

远场涡流探头改进的有限元仿真

刘春艳, 罗飞路, 徐小杰

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

摘要:远场涡流检测是电磁无损检测中的一个重要的研究方向,主要用于铁磁性管道的无损检测。与传统涡流无损检测相比,它有着对管内外壁缺陷灵敏度一致、提离效应小等一系列优点,但由于检测线圈是在远场区,导致探头过长,给实际检测带来了不便,因此,需要对其进行改进,提前远场区,拉近激励和检测线圈的距离。首先叙述了探头改进的一系列方案,然后针对这些方案利用有限元仿真工具 ANSYS 对其进行了仿真试验,得出了仿真结果,给实际的检测系统试验提供了理论上的指导作用。

关键词:远场涡流;软件;有限元仿真;探头

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2006)09-0469-02

The Finite Element Simulation of the Improvement in Remote Field Eddy Current Probe Structure

LIU Chun-yan, LUO Fei-lu, XU Xiao-jie

(College of Mechatronic Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The remote field eddy current is a developing branch of eddy current nondestructive testing. It is mainly used for the nondestructive testing of the ferromagnetic pipe. Compared to the conventional eddy current nondestructive testing, it has the same sensitivity for both the inner and the exterior defect, and has no effect of the lifting off. Because of the detecting coil is on the remote field, the probe is too long, and that caused inconvenient for the actual testing. So the probe needs to be improved, the remote field is made ahead, and the distance is reduced between the exciting coil and the detecting coil. A series of improving schemes were described. For the schemes, some of models were built. By using the finite element simulating software ANSYS, the simulating results of the models were obtained. The results will be useful for improving the remote field eddy current probe.

Keywords: Remote field eddy current; Software; Finite element simulation; Probe

1 远场涡流检测的原理描述和遇到的问题

远场涡流探头是由两个与管轴同轴的螺线管线圈组成,一个为激励线圈而另一个为检测线圈,与常规涡流探头结构不同,它的检测线圈不是紧靠着激励线圈,而是在远离激励线圈 2~3 倍管径处,因此接收到的远场信号十分微弱。

接收的远场涡流信号来自两部分,一是激励线

圈所发出的信号沿管子内部直接耦合至检测线圈,该部分信号衰减较快;二是存在能量的两次穿过管壁的非直接耦合路径,它源于激励线圈在附近区域管壁中感应周向涡流,扩散到管外壁,同时幅值衰减,相位滞后,到达管外壁的电磁场又向管外扩散,管外场强的衰减较管内直接耦合区衰减速度慢得多,因此管外场又在管外壁感应产生涡流,穿过管壁向管内扩散,再次产生幅值衰减与相位滞后,这也就是远场区检测到的信号^[1]。

但在实际检测中,需要两线圈距离一般为 4~5 倍的管径长,这就造成了探头过长的问题,在实际

收稿日期: 2005-08-31

作者简介: 刘春艳(1980~),女,硕士研究生,研究方向为电磁无损检测。

应用中,在管道拐弯处和 U 形管里就难以通过,因此,缩小探头的长度成为远场涡流无损检测应用的一个关键点。对探头的改进主要从三方面来考虑,一是加屏蔽盘;二是平衡技术;三是考虑复式激励探头^[2]。因为平衡法对 RFEC 激励线圈的倾斜和偏心度的影响非常敏感,且对信号的增强效果也不好,在实际应用中是不可取的,没有什么仿真价值,因此只将第一和第三种方法作了仿真验证。

2 模型的建立及仿真验证

模拟仿真是通过仿真软件 ANSYS 的电磁场仿真模块来完成的,用 ANSYS 仿真软件来进行建模仿真需要五大步骤,即① 建立模型,设置模型参数。② 根据需要划分网格。③ 加载激励及边界条件。④ 进行求解。⑤ 将所得的数据按需要进行后处理,得出需要的结果。

2.1 加屏蔽盘的仿真

加屏蔽盘是指在激励线圈和检测线圈之间加上屏蔽盘,以减弱直接耦合路径上磁场信号的传播从而达到提前远场区的目的^[3]。屏蔽盘的材料是由三种圆片组合而成,它们是铝片、硅钢片和铜片,排列时硅钢片在中间,因为仿真对象是轴对称的,因此只需要建立一个截面模型即可,如图 1 所示。

