

# Ultrasonic Inspection Process Study for CPR1000 Main Pipeline Welds

Fan Gao<sup>1</sup> Haibo Zeng<sup>2</sup> Hui Liu<sup>2</sup> Shoubin Li<sup>3</sup>

1. China Nuclear Power Operations Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518124, China

2. CGN Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215026, China

3. Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518124, China

## Abstract

Taking the main pipeline weld of China's improved three-loop pressurized water reactor (CPR1000) unit as the inspection object, this study investigates the beam and energy distribution in coarse-grained materials through acoustic field simulation. A self-designed and fabricated test block for main pipeline welds was used to analyze and optimize the ultrasonic probe incidence angle, focal law design, frequency bandwidth selection, focusing method, and depth settings. The results demonstrate that low-frequency phased array ultrasonic testing (LF-PAUT) with a large-aperture dual-crystal longitudinal wave array probe can detect non-volumetric defects with a height of 8 mm at the weld root. This research provides guidance for the broader application and further optimization of ultrasonic testing for cast austenitic stainless steel (CASS) main pipeline welds.

## Keywords

Main pipeline weld; Ultrasonic testing; Coarse-grained material; Low-frequency phased array ultrasonic testing (LF-PAUT); Defect

# CPR1000 机组主管道焊缝超声检测工艺研究

高帆<sup>1</sup> 曾海波<sup>2</sup> 刘晖<sup>2</sup> 李守彬<sup>3</sup>

1. 中广核核电运营有限公司, 中国·广东 深圳 518124

2. 中广核检测技术有限公司, 中国·江苏 苏州 215026

3. 大亚湾核电运营管理有限责任公司, 中国·广东 深圳 518124

## 摘要

以中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) 机组主管道焊缝为检测对象, 通过粗晶材料中的声场仿真观察声束和能量分布, 利用自行设计加工的主管道焊缝试块开展超声探头入射角度、法则设计、频带宽度选择、聚焦方式、深度选择和优化的分析研究。结果表明, 使用大孔径双晶纵波面阵探头低频相控阵超声检测 (LF-PAUT) 可发现焊缝根部高度 8 mm 的非体积型缺陷。本研究对铸造奥氏体不锈钢 (CASS) 主管道焊缝超声检测的推广应用和进一步优化具有指导意义。

## 关键词

主管道焊缝; 超声检测; 粗晶; 低频相控阵超声检测技术 (LF-PAUT); 缺陷

## 1 引言

主冷却剂管道 (简称主管道) 作为压水堆核电站一回路承压边界的重要设备之一, 其结构完整性对核电站安全运行至关重要。20 世纪 80 年代初以来, 国外相关科研机构开展了铸造奥氏体不锈钢 (CASS) 检测的相关研究, 本文旨在优化和开展中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) 机组一回路 CASS 主管道焊缝的在役检查工作, 在保证机组安全稳定运行的前提下, 缩短大修工期、减少现场操作和降低集体剂量水平。

CASS 材料具有晶粒粗大和各向异性的特点, 对声束传

播有显著影响, 存在较高且不均匀的衰减效果。国内二代改进型压水堆 (M310) 机组主管道基本都采用 CASS, 尤其是在相应主管道焊缝中由于粗大柱状晶的存在, 其内部组织的各向异性更严重, 对超声波具有强烈的衰减作用。

对 CASS 主管道焊缝实施超声检测的主要难点在于, 主管道材料作为高衰减性粗大柱状晶材料, 对超声波声场的扭转、扩散和衰减等产生较大影响, 甚至在同一铸件的不同部分, 因材料特性所导致的影响结果也可能存在显著差异。基于材料特性和运行工况, 国外研究者在失效分析中主要关注周向裂纹缺陷, 超声检测工艺研究也侧重于超声声束垂直于焊缝的方案。考虑到粗晶材料对超声声束的影响, 研究者认为对裂纹类缺陷 (包括形状接近的切槽人工反射体) 的超声信号响应进行研究, 对于该类无损检测可靠性具有较高的相关性<sup>[1]</sup>。

【作者简介】高帆 (1994—), 男, 中国山东泰安人, 工程师, 从事无损检测研究。

相控阵超声检测技术 (PAUT) 的优势在于能实现近实时的多种传播角度和波束聚焦, 在声束覆盖和指向性方面具有显著优势<sup>[2]</sup>。近年来, 采用大孔径双晶纵波面阵探头低频相控阵超声检测技术 (LF-PAUT) 对 CASS 展现出良好的缺陷检测能力, 这也是本文的研究方向。

## 2 超声检测技术方案

近 40 年来, 西太平洋国家实验室 (PNNL) 开展的长期研究, 主要目标是评估通用和先进无损检测方法在压水堆核电厂部件检测中的有效性和可靠性。其中, 粗晶材料焊缝和母材的体积检验是一个具体的研究领域。研究表明, 常规超声检测技术在对 CASS 管道焊缝进行检测时, 未能提供足够可靠的检测结果和尺寸性能。尽管超声检测技术在深度方向的检验范围及在役环境的适用性等方面具有明显优势, 但针对粗晶材料开发超声检测工艺仍面临巨大挑战, 这对在役检查承包商及相关研究机构而言尤为重要<sup>[3]</sup>。

