

# 管道环焊缝的相控阵超声检测

王 雪,薛 岩,周广言,郭瑞杰,朱凤艳

(中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 廊坊 065000)

**摘要:**针对半自动焊及手工焊管道环焊缝相控阵超声检测(PAUT)提出了可靠性试验方法,设计制作了人工模拟自然缺陷,进行了PAUT、自动超声检测(AUT)等大量对比试验。通过宏观切片制作及样本统计学分析,建立了PAUT环焊缝缺陷检测的POD(Probability of Detection)曲线,以及定量能力评估的POS(Probability of Sizing)曲线,用实际数据分析了PAUT环焊缝检测的可靠性。数据结果表明,PAUT具有较高的检出率,95%置信度下达到90%检出率的缺陷尺寸为0.92 mm。采用-6 dB测高法得出的定量分析结果误差较大,误差平均值为2.94 mm,误差标准差为1.37 mm,定尺普遍偏大,离散性较大,定量方法仍需改进。

**关键词:**相控阵超声检测; 环焊缝检测; 可靠性试验

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2020)05-0075-04

## The phased array ultrasonic test of pipeline girth weld

WANG Xue, XUE Yan, ZHOU Guangyan, GUO Ruijie, ZHU Fengyan

(China Petroleum Pipeline Research Institute Co., Ltd., Langfang 065000, China)

**Abstract:** We have proposed a reliability test method for PAUT inspection of semi-automatically and manually welded pipe girth welds. Design and production of artificial simulation of natural defects and a large number of comparison tests such as PAUT and AUT were carried out. Through the macro slicing production and sample statistical analysis, the POD curve of the PAUT pipe girth welds defect detection and the POS curve of the quantitative ability evaluation were established, and the reliability of the PAUT girth weld inspection was further analyzed using actual data. The data results show that the PAUT has a high detection rate, the defect size of 90% detection rate at 95% confidence is 0.92 mm. The quantitative analysis results obtained by the -6 dB altimetric method shall produce large errors of average being 2.94 mm and the standard deviation being 1.37 mm. The measured defect size is generally overvalued with large dispersion, and the quantitative method therefore still needs improvement.

**Key words:** PAUT; girth weld detection; reliability test

自动超声检测(AUT)技术在应用、验收标准及检测工艺评定等方面均已成熟,而且检出率高,定量相对准确,安全环保,尤其是对面积型缺陷的敏感度远高于射线检测技术的敏感度。但是由于AUT声束聚焦在焊缝坡口面上,对坡口的形状要求较高,主

要适用于全自动焊坡口未熔合型缺陷的检测。在半自动焊和手工焊的条件下,坡口间隙以及缺陷类型的变化,对于AUT工艺设置、检出和判读都会有一定的影响。相控阵超声检测技术(PAUT)可实现一定范围的声束覆盖,是管道环焊缝检测的一个推广方向,但是由于PAUT未在实际工程中大规模应用,在检测可靠性、定量能力等方面没有完善的工艺评定,没有成熟的标准指导和合理的验收标准。笔者针对PAUT技术开展了一系列可靠性分析试验,通过制作一定数量的人工模拟缺陷,对PAUT环焊缝的缺陷检出率及定量能力进行分析,为PAUT的

收稿日期:2019-05-27

基金项目:国家重点研发项目(SQ2017YFSF060021)

作者简介:王 雪(1985—),女,硕士,工程师,主要从事石油天然气管道无损检测技术研究工作

通信作者:王 雪,569422527@qq.com

工程应用、工艺及标准制定提供一定的依据。

## 1 PAUT 可靠性试验

可靠性试验方法,参考挪威船级社 DNV-RP-F118《管道环焊缝 AUT 系统评定和项目专项认证程序》标准中关于 AUT 工艺评定及认证方法中可靠性评估的相关规定,试验过程中制作了一定数量的人工模拟自然缺陷作为分析样本。试验流程包括人工模拟自然缺陷的设计制作、PAUT 试验、其他方法的无损检测、切片加工制作以及试验结果分析<sup>[1]</sup>等。

### 1.1 模拟缺陷设计和制作

试验选择外径为 1 219 mm,壁厚为 27 mm 的双 V 坡口管段对接焊缝作为试验对象,加工人工模拟自然缺陷,管段坡口示意如图 1 所示。针对表面张力过渡焊接工艺(STT)打底半自动焊及手工焊容易产生的缺陷类型设计预埋缺陷,缺陷分布信息如表 1 所示,根据不同类型缺陷可能出现的分区位置,均匀设计预埋深度。缺陷设计高度在 0.5~2 mm 之间,满足正态分布。

