DOI: 10.13382/j.jemi.B2306725

海洋平台结构损伤涡流热成像检测激励线圈设计*

孙小茹[1,2] 郑文培[1,2] 张来斌[1,2]

(1. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院 北京 102249;2. 应急管理部油气生产安全与应急技术重点实验室 北京 102249)

摘 要:海上平台作为海上石油开发的重要设施,处在海水浸泡、冲击等恶劣环境中,很容易出现损伤,影响其安全性。管节点作为高应力集中的部位是海上平台结构中更易产生损伤的地方,因此对管节点进行检测十分重要,为适应海上平台管节点这种特殊结构的损伤检测,利用涡流热成像技术,考虑管节点结构、在管节点表面感应出的涡流分布情况等因素,设计出了圆台形线圈、三角形线圈、扁平双线圈三种形式的线圈,并通过 COMSOL、SolidWorks 完成了相应的仿真模拟,为了符合实验室需求,又构建出了等比例待测工件及线圈的实际模型,通过实验模拟、MATLAB 数据处理验证了仿真模拟的准确性及所设计线圈的有效性。结果表明,扁平双线圈对海上平台管节点的加热效果更佳,能够用于对其损伤缺陷的检测。

关键词: 海上平台管节点;涡流热成像检测技术;激励线圈

中图分类号: TN21; X937 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 620.5040; 510.1060

Excitation coil design of eddy current thermography for structural damage detection of offshore platforms

Sun Xiaoru[1,2] Zheng Wenpei[1,2] Zhang Laibin[1,2]

(1. College of Safety and Ocean Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Safety and Emergency Technology, Ministry of Emergency Management, Beijing 102249, China)

Abstract: As an important facility for offshore oil development, offshore platforms are prone to damage in harsh environments, such as seawater immersion and impact, which affects their safety. As a high stress concentration area, tubular joints are more prone to be damaged in offshore platforms. Therefore, the detection of tubular joints is of great significance. In order to adapt to the damage detection of the tubular joints that are the special structures on offshore platforms, using eddy current thermography, the structure of the tubular joints and the distribution of eddy currents induced on the surface of the tubular joints are considered, three forms of coil were designed: Round table coil, delta coil and flat double coil, and the corresponding simulation was completed by SolidWorks and COMSOL. In order to meet laboratory requirements, the actual models of coils and the workpiece to be measured were manufactured. The accuracy of the simulation and the effectiveness of the designed coils were verified through experiments and MATLAB data processing. The results show that the flat double coil has better heating effect on the tubular joints of offshore platforms, and can be used to detect the damage defects.

Keywords: offshore platform tubular joints; eddy current thermography; excitation coil

0 引 言

目前,世界上已经大量建造了钢结构海上平台以用于海上石油天然气的开发,在我国服役的海上固定平台总数也已达 360 多座[1]。但是海洋平台由于长期遭受波浪、海水微生物腐蚀和电化学腐蚀等因素的影响,海上平台结构常出现疲劳破坏、脆性断裂、层状撕裂等现象,影响了海上平台的安全性和可靠性。其中管节点属于海上平台结构中高应力集中的部位,其受到的应力约是其他

收稿日期: 2023-07-12 Received Date: 2023-07-12

*基金项目:中国石油大学(北京)科研基金(2462020QZDX008)项目资助

部分所受应力的十几倍,比其他部位更易产生裂纹等缺陷问题,因此对于管节点的检测是至关重要的。目前,对于海上平台管节点焊缝的检测方法主要有超声波检测、声发射检测、交流电磁场检测等。陆铭慧等[2]针对 TKY 管节点焊缝这种特殊结构,模拟了管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,通过实验实现了利用超声相控阵技术对管节点焊缝的检测,并降低了探测盲区。蒋鹏等[3]利用声发射技术对管节点焊缝进行检测,有效地对工型管节点任何时期的伤信号进行了识别。葛运春等[4]利用交流电磁场对海上平台底座焊缝进行了进行横向和纵向的检测。林影炼等[5]利用超声精细化检测技术对海上平台结构进行裂纹缺陷检测。但是由于海上平台结构复杂,管节点交汇处空间狭小,又存在低温、潮湿等环境因素的影响,并且焊接结构的表面通常覆盖有油漆涂层,而漆膜具有一定的厚度和韧性焊缝裂纹通常隐藏在内部,以上方法存在一定的局限性,并可能对材料造成损伤,检测效果并不理想。而涡流热成像是一种非接触、灵敏度高、受被测对象形状影响小、能够直接成像的检测方法[6]。根据机械钢结构上使用的涂层标准工业环境中所需的漆膜厚度通常小于 0.24 mm,Liu 等[7]利用涡流热成像技术研究了涂层厚度对检测效果的影响,结果发现对于表面涂层厚度为 0.24 mm 的缺陷仍存在较好的检测效果,并且涂层厚度越小,裂纹更容易识别。Liu 等[8]研究了热图像采样率与特征提取对缺陷表征的影响。文献[9-13]均利用涡流热成像检测技术对不同待测对象进行了检测,并取得了一定的研究成果,该检测方法特别适合海上平台管节点这类结构复杂的对象。而对于涡流线圈的设计,国内外已有较多研究,如 Gui 等[14]提出并比较了基于亥姆霍兹线圈和铁氧体轭的 ECPT 激励配置;Tao 等[15]研制了一种由两个励磁线圈切向放置和一个检测线圈水平放置组成的双励磁均匀涡流探头;唐波等[16]提出了一种含 U 型磁轭探头的新型脉冲激励电源。但是目前的激励线圈均不能足以靠近海上平台管节点焊缝,不能满足对该对象的损伤检测。

