

# 大型锻件超声无损检测技术研究

周慧娜

钢研纳克检测技术股份有限公司 北京 100081

**摘要:** 本文围绕大型锻件超声无损检测技术展开研究,先阐述技术基础,包括大型锻件结构与缺陷特性、超声检测原理及技术特点;再分析核心技术环节,涵盖检测系统参数设计、工艺规划与信号处理;接着剖析复杂结构盲区、信号干扰、效率精度平衡等难题;最后提出设备升级、算法优化、工艺创新等优化方向及应用保障措施,为提升大型锻件超声检测质量与效率提供理论与技术参考。

**关键词:** 大型锻件; 超声无损检测; 核心技术体系; 实施流程; 质量控制

引言: 大型锻件广泛应用于能源、航天、重型装备等关键领域,其内部质量直接影响装备安全运行。传统检测方式难以精准识别大型锻件内部缺陷,而超声无损检测技术凭借非破坏性、高灵敏度优势,成为保障质量的关键手段。当前该技术在复杂结构检测、信号区分、效率精度协调等方面仍存不足,开展相关研究对突破技术瓶颈、推动行业发展具有重要意义。

## 1 大型锻件超声无损检测的基础认知与技术背景

### 1.1 大型锻件的特性与检测需求

大型锻件多应用于重工、能源、航空航天领域,结构特征表现为尺寸范围广,单重可达数百吨、最大外径超十米,壁厚差异显著,从数十毫米到数米不等,部分还含复杂型腔分布,如阀体内部流道、法兰连接孔等,增加内部质量管控难度<sup>[1]</sup>。锻造过程中易产生多种内部缺陷,疏松由金属凝固时收缩不均形成,夹杂源于原料杂质或锻造时混入异物,裂纹多因锻造应力释放或冷却过快引发,白点则与氢元素聚集相关。这些缺陷会直接影响锻件力学性能,无损检测可提前识别缺陷,避免因抗拉强度不足、冲击韧性下降导致设备运行中出现断裂、失效,为锻件安全应用提供核心保障,尤其对承载高压、高温的关键部件,检测结果直接关系整体设备运行可靠性。

### 1.2 超声无损检测的技术原理与优势

超声无损检测依托超声波传播规律工作,纵波在钢铁等金属材料中传播速度约5900m/s,横波速度约3200m/s,在铝合金中纵波速度约6300m/s,不同材质中声速差异为缺陷判断提供依据。超声波遇到缺陷界面时会产生反射与透射信号,反射信号的幅值随缺陷尺寸增大而增强,传播时间与缺陷深度正相关,通过分析这些信号特征实现缺陷识别。相较于射线检测,超声检测无需辐射防护,操作更便捷,且检测深度更深,能覆盖厚壁锻件

全截面;相较于磁粉检测,其对内部缺陷定位精度更高,误差可控制在0.1毫米范围内,尤其适配厚壁件检测,可有效捕捉深层缺陷,弥补表面检测技术的不足。

### 1.3 大型锻件超声检测的技术难点

大尺寸给检测带来明显挑战,直径超1m的锻件中心区域,受探头声束覆盖范围限制,即使采用聚焦探头,仍易形成检测盲区,难以全面排查该区域缺陷,需通过多次调整探头角度或采用多探头组合方式改善覆盖效果。锻件粗晶组织,如某些合金钢锻件晶粒度达3-5级时,会加剧超声波衰减,声能在传播过程中损耗增加,每传播1米衰减量可达2-5分贝,导致缺陷反射信号减弱,信噪比降低,影响缺陷识别准确性。复杂曲面与异形结构使检测耦合剂适配难度上升,不同曲面弧度会改变耦合剂的附着形态与声能传导路径,需调整耦合剂用量与类型,如粗糙表面选用高粘度耦合剂,光滑表面选用低粘度耦合剂,以保证声能传输;同时探头难以稳定贴合不规则表面,易出现检测断点,需借助专用探头夹具提升贴合稳定性,确保检测完整性。

## 2 大型锻件超声无损检测的核心技术体系

### 2.1 超声检测设备与探头选型技术

超声波探伤仪的关键参数直接影响检测效果,频率范围0.5-10MHz可覆盖不同检测场景,低频段适合厚壁件深层检测,高频段适配薄壁件精细排查;增益调节范围需达到60-110dB,确保微弱缺陷信号能被有效放大;动态范围不低于30dB,可清晰区分缺陷信号与背景杂波。探头类型需按检测需求适配,直探头发射纵波,适合检测平行于锻件表面的分层、疏松等缺陷;斜探头通过折射产生横波,能检测与表面倾斜或垂直的裂纹;双晶探头因近场盲区小(通常 $\leq 1\text{mm}$ ),专门用于捕捉近表面微小缺陷。耦合剂选择需对比声阻抗匹配性能,机油声阻抗与钢铁接近(约 $1.5 \times 10^6 \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),适合常规平滑

