

管道环焊缝的相控阵超声检测

吴 勇¹, 齐迎春¹, 许 衍¹, 赖 垚², 叶 龙³

(杭州华安检测技术有限公司, 杭州 310023)

摘 要: 针对手工焊管道环焊缝相控阵超声检测 (PAUT) 设计制作了人工模拟自然缺陷, 进行了 PAUT+超声波衍射时差法 (TOFD) 检测和射线检测 (RT), 并对检测结果进行分析。试验结果表明, PAUT、TOFD 和 RT 检测各有优劣, PAUT+TOFD 检测对面积型缺陷敏感, 但对小的点状类缺陷检出率不高, 而 PAUT+TOFD 同步检测速度是 RT 检测的 2~3 倍。

关键词: 相控阵超声检测; 超声波衍射时差法; 射线检测

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2023)12-0057-06

Phased array ultrasonic testing of grith weld of pipeline

WU Yong¹, QI Yingchun¹, XU Kan¹, LAI Yao², YE Long³

(Hangzhou Hua'an Testing Technology Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: Artificial simulated natural defects were designed and manufactured for the phased array ultrasonic testing (PAUT) of manual welded pipeline circumferential welds. PAUT+ultrasonic time of flight diffraction (TOFD) method and radiographic testing (RT) were performed, and the testing results were analyzed. The experimental results showed that PAUT, TOFD, and RT testing had their own advantages and disadvantages. PAUT+TOFD was sensitive to area type defects, but the detection rate was not high for small point type defects. But the synchronous detection speed of PAUT+TOFD was 2-3 times that of RT detection.

Key words: PAUT; TOFD; RT

当前国内 LNG(液化天然气)储罐项目在沿海大批建设,其配套输送管线陆续开建,主要功能是将 LNG 储气库的液化天然气外输,给沿线用户分输,向管网注气。按照设计要求,应按照石油天然气行业标准 SY-T 4109—2020《石油天然气钢质管道无损检测》要求,进行 100% 射线检测 (RT) 以及 100% 相控阵超声检测 (PAUT)。相控阵超声检测技术是近年来迅速发展起来的一种新技术,SY-T 4109—2020 标准中的相控阵超声检测一般和 TOFD(超声波衍射时差法)检测一起使用。

管道环焊缝检测是管道施工过程中的重要环节,而射线检测技术目前是长输管道环焊缝的主要检测手段,但相应的射线检测主要采用胶片成像技

术(RT-F),该技术检测周期长、效率低,经常影响施工进度^[1]。文章为此介绍了 PAUT+TOFD 同步检测技术在长输管道检测中的应用,并将其检测结果与 RT 检测结果进行比对,分析几种检测技术的优劣以及注意事项,以供同行进行参考。

1 检测工艺验证

SY-T 4109—2020 标准第 8 章“相控阵超声检测”规定:① 当被检测焊接接头母材公称厚度不小于 8 mm 且结构允许时应增加 TOFD 辅助检测;② TOFD 仅用于缺欠辅助定性及缺欠高度测量^[2]。

以检测尺寸为 819 mm×17.5 mm(直径×壁厚)的模拟试样为例进行工艺验证,上焊缝实测宽度为 20 mm,下焊缝实测宽度为 8 mm,其材料为 L485 M,焊接坡口为 V 型坡口,坡口角度为 25°,对口间隙为 3 mm,钝边厚度为 1.5 mm,焊接坡口结构如图 1 所示,共设置了 15 个缺陷,对称分布于焊

收稿日期:2023-03-20

作者简介:吴 勇(1986—),男,本科,工程师,主要从事无损检测新技术的研发工作

通信作者:吴 勇,wuyongwumao@163.com

缝两侧(包括上、下游坡口未熔合 6 个,距焊缝边缘上、下游 5 mm 的矩形槽 4 个,焊缝中心条孔 1 个,根部中心矩形槽 1 个,裂纹 1 个,横向刻槽 1 个,点状夹渣 1 个),先采用 PAUT+TOFD 同步检测技术对试样进行检测,然后采用 RT 验证。

