

# 脉冲漏磁检测中的涡流效应

费骏骉<sup>1,2</sup>,左宪章<sup>1</sup>,田贵云<sup>3</sup>,张 云<sup>1</sup>,张 韬<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院 电气工程系,石家庄 050003;2. 77159 部队,眉山 620010;  
3. 纽卡斯尔大学 电气电子与计算机工程学院,纽卡斯尔)

**摘要:**为了解脉冲漏磁检测中涡流效应的特点,奠定进一步分析脉冲漏磁检测信号的基础,建立了脉冲漏磁检测的有限元仿真模型,观察了检测中瞬态磁场和感生涡流的分布,分析了感生涡流特征量的特点及影响因素。结果表明,脉冲漏磁检测中,瞬态磁场和感生涡流总体上符合集肤效应并相互影响,其中感生涡流具有渗透深度浅、感应强度大的特点,涡流密度峰值时间在深度方向上有较强的分辨率。电导率和磁导率影响感生涡流的渗透深度和密度峰值时间在深度方向上的分辨率;脉冲激励上升时间常数只影响感生涡流的渗透深度,而和密度峰值时间在深度方向上的分辨率无关。

**关键词:**脉冲漏磁检测;有限元仿真;瞬态磁场;涡流效应;感生涡流特征量

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2012)02-0005-06

## Eddy Current Effect in Pulsed Magnetic Flux Leakage Testing

FEI Jun-Biao<sup>1,2</sup>, ZUO Xian-Zhang<sup>1</sup>, TIAN Gui-Yun<sup>3</sup>, ZHANG Yun<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. 77159 Forces, Meishan 620010, China; 3. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Newcastle University, Newcastle, UK)

**Abstract:** In order to comprehend the characteristic of eddy current effect in pulsed magnetic flux leakage testing, this paper lays the foundation to further analyze pulsed magnetic flux leakage testing signal, builds simulating model of finite element in pulsed magnetic flux leakage testing, observes the distribution of transient magnetic field and induced eddy current in the test and analyzes and studies the features of characteristic quantity of induced eddy current and influential factors. The result shows that transient magnetic field and induced eddy current overall correspond with skin effect and affect each other in pulsed magnetic flux leakage testing. Induced eddy current has the feature of shallow penetrating depth and strong induction. Peak time of eddy current density has relative stronger resolution on depth direction. Electrical conductivity and magnetic conductivity affect the penetrating depth of induced eddy current and resolution of peak time of density on depth direction; pulsed stimulating ascendant time constant only affects the penetrating depth of induced eddy current, not relevant to resolution of peak time of density on depth direction.

**Keywords:** Pulsed magnetic flux leakage testing; Simulation of finite element; Transient magnetic field; Eddy current effect; Characteristic quantity of induced eddy current

### 近年来发展起来的脉冲漏磁无损检测技术

收稿日期:2011-03-28

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2008001258)

作者简介:费骏骉(1984—),男,硕士研究生,研究方向为电磁无损检测。

导师简介:左宪章(1963—),男,教授,主要从事电磁无损检测方面的研究。

(Pulsed Magnetic Flux Leakage, PMFL)由于结合了脉冲涡流检测技术(Pulsed Eddy Current, PEC)与漏磁检测技术(Magnetic Flux Leakage, MFL)的特点,和传统漏磁检测技术相比,丰富了检测信号中包含的缺陷信息,在铁磁性材料缺陷的定量评估方面体现出了潜在优势<sup>[1-2]</sup>,因而成为目前无损检测

的一个热点研究方向。

脉冲漏磁检测铁磁性材料的原理如图 1 所示。

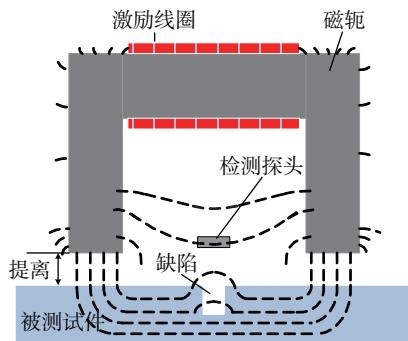


图 1 脉冲漏磁检测原理示意图

传感器包含 U型磁轭、激励线圈和检测探头。脉冲激励信号是占空比一定的方波,加载至绕制在磁轭上的激励线圈中,从而在磁路中产生脉冲瞬态磁场,当试件中存在缺陷时,其脉冲漏磁场将发生变化,使置于被测试件表面的检测探头上所感应的瞬态电压随之变化。通过分析其瞬态电压可获知缺陷情况<sup>[3-4]</sup>。

