锅炉、压力容器、压力管道等特种设备的壁厚检测和内部缺陷排查。

1.2 射线检测技术原理

射线检测依靠 X 射线、 γ 射线的穿透能力实现无损检

测, 是排查特种设备内部体积型缺陷的有效手段。射线工作电压常规控制在 50kV ~ 300kV, 具备穿透金属构件的物理特性, 穿通过程中会与构件材质发生相互作用, 产生一定程度的能量衰减。构件材质均匀区域, 射线衰减程度保持一致; 构件内部存在孔洞、疏松、未焊透等缺陷的区域, 介质密度更低, 射线衰减幅度会明显减小。穿透构件后的射线会作用于胶片或数字成像设备, 形成明暗、深浅存在差异的影像, 技术缺陷分辨率可达 0.1mm 级别。通过观察影像的灰度变化和形态特征, 可识别内部缺陷的类型、尺寸和具体分布。该技术成像直观清晰, 适合检测特种设备焊接接头、薄壁构件的内部体积类缺陷。

1.3 磁粉与渗透检测技术原理

磁粉检测仅适用于铁磁性特种设备构件, 核心依托电磁感应原理工作。对铁磁性构件进行磁化处理后, 构件整体会形成均匀磁场。表面或近表面存在裂纹、折叠等缺陷时, 磁场磁力线会发生畸变, 部分磁力线会溢出构件表面形成漏磁场。喷洒在构件表面的磁粉会在漏磁场区域聚集, 形成肉眼可辨识的磁痕, 可凭借磁痕形态判定缺陷位置与大小。渗透检测适配范围更广, 可用于各类致密固体材质构件。将着色或荧光渗透液涂抹在构件表面, 渗透液会在毛细作用下渗入表面开口缺陷内部。清除表面多余渗透液并喷涂显像剂后, 缺陷内部的渗透液会反向析出, 显现出清晰缺陷痕迹, 精准识别构件表面细微开口缺陷。

1.4 涡流检测技术原理

涡流检测基于电磁感应定律开展工作, 主要用于检

测特种设备导电金属构件的表面及近表面缺陷。检测探头的交变线圈通电后,会产生交变磁场。磁场作用于金属构件表面,会感应出闭合的涡流电流。涡流的分布、密度和流动状态会受构件材质均匀度、表面状态影响。构件表面或浅层存在裂纹、腐蚀、磨损等缺陷时,涡流的流动路径会被阻断、扰动,电流分布规律发生改变。检测设备捕捉到涡流的参数变化并转化为电信号,通过信号波动特征,可判断构件缺陷的存在状态和损伤程度。该技术检测速度快、操作便捷,适合批量筛查特种设备金属板材、管材的表层损伤问题。

2 各类特种设备对应的检测技术适配特点

2.1 承压类特种设备技术适配特点

承压类特种设备包含锅炉、压力容器、压力管道等设备,长期承受内部压力、温度交变载荷,易产生内部焊道缺陷、壁厚减薄、深层裂纹等损伤问题。这类设备多为 10mm~200mm 区间的厚壁金属结构,焊接接头为核心检测部位,对深层缺陷检测精度要求较高。超声波检测是这类设备的核心检测方式,能够精准捕捉厚壁构件内部的夹渣、未焊透、深层裂纹等缺陷,检测深度大、成本低,还可完成实时壁厚监测^[2]。射线检测多用于承压设备 10mm 以内薄壁焊接部位的复检,可清晰呈现气孔、疏松等体积型缺陷,成像结果可留存归档,满足设备质检溯源需求。表面缺陷检测可搭配磁粉、渗透检测,清理设备外壁、焊缝表层的细微开裂与开口损伤,全方位保障承压设备运行安全。

2.2 机电类特种设备技术适配特点

机电类特种设备以电梯、起重机械、客运索道为核心,设备损伤多集中在零部件表层及近表层,疲劳裂纹、表层磨损、连接件开裂是主要缺陷类型。设备构件多为异形结构、薄壁金属件,部分零部件体积小巧、安装位置紧凑,检测空间受限。涡流检测适配这类设备的检测场景,可快速筛查金属零部件表层的细微疲劳裂纹、腐蚀损伤,无需接触构件表面,检测效率更高。磁粉检测可针对起重设备吊钩、钢丝绳接头、电梯金属构架等铁磁性构件开展检测,精准识别近表层隐性裂纹。渗透检测用于部分非铁金属、合金构件的表面开口缺陷排查,适配异形、狭小构件的检测作业,弥补其他技术的检测盲区。