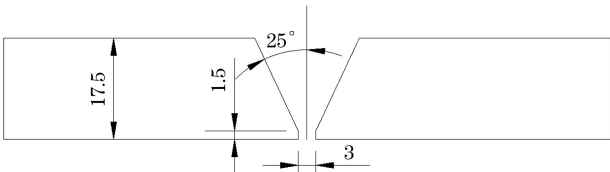


图 1 焊接坡口结构示意

1.1 PAUT 检测工艺

采用多浦乐 Phascan II 32:64 型相控阵超声检测仪进行 PAUT 检测,其含有 2 个 32 晶片线阵探头,探头型号为 5L32-0.5×10-D2,楔块型号为 SD2-N55S-IHC。参照 SY-T 4109—2020 标准,设置扇扫角度为 38°~72°,聚焦深度为 35 mm,探头前端距为 27 mm,检测灵敏度为 $\phi 2\text{ mm}+2\text{ dB}$,两个探头沿线扫查,一次扫查完成检测,PAUT 检测声束覆盖示意如图 2 所示。

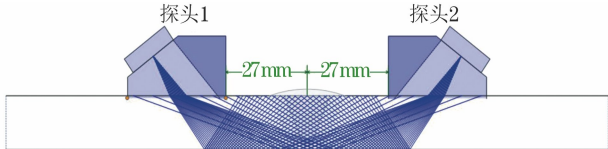


图 2 PAUT 检测声束覆盖示意

1.2 TOFD 检测工艺

采用多浦乐 Phascan II 32:64 型相控阵超声检测仪(具有 2 组 TOFD 通道)进行 TOFD 检测,探头频率为 5 MHz,晶片直径为 6 mm,楔块角度为 70°。参照 SY-T 4109—2020 标准,采用一组探头对进行检测,探头中心间距设置为使该探头组的主声束交点位于 2/3 壁厚深度处,故楔块间距设为 64 mm,TOFD 探头对与 PAUT 探头组扫查偏置距离为 98 mm,扫查方式为非平行扫查,与 PAUT 同步进行检测,TOFD 检测声束覆盖示意如图 3 所示。

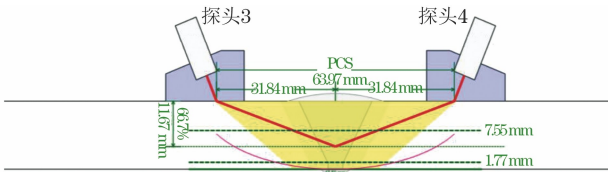


图 3 TOFD 检测声束覆盖示意

1.3 RT 检测工艺

采用 XXHA-3005 型 X 射线机进行检测,采用富士 IX80HD 胶片成像,铅箔增感,检测焦距为 408 mm,管电压为 280 kV,曝光时间为 1.5 min。

1.4 检测结果比对

模拟试样的 PAUT、TOFD、RT 检测结果如图 4~7 所示,原始缺陷信息及其实测结果如表 1 所示。

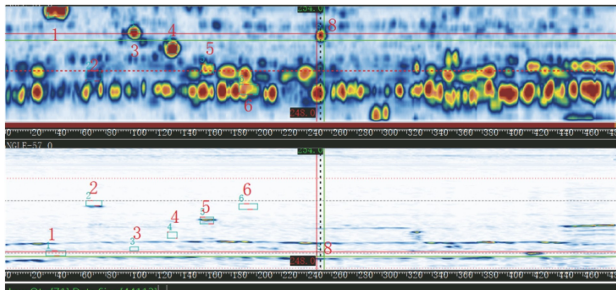


图 4 模拟试样的 PAUT 图谱(组 1)