本文将依据涡流热成像的原理,综合考虑管节点结构、在管节点表面感应出的涡流分布情况等因素设计用于海上平台管节点损伤检测的异形激励线圈,利用 COMSOL、SolidWorks 等软件进行仿真模拟、在实验室进行等比例模拟试验以分析不同形式线圈对管节点的加热情况,选取检测效果最佳的激励线圈。

1　有限元模型建立

1.1　SolidWorks 模型建立

1)管节点模型建立

桁架结构在大部分海上平台结构中起到支撑作用,主体是使用大尺寸的钢管相互焊接而成,整个导管架结构复杂,存在形式也多种多样,本文主要选用对 Y 型海上平台管节点焊缝的缺陷检测进行仿真模拟研究,所构建出的模型如图 1 所示。

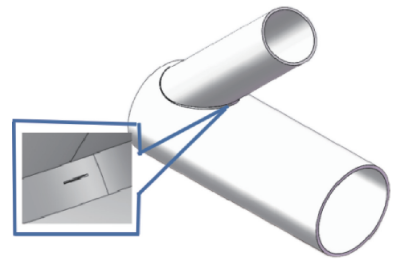


图 1　Y 型管节点模型

Fig. 1　Y-tube node model

对于焊缝模型的构建,本文采用不具有坡口的简易焊缝形式,焊缝的焊脚尺寸选用支管壁厚的 1.2 倍(支管壁厚为 25 mm,则焊脚尺寸为 30 mm)[17],具体尺寸,如表 1 所示。

表 1　管节点模型相关参数

Table 1　Tube node model related parameters

几何属性	尺寸/大小
主管长度	2 500 mm
主管直径	980 mm
主管厚度	32 mm
支管长度	2 000 mm
支管直径	590 mm
支管厚度	25 mm
支管与主管间夹角	45°
焊脚尺寸	30 mm
缺陷长度	16 mm
缺陷宽度	1 mm
缺陷深度	3 mm

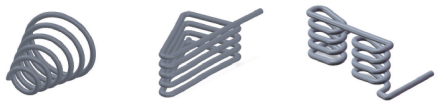
2)激励线圈模型建立

为了适应管节点这种特殊的检测对象,设计了 3 种与海上平台管节点几何形状相适配、能够贴近焊缝且方便移动的特殊激励线圈:坡度为 30°,小圆段处的外径为 30 mm,整体高为 50 mm 的圆台形线圈,如图 2(a)所示;顶角为 30°、腰长为 200 mm、厚度为 50 mm 的三角形线圈,如图 2(b)所示;两个长为 64 mm、宽为 24 mm、圆弧外半径为 12 mm 的柱体组合成的扁平双线圈,如图 2(c)所示。

1.2　COMSOL 模型建立

1)几何导入与构建

将 SolidWorks 模型导入后,设置圆台形线圈、三角形线圈、扁平双线圈的提离高度分别为 3、1、1 mm,并在 COMSOL 中构建球体作为空气域,具体装配情况如图 3 所示。



(a) 圆台形线圈 (a) Round table coil　(b) 三角形线圈 (b) Triangular coil　(c) 扁平双线圈 (c) Flat double coil

图 2　激励线圈模型

Fig. 2　Excitation coil model

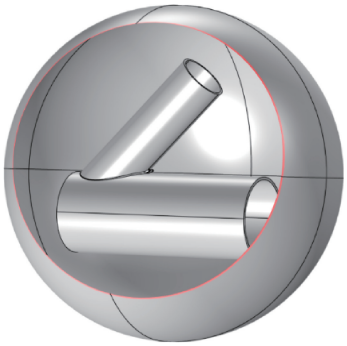


图 3　COMSOL 仿真模拟模型

Fig. 3　COMSOL simulation model

2)材料属性定义

本文在 COMSOL 有限元仿真中海上平台管节点结构用材选用的是 DH36 低合金高强度钢,该等级钢目前用于国内大部分导管架平台的构建[18],线圈的材料为铜,球体区域设置为空气。