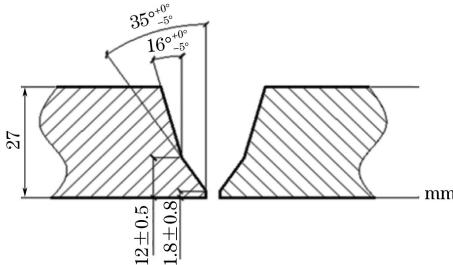


图 1 管段坡口示意

表 1 缺陷分布信息

缺陷类型	分区	预埋比例
坡口未熔合	根部/热焊/填充/盖面	16
夹渣	热焊/填充	3
层间未熔合	热焊/填充	2
气孔	根部/填充	1
未焊透	根部	1
纵向裂纹	中心	1
横向裂纹	中心	1

试验选取 7 条管段进行缺陷加工,每隔 150 mm 埋藏一个缺陷,根据设计结果进行焊接加工。

### 1.2 检测试验

使用 ZETEC 相控阵设备对加工焊缝进行 PAUT 检测,每条焊缝顺时针、逆时针各扫查一次。在试验前首先进行工艺仿真,确定最佳检测方案。每次扫查前均要进行角度增益校准(ACG)、时间增

益校准(TCG)灵敏度校准,并用模拟试块进行工艺能力验证,确认模拟试块中的横通孔、槽等人工反射体的检出结果合格,保证检测工艺的最优灵敏度和检测结果的可靠性。试验结束后,记录所有检出缺陷的位置、长度、深度、高度、幅值、缺陷类型以及上下游等信息,并确定最大幅值的位置,在幅值最高位置划线,作为切片位置参考。PAUT 工艺仿真如图 2 所示。

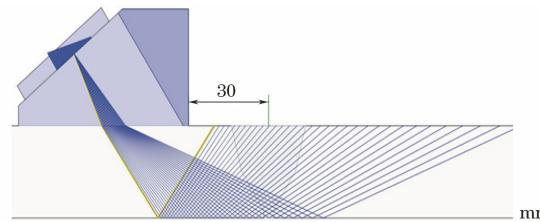


图 2 PAUT 工艺仿真

### 1.3 切片制作

宏观切片技术是一种破坏性参考试验,为检测方法提供系统检测和定量能力参考。制作方法参考 DNV-RP-F118 标准方案,以缺陷检出最高波位置为中心切割,每隔 2 mm 再向两侧各切割两刀。切片与钢管表面垂直,表面打磨酸洗粗糙度小于 6  $\mu\text{m}$ 。每个加工表面放大测量、存档,测量误差不大于  $\pm 0.1$  mm,存档信息包括缺陷编号、缺陷尺寸、上下游等标识信息。从最终每个缺陷的 4 组切片中,选取一组有效截面,作为数据分析参考样本。切片选取尽量避免缺陷重叠。图 3 所示为切片图以及对应的 PAUT+TOFD 检测结果。

## 2 试验结果对比分析

### 2.1 检出率

通过绘制描述缺陷高度与检出率关系的 POD (Probability of Detection) 曲线,得出 PAUT 在环焊缝检测中,在 95% 样本估计置信度下,以达到 90% 检出率的缺陷高度,作为评估指标。试验最终选取了 137 个缺陷作为分析样本,样本覆盖所有设计缺陷类型以及焊缝坡口各分区。缺陷尺寸为 0.2~5 mm,呈近似正态分布,图 4 为不同缺陷尺寸范围对应的缺陷数量,其中包括焊接自然缺陷,充足的样本量增加了评估结果的置信度。

POD 计算采用“hit/miss”模式,即通过计算一种尺寸缺陷的检出数占总检测数(检出数+漏检数)的比值来估算该尺寸的缺陷检出率<sup>[2]</sup>,通过计算找到最适合估算检出率的 POD 函数模型为 log-odds 模型,模型表达式如式(1)所示。

