

脉冲漏磁检测管道技术的有限元分析

唐 莺,罗飞路,潘孟春,陈棣湘,何赟泽

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)

摘要:漏磁检测方法作为一种无损检测技术广泛应用于钢材等的检测。分析了脉冲漏磁检测原理,提出了脉冲交流磁化方式。采用有限元法对系统参数变化等影响缺陷漏磁场分布因素进行了仿真计算,分析了提离、缺陷深度及宽度等变化对脉冲漏磁检测结果的影响。结果表明在较大提离情况下,脉冲漏磁检测方法具有可提取较多检测信息、输出电压幅值高的优点,在钢管的缺陷检测中将有广阔的应用前景。

关键词:脉冲漏磁检测;有限元仿真;钢管;缺陷

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2009)07-0513-04

Finite Element Numerical Simulation on Steel Pipe Using Pulsed Magnetic Flux Leakage Testing

TANG Ying, LUO Fei-Lu, PAN Meng-Chun, CHEN Di-Xiang, HE Yun-Ze

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Magnetic flux leakage technique had been widely used for non-intrusively testing of steel products. The principle of pulsed magnetic flux leakage testing(PMFL) was analyzed. A pulsed alternating current magnetizing method was presented. The finite element numerical simulation had been used to simulate and calculate the effects on various of parameter of the detection system. The influences of changes of lift-off, defect depth and length of the pulsed magnetic field leakage were studied by way of finite element numerical simulation. The results showed that PMFL had the advantage of high signal amplitude and more useful testing information, and this making the method had the broad using foreground in the testing of steel pipe.

Keywords: Pulsed magnetic flux leakage testing; Finite element numerical simulation; Steel pipe; Defect

钢管在石油、城市供水、天然气和化工等行业中应用广泛,而工业管道的工作条件非常恶劣,钢管非常容易因腐蚀和疲劳等因素发生破损,从而导致泄露事故的发生,因而对钢管进行质量检测十分必要。在无损检测方法中,漏磁检测由于具有无污染、无需耦合剂、快速、可靠性高等优点,使其在铁磁性材料领域得到广泛应用。

运用漏磁检测技术对被测试件检测前,试件需要被磁化。漏磁检测技术中的磁化方式主要有三种:直流磁化、永久磁化和交流磁化。直流磁化的优点是可用于检测钢管的内外壁缺陷,但需要退磁;永

久磁化的优势是体积小、磁能低、剩磁低,但磁化强度的调整不方便;交流磁化具有可检测表面粗糙工件、成本低廉、磁路设计简单和不需要退磁的优点,缺点是由于集肤效应,使磁化场集中于被测试件表面,难以检测表面下缺陷^[1]。近几年,在对飞机多层结构缺陷检测领域中得到较多研究的脉冲涡流检测技术,由于含有丰富的频率成分,感应信号包含缺陷的更多信息,体现出一定的优势。而脉冲涡流技术中由于渗透深度随着被测材料相对磁导率的增大而减小,因此主要应用于非铁磁性材料的检测。综合漏磁检测技术和脉冲涡流检测技术,笔者提出了脉冲漏磁检测方法,以提高铁磁性材料的检测灵敏度。利用有限元仿真分析方法,模拟了实际检测条件,而且不需要设计大量的人工缺陷试样和传感器结构,最终为试验设计提供了依据。

收稿日期:2008-10-21

基金项目:十一五预先研究支持项目(51317030109)

作者简介:唐 莺(1971—),女,副教授,研究方向为电磁无损检测。

1 脉冲漏磁检测原理

漏磁检测的基本原理是:当铁磁性材料在外加磁场的作用下被磁化,如果材料材质连续、均匀,那么磁感应线将几乎都通过铁磁材料;若材料的表面或近表面存在裂纹等缺陷,由于缺陷磁导率小、磁阻大,在缺陷附近的磁感应线分布会发生变化,一部分将泄漏出铁磁材料表面,形成漏磁场^[2]。漏磁信号随着缺陷几何尺寸及形状不同而变化,采用漏磁检测传感器来检测漏磁信号的变化,将获得缺陷信息。脉冲交流磁化的漏磁检测装置与正弦交流磁化的漏磁检测类似,采用便携式磁轭,传感装置结构如图1所示,它包含磁化用激励线圈和检测线圈。

