

基于磁导率非线性条件下的油套管 脉冲涡流检测仿真

喻星星,付跃文

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

摘要:根据有限元方法,建立了考虑磁导率非线性条件下的脉冲涡流检测系统瞬态数学模型;在磁导率非线性条件下,对不同激励电流下的油套管脉冲涡流检测过程进行了仿真。通过对每一时刻的磁导率进行迭代计算,得到更为精确的求解结果。利用该模型,获得了不同激励电流下4 mm腐蚀深度时所产生的脉冲涡流信号检测结果。根据仿真计算检测结果,发现由于材料磁导率非线性特点的存在,加大激励电流并不一定能提高检测灵敏度。

关键词:脉冲涡流;磁导率;非线性;激励电流;检测灵敏度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)04-0001-04

Simulation of Oil Casing Pulsed Eddy Current Testing Based on Nonlinear Magnetic Conductivity

YU Xing-Xing, FU Yue-Wen

(Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong
University, Nanchang 330063, China)

Abstract: According to the principle of 2D electromagnetic finite element analysis, a transient mathematic model of pulsed eddy current (PEC) testing system considering permeability nonlinear was established and simulation research for oil casing PEC testing process of different drive current was conducted in permeability nonlinear. Through the iterative calculation to permeability by every moment, more accurate results were obtained. Using this model, we achieved the PEC signals detection results corresponding to the different excitation current in 4 mm corrosion depth. According to the test results, we found that due to the material permeability nonlinear, increasing excitation current does not necessarily improve the detection sensitivity.

Keywords: Pulsed eddy current; Magnetic conductivity; Nonlinear; Excitation current; Detection sensitivity

提高油田油套管在线在役检测的技术水平,对保障油田安全高效开采将发挥重要作用。目前,油套管脉冲涡流检测技术的理论基础主要还是电磁感应定律;通过测定接收线圈上感应电压的大小来判别油套管的损伤情况。其中,多数学者在对铁磁性材料进行仿真研究时,都将其相对磁导率视为不变的常数^[1-3]。这种基于磁导率不变的线性仿真研

究,与实际的铁磁性材料脉冲涡流检测还是具有一定的差距;实际检测过程中,激励电流的大小将直接影响检测效果,因此,将相对磁导率视为常数进行仿真分析,必将带来较大分析误差。为此,在磁导率非线性条件下,针对不同激励电流对接收线圈中感应电动势的衰减情况,以及对油套管检测效果的影响进行仿真研究是十分必要的。

笔者根据有限元方法,建立了考虑磁导率非线性条件下的脉冲涡流检测系统瞬态数学模型;在磁导率非线性条件下,对不同激励电流下的油套管脉冲涡流检测过程进行了仿真。

收稿日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51067007)

作者简介: 喻星星(1985—),男,硕士研究生,主要从事铁磁性材料脉冲涡流检测研究。

1 非线性磁导率对脉冲涡流检测的影响及处理方法

1.1 材料磁导率非线性对脉冲涡流检测的影响

在脉冲涡流检测中,常规涡流检测中的电磁场渗透深度 δ :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: f 为频率; μ 为材料的磁导率; σ 为电导率。

此公式对脉冲涡流检测也是适用的。由式(1)可知,材料的磁导率 μ 值直接影响到电磁场渗透深度;而对磁导率非线性的铁磁性材料而言,其 μ 值随外加磁场强度的变化而变化。图1为油套管绝对磁导率 μ 值与磁场强度 H 的关系曲线。由图1可知在 OA 段,磁导率 μ 随着磁场强度的增强而升高, O 点 μ 值为初始磁导率, A 点作为磁导率的最高点, AC 段磁导率随磁场强度的增强而逐渐降低。由此可知,在 OA 段内,磁场强度越强,那么磁导率 μ 值越高,根据电磁场渗透公式,渗透深度 δ 越小,这是不利于检测的;当磁场强度继续加强而超越 A 点所对应的磁场强度时,磁导率随之降低,渗透深度 δ 也随着加大;根据检测时探头的放置特点(对通电线圈而言磁场强度最强处位于线圈正中心处,在线圈外部磁场强度急剧减弱;所以当线圈置于油管内时,套管所在位置处磁场强度难以超越 A 点所对应的磁场强度 H),激励线圈在套管位置产生的磁场强度处于 O、A 点对应的磁场强度范围内。由此可知,当加大激励电流,即加强磁场强度,磁导率 μ 随之增大,那么将不利于检测灵敏度的提高。