2.3 移动式特种设备技术适配特点

移动式特种设备涵盖叉车、移动式压力容器、车载起重设备等,作业场景流动性强,设备频繁承受震动、冲击载荷,易出现结构松动、局部磨损、焊缝疲劳开

裂等问题,检测作业多为户外现场作业,无固定检测场地。这类设备整体结构复杂,兼具厚壁腔体、薄壁支架、金属板材等多种构件,检测需求具备多样化特征。超声波检测用于移动式压力容器罐体、承重厚壁构件的内部缺陷排查,把控核心承载结构的完整性。涡流、磁粉检测适配设备支架、连接焊缝、金属板材的表层缺陷筛查,设备便携性强,可适配户外流动检测场景。射线检测仅在设备大修、关键构件复检时使用,规避户外复杂环境对成像质量的干扰,保障检测数据的准确性。

3 无损检测技术在特种设备检验中的场景化应用

3.1 穿透式检测技术的场景化应用

穿透式检测技术依托射线、超声波两类核心手段,实现特种设备内部结构的全域检测,是设备核心构件质量把控的关键方式。这类技术能够穿透设备外层金属结构,深挖内部隐藏损伤,多用于承压设备、大型锻件、管道焊缝的质量核验。射线检测擅长处理各类焊接成型缺陷,能够精准识别焊缝内部气孔、未熔合、疏松等体积类损伤^[3]。检测生成的数字化影像清晰度高,可长期保存留存,可直接作为设备出厂验收、年度检验、大修评级的重要评判依据。超声波检测更适配大厚度、高承压的重型构件,常用于高压管道、锅炉厚壁筒体、大型储罐底板的常态化巡检。结合设备材质、结构厚度、运行工况调整检测参数,可有效捕捉设备长期受力产生的深层裂纹、壁厚损耗和内部疲劳损伤,从结构内部规避设备失效风险。

3.2 表层检测技术的场景化应用

表层检测技术涵盖磁粉检测与渗透检测两类基础手段,专注排查设备表层及开口型缺陷,适配特种设备日常维保与常规抽检场景。磁粉检测专门服务于铁磁性金属构件,起重机械钢架、设备法兰、连接基座等构件都可适用。设备长期往复受力产生的微裂纹、疲劳纹路、表层开裂都可以通过磁粉聚集现象清晰显现,精准排查肉眼无法辨识的隐性损伤。渗透检测适用材质范围更为宽泛,可作用于不锈钢、铝合金等无法磁化的构件。作业流程简单便捷,通过渗透液浸润、清洗、显像的流程,放大构件表面细微开口缺陷,清晰呈现裂纹、点状腐蚀、表层剥落等损伤痕迹,广泛应用于机电设备外壳、轻型配件、移动设备外露构件的质量筛查。

3.3 精细化检测技术的场景化应用

精细化检测技术以涡流检测为核心载体,主打高精度细微损伤筛查,适配特种设备精密构件的专项检验工作。现代特种设备搭载大量精密零部件,传动杆件、薄

壁板材、精密轴承等构件精度要求极高,微小损伤都会影响设备运行稳定性。涡流检测依靠电磁感应原理捕捉构件表层及浅层的细微损伤,能够识别微米级裂纹、局部腐蚀、材质厚薄不均等常规技术难以发现的缺陷。检测作业无需打磨、接触构件,不会对精密构件造成二次损伤。可覆盖规整平面与异形曲面构件的检测需求,既可以用于零部件出厂批量质检,也能满足在用设备精细化维保作业,持续提升特种设备检验工作的精细度与规范性。

