

相控阵超声 (PA) 与数字射线成像 (DR) 在 P91 厚壁蒸汽管道中的应用对比研究

张蒙 陈刚 刘豪

江西心连心化学工业有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21206

[摘要] 本文以某工程 98 蒸汽主管道为研究对象, 基于 NB/T 47013.15-2021 和 NB/T 47013.11-2023 标准, 通过现场对比试验, 系统分析了相控阵超声 (PAUT) 与数字射线成像 (DR) 两种无损检测技术在 P91 马氏体耐热钢厚壁管道焊缝检测中的适用性、缺陷检出能力、检测效率及经济性。试验管道规格为 $610 \times 38.89\text{mm}$ 与 $508 \times 32.54\text{mm}$, 共完成 51 道焊口的对比检测。结果表明, 在壁厚超过 30mm 的厚壁工况下, PAUT 对裂纹、未熔合等危害性缺陷的检出率显著高于 DR, 且能精准定量缺陷的深度、高度与长度; DR 在透照厚度 $\leq 50\text{mm}$ 时检测效率高、缺陷定性直观, 但在壁厚 $> 60\text{mm}$ 的工况下对微裂纹、层间未熔合等缺陷的检出灵敏度不足。研究结论可为 P91 厚壁管道无损检测工艺的优化选择提供工程依据。

[关键词] 相控阵超声 (PAUT); 数字射线成像 (DR); P91 钢; 厚壁管道; 无损检测; 对比试验

1 引言

P91 钢作为一种马氏体耐热钢, 具有优异的高温强度、抗氧化性和抗蠕变性能, 广泛应用于电站高温高压蒸汽管道。然而, 其焊接及热处理工艺复杂, 冷裂纹、热裂纹、再热裂纹、未熔合等缺陷的产生风险较高, 直接影响管道的安全稳定运行。

相控阵超声 (PAUT) 和数字射线成像 (DR) 作为两种先进的无损检测技术, 近年来在承压设备检测中得到了广泛应用。PAUT 基于相控阵声场控制技术, 可实现声束的电子偏转、动态聚焦与多角度扫查, 具有缺陷检出率高、可定量缺陷尺寸、无辐射等优势; DR 则采用 X 射线平板探测器直接成像, 具有成像速度快、缺陷定性直观、动态范围广等特点。目前, 针对 P91 厚壁管道, 两种技术的适用性对比研究仍缺乏充分的工程实践数据支撑。

2 PAUT与DR检测技术简介

2.1 相控阵超声检测 (PAUT)

相控阵超声检测执行标准为 NB/T 47013.15-2021《承压设备无损检测 第15部分: 相控阵超声检测》。该检测技术运行原理为依托电子延时调控多晶片组合探头, 依靠电路时序调控完成超声波束的角度偏转、深度动态汇聚以及电子化自动扫查, 以此完成工件内部缺陷可视化成像与定量判别。该检测技术核心技术特征如下:

1 声束调控技术

电子角度偏转 (扇形扫查): 对探头内部各个晶片设置差异化脉冲发射时序, 让各晶片产生的子声波在预设折射角度实现相位叠加, 最终形成方向性主超声束。声束偏转区间能

够覆盖 $-70^\circ \sim +70^\circ$, 仅依靠电路调控即可完成大角度范围探测, 无需挪动检测探头。

动态声束聚焦: 遵循双曲线、抛物线两类延时时序控制晶片脉冲发射时间, 确保所有子声波同步抵达工件内部指定探测深度, 实现声波能量集中汇聚, 保障工件全厚度范围内缺陷成像清晰度。

扇形扫查: 持续动态调整超声束入射角度, 一次性覆盖焊缝全部横截面, 从多个观测角度完成缺陷形态成像记录。

线性扫查: 固定超声束入射角度不变, 通过后台参数切换焦点位置完成线性探测, 全过程无需探头机械位移, 具备检测速率快、探测覆盖面大的优势。

2 技术应用优势

相较于常规单探头超声波检测 (UT), 相控阵超声检测检测分辨力与作业效率更优异。依托灵活的声束调控能力, 可精准对准焊缝坡口、焊缝中轴线位置, 对于裂纹、层间未熔合、根部未焊透等具备延伸方向性的缺陷识别灵敏度极高, 能够检出常规超声极易漏检的细微缺陷。单次扇形扫查即可覆盖焊缝整体截面, 省去常规检测频繁更换探头、反复调校声束角度的步骤, 大幅缩减检测工时。同时该技术能够精准测算缺陷埋藏深度、自身高度与延伸长度, 为焊缝缺陷返修方案制定、焊接质量等级评定提供精准量化数据。除此之外, 相控阵超声检测不存在电离辐射危害, 现场作业安全性与环保性达标, 可适配碳钢、奥氏体不锈钢、合金结构钢、镍基耐蚀合金等常用承压设备用材。