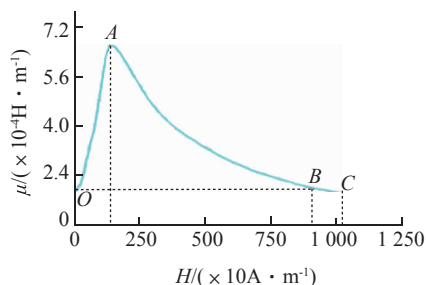


图1 油套管绝对磁导率 μ 与磁场强度 H 的关系曲线

1.2 有限元仿真计算时对非线性磁导率的处理方法

铁磁材料的磁导率随磁场的变化呈现显著的非线性,可用起始磁化曲线、磁滞回线和平均磁化曲线等来表征。当求解域包含铁磁材料时,其中的磁导

率依赖于解向量。常用的求解非线性方程组方法有多种,其中,松弛法(或称逐次线性化法)在求解非线性方程组时不需要建立雅克比矩阵,从而节约了形成代数方程组的计算时间。此时只须按下式对磁导率进行处理即可:

$$\mu^{\text{new}} = \mu^{\text{old}} + \omega(\mu^{\text{new}'} - \mu^{\text{old}}) \quad (2)$$

式中: μ^{old} 为上一次迭代的 μ 值; $\mu^{\text{new}'}$ 为上一次由场的迭代解按磁化曲线查出的 μ 值; ω 为松弛因子 ($0 < \omega < 1$); μ^{new} 为当前迭代步所使用的 μ 值。

对每一时刻,磁导率的迭代过程如下:① 置迭代次数 $k=0$, 设定各单元磁导率初值 $\mu_i^k = \mu_i^0$ 。② 建立并求解代数方程组。③ 计算单元磁感应强度 B_i^k , 由 B_i^k 根据磁化曲线求出对应的磁导率。④ 计算单元磁导率迭代误差 $\Delta\mu_i^0 = \mu_i^{k'} - \mu_i^k$, 如果各单元 $\Delta\mu_i$ 的平均值和最大值分别小于给定的控制误差,则终止计算并输出结果;否则继续进行计算。⑤ 令 $\mu_i^{\text{old}} = \mu_i^k$, $\mu_i^{\text{new}'} = \mu_i^{k'}$ 按式(2)计算单元磁导率 μ_i^{new} 。⑥ 令 $k=k+1$, 更新单元磁导率, $\mu_i^k = \mu_i^{\text{new}}$; 转向第2步。采用松弛法解非线性方程组的优点是不需要建立雅克比矩阵,但松弛因子 ω 的选取依赖于具体问题和经验。通常在计算时 ω 取较小的值(例如取 $\omega=0.1$),这样会使迭代误差缓慢减小,但能够稳定收敛。如果适当增加 ω 的值,可以加速收敛进程;但过大的值($\omega \approx 1$)可能引起振荡,造成不收敛。非线性瞬态涡流场分析所需要的计算时间冗长,因此缩短非线性磁导率的迭代过程是研究者关心的课题。通常在每一时间步,用上一时间步各单元磁导率的终值作为当前时间步各单元磁导率的初值,可以有效地加快收敛速度^[4]。

