

# 海洋工程超声相控阵检测工艺认可要求

金 磊<sup>1</sup>, 张 迪<sup>2</sup>, 郑 玲<sup>3</sup>, 张 健<sup>4</sup>

(1.烟台中集来福士海洋工程有限公司,烟台 264000;2.中国船级社实业公司青岛分公司,青岛 266071;  
3.大连华锐重工起重机有限公司,大连 116052;4.中兴海陆工程有限公司,大连 116000)

**摘要:**超声相控阵检测(PAUT)的可靠性取决于检测工艺,各个船级社针对此技术都提出了工艺认可的要求。相控阵检测工艺认可是相控阵应用的必要手段,通过认可过程,能让相关方了解相控阵的优缺点,对相控阵的推广极为有利。对检测技术进行工艺认可的方案及实施步骤,有助于相关检测人员了解海洋工程企业的无损检测特点。

**关键词:**超声相控阵检测;工艺认可;海洋工程

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号:1000-6656(2019)01-0006-03

## The Requirements of Phased Array Ultrasonic Testing Procedure Qualification in Offshore Industry

JIN Lei<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>2</sup>, ZHENG Ling<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>4</sup>

(1.Yantai CIMC Raffles Offshore Engineering Co., Ltd., Yantai 264000, China;  
2.CCS Industrial Cooperation Qingdao Branch, Qingdao 266071, China;  
3.Dalian Huarui Heavy Industry Crane Co., Ltd., Dalian 116052, China;  
4.Zhongxing Sea-Land Engineering Co., Ltd., Dalian 116000, China)

**Abstract:** The reliability of phased array ultrasonic testing (PAUT) depends on the testing procedure, and almost all the ship classification societies have required that this technology be procedure qualified because the qualification is necessary for the effective application of the PAUT. Through the qualification process, the related applicants can understand the advantages and shortcomings of the PAUT, which is very helpful for the popularization of the technique. The concrete schemes and steps are introduced in the paper to benefit related NDT personnel to understand the characteristics of NDT in offshore engineering enterprises.

**Key words:** phased array ultrasonic testing; procedure qualification; offshore industry

## 1 海洋工程行业相控阵的应用

相控阵检测技术发展迅速,在各行各业都得到了广泛应用。不少海洋工程制造企业也引入了相控阵检测,海洋工程产品焊缝具有各种复杂的几何结构,有时焊缝的可接近性受限。相比常规超声检测,相控阵对这些焊缝进行检测具有一定的优势。目前,在海洋工程制造行业引进相控阵检测的企业包括:江南造船(集团)有限责任公司、上海外高桥造船有限公司、大连船舶重工集团有限公司、青岛北海船

舶重工有限责任公司、中远船务工程集团有限公司、烟台中集来福士海洋工程有限公司等。检测的主要对象有:FPSO(浮式生产储油卸油装置)模块管对接、钻井平台小径管、甲板纵骨角焊缝横向裂纹、中厚板对接焊缝、矿砂船货舱 CM(建造监控)点角焊缝,LPG(液化石油气)液罐对接焊缝、螺栓检测等。

## 2 工艺认可的必要性

在制造业中,关键工序是指:①对成品的品质、性能、功能、寿命、可靠性及成本等有直接影响的工序;②产品重要品质特性形成的工序;③工艺复杂,品质容易波动,对工人技艺要求高或总是发生较多问题的工序。

随着无损检测技术的不断发展,各种新工艺、新

收稿日期:2018-09-26

作者简介:金 磊(1973—),男,工程师,主要从事无损检测工作

通信作者:金 磊,leellenking@126.com

技术不断出现。这些方法要在检测中应用,必须经过工艺评定或认可,以保证其检测的可靠性、再现性和准确性。

相控阵检测作为无损检测的一项新技术,其检测方法具有灵活性与多样性。海洋工程行业相控阵检测标准主要基于 ISO(国际标准化组织)标准和 ASME(美国机械工程师协会)规范的要求,这些标准中并未明确规定特定结构检测参数。在这种情况下,传统的模式(持证人员+工艺文件审核)不足以保证整个检测的可靠性、再现性和准确性,解决这些矛盾的可行方法就是工艺认可。