2.2 数字射线成像检测 (DR)

数字射线成像检测遵循 NB/T 47013.11-2023《承压设备

无损检测 第 11 部分：射线数字成像检测》标准。其底层检测机理和传统胶片射线检测（RT）基本一致，均以 X 射线发生器作为射线发射源，依靠工件母材与内部缺陷对 X 射线吸收衰减系数的差异性，完成内部缺陷成像辨识。

1. 技术优势

现场作业便捷：DR 在施工现场一般不需要对焊口进行特殊处理，检测时成像速度极快，可实现动态观察，适合现场快速检测。

图像质量高：图像清晰度高，缺陷识别更容易。数字图像可放大、调节对比度、增强边缘分辨率，对细小气孔、夹渣、疏松等缺陷的检出能力强。

辐射剂量低：探测器灵敏度远高于胶片，在同等成像质量下，X 射线剂量比传统 RT 胶片低很多，作业更安全。

2. 技术局限性

壁厚适应性差：在单壁单影、不能中心透照的工况下，当壁厚超过 30mm 时，即使使用高频机，DR 作业时间也会显著延长，辐射危害增大，成像效果仅能勉强满足规范最低要求。以本次试验的双壁透照为例，透照厚度超过 70mm 时，成像清晰度偏低，灰雾度过大，影响缺陷判定，尤其是微裂纹、层间未熔合等面状缺陷难以识别。

对方向性缺陷不敏感：DR 对裂纹、未熔合等面状缺陷的检出能力受缺陷与射线束的夹角影响较大，当缺陷方向与射线束平行时，影像对比度低，极易漏检。

3 PAUT与DR检测优劣对比分析

3.1 焊接产生缺陷检测能力对照

不同无损检测方法对各类焊接缺陷的检出能力存在显著差异，具体对照情况见表 1。

方法	烧穿	裂纹	夹渣	未熔合	未焊透	焊瘤	气孔	咬边
RT	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☒
DR	☒	☐	☒	☐	☒	☒	☒	☒
UTA	☐	☒	☐	☒	☒	☐	☐	☐
TOFD	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☒	☒
PAUT	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
符号含义： ☒ 在通常情况下适用 ☐ 在特殊条件下适用 ☒ 不适用								

从表 1 可以看出，PAUT 对裂纹、未熔合、未焊透、气孔、夹渣等所有类型缺陷均具有良好的检出能力，是本次对比试验中检出能力最全面的方法。DR 对气孔、夹渣、烧穿、焊瘤、咬边等体积型和表面缺陷检出效果好，但对裂纹、未熔合等面状缺陷检出能力不足。

结合现场复杂的检查要求，PAUT 在厚壁管道检测上具有更高的灵敏度，尤其对危害性极大的裂纹、未熔合缺陷检出能力远优于 DR。

3.2 管道工件检测能力对照

对比项	DR	PAUT
进度	只能夜间作业 透照厚度 50mm 以下时每天可完成 10-15 道口， 折算约 150-300（直径越大作业量越多）	作业时间不限 碳钢同等作业量比 DR 多 50% 不锈钢同等条件作业量与 DR 相当
费用	约为 RT 费用的 2-3 倍	碳钢不考虑打磨焊口费用略低于 DR，考虑打磨费用持平 不锈钢不考虑打磨焊口费用与 DR 持平，考虑打磨费用略高

