

涡流检测用于无粘结预应力钢绞线护套厚度测量的试验研究

王 威, 牛晓波, 苏三庆, 任广超

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 涡流检测技术是一种常用的无损检测技术. 通过利用涡流对无粘结预应力钢绞线护套厚度的测量试验, 来判断钢绞线护套厚度涡流检测方法的可行性. 将此方法所得结果与游标卡尺测量所得结果的比较, 发现两种结果虽然有一定差异, 但差异并不大. 利用差值参数 d 和 F , 分别对涡流检测结果进行误差和方差分析, 发现最大误差仅为2.3%, 最大方差为0.004 5, 说明涡流检测无粘结预应力钢绞线护套厚度的方法是可行的, 其检测结果的精度和稳定性都比较高.

关键词: 涡流检测; 护套厚度; 误差; 稳定性; 钢绞线

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0340-06

Experimental research on the eddy current testing method for sheath thickness measurement of unbonded prestressed steel strand

WANG Wei, NIU Xiaobo, SU Sanqing, REN Guangchao

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Eddy current testing technology is a commonly used non-destructive testing technique. By the unbonded prestressed strand sheath thickness measurement testing based on eddy current, the feasibility of the sheath eddy current testing methods are analyzed, and the results by this method obtained are compared with the results by the vernier caliper measurements. It was found that the two results have some difference, but the difference is small. Using the different parameters d and F , eddy current testing results for error are analyzed and then found that the maximum error is only 2.3%, and the maximum variance is 0.004 5. The proposed method of eddy current testing to measure sheath thickness is feasible, and the accuracy and stability of the method can be ensured definitely.

Key words: Eddy current testing; sheath thickness; error; stability; steel strand

近年来,随着我国现代化进程,新建了大量的预应力工程项目. 在无粘结预应力结构中主要应用了无粘结预应力钢绞线,而无粘结预应力钢绞线质量检验的一项重要是护套厚度检验,检验方法是用刀割开塑料管,分别用柴油洗清油脂、擦净,然后用千分卡尺量取塑料管臂的平均厚度^[1]. 由于上述检验方法较繁琐,而且在体量超大的土木结构工程中,高空作业困难,难以实现. 除千分尺、刻度尺等测量方法外,现有的测厚方法有超声波、激光、放射性物质、磁性及涡流测厚. 超声波和放射性物质测厚方法不仅操作不便、成本较高,而且对人体的健康有一定危害;激光测厚方法是目前比较流行的测厚方法,已被广泛地应用于轻工、汽车、机械、钢铁、橡胶等行业,但其成本较高,并且因不适合高空和空旷作业,无法满足土木工程中体形庞大的建筑测厚需求;磁性测厚方法适用于测量铁磁性材

料表面的非铁磁覆盖层,但测量厚度较薄,包括非导电的漆层、阳极氧化膜、珐琅层和铜、铬、锌的镀层等;而涡流检测既可以对非铁磁性材料表面的绝缘覆盖层厚度进行测量,又可以对磁性导体进行测厚,但是后者的准确度无法保证,需进行试验验证.

本文进行了利用涡流对无粘结预应力钢绞线覆盖层厚度的测量试验,目的是找到一种不用拨开塑料管就能检测护套厚度的测量方法,无需用千分尺,为了验证该方法的可行性,所以将此方法测得结果与游标卡尺所测结果进行了对比. 其不仅为混凝土预应力工程中的无粘结预应力钢绞线护套厚度检测提供了一种新的方法,而且为建筑钢结构高空不宜测量的拉索、钢梁等构件的涂层、腐蚀层厚度测量奠定了一定的实验基础.