表面；甘油粘度高、附着力强，适配粗糙表面检测；专用耦合剂耐高低温性能优异，在-20℃至80℃环境下仍能保持稳定声能传输，适合复杂工况。

### 2.2 检测工艺参数确定技术

检测频率优化需结合锻件壁厚，厚壁锻件（壁厚 > 100mm）选用0.5-2MHz低频，低频声波穿透能力强，每传播1m衰减量仅2-3dB，可覆盖全壁厚；薄壁件（壁厚 < 50mm）选用5-10MHz高频，高频波分辨率高，能识别0.1mm级微小夹杂。探头移动速度控制通常  $\leq 100\text{mm/s}$ ，过快易导致探头与工件接触不充分，遗漏缺陷信号；过慢则会延长检测周期，降低效率<sup>[2]</sup>。聚焦深度调节需根据锻件厚度精准设定，频率与聚焦深度成反比，高频下需减小聚焦深度，且探头移动后需实时微调焦距避免图像模糊；对厚度均匀的锻件，将焦点落在壁厚1/2处；对变壁厚锻件，需分段调整聚焦深度，确保每个区域的焦点都落在关键检测位置，提升缺陷检出率。

### 2.3 缺陷信号处理与分析技术

信号降噪技术通过多种手段抑制杂波，滤波算法选用1-5MHz带通滤波器，滤除高频电磁干扰与低频机械噪声；平均化处理对连续采集的10-20组信号取平均值，平滑信号波动，使缺陷信号更突出。缺陷定量分析基于回波幅度与声程差，将检测到的缺陷回波幅度与标准试块（含已知尺寸缺陷）的回波幅度对比，结合声波传播时间计算的声程差，换算出缺陷当量尺寸，误差可控制在5%以内。缺陷定性识别依靠信号波形特征，裂纹信号多呈尖锐单峰，波峰陡峭且衰减快；夹杂信号幅值稳定，波形对称；疏松信号表现为连续小幅度波动，无明显尖锐波峰，通过这些特征可准确区分不同缺陷类型。

### 2.4 特殊结构检测适配技术

大型轴类、盘环类锻件作为常规结构，需针对性优化检测适配方案。轴类锻件采用端面直探头轴向扫查，从两端面沿轴线方向覆盖，外圆周向按15°至30°间隔布设扫查线，轴向移动步距不超过探头晶片尺寸二分之一，确保100%检测覆盖率。盘环类锻件实施多向检测，两个端面优先用直探头扫查，不方便翻面时采用单晶探头与双晶探头联合检测。双晶探头（近场盲区  $\leq 1\text{mm}$ ）聚焦近表面区域以减少盲区，单晶探头则补充扫查双晶探头无法覆盖的中深层区域，实现全深度范围检测。内径检测依尺寸适配：内径足够大时用直探头直接扫查；内径较小时，采用对应弧度探头或匹配带弧度楔块保障贴合度。外壁直接用直探头扫查，覆盖壁厚全范围。法兰、轮毂等异形锻件采用分区检测与数据拼接技术，拆解为规则区域独立检测，经坐标校准整合形成完整缺陷图

谱，确保无盲区，为缺陷评估提供精准支撑。

## 3 大型锻件超声无损检测的实施流程与质量控制

### 3.1 检测前期准备环节

探伤前需明确检测标准、验收等级及检测时机，为后续检测提供依据。锻件基础信息梳理需全面收集关键数据，材质成分决定超声波传播速度，合金钢与碳钢声速差异需提前明确；热处理状态影响锻件晶粒大小及超声衰减程度，晶粒粗大时需针对性调整检测参数；设计图纸中壁厚、孔径、曲面半径等关键尺寸为检测区域划分提供依据，重点关注应力集中区域尺寸细节。检测方案制定需细化内容，按锻件结构划分检测区域，明确检测优先级，核心受力部位优先检测；列出探头选型清单，匹配不同区域检测需求；制定工艺参数表，标注各参数取值范围与调整原则，预留微调空间适配现场。设备校准是保障精度的关键，用含已知缺陷的标准试块校准探伤仪灵敏度，确保验收等级要求的最小缺陷信号可检出；校准探头延迟时间减少声程计算误差，校准声速值匹配锻件实际尺寸避免定位偏差，校准后记录数据并存档。

### 3.2 现场检测实施环节

检测前需先进行声速校验，制作灵敏度曲线，完成后开展产品检测。锻件表面预处理需达检测要求，采用打磨、喷砂等方式去除氧化皮与油污，使表面粗糙度  $\leq \text{Ra}6.3\mu\text{m}$ ，粗糙度过高会增加耦合剂声能损耗，影响检测信号质量，预处理后需检查表面是否存在凹坑、划痕等损伤。耦合剂涂抹需均匀覆盖检测区域，控制耦合层厚度在0.1-0.3mm，过厚或过薄都会导致声能传输不稳定；探头贴合时需施加均匀压力，避免空气间隙进入耦合层，空气间隙会大幅反射超声波，导致检测信号中断，移动探头时需保持压力稳定。扫查操作需严格遵循预设路径，保持探头移动速度匀速稳定，避免速度波动导致信号采集不完整；连续检测4小时、换班或更换设备后，需重新校验灵敏度。若灵敏度出现偏差，此期间检测的产品需相应处理。同时记录检测数据与信号图谱，对异常信号位置做好标记，标注该位置的锻件坐标与检测时间，便于后续复核，记录需清晰可追溯。