2 油套管脉冲涡流检测仿真计算及结果分析

2.1 仿真模型的构建

图2是油套管脉冲涡流检测模型示意图,考虑模型的对称性,使用2D轴对称模型代替三维实体

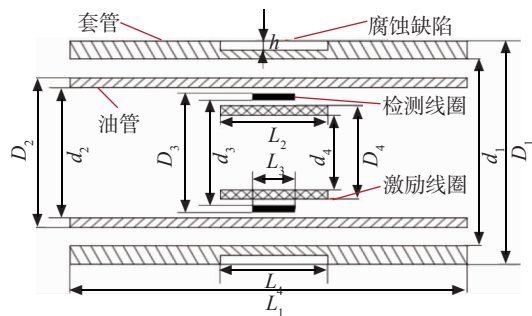
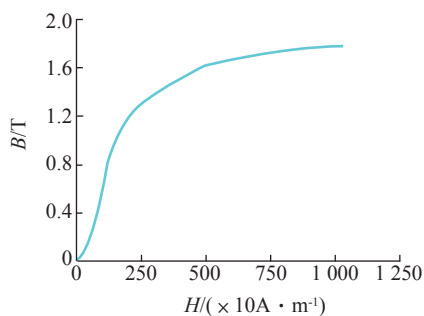


图2 油套管脉冲涡流检测有限元模型

模型。被检套管外径 $D_1 = 141.5 \text{ mm}$, 内径 $d_1 = 126.1 \text{ mm}$; 被检油管外径 $D_2 = 73.8 \text{ mm}$, 内径 $d_2 = 62.4 \text{ mm}$; 检测线圈外径 $D_3 = 51.6 \text{ mm}$, 内径 $d_3 = 50 \text{ mm}$, 长度 $L_3 = 20 \text{ mm}$; 激励线圈外径 $D_4 = 44 \text{ mm}$, 内径 $d_4 = 40 \text{ mm}$, 长度 $L_2 = 100 \text{ mm}$; 以矩形槽模拟腐蚀缺陷, 其长度 $L_4 = 100 \text{ mm}$, 其深度分别设置为 4, 1 mm; 管内外以空气填充, 套管外自由区建模时设置了圆柱环形空气, 空气层厚度为 229.25 mm; 模型整体长度为 500 mm。油套管磁导率由 $B-H$ 曲线给出, 如图 3 所示, 电导率 $\sigma = 4.06 \times 10^6 \text{ S/m}$; 激励线圈和检测线圈的相对磁导率 $\mu_r = 1$, 电导率 $\sigma = 0.58 \times 10^8 \text{ S/m}$; 激励线圈线径为 1 mm, 匝数为 200 匝; 检测线圈线径为 0.2 mm, 匝数为 400 匝。

图3 油套管材料 $B-H$ 曲线

2.2 油套管脉冲涡流检测有限元仿真方法

选用了美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析软件 ANSYS12.0 对油套管脉冲涡流检测进行有限元仿真计算。在建立的几何模型时, 采用四边形、八节点的 PLANE53 单元; 网格划分全部采用映射方式进行, 保证了较好的网格质量, 网格划分如图 4 所示; 完好的油套管和有腐蚀的油套管通过赋予腐蚀区材料不同属性来表示, 当腐蚀区被赋予空气属性时表示有腐蚀的油套管, 当腐蚀区被赋予套管材料属性时则表示完好的油套管, 这个过程中网格划分始终保持相同, 这样就保证了有腐蚀的油套管和完好的油套管在脉冲涡流检测仿真计算时得到的感应电压差别完全是由腐蚀区材料性质不同而产生的, 排除了网格不同带来误差的可能性。仿真计算时, 使用 CIRCU124 单元外接独立电压源脉冲激励供电, 激励电流如图 5, 其中, 脉冲宽度为 0.03 s, 频率为 10 Hz。

