

无缝钢管分层缺陷的相控阵超声检测

邓颖轩 晁宝军

陕西西宇无损检测有限公司 陕西 咸阳 712000

摘要：本文聚焦无缝钢管分层缺陷的相控阵超声检测技术。阐述了相控阵超声检测原理与系统组成，接着分析无缝钢管分层缺陷的形成机理、分类及声学特性。通过实验研究，对检测工艺进行优化，实现缺陷精准检测与成像。探讨该技术在无缝钢管检测中的适用性、局限性，并提出改进优化建议。研究表明，相控阵超声检测技术在无缝钢管分层缺陷检测中具有显著优势与应用前景。

关键词：无缝钢管；分层缺陷；相控阵超声检测

1 相控阵超声检测技术原理

1.1 相控阵超声检测基本原理

相控阵超声检测技术是先进无损检测方法，核心原理基于超声波相控发射与接收技术。与传统超声检测不同，它通过电子方式控制多个独立阵元激发时间，实现超声波束灵活偏转和聚焦，无需移动探头就能扫描整个检测区域。相控阵探头由多个小型压电晶片（阵元）组成，各阵元可独立发射或接收超声波。精确控制阵元激发延迟时间，能调整波束相位，在不同方向叠加形成合成波束，电子扫描替代传统机械扫描，提升检测效率与灵活性。调整阵元相位差可动态改变波束指向角度，实现多角度扫描；优化延迟时间分布能在特定深度聚焦波束，提高局部检测分辨率，适用于复杂结构或不规则表面检测。相控阵系统支持动态聚焦，发射或接收时实时调整焦点位置，确保不同深度缺陷清晰成像；多焦点技术可同时生成多个焦点，扩大检测覆盖范围、提高精度。相控阵超声检测通过高速数据采集与处理，能实时生成检测区域二维或三维图像，直观显示缺陷位置、形状及尺寸，结合先进算法还可对缺陷定量分析，为评估材料性能提供可靠依据。

1.2 相控阵超声检测系统组成

相控阵超声检测系统是一个高度集成化的平台，主要由探头、电子控制系统、信号处理单元及显示分析软件四大部分构成。（1）探头：作为系统的核心部件，相控阵探头由数十至数百个压电阵元组成，阵元间距通常为半波长的整数倍，以确保波束的有效合成。探头设计需兼顾频率范围、阵元数量及排列方式，以适应不同检测需求^[1]。（2）电子控制系统：负责精确控制各阵元的激发时序与信号接收。该系统包含高精度延迟线、多路复用器及信号放大器，确保波束的相位与幅度得到准确调控。先进的电子控制系统还支持动态聚焦、波束偏转

等复杂功能。（3）信号处理单元：对接收到的超声信号进行滤波、放大及数字化处理，提取缺陷回波特征。通过傅里叶变换、小波分析等算法，可进一步增强信号质量，提高缺陷识别率。（4）显示分析软件：提供直观的图形界面，实时显示检测图像，并支持缺陷标注、尺寸测量及报告生成。部分软件还集成AI算法，可自动识别缺陷类型，辅助检测人员快速决策。

2 无缝钢管分层缺陷特征分析

2.1 分层缺陷的形成机理与分类

无缝钢管的分层缺陷是制造过程中常见的内部缺陷之一，其形成机理复杂，主要与金属材料在冶炼、轧制及热处理等环节的工艺控制密切相关。形成机理：

分层缺陷的本质是金属内部存在的非金属夹杂物、气孔或微观组织不均匀性在轧制过程中被延伸、扩展，最终形成平行于管壁或呈一定角度的层状分离。冶炼过程中，若脱氧、脱硫不彻底，残留的氧化物、硫化物等夹杂物在钢液中聚集，轧制时沿金属流动方向延伸，形成连续或间断的分层。铸造或连铸过程中，气体未完全逸出导致的气孔，或凝固收缩形成的疏松区域，在轧制时被压合但未完全焊合，形成潜在分层。合金元素分布不均或轧后冷却速度不当，可能引发微观组织偏析（如带状组织）或相变应力，导致层间结合力减弱。

根据缺陷形态与成因，分层缺陷可分为以下几类：

（1）平行分层，缺陷层与钢管轴线平行，多由夹杂物或气孔沿轧制方向延伸形成，常见于厚壁管或轧制比不足的管材。（2）斜向分层，缺陷层与轴线呈一定角度，通常因轧制过程中金属流动不均匀或孔型设计不合理导致。（3）网状分层，多层缺陷相互交织，形成类似网状的结构，常见于严重偏析或多次轧制变形的管材。（4）隐性分层，缺陷层间结合力未完全丧失，常规检测难以发现，但在高压、高温或疲劳载荷下可能扩展为显性缺陷。