DH36 低合金高强度钢为热轧钢,而热轧钢的相对磁导率一般在 500~1 000,因此选用 1 000 为本次仿真模拟钢材料的相对磁导率,表 2 为各材料的相关参数。

表 2　材料相关参数

Table 2　Material-related parameter

部件	材料	电导率/(S·m^{-1})	相对磁导率
待测管节点	钢	4.032×10^{-6}	1 000
激励线圈	铜	5.998×10^{-7}	1
球体区域	空气	100	1

3)边界条件设置

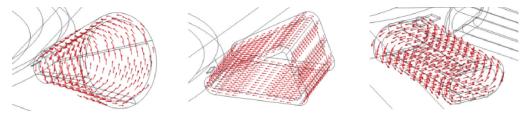
在涡流热成像检测中所采用的激励频率通常为 100~300 kHz[19],激励电流通常大于 100 A。由集肤深度表达式:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\sigma\mu}} \tag{1}$$

可知,当激励频率为 100 kHz 时,集肤深度非常的小,由此可以假定集肤深度为 0,感应涡流只存在于焊缝表面,在磁场设定时,选用阻抗边界条件,该设定并不会影响仿真结果的精确性。

4)仿真模拟结果

对仿真模型进行了求解和分析,并得到了结果。在仿真模拟中 3 种异形线圈的电流流向均符合所预期的理想状态,如图 4 所示。但是在圆台形线圈进行仿真时,该线圈对管节点焊缝缺陷的加热效果并不明显,如图 5 所示,若想进一步提高该线圈对焊缝缺陷的加热效果,可以尝试通过减小圆台顶部直径以更靠近焊缝,但这样的改进对后期实验、实际工程应用中激励线圈的制作造成了一定的困难,且激励线圈所用空心铜管的直径对该圆台顶部直径也有限制,使得进一步改进存在较大的困难,不利于后期进一步研究。



(a) 圆台形线圈 (a) Round table coil　(b) 三角形线圈 (b) Triangular coil　(c) 扁平双线圈 (c) Flat double coil

图 4　电流流向

Fig. 4　Current flow direction

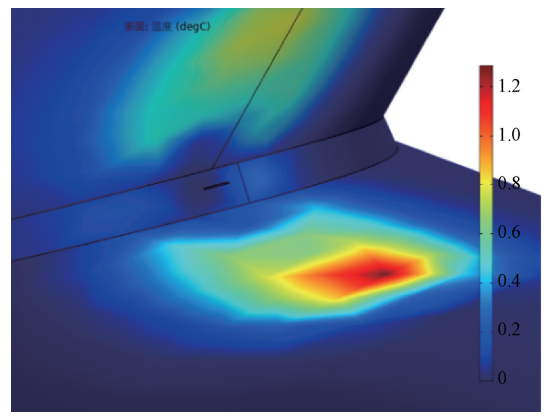


图 5　圆台形线圈仿真结果

Fig. 5　Circular table coil simulation results

三角形线圈和扁平双线圈对管节点进行加热后,在仿真结果中可以明显观察到缺陷的位置,即焊缝表面上所感应出的涡流对缺陷的加热呈现不均匀分布的状态,且主要分布在缺陷两端点处,使缺陷两端的温度高于其他部位,如图 6 所示(其中,t、t'分别表示三角形线圈对管节点焊缝的加热时间、扁平双线圈对管节点焊缝的加热时间),该结果符合涡流热成像基本原理,具体温度分布如图 7 和 8 所示。并且从两个图像可以看出,扁平双线圈比三角形线圈的加热效果更明显,加热温度更高。