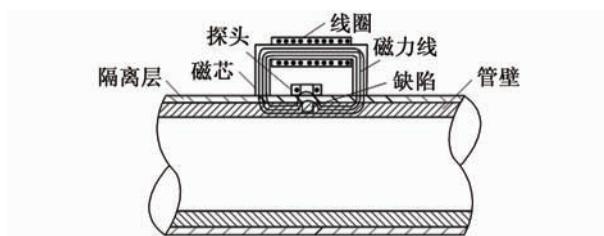


图1 脉冲漏磁检测仿真模型图

脉冲交流信号是占空比一定的矩形波,加载在U型磁芯的激励线圈上将产生一脉冲变化磁场,管壁上的缺陷会影响漏磁场的变化,使置于被测试件表面的检测探头上感应出随之变化的瞬态电压。通过分析其瞬态电压可获知缺陷情况^[3-4]。

2 有限元模型建立

麦克斯韦方程组是描述所有宏观电磁现象的一组基本方程组,其表述的缺陷漏磁场方程为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n} \quad (4)$$

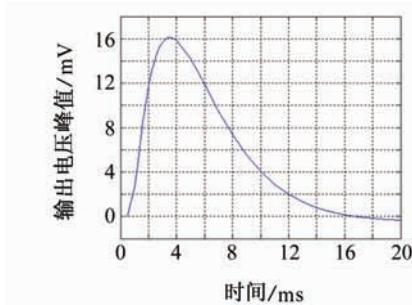


图2 感应瞬态电压的时间响应信号

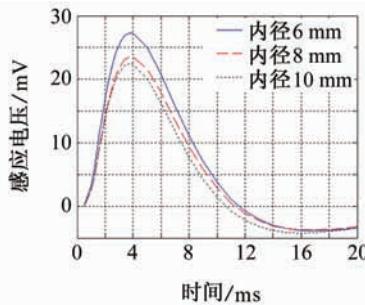


图3 漏磁检测线圈内径变化对感应电压的影响

引入磁矢势 \mathbf{A} ,得:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (6)$$

均匀介质中有:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (7)$$

利用有限元法对满足边界条件式(4)和(7)的脉冲交变漏磁检测系统各区域的磁势进行数值计算^[5]。

采用有限元分析软件 ANSYS, 对图1所示的传感器结构进行三维建模分析。由于脉冲激励信号的时域特点,需对所建模型进行三维瞬态磁场分析。利用 ANSYS 进行磁场分析一般包括前处理(设立单元类型、模型建立和网格划分)、加载求解以及后处理(查看分析结果)三个步骤。三维有限元瞬态磁场的求解需要多个载荷步才能完成,因此所占计算机资源大、计算所需时间长。由于研究的重点是缺陷附近的漏磁情况,并不一定要建立有限元的全模型,笔者只对含有缺陷的四分之一钢管及传感器结构建立模型,分别对无缺陷及周向缺陷进行了三维瞬态磁场仿真分析。

为了仿真计算得到检测探头的感应瞬态电压,可利用 ANSYS 软件提供的通用电路分析单元 CIRCU124,将检测探头与电阻耦合串联构成电路来完成。在电路分析中设立脉冲交流电压幅值为 24 V,占空比为 50%。在频率为 20 Hz 时所仿真计算的感应瞬态电压如图2 所示。

3 系统参数对缺陷漏磁场的影响

3.1 漏磁传感装置参数变化的影响

为了分析漏磁检测线圈内径变化对结果的影响,计算其加聚磁磁芯检测线圈,内径分别为 6,8 和 10 mm 三种情况下的感应电压波形曲线(图3)。发现漏磁检测线圈内径越小,感应电压峰值越小,过零时间越短(此处所指信号的峰值是指脉冲漏磁感应

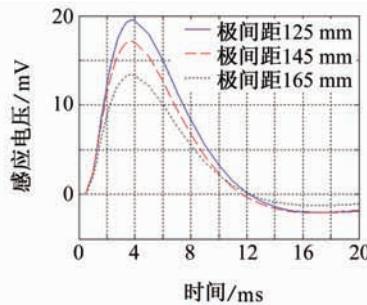


图4 磁轭极间距对感应电压的影响

信号的最大值,过零时间是指从脉冲激励信号的上升开始到漏磁感应信号到达零点时的时间间隔)。在线圈内径较小的情况下,线圈内径的变化对感应电压波形的影响不明显。这是因为检测线圈直径越大,收集到的缺陷漏磁场的磁通量也越大,因此具有较高的检测灵敏度。

