

DOI: 10.11973/wsjc202210015

# 碳钢焊缝的阵列涡流检测

邓丹<sup>1</sup>,胡振龙<sup>2</sup>,李运涛<sup>2</sup>

(1. 中国船级社实业有限公司,北京 100006;2. 中国特种设备检测研究院,北京 100029)

**摘要:**在船舶营运过程中,往往需要去除焊缝表面涂层来保证磁粉或渗透检测的准确性,工序繁琐,检测效率低,且检测后重涂涂层的防锈蚀效果必然受到影响。以 20 碳钢焊缝为试验对象,按照 ASME 标准要求设计加工人工缺陷,分别开展有无模拟涂层下的阵列涡流检测试验。试验结果表明,阵列涡流检测技术能满足船舶碳钢焊缝表面无损检测的要求,特别是在检测效率、信号显示等方面,阵列涡流检测技术具有明显的优势。

**关键词:**碳钢;焊缝;阵列涡流;涂层

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2022)10-0065-04

## Array eddy current testing for carbon steel weld

DENG Dan<sup>1</sup>, HU Zhenlong<sup>2</sup>, LI Yuntao<sup>2</sup>

(1. China Classification Society Industrial Co., Ltd., Beijing 100006, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

**Abstract:**It is often necessary to remove the weld surface coating to ensure the accuracy of detection during the operation of the ship, which is cumbersome and low detection efficiency. Moreover, the anti-corrosion effect of the recoating after detection is inevitably affected. This paper takes 20 carbon steel weld as the research object, designs and processes manual defects according to ASME standards, and carries out array eddy current detection tests with or without analogue coating. The experimental research has shown that array eddy current testing technology can meet the surface testing requirements of ship carbon steel weld, especially has obvious advantages in terms of testing efficiency and signal display.

**Key words:**carbon steel; weld; array eddy current; coating

船舶营运过程中,长期处于海水浸泡、非常温等环境中,焊缝很可能会发生材料劣化、蠕变开裂、疲劳断裂。焊缝表面裂纹作为一种严重威胁船舶安全的缺陷,通常使用磁粉或渗透方法来进行检测。在船舶建造阶段对船舶焊缝表面进行磁粉检测、渗透检测时,现场对被检工件表面光照度有要求,检测结果不便于数字化处理,且由于化学试剂的使用,检测工序对环境有一定污染;在船舶营运过程中,对船舶焊缝表面进行磁粉检测、渗透检测时,除了存在上述建造阶段的局限,往往还需要去除焊缝表面涂层来

保证检测结果的准确性,工序繁琐,检测效率低,且检测后重涂涂层的防锈蚀效果必然受到影响<sup>[1-2]</sup>。

涡流检测作为一种高效、绿色、环保的无损检测技术,操作便捷,不需要进行表面耦合,适用于大部分条件苛刻的检测环境,在工业各领域都有广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。在船舶领域,涡流检测技术的一个重要特点就是能够隔着一定厚度的涂层对焊缝表面与近表面进行初步检测,世界上几个主要船级社都已认可了这种方法,如英国劳氏船级社、美国船级社和挪威船级社等都已发布了相关涡流检测技术指导性文件<sup>[5]</sup>。阵列涡流检测将多个涡流检测线圈进行特殊设计封装,借助计算机对激励次序进行快速控制和处理,从而实现对材料和零件的快速、有效检测,是一种结合计算机技术、自动控制技术、多传感器融合

收稿日期:2022-08-09

作者简介:邓丹(1987—),女,硕士,工程师,主要从事超声、电磁无损检测技术的研究工作

通信作者:胡振龙,18910756379@163.com

技术、智能信号处理技术的综合技术<sup>[6]</sup>。

船舶焊缝疲劳裂纹大多发生于表面,笔者参考标准 ASME BPVC. V—2019:第 8 条 强制性附录 X《阵列涡流检测铁磁性和非铁磁性焊缝表面开口缺陷》制作对比试样,并在此基础上对对比试样进行阵列涡流检测试验,研究分析了有无模拟涂层下不同位置刻槽的检测能力。试验结果表明,阵列涡流检测技术能满足船舶碳钢焊缝表面无损检测的要求,可检测出有危险性的裂纹缺陷,可穿透表面非导电涂层,特别是在检测效率、信号显示等方面,阵列涡流检测技术具有明显的优势。

