

水利机械铸件缺陷无损检测技术应用

洪国斌

广东粤水电装备集团有限公司 广东 511356

【摘要】：水利机械铸件是水轮机转轮、泵壳等核心承压部件，铸造缺陷直接诱发设备失效。本文聚焦超声、数字射线、磁粉/渗透三类无损检测技术，阐述其适配水利机械铸件的实践原理与操作规范，结合行业标准及工程数据，分析不同技术的缺陷检出效果、场景适用性与工程效益。研究表明，三类技术组合应用可实现铸件全类型缺陷全覆盖检测，为水利机械铸件质量保障与安全运行提供可靠技术支撑。

【关键词】：水利机械铸件；无损检测技术；缺陷检测

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.001

引言

水利机械铸件是水利枢纽工程核心构件，长期承受水力冲击与交变载荷，气孔、裂纹等铸造缺陷易诱发设备故障。无损检测作为非破坏性质量管控关键手段，在行业中应用广泛。本文针对水利机械铸件材质与结构特点，系统探讨三类主流无损检测技术的实践应用方法，通过分析检出效果、适配性及工程效益，为行业标准化检测流程构建与技术优化提供参考，助力提升水利机械装备运行安全性。

1 水利机械铸件缺陷无损检测技术原理

水利机械铸件多承担水轮机转轮、泵壳、阀体等核心承压功能，铸钢与合金铸铁是其主要材质，成型阶段受温度分布不均、收缩应力作用，极易产生气孔、夹渣、裂纹及缩松等问题。这类缺陷在交变水力载荷与冲蚀磨损的复杂工况中易持续扩展直至失效，直接危及设备运行安全。无损检测依托声、光、磁、射线等物理场与铸件材料、缺陷间的相互作用差异，无需损伤铸件结构与使用性能即可精准识别缺陷位置、尺寸及属性^[1]。厚壁铸件内部缺陷可借助超声波在不同介质界面的反射与衰减特性捕捉回波信号实现检测，表面开口缺陷通过渗透液毛细作用或磁粉漏磁聚集效应显现轮廓，体积型缺陷则利用射线穿透后的衰减差异形成灰度影像完成直观判定。各类技术均以铸件材料物理特性及缺陷对物理场传播的扰动为基础，实现铸件质量非破坏性评价，为水利机械铸件质量管控提供坚实技术依据。

2 水利机械铸件缺陷无损检测关键技术

2.1 超声检测技术

超声检测是水利机械厚壁铸件内部缺陷排查的核心技术，水轮机转轮上冠、泵壳、阀体等壁厚 100~300mm 的铸钢件，借助该技术可精准识别气孔、缩松、裂纹及夹渣等各类问题。检测实施前需对铸件表面做预处理，依据 GB/T7233.1-2009 标准，检测区域表面粗糙度需控制在 Ra25 μm 以内，铸件表面残留的粘砂、氧化皮需通过角磨机或喷砂机打磨清除，去除表层厚度不少于 1mm，避免表面不平整造成耦合失效或伪缺陷信

号干扰。探头选型需匹配铸件结构与壁厚参数，厚壁铸钢件适配 2.5MHz 纵波直探头，20mm 晶片直径对应近场长度约 30mm，可覆盖多数铸件有效检测范围；叶片根部、流道等曲面结构则选用软保护膜探头保障贴合度，减少声能损耗，搭配 45°、60° 横波斜探头检测近表面及根部裂纹，探头折射角根据铸件壁厚与缺陷潜在取向灵活确定，确保声束扫查覆盖整个检测截面。

灵敏度校准采用 GB/T7233.1-2009 规定的平底孔对比试块，试块材质与被检铸件保持一致，通过 2mm、4mm、6mm 三种直径平底孔制作距离-波幅曲线，作为铸件质量等级评定的参考当量；水利机械 II 级铸钢件需满足单个缺陷当量不超过 ϕ 4mm、密集缺陷当量不超过 ϕ 2mm 的标准，且缺陷间距需大于缺陷当量直径 3 倍，防止误判为连续缺陷。手工扫查时探头移动速度控制在 50~100mm/s，扫查间距不超过探头有效声束宽度的 80%，确保无检测盲区；壁厚超 200mm 的铸件采用双面纵波扫查，近表面盲区通过横波斜探头补充检测，浇冒口、加强筋等应力集中区域实施 100% 全覆盖扫查，规避收缩应力引发的裂纹漏检。

