

红外锁相法涂层测厚数值模拟与分析

张金玉, 孟祥兵, 杨正伟, 王冬冬, 陶胜杰

(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

摘要: 在传热学基础上建立了涂层的三维瞬态导热模型, 利用 ANSYS 仿真软件对施加有正弦规律变化热流密度的涂层试件进行有限元分析; 运用两次加载、减法处理的方法有效克服了常量和环境因素带来的影响, 然后讨论了数据拟合求相位的方法; 改变加载频率, 得到了多组涂层厚度与相位的定量关系曲线, 从理论计算的角度揭示涂层厚度和相位及加载频率的定量关系; 最后利用曲线中的线性线段, 总结确定了涂层厚度与相位的定量关系, 为利用锁相法对涂层厚度进行精确测量提供了理论依据。

关键词: 锁相; 涂层厚度; 数值模拟; 数据拟合

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0006-06

Numerical simulation and analysis of lock-in thermography for thickness measurement of coating

Zhang Jinyu, Meng Xiangbing, Yang Zhengwei, Wang Dongdong, Tao Shengjie

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: On the basis of the heat transfer, a three-dimensional heat conduction model was proposed. The coating applied sinusoidal variation of heat flux was analyzed using large-scale finite element analysis software ANSYS. The use of two loading and subtraction effectively overcome the effects brought about by the constant part and environmental factors. Then data fitting method for seeking phase was discussed. Changing loading frequency, multiple sets of the quantitative relationship curves were obtained. From the theoretical point of view, the relationship of the phase between the modulation frequency and thickness were revealed. Finally, using the linear stages in curves, the quantitative relationship between phase and thickness was identified. A theoretical basis for precise measurements of coating thickness using infrared lock-in method was provided.

Key words: lock-in; coating thickness; numerical simulation; data fitting

收稿日期: 2014-05-05; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(51275518, 51305447); 陕西省自然科学基金(2013JM7021)

作者简介: 张金玉(1964-), 男, 副教授, 研究生导师, 博士后, 主要从事热波无损检测、智能故障诊断方面的研究。

Email: mejy Zhang@163.com

通讯作者: 杨正伟(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事热波无损检测、智能故障诊断方面的研究。Email: yangzhengwei1136@163.com

0 引言

特种功能涂层在现代武器装备和工程机械设备上得到了广泛的应用,发挥着极为重要的作用,而涂敷质量的好坏,直接影响到涂层的使用性能,涂层厚度是评价涂敷质量的一个重要指标。目前检测涂层厚度的方法有多种,红外热波检测技术是一种新的检测手段。该技术克服了传统无损检测技术的局限,具有观测面积大、可靠性高、无损伤、非接触等优势^[1]。红外热波无损检测技术按照热激励方式不同主要分为脉冲法(PT)^[2]和锁相法(LT)^[3]。对于脉冲法红外热波检测国内外学者已经做了大量的研究工作^[4-7],这里不做赘述。与脉冲法相比,锁相法具有对热激励强度要求低、对加热不均和表面发射率变化不敏感、抗反射干扰强、对表面的防反射处理要求低、对曲面适应性较好等优点^[8]。德国斯图加特大学 Busse G 教授首先提出了红外锁相技术^[3],从此该技术得到快速发展,尤其在检测缺陷领域得到了深入研究^[9-12]。红外锁相法在涂层测厚上的独特优势已被许多国外学者证实^[13-15],然而有关锁相法检测涂层厚度的理论基础研究却非常少。法国 CEDIP 公司研制了红外锁相热成像系统 Cedip JADE III,但是由于其设备价格昂贵,一般单位难以购买和尝试该技术。数值模拟无疑是研究该技术的最好方法。

文中基于大型有限元分析软件 ANSYS 对涂层试件进行热分析,建立三维瞬态热传导模型,将红外锁相技术应用在涂层的厚度测量上,从理论计算的角度揭示了相位与调制频率、涂层厚度及材料等因素的关系,为锁相法涂层测厚奠定理论基础。

