

# 无损检测技术在海洋工程中的应用

张曙光<sup>1</sup>, 邵建华<sup>2</sup>

(1. 中兴海陆工程有限公司, 东莞 523146; 2. 上海船舶工程质量检测有限公司, 上海 200030)

**摘 要:** 由于海上能源开发的需要, 海洋工程的装备制造已经成为国内各大船厂相互竞争的热门项目。主要介绍了无损检测技术在海洋工程项目中的应用现状, 分析了海洋工程无损检测项目在结构形式、材质、检测标准、检测人员与常规修造船无损检测的区别, 以及无损检测新技术在海洋工程项目中的应用及无损检测技术在海洋工程项目中的发展趋势。

**关键词:** 无损检测技术; 海洋工程; 应用

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)05-0069-04

## Application of NDT Technique in Marine Engineering

ZHANG Shu-guang<sup>1</sup>, SHAO Jian-hua<sup>2</sup>

(1. Zhongxing Sea-Land Engineering Co. Ltd, Dongguan 523146, China;

2. Shanghai Ship Engineering Quality Testing Co. Ltd, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Because of the needs of development on marine energy, marine engineering equipment manufacturing has become the hot competing item among major domestic shipyards. Therefore, this article is mainly compiled to introduce current application situation of nondestructive testing technology in the marine engineering project, and analyse the differences between marine engineering project and conventional ship repairing and shipbuilding project in aspects such as structure type, material, testing standard, testing technician. The state of new nondestructive testing technology application existing in the marine engineering project, as well as its research and development trend at present stage is also discussed.

**Keywords:** Nondestructive testing; Marine engineering; Application

随着国际海洋油气的发展不断向深海推进, 我国海洋工程装备制造业已经迎来重大机遇。国家在“十二五”规划中, 预计将在海洋工程中投入 2 000 亿元资金, 海洋工程装备制造业到“十二五”末期产值也将达到千亿元以上, 这对一个行业来说是一个机遇。同样, 也为无损检测技术在海洋工程项目中的应用提供了广阔的技术平台。

### 1 海洋工程的范围

海洋工程从广义上说, 所有涉及或与海洋环境有关的工程都可以归纳为海洋工程的范畴。如海洋平台、系泊系统、海底管线以及其它开发海洋资源的

设备和工程建筑(如陆地终端处理系统、海上风力发电), 可见范围还是比较广泛的。对于船舶工业系统来说, 可以分为两个大的方面, 即海洋平台和海洋工程作业船舶。

海洋平台又可以分为两类: 一类是移动式平台, 如坐底式平台、自升式平台、钻井船、半潜式平台; 另一类是固定式平台, 如钢制导管架平台、张力腿式平台、重力式平台。而系泊系统主要是指浮式储油轮的海上系泊单点结构。海底管线是指海上输送油、气、水管线, 一般分为双层管和单层管两种。这些海洋工程结构及其设备基本都是由钢质材料焊接而成, 加之由于恶劣的海况环境和工况条件, 以及难以返回陆地等特点, 使得海洋工程在结构材料选择、制造质量方面的要求非常高。制造原材料及重要钢结构焊缝在无损检测时, 检测范围近于 100%, 验收标

收稿日期: 2013-03-11

作者简介: 张曙光(1955—), 男, 技术总监, 高级工程师, 主要从事无损检测新技术、新工艺的研究工作。

准也要求在一个比较高的水平。

## 2 无损检测技术在海洋工程的应用现状

由于海上平台及设施的恶劣作业环境及工况条件,在建平台和在役平台及设施的检验评估及维修工作显得尤为重要。因此,国家安监总局以及各船级社的入级规范都着重强调并且制定了建造检验和在役检验的规定和要求。特别对在役平台的检验,都是从平台以及设施一投入使用就开始了此项工作,并规定了年检和特检监控频度,以保证平台及设施的安全使用。对于在建的平台完全可以按照各船级社的建造规范的要求采用常规的无损检测方法(UT,MT,RT,PT)来完成检验。当然,有的船级社也已经在做推广新设备、新标准、新技术、新工艺的准备工作。

在役海洋平台的检验较在建海洋平台的检验还是有一定区别的:在役海洋平台检验一般分为水上检测和水下检测两部分。检测内容主要有结构完整性检验、结构测厚、焊缝的无损检测、阳极防腐检测等。目前采用的检测方法主要有目视检测(目视检测是最基本的检测,而其它所有的检测都是在目视检测完成之后再行)、超声波测厚、磁粉检测、超声波检测、交流电磁场检测(ACFM)、阳极电化学电位测量等。其中磁粉检测和交流电磁场检测(ACFM)都是应用于表面裂纹的检测方法。但 ACFM 检测时,探头可以离开检测表面 5~10 mm,且无需对有涂层的表面进行处理。具体到水下检测的可靠性,有资料试验统计表明:仅就磁粉检测与 ACFM 检测而言,水下检测要比水上检测的可靠性低。检验检测所依据的规范为船级社相关入级规范要求。