收稿日期: 2015-12-08

修改稿日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51478383, 51578449); 陕西省自然科学基金项目 (2015JM5192)

作者简介: 王威 (1972-), 男, 教授, 主要研究方向为结构安全诊断、钢与混凝土组合结构. E-mail: wangwgh@xauat.edu.cn

1 涡流检测技术

1.1 涡流定义及应用特点

涡流定义是:将通有交流电的线圈置于待测的金属板上或套在待测金属构件外,这时线圈内及其附近将产生交变磁场,使试件中产生旋涡状的感应交变电流,这种感应交变电流被称为涡流^[2]。当下涡流检测技术已被广泛用于厚度检测和缺陷探伤,涡流检测仪器也有很大的发展。涡流无损检测技术具有灵敏度高、检测速度快、非接触等特点。

1.2 涡流感应探头测厚原理

电磁涡流法测厚可分为两大类,一类是基体金属上膜层厚度测量;另一类是金属板、箔、管壁等的厚度测量。涡流测厚原理为:将传感器探头放置在需测厚的部位,传感器前置器中高频振荡电流通过延伸电缆流入探头线圈,在探头头部的线圈中产生交变的磁场。当被测金属体靠近这一磁场,则在此金属表面产生感应电流,与此同时该电涡流场也产生一个方向与头部线圈方向相反的交变磁场,由于其反作用,使头部线圈高频电流的幅度和相位得到改变(线圈的有效阻抗),通过前置器电子线路的处理,将线圈阻抗的变化,即头部体线圈与金属导体的距离的变化转化成电压或电流的变化,输出信号的大小随探头到被测体表面之间的间距而变化,电涡流传感器就是根据这一原理实现对金属物体的厚度的测量^[2-6]。

电导率、磁导率是影响涡流透入深度和涡流分布密度的两个重要因素。涡流标准透入公式为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

式中: δ 为标准透入深度, m; f 为工作频率, Hz; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, 单位是 H/m; μ_r 为相对磁导率, 无量纲常数; σ 为电导率, 单位是 S/m。

通过式(1)可知电导率和磁导率的平方根与涡流透入深度成反比,对于铁磁性材料, μ_r 是一个随磁化强度变化的量,即使在饱和磁化条件下依然是一个较大数值的量,因此在铁磁性材料检测时往往选择较低的检测频率,以保证涡流在被测试件中达到的适当的透入深度。

另外,应用涡流方法对覆盖层实时测量之前,

除了要合理选定工作频率、适用范围外,还要依据被测覆盖层材料,制作标准试片。标准试片主要有两类:一类是不带有基体的薄膜(片),这类标准试片可覆盖在各种制件的集体上;另一类是带有基体的标准试片,这类试片的覆盖层与基体结合为一体。标准试片的选取也影响检测结果的准确性。在测量带有曲面的试件上的覆盖层厚度时,标准试片的曲率应该与试件的曲率相同^[11]。

2 试验方案及测量的方法与步骤

2.1 试验材料

选用预应力工程中常用的无粘结预应力钢绞线,公称直径为 15.20 mm,其护套为两种不同颜色,原料为挤塑型高密度聚乙烯树脂,属于非导电的绝缘材料,如图1所示。



图1 试验试件

Fig.1 Experimental specimen

这些无粘结预应力钢绞线的护套出厂标准厚度为 1.5 mm 且标准试片的曲率与被测试件的相同。按照护套颜色的不同,将钢绞线分为两组,每组各三根。其中黑色护套为A组,试件编号为A₁、A₂、A₃,试件表面沿长度方向均布选定五个测量面;绿色护套为B组,试件编号为B₁、B₂、B₃,试件表面沿长度方向均布选定六个测量面。两组试件中每个测量截面均沿环向均布选定五个测点。

2.2 检测仪器

此试验检测仪器为EMS2003磁记忆/涡流检测仪,试验采用其涡流检测功能,其技术参数为:两个独立检测频率,可扩展至八个频率;频率范围:64~5 MHz;快速高精度/数字式电子平衡;增益:高通0~90 dB,每档0.5 dB;数字滤波:高通0~500Hz,低通10~10 kHz;自动/手动幅度和相位测

量;独创的非等幅相位/幅度报警;存储独立的检测程序;阻抗平面图及带式曲线显示;涡流图形可存储、回放、分析和打印;厚度测量范围为0~10 mm.