分析磁轭两极间距对检测结果的影响。分别计算极间距为 125,145 和 165 mm 的感应电压波形曲线(图 4)。极间距越大,钢管表面的磁场强度越弱,感应电压的峰值越小。过零时间亦随极间距增大而减少,但变化不大。因此在设计传感器装置时应考虑合适的磁轭极间距及检测线圈内径。

3.2 聚磁组件对缺陷漏磁场的影响

为了使磁化激励线圈产生的磁力线大部分能传递至被测试件,确保管壁的局部区域被有效磁化,选用在高导磁性能 U 型磁芯上绕制矩形激励线圈。加入聚磁板和不加聚磁板两种情况下的仿真磁场分布如图 5 所示。通过对比可知,不加聚磁板的磁化激励线圈产生的激励磁场在探头两端会出现较多的磁场泄漏,能够进入到管壁的磁场均会比较微弱,对管壁的局部磁化效果不够理想,这将影响缺陷的有效识别。因此拟选用加聚磁板的检测传感装置。

4 缺陷尺寸变化对检测结果的影响

4.1 缺陷宽度对检测结果的影响

为了分析缺陷宽度对检测结果的影响,在钢管表面设置缺陷尺寸(长×宽×深)为 15 mm×2 mm×3 mm,15 mm×4 mm×3 mm 和 15 mm×6 mm×3 mm 三种轴向缺陷进行仿真分析,计算在缺陷边缘,即感应电压出现最大峰值的时域波形(图 6)。由图可知,缺陷深度的变化使感应电压波形峰值相应改变,而过零时间基本不变,这说明过零时间与缺陷宽度无关。

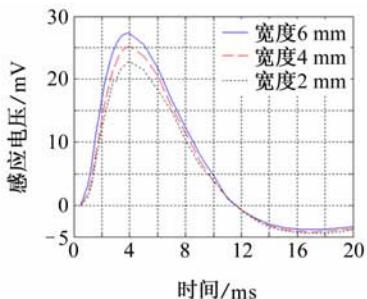


图 6 缺陷宽度对检测结果的影响

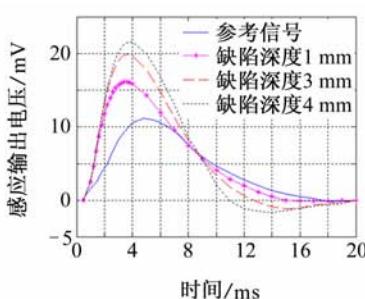
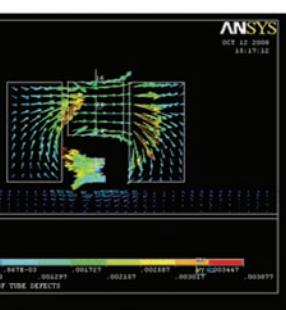
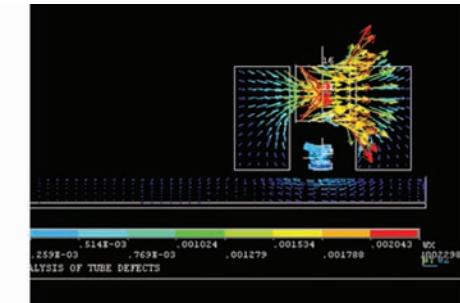


图 7 缺陷深度对检测结果的影响



(a) 加聚磁板



(b) 不加聚磁板

图 5 两种激励线圈的磁场分布图

4.2 缺陷度深对检测结果的影响

在钢管外壁上分别设置缺陷尺寸(长×宽×深)为 15 mm×2 mm×2 mm,15 mm×2 mm×3 mm 和 15 mm×2 mm×4 mm 的轴向缺陷,分析缺陷深度对结果的影响(图 7)。由此发现随着缺陷深度的增加,感应电压峰值增大,过零时间减少。图 8 说明感应电压的峰值与缺陷深度近似成线性关系,由感应电压可获知缺陷的深度。

5 提离对检测结果的影响

提离增大将使工件表面磁场强度的损失增大。为了分析提离变化对检测结果的影响,确定缺陷尺寸(长×宽×深)为 15 mm×2 mm×3 mm 不变,改变提离值(分别为 3,6 和 9 mm)进行仿真分析,所

