

航空发动机叶片热障涂层厚度的无损定量评估

李 达¹, 李 勇¹, 闫 贝¹, 刘相彪¹, 王东升², 牟仁德²

(1.西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室,西安,710049;
2.中国航空工业集团公司北京航空材料研究院,北京,100095)

摘要 目前用来提高航空发动机涡轮叶片的耐高温及抗腐蚀性能的热障涂层易出现过薄或脱落的情况,针对涡轮叶片的微米级热障涂层,集中探究其厚度的有效无损定量评估方法,采用高频涡流检测,配合涡流检测正逆问题求解模型进行求解。通过建立涡流检测阻抗信号-陶瓷层厚度与粘接层厚度的解析方程组,结合逆运算算法和试验拾取的线圈阻抗信号,联立求解陶瓷层厚度与粘接层厚度的预测值,继而计算2层厚度之和。为了验证计算结果的正确性,利用扫描电镜来测量样本热障涂层的真实厚度,结果显示该方法能够对涡轮叶片热障涂层厚度实现高效定量评估,评估精度可达90%以上。

关键词 热障涂层;无损检测;高频涡流检测;逆问题

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.06.005

中图分类号 TG115.28 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)06-0022-05

Quantitative Non-destructive Evaluation of Thermal Barrier Coatings of Aero-engine Blades

LI Da¹, LI Yong¹, YAN Bei¹, LIU Xiangbiao¹, WANG Dongsheng², MU Rende²

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Research Centre for Inspection and Evaluation of Nuclear Structural Integrity, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The turbine blade is one of the crucial components in advanced aero-engines. It is of importance to apply the thermal barrier coating (TBC) to the turbine blade in a bid to enhance its high temperature resistance and corrosion resistance performance. However, defects involving wall-thinning and delamination considerably decrease the protective effect of in-service TBC, which significantly influence the safety of turbine blades and aero-engines. This paper intensively investigates the technique for quantitative NDE of TBC which is subject to wall-thinning defects in micrometers. It has been found that high-frequency eddy current technique in conjunction with the inverse model is applicable and effective for NDE of TBC. The establishment of eddy current impedance signal - the thickness of TC and the thickness of BC the analytical equations and combining with the inverse algorithm and the pickup coil impedance signal, the simultaneous solving the thickness of TC and BC. And then add them up, getting the thickness of TBC. To validate the

收稿日期: 2015-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477127)

作者简介: 李 达(1991-),男,山东日照人,硕士生,主要从事电磁无损检测研究。

通讯作者: 李勇(1978-),男,副教授,主要从事结构健康检测及完整性评估技术研究。E-mail: yong.li@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 李达,李勇,闫贝,等.航空发动机叶片热障涂层厚度的无损定量评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(6):22-26. LI Da, LI Yong, YAN Bei, et al. Quantitative Non-destructive Evaluation of Thermal Barrier Coatings of Aero-engine Blades[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(6): 22-26.

computational results, by scanning electron microscope (SEM) to measure the true thickness of sample thermal barrier coatings. The results show that this method can achieve efficient quantitative assessment of thermal barrier coating of turbine blades with accuracy over 90%.

Key words: thermal barrier coating; non-destructive testing; high-frequency eddy current technique; inverse problem

航空发动机涡轮叶片的粘接层与陶瓷层构成热障涂层^[1-4] (Thermal Barrier Coating, TBC)。热障涂层沉积在高温合金基体 (Alloying Body) 表面,对于基底材料起到隔热和降温的作用,使得涡轮叶片能在高温下正常运行。然而,服役中的涡轮叶片其热障涂层易出现减薄或脱落,导致其防护作用将大大降低,严重影响航空发动机安全性。在宏观上,热障涂层减薄缺陷主要在降低有效涂层厚度。为了及时排除该缺陷对叶片安全的潜在影响,开发热障涂层厚度的有效检测方法十分必要。国内外学者对该问题已进行了相关研究,提出了不同的方法^[5-8]。但这些方法仅针对毫米级的热障涂层,且普遍存在定量评估精度低、有效性待验证等不足。本文集中研究涡轮叶片热障涂层厚度的有效无损定量评估方法,提出基于双高频涡流检测^[9-11] (激励频率大于 1 MHz) 的热障涂层厚度无损定量评估方法,建立了该方法的逆问题高效求解模型。