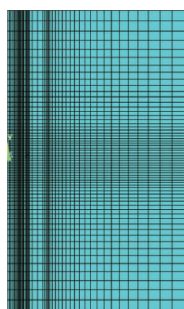


图4 网格划分

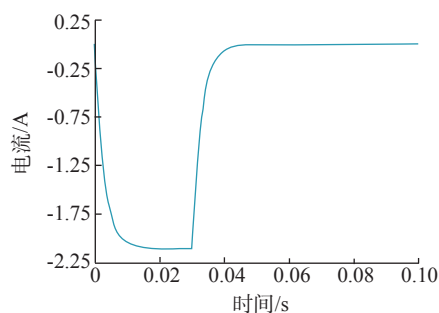


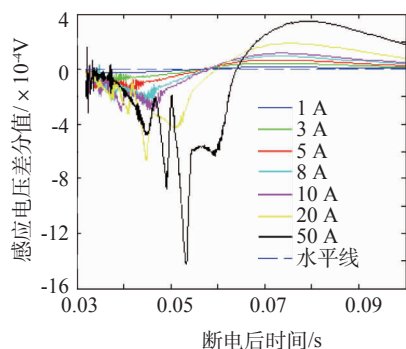
图5 激励电流图

2.3 仿真结果分析

对于利用脉冲涡流检测方法对油井油套管进行在线在役检测来说, 由于材料磁导率非线性的实际存在, 激励电流的大小无疑将对检测结果产生影响。为此, 在保证模型、材料特性及其他激励参数相同的情况下, 激励电流分别取 1, 3, 5, 8, 10, 20, 50 A 等值进行多次仿真计算。出于对实际仪器系统性能以及缺陷的有效检出考虑, 笔者在此规定完好与有腐蚀情况下接收线圈感应电压差值 ΔV 应大于 $1 \mu\text{V}$; 与此同时, 单一考察 ΔV 并不能充分说明检测效果的优劣, 因为有些情况下, 接收线圈上感应电压的数量级相对较大, 此时感应电压的差值 ΔV 也会较大, 但它并不能明显区分完好与有损情况, 为此引入比值 $\Delta V/V$ 作为检测灵敏度, 其中 V 为完好情况下接收线圈感应电压值; 同时要求对腐蚀深度为 4 mm 的缺陷检测灵敏度 $\Delta V/V$ 应不低于 10%。观察 4 mm 腐蚀深度下不同激励电流时, 接收线圈上的感应电压差分曲线, 如图 6(a) 所示。

由图 6(a) 可见, 在断电后前期, 尽管此时 ΔV 具有一定幅值, 但差分曲线波动比较严重, 对缺陷的检出是不利的; 进入中后期 (0.06 s 后), 差分曲线逐渐平稳。同时也可发现随着电流的加大, ΔV 的幅值也逐渐上升; 过零点也随之后移; 仔细观察还可发现 0.075 s 左右差值曲线波峰也向后移动。

为了研究不同激励电流对检测灵敏度的影响, 得到 4 mm 腐蚀深度下的检测灵敏度 $\Delta V/V$ 曲线, 如图 6(b) 所示。观察图 6(b) 可知, 随着激励电流的加大, 检测灵敏度 $\Delta V/V$ 值逐渐降低。考虑对检测灵敏度的要求, 对 4 mm 腐蚀深度的缺陷来说, 在 1 A 激励电流作用下, 其断电后的接收时间应不低于 0.07 s; 并且随着激励电流的升高, 最短接收时间要随之延长。最后综合考虑图 6 发现, 尽管在断电后的前期 (0.06 s 之前) ΔV 具有一定的幅值, 但此时其检测灵敏度却很低, 从这个角度考虑, 检测的最



