

基于磁屏蔽的脉冲涡流缺陷检测仿真

周德强^{1,2,3}, 吴佳龙^{1,2}, 王 俊^{1,2}, 过雪东^{1,2}, 尤丽华^{1,2}

- (1. 江南大学 机械工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122;
3. 无锡国盛精密模具有限公司, 无锡 214024)

摘 要:针对铁磁性/非铁磁性的脉冲涡流缺陷检测,建立了磁屏蔽下的脉冲涡流检测数值仿真模型,分析了两种金属构件磁屏蔽下的涡流、磁感线分布和涡流检测信号的作用机制。磁屏蔽主要包括线圈无磁屏蔽、线圈内磁屏蔽、线圈外磁屏蔽、线圈内外磁屏蔽四种磁屏蔽方式。仿真结果表明:两种金属构件下的四种脉冲涡流缺陷检测磁屏蔽模型中,线圈内磁屏蔽措施对于提高脉冲涡流缺陷检测的灵敏度最有效。

关键词:脉冲涡流检测;磁屏蔽;磁感线;灵敏度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)11-0014-04

The Simulation Analysis of Pulsed Eddy Current Flaw Detection Based on Magnetic Shielding

ZHOU De-qiang^{1,2,3}, WU Jia-long^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, GUO Xue-dong^{1,2}, YOU Li-hua^{1,2}

- (1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China;
3. Wuxi G. S Precision Tool Co., Ltd, Wuxi 214024, China)

Abstract: In view of the pulsed eddy current flaw detection of ferromagnetic and non ferromagnetic metals, the numerical simulation models of pulsed eddy current testing under the magnetic shielding were established. The distribution of magnetic induction line and the mechanism of action of eddy current testing signal were researched. Magnetic shielding included: magnetic shielding within the coil, magnetic shielding outside the coil, magnetic shielding both inside and outside the coil. The simulation results show that magnetic shielding in the inner magnetic shielding of the coil can most effectively improve the sensitivity of defect detection for the ferromagnetic and non ferromagnetic metal in the four magnetic shielding models.

Keywords: Pulsed eddy current detection; Magnetic shield; Magnetic induction line; Sensitivity

脉冲涡流无损检测技术作为一种新兴的电磁无损检测技术,是涡流检测技术的一种新方法,具有宽频谱、缺陷信息提取量大、检测速度快等优点^[1-5],应用前景广阔。传统的电磁检测根据稳态分析只能确定缺陷的位置,而脉冲涡流检测通过对感应电压信号的时域瞬态分析,可以分析缺陷的尺寸、类型和结构参数等变化,实现缺陷的定量检测评估^[1]。

国内外学者在非铁磁材料涡流检测的理论建

模、新型探头设计、缺陷反演等方面开展了深入研究^[3-6]。而对铁磁构件实施涡流探伤时,则须增添磁饱和器,以主要用于抑制构件磁导率波动诱发的噪声。文献[7]针对钢管采用漏磁与涡流进行复合探伤,仿真与试验结果表明,在饱和磁化状态下,即使采用涡流探头,检出信号也是漏磁信号,铁磁性构件的脉冲涡流检测信号复杂。文献[8]在多通道低频涡流探测器的研制方面,对接收信号线圈采用磁屏蔽措施,减小高频信号对接收线圈的干扰,提高了探测器的灵敏度。文献[9]针对铁磁性管道腐蚀远场涡流检测性能进行改进,在激励线圈和检测线圈间加装屏蔽装置,降低直接耦合场大小,从而缩短传感器尺寸、增强检测信号幅值以及提高激励信号频率。

收稿日期: 2014-06-25

基金资助: 国家自然科学基金资助项目(51107053); 中国博士后基金资助项目(2012M520994)