1 基于双高频涡流检测的 TBC 厚度评估方法

TBC 厚度为陶瓷层 (TC) 厚度与粘接层 (BC) 厚度的总和,本方法在对 TBC 厚度进行定量评估时,通过建立涡流检测阻抗信号-陶瓷层厚度与粘接层厚度的解析方程组 (因实际待求解参数为陶瓷层厚度和粘接层厚度,故所建立的解析方程组为 2 个不同激励频率下所对应的涡流检测阻抗信号解析表达式),结合逆运算算法和试验拾取的线圈阻抗信号,联立求解陶瓷层厚度与粘接层厚度的预测值,继而计算 2 层厚度之和。

1.1 正问题求解模型

将高频涡流探头置于涡轮叶片表面,模型见图 1。基于 ETREE^[12-13] 解析法,建立检测信号和参数信号梯度矩阵解析式。探头输出的涡流检测信号 (线圈阻抗) 与 TBC 参数间的关系可用隐式表示:

$$Z = F(z_1, d_1, f) \quad (1)$$

式中: Z 为检测得到的阻抗值 (Ω); z_1 为探头的提高距离,即陶瓷层厚度 (mm); d_1 为粘结层厚度 (

mm); f 为涡流探头激励频率 (Hz)。可将该隐式写为显式形式^[14-15]:

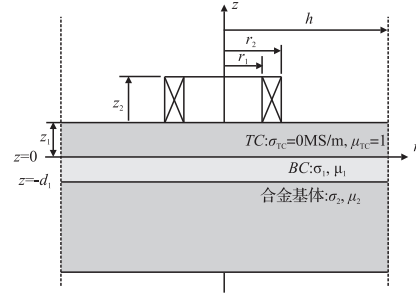


图 1 高频涡流检测 TBC 二维轴对称模型

Fig.1 2D axisymmetric model of high frequency eddy current testing

$$Z = Z_0 + Z_1 = \frac{2j\omega\pi\mu_0 N^2 v}{(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2} \quad (2)$$

式中: $v = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\chi^2(a_i r_1, a_i r_2)}{[hJ_0(a_i h)]^2 a_i^7} \times \{2[a_i(z_2 - z_1) - 1 + e^{a_i(z_1 - z_2)}] + (e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2})^2 \frac{V_1}{U_1}\}$

Z_0 和 Z_1 分别代表激励线圈磁场和涡流感应磁场所对应的线圈阻抗信号。式(2)中其他参数项写为:

$$\begin{cases} \lambda(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx \\ \frac{V_1}{U_1} = \frac{(a_i + a_{i1}) e^{-2a_{i1} d_1} R(a_i) + (a_i - a_{i1})}{(a_i - a_{i1}) e^{-2a_{i1} d_1} R(a_i) + (a_i + a_{i1})} \\ R(a_i) = \frac{(a_{i1} + a_{i2})(a_{i2} - a_i) e^{-2a_{i1}(d_2 - d_1)} + (a_{i1} - a_{i2})(a_{i2} + a_i)}{(a_{i1} - a_{i2})(a_{i2} - a_i) e^{-2a_{i1}(d_2 - d_1)} + (a_{i1} + a_{i2})(a_{i2} + a_i)} \\ a_{in} = \sqrt{a_i^2 + j\omega\mu_n \sigma_n} \quad n = 1, 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: J_n 为贝塞尔方程; h 为求解域径向截断半径; 特征值 a_i 可通过求解 $J_1(a_i h) = 0$ 的正根得到; μ_0 为真空磁导率; μ_n 和 σ_n 分别为各层材料相对磁导率和导电率; ω 为激励电流角频率; N 为线圈匝数。

针对不同的陶瓷层厚度和粘接层厚度,采用正问题求解模型对高频涡流阻抗信号进行求解,探究在不同激励频率下厚度对探头阻抗的影响及关联规律。仿真中探头尺寸、TBC 尺寸和电气参数见表 1。由于加工工艺等因素的限制,无法加工出具有给定 TBC 厚度的标准试件,故以探头置于空气中的阻抗