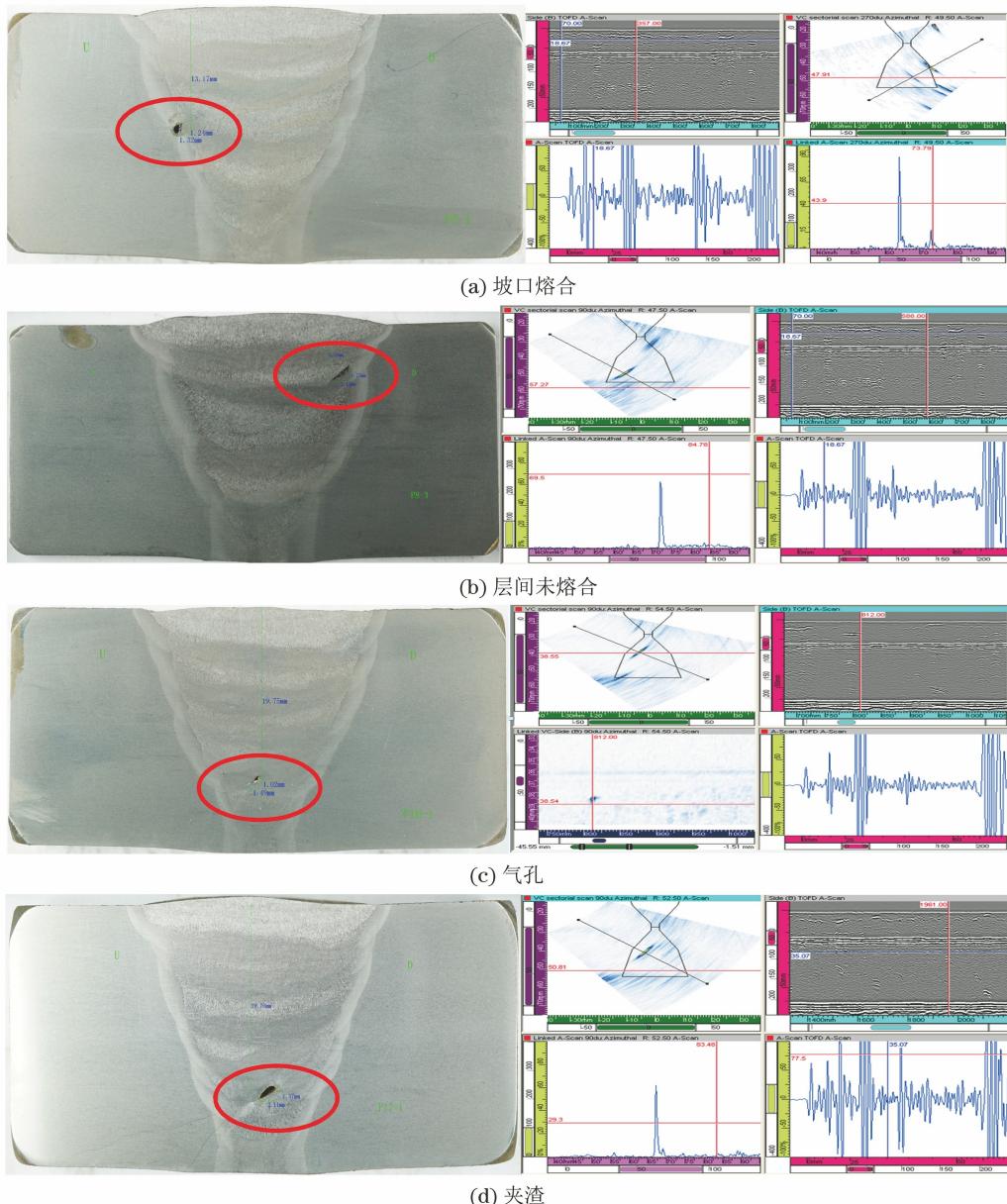


图 3 不同缺陷的切片图及 PAUT+TOFD 检测结果

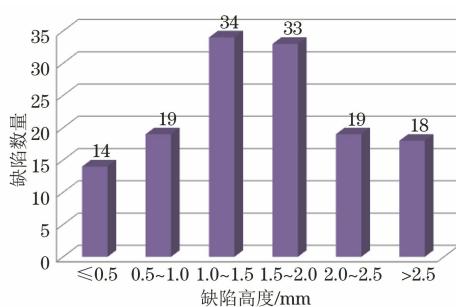


图 4 不同缺陷尺寸范围对应的数量

$$POD(a) = \frac{\exp\left[\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma}\right)\right]}{1 + \exp\left[\frac{\pi}{\sqrt{3}}\left(\frac{\ln a - \mu}{\sigma}\right)\right]} \quad (1)$$

式中:  $a$  为缺陷尺寸;  $\mu$  为缺陷尺寸的平均值;  $\sigma$  为缺陷尺寸的标准差。

统计中设定缺陷检出阈值为 20% 幅值高度, 检测缺陷在位置、深度、缺陷类型、坡口中横向位置、上下游与切片数据一致的前提下, 检测最大幅值不小于 20%, 即判定该缺陷检出, 否则拒收。根据试验切片及检测数据统计结果进行统计学分析计算, 绘制 POD 曲线如图 5 所示。结果显示, PAUT 在该双 V 坡口检测中, 95% 置信度下达到 90% 检出率的缺陷尺寸为 0.92 mm, 参考中俄东线关于 AUT 工艺评定中应用的 1 mm 的评定阈值, PAUT 环焊缝的检出率水平与 AUT 的检出率基本一致, 具有较高的检出可靠性。