中国船级社 2017 年出版了《船用厚板焊接接头衍射时差技术及相控阵超声联合检测技术指南》和《衍射时差法和相控阵超声检测技术应用指南》,美国船级社 2018 年出版了《船体焊缝无损检测导则》。这几个规范中都对相控阵超声检测(PAUT)工艺认可做出了要求及具体的认证规定。挪威船级社规范 DNVGL-CG-0051《无损检测》也提出了相控阵工艺认可的要求,虽然没有具体的要求和规定,但在其后编制的文件中,也明确了相控阵检测工艺认可的认证规定。

### 3 工艺认可过程

#### 3.1 相控阵检测工艺规程的编写

执行无损检测工作前,首先要根据被检工件的检测要求进行无损工艺规程的编写。无损检测工艺是无损检测作业的指导性文件,是某一无损检测方法对某一产品进行检测的程序性文件。无损检测工艺规程实际上是对检测方法和要求进行统一的规定,以符合有关规范和标准的要求。工艺详细规定了检测中的各个细节及参数。严格控制工艺参数及影响参数波动的各种因素,保证检测结果的再现性是检测结果可靠性的评价依据。相控阵检测工艺内容主要包括:适用范围、检测比例、检测时机、检测材料及焊接工艺、人员要求、仿真设计、设备耗材需求、校准试块及校准方法、检测使用技术及参数、检测步骤、数据评定、验收标准、过程记录和报告等。

人员的要求包括两个方面,一方面要求持证上岗,另一方面要求能力展示。目前,国内相控阵培训机构很多,证书也各有不同,都主要是按照 ISO 9712—2005《无损检测人员的资格鉴定与认证》,ASNT SNT-TC-1A《无损检测人员资格鉴定与认证》和 CCS(中国船级社)要求认证的,培训机构有

SGS(通标标准技术服务有限公司)、TUV NORD(德国技术监督协会)、CSWIP(焊接与检验从业人员资格认证)、中国无损检测学会、中国船级社无损检测人员资格认证考试中心等。但人员资格证书并不与所使用的设备挂钩,目前市场上国内外相控阵检测设备品牌很多。不同设备的操作方式甚至检测理念不同,软件(设备软件,设置软件,评定软件)处理方式也不同,设备功能也具有多样性,如 DDF(动态深度聚焦)、FMC(全矩阵捕捉)、TFM(全聚焦法)等。设备操作方法的千差万别造成了特定的检测设备操作困难,持证人员必须经过所使用设备厂家的培训方可进行检测操作。所以各船级社一般都要求,即使是持证检测人员,也需要证明其熟悉检测设备的操作以及具有相应的检测经历。

相控阵超声检测探头及楔块种类有:线性探头、面阵探头、双晶线阵探头、双晶面阵探头、平楔块、斜楔块、凸面楔块、凹面楔块等,其设置具有灵活性与多样性,在工艺规程中应规定参数的取值或取值范围。相比 ISO 标准和船级社规范,ASME 规范的要求比较详细。笔者以 ASME 规范为例,列举了规程中所涉及的参数及要求。

在 CCS 规范和 ABS(美国船级社)规范中都要求列出详细的检测步骤(见表 1~4,表中“×”表示“是”),以方便引导现场检测人员的操作。操作采集的数据应包括设置文件及扫查的原始数据文件,数据的评估方法和验收准则应符合相关船级社规范的要求,以便各相关方人员进行评定和审核。

#### 3.2 预审核

相控阵检测工艺规程准备完成后,需递交给相关方进行审核。将工艺规程提交给审核方,同时需将拟参与项目的人员名单、资格证书、设备商培训证明、相控阵检测工作经历、设备及耗材清单、设备校准证书、耗材合格证书等内容递交给审核方进行认可。

经过预审核,对审核方提出的意见及建议进行修改或澄清,完成文件审核。

#### 3.3 工艺仿真和现场演示

工艺仿真主要是利用计算机软件来模拟波束在检测区域的体积覆盖情况的,在试块验证前必须完成波束覆盖仿真的验证工作,并将波束覆盖仿真验证结果以报告形式提交认可单位审核。工艺仿真报告的内容应包含:仿真软件简介、探头和楔块的型号及参数、工艺设置参数,波束覆盖结果等。