1 锁相涂层测厚的原理

红外锁相法涂层测厚是采用强度按正弦规律变化的调制热源对涂层试件进行外部激励,一部分入射的能量会被该涂层表面吸收而转化为热能,并在涂层中产生一周期性变化的局部热流,且在涂层内部形成周期性的温度分布。热能以热波形式在涂层中传播,该传播与涂层的热学性质及热源的调制频率有关。当热波遇到涂层与基体的界面时,由于热波载体的热学性质发生变化,热波将被散射或反射,热波返回涂层表面时,改变了涂层表面的温度分布。用

红外热像仪记录涂层的表面温度变化过程,然后提取涂层表面温度变化的相位图和幅值图。由于激励源的强度是按正弦规律变化的,所以涂层表面温度也是同频率正弦规律变化,当涂层的厚度不同时,不同厚度的涂层表面温度变化的相位也不同。检测原理如图 1 所示,涂层厚度是相位的函数,即 $h=f(\Phi)$ 。

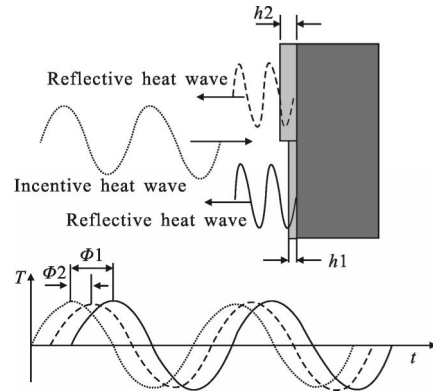


图 1 锁相检测原理

Fig.1 Theory of lock-in thermography

文中所提涂层表面温度变化的相位(即所求的相位)是以正弦调制热流密度信号的相位为参考的相对相位,本质上是热波信号相对调制热流密度信号的相移。

2 建立三维热波传导模型

锁相法采用调制热源对涂层试件表面进行加热,即在涂层表面施加随时间按正弦规律变化的热流密度 $I(t)$ 。

$$I(t) = P(1 - \cos(2\pi ft)) \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为周期性变化的热流密度; P 为热源的加热功率; f 为热源激励加载频率。

热波在涂层中传递时,满足三维傅里叶热扩散方程。

$$\alpha_x \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial X^2} + \alpha_y \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Y^2} + \alpha_z \frac{\partial^2 T(X, Y, Z, t)}{\partial Z^2} = \frac{\partial T(X, Y, Z, t)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $\alpha = \frac{\rho c}{k}$ 称为材料的导温系数或热扩散率,其中, k 为涂层材料的热传导率, ρ 为涂层的密度, c 为涂层材料的比热容; α_x 、 α_y 、 α_z 分别为三个坐标方向上的热扩散率。

为了求解模型, 确定该模型的初始条件和边界条件。

初始条件:

$$T(X, Y, Z, t=0)=T_{am} \quad (3)$$

边界条件:

$$-k_{top} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l_z} = I(t) - h_c(T - T_{am}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l_x, x=0} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=l_y, y=0} = 0 \quad (6)$$

式中: h_c 为表面热交换系数; l_x 、 l_y 、 l_z 分别为涂层的长度、宽度、厚度。

显然, 上面三维热传导微分方程的定解问题相当复杂, 难以用解析法求解, 下面将利用 ANSYS 仿真软件对其进行有限元分析。

3 数值仿真

应用 ANSYS 软件, 以玻璃纤维基体上的不同厚度的丙烯酸涂层为例, 对其进行正弦调制加热, 得到各涂层表面的相位, 进而探索相位与涂层厚度的关系。表 1 给出了材料的热特性参数。假定环境温度 T_e 保持 25 °C 不变, 材料的初始温度为环境温度, 表面对流换热系数 h_c 为 10 W/(m²·°C), 检测过程无内部热源, 忽略表面辐射传热。

表 1 材料的热特性参数

Tab.1 Thermal properties of materials

Materials	Thermal conductivity /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Special heat /J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	Density/kg·m ⁻³
Acrylicacid	0.78	1 378	2 160
Glassfibre	0.152	1 297	1 200