## 1 带涂层焊缝阵列涡流检测系统

### 1.1 检测仪器及探头

阵列涡流检测试验采用由 Eddyfi 公司生产的 Ectane 型阵列涡流检测仪,探头为 ECA-PDD-056-250-032-N03S 型衬垫式阵列涡流探头,检测仪器及探头实物如图 1 所示。所用探头可适应焊缝的走向,线圈直径为 3.5 mm,线圈数量为 32,通道数量为 60(30 个位纵向,30 个位横向),可同时检测出不同方向的缺陷,适用于焊缝检测区域宽度(含焊缝和热影响区)不超过 56 mm。



图 1 检测仪器及探头实物

### 1.2 对比试样的制作

参考标准 ASME BPVC. V—2019:第 8 条 强制性附录 X 中对比试样制作要求(见图 2),选用 20 碳钢材料制作对比试样,分别在焊缝、焊缝熔合线、热影响区中加工平底孔和表面刻槽(ASME 标准中母材上有 4 号、7 号、11 号、16 号和 17 号缺陷未涉及该研究,故不做说明)。

20 碳钢对比试样焊缝缺陷如图 3 所示,其平底孔及刻槽的位置及尺寸如表 1 所示。

## 2 检测试验

### 2.1 无涂层焊缝试样阵列涡流检测试验

#### 2.1.1 工艺参数设置原则

(1) 频率。

频率选择时应使提离信号、其他不希望出现的

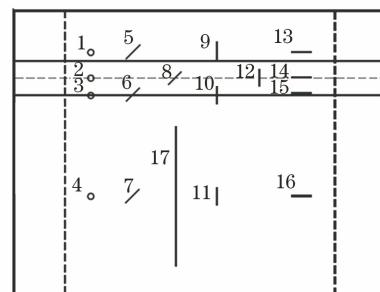


图 2 ASME 标准中的试样制作要求示意

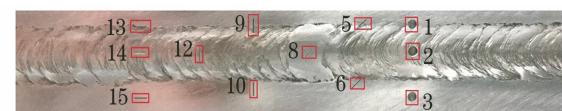


图 3 20 碳钢对比试样焊缝缺陷位置示意

表 1 20 碳钢对比试样焊缝平底孔及

刻槽的位置及尺寸

序号	缺陷类型	位置	长度	孔径	深度	mm
1	平底孔	焊缝熔合线	—	3.2	1.0	
2	平底孔	焊缝	—	3.2	1.0	
3	平底孔	热影响区	—	3.2	1.0	
5	45°斜向刻槽	焊缝熔合线	5.0	—	1.0	
6	45°斜向刻槽	热影响区	5.0	—	1.0	
8	45°斜向刻槽	焊缝	5.0	—	1.0	
9	横向刻槽	焊缝熔合线	5.0	—	1.0	
10	横向刻槽	热影响区	5.0	—	1.0	
12	横向刻槽	焊缝	5.0	—	1.0	
13	纵向刻槽	焊缝熔合线	5.0	—	1.0	
14	纵向刻槽	焊缝	5.0	—	1.0	
15	纵向刻槽	热影响区	5.0	—	1.0	

干扰信号与缺陷响应信号的相位差最大化。

(2) 相位调节。

相位调节应有利于缺陷响应信号与提离干扰信号的区分和识别,通常将提离信号的相位调节为水平方向。涡流响应信号会随着检测频率的改变而变化,在改变检测频率的同时应重新调节提离信号的相位,使其处于水平方向。

