

# 基于覆材侧的不锈钢复合板球罐超声波衍射时差法检测

毛国均<sup>1</sup>, 张子健<sup>2</sup>, 柴军辉<sup>1,2</sup>, 张小龙<sup>2</sup>, 吕钟杰<sup>2</sup>, 吴家喜<sup>2</sup>, 胡 健<sup>2</sup>, 李泽鑫<sup>3</sup>

(1.宁波市特种设备检验研究院, 宁波 315048; 2.宁波市劳动安全技术服务公司, 宁波 315048;  
3.宁波明峰检验检测研究院股份有限公司, 宁波 315200)

**摘 要:** 针对不锈钢复合板球罐在制造和使用过程中容易出现的各类缺陷, 采用基于覆材侧的超声波衍射时差法(TOFD)检测, 通过 CIVA 软件仿真 TOFD 检测工艺, 再用对比试块验证工艺的可靠性, 最后采用该检测工艺对一台体积为 500 m<sup>3</sup> 的不锈钢复合板球罐进行现场检测。结果表明: 基于覆材侧的检测工艺可有效减小不锈钢复合板 TOFD 检测的盲区覆盖范围, 具有较高的信噪比, 对于开展不锈钢复合板球罐覆材侧 TOFD 检测具有一定的指导意义。

**关键词:** 不锈钢复合板; CIVA 仿真; TOFD 检测

中图分类号: TG115.28      文献标志码: A      文章编号: 1000-6656(2020)05-0052-07

## TOFD detection of stainless steel composite plate spherical tank based on cladding side

MAO Guojun<sup>1</sup>, ZHANG Zijian<sup>2</sup>, CHAI Junhui<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaolong<sup>2</sup>, LYU Zhongjie<sup>2</sup>, WU Jiayi<sup>2</sup>, HU Jian<sup>2</sup>, LI Zexin<sup>3</sup>

(1.Ningbo Special Equipment Inspection and Research Institute, Ningbo 315048, China;

2.Ningbo Labor Safety and Technology Services Company, Ningbo 315048, China;

3.Ningbo Mingfeng Inspection and Testing Research Institute Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

**Abstract:** In view of various defects in the manufacturing and use of stainless steel composite plate spherical tank, TOFD detection technology based on the cladding side is adopted, and the TOFD detection technology is simulated by CIVA software, and the reliability of the process is verified by the comparison with the test block. Finally, a 500 m<sup>3</sup> stainless steel composite plate spherical tank is tested on site by this detection technology. The results show that the detection technology based on the cladding side can effectively reduce the blind area coverage of TOFD detection of stainless steel clad plate, and has a high signal-to-noise ratio, which has a certain guiding significance for the development of TOFD detection of the cladding side of stainless steel clad plate spherical tank in the cladding side.

**Key words:** stainless steel composite plate; CIVA simulation; TOFD detection

不锈钢复合板球罐作为一种典型的复合板制承压设备, 经常在石油化工业中使用, 超声衍射时差法(TOFD)检测是球罐对接焊缝的有效无损检测方法之一, 但使用 TOFD 检测技术对不锈钢复合板球罐检测还存在以下问题: ① NB/T 47013.10—2015

《承压设备无损检测 第 10 部分: 衍射时差法超声检测》中规定, 若从基材侧对基材对接接头进行 TOFD 检测, 可参照该部分使用, 但对于总厚度为 20~30 mm 的球罐对接焊缝, 在 TOFD 检测验证后发现, 直通波盲区和基材-过渡层的结合面信号回波会造成检测有效可视区域较小, 总体盲区偏大, 且信噪比低, 检测效果较差; ② NB/T 47013.10—2015 对基于覆材侧的 TOFD 检测也进行了说明, 若从覆材侧对基材对接接头进行 TOFD 检测, 也可参照该标准执行, 但未对具体检测工艺参数进行规定, 需要

收稿日期: 2020-02-29

基金项目: 浙江省质监系统质量技术基础建设项目(20180119)

作者简介: 毛国均(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事承压类特种设备无损检测工作

通信作者: 张子健, zhangzj@nbanji.com

进一步研究,相关文献资料也未对该问题进行有效研究。笔者采用 CIVA 软件仿真不锈钢复合板 TOFD 检测工艺,用对比试块验证了该检测工艺的可靠性,最后对一台在役的体积为 500 m<sup>3</sup> 的不锈钢复合板球罐进行现场检测,为开展基于覆材侧不锈钢复合板球罐的 TOFD 检测打下一定的基础。