信号作为观察对象,进行探头扫频测试,研究得知:
①探头在 $f = 4.32$ MHz 处出现谐振,激励频率应低于该数值;②当激励电流频率为 $f_1 = 1.26$ MHz, $f_2 = 1.99$ MHz 时,探头阻抗计算值与试验测量值吻合度较好(相对误差小于 2%)。故探头激励频率选为 $f_1 = 1.26$ MHz, $f_2 = 1.99$ MHz。采用式(2),仿真计算结果见图 2。

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Parameters of simulation model

r_1/mm	r_2/mm	$z_1/\mu\text{m}$	z_2/mm	N
2	3	30~110	0.8	500
$d_1/\mu\text{m}$	$(d_2 - d_1)/\text{mm}$	$\sigma_1/(\text{MS} \cdot \text{m}^{-1})$	σ_2	$\mu_1, \mu_2/(\text{MS} \cdot \text{m}^{-1})$
30~110	1.47	0.35	0.695	1

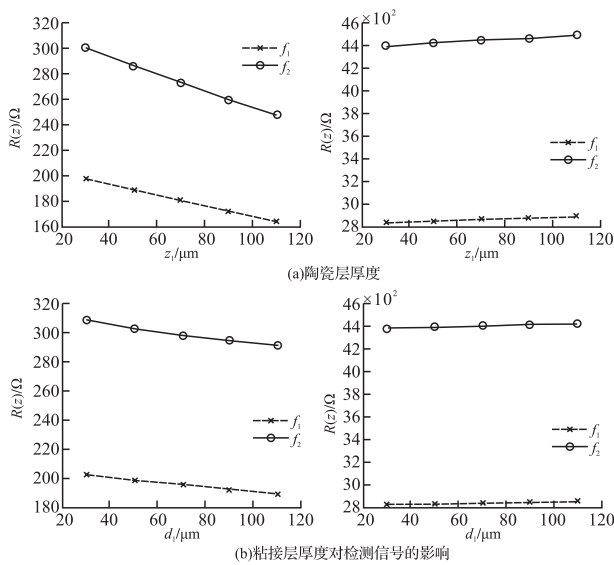


图 2 陶瓷层厚度与粘接层厚度对检测信号的影响

Fig.2 Effect on detection signal with different TC thickness and BC thickness

由图 2 可见,当陶瓷层厚度 z_1 增大,系统其他参数不变($d_1 = 10 \mu\text{m}$)时,阻抗信号实部单调递减,虚部单调递增;当粘接层厚度 d_1 增大,系统其他参数不变($z_1 = 10 \mu\text{m}$)时,阻抗信号实部单调递减,虚部单调递增。为了抑制后续逆问题求解中解的不适定性,选取影响规律呈较好线性度的阻抗信号虚部作为逆运算中输入的测量值。

1.2 参数信号梯度矩阵

在高频涡流检测 TBC 逆问题求解中,参数信号梯度矩阵(用以表征及量化各待求解参数变化对阻抗信号的影响)的快速求解非常重要。本问题中,待求解的 TBC 参数个数为 2,分别为 z_1 和 d_1 ,因此,参数信号梯度矩阵可写为 $\partial F(\mathbf{P}, f_m)/\partial \mathbf{P}$,其中参数矩阵 $\mathbf{P} = [z_1, d_1]$, f_m ($m = 2$) 为激励电流频率。

通过式(2)和(3)将 Z 对各参数进行一阶求导,并考虑 $Q(z_1) = (e^{-a_1 z_1} - e^{-a_2 z_2})^2$, $W(d_1, \sigma_1) = V_1/U_1$ 可以得到:

$$\frac{\partial Q(z_1)}{\partial z_1} = -2a_1 (e^{-a_1 z_1} - e^{-a_2 z_2})^2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial W(d_1, \sigma_1)}{\partial d_1} = \frac{-2a_{i1}^2 a_i W_1 W_2}{[W_3 \sinh(d_1 a_{i1}) + W_4 a_{i1} \cosh(d_1 a_{i1})]^2} \quad (5)$$