在 CASS 的超声声场中, 材料微观组织对超声波声束偏转、衰减和扩散有明显影响, 同时随检测范围内材料壁厚的增大、声束能量的减弱, 缺陷信号与信噪比也随之受到影响。超声波声束在粗晶 CASS 材料中的频率越高, 声束的偏转和衰减越明显<sup>[4]</sup>。基于对检测对象材质的分析, 选取 LF-PAUT 进行仿真试验, 通过对其在 CASS 粗晶材料中的声场进行仿真, 可观察声束和能量的分布, 这将有助于后续试验中选择合适的探头参数。

通过相控阵探头阵列设计的仿真对比, LF-PAUT 对危害性较大的缺陷探测和定量具有更好的效果, 本试验选用频率为 0.5~1.0 MHz 的低频大孔径探头 (85 mm×92 mm, 主轴 10 晶片间距 6 mm、次轴 5 晶片间距 7 mm)。

### 2.1 试验测试

基于相控阵工艺参数分析, 围绕 CASS 主管道焊缝试块 (7 个人工缺陷布置见图 1, 参数见表 1) 进行测试, 超声检测按轴向和周向检测 2 种方式从主管道的外表面进行。扫查试块焊缝中心线位置加工的不同尺寸的内、外表面开口切槽, 由自动管道扫查机械搭载相控阵探头进行探测, 由编码器记录超声信号。

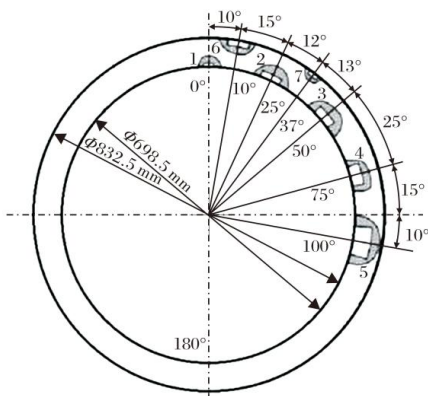


图 1 人工缺陷布置示意图

表 1 CASS 主管道焊缝试块缺陷参数与位置

缺陷编号	角度 / (°)	方向	深度位置	长度 /mm	高度 /mm	壁厚占比 /%
1	0	周向	内表面	25	8	11.6
2	25	周向	内表面	50	14	20.3
3	50	周向	内表面	50	20	29.0
4	75	周向	内表面	50	27	39.1
5	100	周向	内表面	50	42	60.9
6	10	周向	外表面	50	14	20.3
7	37	周向	外表面	25	8	11.6

测试试验使用的是某核电厂 CASS 主管道材料余料依据现场焊接工艺制备的主管道模拟体试块, 母材和焊缝材质与该电厂设备一致。

### 2.2 试验结果

基于 LF-PAUT 试验探头扇扫设置角度范围内缺陷声束反射响应最好的角度声束检验数据, 扫查方法如下:

(1) 双晶纵波聚焦探头 LF-SAFT 的扫查: 使用直径为 2 mm 的长横孔 (CASS 材质) 标定基准灵敏度, 与离心铸造试块有材质差别; 37° 探头扫查离心铸造试块, 其中 27 mm 高度切槽信号幅值最高, 其根部信号幅值为距离 - 波幅曲线 (DAC) -15.5 dB; 使用 41° 探头扫查, 20 mm 高切槽的幅值最高, 其根部信号的幅值为 DAC-15.3 dB。

(2) 相控阵探头 LF-PAUT 扫查: 使用直径为 2 mm 的长横孔 (CASS 试块) 标定基准灵敏度, 对 CASS 主管道试块上 5 个不同尺寸的电火花加工 (EDM) 切槽缺陷进行自动化相控阵栅格扫查, 所有缺陷均能检出, 缺陷的最大幅值 DAC-12.6 dB。

扫查 CASS 主管道焊缝试块中心线位置不同尺寸的内、外表面开口 EDM 切槽并记录超声信号。试块缺陷检出结果见表 2。

表 2 铸造 CASS 主管道焊缝试块 LF-PAUT 检测结果

缺陷编号	设计尺寸 (高度 × 长度) / (mm × mm)	测量长度 / mm		测量高度 / mm		信噪比 / dB
		结果	偏差	结果	偏差	
1	8 × 25	32	7			< 9
2	14 × 50	61	11	11	-3	< 9
3	20 × 50	36	-14			< 12
4	27 × 50	56	6	20	-8	< 12
5	42 × 50	56	6	36	-6	< 12
6	14 × 50	49	-1	9	-5	< 12
7	8 × 25	38	18			< 9