1 CIVA 软件仿真

1.1 CIVA 模型

采用平板对接焊缝模型进行模拟仿真,工件尺寸为 250 mm×150 mm×20 mm(长×宽×高),其中基材为 Q345R 钢,厚度为 17 mm,覆材侧为 316L 钢,厚度为 3 mm。对接焊缝 CIVA 模型分为 3 层,基材为 Q345R 钢+过渡层焊条 E309Mo-16+覆材 316L 钢,其中焊缝坡口形式参照标准 GB/T 13148—2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》选取 6.3 节中的对接 2 号 X 型坡口(见图 1),为与后续对比试块检测数据进行比对,在 CIVA 模型中添加长横孔和矩形槽缺陷,分别验证 TOFD 检测工艺表面盲区和焊缝中下部的灵敏度,CIVA 三维模型如图 2 所示。

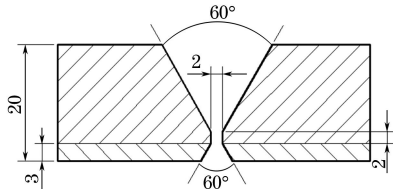


图 1 对接 2 号 X 型坡口尺寸示意

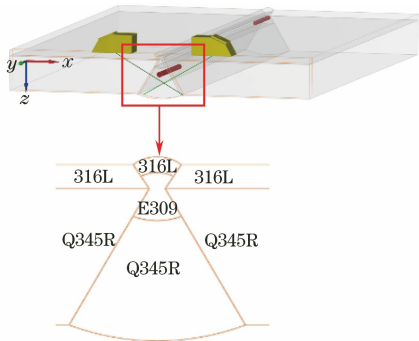


图 2 对接焊缝的 CIVA 三维模型

1.2 声场计算

TOFD 检测的主要工艺参数有: $P_{CS}$ (探头中心

间距)、探头频率、折射角度与晶片尺寸等<sup>[1-2]</sup>,结合所研究的内容,还需设置检测面对声场的影响,研究采用 CIVA 软件中超声检测(UT)模块的 Beam Computation(声场计算)功能进行计算,对-12 dB 和-6 dB 的声束覆盖范围进行分析,比对各种情况下声束对工件的覆盖情况能否满足检测要求,选取出最佳检测工艺参数。从  $P_{CS}$ 、探头频率、折射角度、晶片尺寸和检测面等 5 个因素进行模拟计算,相关设置根据 NB/T 47013.10—2015 的推荐值进行排列。

1.2.1 改变探头频率对声场的影响

选取  $P_{CS}$  为 75 mm,折射角为 70°,晶片尺寸为  $\phi$  6 mm,检测面为覆材侧,对探头频率为 5,7.5,10 MHz 的情况进行仿真,不同探头频率对 TOFD 声场影响的仿真结果如图 3 所示。

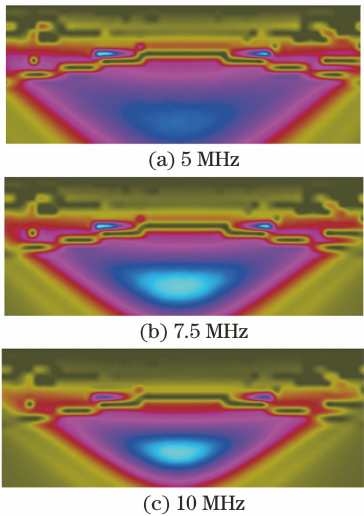


图 3 不同探头频率对 TOFD 声场影响的仿真结果

探头频率对声场的影响分析结果如表 1 所示(pts 为 CIVA 软件在不同工艺条件下波高能量大小比较的特殊单位,pts 值越大,质点能量越大)。

从表 1 可以看出,探头频率选取 7.5 MHz 时,综合比较各项参数具有最优结果。

1.2.2 改变  $P_{CS}$  和折射角对声场的影响

模拟计算选取探头频率为 7.5 MHz,晶片尺寸为  $\phi$  6 mm,检测面为覆材侧不变,折射角选取 60°,65°,70°,分别计算  $P_{CS}$  在 70,75,80 mm 下的声场情