式中: \sinh 和 \cosh 为双曲正弦函数和双曲余弦函数,其他参数项写为:

$$\begin{cases} W_1 = a_{i2} (a_{i1} - a_i) \cosh(d_2 a_{i2}) + (a_{i1} a_i - a_{i2}^2) \sinh(d_2 a_{i2}) \\ W_2 = a_{i2} (a_{i1} + a_i) \cosh(d_2 a_{i2}) + (a_{i1} a_i + a_{i2}^2) \sinh(d_2 a_{i2}) \\ W_3 = a_{i2} (a_{i1}^2 + a_i^2) \cosh(d_2 a_{i2}) + a_i (a_{i1}^2 + a_{i2}^2) \sinh(d_2 a_{i2}) \\ W_4 = 2a_{i2} a_i \cosh(d_2 a_{i2}) + (a_{i2}^2 + a_i^2) \sinh(d_2 a_{i2}) \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)和(5)可推得参数信号梯度矩阵为:

$$\frac{\partial F(\mathbf{P}, f_m)}{\partial \mathbf{P}} = A \times \text{conj} \left[\begin{array}{l} -2 \sum_{i=1}^{\infty} \lambda^2 (a_i r_1, a_i r_2) \frac{(e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2})^2 V_1}{[h J_0(a_i h)]^2 a_i^6 U_1} \\ \sum_{i=1}^{\infty} \lambda^2 (a_i r_1, a_i r_2) \frac{(e^{-a_i z_1} - e^{-a_i z_2})^2 \partial W(d_1, \sigma_1)}{[h J_0(a_i h)]^2 a_i^7 \partial d_1} \end{array} \right]^T \quad (7)$$

式中: $A = 2j\omega\pi\mu_0 N^2 / [(r_2 - r_1)^2 (z_2 - z_1)^2]$; conj 为共轭复数。

1.3 逆问题求解模型

基于确定论的逆问题求解策略为:通过迭代计算寻找当预测信号与测量信号误差达到最小时所对应的待测参数解。令预测信号为 $\mathbf{Z}_p = F(z_1, d_1, f_m)$, 测量信号为 $\mathbf{Z}_{\text{obs}} = F(z_1, d_1, f_m)$, 两者的误差方程写为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = \sum_{m=1}^{M_0} |\mathbf{Z}_{\text{obs}} - \mathbf{Z}_p|^2 \\ \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{Z}_{\text{obs}} - \mathbf{Z}_p \end{cases} \quad (8)$$

令: $\delta_p = [\Delta z_1, \Delta d_1]$ 为待测参数变化量,则对于较小的 δ_p ,公式(1)可用泰勒级数展开为:

$$\mathbf{Z}(\mathbf{P} + \delta_p) = F(\mathbf{P} + \delta_p, f_m) \approx F(\mathbf{P}, f_m) + \frac{\partial F(\mathbf{P}, f_m)}{\partial \mathbf{P}} \delta_p \quad (9)$$

采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法,在每一步迭代计算中,分别求取 $\|\mathbf{Z}_{\text{obs}} - \mathbf{Z}_p(\mathbf{P} + \delta_p)\| \approx \|\boldsymbol{\varepsilon} - \frac{\partial F(\mathbf{P}, f_m)}{\partial \mathbf{P}} \delta_p\|$ 为最小值时所对应的 δ_p ,用以对待测参数进行修正。基于 LM 算法的逆问题求解模型见图 3。图 3 中所涉及的参数信号梯度矩阵可采用式(7)求解得出。

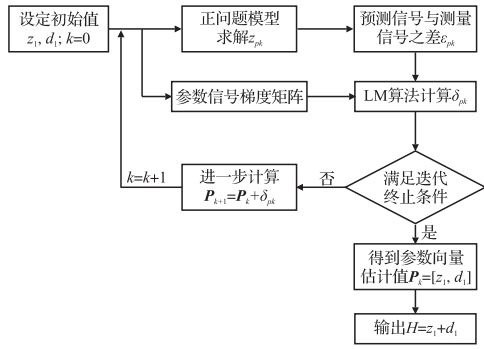


图 3 基于 LM 算法的涡流检测逆问题求解模型

Fig.3 Inverse model of eddy current based on LM algorithm

2 TBC 厚度双高频涡流检测试验与验证

2.1 TBC 厚度涡流检测试验系统

为了进一步验证本文方法的可靠性,搭建了双高频涡流检测试验平台,见图 4。利用 HIOKI 生产的 LCR-3532 阻抗测量仪对所制备的试验样本进行高频涡流检测,测取的试验信号(阻抗信号虚部)输入逆问题求解模型,对参数矩阵 P 和涂层厚度 h 进行逆向求解。