根据文献[5],对于深度无限的平面导体,其涡流密度的分布随着距导体表面的距离呈指数规律衰减。涡流渗入导体内的距离称为渗透深度,定义涡流密度衰减到其表面值  $1/e$  时的透入深度为标准渗透深度,也称为集肤深度。渗透深度与激励频率、导体的电导率和磁导率都有关系,其表达式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\alpha\mu\sigma}} \quad (1)$$

式中  $\delta$  为渗透深度,单位为 m;  $\omega$  为角频率,单位为 rad/s;  $\mu$  为磁导率,单位为 H/m;  $\sigma$  为电导率,单位为 S/m。由于铁磁性材料磁导率较高,根据集肤效应公式(1)和麦克斯韦方程,试件中的感生涡流渗透深度很浅,同时感应强度很大。由于涡流效应会对磁路中的瞬态磁场变化形成阻尼,进而影响脉冲漏磁信号的时频域特征,因此有必要对脉冲漏磁检测中的涡流效应进行研究。

为了解脉冲漏磁检测中涡流效应的特点,奠定进一步分析脉冲漏磁检测信号的基础,笔者利用有限元法对脉冲漏磁检测模型中的电磁场进行数值计算,观察了检测中瞬态磁场和感生涡流的分布,分析了感生涡流特征量的特点及影响因素。

## 1 有限元模型建立

采用有限元分析软件 ANSYS 对图 1 所示结构

的传感器进行建模,由于脉冲激励信号的时域特点,需对所建模型进行瞬态分析。传感器尺寸及坐标方向设置如图 2 所示。

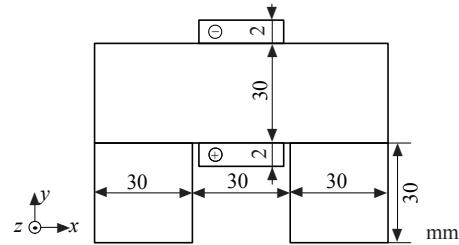


图 2 脉冲漏磁传感器尺寸图

模型中,采用线径 0.35 mm 的铜线绕制 400 匝的矩形激励线圈。激励脉冲电流选择呈指数规律上升的方波函数<sup>[6]</sup>:

$$I(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_0}) u(t) \quad (2)$$

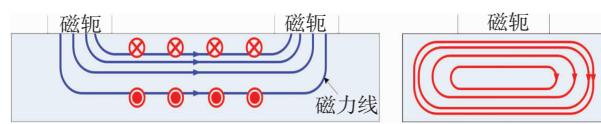
式中  $I_0$  为脉冲幅值,  $I_0 = 0.5$  A;  $\tau_0$  为上升时间常数,  $\tau_0 = 100 \mu s$ 。脉冲周期  $T = 20$  ms, 占空比为 50%, 考虑到激励电流波形的对称性, 只计算 0~ $T/2$  时间段。被测试件长度为 150 mm, 厚度为 10 mm, 上表面的深度位置为  $y=0$  mm, 下表面的深度位置为  $y=10$  mm。

## 2 瞬态磁场和感生涡流的分布

由于脉冲漏磁检测中的激励磁场为瞬态磁场,U型结构的脉冲漏磁传感器在对铁磁性材料进行检测时,被测试件会在激励磁场的作用下感生涡流场。这里的感生涡流可以分成两部分来看,一部分如图 3 所示,分别以两个磁轭为中心,分布于试件上表面附近;另一部分环绕试件内部的磁路分布如图 4 所示<sup>[7]</sup>。



(a) 试件正面  
(b) 试件侧面  
图 3 环绕磁轭分布的感生涡流



(a) 试件正面  
(b) 试件侧面  
图 4 环绕磁路分布的感生涡流

根据麦克斯韦方程,瞬态磁场同时受磁导率和电导率的影响,并且和感生涡流相互作用。为了观

察脉冲漏磁检测中瞬态磁场和感生涡流的分布情况,设计了两组模型进行有限元分析。第一组模型中试件的相对磁导率 $\mu_r$ 分别为100,300,1 000,电导率 $\sigma=5\times10^6\text{ S/m}$ ,磁轭的 $\mu_r=10\,000,\sigma=2\times10^6\text{ S/m}$ ;第二组模型中试件的 $\sigma$ 分别为0, $5\times10^6$ 和 $1\times10^7\text{ S/m}$ , $\mu_r=200$ ,磁轭的 $\sigma=0\text{ S/m},\mu_r=10\,000$ 。