3.1 数据拟合法求相位

在离散的周期性信号里面提取相位可以采用傅里叶变换法、相关函数法、四点平均法和数据拟合法。其中数据拟合法方法简单, 而且可以直接得到涂层表面温度变化的相位与加载的正弦调制热流密度的相位差, 这里采用数据拟合法, 并详细介绍该方法的应用。在现实实验中, 无法加载负值热流密度, 因此仿真实验时加载 $A(1 - \cos(2\pi ft + \varphi))$ 形式的热流密度, 这样仿真实验更加有意义。

在 ANSYS 中先建立一个正方形涂层模型, 其边长为 100 mm, 基体厚度为 5 mm, 涂层厚度为 1 mm 的涂层模型, 如图 2 所示。

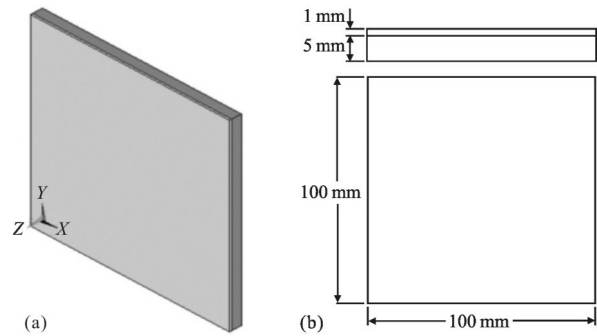


图 2 模型尺寸

Fig.2 Model size

(1) 正弦加载

对涂层表面施加热流密度为 $100(1 - \cos(2\pi ft))$ W/m² 的热激励, 进行仿真, 并获取涂层表面的温度变化云图。其中, 加载频率 f 为 0.01 Hz, 加载时间 t 为 800 s, 即加载 8 个周期, 每个周期取 32 个点, 共取点 256 帧温度数据。取涂层表面中心节点的温度, 得到涂层表面温度随时间变化的曲线如图 3 所示。可以看出涂层表面的温度是正弦上升变化的, 交流热流使涂层表面温度产生振荡, 频率与加载频率一致; 常量热流导致涂层产生热积累, 表面温度升高, 对相位不产生影响。

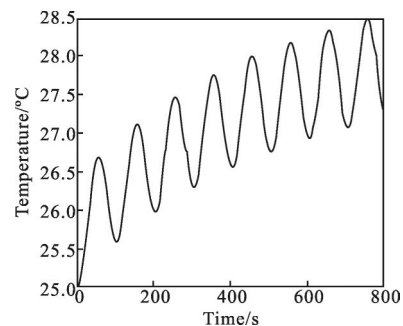


图 3 正弦加载温度变化曲线

Fig.3 Temperature curve at sinusoidal load

(2) 常量加载

对涂层表面施加常量热流密度 100 W/m², 加载时间 t 也为 800 s。同样, 每隔 3.125 s 取一个点, 共取点 256 个, 得到涂层表面温度随时间变化的曲线如图 4 所示。

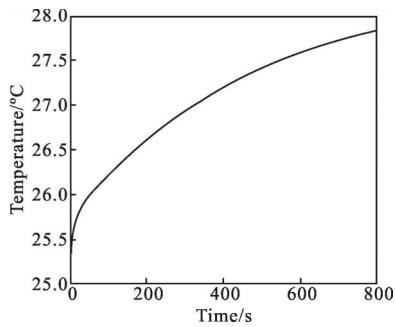


图 4 常量加载温度变化曲线
Fig.4 Temperature curve at constant load

(3) 减法处理

用常量加载得到的数据减去正弦规律加载得到的数据,可以消去常量加载和环境因素带来的影响,得到近似标准的正弦曲线,如图 5 所示。可以看出在加热初期,由于瞬态分量的影响,加热表面过余温度还不稳定,最小值呈缓慢下降的趋势,待加热一段时间后,才逐步趋于稳定。为了得到更为标准的正弦曲线,只取后四个周期的值,得到图 6,由于是整周期取舍数据,所以对相位没有影响。