表 1 不同探头频率对声场的影响分析结果

探头频率/ MHz	计算区域内能量 最大点位置/mm	声场能量/ (pts)	-6 dB 深度/ mm	-6 dB 水平范围/ mm	-12 dB 深度/ mm	-12 dB 水平范围/ mm
5.0	18	0.238	8~20	31	8~20	35
7.5	16	0.221	9~20	27	8~20	31
10.0	15	0.210	10~19	21	8~20	27

况, 计算结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, TOFD 纵波声场大体呈圆锥形, 声场能量主要集中在一定的区域内, 通过比较聚焦深度、声场能量、-6 dB 和 -12 dB 声束水平和深

度方向覆盖范围来确定最佳  $P_{CS}$  和折射角度, 其中声场能量取聚焦范围最高点的振幅作为代表, 不同  $P_{CS}$ 、不同折射角度对声场的影响分析结果如表 2 所示。

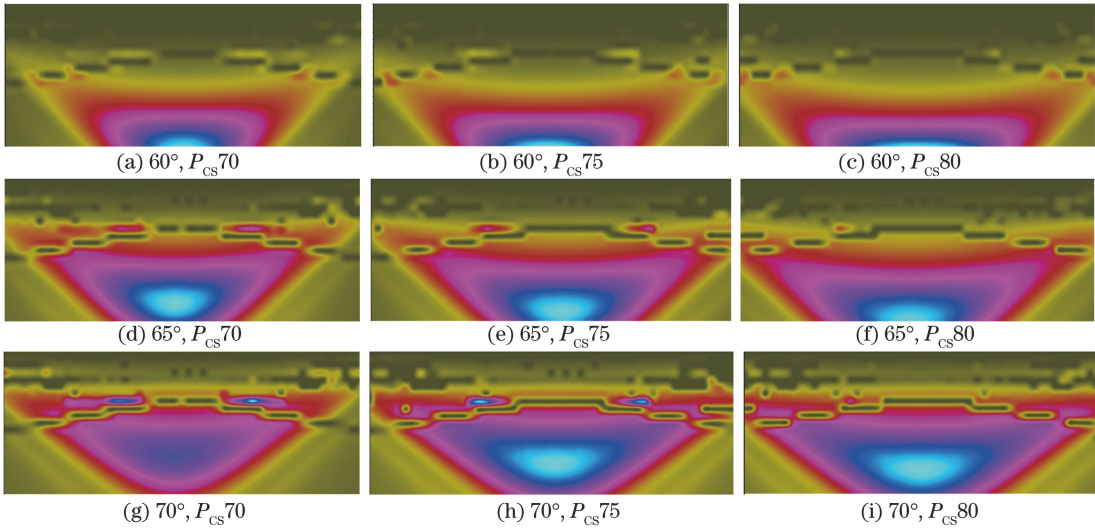


图 4 不同  $P_{CS}$  和折射角度对 TOFD 声场影响的仿真结果

表 2 不同  $P_{CS}$ 、不同折射角度对声场的影响分析结果

$P_{CS}/$ mm	计算区域内能量 最大点位置/mm			声场能量/ pts			-6 dB 深度/ mm			-6 dB 水平范围/ mm			-12 dB 深度/ mm			-12 dB 水平范围/ mm		
	60°	65°	70°	60°	65°	70°	60°	65°	70°	60°	65°	70°	60°	65°	70°	60°	65°	70°
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
70	20	17	14	0.318	0.289	0.250	15~20	12~20	8~20	19	19	23	13~20	9~20	8~20	25	27	31
75	20	19	16	0.258	0.255	0.221	16~20	13~20	9~20	23	21	27	13~20	9~20	8~20	29	29	31
80	20	20	17	0.199	0.227	0.195	16~20	13~20	9~20	28	24	29	14~20	10~20	8~20	34	30	34

根据表 2, 计算区域内能量最大点位置, 将 -6 dB 和 -12 dB 覆盖范围进行综合比较, 得出  $P_{CS}$  为 75 mm, 折射角度为 70° 时, 声场覆盖具有最优结果。