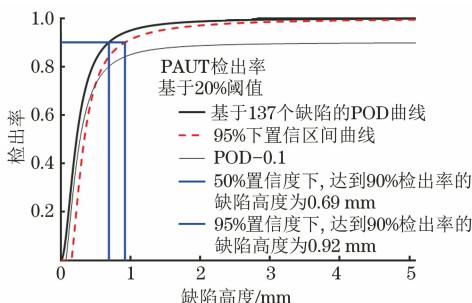


图 5 PAUT 检测 POD 曲线

在当前检出率下,对 PAUT 试验结果进行定性能力评估(见表 2),可见定性准确率可达 96.9%,与 AUT 定性能力基本一致。PAUT 对缺陷的定性检测,可根据缺陷出现位置和不同缺陷类型回波特性,结合 TOFD 检测结果进行综合分析。由于层间未熔合、夹渣、气孔等缺陷在坡口内部,位置不固定,在缺陷尺寸较小的情况下较难定性,容易出现小概率误判。

表 2 缺陷定性能力评估

检测方法 / 检出数量 / 误判数量 / 个	个	个	误判类型	定性 准确率 / %	
				层间未熔合、 夹渣、气孔	96.2
AUT	130	5	层间未熔合、 夹渣、气孔	96.2	
PAUT	129	4	层间未熔合、 夹渣	96.9	

## 2.2 定量准确性

定量准确性通过建立切片实际缺陷高度与 PAUT 检测高度的 POS(Probability of Sizing) 曲线,分析 PAUT 检测定量误差范围及定量离散性。定量分析采用检出的 129 个缺陷作为样本分析对象。高度判读方法首先采用 ASTM,ISO 等标准中提到的波幅降低一6 dB 法,将检测高度与实际高度相比,进行统计学计算,绘制 POS 曲线如图 6 所示。缺陷定量误差平均值为 2.94 mm,误差标准差为 1.37 mm。相对于 AUT 检测方法的误差平均值为 0.89 mm,误差标准差为 1.24 mm,PAUT 检测定量高度普遍偏大,且离散性较大,定量可信度不高。该特性与 PAUT 原理上相邻角度声束覆盖有关,也与 PAUT 无针对性方案设计,对不同角度和不同类型缺陷反射回波能量的差异性有关。

基于以上不理想定量结果,对 PAUT 检测结果重新评定,采用中心色法测量高度,即高度测量只针对扇扫结果的中心色块。重新进行 POS 曲线绘制(见图 7),定量误差平均值为 0.48 mm,误差标准差为 0.91 mm。可见,新的高度测量方法改进了 PAUT 的

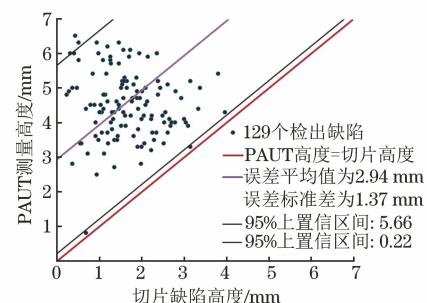


图 6 -6 dB 法 POS 曲线

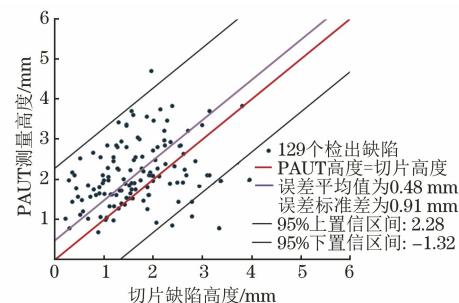


图 7 中心色法 POS 曲线

定量结果。但是,此方法基于经验值,不便形成标准。为了获得更准确的 PAUT 定量方法,仍需针对不同的缺陷类型、缺陷深度和缺陷方向进行大量的试验研究和探讨,形成可适用的、合理的定量标准。

## 3 结语

针对管道环焊缝检测,PAUT 检测工艺评定还未完全成熟,对于 PAUT 检测的可靠性分析多基于模拟试验,未有大量的实际试验验证。笔者参考 AUT 工艺评定及认证方法,提出了一种 PAUT 可靠性分析的试验方法,进行了人工模拟缺陷和切片的设计制作,并开展了一系列检测对比试验和数据统计分析,得出 PAUT 环焊缝的缺陷检出率及定量准确率。结果表明,PAUT 在管道环焊缝的检出率上,95%置信度下 90%检出率的缺陷尺寸可达 0.92 mm,具有较高的检出可靠性,且定性准确性较好。但是在定量方面,未形成较好的定量标准,用-6 dB 波幅法测量,PAUT 定量误差较大,离散性较大,存在误导验收风险,在经验和技术原理、试验研讨的基础上,提出可因循的标准判读方法是很好的解决途径。为了解决该问题,进行大量的试验和形成相应的标准是当务之急。

## 参考文献:

- [1] 周广言,郑娜,刘全利,等.全自动超声检测的工艺评定[J].无损检测,2017,39(11):62-64,67.
- [2] 李莹莹.相控阵超声检测可靠性与 POD 数值模拟初探[D].大连:大连理工大学,2014.