相比之下得出三角形线圈和扁平双线圈可以较有效地加热管节点焊缝,因此后续仅对该两种异形线圈进行研究模拟。

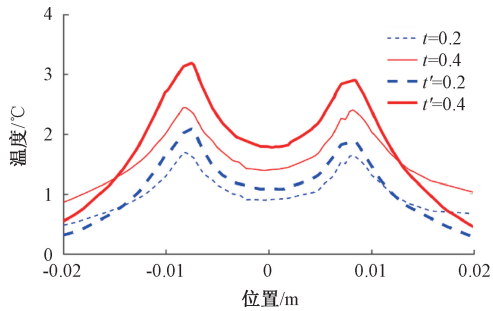


图 6　缺陷上方温度分布图

Fig. 6　Temperature distribution above defects

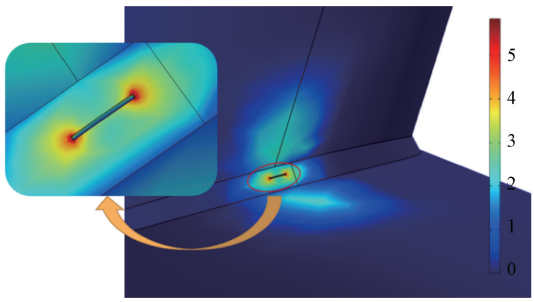


图 7　三角形线圈仿真结果

Fig. 7　Triangular coil simulation results

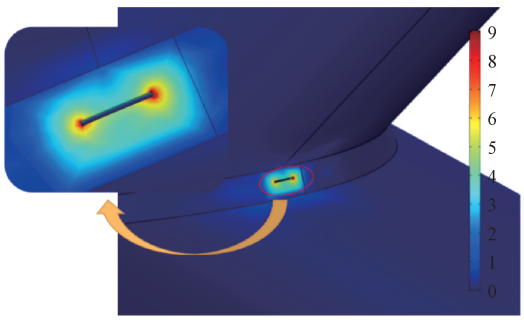


图 8　扁平双线圈仿真结果

Fig. 8　Flat two-coil simulation results

2　钢板仿真模拟

2.1　钢板模型建立

由于海上平台管节点体积庞大,无法在实验室进行实验,后续实验模拟选用实验室的 45#钢板作为加热对象,并建立如图 9 所示的等比例钢板模型和 1/2 比例的异形线圈模型进行仿真模拟,钢板上缺陷的尺寸如表 3 所示,从左到右分别缺陷编号分别为 1#、2#、3#。

2.2　算例分析

本次静态仿真模拟,分别模拟钢板无缺陷和含缺陷两种情况,如图 10~13 所示,三角形线圈和扁平双线圈

图 9　等比例钢板模型

Fig. 9　Equal scale steel plate model

中均通入 100 A 的电流,匝数为 4 匝,线圈与平板之间的距离为 1 mm,加热时间为 0.4 s。

表 3　缺陷的具体尺寸

Table 3　The specific size of the defect

尺寸	1#	2#	3#
长度/mm	8	12	16
宽度/mm	0.8	0.8	0.8
深度/mm	3.2	3.2	3.2

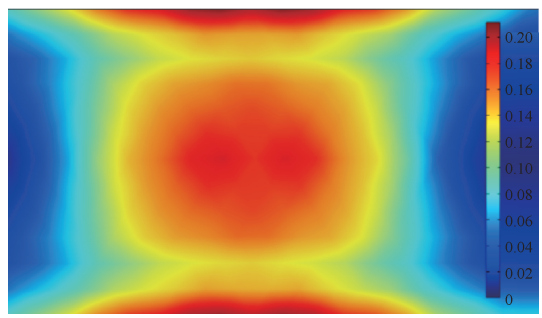


图 10　三角形线圈在无缺陷处加热效果

Fig. 10　The delta coil heats up without defects

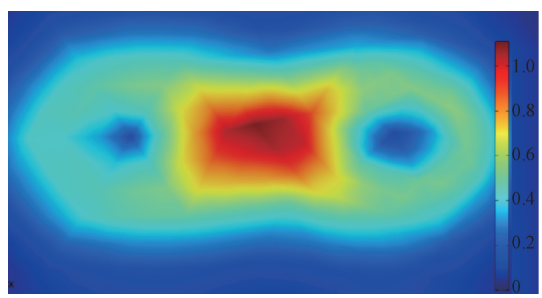


图 11　扁平双线圈在无缺陷处加热效果

Fig. 11　Flat double coil heating effect without defects

由温度分布图可以看出:当钢板上存在缺陷时,温度分布发生了明显的变化,含缺陷温度分布图中的最高温度比无缺陷温度分布图中的高,并且高温区集中在缺陷的两端点处,说明三角形线圈和扁平双线圈仍然适用于 45#钢板。

在动态仿真模拟中,设置为激励线圈静置、钢板移动的动态模拟形式,起点为-0.1 m 处,终点为 0.3 m 处,步长为 0.01 m。完成动态线性参数扫描后,通过 MATLAB 对其数据进行分析处理,得到了如图 14 所示的三维重构温度分布图,3 个尖端分别代表钢板上的 3 个缺陷。