缺陷判定需结合波形特征与距离-波幅曲线，气孔表现为单个尖锐回波，底波无明显衰减；缩松对应底波降低、密集杂波信号，衰减系数超 0.15dB/mm（铸钢件正常衰减系数范围 0.05~0.1dB/mm）；裂纹则呈现尖锐多峰回波，底波衰减显著，需通过多角度扫查明确缺陷长度与深度。水电站现场检测环境中铸件表面温度波动较大，应选用甘油基耦合剂，其在 -10℃~50℃ 区间可保持稳定声阻抗匹配，同时需对探头采取保温措施，避免温度过低影响检测精度；大型转轮铸件采用分段扫查与标记记录联动方式，按结构特点划分检测区域并做好清晰标记，为后续缺陷定位与返修处理提供便利。

2.2 数字射线检测技术

数字射线检测是水利机械薄壁铸件体积型缺陷检测的关键技术，阀体、导叶、泵体等壁厚 20~100mm 的部件均适用该技术，能直观呈现缺陷形态与分布特征，成为铸件质量判定的

重要依据^[2]。设备选用工业 X 射线数字成像系统, 100 μm 平板探测器像素尺寸、 $\geq 14\text{bit}$ 动态范围, 搭配 100~300kV 管电压调节范围与 0.5~10mA 电流区间, 可满足不同壁厚铸钢件透照需求; 壁厚 50mm 的铸钢阀体检测需遵循 NB/T47013.11-2015《承压设备无损检测第 11 部分: X 射线数字成像检测》标准, 220kV 管电压、5mA 电流、30s 曝光时间及 1000mm 透照距离的参数组合, 可获取清晰缺陷影像。透照工艺需结合铸件结构灵活优化, 复杂结构件采用多角度透照方案, 每个检测截面至少设置 3 个透照方向, 相邻方向夹角控制在 120° 以内, 避免缺陷被铸件结构遮挡; 铸件与探测器间距保持 50~100mm 以降低几何不清晰度, 焦点尺寸 1mm 时几何不清晰度约 0.05~0.1mm, 符合不大于 0.2mm 的标准要求; 浇冒口残留、加强筋等结构需用铅屏蔽板遮挡无关区域, 防止伪缺陷影像产生, 同时在铸件表面放置丝型像质计, 壁厚 50mm 对应 W10 像质指数, 确保影像灵敏度契合 NB/T47013.11-2015 标准规范。

图像采集后需开展灰度调整、直方图均衡化、边缘增强等后处理操作, 提升缺陷与基体的对比度; 疏松缺陷通过设定灰度阈值, 将黑度差 ≥ 0.3 的区域标记为潜在缺陷, 气孔缺陷黑度差一般 ≥ 0.5 , 夹渣缺陷因成分差异黑度差在 0.3~0.8 区间, 可通过形态特征区分具体缺陷类型; 数字影像采用 DICONDE 格式存储, 便于后续追溯与评定, 存储分辨率不低于探测器原始分辨率, 避免图像压缩造成缺陷细节丢失。

缺陷评定严格参照 NB/T47013.11-2015 质量分级标准, 水利机械铸件单个气孔最大直径不超过铸件壁厚的 $1/10$ 且不大于 3mm, 密集气孔面积不超过评定区域的 1%, 夹渣缺陷长度不大于铸件壁厚的 $1/3$ 且不大于 5mm, 超出标准限值的铸件需判定为不合格并实施返修处理。数字射线检测相较于传统胶片射线检测, 无需暗室处理即可实现实时成像, 现场检测效率提升 40% 以上, 行业应用报告显示该技术省去胶片耗材, 有效降低检测成本; 水电站现场返修件可通过数字影像直接明确缺陷位置与尺寸, 为返修工艺提供精准指导, 避免盲目打磨, 显著提高返修合格率。