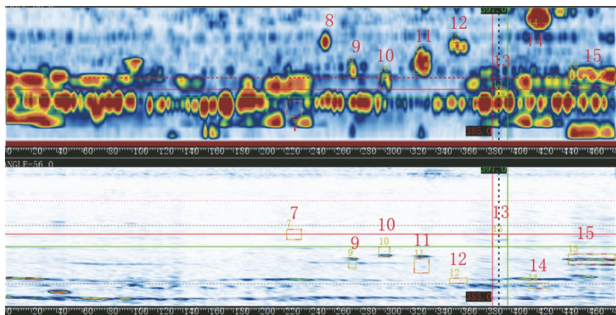


图 5 模拟试样的 PAUT 图谱(组 2)

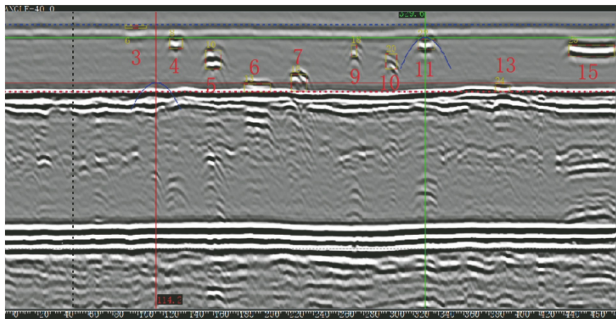


图 6 模拟试样的 TOFD 图谱

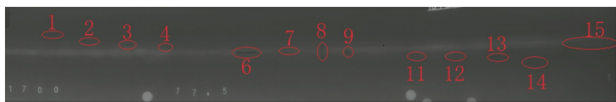


图 7 模拟试样的 RT 底片

2 检测结果分析

试块上 15 个缺陷通过 PAUT+TOFD 检测均能清晰显示;其中 1,8,12,14 号缺陷处于 TOFD 上表面盲区范围内,故在 TOFD 图谱上未有相应显示;2 号缺陷处于 TOFD 下表面盲区范围内,故在 TOFD 图谱上未有相应显示。

受制于射线束与缺陷主平面的角度关系,若检测工艺控制不好易漏检未熔合、裂纹类缺陷,故 5,10 号未熔合及 7 号裂纹在底片上很难分辨;7 号裂纹

表 1 原始缺陷信息及其实测结果

mm

检测方法	原始缺陷信息			实测缺陷信息			
	缺陷序号-名称	长×宽×高	缺陷深度	缺陷长度	缺陷高度	埋藏深度	偏离中心线
RT	1-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	10	—	—	—15
	2-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	10	—	—	—9
	3-焊缝边缘未熔合	10×1	1	12	—	—	—7
	4-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	7.5	—	—	—5
	5-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	13	—	—	—3
	6-焊缝中心内表槽	15×2×1.5	16	16	—	—	0.5
	7-焊缝内表裂纹	10×2.5	15	11	—	—	—1
	8-外表面横槽	10×2×1.5	0	10	—	—	0
	9-夹渣	φ2.5(直径)	8.8	φ4	—	—	1
	10-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	11	—	—	3
	11-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	12	—	—	5
	12-焊缝边缘未熔合	10×1	1	10	—	—	7
	13-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	10	—	—	8
	14-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	10	—	—	14
	15-焊缝中心长孔	40×φ2(长度×直径)	8.8	38	—	—	0
PAUT	1-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	15	1.8	0.5	—15.6
	2-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	13	2.3	16.3	—10.9
	3-焊缝边缘未熔合	10×1	1	15	2.2	1.4	—8.3
	4-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	8	2.9	5.6	—8.3
	5-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	11	3.1	11.3	—8.3
	6-焊缝中心内表槽	15×2×1.5	16	16.5	3.4	16.5	—1.9
	7-焊缝内表裂纹	10×2.5	15	12	4.1	13.9	—1.4
	8-外表横槽	10×2×1.5	0	6	2.2	0.3	—1.4
	9-夹渣	φ2.5(直径)	8.8	6	2.9	6.9	—2.9
	10-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	9	3.1	9.4	3.7
	11-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	12	4.3	5.1	5.7
	12-焊缝边缘未熔合	10×1	1	14	2.3	1.0	6.9
	13-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	12	2.4	15.6	8.9
	14-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	15	2.9	0.4	15.3
	15-焊缝中心长孔	40×φ2(长度×直径)	8.8	37	3.2	7.3	2.3
TOFD	1-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	—	—	—	—
	2-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	—	—	—	—
	3-焊缝边缘未熔合	10×1	1	17	2.3	1.9	—
	4-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	10.8	2.6	7.7	—
	5-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	12.2	2.8	10.6	—
	6-焊缝中心内表槽	15×2×1.5	16	20.7	1.7	16.4	—
	7-焊缝内表裂纹	10×2.5	15	12.6	2.5	15	—
	8-外表横槽	10×2×1.5	0	—	—	—	—
	9-夹渣	φ2.5(直径)	8.8	4.5	2.2	9.4	—
	10-2T-3 未熔合	10×2.5	11.7	8.6	2.6	11.4	—
	11-T-3 未熔合	10×2.5	5.8	13.1	2.8	7.8	—
	12-焊缝边缘未熔合	10×1	1	—	—	—	—
	13-焊缝热影响区内表槽	10×1×1	16.5	12.2	0.7	16.8	—
	14-焊缝热影响区外表槽	10×1×1	0	—	—	—	—
	15-焊缝中心长孔	40×φ2(长度×直径)	8.8	36.9	2.6	9.4	—