1.2.3 改变晶片尺寸对声场的影响

选取  $P_{CS}$  为 75 mm, 折射角为 70°, 探头频率为

7.5 MHz, 检测面为覆材侧不变, 在晶片尺寸分别为  $\phi 2, \phi 4, \phi 6$  mm 的情况下进行仿真, 不同晶片尺寸对 TOFD 声场影响的仿真结果如图 5 所示。

晶片尺寸对声场的影响分析结果如表 3 所示。

从图 5 和表 3 可以看出, 晶片尺寸为  $\phi 2$  mm 时, 纵波声场未形成明显聚焦; 晶片尺寸为  $\phi 4$  mm

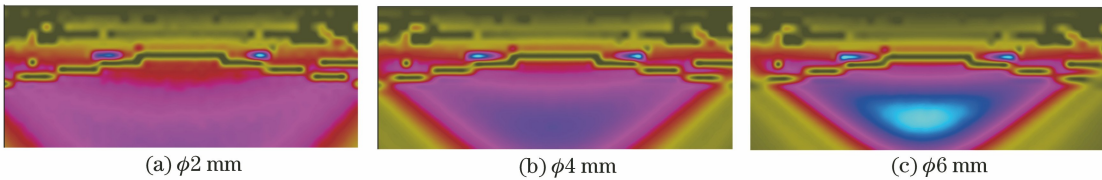


图 5 不同晶片尺寸对 TOFD 声场影响的仿真结果

表 3 晶片尺寸对声场的影响分析结果

晶片尺寸/ mm	计算区域内能量 最大点位置/mm	声场能量/ (pts)	-6 dB 深度/ mm	-6 dB 水平范围/ mm	-12 dB 深度/ mm	-12 dB 水平范围/ mm
$\phi 2$	未形成明显聚焦	—	—	—	—	—
$\phi 4$	17	0.004	8~20	31	8~20	37
$\phi 6$	16	0.221	9~20	27	8~20	31

时,仅存在微弱的聚焦效果;晶片尺寸选取  $\phi 6\text{ mm}$  时,综合比较各项参数具有最优结果。

1.2.4 改变检测面对声场的影响

选取  $P_{CS}$  为  $75\text{ mm}$ ,折射角为  $70^\circ$ ,探头频率为  $7.5\text{ MHz}$ ,晶片尺寸为  $\phi 6\text{ mm}$ ,对检测面设置为基材侧和覆材侧的情况进行仿真,结果如图 6 所示。检测面对声场的影响分析结果如表 4 所示。从图 6 和表 4 可以看出,若从基材侧检测,由于对接焊缝由 3 层不同材料组成,且焊态不锈钢对纵波较碳钢对纵波存在明显衰减,TOFD 纵波未形成能量聚焦,且存在多个波幅极值点,这对检测来讲是极为不利的,因此仅基于声场能量这一角度来讲,从覆材侧进

行检测相对于从基材侧进行检测具有明显的优势。

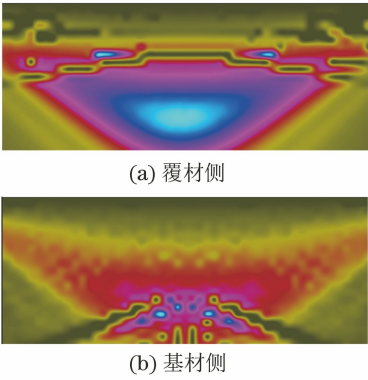


图 6 不同检测面对 TOFD 声场影响的仿真结果

表 4 检测面对声场的影响分析结果

检测面	计算区域内能量 最大点位置/mm	声场能量/ (pts)	-6 dB 深度/ mm	-6 dB 水平范围/ mm	-12 dB 深度/ mm	-12 dB 水平范围/ mm
覆材侧	16	0.221	9~20	27	8~20	31
基材侧	未形成明显聚焦	—	—	—	—	—

综上所述,针对  $20\text{ mm}(17\text{ mm}+3\text{ mm})$  厚不锈钢复合板基于覆材侧的检测工艺定为: $P_{CS}$  为  $75\text{ mm}$ ,探头频率为  $7.5\text{ MHz}$ ,折射角度为  $70^\circ$ ,晶片尺寸为  $\phi 6\text{ mm}$ 。

1.3 缺陷响应

根据上节所选取的 TOFD 检测工艺参数,在 CIVA 模型中添加长横孔和矩形槽缺陷,进行缺陷响应的模拟计算,所添加的缺陷参数如表 5 所示。

表 5 CIVA 模型中所添加的缺陷参数

缺陷编号	缺陷类别	缺陷尺寸/mm	缺陷位置/mm
1#	长横孔	$\phi 2\times 30$	距离左端点 0,深度 4
2#	覆材侧矩形槽	$20\times 1\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 45,深度 1
3#	基材面矩形槽	$20\times 2\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 145.5,深度 2
4#	覆材侧矩形槽	$20\times 2\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 85,深度 2
5#	基材面矩形槽	$20\times 3\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 105,深度 3
6#	覆材侧矩形槽	$20\times 3\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 125,深度 3
7#	基材面矩形槽	$20\times 4\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 65,深度 4
8#	覆材侧矩形槽	$20\times 4\times 1$ (长 $\times$ 深 $\times$ 宽)	距离左端点 165,深度 4
9#	长横孔	$\phi 2.5\times 45$	距离左端点 215,深度 10