为了有效模拟真实涡轮叶片,试验中采用的试件其制备工艺与实际涡轮叶片制备工艺相同。其中 A_0 为无涂层样本(合金基体厚度为 1.47 mm,电导率为 0.695 MS/m),粘结层电导率为 0.35 MS/m,陶瓷层电导率为 0 MS/m。 $A_1 \sim A_3$ 分别为 3 个不同厚度的样品。

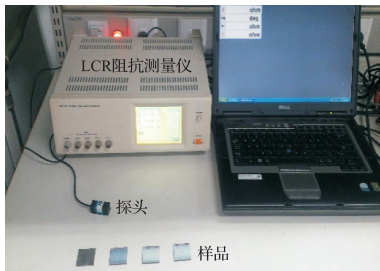


图 4 TBC 厚度双高频涡流检测试验平台

Fig.4 Dual high-frequency eddy current platform

2.2 试验结果及分析

通过 LCR-3532 阻抗测量仪驱动探头产生频率为 f_1, f_2 的磁场,在磁场的作用下,分别得到空气、 A_0, A_1, A_2, A_3 的原始虚部阻抗值。为了消除探头自身特性对检测结果的影响,对拾取的阻抗信号虚部值进行归一化处理,得到了规范化阻抗信号虚部值: $X_n = X/X_0$, X_0 为将探头置于空气中时所拾取的阻抗信号虚部值。

为了消除试验结果与正问题求解结果间的差

异,将 A_0 对应的正问题求解结果除以试验结果,得到标定矩阵,将后续试验中 A_1, A_2, A_3 样本对应的试验结果分别乘以该标定矩阵,得到标定后的规范化阻抗信号虚部值(X_c)。标定后,将各样本所对应的 X_c 带入逆问题求解模型中对样本 TBC 厚度进行预测。

为了获取各样本 TBC 厚度的精确值,在高频涡流检测试验后,对 A_1, A_2, A_3 进行截断并利用电镜扫描观察其涂层厚度,其 TBC 断面的微观显示见图 5。采用本文所提出逆问题求解模型,经 53 步迭代(耗时约 3.4 s),可得 A_1, A_2, A_3 的 TBC 厚度预测值,求解结果见表 2。通过与实际 TBC 厚度比较可知,本文所提出的 TBC 厚度无损定量评估方法具有较高精度和效率。

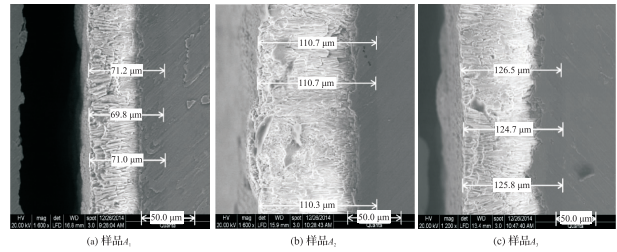


图 5 各样本 TBC 断面电镜扫描结果

Fig.5 Cross-sectional topography of TBC samples

表 2 逆运算求解结果

Tab.2 Results of inversion

样品号	涂层厚度测量值/ μm		绝对误差/ μm	相对误差
	标称值	测量值		
A_1	60	70.67	67.09	3.58 5.07%
A_2	100	110.57	101.74	8.83 7.99%
A_3	120	125.67	112.93	12.74 10.14%

3 结论

本文提出基于双高频涡流检测的 TBC 厚度无损定量评估方法,旨在实现 TBC 厚度的高效高精度量化评估。具体结论如下:

1) 基于 ETREE 解析法,建立了涡流检测 TBC 正问题求解模型,推导了阻抗信号和逆问题求解所需参数信号梯度矩阵的理论解析表达式,探究了 TC 和 BC 厚度与阻抗信号的关联规律。阻抗信号和参数信号梯度矩阵理论解析表达式的建立有效提升了逆问题求解模型的计算精度和效率。同时,基于 LM 算法,建立了双高频涡流检测 TBC 厚度的逆问题求解模型;