在 PAUT 图谱上隐约能发现,但幅度很低(34.8%),信噪比不高,容易漏检,而在 TOFD 图谱上却能清晰显示。

8 号缺陷为外表面横向槽,PAUT 所测为缺陷的宽度,故其结果比 RT 所测长度短。

PAUT、TOFD 所测的缺陷长度相当,一般较 RT 结果更长,误差在±5 mm 内;因为 PAUT 所测

缺陷深度为最高波幅位置,所以 PAUT 所测缺陷深度较准确,误差在±3 mm 内。

TOFD 检测具有上、下表面盲区,且上表面盲区比下表面盲区大,在能够发现缺陷的情况下,可准确测定缺陷的高度,误差在±2 mm 内,所测缺陷高度较 PAUT 结果更精确,但在非平行扫查时不能测定缺陷偏离焊缝中线的距离。

RT 检测能准确判断缺陷的性质,不能测定缺陷深度及高度,RT 所测缺陷偏离焊缝中心线的距离较 PAUT 的更准确,误差在±3 mm 内。

3 实际应用

对某项目外输管道工程进行检测,其设计压力为 9.2 MPa,线路总长度为 41.5 km,管道规格有 $\phi 819\text{ mm}\times 15.9\text{ mm}$, $\phi 819\text{ mm}\times 17.5\text{ mm}$, $\phi 819\text{ mm}\times 20.6\text{ mm}$ (直径×壁厚,下同)管道材料为 L485M,焊缝坡口型式与参数与工艺验证试样的基本一致。对现场检测到的缺陷进行检测结果对比。

3.1 裂纹检测

对规格为 $\phi 819\text{ mm}\times 20.6\text{ mm}$ 的管道进行检测,

其焊口 RT 及 PAUT 检测未发现缺陷显示,但 TOFD 检测出现了清晰显示,实际管道的裂纹检测图谱如图 8 所示,可见缺陷显示长度为 12 mm,具有裂纹类特征,检测人员怀疑其为裂纹;现场打磨后进行渗透检测,在深度 5 mm 处发现一长度为 6 mm 的横向线性显示(见图 9)。

3.2 坡口面缺陷检测

对规格为 $\phi 819\text{ mm}\times 15.9\text{ mm}$ 的管道进行检测,其焊口 RT 及 TOFD 检测未发现缺陷显示,但 PAUT 在近表面坡口位置出现了清晰显示(见图 10),其长度为 28 mm,深度为 2.6 mm,幅度为 116%,评为 IV 级;现场打磨后,发现其为层间清渣不干净导致的坡口面夹渣类缺陷。