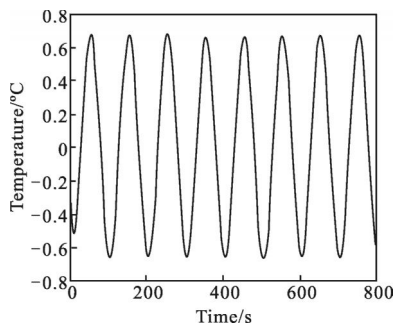


图 5 减法处理后温度曲线
Fig.5 Temperature curve after subtraction

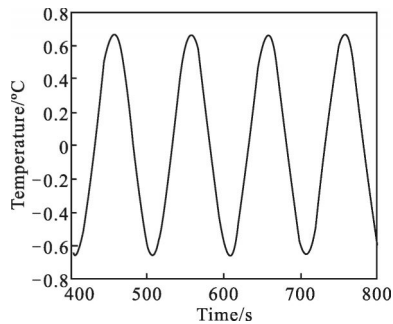


图 6 后四个周期温度曲线
Fig.6 Temperature curve of last four cycles

(4) 数据拟合求相位

利用 MATLAB 数据拟合工具箱对图 6 中曲线

用函数式 $A\cos(2\pi ft + \varphi)$ 进行拟合,其中 f 为 0.01 Hz,通过拟合得到幅值 $A=0.6605$, 相位 $\varphi=-0.4256$,拟合精度如表 2 所示,拟合曲线如图 7 所示,可以看出拟合结果可以接受。拟合得到的相位 φ 也就是涂层表面温度曲线的相位与输入热流密度 $100(1-\cos(2\pi ft))$ 的相位差。

表 2 拟合精度

Tab.2 Fitting accuracy

SSE	R-square	Adjusted R-square	RMSE
0.001 531	0.999 9	0.999 9	0.003 486

表中 SSE 为和方差, R-square 为确定系数, Adjusted R-square 为校正后的确定系数, RMSE 为均方根。

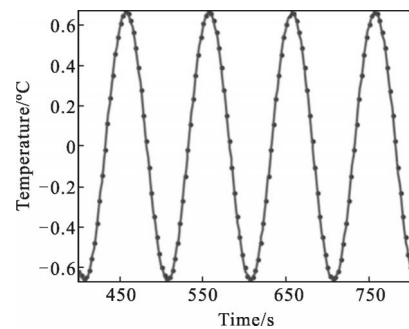


图 7 拟合得到的曲线
Fig.7 Fitting curve

3.2 涂层厚度与相位的关系

在 ANSYS 中建立长为 10 cm, 宽为 1 cm, 基体厚度为 5 mm, 涂层为 0.1~1 mm 的 10 个阶梯厚度的涂层模型, 建模及划分网格后如图 8 所示。

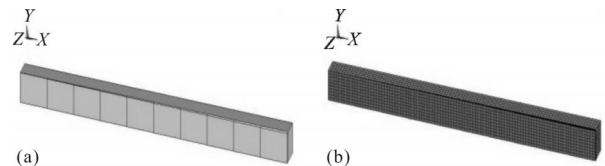


图 8 建立阶梯涂层模型及划分网格
Fig.8 Establish ladder coating model and meshing

首先对涂层表面施加正弦规律变化的热流密度 $100(1-\cos(2\pi ft)) \text{ W/m}^2$, 频率 f 为 0.01 Hz, 加载时间 t 为 800 s, 取不同厚度涂层表面的中心节点的温度, 每个周期取 32 个点, 共取点 256 个, 得到 10 组数据。而后对涂层表面施加常量热流密度 100 W/m^2 , 加

载时间 t 为 800 s, 每隔 3.125 s 取个点, 共取点 256 个, 同样得到 10 组数据。利用 3.1 节中数据拟合法求相位的方法, 求得 0.1~1 mm 不同厚度涂层的相位值。改变模型中涂层的厚度, 用同样的方法可以得到涂层厚度从 1.1~3 mm 的相位。从而得到涂层厚度从 0.1~3 mm 的厚度与相位的关系如图 9 所示。