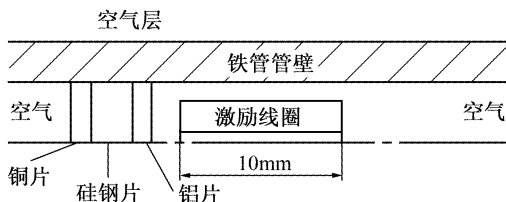


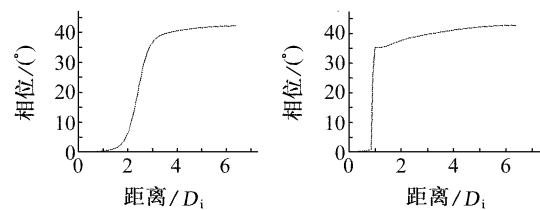
图 1 加屏蔽盘模型示意图

试验中被检测试件是一段内径为 $\phi 14$ mm, 外径 $\phi 18$ mm, 长 180 mm 的铁磁性钢管, 电导率 $\sigma = 5.96 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 相对磁导率 $\mu_r = 129.5$; 铜片和铝片的厚度为 1 mm, 两者的相对磁导率 μ_r 都为 1, 铜片的电导率 σ 设为 $2.25 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 铝片的电导率 σ 设为 $3.45 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 硅钢片的厚度为 2 mm, 电导率 $\sigma = 7.8 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, 相对磁导率 $\mu_r = 256$; 线圈是铜制线圈, 内径 $\phi 4$ mm, 外径 $\phi 10$ mm, 长 10 mm, 放在铁管内部中心处, 其相对磁导率为 1, 共绕制 250 匝, 电流大小为 0.15 A, 因此, 所加的电流密度为 $5.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, 初始相位角为 0, 激励频率为 60 Hz; 管内除了线圈皆充满空气, 管外包了两层圆柱形空气, 内层空气外径为

$\phi 40$ mm, 外层空气的外径是 $\phi 100$ mm, 在外层空气的边缘必须加载磁力线平行条件。分两层空气的原因是在进行划分网格的时候可以按需要将内层空气网格划分得密一些, 外层空气网格划分得疏一些, 这样有利于减少计算量又不会影响结果的精度。

在以上模型里并没有建立检测线圈的模型, 因为 ANSYS 软件中在加载激励线圈电流运算后, 就会产生一个场的分布, 在 ANSYS 结果中直接得出各场量的分布值, 而所需要的检测线圈感应到的相位差值可以由这些场量值的代数运算得到, 因此建模中没有设置检测线圈。

按以上数据在 ANSYS 里建立模型, 加载激励和边界条件, 进行求解并进行数据处理可得相位差随激励线圈和检测线圈之间距离的变化关系, 为便于比较, 将加屏蔽盘前后的相位差随激励线圈和检测线圈之间距离的变化关系绘制成图 2。



(a) 加屏蔽前 (b) 加屏蔽后

图 2 屏蔽盘对远场区的影响

比较图 2a 和 b 可以很明显地看到, 过渡区明显陡峭, 远场区从 3 倍管径 $3D_1$ 处提前到了 1 倍管径 D_1 处, 效果十分明显, 因此在探头上加上屏蔽盘能够将探头长度缩短。

3.2 复式激励探头的仿真

复式激励探头是通过能量流控制来实现提前远场区的目的, 其结构示意图见图 3^[4]。

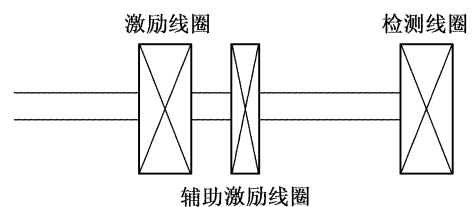


图 3 复式探头结构示意图

复式激励的主要原理就是借助辅助激励线圈的磁场来抑制管内的轴向磁场, 改变主激励线圈附近的能量流规律, 迫使管外能量流向管内扩散提前, 使二次穿透区在距主激励线圈较近地方出现^[2]。

(下转第 501 页)

重合在一起,波形较难分别,但仔细观察波形形状和位置,缓慢移动探头,疲劳裂纹和轮箍标记字头反射波还是有区别的;对于轮箍表面剥离,不动车轮箍探伤也有较强的反射波,尤其是表面剥离下面有径向疲劳裂纹时,会在剥离反射波中间出现一个较强的裂纹反射波,波形呈一束高度几乎相同的草状波;如在轮箍踏面下形成一定面积的周向缺陷,在其周向的两端会出现两个裂纹波,波形和疲劳裂纹反射波相同,所不同的是波形幅度略低,两个裂纹波形的距离即为缺陷的周向长度;而对于埋藏较深、表面光滑的周向缺陷,其反射波较低。