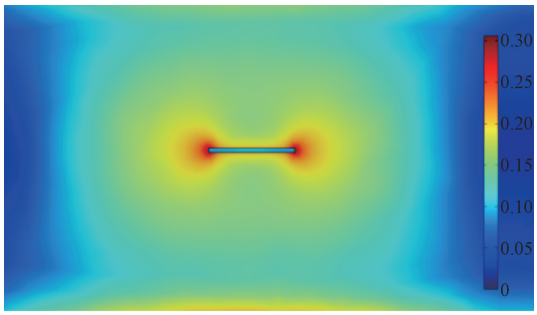


图 12　三角形线圈在缺陷处加热效果

Fig. 12　The effect of the delta coil heating at the defect

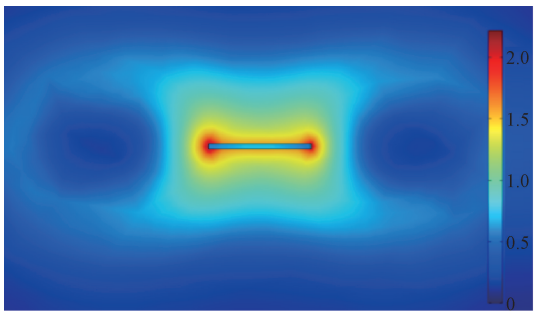


图 13　扁平双线圈在缺陷处加热效果

Fig. 13　Flat double coil heating effect at defects

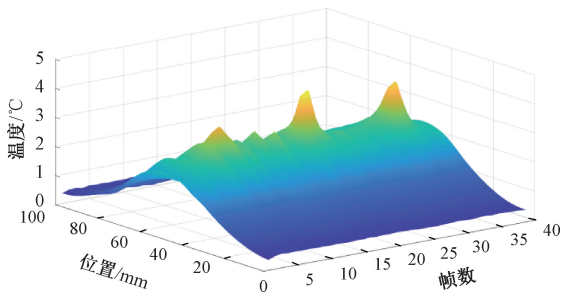


图 14　温度分布三维图

Fig. 14　3D plot of temperature distribution

3　实验验证

本文实验所用到的实验模拟系统包括激励系统、水冷系统、热像仪、导轨、导轨控制器等，该系统的工作示意图如图 15 所示。

3.1　三角形线圈实验验证

实验时，使三角形顶角处正对缺陷，通入 50 A 交流激励电流对缺陷进行静态加热，即线圈和缺陷均保持静止状态，线圈与钢板间距离为 5 mm，加热时间为 500 ms，如图 16(a)所示。

通过热像仪图像显示发现，在钢板缺陷处并未观察到温度的变化，后续加大激励电流、改变线圈放置方向以改变磁场分布(如图 16(b)所示)也无法观察到明显的温度变化，说明线圈实际加热效果并不理想。

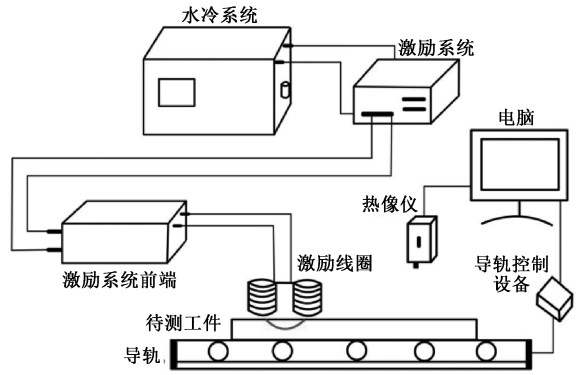
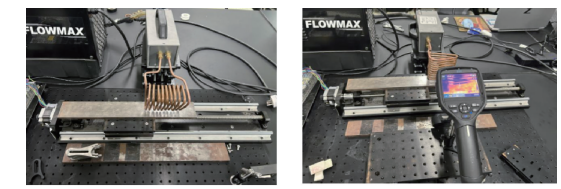


图 15　实验模拟系统

Fig. 15　Experimental simulation system



(a) 顶角正对放置
(a) The top corners are placed directly opposite

(b) 面正对放置
(b) Face facing each other

图 16　三角形线圈实验模拟

Fig. 16　Experimental simulation of delta coil

3.2　扁平双线圈实验验证

扁平双线圈的设定参数与上文三角形线圈的设定参数保持一致，并将缺陷放置于双线圈中间处，如图 17 所示。

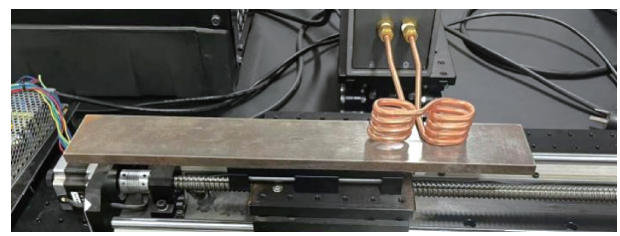


图 17　扁平双线圈实验模拟

Fig. 17　Flat double coil experimental simulation

利用 MATLAB 将热像仪所采集的数据进行处理后，得到了如图 18 所示的三维图像，从图像中可以看出缺陷(图中的突起部分)在经过线圈加热后，存在明显的温度变化，并且缺陷两端处的温度略高于缺陷中部，基本符合缺陷两端为高温区的实际理论，说明扁平双线圈对钢板缺陷的实际加热效果相对理想。