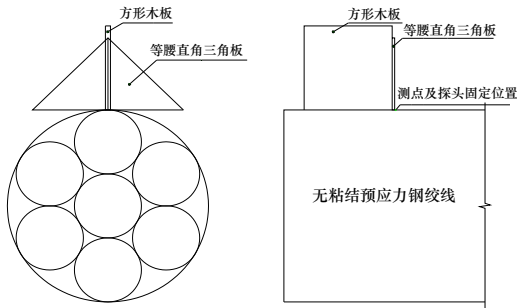


图2 涡流探头固定方法与固定位置

Fig.2 Eddy current probe fixed method and fixed position

试验采用的探头为点式涡流探头,探头最佳使用频率范围为500 kHz~2 MHz,编号为EPB 2.J0.20.为确保探头的中心线与钢绞线的中心对齐,将探头固定在临时制作的检测支架上,支架由方形木板和等腰直角三角板组成.将等腰直角三角板垂直粘结在方形木板上,并将木板中心线与三角板的中心线对齐,如图2所示,测量时,将三角板的中心线与测点对齐,探头垂直固定在此处.

2.3 试验步骤

(1) 对2组6根钢绞线进行编号,并在其A组(黑色护套)试件表面标定5个测量截面,B组(绿色护套)试件表面6个测量截面,每个测量截面上有五个测点.

(2) 利用游标卡尺测量每根钢绞线塑料护套的厚度,测量选定的测量截面,先测无护套处,再测有护套的,后者再减前者,再除以2,即此测量截面处的厚度.

(3) 利用EMS2003磁记忆/涡流检测仪涡流检测功能检测每个测点处钢绞线护套厚度.

2.4 标定

根据EMS2003磁记忆涡流检测仪操作指南,护套厚度标定过程如下:

(1) 打开仪器,连接探头,调节参数.参数调整为:“高通截止频率”:关,频率500 kHz左右、前置15、驱动1;“100%表示数”调节为6 mm(利用游标卡尺已测定钢绞线护套标准厚度为1.5 mm,四层).一般来说,在其它检测条件和参数相同的条件下,频率越小,渗透深度越大,故选择探头最佳使用频率范围的最小值500 kHz,标准护套及标准试块如图3所示.



图3 标准护套及标准试块

Fig.3 Sheath and standard test block

(2) 根据试块涂层厚度的测量方法,把探头垂直放在无护套的钢绞线部位上,按“平衡”键,提离探头使得探头远离试块,停止检测;进入扩展分析,测量出信号变化幅值(探头从无涂层的基材上到空气中的信号变化幅值);试片1、2、3、4……依次放在试块上,并分别测试信号变化幅值(基准点为探头放置在空气中的信号所处位置,分别测量出涂层为1.5、3.0、4.5、6 mm时的涡流信号变化幅值),表1为测量数据.

表1 信号变化幅值

Tab.1 Variable amplitude of the signal

试片	信号变化幅值	护套试片厚度/mm
无试片	146	0
试片1	60	1.5
试片2	34	3.0
试片3	20	4.5
试片4	15	6.0

(3) 在做标定曲线时,需要将上述涡流信号变化幅值转换一下.转换方法是用提离后的涡流信号变化幅值146,分别减去上表中的信号变化幅值,转换后的涡流信号变化幅值见表2,转换后的涡流信号变化幅值以基材无涂层时的涡流信号所处位置(平衡点)为基准点.

表2 标定信号幅值

Tab.2 Calibration signal amplitude

试片	信号幅值	护套试片厚度/mm
基材无试片	0	0
试片1	86	1.5
试片2	112	3.0
试片3	126	4.5
试片4	131	6.0

(4) 制作标定曲线:如图4所示。

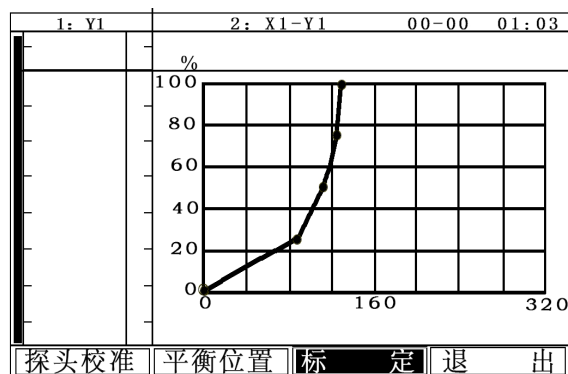


图4 标定曲线

Fig.4 Calibration curve

打开“检测—调试—标定—功能1”,“X1—Y1 标定方式”选择“插值(幅度)”;按“功能2”,将上表中的数值输入到仪器内;按“功能3”显示标定曲线,确认正确后按返回键退出当前状态。