缺陷响应信号与提离信号之间应有尽可能大的相位差,必要时,可通过调节缺陷响应信号的垂直、水平比来增大缺陷响应信号与提离信号间的相位差。

(3) 探头驱动和探头增益。

调节探头驱动和探头增益,直到缺陷基于幅度的数据信噪比大于 3。

(4) 滤波。

干扰信号影响检测灵敏度时,可使用滤波方法过滤干扰信号,保留缺陷信号。

(5) 调色板设置。

调色板的选择和调整,应能够区分相关显示与

非相关显示信号。

#### (6) 编码器分辨率设置。

按编码器标识或校准结果设定编码器分辨率,所选用编码器分辨率不应超过 0.38 mm/采样点。

#### 2.1.2 试验结果

按上述原则进行工艺参数设置,要求对比试样上所有平底孔及刻槽缺陷信号基于幅度的数据信噪比不小于 3,无涂层 20 碳钢对比试样涡流检测结果如图 4 所示。

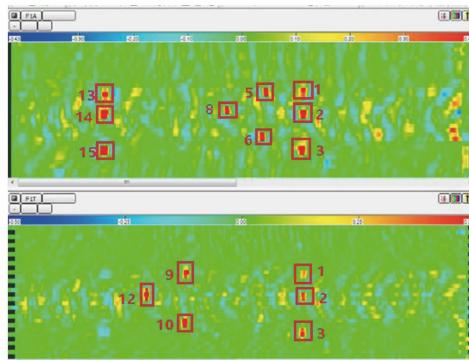


图 4 无涂层 20 碳钢对比试样涡流检测结果

由图 4 可以看出,20 碳钢对比试样焊缝、焊缝融合线、热影响区上制作加工的横向、纵向、45°斜向表面刻槽及平底孔均被检出。说明试验所采用的阵列涡流检测方法能够满足对碳钢焊缝表面开口缺陷的检测要求,并具有以下检测特点:① 检测结果包含阻抗平面显示、时基信号显示、二维 C 扫描显示等,数据信息丰富;② 显示清晰、直观,利用二维 C 扫描显示可以很直观地读出缺陷所处的位置关系;③ 阵列探头尺寸较大,扫查覆盖区域大,一次检测过程相当于传统的单个涡流检测探头对部件受检面进行反复往返步进扫描的检测过程,检测效率高,试验所用阵列探头的宽度可覆盖焊缝及热影响区,可同时兼顾焊缝及热影响区区域的检测。

#### 2.2 带模拟涂层试样涡流检测试验

选用 20 碳钢对比试样为检测对象,采用阵列涡流检测方法对其进行不同模拟涂层厚度下的检测试验。船壳涂层总厚度一般不超过 0.5 mm,为此选用 0.5 mm 厚的绝缘塑料薄片用于模拟工件表面的油漆涂层(见图 5)。阵列涡流检测中,可检测的涂层厚度与所选用阵列探头线圈结构相关,该试验采用衬垫式阵列涡流探头。

含模拟涂层对比试样涡流检测现场如图 6 所示,检测时将探头直接放置在 20 碳钢焊缝试样表面,分别选取 1,2,3 张 0.5 mm 厚的塑料薄片,放置



图 5 涂层模拟片实物

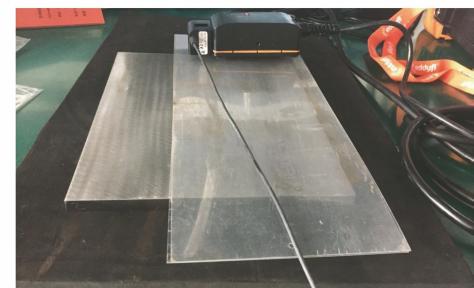


图 6 含模拟涂层对比试样涡流检测现场

在焊缝试样表面,即分别模拟 0.5,1.0,1.5 mm 厚的涂层。

含 0.5 mm 厚模拟涂层的 20 碳钢对比试样阵列涡流检测结果如图 7 所示,可以看出,涂层厚度为 0.5 mm 时,除 5 号热影响区 45°刻槽显示较弱外,对比试样上其他刻槽的检测未受影响。

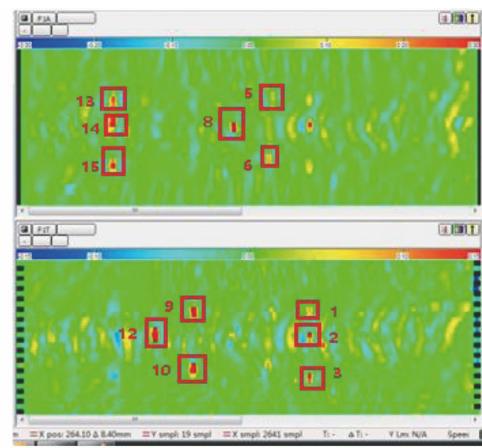


图 7 含 0.5 mm 厚模拟涂层 20 碳钢对比试样检测结果

含 1.0 mm 厚模拟涂层的 20 碳钢对比试样阵列涡流检测结果如图 8 所示,可见,除 5 号热影响区 45°刻槽及 6 号焊缝融合线 45°刻槽显示较弱外,对比试样上其他刻槽的检测未受影响。