## 3 海洋工程及其无损检测的特点

就目前而言,我国海洋工程结构在建造上大多采用了钢结构制造。其结构特点及与常规修造船的无损检测的区别主要体现在以下方面。

### 3.1 结构形式和材质

海洋工程从结构形式上分为移动式和固定式结构。其所有结构件的连接除了采用板状和管状对接全熔透焊缝外,管状 TKY 焊接接头的连接形式也占了一定的比例,并且都是重要的强力结构(如平台导管架,平台上部组块框架等)。由于结构属于高强度结构,故所用的钢材采用了低合金高强度钢,如 D36, E36, E690, EQ56 和 Z 向钢(Z35)等,按交货状

态有正火态和热控轧制态(TMCP 钢);板材厚度一般在 20~200 mm 间;焊接方法采用埋弧自动焊(SAW)、手工电弧焊(SMAW)和药芯焊丝保护焊(FCAW-S)等。由于随着材料强度及板厚的增加,焊接难度系数相应提高,各种缺陷出现的机率也会相应增加,甚至出现冷裂纹、热裂纹、延迟裂纹等缺陷;因此,在选择检测时机上至少要在 48 h 或 72 h 以后;而且检测时间必须严格控制,要求从焊接到最终检验进行准确追溯。

### 3.2 检测人员

常规修造船项目,检测人员只要持证就可以上岗,而对颁证机构没有特殊的、严格的要求,即国家技术监督局的证书,中国船级社颁发的证书,国外无损检测认证机构发的证书等均可以。而海洋工程的无损检测对人员的要求相对严格,如挪威 DNV 船级社管辖的海洋工程就必须通过 DNV 的现场考核认证后,才能有资格参加现场操作,而且必须由监督员(Ⅲ级人员)对每个操作人员和每种检测方法每月、每季度(方法不同)进行一次抽查验证并作出验证结论;12 个月的验证结论作为当年的考核依据,对达到要求的人员保留资格,达不到要求的需离岗重新接受培训考核,考核合格后保留资格。美国 ABS 船级社对自升式(JACK-UP)系列海洋平台规定,检测人员必须取得 ABS-UT-TKY-Ⅱ级资格证书才有资格从事管状结构焊缝(T、K、Y 型管节点焊缝)的技术操作;同时极为注重无损检测人员的职业道德及素质培训。同样,中国(CCS)船级社规定:从事管状结构焊缝(T、K、Y 型管节点焊缝)的现场技术人员,必须在取得 UT-Ⅱ资格证书后,实践操作时间满 18 个月才能报名参加 UT-TKY-Ⅱ资格证书的认可考试。

### 3.3 采用的标准

常规修造船的检测标准采用船标或国标即可一步完成。海洋工程项目根据入级船级社的不同以及船东的要求不同而不同。目前涉及海洋工程制造最大的两家船级社为挪威 DNV 船级社和美国 ABS 船级社。对于 DNV 船级社来讲一般选用 DNV-OS-C401<sup>[1]</sup>和 DNV-OS-D101<sup>[2]</sup>及 DNV-OS-E101<sup>[3]</sup>标准。例如:根据 DNV-OS-C401 标准的要求,验收标准既要执行 ISO 5817<sup>[4]</sup>标准,又要根据 ISO 5817 标准分别执行等效的 EN ISO 11666<sup>[5]</sup>, EN ISO 23278<sup>[6]</sup>, EN 23277<sup>[7]</sup>等相应的欧盟标准。对于美国 ABS 船级社则会选用美国焊接学会(ABS)标准,

而对一些有特殊要求的部位如桩腿、克令吊及钻井平台的井架等重要的强受力部位的超声波检测,船东则会提出选用美国石油学会(AWS)标准,而船体部分则采用 ABS 标准,一些工艺管道和动力管道却要使用美国机械工程协会(ASME)标准以及美国石油学会(API)标准。而在使用这些标准和无损检测程序前必须对操作人员进行培训,经书面考试合格达到认证体系的要求后,才能上岗操作,且考试成绩要存档备查。