作者简介: 周德强(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为新型传感器、电磁无损检测。

文献[10]在脉冲涡流无损检测系统抗干扰设计方面,考虑到地磁场或者周围空间中外来强磁场或电磁波的干扰影响,采用金属网或者金属壳体将检测电路和外界环境隔离开来,从而提高了数据采集信号的信噪比。文献[11—13]针对铁磁性构件采用漏磁检测方法,从磁折射物理特性的分析出发,形成一套磁真空泄漏假设并提出一种基于磁真空泄漏原理的漏磁检测新方法。但是这些方法大都是在基于磁饱和或者外加激励工件条件下进行的,尽管在检测实践中能够有效地辨别缺陷,但是造价相对较高且检测过程相对复杂。文献[14]为改善钻杆漏磁检测信号信噪比,设计了磁屏蔽器,仿真和试验结果表明,磁屏蔽器存在的情况下,钻杆漏磁信号明显集中于缺陷附近,且永磁体元件间通过空气介质耦合的背景磁通会大大降低,漏磁信号信噪比得到提高。

以上文献表明,磁屏蔽技术能够有效提高远场涡流与漏磁传感器检测的灵敏度。笔者借鉴漏磁检测与远场涡流检测新成果,建立磁屏蔽下的两种金属构件(铁磁性与非铁磁性构件)的脉冲涡流数值模型,分析了两种金属构件磁屏蔽下涡流、磁感线分布和涡流检测信号的作用机制,提出了基于磁屏蔽的脉冲涡流缺陷检测新方法。

1 脉冲涡流检测模型的建立

采用 Comsol Multiphysics 4.4 建立了脉冲涡流圆柱型探头二维轴对称检测模型。在 AC/DC 模块下选择物理场为磁场,并且在瞬态求解下进行求解分析。针对铁磁性/非铁磁性材料缺陷的脉冲涡流无损检测,分别建立了磁屏蔽与无磁屏蔽四种检测模型,即磁场无屏蔽、磁场内屏蔽、磁场外屏蔽、磁场内外屏蔽模型。各模型如图 1 所示。脉冲涡流仿真参数设置如下:激励电流为 0.5 A 的方波,激励频率为 100 Hz,漆包线截面积为 1 mm^2 ,匝数为 667 匝;仿真试样为铁磁性与非铁磁性金属,分别设置为铁与铝,其电导率分别为 1.12×10^7 , $3.774 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$;磁屏蔽材料参数设置:相对磁导率设置为 1,相对介电常数设置为 1,电导率设置为 $3.774 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2 模型仿真及讨论