2) 搭建了高频涡流检测 TBC 试验系统。通过试验所获取的规范化阻抗信号虚部值,结合逆问题求解模型,预测所制备的涡轮叶片模拟试件 TBC 厚

度。与 TBC 厚度真实值相比,逆问题求解所得预测值绝对误差小于 $13\ \mu\text{m}$,相对误差小于 11% ,满足工程实际要求(绝对误差小于 $15\ \mu\text{m}$)。

由此可见,本文提出的基于双高频涡流检测的 TBC 厚度无损定量评估方法可有效量化评估涡轮叶片微米级 TBC 厚度,较其他毫米级 TBC 厚度检测方法,具有较高的量化精度和效率。在本研究的基础之上,后续研究将着重探究高频涡流检测热障涂层脱粘缺陷的可行性。

参考文献(References):

- [1] 兰磊,康进兴,张忠平,等. C/C 复合材料抗氧化涂层性能研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2004, 5(3):92-94.
LAN Lei, KANG Jinxing, ZHANG Zhongping, et al. Properties of High Temperature Oxidation Resistance Coating for C/C Composites[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2004, 5(3):92-94. (in Chinese)
- [2] Chen X, Yu Z, Huang W, et al. Thermal Aging Behavior of Plasma Sprayed LaMgAl₁₁O₁₉ Thermal Barrier Coating[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2011, 31(13):2285-2294.
- [3] Winter M R, Clarke D R. Oxide Materials with Low Thermal Conductivity[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2007, 90(2):533-540(8).
- [4] 刘纯波,林锋,蒋显亮. 热障涂层的研究现状与发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2007, 1(1):1-13.
LIU Chunbo, LIN Feng, JIANG Xianliang. Current State and Future Development of Thermal Barrier Coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 1(1):1-13. (in Chinese)
- [5] Marinetti S, Robba D, Cernuschi F, et al. Thermographic Inspection of TBC Coated Gas Turbine Blades; Discrimination between Coating Over-Thicknesses and Adhesion Defects[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 49(3):281-285.
- [6] Kakuda T, Limarga A, Vaidya A, et al. Non-destructive Thermal Property Measurements of An APS TBC on An Intact Turbine Blade[J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(2):446-451.
- [7] Cernuschi F, Bison P, Moscatelli A. Microstructural-Characterization of Porous Thermal Barrier Coatings by Laser Flash Technique[J]. Acta Materialia, 2009, 57(12):3460-3471.
- [8] Bose S. Chapter 8 - Nondestructive Inspection (NDI) of Coatings[J]. High Temperature Coatings, 2007: 233-246.
- [9] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等. 基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(1):73-77.
YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of Crack Defect Using a New Pulsed Eddy Current Sensor[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(1):73-77. (in Chinese)
- [10] 张东利,吴超,王召巴,等. 涡流技术用于钢管涂层测厚的可行性研究[J]. 中北大学学报:自然科学版, 2013, (2):188-193.
ZHANG Dongli, WU Chao, WANG Zhaoba, et al. Research on Applicability of Eddy Current Testing Technique to Thickness Measurement of Coating in a Steel Pipe[J]. Journal of North University of China, 2013, (2):188-193. (in Chinese)
- [11] 周德强,李勇,张秋菊,等. 脉冲涡流金属厚度检测信号及其特征提取[J]. 中国机械工程, 2012, 23(15): 1771-1773,1778.
ZHOU Deqiang, LI Yong, ZHANG Qiuju, et al. Feature Extraction of Pulsed Eddy Current Signals on Metal Thickness Measurement[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(15): 1771-1773, 1778. (in Chinese)
- [12] Li Y, Tian G Y, Simm A. Fast Analytical Modelling for Pulsed Eddy Current Evaluation[J]. NDT & E International, 2008, 41(6):477-483.
- [13] Li Y, Chen Z M, Qi Y. Generalized Analytical Expressions of Liftoff Intersection in PEC and a Liftoff-intersection-Based Fast Inverse Model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 2931-2934.
- [14] Li Y, Liu X B, Chen Z M, et al. A Fast Forward Model of Pulsed Eddy Current Inspection of Multi-layered Tubular Structures[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45(4):417-423.
- [15] Li Y, Chen ZM, Mao Y, et al. Quantitative Evaluation of Thermal Barrier Coating Based on Eddy Current Technique[J]. NDT&E International, 2012, 50(5):29-35.

(编辑:徐敏)