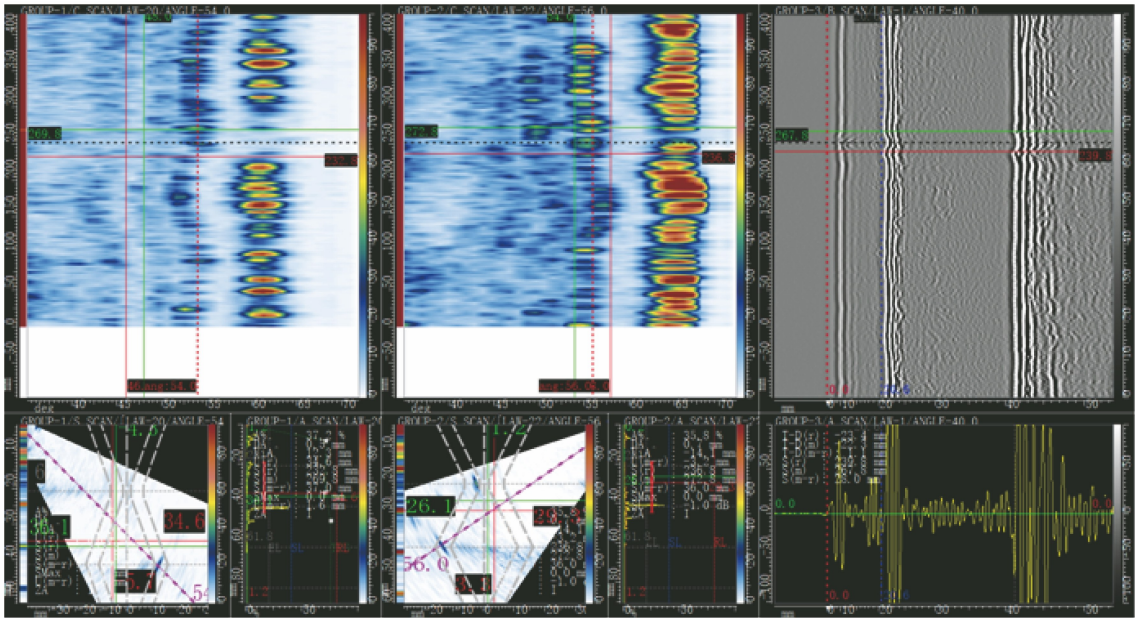


图 8 实际管道的裂纹检测图谱

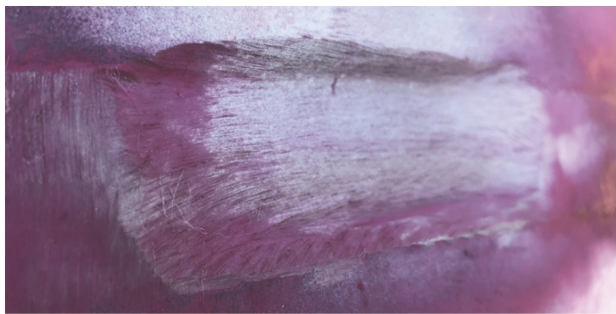


图 9 实际管道的裂纹渗透检测结果

对规格为 $\phi 819\text{ mm}\times 15.9\text{ mm}$ 的管道进行检测,其焊口 RT 检测未发现缺陷显示,但 PAUT 及 TOFD 检测到根部坡口位置存在清晰显示(见图 11),其长度为 13 mm,深度为 11 mm,幅度为 111%,评为 IV 级;现场打磨后发现其为坡口面夹渣类缺陷。

3.3 气孔检测

对规格为 $\phi 819\text{ mm}\times 15.9\text{ mm}$ 的管道进行检测,其多个焊口 RT 检测发现有圆形显示,但 PAUT 及 TOFD 检测均未发现缺陷显示,点状缺陷的射线检测底片如图 12 所示。