对 CASS 主管道焊缝试块采集的超声数据进行分析, 试块中的 7 个人工缺陷均被有效检出。超声波检测编码扫查可在数据分析过程中还原缺陷位置, 有利于缺陷的定量; 另一方面数据采集可保留更全面的超声波信号信息, 在条件允许的情况下还能增加数据的后处理和图像处理等工作, 缺陷

显示的 LF-PAUT 检测图像见图 2, 可实现最小 8 mm 缺陷的检出。

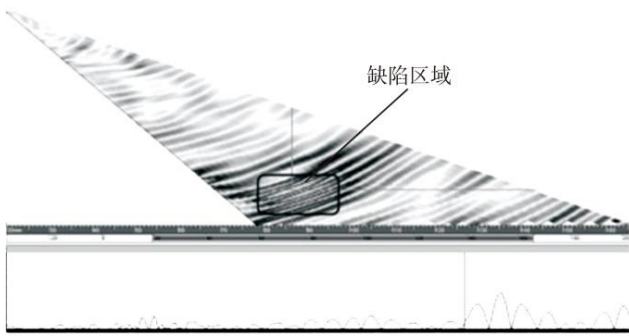


图 2 8 mm 高度缺陷检出信号图像

### 2.3 结果分析

LF-PAUT 检测试验结果表明, 粗晶材料的组织结构对超声检测工艺设置造成很大困难, 同时也能从结果看出, LF-PAUT 探头 (85 mm × 92 mm, 主轴 10 晶片间距 6 mm、次轴 5 晶片间距 7 mm) 对切槽类的面积型缺陷检出效果良好, 进一步的研究将集中在探头入射角度、法则设计、聚焦方式和深度的选择和优化方面。

通过仿真计算, 研究低频双晶纵波面阵探头 (LF-DMA) 在不同聚焦法则下声束能量聚集的主要区域, 提高对探头扫描区域的理解, 在扇扫范围内不同角度的声束能量有明显区别, 聚焦法则对大角度声束有较高的补偿; 通过计算也得出了如下规律: 等深度聚焦的方式, 在不同聚焦深度 (50 mm 和 70 mm) 并没有在管道内表面能量分布上形成明显的差异, 而等声程聚焦则可形成更大范围的能量覆盖。

频带宽度对声束能量的影响非常明显, 对于 CASS 这样的粗晶材料, 由于存在材质对超声波声束能量衰减、偏转和扩散的影响, 让更多能量穿透完整检验区域, 可提供更好的信噪比和成像效果。设备厂家的研究表明: 在粗晶材料中, 频率在 1.0 MHz 及以下的低频探头, 设置 60% 以上的频带宽度可获得相对理想的声场能量分布。

## 3 结语

通过研究 CASS 材料的特殊性, 选择适合的超声检测设备工艺参数, 通过已知信息的缺陷响应优化相控阵聚焦法则设置, 依据试验结果调整工艺, 为进一步改进工艺提供数据基础。试验结果总结如下:

(1) 以 LF-DMA 为主体的 LF-PAUT 技术, 能取得良好的声束穿透能力和声场覆盖效果, PAUT 设置可优化检测区域内的声场能量分布, 在不同检测面 (包括管道内表面容易萌生缺陷的位置) 取得可接受的信噪比。

(2) 在低频 (0.5~1.0 MHz) 范围内相同规格的 LF-DMA 试验结果中, 频率为 0.5 MHz 的探头可取得最好的声束覆盖和回波幅值, 而频率为 0.8 MHz 的探头和 1.0 MHz 的探头其定量准确性相对更佳。

(3) 沿探头声束方向 (垂直于缺陷长度方向) 移动的扫描更易发现缺陷的高度测量信息, 采用编码器记录超声检测信号 + 离线分析的方法在一定程度上可克服材料晶粒粗大引起的干扰信号影响。

本文通过仿真和人工反射体超声检测试验的方式, 分析 CASS 主管道焊缝的超声检测难点和技术方案, 经过试验和优化改善了缺陷反馈的信噪比, 取得了良好的探测和定量结果, 可为进一步改良 CASS 主管道焊缝超声检测工艺奠定基础。

### 参考文献

- [1] CRAWFORD S L, CINSON A D, MORAN T L, et al. Improvements in 500 kHz ultrasonic phased-array probe designs for evaluation of thick section cast austenitic stainless steel piping welds[R]. Washington: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), 2011: 25-37.
- [2] 施克仁, 郭寓岷. 相控阵超声成像检测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 36-40.
- [3] 瞿宁, 陈军, 赵天伟, 等. 厚壁 CASS 材料特性及其对超声检测的影响[J]. 失效分析与预防, 2013, 8 (4): 199-201.
- [4] 郑中兴. 奥氏体不锈钢焊缝的超声探伤方法[J]. 无损探伤, 2005, 29 (4): 12-16.