4 无损检测作业的实操要点与技术升级方向

4.1 无损检测现场实操核心要点

无损检测现场作业的规范性直接决定检测数据的有效性,整套流程需要落实全流程质量管控。检测前期需要完成设备工况核查、构件表面预处理与检测参数标定,清理构件表面锈蚀、涂层、油污等杂物,消除外界因素对检测信号的干扰。不同材质与厚度的构件需要匹配对应的检测设备与参数,杜绝统一参数作业带来的精度偏差^[4]。检测过程中需要把控作业环境条件,常规作业环境温度需维持在 $5^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$,温湿度、光照、电磁干扰等环境因素都会影响各类检测技术的作业效果。射线检测作业需划定专属作业区域,落实辐射防护举措,规避安全隐患。超声波检测需要保证探头与构件表面贴合紧密,把控耦合剂涂抹厚度均匀度,探头常用折射角度优选 45° 、 60° 、 70° 。磁粉、渗透、涡流检测需严格遵循工序流程,把控磁化时间、渗透时长、显像间隔等关键节点。检测结束后留存完整检测数据与影像资料,完成现场设备复位,保障作业闭环可控。

4.2 多类型检测技术组合搭配思路

单一检测技术存在适用范围局限,无法覆盖特种设备复杂结构的全部缺陷类型。合理搭配多种检测技术,能够补齐单项技术的检测短板,实现缺陷全方位排查。厚壁承压构件的焊缝检测可采用超声波与射线结合的方式,超声波负责深层裂纹、夹层类平面缺陷筛查,可覆盖200mm厚度构件,射线覆盖气孔、疏松等体积型缺陷,适配10mm以内薄壁结构,完善焊缝质量判定维度。铁磁性金属构件检测可组合磁粉与超声波技术,超声波挖掘内部深层损伤,磁粉捕捉表层0.1mm级细微疲劳裂纹,实现内外结构全覆盖。非磁性精密构件可搭配渗透与涡流检测,渗透定位开口型表面缺陷,涡流筛查浅层隐性损伤。技术组合无需冗余叠加,结合设备结

构、运行年限、缺陷高发规律制定针对性方案,在控制作业成本的同时提升检测精准度。

4.3 特殊工况下检测技术升级方向

特种设备常处于高温、高压、户外恶劣环境、低温承压等特殊工况,常规检测技术难以适配复杂作业场景,技术迭代升级成为行业发展核心趋势。极端温度工况下,常规检测设备稳定性不足,耐高温、耐低温专用检测探头与耦合介质的研发应用,可拓宽检测技术的工况适配范围,适配 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 宽温域作业环境。复杂户外工况依托数字化、智能化技术,升级便携式智能检测设备,弱化环境干扰对检测数据的影响,提升野外作业稳定性。传统人工判读模式逐步向智能图像识别、数据自动分析方向转型,依托算法模型精准识别0.1mm级微小缺陷,降低人工判读误差。自动化检测设备、机器人检测系统逐步替代人工高危作业,适配高空、密闭、高压高危设备检测场景^[5]。数字化档案体系的搭建,可实现检测数据动态追溯,推动特种设备无损检测向智能化、精准化、安全化方向稳步升级。

结束语

无损检测是保障特种设备安全稳定服役的重要技术支撑,各类检测技术依托不同工作原理,形成差异化的功能优势与适用范畴。结合不同特种设备的结构特性匹配适配检测方式,依托场景化应用模式落实精细化检验,能够有效覆盖设备内外各类缺陷隐患。通过规范现场实操流程、优化多技术组合应用模式、适配特殊工况完成技术升级,可持续提升特种设备检验工作的精准度与规范性,为各类特种设备的安全运维与长效运行筑牢技术基础。

参考文献

- [1] 苏睿. 解析特种设备检验中无损检测技术应用[J]. 建材与装饰,2023,19(11):24-26.
- [2] 胡杰. 解析特种设备检验中无损检测技术应用[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(9):127-129.
- [3] 孙敏,冯婕. 解析特种设备检验中无损检测技术应用[J]. 中文信息,2024(2):7-8.
- [4] 柳芳辉. 解析特种设备检验中无损检测技术应用[J]. 电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(2):352-354.
- [5] 惠佳琛,徐小建,李博凡,等. 无损检测技术在承压类特种设备检验中的应用[J]. 品牌与标准化,2026(2):166-168.