3.4 根部缺陷检测

对规格为 $\phi 819\text{ mm}\times 15.9\text{ mm}$ 的管道进行检测,RT 检测发现存在根部未熔合显示(长度为 10 mm),PAUT 在同一位置发现一长为 10 mm,深度为 15.6 mm,波幅为 57.5%的根部显示,TOFD 检测未发现缺陷显示,根部未熔合缺陷的检测图谱与底片显示如图 13 所示。

3.5 检测结果分析

从以上几类缺陷检测的实际检测结果可知,相

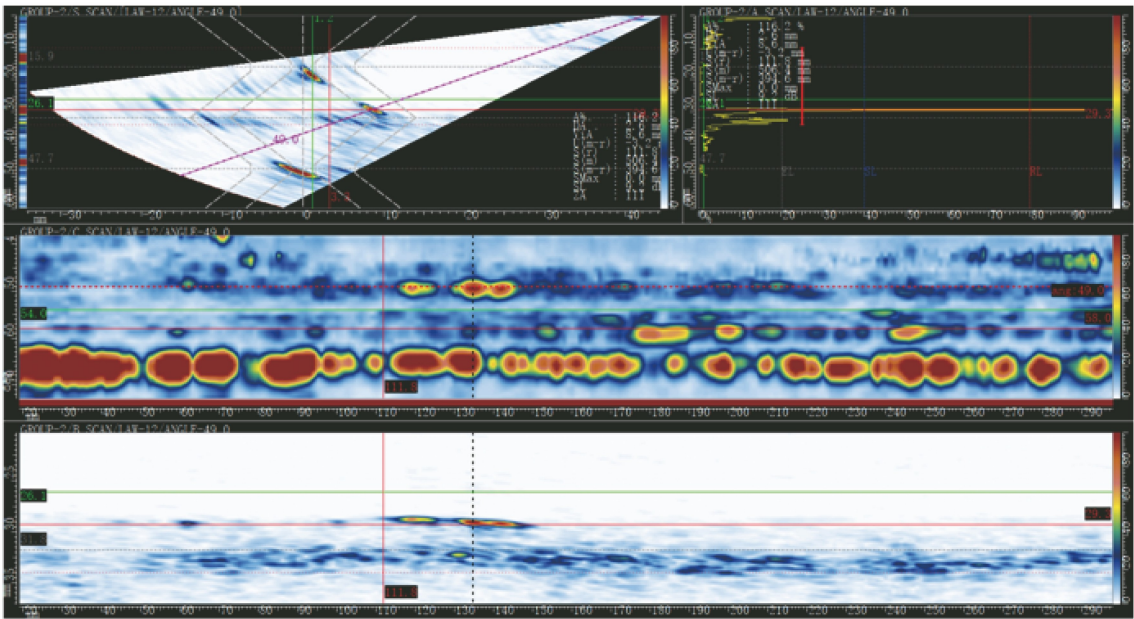


图 10 近表面坡口缺陷 PAUT 检测图谱

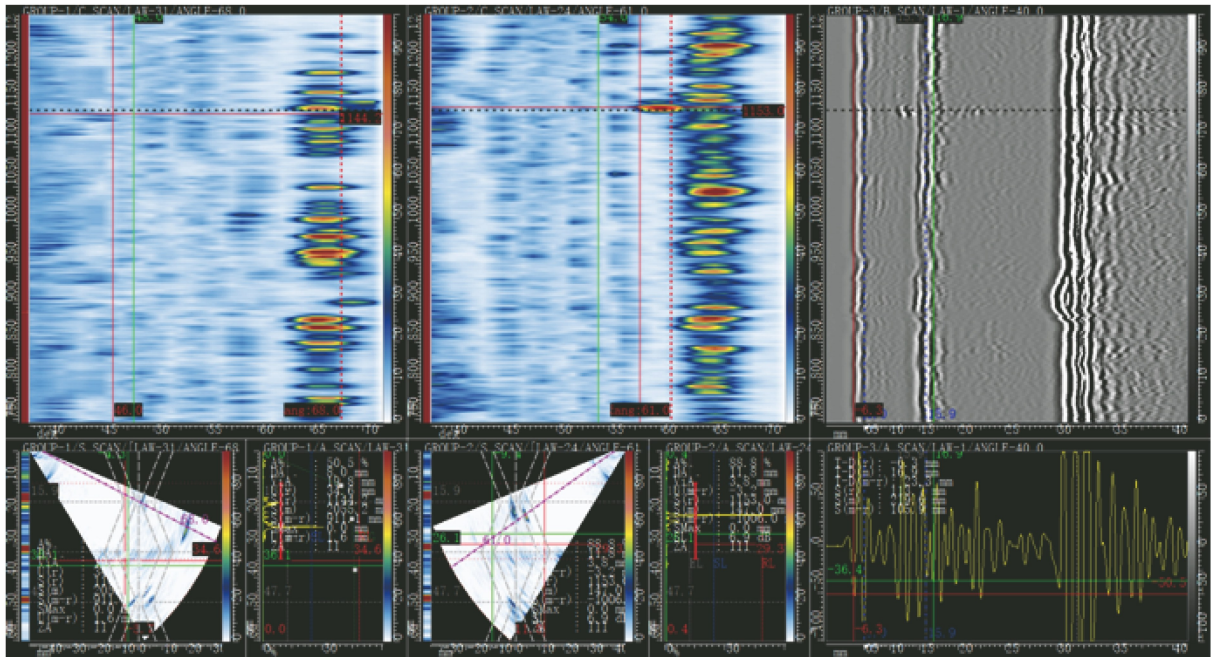


图 11 近底面坡口缺陷 PAUT 及 TOFD 检测图谱

控阵超声检测、超声波衍射时差法检测、射线检测各有优劣。从图 10~12 可知 PAUT+TOFD 检测对面积型缺陷敏感,但对小的点状类缺陷检出率不高。从图 13 可知 PAUT+TOFD 同步检测技术在对缺陷定性有疑问时,可借助 RT 对缺陷定性。

4 注意事项

如在 PAUT 及 TOFD 通道中均发现了点状缺陷,应使用 TOFD 测量缺陷高度,按高度进行评级,TOFD 无法测量缺陷高度时才使用回波高度法进

行评级。

5 结语

介绍了 PAUT+TOFD 同步检测技术在长输管道检测中的应用,并将其检测结果与 RT 检测技术进行对比,分析了几种检测技术的优劣。结果表明,PAUT+TOFD 同步检测技术基本可达到 RT 检测的效果,其检测速度是 RT 检测的 2~3 倍。在对 PAUT+TOFD 同步检测技术进行经验总结后,可增加该技术在长输管道检测中的应用比例。