图5和6显示的是10 ms时刻,不同磁导率下,瞬态磁场和感生涡流在试件中的分布情况。其中图5(a)~(c)显示的是磁力线的分布,图6(a)~(c)显示的是涡流密度的分布。从图中可以看出,脉冲漏磁检测中的瞬态磁场在磁轭和试件中不像静磁场一样均匀分布,而是聚集在磁路上下表面附近,聚集效应随着磁导率的增大而增强;同时,感生涡流随着磁导率的增加也趋于向磁路表面聚集,并且上下表面涡流流动方向相反,其中蓝色和红色区域分别代表向 $-z$ 和 $+z$ 方向流动的涡流的密度 $J_z$ 。最大值所在区域,说明涡流围绕试件中的磁路呈环形分布。图7和8显示的是10 ms时刻,不同电导率下,瞬态磁场和感生涡流在试件中的分布情况。从图中可以看出,当磁轭和试件的电导率都为零时,磁路中的瞬态磁场和静磁场一样呈均匀分布,并且磁轭和试件中都不存在感生涡流,随着试件中的电导率增大,磁场和涡流的分布都开始向磁路表面附近聚集,可见磁路中磁导率和电导率的大小直接影响磁场和涡流向表面附近聚集的程度,同时,磁路中是否存在电导率决定了电磁场是否有聚集效应。

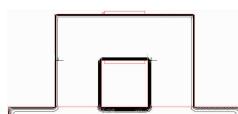
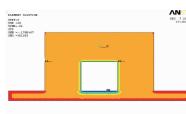
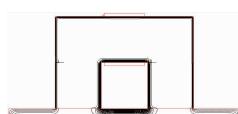
(a)  $\mu_r=1\,000$ (b)  $\mu_r=300$ (c)  $\mu_r=100$ 

图5 磁导率对瞬态磁场的影响

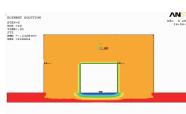
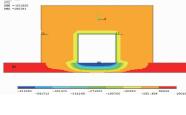
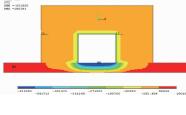
(a)  $\sigma=0\text{ S/m}$ (b)  $\sigma=5\times10^6\text{ S/m}$ (c)  $\sigma=1\times10^7\text{ S/m}$ 

图6 磁导率对感生涡流分布的影响

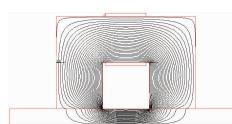
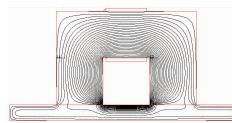
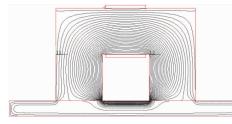
(a)  $\sigma=0\text{ S/m}$ (b)  $\sigma=5\times10^6\text{ S/m}$ (c)  $\sigma=1\times10^7\text{ S/m}$ 

图7 电导率对瞬态磁场的影响

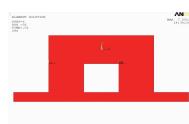
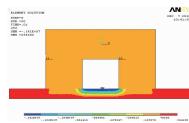
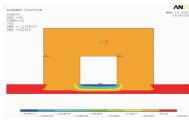
(a)  $\sigma=0\text{ S/m}$ (b)  $\sigma=5\times10^6\text{ S/m}$ 

图8 电导率对感生涡流分布的影响

前面的分析表明,脉冲漏磁检测中的电磁场总体上符合集肤效应。但由于脉冲漏磁中感生的涡流场并不以理想条件为背景,因此对涡流特性的量化需要进一步通过试验结果进行分析。

根据傅里叶变换公式,脉冲方波包含丰富的频率分量,加上瞬态磁场在磁路表面的聚集效应,使得一方面,脉冲漏磁检测和单频(或多频)交流磁化的漏磁检测相比,激励磁场在试件中的渗透深度大大增加;另一方面,与永磁体磁化的漏磁检测相比,对上下表面缺陷的检测灵敏度更高。根据电磁感应定律,感生涡流和瞬态磁场相互影响,对激励磁场的变化造成阻尼,当试件上下表面附近存在缺陷时,缺陷会扰动感生涡流的流动模式,进而引起瞬态磁场的变化。不同缺陷扰动下的感生涡流,对瞬态磁场造成不同的阻尼,最终体现在脉冲漏磁信号的差别上。因此,对涡流效应特点的研究有助于对脉冲漏磁场信号特点的把握。