2.1 铁磁性金属缺陷脉冲涡流检测仿真分析

图 2 各分图分别为无磁屏蔽、内磁屏蔽、外磁屏蔽与内外磁屏蔽下的铁磁性金属涡流分布。从图 2 中可以看出,无磁屏蔽、内磁屏蔽、外磁屏蔽与内外

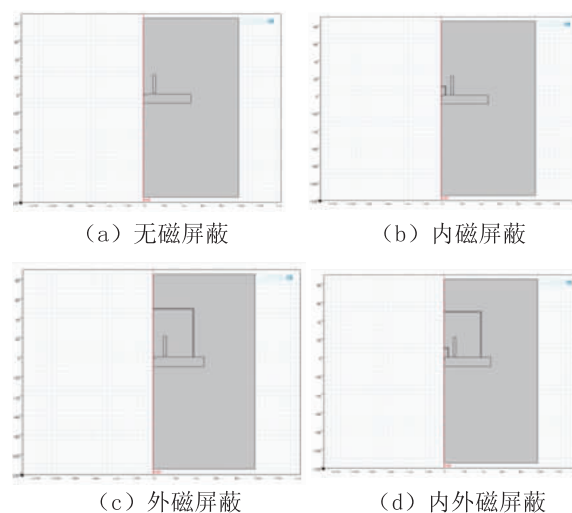


图 1 磁屏蔽与无磁屏蔽脉冲涡流检测模型

磁屏蔽下的感应电流密度最大值依次是:3.8087, 5.2994, 3.4478, 4.428 ($\times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$);内磁屏蔽下的感应涡流密度最大,外磁屏蔽下的感应涡流密度最小的,内外磁屏蔽下的感应涡流密度仅次于内磁屏蔽下的值;这说明,对于铁磁性材料来说,内磁屏蔽措施可以提高检测的灵敏度。外屏蔽措施对检测灵敏度有不利影响,内外磁屏蔽措施也可以提高检测的灵敏度,但是比单纯的内磁屏蔽下的灵敏度要低。为进一步寻求磁屏蔽下,涡流随着求解时间的变化,仿真分析了磁力线随时间变化的关系,如图 3 所示。从图 3 中可发现,在仿真求解初期,内磁屏蔽下磁力线是不穿过磁屏蔽罩的,外磁屏蔽下磁力线被聚拢。随着求解时间的变长,如图 2 所示,内磁屏蔽下磁力线缓慢穿过磁屏蔽罩,外磁屏蔽下磁力线缓慢穿出磁屏蔽罩,即方波上升沿瞬间,高频分量占主导,内磁屏蔽罩下近似真空,外磁屏蔽罩下磁力线受到一定的衰减;随着脉冲宽度的增加,低频分量增加,内磁屏蔽罩下磁力线增加,背景磁场增加,对涡流信号干扰加大;外磁屏蔽下大量磁力线穿出磁屏蔽罩,磁力线进一步受到衰减,减小了涡流的产生。由图 2 可知,无磁屏蔽、内磁屏蔽、外屏蔽、内外屏蔽四种情况下的磁感应强度分别是:8.8252, 8.7849, 8.8244, 8.8144 ($\times 10^{-5} \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-1}$),从中看出,内磁屏蔽情况下的磁感应强度最低,表明内磁屏蔽措施可以一定程度地起到减小背景磁场对缺陷涡流磁场的干扰的作用,这与文献[12]结论一致。内磁屏蔽条件下,减小背景磁场对涡流的干扰,有利于提高涡流探头的灵敏度。

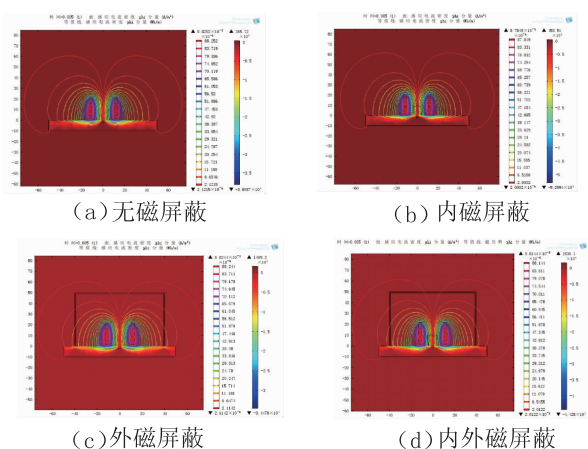


图2 各屏蔽情况下的铁磁性金属涡流分布

为了进一步验证磁屏蔽措施下的检测效果,笔者进行了缺陷仿真,在被测铁板表面的中心刻有不同深度的切口(2,4,6,8 mm),提取中心点处的磁通密度Z分量并做缺陷差分处理,提取缺陷差分信号峰值,得到差分信号峰值与缺陷深度间的关系,如图4所示。从图4中可发现,内磁屏蔽下的检测效果是最佳的,其次是内外磁屏蔽情况,而单纯的外磁屏蔽检测效果最差。