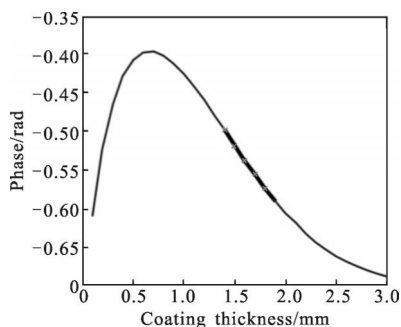


图 9 相位与厚度关系

Fig.9 Relationship between phase and thickness

从图 9 中可以看出随着涂层厚度的增加, 相位先逐渐增大, 在 0.7 mm 左右时达到极大值, 而后逐渐减小, 厚度为 3 mm 时曲线已趋于平缓, 从曲线的走势上可以看出, 曲线最终将趋于水平, 所以涂层厚度在 3 mm 以内时得到的数据更有价值。在被测材料不变的情况下, 当热激励频率为 0.01 Hz 时, 锁相法理论上可检测涂层的最大厚度在 3 mm 左右。进一步分析得出可检测的最大厚度与涂层的热扩散长度 μ ($\mu = (k / (\pi \rho f c))^{1/2}$) 有关, 大约在 $1.5 \sim 2 \mu$ 之间。

当改变加载频率时, 获得的涂层厚度与相位关系曲线具有与图 9 相似的形状。所以该曲线形状也是涂层厚度与相位关系的一般性曲线形状。图 10 给出了调制频率分别为 0.005 Hz、0.01 Hz、0.05 Hz、0.1 Hz 时

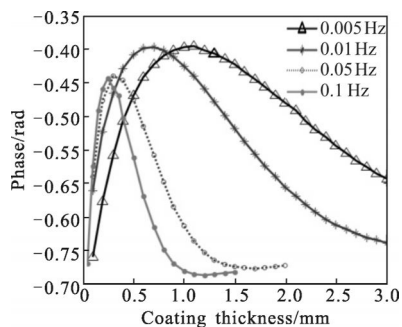


图 10 不同频率下相位与厚度关系

Fig.10 Relationship between phase and thickness at different frequencies

相位与涂层厚度之间关系曲线, 可以直观地看出它们检测的涂层厚度范围。当热激励频率增大时, 曲线向左移, 可以检测涂层的厚度范围减小, 涂层厚度的分辨率增加, 适合检测薄涂层; 当频率减小时, 曲线向右移, 可以检测涂层的厚度范围增大, 涂层厚度的分辨率降低, 适合检测厚涂层。

4 涂层厚度计算方法

分析图 9 中曲线, 可以看出直接利用整条曲线来找出涂层厚度与相位的关系式比较复杂, 进一步分析发现涂层厚度在 1.4~1.9 mm 之间时 (图 9 中粗线标记部分), 涂层的厚度与相位基本满足线性关系。不难得到在该线性阶段涂层的厚度 h 与相位 φ 满足如下关系式:

$$h = 1.7636 \times 10^{-3} + \frac{-0.568 - \varphi}{0.176 \times 10^3} \quad (7)$$

通过对图 10 中不同频率曲线的观察, 发现各条曲线上都存在一段近似线性的曲线段, 当频率和材料热特性发生变化时, 该线性阶段的位置会发生变化, 但是线性段位置的变化与涂层材料的热扩散长度 μ_1 有关, 即当涂层的厚度在 μ_1 附近时, 厚度和相位满足近似线性关系。而且当涂层的厚度为 μ_1 时, 涂层表面温度变化的相位 φ_{μ_1} 为定值, 它与涂层和基体材料的热扩散长度有关。线性阶段的斜率也与涂层材料的热扩散长度有关。将公式(7)抽象为一般性公式:

$$h = \mu_1 + \frac{\varphi_{\mu_1} - \varphi}{\xi} \quad (8)$$

式中: $\mu = \sqrt{\frac{k}{\pi \rho c f}}$ 为材料的热扩散长度; μ_1 为涂层的热扩散长度; φ_{μ_1} 为涂层厚度等于 μ_1 时涂层表面温度变化曲线的相位; ξ 为线性阶段的斜率。

公式(8)给涂层的厚度测量提供了理论依据, 当已知某一涂层的大体厚度时, 比如说涂层厚度大体在 0.5×10^{-3} m 左右时, 在已知涂层和基体的热特征参数的情况下, 就可以令 $\mu = \sqrt{\frac{k}{\pi \rho c f}} = 0.5 \times 10^{-3}$, 求解得到调制频率 f , 在该调制频率下对涂层进行检测, 得到涂层表面的相位 φ , 将相位 φ 代入公式(8)中, 可以得到涂层的精确厚度。