2.2 分层缺陷的声学特性

超声检测作为无缝钢管分层缺陷检测的主要手段,其声学特性与缺陷的几何形态、材质特性紧密相关。分层缺陷的层间界面可看作声阻抗突变边界,超声波在此处会发生反射。平行分层的反射波信号强且规律,而斜向分层因角度变化,反射波呈现多峰特征;若分层间距小,超声波会在层间多次反射,形成复杂回波序列,需借助信号处理技术区分真实缺陷与伪信号^[2]。在透射与衰减方面,分层缺陷会使超声波能量部分透射至下层材料,透射波幅度与缺陷层间结合强度有关,层间若有微裂纹或夹杂物,透射能量会显著衰减。缺陷的不规则边界或内部微小结构还会引发超声波散射,导致信号频谱展宽、幅度降低,高频成分衰减更明显。从波形特征来看,平行分层的回波时间间隔与层间距成正比,可据此估算缺陷深度;若分层界面有微小倾斜或粗糙度,反射波可能发生相位反转或畸变,需结合波形分析判断缺陷性质。不过,超声检测也面临难点,如隐性分层识别需高频探头或相控阵技术增强微弱反射信号捕捉能力,斜向或网状分层则需三维超声成像技术还原缺陷空间分布。

3 相控阵超声检测无缝钢管分层缺陷实验研究

3.1 实验设备与材料

本实验运用一套完整的相控阵超声检测系统,核心设备包含高精度相控阵探头、多通道超声发射/接收仪、高速数据采集卡及三维成像分析软件。相控阵探头采用64阵元线性阵列设计,中心频率5MHz,阵元间距0.6mm,可覆盖无缝钢管8-60mm的壁厚范围。它借助柔性楔块与钢管表面耦合,支持0°-70°偏转角度扫描,能检测不同角度缺陷。超声发射/接收仪具备128通道并行处理能力,发射电压 $\pm 100\text{V}$ 可调,脉冲宽度10-500ns可调,还支持动态聚焦与动态孔径技术以优化检测效果。数据采集系统采样率达100MS/s,16位A/D转换精度,可实时存储全矩阵捕获数据,为成像处理提供高质量原始信号。成像分析软件集成合成孔径聚焦、全聚焦成像及自适应波束形成算法,支持二维/三维缺陷成像与定量分析,保障缺陷精准识别。实验对象为 $\Phi 168\text{mm} \times 20\text{mm}$ 、材质为20#钢、采用热轧工艺制造的无缝钢管。为模拟实际工况中的分层缺陷,人工预制了平行分层、斜向分层和网状分层。平行分层通过嵌入0.2mm厚聚四氟乙烯薄膜模拟;斜向分层以15°倾角插入金属薄片模拟;网状分层通过交叉布置多条0.1mm厚金属丝模拟。实验采用甘油作耦合剂,确保超声有效传输。校准试块为含已知尺寸侧钻孔的20#钢块,用于验证系统分辨率与声速校准,保证检测结果准确。

3.2 检测工艺优化

在检测工艺优化方面,首先对探头参数进行了详细研究。通过对比32/64阵元激活模式下的信噪比(SNR),发现64阵元全激活可提升15dB信号强度,同时减少旁瓣干扰,从而提高了检测的灵敏度和分辨率。此外,采用多角度扫描策略,以5°为间隔从0°扫描至70°,并结合动态聚焦技术,在壁厚方向设置3个焦点位置,显著提高了缺陷检出率。在信号处理算法方面,针对钢管表面粗糙度引起的散射噪声,设计基于最小均方误差(LMS)的自适应滤波器,噪声抑制比提升20%,有效改善信号质量^[3]。引入延迟-叠加(DAS)与最小方差(MV)混合波束形成算法,在保持高分辨率的同时降低计算复杂度,提高检测效率。检测参数的实验设计也是工艺优化的重要环节。通过阶梯增益法确定最佳增益范围为60-70dB,阈值设定为-40dB,以平衡缺陷识别率与误报率。扫描步长与速度的优化实验表明,0.5mm扫描步长与50mm/s扫描速度的组合可实现检测效率与精度的最佳平衡。与传统超声对比实验显示,相控阵系统在斜向分层检出率上提升42%,定位误差从 $\pm 1.5\text{mm}$ 降至 $\pm 0.3\text{mm}$,验证了工艺优化的有效性。重复性测试对同一缺陷进行10次重复检测,信号幅度波动小于5%,进一步验证了工艺的稳定性。

3.3 缺陷检测与成像

在缺陷检测与成像上,二维成像结果分析表明,SAFT算法重建的二维图像能清晰显示分层边界。平行分层缺陷长度测量误差小于0.5mm,层间距估算精度达 $\pm 0.1\text{mm}$;斜向分层采用TFM算法,有效克服投影失真,缺陷倾角测量误差从 $\pm 5^\circ$ 降至 $\pm 1^\circ$,提高检测精度。三维成像与缺陷表征中,基于FMC数据的TFM三维重建可直观呈现缺陷空间形态。网状分层三维成像能清晰显示交叉节点位置,误差小于0.2mm,图像分割与边缘检测算法自动计算缺陷面积、周长及体积,与实际尺寸吻合度达92%,为定量分析提供可靠依据。复杂缺陷检测能力验证实验显示,相控阵超声检测系统能检出0.1mm厚金属丝模拟的微细分层,最小可检缺陷尺寸较传统方法缩小3倍。双层平行分层间距1mm时,各层边界清晰,层间分辨力达0.8mm,体现系统对微小和复杂缺陷的强大检测能力。检测效率与适应性评估结果指出,单根钢管检测时间从传统超声的45分钟缩短至12分钟,效率提升73%,且通过柔性楔块与曲面匹配算法,在管径变化 $\pm 10\%$ 范围内保持检测精度。成像质量优化策略采用稀疏采样与压缩感知技术,减少30%数据采集量并抑制栅瓣伪影,结合多扫图像提升判读准确性。