分别采用 CIVA 软件中的长横孔和矩形面状缺陷进行设置,长横孔的设置主要考虑验证检测工艺的表面盲区深度和焊缝中部的检测灵敏度,覆材侧矩形槽的设置主要考虑验证检测工艺的表面盲区,基材面矩形槽是为了验证检测工艺在焊缝根部的检测灵敏度。CIVA 三维模型缺陷设置如图 7 所示。

采用声场计算得出的检测工艺参数,分别基于覆材侧和基材侧对试块进行非平行扫查,从缺陷响应的角度来验证基于覆材侧检测工艺的可靠性。

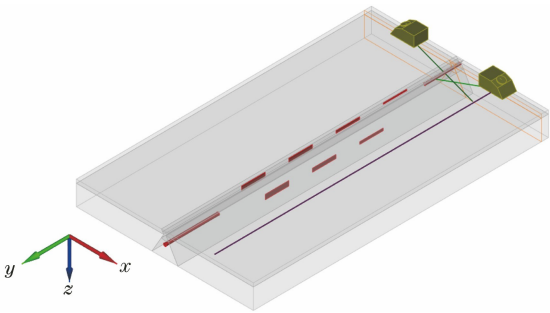


图 7 CIVA 三维模型缺陷设置

1.3.1 基于覆材侧检测

对于长横孔的缺陷算法选择基尔霍夫衍射理论



模型,矩形面状缺陷的算法选择几何衍射理论(GTD)模型。GTD模型是几何光学理论的延伸,解决了非连续场的计算问题,主要用于 TOFD 缺陷响应里的面状缺陷计算<sup>[3]</sup>,在整个非平行扫查过程中,仅计算纵波响应,不考虑横波和波形转换,基于覆材侧的仿真结果如图 8 所示。

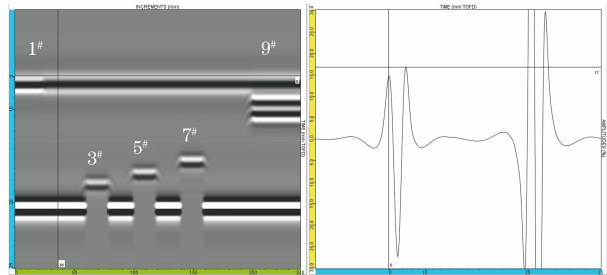


图 8 基于覆材侧的 TOFD 检测仿真结果

由图8可知,在该检测工艺参数下,1<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>缺陷能很好地检出,其中3<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>图像符合典型下表面开口缺陷的形貌,2<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>缺陷由于埋深为1~4 mm,且根据理论计算直通波盲区为6.6 mm,因此无法检出缺陷,均淹没在直通波盲区里,但是1号长横孔在D扫图和A扫图中能明显发

现,直通波处信号幅度有明显加强,其次整个D扫图中未见异种钢结合面处的回波信号。

1.3.2 基于基材侧检测

基于基材侧的 TOFD 检测仿真结果如图 9 所示。

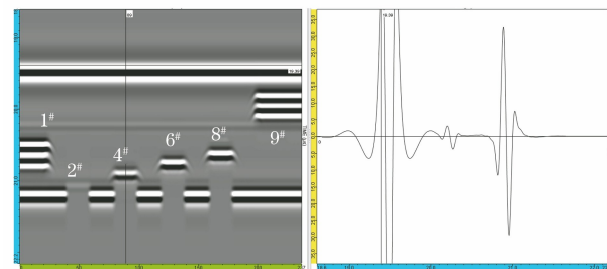


图 9 基于基材侧的 TOFD 检测仿真结果

由图 9 可知,基于基材侧的 TOFD 检测可以发现 1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>缺陷,但 3<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,7<sup>#</sup>缺陷淹没在直通波盲区内,值得注意的是,在整个 D 扫图中有明显的异种钢结合面处的回波信号,这个回波信号对检测来讲是不利的,理论模型结合面是光滑平整的,实际模型是粗糙不平整的,界面回波信号影响会变大,现将两种检测方法对缺陷的检出结果进行比较(见表 6)。