表1 手动超声波检测工艺的要求

要求	重要变素	非重要变素
被检焊缝的参数,包括母材厚度及产品形式 (管子、平板等)	×	...
被检表面	×	...
技术方法(直射波、斜射波、接触法、 液浸法等)	×	...
被检材料中的角度和波型	×	...
探头的类型,频率以及晶片的尺寸和形状 特殊探头、楔块	×	...
超声设备	×	...
校准(校准试块及方法)	×	...
扫查方向以及范围	×	...
检测方式(手动或自动)	×	...
区分缺欠与几何反射信号的方法	×	...
指示定量的方法	×	...
使用计算机方法增强数据采集的方法	×	...
扫描重叠(仅当减小时)	×	...
检测人员操作能力的需求	×	...
检测人员的资质	...	×
检测面与校准试块表面状况	...	×
耦合剂的名称和类型	...	×
自动报警或(和)记录仪器的使用	...	×
记录,包括最少需要记录的校准数据 (如设备设置)	...	×

表2 使用线阵相控阵探头进行线性扫查的  
检测工艺要求

要求	重要变素	非重要变素
探头(晶片的尺寸、中心距、数量及间距)	×	...
聚焦范围(定义平面、深度或声程模式)	×	...
虚拟孔径尺寸(晶片号、晶片宽度及有效尺寸)	×	...
楔块切割角度	×	...
楔块材料	×	...
楔块高度(z向尺寸)	×	...
楔块屋顶角	×	...
探头分离(双晶探头)	×	...
楔块外形	×	...
楔块偏置(相对测量基点)	×	...
扫查计划	×	...
焊缝轴线的参考点标注	...	×
线扫的额外要求		
扫描角度	×	...
孔径(开始和结束晶片的编号)	×	...
孔径变化的增量(晶片步进的量)	×	...
扇扫的额外要求		
扫描的角度范围	×	...
扇扫的角度步进(角度增加的增量)	×	...
孔径中晶片编号(第一个及最后一个)	×	...

表3 基于断裂机理验收标准的超声检测程序要求

要求	重要变素	非重要变素
扫查计划	×	...
计算机软件版本	×	...
扫查技术(自动/半自动)	×	...
缺陷定量(长度)方法	×	...
探头机械固定装置(制造商及型号)	×	...
扫查架及引导机械	×	...

表4 中国船级社规范检测工艺规程关键因素表

序号	相关因素
1	产品范围(工件形状、规格、材料、壁厚等)
2	依据的标准、法规
3	检测设备、器材及校准、核查、运行核查或检查的要求
4	检测工艺(探头配置、扫查方式、厚度分区等)
5	检测前的表面准备要求
6	盲区检测方式及工艺试验报告
7	横向缺欠检测方式及工艺试验报告
8	检测数据的分析和解释
9	缺欠评定与质量分级

实物现场演示的目的包括两方面,一方面是对整个检测系统的可靠性验证,另一方面是功能性验证。这两种验证可以分别进行,也可以结合进行,所有的相关操作演示应尽量放在一起。

可靠性验证是对整个检测系统的可靠性进行验证,包括其检出率,误报率等,从而衡量检测系统的检测能力是否满足要求,验证检测人员的业务能力,判断参与检测的人员是否能够独立完成自己职责范围内的工作,验证系统的可再现性,即通过不同人员对相同试板的数据采集及处理工作,进行设备比对及人员比对,以验证检测的可再现性。以ASME规范为例,该工作称为检测系统鉴定,分为3个等级,即低级严格等级鉴定,中级严格等级鉴定和高级严格等级鉴定。鉴定主要包括技术论证材料以及操作演示。对于低级严格等级鉴定,仅需提供技术论证材料,无需操作演示。对于中级严格等级鉴定和高级严格等级鉴定,需提供技术论证材料并进行操作演示。中级严格等级鉴定和高级严格等级鉴定对操作演示试块及结果的要求是不同的。对于中级严格等级鉴定,试块应是按实际焊接工艺加工的焊缝试块,其至少包含3种缺欠类型(表面开口型,埋藏型以及底面开口型),缺欠长度及高度亦有具体要求。应委托有资质的专业厂家制作试块,并要求出具缺