2.3 磁粉/渗透检测技术

磁粉与渗透检测是水利机械铸件表面及近表面缺陷排查的关键技术, 转轮叶片表面裂纹、泵壳内表面冷隔、阀体折叠等问题均可通过这类技术实现精准识别, 成为保障铸件表面质量的核心环节。磁粉检测适用于铁磁性铸钢件, 遵循 GB/T9444-2019《铸钢件磁粉检测》标准采用湿法非荧光磁粉检测方案, 10~20g/L 磁悬液浓度搭配无味煤油载体, 添加防锈剂与分散剂防止磁粉结块; 磁化选用触头法, 150~250mm 触头间距对应每 100mm 间距 800~1000A 磁化电流, 20~50mm 壁厚铸件按 800A/100mm 取值, 确保近表面缺陷产生足够漏磁场; 磁化过程需分两次垂直进行, 先纵向后周向, 每次 1~3s 磁化后观察磁痕, 缺陷磁痕呈线状或树枝状且轮廓清晰, 伪缺陷磁

痕多为分散点状无固定形态。检测结束后采用交流退磁法对铸件处理, 电流从最大值逐步降至零, 确保剩磁不超过 0.3mT, 避免影响后续加工与设备运行; 转轮叶片曲面表面采用柔性触头或绕电缆法磁化, 保证磁化均匀无检测盲区, 同时控制环境湿度在 80% 以内, 防止磁悬液受潮干扰缺陷显示^[3]。针对泵壳、阀体等异形弯管类水利机械铸件, 常规平面检测方式难以实现曲面全覆盖磁化检测, 工程现场常采用专用工装辅助开展湿法磁粉检测作业。见图 1

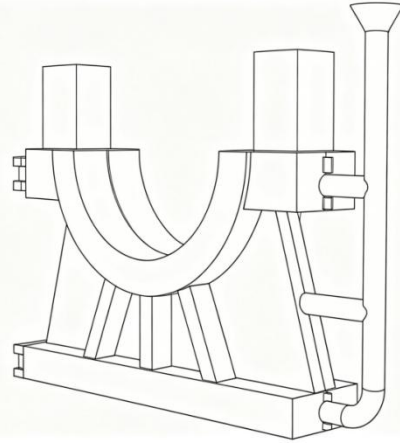


图 1 水利机械铸件磁粉检测工装结构示意图

渗透检测多用于非铁磁性铸件或磁粉检测难以覆盖的区域, 不锈钢铸件表面开口缺陷检测尤为适配, 依据 JB/T9218-2007《无损检测渗透检测》采用溶剂去除型着色渗透检测, 操作流程包含预清洗、干燥、渗透、去除、干燥、显像、观察七个环节。预清洗通过丙酮或乙醇擦拭铸件表面, 清除油污、锈蚀与氧化皮, 确保缺陷开口充分暴露; 40~50 $^\circ\text{C}$ 干燥温度保持 10~15min, 避免水分残留阻碍渗透剂渗入。渗透剂采用喷涂方式施加, 保持铸件表面润湿 10~15min, 深缺陷可延长至 20min; 多余渗透剂先以干净布擦拭, 再用蘸有清洗剂的布轻擦, 避免过度清洗导致缺陷内渗透剂流失。再次干燥后施加 0.05~0.07mm 厚的显像剂, 要求薄而均匀, 显像时间 7~60min, 缺陷在显像剂上呈现红色线状或斑点状; 观察时白光照射度需达到 1000lx 以上, 细小裂纹可借助放大镜辅助, 开口宽度 $\geq 0.01\text{mm}$ 的缺陷检出率超 98%, JB/T9218-2007 应用验证数据已证实这一效果。

水电站现场检测中, 长期处于潮湿环境的铸件表面易生锈蚀, 检测前需彻底除锈避免缺陷被覆盖; 泵壳流道等内表面检测需配合内窥镜辅助观察, 确保无缺陷遗漏; 两种检测方法均需详细记录缺陷位置与尺寸, 为后续返修与质量追溯提供支撑, 同时需避免在铸件表面残留有害物质, 保障后续防腐涂层的附着效果。