(a) 不同激励电流感应电压差分曲线

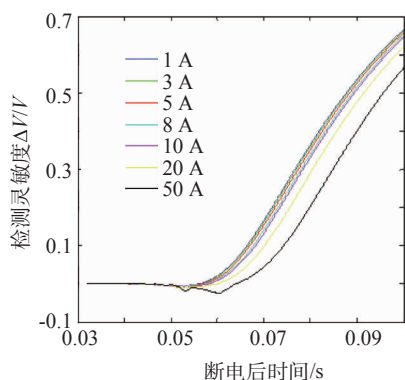
(b) 检测灵敏度 $\Delta V/V$ 曲线

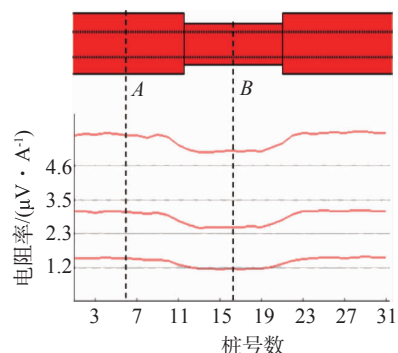
图6 仿真计算时 4 mm 腐蚀深度下电流感应电压差分曲线和检测灵敏度曲线

佳时机应为接收时间的中后期(0.06 s 之后)。由此证明了,由于材料磁导率非线性原因,加大激励电流并不一定能提高检测灵敏度。

2.4 仿真模型验证

为验证所建有限元分析模型的效果,笔者自制了与仿真试验时相同的激励线圈和接收线圈,并结合瞬变电磁检测仪进行实际管道检测试验。试验管道采用我国油田普遍使用的 J55 管材,其油管内径为 62.4 mm,壁厚为 5.7 mm;套管内径为 126.1 mm,壁厚为 7.7 mm,两管长都为 500 mm,用人工方法在套管外壁中间加工一个深度 4 mm 的腐蚀缺陷。试验时,将探头放置于油管内,为避免管端头效应,在距离试验用油套管端头 100 mm 处开始每隔 5 mm 进行一次测量。取完好位置 A 处和腐蚀中间位置 B 处各激励电流作用下接收线圈感应电压值,作出试验条件下检测灵敏度 $\Delta V/V$ 曲线。图 7 给出了油套管检测验证试验剖面曲线和试验条件下检测灵敏度 $\Delta V/V$ 曲线(桩号数表示探头向后移动测试的点号,以此标记)。

由图 6(b)与图 7(b)比较可看出,两曲线变化规



(a) 剖面曲线

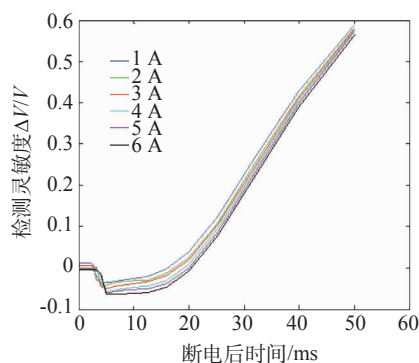
(b) 检测灵敏度 $\Delta V/V$ 曲线

图7 验证试验时 4 mm 腐蚀深度下剖面曲线和检测灵敏度曲线

律基本相同,即小激励电流作用下相对大激励电流作用下检测灵敏度要高一点。因此,建立的油套管二维脉冲涡流有限元仿真模型与验证结果之间吻合良好,能有效反映实际油套管检测结果。

3 结论

在磁导率非线性条件下对油套管脉冲涡流检测进行仿真研究,通过对仿真结果的分析证实:由于材料磁导率非线性特点的存在,在套管外壁完好或有腐蚀情况下,加大激励电流并不一定能提高检测灵敏度。但也不能简单地说激励电流越小越好,因为过小的激励电流将使接收线圈感应电压差值 ΔV 低于检测系统的采集能力,同时由于材料初始磁导率的存在,无限降低激励电流也不能使材料的磁导率低于其初始磁导率。基于 ANSYS 软件的特点,在研究过程中忽略了材料的磁滞效应;但仿真与验证试验相一致的检测效果,证明该研究方法对实际脉冲涡流检测铁磁性油套管具很好的指导意义,同时为下一步解释其影响机理也有重要作用。

(下转第 64 页)