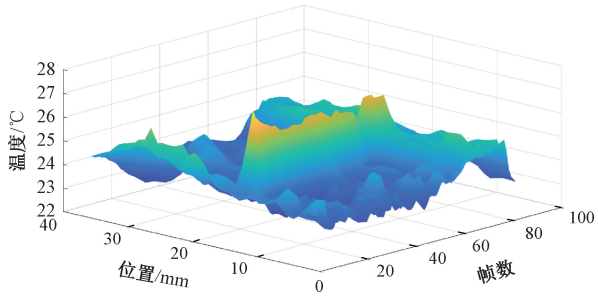


图 18　静态温度三维重构图

Fig. 18　Static temperature 3D reconstruction

扁平双线圈在静态检测中的效果较理想,因此又对其进行了动态检测分析。利用 PLC 控制导轨,使导轨承载的待测工件能够与激励线圈产生相对运动,导轨的速度移动为 8 mm/s,激励线圈与 45#钢板间的距离设定为 1 mm,激励电流和激励时间分别设定为 50 A 和 30 s,从而对钢板上不同尺寸的缺陷进行检测。利用 MATLAB 数据处理得到如图 19 所示的三维重构图,从图中可以看出,当不同尺寸缺陷经过线圈中心时,均产生了很明显的温度变化,再次证明扁平双线圈对钢板缺陷的实际加热效果比较理想。

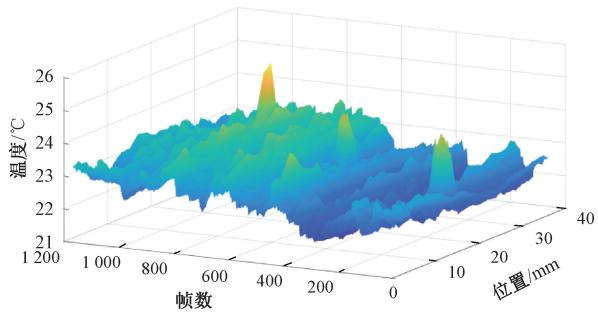


图 19　动态温度三维重构图

Fig. 19　Dynamic temperature 3D reconstruction

4　参数分析

从上述研究中可以看出扁平双线圈的检测效果较好,但鉴于海洋平台的桁架结构通常极为复杂,在实际检测过程中应当考虑扁平双线圈能否充分适应检测操作,本文对扁平双线圈进行了部分参数分析。

4.1　提离高度

提离高度在激励系统对待测工件加热的过程中起到一个重要作用,因此选择一个合适的提离高度对加热效果是否理想具有重要影响。为研究管节点焊缝与激励线圈间的最佳距离,本文设定电流为 100 A,选择间距为 1、5、10、15 mm 进行数值分析,得出 4 种不同提离高度对管节点加热温度的影响以及间距与加热温度间的关系。

通过仿真模拟研究得出 4 种不同提离高度所对应的加热温度上升最高值,具体如图 20 所示,当提离高度为 15 mm 时,同样能够对缺陷进行检测。

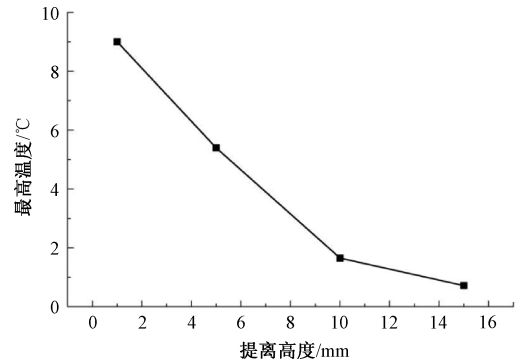


图 20　提离高度与最高加热温度间关系曲线

Fig. 20　Relationship curve between lifting height and heating temperature

4.2　双线圈间距

双线圈间距是影响本文特殊激励线圈对待测工件加热效果的一个重要因素,当线圈间距过于大时,两线圈中间部分所感应出的涡流会很稀疏,影响对缺陷的加热效果;但当两线圈过于近时,检测范围比较小,检测效果并不理想。因此找到一个合适的线圈间距十分重要,本文选定了线圈间距为缺陷长度的 0.5 倍、1 倍、2 倍、3 倍时线圈对管节点焊缝处缺陷的加热效果进行研究,得到了如图 21 所示的结果。