### 3.3 数据处理与结果判定环节

检测数据整理需系统分类，将信号幅值、声程、缺陷位置等信息按检测区域录入数据库，建立数据与锻件结构的对应关系，便于快速查询与分析，数据录入后需进行逻辑校验以确保准确性。缺陷判定标准需明确等级划分，根据缺陷当量尺寸确定是否超出允许范围，结合缺陷分布密度判断对锻件性能的影响程度，如密集型

缺陷即使单个尺寸较小,也可能判定为不合格;对疑似缺陷需结合多组数据综合判断。检测报告编制需内容完整,详细列出检测参数包括频率、探头类型、耦合剂种类,缺陷图谱标注缺陷位置与信号特征,判定结果清晰明确,同时针对不合格锻件提出处理建议,如返修后复检或评估使用风险,报告需经审核人员签字确认。

#### 3.4 检测质量验证环节

复检机制需覆盖疑似缺陷区域,对初次检测的异常信号,用不同探头或调整频率复核,对比结果确认缺陷真实性,避免设备误差或操作不当误判,全程记录复检过程<sup>[1]</sup>。人员资质需符合GB/T9445或等同标准,签发报告者需持UT II级及以上资质,定期参加培训考核,保证证书有效且掌握最新技术,不合格者暂停工作。设备需至少每年经有资质第三方检定,部分单位每周用标准试块验证探伤仪灵敏度、动态范围等性能,不合格设备及时维修更换,校验记录妥善保存,为检测质量追溯提供完整依据。

### 4 大型锻超声无损检测技术的优化方向与发展趋势

#### 4.1 技术层面优化

高精度检测设备研发聚焦性能提升,多通道超声探伤仪可实现多组探头同步采集数据,大幅提升检测效率,适合大型锻件大面积扫查;相控阵探头阵列通过多阵元协同控制声束角度与聚焦深度,能灵活覆盖复杂检测区域,减少检测盲区,提升缺陷定位精度。智能化信号分析依托机器学习算法,通过海量缺陷信号数据训练构建自动识别模型,可快速区分缺陷信号与杂波,实现裂纹、夹杂、疏松等缺陷自动分类,降低对人工经验依赖,提升判定一致性。数字化检测系统构建全流程数据管理体系,检测数据通过无线传输实时上传云端平台,实现数据集中存储与备份,支持远程专家调用数据会诊,及时解决现场检测难题,打破空间限制。

#### 4.2 工艺层面改进

粗晶锻件检测工艺针对晶界散射问题优化,采用低频率探头减少晶界反射干扰,搭配大直径探头增强声束能量,提升声波穿透能力,使深层缺陷信号更清晰;调整检测灵敏度与滤波参数,进一步抑制杂波,改善检测信噪比。复杂结构适配工艺注重检测灵活性,柔性探

头可贴合不规则曲面,适应法兰、轮毂等异形锻件表面形态,确保耦合效果;水浸检测技术利用水作为耦合介质,避免探头与工件直接接触,适合表面粗糙或结构复杂锻件,实现均匀声能传输。快速检测工艺通过优化扫查方案提升效率,采用宽幅探头增大单次扫查覆盖宽度,结合自动化扫查装置控制移动速度与路径,减少人工操作耗时,缩短单件锻件检测时长,满足批量生产检测需求。

#### 4.3 应用拓展方向

高温状态下的在役检测突破环境限制,研发耐高温探头可承受300℃以上高温,搭配高温耦合剂在高温环境下保持稳定耦合性能,实现锻件在服役高温工况下的实时检测,避免停机降温导致的生产损失。全生命周期检测构建完整数据链条,从锻造成型阶段的初始检测,到服役期间的定期检测,将各阶段数据关联整合,形成锻件健康状态变化曲线,为预测设备剩余寿命提供数据支撑。多技术融合检测实现缺陷全面识别,以超声检测排查内部缺陷,搭配涡流、漏磁、磁粉检测识别表面及近表面缺陷,或结合渗透检测针对表面开口缺陷检测,形成“内部+表面及近表面”全方位检测体系,提升缺陷检出率与准确性。

#### 结束语

大型锻件超声无损检测技术需以基础原理为支撑,聚焦核心环节优化,破解现存技术难题。设备升级、算法改进与工艺创新为技术发展提供有效路径,应用保障措施则确保技术落地效果。未来随着新型技术与数字化趋势融合,该技术将更精准适配大型锻件检测需求,为关键领域装备安全提供更坚实的质量保障。

#### 参考文献

- [1]汪树民,石文泽,卢超,等.脉冲压缩技术的高温锻件电磁超声检测中的应用[J].压力容器,2023,40(8):28-36.
- [2]张文杰.超声波检测技术在铸件检测中的研究应用[J].铸造设备与工艺,2024(1):33-36.
- [3]陈国清,吕小峰,马振,等.超声无损检测技术在发动机铸件壁厚检测中的应用探索[J].中国铸造装备与技术,2024,59(4):130-133.