表 6 两种检测方法缺陷响应结果

缺陷编号	覆材侧检测				基材侧检测			
	长度/mm	高度/mm	深度/mm	信号幅值/pts	长度/mm	高度/mm	深度/mm	信号幅值/(pts)
1 <sup>#</sup>	28.0	—	—	—	29.0	1.9	15.0	$2.23 \times 10^{-3}$
2 <sup>#</sup>	—	—	—	—	19.0	0.9	18.9	$1.10 \times 10^{-4}$
3 <sup>#</sup>	19.8	2.0	17.8	$1.08 \times 10^{-3}$	—	—	—	—
4 <sup>#</sup>	—	—	—	—	19.0	1.9	17.7	$7.80 \times 10^{-4}$
5 <sup>#</sup>	19.0	3.0	16.7	$1.28 \times 10^{-3}$	—	—	—	—
6 <sup>#</sup>	—	—	—	—	19.2	3.0	16.8	$1.23 \times 10^{-3}$
7 <sup>#</sup>	19.5	4.1	15.8	$1.43 \times 10^{-3}$	—	—	—	—
8 <sup>#</sup>	—	—	—	—	19.6	3.9	15.9	$1.39 \times 10^{-3}$
9 <sup>#</sup>	44.2	2.4	7.6	$1.98 \times 10^{-3}$	44.0	2.3	7.5	$1.68 \times 10^{-3}$

从表 6 可以看出,采用覆材侧或基材侧 TOFD 检测时,对于缺陷的几何尺寸测量均具有较高的精度,误差在 1 mm 以内,但基于覆材侧检测缺陷信号回波强度明显强于基于基材侧检测缺陷信号回波强度,部分数据相差一个数量级,原因在于基于覆材侧的 TOFD 检测具有聚焦声场,能量较为集中。

1.3.3 TOFD-D 扫图有效可视区域的对比

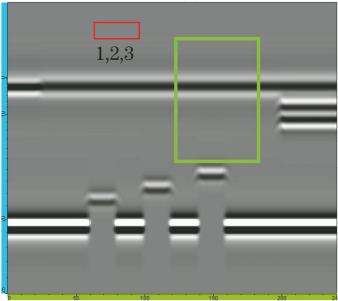
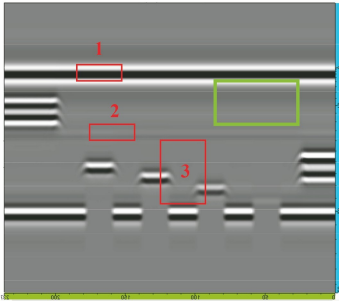
NB/T 47013.10—2015 中关于复合板 TOFD 检测主要关注的是基材对接接头部分,因此有必要对两种检测方法的有效可视区域进行对比分析(见表 7)。

从表 7 可以看出,覆材侧检测有效可视区域范围明显大于基材侧检测的,异种钢结合面信号和焊缝不锈钢部分信号均被直通波盲区所覆盖,基材侧检测 3 处非有效区域不相互重叠,占据了 D 扫图中大部分面积,其次 TOFD-D 扫图在工件厚度方向上不是按比例设置的,进一步造成了基材焊接接头可视部分的压缩。

1.4 小结

采用 CIVA 仿真技术对覆材侧和基材侧两种检测工艺进行了研究,结果表明:从声场能量、缺陷响应、D 扫图有效可视区域等 3 个方面来讲,覆材侧检测较基材侧检测具有明显的优势。

表 7 两种检测方法有效可视区域对比

检测方法	D 扫图	非有效可视区域	有效可视区域
覆材侧		1 为直通波盲区； 2 为异种钢结合面信号 (淹没在直通波盲区中)； 3 为焊缝不锈钢部分 (淹没在直通波盲区中)	见图中绿色方框范围
基材侧		1 为直通波盲区； 2 为异种钢结合面信号； 3 为焊缝不锈钢部分	见图中绿色方框范围

2 对比试块验证

基于上述 CIVA 仿真结果与结论，采用 20 mm (17 mm+3 mm)厚不锈钢复合板对比试块进行实际 TOFD 检测验证，分别从覆材侧和基材侧进行扫描，并对结果进行比对分析。比对试块尺寸示意如图 10 所示，检测设备为：南通友联 PXUT-920 TOFD 检测仪，7.5 MHz、 $\phi$  6 mm 探头一对，70°楔块一对，编码器一个。20 mm(17 mm+3 mm)厚对比试块检测结果如图 11 所示。