### 3.4 检测工艺

常规修造船项目和海洋工程项目由于选用检测标准不同,因此检测工艺也不完全相同。就拿超声波检测选择探头角度来说,对于常规造船的检测,基本上选用一种角度探头,最多两种探头;而对于海洋工程的检测,根据钢板的厚度、焊接接头的坡口型式不同,必须组合使用  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  探头;检测时至少使用三个探头,有时需要同时使用四个探头;对于角接焊缝必须进行双面扫查,而且对每一种缺陷都要进行性质评定;对某些复杂节点焊缝检测前的缺陷定位,甚至要用特殊工具进行现场 1:1 作图后,才能确定缺陷在焊缝中的大致位置。要提前预知缺陷,这对检测人员的技术水平和工作经验要求非常高。特别是随着大量的使用高强度钢、TMCP 钢以及 Z 向板的应用,各种裂纹尤其是横向裂纹出现的机率大大增加。所以除了常规的纵向检测外,还必须增加非常规的横向扫查——即探头骑在焊缝上进行检测以发现横向裂纹。

## 4 无损检测技术在海洋工程中的发展趋势

### 4.1 无损检测新技术在海洋工程中的应用

无损检测新技术,如相控阵超声检测技术(PAUT)和超声波时差衍射法(TOFD)检测技术,已经在一些较大规模的海洋工程项目中得到了应用。如中远船务集团建造的,目前国际上钻井最深(3 050 m)的钻井船“大连开拓者”号的重要结构和关键结构中使用了 PAUT 检测技术和 TOFD 检测技术,检测的可靠性得到了较大的提高。对钻井动力模块的结构焊缝的检测,其钢板厚度在 50~120 mm,组合采用 PAUT 和 TOFD 技术进行检测,其可以有 3 种方法同时显示一个缺陷,对缺陷的定位、定量的准确性有了很大的提高,同时工作效率也得到了大幅度的提高。将相控阵超声检测技术应用于检测全船管系的小径管环焊缝,检测直径范围

76~200 mm;管壁厚度 6~50 mm,取得了非常好的检测效果,达到了船级社的要求,可以完全或部分代替射线检测;该方法既提高了检测效率,又消除了不安全因素,还保证了工作环境不受到污染。

### 4.2 无损检测技术在海洋工程中的发展趋势

(1) 管状 TKY 节点焊缝传统检测技术的完善提高及新检测方法研究

管状 TKY 节点焊缝在海洋工程结构中是非常重要的节点,但遗憾的是其传统超声波检测方法的可靠性并不十分理想,因此,对管状 TKY 节点焊缝的检测有待进一步完善和提高。据资料报道,一些专家和学者在对管状 TKY 节点焊缝利用相控阵技术进行研究,并取得了初步成果。文献[8-9]为解决 TKY 管节点焊缝超声检测缺陷定位难的问题,分析了节点焊缝超声相控阵检测的声束覆盖效果及对反射回波的定位方法,并制作了 TKY 试块进行试验验证。

(2) 大量推广 TOFD 检测技术的应用

随着我国海洋工程技术的不断提高,向深海发展建造海上钻采平台已经成为趋势。据悉,就目前我国在建和将要建造的项目来看,仅导管架一项的建造吨位就在 20 000 t 以上,高度超过 200 m。导管架管径最大超过 3 m,管壁厚度最厚处超过 100 mm。可想而知检测量是巨大的,而 TOFD 技术的大量推广应用<sup>[10]</sup>,将对较厚平板的对接焊缝的检测和卷管接长焊缝的检测发挥很大的作用,且检测速度和检测质量都能得到较大的提高。当然检测标准的制定和操作人员资格培训也是必须要跟上的。

(3) 采用相控阵超声检测技术<sup>[11]</sup>对海洋平台重要和关键结构中的奥氏体不锈钢及双相不锈钢工艺管线焊缝和异种钢结构焊缝的超声检测技术研究,以尽快取代常规超声检测和射线照相检测的方法。近年来,超声多维成像技术中的 C 扫描、D 扫描、P 扫描成像技术发展迅速,其中的面阵相控阵扫描技术利用面阵相控阵探头的可编程控制特性可完成不规则工件截面的完整扫查,而不需要移动探头,在检测空间受限或工件结构复杂时技术优势明显。

(4) 利用导波技术以及远场涡流技术对在役平台工艺管线进行检测及评估

超声导波检测系统是近年快速发展起来的检测新技术,常用于快速检测内部和外部腐蚀以及轴向和周围的裂纹,在检测裂纹和金属损失(大于横断面的 3%)方面有很多应用,特别在对在役海洋平台工



艺管线进行长距离检测时具有其技术优势<sup>[12]</sup>。远场涡流检测是基于远场涡流效应的一种管道检测新技术<sup>[13]</sup>,它除了具有一般常规涡流的优点外,对铁磁性管道无需采用磁饱和等辅助方法,即可直接用内插式探头来检测管壁上的裂纹、腐蚀凹坑、磨蚀减薄等缺损,可以解决海洋平台工艺管线的在役快速探伤、测厚难题。

## 5 结语

随着海洋工程的装备制造业的大力发展,无损检测在海洋工程项目中的应用也越来越广泛。在分析海洋工程无损检测的特点的基础上,介绍了无损检测技术在海洋工程项目中的应用现状,总结了现阶段无损检测技术在海洋工程项目中的发展趋势,提出无损检测传统技术的完善提高与新技术的应用对确保海洋工程的安全可靠有着重要的意义。

### 参考文献:

- [1] DNV-OS-C401—2013 Fabrication and Testing of Offshore Structures[S].
- [2] DNV-OS-D101—2013 Marine and Machinery Systems and Equipment[S].
- [3] DNV-OS-E101—2013 Drilling Plant[S].