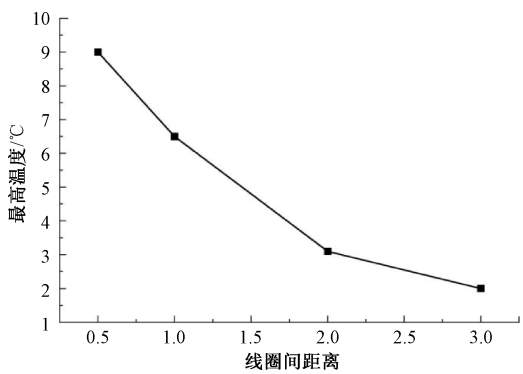


图 21　线圈间距与最高加热温度间关系曲线

Fig. 21　Relationship curve between coil spacing and maximum heating temperature

从图 21 中可以看出加热最高温度随线圈间距的增大而降低,但是当线圈间距为缺陷长度的 3 倍时,加热效果仍较理想,而在实际检测中,缺陷的长度并不可知,因此选用 32~48 mm 长度适中的距离较为合适。

5　结　论

涡流热成像检测是一种新兴的无损探伤技术手段，本文基于该检测技术设计了 3 种适合海上平台管节点焊缝的异形线圈，通过 COMSOL 仿真模拟及实验验证得出了如下结论：

1）通过 COMSOL 仿真模拟发现三角形线圈和扁平双线圈对缺陷进行加热后，缺陷处会发生明显的温度变化，并且缺陷使感应涡流发生扰动，集中在缺陷两端，在两端形成高温区，而圆台形线圈并不会使缺陷处产生明显的温度变化。从而初步得出三角形线圈和扁平双线圈相比于圆台形线圈均更适合海上平台管节点这种特殊结构，并且扁平双线圈的加热效果比三角形线圈的效果好。

2）通过实验验证得出，扁平双线圈的实际加热效果明显优于三角形线圈，且不管是静态检测还是动态检测，效果均比较好，并通过 MATLAB 对实验数据进行处理得到了静态和动态的三维重构图，缺陷显示为突起部分，规律均符合涡流热成像的基本原理。

本文已研究了采用涡流热成像技术对海上平台管节点焊缝的检测，该技术能够实现对一般涂层的漆下检测，但是随着工业的发展，海上平台的导管架所用到的保护涂层越来越复杂，如热喷铝防腐[20]，对于这种复杂的涂层结构需要进一步研究。

由于海上平台管节点体积庞大，无法在实验室进行实验，本文没有对管节点焊缝进行实际的实验验证，相关研究需要进一步完善。

参考文献

[1] 徐辉，高畅. 老龄海洋平台的结构延寿评估[J]. 中国海洋平台，2018，33(1)：5-8，16.
XU H，GAO CH. Structural life extension assessment of aging marine platforms[J]. China Offshore Platform，2018，33(1)：5-8，16.

[2] 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(12)：13-15.
LU M H，SHAO H L，LIU X F，et al. Application of TKY tube joint weld shape model in phased array detection[J]. Nondestructive Testing，2013(12)：13-15.

[3] 蒋鹏，张璐莹，李英年，等. 基于 K 均值聚类的海洋平台 T 型管节点损伤声发射信号的模式识别[J]. 无损检测，2015，37(8)：48-50.
JIANG P，ZHANG L Y，LI Y N，et al. Pattern recognition of damage acoustic emission signals of T-shaped pipe nodes in offshore platforms based on K-means clustering[J]. Nondestructive Testing，2015，37(8)：48-50.

[4] 葛运春，张翼，冷建成，等. 海洋平台钻机底座焊缝的交流电磁场检测[J]. 无损检测，2015(7)：77-80，88.
GE Y CH，ZHANG Y，LENG J CH，et al. Detection of critical welds of ocean platform drilling rig substructure using alternating current field measurement technique[J]. Nondestructive Testing，2015(7)：77-80，88.

[5] 林影炼，张勇，杨振宇. 海油平台导管架裂纹的超声精细化检测技术[J]. 无损检测，2022，44(8)：69-73.
LIN Y L，ZHANG Y，YANG ZH Y. Ultrasonic fine detection technology of jacket crack on offshore oil platforms[J]. Nondestructive Testing，2022，44(8)：69-73.