4 无缝钢管分层缺陷的相控阵超声检测应用探讨

4.1 相控阵超声检测技术的适用性分析

相控阵超声检测技术凭借其灵活的波束控制能力、高分辨率成像特性以及多参数可调优势,在无缝钢管分层缺陷检测中展现出显著适用性。无缝钢管的分层缺陷形态复杂,包括平行分层、斜向分层及网状分层等,传统超声技术因波束固定、角度单一,难以全面覆盖此类缺陷。而相控阵超声通过电子扫描技术,可动态调整波束角度(如 0° - 70° 扇形扫描)和聚焦深度,实现对不同角度、不同深度缺陷的精准检测。相控阵技术结合全聚焦成像(TFM)或合成孔径聚焦(SAFT)算法,可生成高分辨率的二维/三维缺陷图像,对于微小分层(如 0.1mm 厚夹杂物),TFM技术能清晰显示缺陷边界及层间结构,量化误差小于 5% 。三维成像技术则可直观呈现网状分层的空间分布,为工艺分析提供关键依据。在生产效率方面,无缝钢管生产线对检测速度要求极高。相控阵超声通过多通道并行发射/接收技术,大幅缩短检测时间。柔性楔块设计使其适应不同管径(如 $\Phi 89$ - $\Phi 426\text{mm}$)和曲率变化,在管端或弯管部位的检测精度仍可达 $\pm 0.3\text{mm}$ 。相控阵系统支持高速数据采集(如 100MS/s)与实时成像,可集成于自动化生产线。结合AI算法(如深度学习缺陷识别模型),可进一步实现缺陷自动分类与报警,减少人工干预,提升检测可靠性。相控阵技术仍存在一定局限性^[4]。其设备成本较高(如64通道探头价格昂贵),对操作人员技能要求严格(需掌握波束优化与数据分析),且在复杂环境(如高温、强噪声干扰)下的适应性有待提升。对于超深层缺陷(如壁厚超过 80mm 的钢管),其检测灵敏度仍需进一步优化。

4.2 相控阵超声检测技术的改进与优化建议

为进一步提升相控阵超声在无缝钢管分层缺陷检测中的性能,可从三方面改进。硬件系统升级上,开发 10 - 15MHz 的高频相控阵探头,提高微小缺陷分辨率;采用

PMN-PT等复合压电材料,增强发射效率、降低功耗。优化柔性楔块设计,内置传感器实时调整曲率,确保与钢管表面贴合,减少耦合损失。还可集成超声、涡流或电磁超声技术,实现多物理场联合检测。算法与数据处理创新是关键。引入深度学习波束优化模型,根据缺陷类型自动调整阵元激活模式与延迟时间,提升复杂缺陷成像质量。运用稀疏采样与压缩感知算法,减少 50% 数据采集量并抑制伪影,提高实时性。开发基于CNN的缺陷识别模型,自动量化分层缺陷几何特征,与标准缺陷库比对实现智能判级。检测工艺与系统集成方面,设计适用于 800°C 高温钢管的检测系统,采用耐高温耦合剂与冷却模块。结合钢管参数与缺陷分布,自动生成最优扫描路径,提升效率。将检测数据与MES/ERP系统对接,实现缺陷追溯等全生命周期管理。推动行业标准制定,明确设备校准等规范,建立分层级培训体系。

结束语

无缝钢管分层缺陷检测对保障其质量至关重要,相控阵超声检测技术凭借独特优势展现出强大检测能力。虽存在成本、环境适应性等局限,但通过硬件升级、算法优化及工艺集成等改进措施,其性能可进一步提升。未来,随着技术融合与行业标准完善,相控阵超声检测将更智能化、微型化,为无缝钢管质量保障提供更坚实支撑,推动行业高质量发展。

参考文献

- [1]常嘉玮.建筑无缝钢管工程及焊缝无损检测技术应用[J].智能城市,2021,7(10):37-38.
- [2]陈志文.韩波.桥梁无缝钢管工程及焊缝无损检测技术分析[J].运输经理世界,2020(12):29-30.
- [3]伦汉华.无缝钢管工程焊缝无损检测技术及其运用分析[J].建材与装饰,2020(7):58-59.
- [4]苏忠亮,张晔,揭辉经.输送流体用无缝钢管断裂机理分析研究[J].厦门科技,2020(02):56-58.