(上接第 33 页)

在图 2(a)所显示的缺陷长度 41 mm,深度 22.4 mm。该缺陷经返修后,发现是一个层间未熔合,并且旁边伴随着一些小气孔。图 2(b)中显示的缺陷为两段未熔合缺陷,经返修后,也证实为未熔合缺陷。图 2(c)中显示的缺陷深度为 116 mm,判定长度为 376.9 mm,经返修发现,其由夹渣与气孔组成。

当检测区域焊缝经过返修后,该处晶粒组织可能会发生变化;有时该处晶粒会变大,导致该处在图上可能会出现非正常的显示,如图 3 所示。

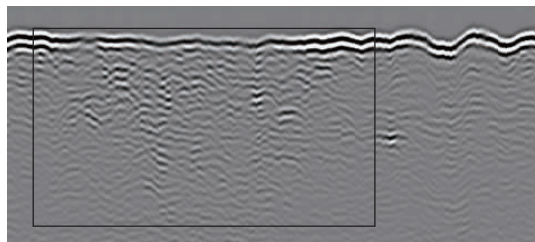


图 3 缺陷返修后的检测图

图 3 中方框内位置为返修区域。将该区域与旁边未返修区域对比可知,返修后区域内的晶粒噪声更大,因此在进行返修后的缺陷评判时,要注意该现

- [4] ISO 5817—2003 钢、镍、钛及其合金熔焊接头(不包括电子束焊接)缺陷的质量等级[S].
- [5] EN ISO 11666—2010 Non-destructive testing of welds-Ultrasonic testing-Acceptance levels[S].
- [6] EN ISO 23278—2009 Non-destructive testing of welds-Magnetic particle testing of welds-Acceptance levels[S].
- [7] EN ISO 23277—2009 Non-destructive testing of welds-Penetrant testing of welds-Acceptance levels[S].
- [8] 陆铭慧,程俊,邵红亮,等. 计算机辅助在 TKY 管节点焊缝超声相控阵检测中的应用[J]. 焊接学报, 2012(4):49-52.
- [9] 陆铭慧,邵红亮,刘勋丰,等. TKY 管接点焊缝形状模型在相控阵检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(12):13-15.
- [10] 陶红燕,张茂桐,郭强. TOFD 检验技术在海洋平台压力管道检测中的应用[J]. 新疆石油科技, 2012(4): 80-81.
- [11] 单宝华,喻言,欧进萍. 海洋平台结构超声相控阵检测成像技术的发展及应用[J]. 海洋工程, 2005(2): 107-110.
- [12] 王海波,贾巧玲,腾延平,等. 管道超声导波腐蚀检测技术应用研究[J]. 管道技术与设备, 2009(3):27-29.
- [13] 廉纪祥,沈跃. 管道远场涡流检测技术的进展[J]. 油气储运, 2004, 23(7):14-16.

象,以免造成误判。

## 4 结论

经现场实际应用结果证明,采用优化后的 TOFD 检测工艺对厚壁压力容器进行检测,能比较精准地测出各个层中的缺陷,而且对缺陷的定位较准确,能测出缺陷的位置和缺陷的长度。

### 参考文献:

- [1] 林立华. 压力容器无损检测技术[J]. 机械, 2007(34): 1-3.
- [2] 刘松平,刘菲菲,李乐刚,等. 铝合金搅拌摩擦焊缝的无损检测方法[J]. 航空造技术, 2006(3):81-84.
- [3] 刘松平,刘菲菲,李乐刚,等. 搅拌摩擦焊缝变入射角超声检测方法研究[J]. 无损检测, 2006, 28(5):225-228.
- [4] 倪进飞. TOFD 检测技术基本原理及其应用探讨[J]. 广东电力, 2007(10):17-19.
- [5] 袁涛,曹怀祥,祝卫国,等. TOFD 超声成像检测技术在压力容器检验中的应用[J]. 压力容器, 2008(2):58-60.
- [6] 郭小联. 厚壁压力容器声源定位理论分析与试验研究[C]//第 11 届中国声发射学术研讨会. 杭州:[出版者不详], 2006.