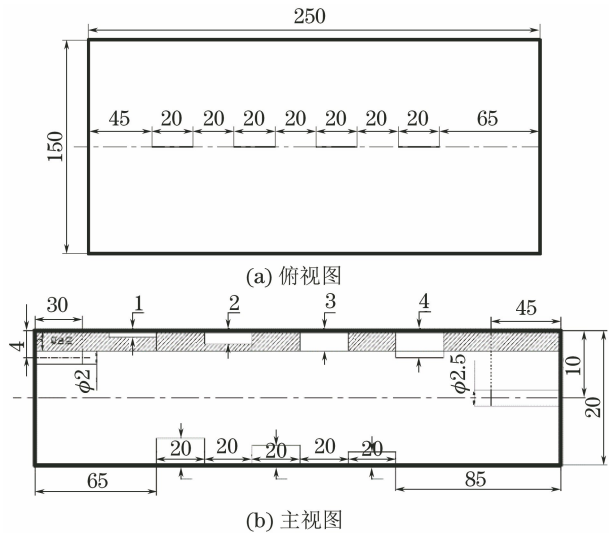


图 10 20 mm(17 mm+3 mm)厚不锈钢复合板对比试块尺寸示意

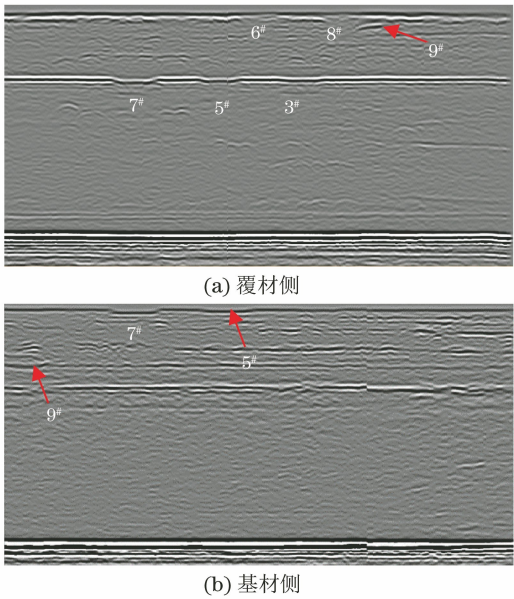


图 11 20 mm(17 mm+3 mm)对比试块检测结果

从图 11(a)可以看出，基于覆材侧检测可以明显发现 9<sup>#</sup>长横孔(埋深 10 mm)，覆材侧 6<sup>#</sup>，8<sup>#</sup>矩形槽(埋深 3,4 mm)，基材侧 3<sup>#</sup>，5<sup>#</sup>，7<sup>#</sup>矩形槽(埋深 2,3,4 mm)，未检测出 1<sup>#</sup>长横孔，因此可以得出表面盲区为 3 mm，小于理论计算表面盲区 6.6 mm，未发现异种钢界面回波信号，整个图谱具有较高的信噪比。

从图 11(b)可以看出，缺陷检出率明显偏小，仅检出 5<sup>#</sup>，7<sup>#</sup>，9<sup>#</sup>缺陷，同时 9<sup>#</sup>长横孔易受杂波信号干扰，基材侧 5<sup>#</sup>，7<sup>#</sup>矩形槽(3,4 mm)可见，表面盲

区同样为 3 mm,覆材侧矩形槽未见明显回波信号,同时整个图谱中存在明显的连续异种钢界面回波信号,相比于 CIVA 仿真,信号更为强烈,且存在多层界面波,这是由于焊接过程中异种钢的结合面不像仿真中的光滑、平整、无缺陷和无杂质,这类界面回波信号会影响整个图谱的信噪比,且有效可视区域较小,对缺陷的定量、定性都极为不利。

对比试块的验证结果表明:基于覆材侧的复合板 TOFD 检测具有明显的优势,与 CIVA 仿真结果具有较高的吻合性。

3 现场检测应用

根据 CIVA 仿真优化和对比试块验证的 TOFD 检测工艺,对某化工企业一台 500 m<sup>3</sup> 环氧丙烷不锈

钢复合板球罐进行开罐后基于覆材侧的 TOFD 检测,该球罐规格为 Di9900×(17+3) mm,材料为 Q345R+304 不锈钢,TOFD 检测抽查 45 m,对于扫查面盲区采用手工超声检测(UT)和渗透检测(PT)进行补充检测,对于底部盲区采用两侧偏置非平行扫查进行补充检测,TOFD 检测结果如表 8 所示,球罐的 TOFD 检测 D 扫图如图 12 所示。