### 3 感生涡流特征量影响因素

在脉冲涡流检测中,涡流密度峰值大小影响缺陷检测的灵敏度,而涡流密度峰值时间影响缺陷特征量的分辨率。可见,密度峰值和密度峰值时间是感生涡流的两个重要特征量。对脉冲漏磁检测模型中两磁轭间试件中的涡流密度数据进行分析,结果显示,试件中坐标 $y$ 相同而坐标 $x$ 不同的涡流密度的时域波形基本相同,表明涡流在 $z$ 方向上的分量

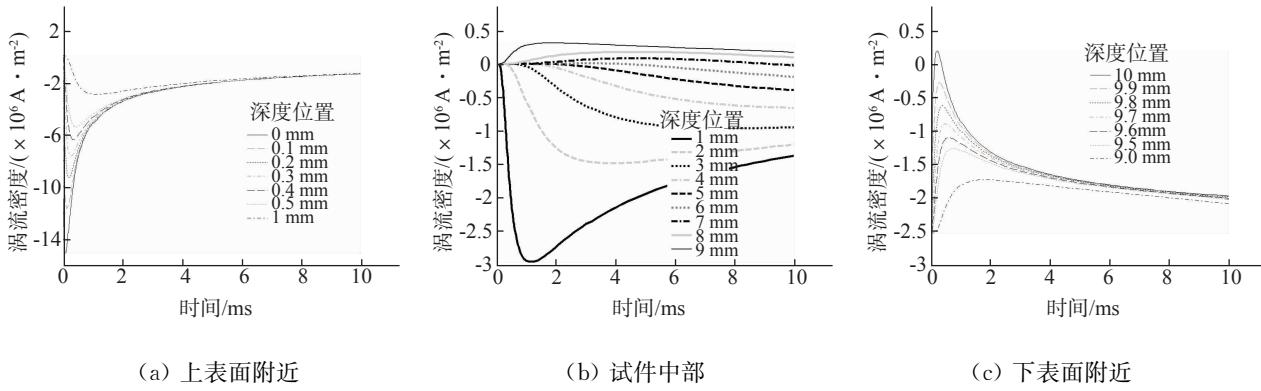


图 9 试件中的感生涡流密度分布

$J_{cz}$  在  $x$  方向上均匀分布。图 9 显示的是试件中不同深度位置的涡流密度分布情况。由图中可以看出, 涡流能量主要集中在上下两个表面附近且上下表面涡流的流向相反, 随着深度从上下两个表面向中间增加, 涡流密度峰值不断衰减, 且到达峰值的时间越来越长; 同时可以看出, 上表面的涡流密度比下表面大, 这与第 2 节中观察结果一致。

### 3.1 磁导率对涡流密度峰值和峰值时间的影响

设置相对磁导率  $\mu_r$  分别为 100, 300 和 1 000 的被测试件, 比较相对磁导率的变化对涡流密度峰值和峰值时间的影响(图 10)。从图 10(a)和(b)中可以看出, 试件中的感生涡流强度很大, 并且随着磁导率的增加, 涡流密度峰值增大, 在深度方向上的衰减速度加快。这是因为磁导率影响磁路中磁感应强度的大小, 磁导率越大, 磁路中的磁感应强度越大, 根据电磁感应定律, 由磁场感应出来的涡流强度也越大; 同时, 由集肤效应可知, 随着磁导率的增加, 涡流的渗透深度变浅, 造成涡流密度峰值大小在深度方向上的衰减速度相应变快。