2.5 测厚

先将探头放在无涂层处按“平衡”,然后将点式探头放在试件测点上(参数中的“深度、厚度”打开)。

其次再用游标卡尺测量无粘结预应力钢绞线护套的厚度。

3 试验数据处理与分析

3.1 试验数据的处理

(1) 取涡流测量的每个截面五个测点厚度的平均值,对所有截面的厚度平均值再取平均值。

(2) 取游标卡尺测定的两组不同颜色护套厚度平均值。

3.2 数据分析

(1) 测量数据分析

EMS2003磁记忆/涡流检测仪对A、B组试件测量的截面厚度值分别如图5~6所示。

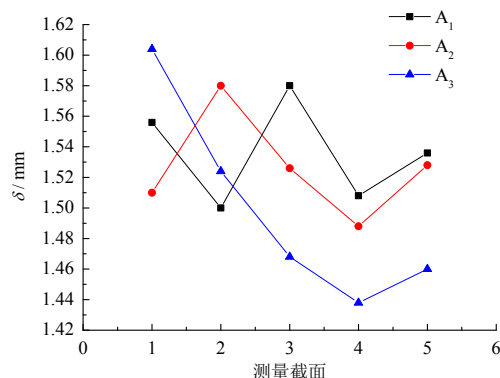


图5 A组试件各截面厚度值

Fig.5 Each cross section thickness value of group A specimen

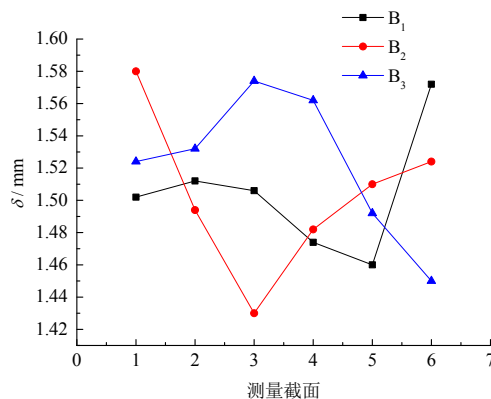


图6 B组试件各截面厚度值

Fig.6 Each cross section thickness value of group B specimen

观察图5、图6中试验数据可知,两组试件各个截面护套厚度值都不同,但检测结果的差值很小.A组试件中护套截面厚度差值最大为0.166 mm,存在于A₃试件检测结果中;B组试件中护套截面厚度差值最大为0.160 mm,存在于B₂试件检测结果中。

游标卡尺、EMS2003磁记忆/涡流检测仪对A组试件测量的护套厚度平均值分别如图7所示。

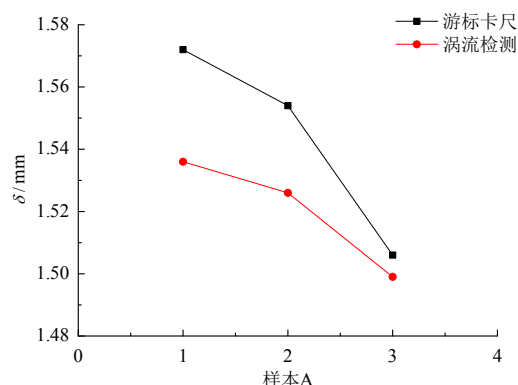


图7 A组试件结果

Fig.7 The results of group A specimen

由图7两条线相比整体趋势一致,且每个试件数据相差不大,由此可知,游标卡尺、EMS2003磁记忆/涡流检测仪对A组每根试件测量的试验结果相近,接近标准厚度1.5 mm,且差值相近.对于A组试件,涡流测厚方法所得结果有较高的精度。

游标卡尺、EMS2003磁记忆涡流检测仪对B组试件测量的护套厚度平均值分别如图8所示,两条线整体趋势一致,且每个试件数据相差不大,并且与A组试件所得结果相近,均大约厚1.5 mm,并且两种测量方法对B组试件所得结果的差值也相近.对比图7和图8数据可知:三根A组试件中两种测量方法所得结果差值最大值为0.036 mm,三根B组试件差值最大值为0.033 mm,差值都较小,因此,