(下转第38页)

表 1 球罐检测结果

mm

项目	缺陷编号		
	1#	2#	3#
缺陷长度	TOFD 550	300(150.0~450.0)	—
	相控阵 8.5(100.5~109.0)	29.5(18.5~48.0), 49.5(70.5~120.0)	11.0(172.5~183.5)
缺陷高度	TOFD 2.2(15.8~18.0)	3.9(14.1~18.0)	—
	相控阵 3.8(14.2~18.0)	3.8(14.2~18.0), 4.0(14.0~18.0)	2.3(13.3~15.6)
埋藏深度	TOFD 15.8	14.1	—
	相控阵 15.7	14.2, 14.0	13.3

磨至肉眼看不见,打磨消除结果以渗透检测结果为准。通过现场验证,缺陷自身高度的测量结果与表 2 中 TOFD 测高结果更为接近,缺陷自身长度的测量结果与表 2 中相控阵长度的测量结果更为接近。裂纹缺陷返修焊补后,对缺陷返修部位进行超声和磁粉检测,检测结果均合格。

#### 4 结语

实际检测过程中,应采用多种检测手段对缺陷进行定量检测,但也应注意各种检测手段的优化选择,

(上接第 8 页)

欠尺寸证明,80%的检出率,20%的误报率即满足要求。对于高级严格等级鉴定,试块应与被检结构相一致,且应有足够的试块及缺欠数量。缺欠的位置、尺寸等需协商确定。一般规定 90%置信等级下 95%的缺欠检出率。一般按照 ASME 规范规定的中等严格等级的要求进行鉴定,在此情况下,需设计演示试块,包括试块数量、规格、缺欠数量及缺欠尺寸等内容。

规程现场演示应邀请相关方、审核机构、业主、第三方代表等。演示过程应根据相控阵检测工艺规程的步骤进行,包含数据的分析和评定。检测的结果应与缺欠试块的原始数据作比较,并符合中等严格等级的要求。

实物现场演示通常采用射线检测技术与相控阵技术对同一验证试块进行检测,并对检测结果进行对比验证,必要时可选用常规超声波、磁粉、渗透等检测技术进一步验证对比。需将试块验证分析报告(包括验证试块的射线检测结果、相控阵的检测结果与检测结果的对比验证结果),提交认可单位审核。试块验证报告的内容应包含:试块厚度、坡口形式、焊接工艺、检测设备参数、检测工艺参数、射线检测与相控阵检测的结果对比等。检测结果对比的内容

当现场检测过程中利用射线检测和常规超声检测技术受阻的情况下,选择相控阵检测技术和 TOFD 检测技术相结合的方法对缺陷进行精确定量是超声检测的有效辅助手段,其在压力容器等特种设备行业的检测领域有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张在东,彭国平,李洪刚,等.TOFD 技术对球罐近表面裂纹的检测 [J]. 中国特种设备安全, 2013, 29(9): 50-52.

应包含:缺欠高度(仅针对相控阵检测结果)、缺欠长度、缺欠类型、缺欠位置等。相控阵检测技术应可检出验证试块中的全部缺欠,并且缺欠的测量长度不小于缺欠实际长度。

#### 3.4 审核认可

最后根据演示结果优化并固定检测参数,修改工艺规程相关部分。通过审核后,完成工艺认可。

#### 4 现场抽查

在项目检测过程中,需进行现场抽查验证。可以使用射线或者常规超声检测技术与相控阵检测技术进行对比,按照约定的抽查方案进行现场抽查。在现场抽查过程中,如果发现现场验证结果符合率低于约定值,应立即暂停使用认可的检测工艺规程并进行整改。整改后由审核方审核,并决定是否恢复使用。当发现重大问题时,审核方有权要求停止使用认可的检测工艺规程。

#### 5 结语

相控阵检测是一项新技术,各方接受新技术都有一个循序渐进的过程。相控阵检测工艺认可是相控阵应用的必要手段。通过认可过程,能让相关方了解相控阵的优缺点,对相控阵的推广极为有利。