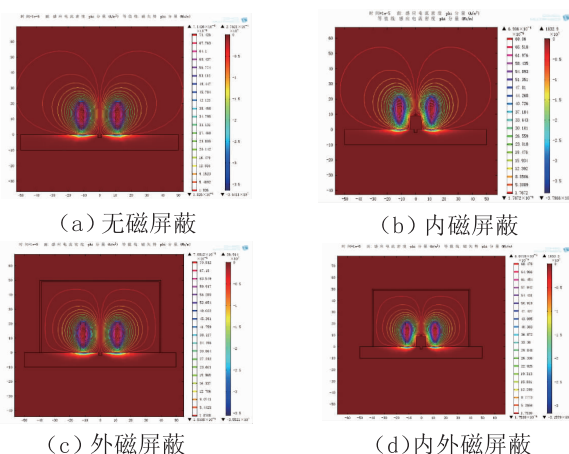


图3 各屏蔽情况下的铁磁性金属磁力线分布

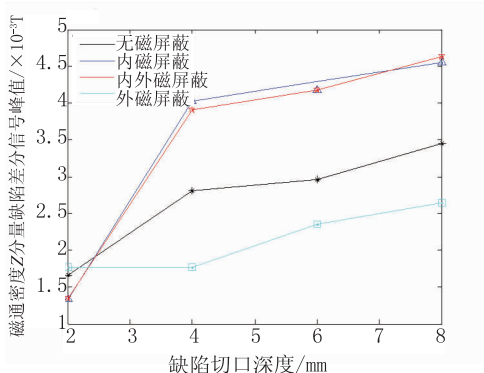


图4 铁磁性材料缺陷差分信号峰值与缺陷深度间的关系

2.2 非铁磁性金属缺陷脉冲涡流检测仿真分析

图5各分图分别为无磁屏蔽、内磁屏蔽、外磁屏蔽与内外磁屏蔽下的非铁磁性金属涡流分布。从图5中可得出,无磁屏蔽、内磁屏蔽、外磁屏蔽与内外磁屏蔽下的感应电流密度的峰值分别是: $5.4643, 5.4744, 5.4093, 5.4081 (\times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2)$,内磁屏蔽下的感应涡流密度最大,内外磁屏蔽下的感应涡流密度最小。无磁屏蔽、内磁屏蔽、外磁屏蔽与内外磁屏蔽下的磁感应强度的峰值分别是: $77.269, 77.248, 77.222, 77.404 (\times 10^{-6} \text{ Wb/m})$,可以看出,内磁屏蔽措施下磁感强度相对较小;内外磁屏蔽下磁感强度最大。

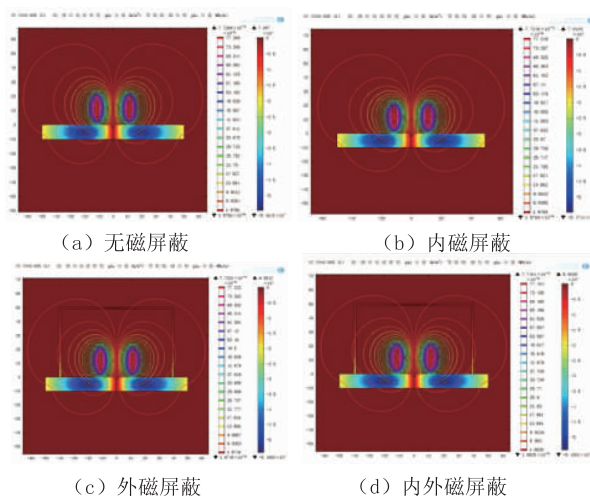


图5 各屏蔽情况下的非铁磁性金属涡流分布

为了进一步验证磁屏蔽措施下的检测效果,笔者进行了缺陷仿真,在被测铝板表面的中心刻有不同深度的切口(2,4,6,8 mm),提取中心点处的磁通密度Z分量并做缺陷差分处理,提取缺陷差分信号峰值,差分信号峰值与缺陷深度间的关系如图6所示。从图6中可发现,对于非铁磁性材料,内磁屏蔽增大了感应涡流密度,提高了检测的灵敏度。内外磁屏蔽下磁感强度较大,而感应涡流密度较小,内外磁屏蔽下抑制了感应涡流的产生,与内磁屏蔽相比,缺陷检测的灵敏度较低。

3 结论

(1) 对于铁磁性材料,线圈内磁屏蔽可以有效提高缺陷检测的灵敏度;线圈外磁屏蔽降低了检测灵敏度;线圈内外磁屏蔽可以提高检测缺陷检测的灵敏度,但是灵敏度不如单纯内磁屏蔽情况下的灵敏度。

(2) 对于非铁磁性材料,线圈内磁屏蔽可以有

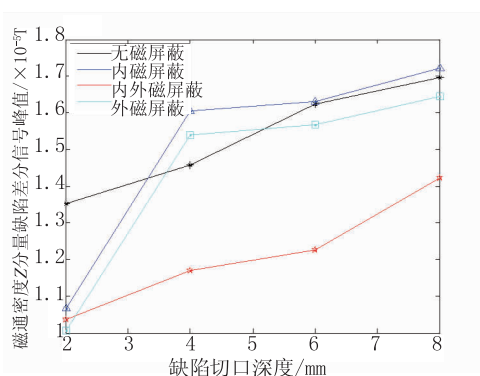


图6 非铁磁性材料缺陷差分信号峰值与缺陷深度间的关系

效提高缺陷检测的灵敏度;线圈内外磁屏蔽降低了缺陷检测的灵敏度;线圈外磁屏蔽检测效果不明显。

参考文献:

- [1] 徐晨曦. 脉冲涡流检测实验系统的研制[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [2] 程松波, 郭顺生. 铁轨部件表面裂纹的快速涡流检测系统设计[J]. 机电一体化, 2006, 12(4): 70-72.
- [3] THEODOULIDIS T, POULAKIS N, DRAGOGLAS A. Rapid computation of eddy current signals from narrow cracks[J]. NDT & E International, 2010, 43(1): 13-19.
- [4] LADISLAV J, KLARA C, NORITAKA Y, et al. Multi-probe inspection for enhancing sizing ability in eddy

current nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 144(6): 1618-1621.

- [5] 耿强, 田淑侠, 黄太回, 等. 基于支持向量机和神经网络方法的应力腐蚀裂纹定量重构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 196-199.
- [6] 范孟豹, 黄平捷, 叶波, 等. 基于反射与折射理论的电涡流检测探头阻抗解析模型[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 5950-5954.
- [7] 宋凯, 康宜华, 孙燕华, 等. 漏磁与涡流复合探伤时信号产生机理研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 233-237.
- [8] 王洪柱, 丁克勤, 黄冬林, 等. 多通道低频涡流探测器的研制[J]. 测试技术学报, 2009, 23(4): 5-6.
- [9] 徐小杰, 罗飞路, 刘春艳, 等. 铁磁性管道腐蚀远场涡流检测性能的改进[J]. 测试技术学报, 2006, 20(5): 4-7.
- [10] 张斌强. 脉冲涡流检测系统的设计与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [11] 康宜华, 谈存真, 宋凯, 等. 铝板和铜板裂纹磁场检测法[J]. 无损检测, 2011, 33(5): 15-18.
- [12] 孙燕华, 康宜华. 一种基于磁真空泄漏原理的漏磁无损检测新方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 18-23.
- [13] 孙燕华. 钢管漏磁检测及其新原理[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [14] 马义来, 林立, 蒋开文, 等. 利用磁屏蔽效应改善钻杆漏磁检测信号信噪比[J]. 无损检测, 2013, 35(3): 10-11.

(上接第13页)

3 结语

基于Ar法对使用柔性探头的套管偏心缺陷涡流检测方法进行数值计算,以初步验证其可行性。然后手工绕制探头,搭建试验系统对模拟套管偏心系统进行了实际检出试验。对不同探头结构及放置方式下的检出效果进行了对比,探究最优探头配置方式。试验表明,上激励、上下共同检出作差分,上激励、环向90度检出以及上下分别自行激励检出并作差分的方式均可以有效地检测出偏心。其中上激励、环向90度探头配置方式信噪比较差,实际检出试验时采用其他两种探头配置方式检出效果较好。

参考文献:

- [1] SCHAFFER M J, MENARD J E, ALDAN M P, et al. Study of in-vessel nonaxisymmetric ELM suppression coil concepts for ITER [J]. Nuclear Fusion, 2008, 48(2): 1-14.

- [2] VILLARI R, PETRIZZI L, BROLATTI G, et al. Three-dimensional neutronic analysis of the ITER in-vessel coils[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(6): 584-587.
- [3] YONG L, CHEN Z, MAO Y, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique[J]. NDT & E International, 2012, 50: 29-35.
- [4] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] 赵宏达, 蔡文路, 李勇, 等. 托卡马克内部线圈套管导体偏心缺陷无损检测方法研究[J]. 无损检测, 2013, 32(10): 63-66.
- [6] FUKTOMI H, TAKAGI T, NISHIKAWA M. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes[J]. NDT & E International, 2001, 34(1): 17-23.
- [7] NARDON E, BECOULET M, HUYSMANS G, et al. Edge localized modes control by resonant magnetic perturbations[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 363: 1071-1075.