3 结论

(1) 轮箍崩裂的主要原因是轮箍中存在冶金缺陷和疲劳裂纹,冶金缺陷的存在是疲劳裂纹的根源,因此在轮箍出厂和组装时要逐个进行超声波探伤,同时选择适当的入射方向,保证声束和冶金缺陷相互垂直,其次选择双晶片纵波探头探伤。

(2) 在役轮箍主要检查轮箍中径向疲劳裂纹,应选择横波斜入射法,最好选择探头角度略大些,对轮箍踏面下 30 mm 的主要受力部位和应力集中区进行检查,选择不动车横波斜入射法,探头只需移动一个跨距即可对整个轮箍进行检查,提高了效率。

(3) 整体车轮踏面掉块是由于在运用中,制造

(上接第 470 页)

图中铁管、主激励线圈和空气的参数设置和上面的相同,辅助激励线圈长度为主激励线圈的一半,在距离主激励线圈 1 mm 处,所加电流密度和主激励线圈相同,但初始相位不同,辅助线圈的初始相位比主激励线圈的要滞后,在以上的设置条件下,滞后 70° 。经过 ANSYS 仿真运算,将有无辅助激励线圈时得到激励线圈和检测线圈间相位差随两线圈间距离的变化关系示于图 4。

比较图 4a 和 b 可以很明显地看到,过渡区变得陡峭,远场区从 3 倍管径处提前到了 1.5 倍管径处,

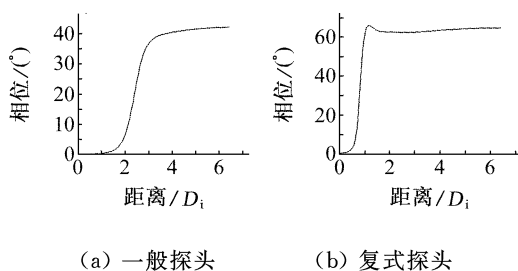


图 4 辅助激励线圈对远场涡流测试区域的影响

缺陷向四周扩展形成裂纹,当剩余面积强度不足时发生掉块,因此在整体车轮探伤中应采用双晶纵波探头垂直入射法进行检测。

(4) 轮箍(整体车轮)缺陷定量中不能只进行简单的理论计算,要考虑缺陷是否处在三倍近场区内,应制作不同深度、不同孔径的平底孔或横通孔进行当量对比。

(5) 对于不同的探伤方法,要对波形进行认真分析,没有缺陷波并不意味没有缺陷,如垂直入射法既无缺陷波又无底波,可能是轮箍中存在面积较大的斜向缺陷或轮箍材质不良,是危害性较大的缺陷。探伤操作时应随时注意底波的变化。

(6) 每一种探头和探伤方法都有对应的缺陷检出能力,对同样的缺陷,不同探头和探伤方法会有不同的检测效果,缺陷定性、定位和定量时最好采用不同探头和不同探伤方法进行判断,同时探伤人员应积累实践经验,对波形做出正确判断,防止机车轮箍在运行中发生崩裂。

(7) 检测结果受超声波探伤仪、探头、检测方法和探伤人员四个要素影响,其中任何一个因素都会改变检测效果,尤其是人员素质,包括人员对轮箍缺陷形成和缺陷的反射回波的认识、对轮箍的加工工艺的了解以及对轮箍超声波探伤的个人经验都会影响检测结果。

而且所测得的相位差值增大了,信号增强了。

复式探头中,重要的一点是确定主辅激励线圈间的初始相位差,必须寻找合适的角度,经 ANSYS 仿真尝试,得到初始相位的差值与主激励的初始相位无关,而与激励频率和铁管的材料属性有关。

4 结论

通过有限元仿真工具对探头改进的两种方案进行了模型仿真,对其改进效果进行了验证,表明两种方法对探头的长度缩短有着明显的成效。

参考文献:

- [1] 陶旺斌.远场涡流机理探讨[J].无损探伤,1996,(5):42-44.
- [2] 王风华.远场涡流探头结构的改进[J].试验技术与试验机,1996,(1,2):46-49.
- [3] 张忠,曲民兴.远场涡流检测探头的改进[J].油田地面工程,1994,(4):85-86.
- [4] 曲民兴,司家屯.采用复式激励的新型远场涡流探头[J].电工技术学报,1997,(3):11-14.