利用EMS2003磁记忆/涡流检测仪的涡流检测功能,对无粘结预应力钢绞线护套厚度进行测量的方法有一定的精度。

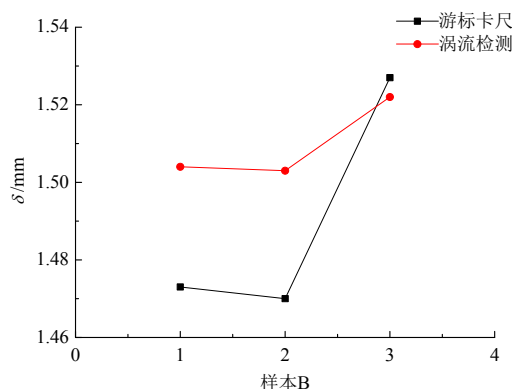


图8 B组试件结果

Fig.8 The results of group B specimen

(2) 测量精度及稳定性分析

为了验证涡流检测外裹层厚度的测量方法的准确度,对涡流所测厚度进行了误差分析,其中参数 d ,表示涡流检测厚度相对游标卡尺检测厚度的误差, l_k 表示游标卡尺测量值, l_y 表示EMS2003涡流检测功能的测量值,按公式(2)计算:

$$d = \left| \frac{l_k - l_y}{l_k} \right| \times 100\% \quad (2)$$

利用公式(2)得到试件的误差如图9所示,其中涡流检测A组试件护套厚度最大误差为2.3%,涡流检测B组试件护套厚度的最大误差为2.2%,因此说明了涡流检测方法的精确性和实用性。

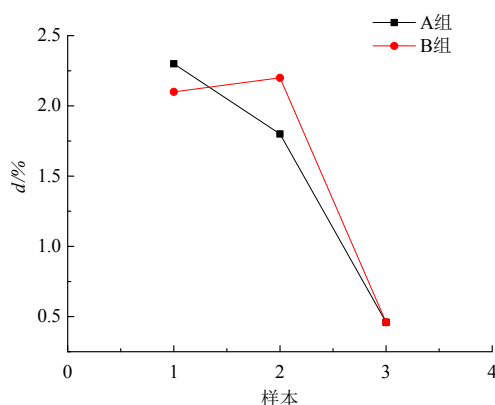


图9 测量结果误差

Fig.9 The error of measurement results

为了验证测量结果的稳定性,利用数理统计方法对涡流所测厚度进行方差分析.其中参数 F 代表方差, l_i 代表第 i 个测量截面涡流检测的平均厚度, l_a 代表EMS2003涡流检测试件的平均厚度, n 代表

试件的测量截面个数.有:

$$F = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - l_a)^2 \quad (3)$$

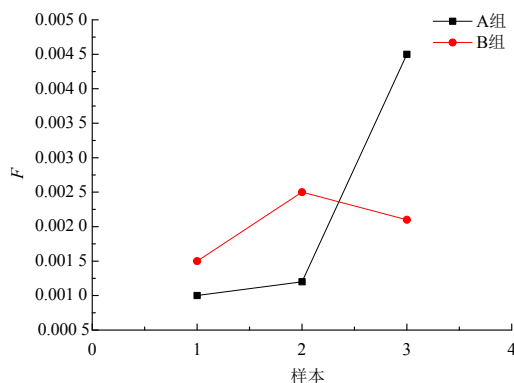


图10 测量结果的方差

Fig.10 The variance of measurement results

图10为利用公式(3)所得方差,其中涡流检测A组试件的护套厚度的最大方差为0.0045,涡流检测B组试件的护套厚度的最大方差为0.0025.两组试件的方差都很小,说明测量稳定性较好,无粘结预应力钢绞线的电导率、磁导率比较均匀。