图 10(c)和(d)所示的是图 10(a)和(b)中密度峰值对应的峰值时间。由图中可以看出,涡流密度在深度方向上的峰值时间分辨率很高,并且随着试件磁导率的增加而提高;同时,上表面涡流密度峰值时间随着深度的增加而变大,下表面涡流密度峰值时间随着深度的增加先增大后减小。分析其原因:

$$d = \sqrt{\frac{t}{\pi\mu,\sigma}} \quad (3)$$

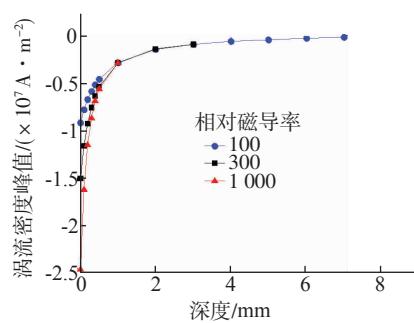
式中  $\mu_r$  和  $\sigma$  分别是金属导体的相对磁导率和电导率。可见脉冲电磁波在导体介质中的传播速度与磁导率和电导率的乘积成反比。以铝和钢为例,按照铝的相对磁导率  $\mu_r=1$ , 电导率  $\sigma=3.4 \times 10^7 \text{ S/m}$ ,

钢的相对磁导率  $\mu_r = 300$ , 电导率  $\sigma = 5 \times 10^6 \text{ S/m}$  来计算, 脉冲电磁波在铝中的传播速度是钢的 44 倍, 也就是说涡流密度峰值时间在钢中的分辨率是在铝中的 44 倍。② 根据之前的分析, 试件上表面涡流场的强度比下表面大, 且上下表面涡流流向相反, 两个涡流场在接近下表面的位置叠加以后, 负峰值时间的位置会向正峰值时间的位置方向偏移。

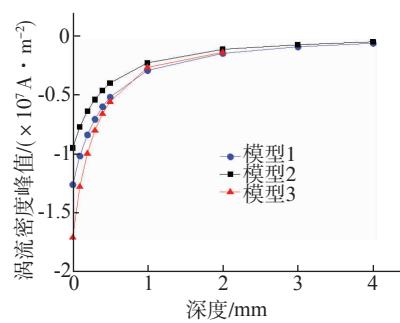
### 3.2 电导率对涡流密度峰值和峰值时间的影响

为了研究电导率对试件中涡流密度峰值和峰值时间的影响,分别设计了三种脉冲漏磁检测模型。模型 1 中,磁轭电导率  $\sigma=0$  S/m, 试件  $\sigma=5 \times 10^6$  S/m; 模型 2 中, 磁轭  $\sigma=2 \times 10^6$  S/m, 试件  $\sigma=5 \times 10^6$  S/m; 模型 3 中, 磁轭  $\sigma=0$  S/m, 试件  $\sigma=1 \times 10^7$  S/m, 三个模型的其它参数设置一样。对涡流密度峰值的影响如图 11(a) 和 (b) 所示。模型 1 和模型 3 的数据显示, 试件中电导率越小, 涡流密度峰值越小, 涡流密度在深度方向上的衰减速度越慢, 越符合集肤效应的规律。对比模型 1 和模型 2 的数据可以看出, 试件中的涡流密度峰值在磁轭中有电导率时比没电导率时更小, 但涡流密度在深度方向上的衰减速度更慢, 也就是说涡流的渗透深度变深。实际上, 式(1)所示的涡流渗透深度的表达式只适用于单频激励情况。根据傅里叶展开公式, 一个脉冲信号可以展开成含有基波和许多谐波成分的组合, 因此脉冲激励的能量在高频和低频的分布会影响感生涡流在导体介质中的渗透深度<sup>[9]</sup>, 而磁轭中的涡流对激励磁场产生了阻尼作用, 延迟了磁路中磁场到达峰值的时间, 削弱了脉冲激励的高频分量, 使激励的低频分量相对增强, 从而增加了涡流的渗透深度。

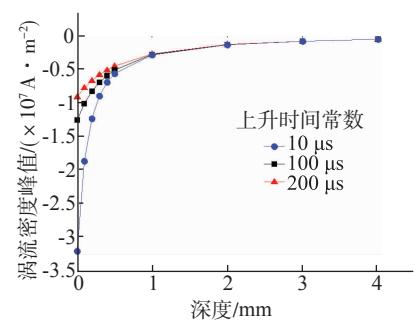
图 11(c)和(d)显示的是电导率对涡流密度峰值时间的影响。从图中可以看出,模型 1 和模型 2 的涡流密度峰值时间在深度方向上的分辨率几乎是