下分析底片,若固体推进剂装药包覆层与药柱混为一体,说明粘接良好。若粘接界面出现黑线,则说明存在粘接缺陷。

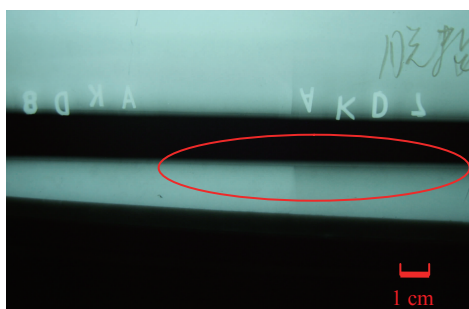
(2) 对存在粘接缺陷的固体推进剂装药药柱/包覆层界面给出定量和定位检测报告。

3.2 应用实例

图4为自由装填式固体推进剂装药包覆层/药柱粘接界面脱粘缺陷检测实例图。图中椭圆线圈出部位为脱粘缺陷部位(其中浅色部位为固体推进



(a) 脱粘缺陷一



(b) 脱粘缺陷二

图4 固体推进剂装药包覆层/药柱界面脱粘缺陷检测图

(上接第4页)

参考文献:

- [1] 徐志远,武新军.激励参数和试件电磁参数对脉冲涡流检测影响的仿真分析[J].无损检测,2008,32(1):1—4.
- [2] 辛伟.工业管道腐蚀脉冲涡流检测传感器仿真研究[D].太原:中北大学,2009.
- [3] 徐志远,武新军,黄琛,等.有限厚铁磁性试件脉冲涡流响应研究[J].华中科技大学学报,2011,39(6):91—95.
- [4] 谢德馨.三维涡流场的有限元分析[M].第二版.北京:机械工业出版社,2007.
- [5] 张倩,胡仁喜,康士延,等. ANSYS12.0 电磁学有限元

剂装药、黑色部位为背景、黑线为药柱与包覆层界面的脱粘缺陷)。

利用观测镜或观片尺对缺陷部位进行测量得到图4(a)脱粘缺陷长度10 cm,位于距固体推进剂装药底部6 cm处;图4(b)脱粘缺陷长度13 cm,位于距固体推进剂装药底部20 cm处。

通过对被判报废药的解剖结果证明该检测方法检测结论正确,适用于科研及生产线上的检测。

4 结论

(1) X切线照相检测技术能够实现体推进剂装药包覆层/药柱界面脱粘缺陷的检测。

(2) 针对固体推进剂装药包覆层/药柱界面脱粘缺陷类型优化出了适宜的检测方法和检测条件。

(3) 获得了透照参数、散射线、胶片类型等检测条件对固体推进剂装药包覆层/药柱界面脱粘缺陷检测的影响规律。

参考文献:

- [1] 张子青.固体火箭装药包覆层脱粘问题的分析[J].推进技术,1982,3(2):33—35.
- [2] DU Dong, CAI Guo-Rei, TIAN Yuan, et al. Automatic inspection of weld defects with X-ray real-time imaging[J]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2007, 362: 359—366.
- [3] GJB 1187A—2001 射线检验[S].
- [4] 徐莉.我国射线检测技术的发展[J].内江科技,2007(10):20—22.
- [5] 中国机械工程学会无损检测分会.射线检测[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 余付平,朱荣新,王韞江,等.基于ANSYS的管道腐蚀缺陷有限元仿真[J].计算机测量与控制,2009,17(1):151—153.
- [7] 林俊明,林发炳,林春景.隔热层下钢管壁厚脉冲涡流检测系统[J].无损探伤,2006,30(6):26—30.
- [8] TAI C C, ROSE J H, MOULDER J C. Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements[J]. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67(11):3965—3972.
- [9] GIGUÈRE S, LEPINE B A, DUBOIS J M S. Pulsed eddy-current (PEC). characterization of material loss in multi-layer structures[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2000, 46(4):204—208.