3.3 讨论

在利用涡流检测无粘结预应力钢绞线护套厚度的过程中发现此方法有一定的缺点:检测结果易受探头晃动及移动影响,显示屏上的结果易发生变化,这主要是因电涡流检测系统通常存在的集肤效应和边缘效应引起的.集肤效应指导线内部实际电流很小,电流集中在临近导线外表的一薄层,结果使它的电阻增加,导线的电阻增加,使它的损耗功率也增加;边缘效应是指线圈上的磁场是向各个方向伸展的,当线圈达到被测试件边缘时,涡流将发生变化^[7-10].这两个效应将对系统检测精度及稳定性带来不利影响,因此在对钢绞线或钢丝绳等钢丝捻起的复杂构件进行涡流检测时应规范操作,减少误差.在一般项目之中,没有游标卡尺等准确且稳定的尺寸检测工具时,在进行无粘结预应力钢绞线护套的厚度检测时,EMS2003磁记忆/涡流检测仪的涡流检测功能可以测出较为准确的结果,但须规范操作,防止涡流检测系统的不稳定因素影响。

规范操作的建议:一是为了是磁导线垂直穿过电线圈,涡流探头应垂直放置,避免影响测量的稳定性;二是标准试片选取时,标准试片的厚度应与试件覆盖层厚度一样或相近,这样会增强结果的准确性;三是被测试件的电、磁特性应具有良好的均匀性。

4 结论

(1) 在无法利用游标卡尺等手段进行准确测量时,可利用涡流检测无粘结预应力钢绞线护套厚度,该方法误差很小,精度较高。

(2) 涡流检测无粘结预应力钢绞线护套厚度的检测结果方差小,说明涡流检测稳定性较高,试件的磁导率均匀。

(3) 在检测操作中,应注意涡流探头垂直放置,标准试片的选取应与试件覆盖层厚度相同或相近,被测试件的电、磁特性应具有良好的均匀性。

参考文献 References

- [1] 陈杰. 无粘结预应力钢绞线的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2007(15): 277.
CHEN Jie. The application of unbonded prestressed steel strand[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2007(15): 277.
- [2] 郑建才. 电涡流技术在多层厚度检测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
ZHENG Jiancai. Application of eddy current technology in a multi-layer thickness detection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 无粘结预应力钢绞线: JG 161-2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Unbonded prestressing steel strand: JG 161-2004[S]. Beijing: China Building Industry Press.
- [4] 任吉林. 涡流检测技术20年的进展[J]. 无损检测, 1998, 20(5): 121-125.
REN Jilin. Development of eddy current testing in recent twenty years[J]. Nondestructive Testing, 1998, 20(5): 121-125.
- [5] 陆兴旺, 王伟杰, 潘超. 涡流测厚传感器阻抗特性分析[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 38-39, 43.
LU Xingwang, WANG Weijie, PAN Chao. Analysis of impedance characteristics of eddy thickness measurement sensor[J]. Transducer and Microsystem of Technologies, 2009, 28(9): 38-39, 43.
- [6] 周杰, 张德均, 陈庭勋. 基于电涡流的铜膜测厚研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(7): 179-182.
ZHOU Jie, ZHANG Dejun, CHEN Tingyun. Research on thickness measurement of copper film based on eddy current[J]. Modern Electronic Technology, 2010, 33(7): 179-182.
- [7] 曹青松, 刘丹, 周继惠, 等. 一种钢丝绳断丝无损定量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 787-794.
CAO Qingsong, LIU Dan, ZHOU Jihui, et al. Non-destructive and quantitative detection method for broken-wire rope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 787-794.
- [8] 周德强, 王俊, 张秋菊, 等. 铁磁构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 989-995.
ZHOU Degang, WANG Jun, ZHANG Qiuju, et al. Research on sensing mechanism of ferromagnetic flaw using pulsed eddy current testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 989-995.
- [9] 周俊, 徐可北, 葛子亮. 热障涂层厚度涡流检测技术研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 353-354.
ZHOU Junhua, XU Kebei, GE Ziliang. Study on thickness of thermal barrier coating with eddy-current testing technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 353-354.
- [10] 李贵娥, 麻红昭, 沈家琪, 等. 电涡流检测技术及影响因素分析[J]. 传感技术学报, 2009, 22(11): 1665-1669.
LI Gui'e, MA Hongzhao, SHEN Jiaqi, et al. Analysis of detection principle and influential factors of eddy current[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(11): 1665-1669.
- [11] 徐可北, 周俊华. 涡流检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 67, 74.
XU Kebei, ZHOU Junhua. Eddy current testing[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004: 67, 74.

(编辑 吴海西)