[6] 闫会朋，杨正伟，田干，等. 基于涡流热成像的铁磁材料近表面微裂纹检测[J]. 红外与激光工程，2017，46(3)：238-243.
YAN H P，YANG ZH W，TIAN G，et al. Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography[J]. Infrared and Laser Engineering，2017，46(3)：238-243.

[7] LIU Z P，LIU H L，JIANG L，et al. Simulation of non-destructive testing on weld surface crack of metal structure by electromagnetically stimulated infrared thermography[J]. Applied Mechanics and Materials，2014，590：639-644.

[8] LIU J，TIAN G Y，GAO B，et al. Investigation of thermal imaging sampling frequency for eddy current pulsed thermography[J]. NDT & E International，2014，62(3)：85-92.

[9] 马烜，邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. 电子测量与仪器学报，2019，33(7)：137-144.
MA X，ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation，2019，33(7)：137-144.

[10] 陈锐，朱玉玉，武丽. 涡流锁相热成像的多层异种金属无损检测系统[J]. 传感器与微系统，2020，39(2)：91-94.
CHEN R，ZHU Y Y，WU L. Non-destructive testing system for multi-layer metals by using eddy current lock-in thermography[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2020，39(2)：91-94.

[11] 周金龙. 基于脉冲涡流热成像的焊点缺陷检测及寿命预测[D]. 成都：电子科技大学，2016.

ZHOU J L. Research on defects inspection and life prediction of solder joint based on eddy current pulsed thermography[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016.

[12] 刘兴乐, 刘志平, 黎玄, 等. 基于脉冲涡流热成像的金属结构焊缝表面裂纹识别方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(14): 1925-1931.
LIU X L, LIU ZH P, LI X, et al. Method for surface crack detection of welded structure in pulsed eddy current thermography[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(14): 1925-1931.

[13] 夏慧, 郑军, 邱锦川, 等. 钢丝绳缺陷涡流热成像在线检测方法研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(9): 1044-1050.
XIA H, ZHENG J, QIU J CH, et al. Research on ECT for online detection of defects in wire ropes[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(9): 1044-1050.

[14] GUI T, YUNLAI G, KONGJING L, et al. Eddy current pulsed thermography with different excitation configurations for metallic material and defect characterization[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2016, 16(6): 843.

[15] TAO C, HAI S, YUANHANG D, et al. Design and performance research of a new dual-excitation uniform eddy current probe[J]. Sensors, 2022, 22(22): 8850-8850.

[16] 唐波, 方旭, 侯德鑫, 等. 面向脉冲涡流热成像的激励电源特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(1): 208-215.
TANG B, FANG X, HOU D X, et al. Exciting power supply characteristics for pulsed eddy current thermography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 208-215.

[17] 韩涵, 郑涛, 王旭东, 等. X形圆钢管相贯节点焊缝断裂预测及承载力分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(13): 99-105.
HAN H, ZHENG T, WANG X D, et al. Fracture prediction and bearing capacity analysis of weld of tubular circular hollow section X-joints[J]. Journal of Building Structures, 2022, 52(13): 99-105.

[18] 刘华祥, 袁玉杰, 曾靖波, 等. 导管架平台用钢现状及展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 164-170.
LIU H X, YUAN Y J, ZENG J B, et al. Application state and prospect of steels for jacket platform[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 164-170.

[19] 贺敏. 基于交流电磁场和涡流激励热成像的复合检测技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
HE M. Research on a combined testing technique based on ACFM and eddy current thermography[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.

[20] 薛伟航. 海洋平台防腐中热喷铝防腐技术的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(24): 167-168.
XIE W H. Application of thermal spray aluminum anti-corrosion technology in offshore platform anti-corrosion[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2021, 41(24): 167-168.

作者简介

孙小茹, 2023年于中国石油大学(北京)获得学士学位, 现为中国石油大学(北京)硕士研究生, 主要方向为结构损伤检测。
E-mail: 2023215847@student.cup.edu.cn

Sun Xiaoru received her B. Sc. degree from China University of Petroleum (Beijing) in 2023. Now he is a M. Sc. candidate in China University of Petroleum (Beijing). Her main research interest includes structural damage detection.

郑文培(通信作者), 2010年于中国石油大学(北京)获得博士学位, 现为中国石油大学(北京)副教授, 主要方向为海洋油气开采风险评估、结构损伤检测、可靠性评估。
E-mail: zhengwp@cup.edu.cn

Zheng Wenpei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from China University of Petroleum (Beijing) in 2010. Now he is an associate professor at China University of Petroleum (Beijing). His main research interests include risk assessment of offshore oil and gas extraction, structural damage detection and reliability evaluation.