5 结论

文中建立了涂层三维非稳态导热模型,运用大型 ANSYS 仿真软件对涂层模型的正弦调制加热过程进行仿真模拟,用数据拟合的方法求得相位,分析了涂层厚度、加载频率和相位的关系,得到的主要结论如下所述:

(1) 利用两次加载、减法处理的加载和处理方式,有效克服了常量部分和环境因素带来的影响,减少了计算量、和误差,同时该方法有效缩短了检测时间,不需要等到温度稳定振荡状态。而且得到的数据在使用数据拟合方法求相位时更加容易,精度更加高。

(2) 通过分析涂层厚度与相位的关系曲线,得出红外锁相法理论上可检测的涂层的最大厚度与涂层的热扩散长度 μ 有关,大约在 $1.5\sim 2\mu$ 之间。

(3) 改变热激励频率,得到不同频率下涂层厚度与相位的关系曲线,得出不同的加载频率适合检测的涂层厚度不同。高频加载,涂层厚度分辨率高,检测厚度薄,适合检测薄涂层;低频加载,涂层厚度分辨率低,检测厚度厚,适合检测厚涂层。

(4) 通过对涂层厚度与相位关系曲线进一步分析,发现涂层厚度在 μ 附近时,涂层厚度与相位满足近似线性关系,总结出了涂层厚度计算的有效公式,为锁相法涂层厚度的精确测量提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Numerical simulation and comparative study of infrared technology for nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2330-2335. (in Chinese)
- [2] Guo Xingwang, Vavilov V, Guo Guangping, et al. Modeling and image processing in infrared thermographic NDT of composite materials [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(4): 363-369. (in Chinese)
- [3] Busse G, Wu D, Busse W G, et al. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 71: 33962-3965.
- [4] Marinetti S, Robba D, Cernuschi F, et al. Thermographic inspection of TBC coated gas turbine blades discrimination between coating over-thicknesses and adhesion defeats [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 49(3): 281-285.
- [5] Zhang Jinyu, Xu Wei, Zhang Wei, et al. A novel compression algorithm for infrared thermal sequence based on K-means method [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 64(5): 18-25.
- [6] Zhang Jinyu, Meng Xiangbing, Xu Wei, et al. Research on the compression algorithm of the infrared thermal image sequence based on differential evolution and double Exponential Decay Model [J]. *The Scientific World Journal*, 2014,(10):601506.(in Chinese)
- [7] Guo Xingwang, Ding Mengmeng. Simulation of thermal NDT of thickness and its unevenness of thermal barrier coating[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 198-203. (in Chinese)
- [8] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Numerical simulation of lock-in thermography for infrared nondestructive testing[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 119-122. (in Chinese)
- [9] Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with sequence processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 346-351. (in Chinese)
- [10] Liu Junyan, Dai Jingmin, Wang Yang. Thermal wave detection and defect depth measurement based on lock-in thermography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 37-44. (in Chinese)
- [11] Feng Lichun, Tao Ning, Xu Chuan. Lock-in thermography and its application in nondestructive evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1121-1123. (in Chinese)
- [12] Guo Xingwang, Li Ransheng, Ding Mengmeng. Simulating modulated thermography of cladding debond in solid rockets [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(2): 10-12. (in Chinese)
- [13] Sargent J P, Almond D P, Gathercole N. Thermal wave measurement of wet paint film thickness [J]. *Journal of Material Science*, 2006, 41(2): 333-339.
- [14] Bento A C, Brown S R, Almond D P, et al. Thermal wave nondestructive thickness measurement of hydroxyapatite coating applied to prosthetic hip stems [J]. *Journal of Materials Science: Material in Medicine*, 1995, 6(6): 335-339.
- [15] Patel P M, Almond D P. Thermal wave testing of plasma-sprayed coatings and a comparison of the effects of coating microstructure on the propagation of thermal and ultrasonic waves[J]. *Journal of Material Science*, 1985, 20(3): 955-966.