含 1.5 mm 厚模拟涂层的 20 碳钢对比试样阵列涡流检测结果如图 9 所示,可见对比试样上刻槽及平底孔的显示均很弱。

笔者分析,当模拟油漆超过 1 mm 时,模拟用塑料薄片加厚后一定程度上不能完全贴合表面,故缺陷显示不具参考性。模拟涂层与表面贴合的问题使

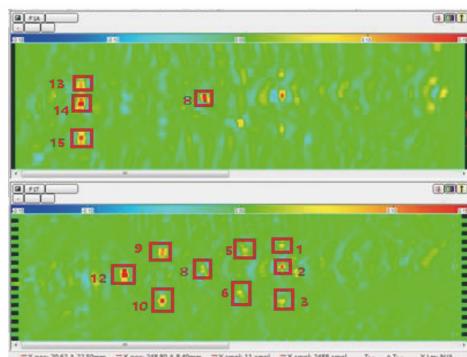


图 8 含 1.0 mm 厚模拟涂层 20 碳钢对比试样检测结果

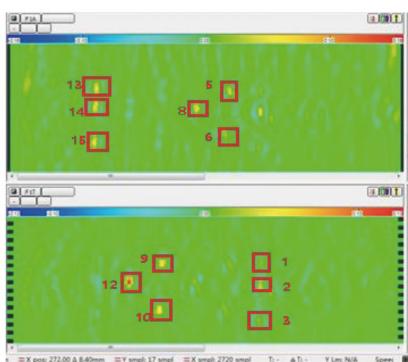


图 9 含 1.5 mm 厚模拟涂层 20 碳钢对比试样检测结果

得该位置处的缺陷实际偏离高度比较大,造成该位置缺陷信号变弱甚至无法检出,如 5 号热影响区 45°刻槽及 6 号焊缝融合线 45°刻槽位置。

### 3 结语

以 20 碳钢焊缝为试验对象,在焊缝、焊缝融合

线、热影响区上制作加工横向、纵向、45°斜向表面刻槽及平底孔,并分别开展无涂层和带涂层的涡流阵列检测试验,得出以下结论。

(1) 阵列涡流检测技术能满足船舶碳钢焊缝表面无损检测的要求,可检测出有危险性的裂纹缺陷;相比于其他表面检测技术,阵列涡流检测具有检测效率高、数据信息丰富、可 C 扫成像和易于归档等特点。

(2) 阵列涡流检测可穿透表面非导电涂层,可穿透的涂层厚度与所选用的阵列探头线圈结构相关,不同位置刻槽的涂层检测显示能力存在区别,这对在役船舶的带涂层焊缝疲劳裂纹检测具有参考意义。

### 参考文献:

- [1] 张珍强. 船舶质量检验相关问题探讨[J]. 科技创业家, 2014(8): 250.
- [2] 丁力. 船舶涂装工艺技术改造中的环保技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [3] 吴桔生, 吴承燕, 张荣刚. 电涡流技术与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
- [4] Michael Wright. Eddy Current Array Technology [M]. Canada: Eclipse Scientific Products Inc., 2014.
- [5] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 李运涛, 胡振龙, 万本例, 等. 基于我国锅炉压力容器典型金属材料的涡流阵列检测灵敏度研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11): 1579-1586.

(上接第 28 页)

- [4] 刘龙, 孟光. 电子散斑干涉无损检测技术的应用现状[J]. 无损检测, 2006, 28(1): 28-30, 39.
- [5] 温亚楠, 王添, 于佳, 等. 高精度非接触式锥光全息测量系统设计及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080902.
- [6] 胡晓东, 杨媛, 常新宇, 等. 具有宽频带高灵敏度的微振动外差干涉测试仪[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(5): 526-532.
- [7] PARK Y, CHO K. Heterodyne interferometer scheme using a double pass in an acousto-optic modulator[J].

Optics Letters, 2011, 36(3): 331-333.

- [8] 尚建华, 任立红, 徐海芹, 等. 基于双声光移频器的外差式激光多普勒测振计[J]. 光子学报, 2012, 41(10): 1149-1155.
- [9] 朱祥, 张志伟, 张文静, 等. 基于激光外差干涉的金属微振动检测[J]. 光学与光电技术, 2016, 14(6): 22-25.
- [10] 刘丹, 郑宾, 郭华玲, 等. 基于外差干涉的微振动测量技术研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 858-861.
- [11] 张志伟, 曾光宇, 李仰军. 光电检测技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.