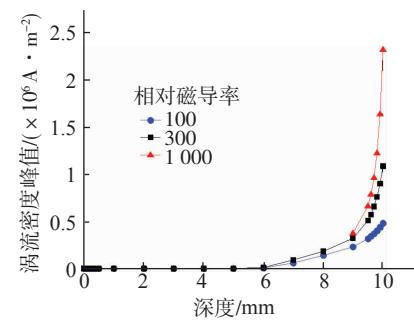
(a) 涡流密度负峰值分布



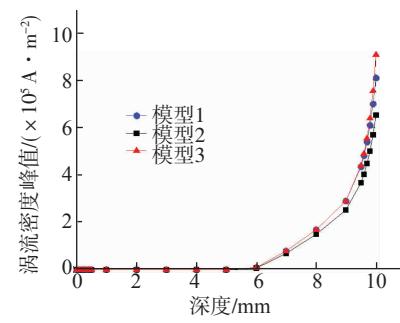
(a) 涡流密度负峰值分布



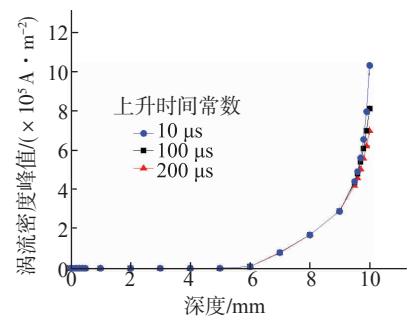
(a) 涡流密度负峰值分布



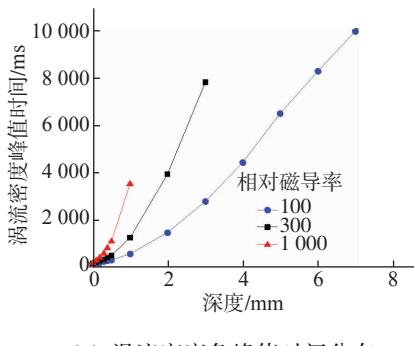
(b) 涡流密度正峰值分布



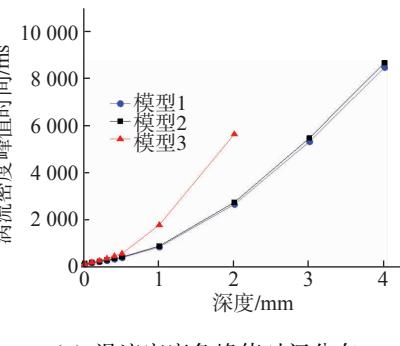
(b) 涡流密度正峰值分布



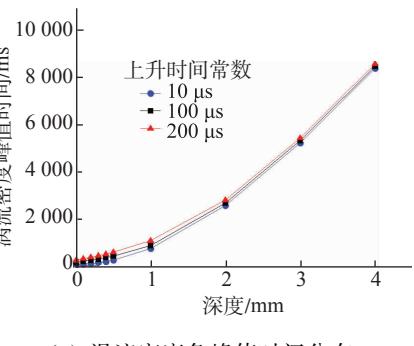
(b) 涡流密度正峰值分布



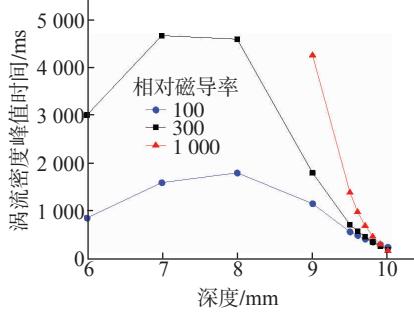
(c) 涡流密度负峰值时间分布



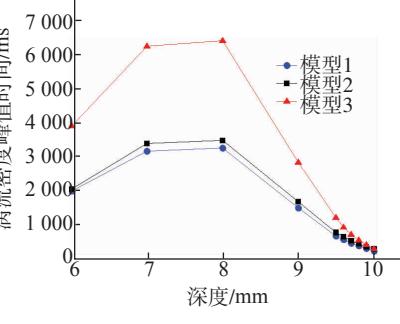
(c) 涡流密度负峰值时间分布



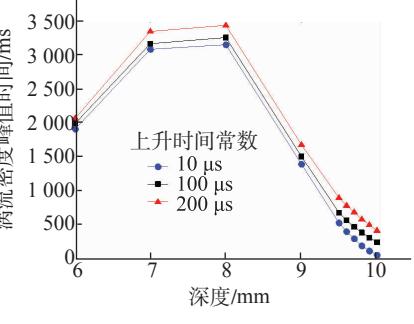
(c) 涡流密度负峰值时间分布



(d) 涡流密度正峰值时间分布



(d) 涡流密度正峰值时间分布



(d) 涡流密度正峰值时间分布

图 10 磁导率对感生涡流特征量的影响

相同的,而模型 3 的涡流密度峰值时间在深度方向上的分辨率更高,这说明试件中涡流密度峰值时间在深度方向上的分布和试件的电导率大小有关,和磁轭中的电导率大小无关。

图 11 电导率对感生涡流特征量的影响

### 3.3 激励的上升时间常数对涡流密度峰值和峰值时间的影响

式(2)中,上升时间常数  $\tau_0$  的取值会影响脉冲激励在各频率的能量分布。 $\tau_0$  越小,激励的高频能

量相对越强,低频能量相对越弱; $\tau_0$ 越大,激励的高频能量相对越弱,低频能量相对越强。

设计上升时间常数 $\tau_0$ 分别为10,100和200 $\mu\text{s}$ 的脉冲激励,研究上升时间常数对感生涡流密度峰值和峰值时间的影响。从图12(a)和(b)中可以看出, $\tau_0$ 越大,涡流密度在深度方向上的衰减速度越慢,涡流密度峰值越小。这是因为 $\tau_0$ 的增大削弱了脉冲激励的高频能量,使得激励在峰值相同的情况下能量变小。从图12(c)和(d)中可以看出,随着 $\tau_0$ 的增加,感生涡流密度的峰值时间会变大,但在深度方向上的分辨率几乎没有变化。也就是说 $\tau_0$ 的大小影响感生涡流的渗透深度但不影响涡流密度峰值时间在试件深度方向上的分辨率。综合上一节的分析还可知道,磁轭中存在感生涡流或加大脉冲激励的上升时间常数 $\tau_0$ ,都会增加感生涡流的渗透深度,不同的是前者造成了激励源能量在磁轭中的损耗,所以在设计制作脉冲漏磁传感器的磁轭时应采用电导率低的材料,以尽量避免将激励能量消耗在磁轭中。

#### 4 结语

采用有限元方法对脉冲漏磁检测中的瞬态磁场和感生涡流分布进行了观察,研究分析了感生涡流的特征量影响因素。结果表明,脉冲漏磁检测中,瞬态磁场和感生涡流总体上符合集肤效应并相互影响,其中感生涡流具有渗透深度浅,感应强度大的特点,涡流密度峰值时间在深度方向上有较强的分辨率。电导率和磁导率影响感生涡流的渗透深度和密度峰值时间在深度方向上的分辨率;脉冲激励上升时间常数只影响感生涡流的渗透深度,而和密度峰值时间在深度方向上的分辨率无关。这为进一步分