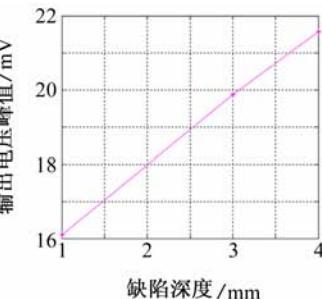


图 8 缺陷深度变化与感应电压峰值的关系

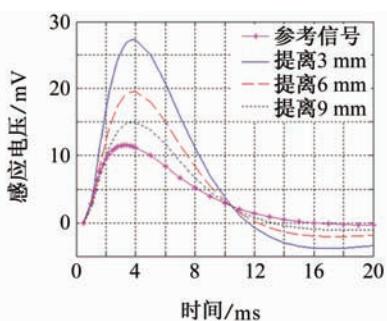


图 9 提离变化对感应电压的影响

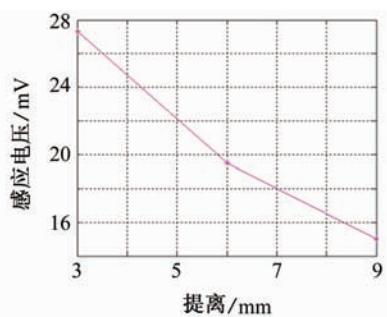


图 10 提离变化与感应电压峰值的关系

得结果如图 9 和 10 所示。由图 10 可以发现,随着提离的增大,感应信号的峰值减少,过零时间变长。对比参考信号和提离达到 9 mm 时的感应信号,得知尽管提离对检测探头的输出电压有影响,但仍可以对缺陷进行识别。脉冲涡流检测技术对提离非常敏感,1~2 mm 左右的提离将很大程度上影响检测的灵敏度。

6 结论

采用有限元法,仿真分析了脉冲漏磁检测系统

(上接第 512 页)

参考文献:

- [1] 游凤荷. 涡流检测技术的某些新进展[J]. 无损检测, 2001, 38(2): 4—6.
- [2] Ali Sopian, Gui Yun Tian, David Taylor, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 37—41.
- [3] Dai X W, Ludwig R, Palanisamy R. Numerical simulation of pulsed eddy-current nondestructive testing phenomena [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(6): 3089—3096.
- [4] 孙明礼, 胡仁喜. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例
- [5] 徐章遂, 徐英, 王建斌, 等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] Tianlu Chen, Gui YunTian, Ali Sophian, et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2008, 41(6): 467—476.
- [8] Huang Zuoying, Que Peiwen, Chen Liang. 3D FEM analysis in mengnetic flux leakage method[J]. NDT & E International, 2006, 39(1): 61—66.
- [9] 唐莺, 郭希玲, 潘孟春, 等. 不同参量对缺陷交变漏磁场影响的仿真及验证[J]. 无损检测, 2008, 30(9): 577—579.
- [10] 张榴晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [11] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [12] 单成祥, 牛彦文. 传感器设计基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [13] Safizadeh M S, Lepine B A, Forsyth D S, et al. Time frequency analysis of pulsed eddy current signals[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2001, 20(2): 73—86.

中传感器装置参数等变化对漏磁场的影响,计算了提离变化、缺陷深度和缺陷长度等对漏磁检测探头感应电压的影响。计算结果表明,脉冲漏磁检测技术与脉冲涡流检测技术相比较,在信号特征量的提取上有较大的相似性;区别在于脉冲漏磁检测适用于铁磁性材料的检测,而脉冲涡流主要用于非铁磁性材料的检测。脉冲涡流对提离变化敏感,脉冲漏磁在较大提离情况下仍能有效识别缺陷;另外,脉冲漏磁的励磁信号频率较低,否则将不会有零点这一特征量出现。因此,脉冲漏磁检测技术综合了脉冲涡流和一般漏磁检测技术的优点,具有定量检测的优点,且包含更多检测信息,在较大提离情况下,能实现对缺陷的有效识别。在钢管的缺陷检测中将有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 徐章遂, 徐英, 王建斌, 等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] Tianlu Chen, Gui YunTian, Ali Sophian, et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2008, 41(6): 467—476.
- [4] Huang Zuoying, Que Peiwen, Chen Liang. 3D FEM analysis in mengnetic flux leakage method[J]. NDT & E International, 2006, 39(1): 61—66.
- [5] 唐莺, 郭希玲, 潘孟春, 等. 不同参量对缺陷交变漏磁场影响的仿真及验证[J]. 无损检测, 2008, 30(9): 577—579.
- [6] 张榴晨, 徐松. 有限元法在电磁计算中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- [7] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] 单成祥, 牛彦文. 传感器设计基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [9] Safizadeh M S, Lepine B A, Forsyth D S, et al. Time frequency analysis of pulsed eddy current signals[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2001, 20(2): 73—86.