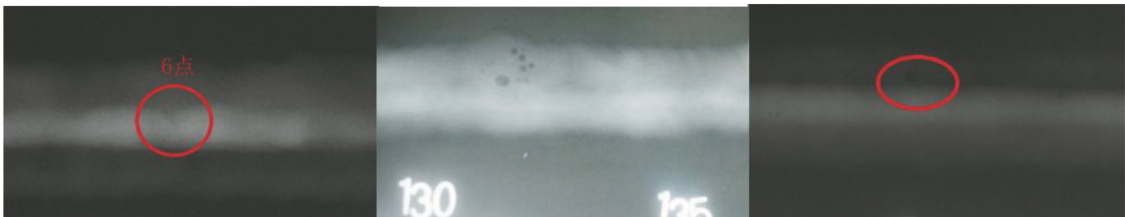


图 12 点状缺陷的射线检测底片

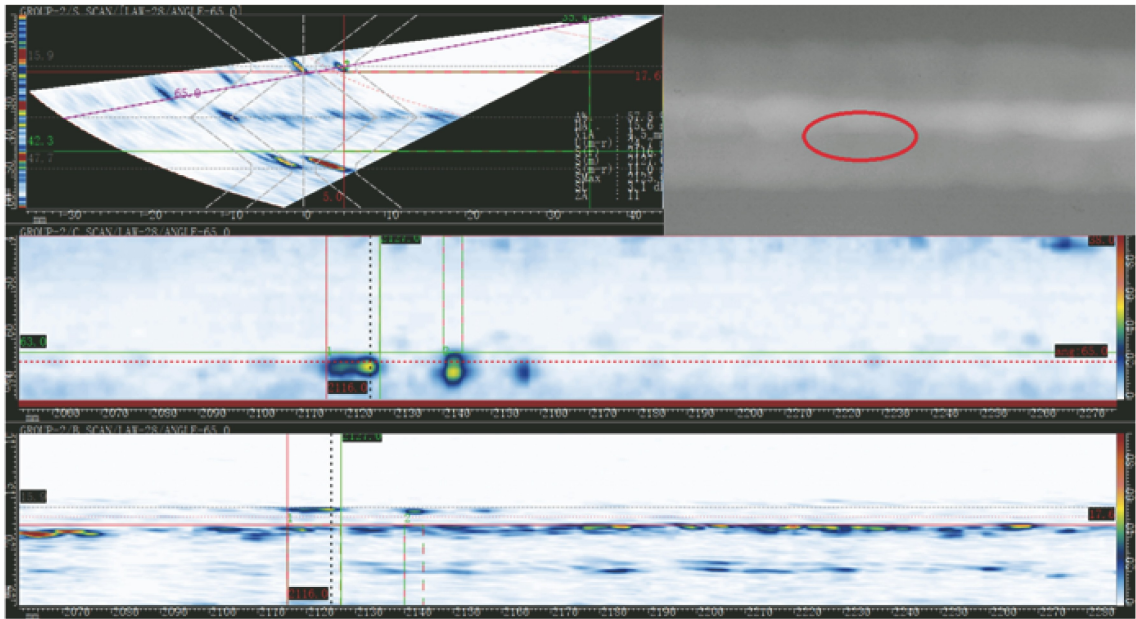


图 13 根部未熔合的检测图谱与底片显示

参考文献:

[1] 吕新昱,李维,周广言,等. 油气管道环焊缝数字射线检测与胶片法射线检测技术对比分析[J]. 无损检测,

2019,41(2):48-51.
[2] 杨晶,赵亮,王希. 相控阵和超声衍射时差法在球罐裂纹检测中的应用[J]. 无损检测,2019,41(1):35-38.

(上接第 44 页)

[7] 龚建良,李鹏,张正泽,等. 固体火箭发动机装药结构完整性研究进展[J]. 科学技术与工程,2021,21(2):434-441.
[8] 徐翰文,张闯,陈苏婷. 基于视觉显著性的图像特征提取算法[J]. 计算机应用,2022,42(2):72-78.
[9] BHARODIYA A K, GONSAI A M. An improved edge detection algorithm for X-Ray images based on the statistical range[J]. Heliyon,2019,5(10):2743.
[10] YAHAGHI E, MOVAFEGHI A, ROKROK B, et al. Defects detection of digital radiographic images of

aircraft structure materials via geometric locally adaptive sharpening[J]. Research in Nondestructive Evaluation,2020,31(2):107-115.
[11] 万书亭,王莹,张伯麟,等. 多幅 X 射线旋转图像轮廓对应点坐标提取和匹配方法研究[J]. 中国工程机械学报,2022,20(5):390-395.
[12] 史先传,许议元,殷帅. 基于机器视觉的摄像经纬斜检测研究[J]. 计算机测量与控制,2023,31(3):22-28.
[13] 刘杰. 探究钢铁表面缺陷检测的研究与实现[J]. 中国设备工程,2023(6):172-174.