注：PAUT 为了保证检测质量，需要将焊缝两侧打磨光滑，管件与直管段连接焊缝需打磨至管道外壁齐平，会产生额外的打磨工时与成本。

4 P91厚壁管道对比试验

4.1 试验概况

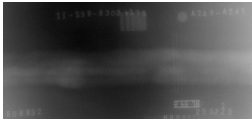
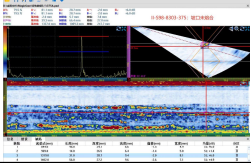
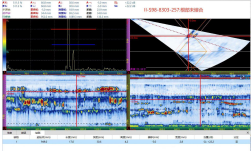
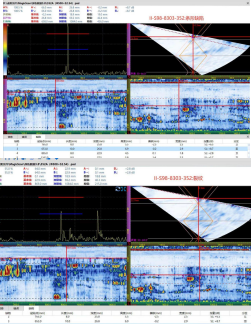
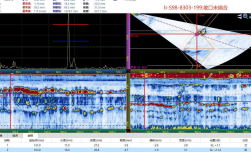
本次对比试验的对象为某工程 98 蒸汽主管道，管道材质为 P91 马氏体耐热钢，规格为 610×38.89mm 和 508×32.54mm。共完成 51 道焊口的对比试验，其中 PAUT 检测不合

格焊口 10 道，DR 检测不合格焊口 5 道。试验结果表明，在厚壁管道检测中，PAUT 的缺陷检出率更高，尤其对裂纹、未熔合等危害性缺陷的检出能力显著优于 DR。

4.2 典型缺陷对比分析

试验中发现的 10 道不合格焊口的对比情况见表 4。

序号	不合格焊口编码	DR 检测	PA 检测	情况说明
----	---------	-------	-------	------

序号	不合格焊口编码	DR 检测	PA 检测	情况说明
1	II-S98-8303-375			DR 未检出 PA 检测条形缺陷，根部咬边长度 400mm
2	II-S98-8303-257			DR 未检出 PA 检测圆缺 剖开后气孔直径 3 mm
3	II-S98-8303-352			DR 未检出 PA 检测裂纹、圆形缺陷、条形缺陷 剖开后裂纹、未熔合、缩孔
4	II-S98-8303-199	合格		PA 检测坡口未熔合

对试验结果的分析如下：

DR 漏检的危害性缺陷：表中序号 1-5 为 DR 未检出但 PAUT 检出的焊口。这些缺陷的性质和尺寸与表 1 一致，尤其是 2 处裂纹，DR 均未检出。裂纹是 P91 钢焊接和热处理过程中极易产生的缺陷，且对管道后续安全运行有较大风险，DR 的漏检可能给设备安全运行留下重大隐患。

5 结论

通过对 P91 厚壁蒸汽管道焊缝的 PAUT 与 DR 对比试验，可得出以下结论：

1 缺陷识别性能：针对裂纹、焊缝未熔合、根部未焊透等高危面型焊接缺陷，PAUT 的识别精准度远优于 DR 技术。当工件壁厚超过 30mm 时，DR 设备对细微裂纹、层间未熔合等隐蔽缺陷的识别灵敏度大幅下降，极易出现缺陷漏检问题，存在设备运行安全隐患。

2 壁厚适配范围：DR 检测工艺更适用于透照厚度不超过 50mm 的薄壁、中薄壁压力管道构件；针对壁厚大于 60mm 的大厚度管道工件，PAUT 检测技术优势突出，可在工件整体厚度区间内完成高清成像，精准捕捉各类内部缺陷。

3 作业效率与经济成本：受射线穿透极限及辐射安全管控规范制约，DR 检测仅可在夜间开展施工作业，厚壁工件检

测的作业效率偏低；而 PAUT 检测不受作业时段限制，在碳钢管道检测作业中，施工效率较 DR 提升 50%左右。

综合以上对比分析可知，在 P91 材质厚壁蒸汽管道的无损检测工作中，PAUT 技术在缺陷检出精度、厚壁工况适配性、缺陷数据量化分析等多个维度均具备明显技术优势，能够有效把控厚壁管道焊接施工质量，为设备长期稳定、安全运行提供可靠技术保障，是该类工况下更优质的无损检测方案。

[参考文献]

[1]NB/T 47013.1-2015，承压设备无损检测 第 1 部分：通用要求[S].

[2]NB/T 47013.11-2023，承压设备无损检测 第 11 部分：射线数字成像检测[S].

[3]NB/T 47013.15-2021，承压设备无损检测 第 15 部分：相控阵超声检测[S].

[4]王景人，支泽林，靳超. 小径管焊缝 X 射线数字成像检测与相控阵成像检测技术对比[J]. 无损检测，2018，40(4)：27-31.

[5]牟彦春，朱晓智，金南辉. 超声相控阵检测技术在电站锅炉厚壁管道检测中的应用[J]. 无损检测，2014，36(9)：5-8.