3 水利机械铸件缺陷无损检测应用效果分析

3.1 典型铸件缺陷检出效果

水利机械核心铸件长期承载水力冲击与交变载荷,缺陷的精准识别是设备安全运行的关键前提。基于现行无损检测标准开展批量检测实践,水利行业铸件质量检测统计数据显示,水轮机铸钢转轮、大型水泵壳体、水工阀体等主流构件检测中,整套无损检测体系已实现不同类型缺陷的全面识别。超声检测在厚壁铸钢件(100~300mm)检测中表现突出,对内部深层裂纹、大面积缩松及夹层夹渣的识别能力尤为显著,能精准定位浇冒口切割区域、铸件转角应力集中处的隐藏裂纹,内部危害性缺陷检出准确率维持在高水平^[4]。数字射线检测在薄壁导叶、小型阀类铸件检测中优势明显,可清晰呈现气孔、点状夹杂、疏松等体积型缺陷的实际形态与分布范围,弥补了超声检测对细小体积缺陷辨识不足的短板。磁粉与渗透检测则适配铸件外表面、流道内壁、叶片曲面等位置的开口性缺陷检测,能有效捕捉铸造过程产生的冷隔、微裂纹、折叠等细微瑕疵,避免表面微小缺陷在长期水力工况下逐步扩展。实际现场抽检中,多项隐蔽缺陷均通过组合检测方式提前发现,成功规避了带缺陷铸件投入装配使用的风险。

3.2 不同检测技术适用性对比

三种主流无损检测技术在水利机械铸件检测场景中各有适配范畴,适用工况与检测条件差异显著。超声检测无需复杂防护配置,设备便携性突出,能适应水电站野外施工现场、大型铸件就地检测等复杂环境,更适配大尺寸厚壁铸钢构件内部缺陷筛查,结构复杂、曲面曲率过大的小型铸件检测中,却易出现声束扫查盲区。数字射线检测成像直观且缺陷量化精度高,便于检测结果留存归档与质量评级,NB/T47013系列标准对该技术检测场地辐射防护条件有严格要求,设备搬运部署繁琐,难以应用于野外露天大范围批量检测作业。磁粉与渗透检

测操作流程简便、检测成本低廉,不受铸件结构形状约束,适合铸件出厂前表面缺陷批量普查,仅能识别表层及近表面开口缺陷,无法探测铸件内部深层隐患。实际工程应用中,大型厚壁主构件以超声检测为核心,中小型薄壁铸件通过数字射线检测复核,所有铸件均搭配磁粉或渗透检测完成表面质量筛查,形成优势互补的检测体系。

3.3 工程应用综合效益评价

无损检测技术在水利机械铸件生产与运维阶段的广泛应用,产生显著质量成效与经济价值。标准化无损检测流程的落地实施,使铸件不合格品得以在出厂环节提前甄别,水利装备制造行业应用数据显示,铸件返修率与报废率得到有效管控,减少原材料浪费与二次加工的额外投入。经全面无损检测合格的铸件投入水利工程后,内部缺陷、表面裂纹引发的设备渗漏、结构断裂等故障显著减少,降低水电站机组停机检修频次,保障水利枢纽工程持续稳定运转。系统化无损检测的推广应用,构建起水利机械铸件全流程质量管控体系,统一缺陷判定标准与检测流程,助力行业铸件制造整体工艺水平提升。从长远发展来看,这一技术的普及有效延长水利机械设备服役年限,减少后期运维改造资金投入,兼具安全生产保障与工程经济节约的双重效能^[5]。

4 结语

本文围绕水利机械铸件缺陷无损检测技术的原理、实践与应用效果展开探讨,明确了超声、数字射线、磁粉/渗透检测技术在不同铸件类型、缺陷形态下的应用边界与操作要点。三类技术优势互补,实现了铸件表面与内部缺陷精准检出,降低了不合格铸件使用风险及生产运维成本。未来可推动检测技术智能化集成化发展,优化复杂工况下检测精度与效率,为水利机械装备高质量发展筑牢技术基础。

参考文献:

- [1] 王亚鑫.水利工程混凝土浇筑质量无损检测与缺陷修复技术[J].产品可靠性报告,2025(9):120-121.
- [2] 张辉,张邹铨,陈煜嵘,吴天月,钟杭,王耀南.工业铸件缺陷无损检测技术的应用进展与展望[J].自动化学报,2022,48(4):935-956.
- [3] 曹敏,林秀松.无损检测技术在水利工程混凝土结构质量检测中的应用[J].水利技术监督,2025(9):30-32148.
- [4] 董树林,李倩倩.基于无损检测技术的水利工程质量评估方法研究[J].水上安全,2025(3):125-127.
- [5] 谈振宇.电梯机械部件无损检测技术的应用与发展[J].现代制造技术与装备,2025,61(5):106-108.