表 8 TOFD 现场检测结果

缺陷 编号	缺陷位 置/mm	埋藏深 度/mm	指示长 度/mm	自身高 度/mm	评定 级别	备注
1 <sup>#</sup>	478.6	9.7	38.3	3.8	Ⅲ	埋藏缺陷
2 <sup>#</sup>	380.6	10.4	43.3	3.1	Ⅲ	埋藏缺陷
3 <sup>#</sup>	34.8	0	29.9	7.1	Ⅲ	表面开口缺陷
4 <sup>#</sup>	619.9	7.7	43.8	4.7	Ⅲ	埋藏缺陷

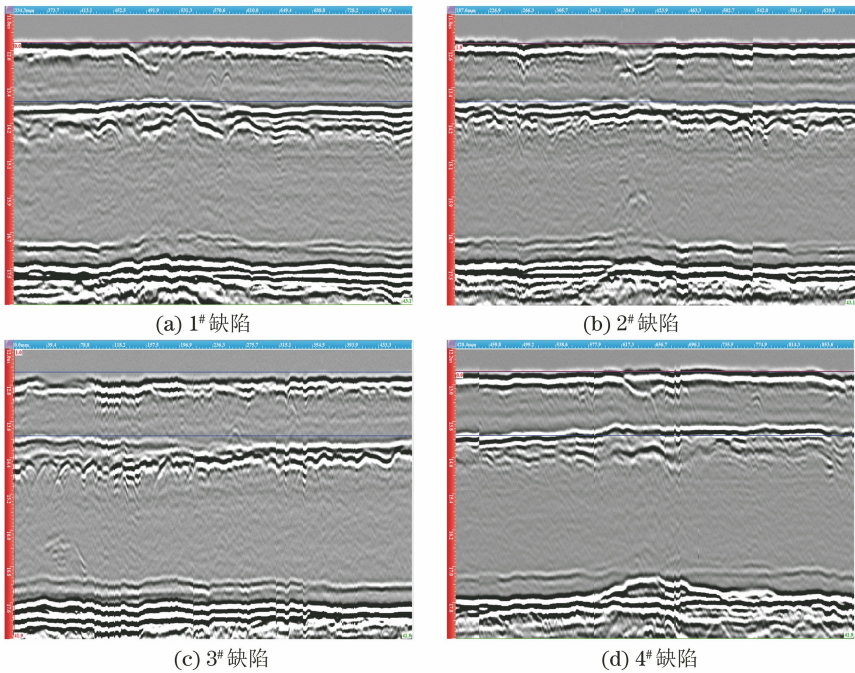


图 12 500 m<sup>3</sup> 球罐的 TOFD 检测 D 扫图

根据表 8 和图 12 可以看出:TOFD 检测共发现 4 处超标缺陷,根据 NB/T 47013.10—2015 评定为Ⅲ级,需要进行返修处理;采用基于覆材侧的复合板 TOFD 检测工艺,异种钢界面回波与直通波相互叠加,有效可视区域范围增大,盲区减小,缺陷图谱清晰,具有较高的信噪比。

4 结语

针对不锈钢复合板球罐基材侧 TOFD 检测存在的问题,提出了基于覆材侧的 TOFD 检测技术。采用 CIVA 仿真检测工艺,进行了对比试块验证和现场检测应用,结果表明:基于覆材侧的检测工艺具有声

场能量集中、缺陷检测灵敏度高、信噪比高、有效可视区域大等优势,检测工艺是复合板球罐对接焊缝有效且重要的检测手段之一,对于广泛地开展不锈钢复合板球罐覆材侧 TOFD 检测具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 唐飞阳亮,王波,魏培生.球形储罐定期检验中无损检测技术的组合应用[J].无损检测,2019,41(2):65-67.  
[2] 张勇芳,戴翔,罗更生.球形储罐定期检验中的 TOFD 检测[J].无损检测,2018,40(3):41-45.  
[3] 程高飞.基于 CIVA 平台的材料中超声检测声场分布和小缺陷响应建模仿真及实验研究[D].杭州:浙江大学:2017.