(上接第4页)

这对于缺陷的检出至关重要。另外,从生产应用的角度讲,采用涡流与专用漏磁检测(或超声检测)集成技术将是未来发展的一大趋势(特别是对大口径、厚壁管的检测,其深部缺陷已无法用电磁法检出),这一点已在现代钢管生产线上得到印证。国家特检培训考试基地从长期发展考虑,选用EEC-508涡流/漏磁/超声一体化仪器用于培训考核。

析脉冲漏磁信号奠定了基础。

#### 参考文献:

- [1] John W Wilson, Gui Yun Tian. Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterisation [J]. NDT&E International, 2007, 40(4): 275—283.
- [2] Sophian A, Tian G Y, Zairi S. Pulsed magnetic flux leakage techniques for crack detection and characterization[J]. Sensors and Actuators A, 2006, 125(2): 186—191.
- [3] Tian Lu Chen, Gui Yun Tian, 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] Ali Sophian, 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.
- [6] John Bowler, Marcus Johnson. Pulsed eddy-current response to a conducting half-space[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(3): 2258—2264.
- [7] Javier García-Martín, Jaime Gómez-Gil, Ernesto Vázquez Sánchez. Review non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. Sensors, 2011, 11(3): 2525—2565.
- [8] J. Blitz, T. S. Peat. The Application of Multi—frequency Eddy Currents to Testing Ferromagnetic Metals[J]. NDT&E International, 1981, 14(1): 15—17.
- [9] Gui Yun Tian, Ali Sophian. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors[J]. NDT&E International, 2005, 38(1): 77—82.

以上内容也可以看成是对GB/T 7735—2004标准的补充说明。

#### 参考文献:

- [1] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 雷银照.电磁场[M].北京:高等教育出版社,2008.