

基于小波分解的热波相位特征提取及喷涂层厚度评价

郭 伟,董丽虹,王海斗,徐雅薇,徐滨士

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室,北京 100072)

摘 要: 针对热障涂层制备过程中的厚度评估问题,通过数值模拟手段研究了光脉冲激励下制备在镍基高温合金上不同厚度的 NiCrAlY 涂层表面热波瞬态响应规律;在此基础上分析了表面热波相位特征随涂层厚度的变化规律,结果表明特定频率范围的热波相位特征与涂层厚度具有近似线性对应关系,但不同涂层厚度之间的相位差绝对值较小,不利于厚度定量评价;为提高不同厚度涂层之间的热波相位差,提出采用小波分解第二层细节系数对涂层表面热波进行重构,重构热波相位差比原始热波提高了约 500 倍,有利于提高涂层厚度评价的准确率;最后采用试验手段验证了模拟结果的准确性。

关键词: 热障涂层; 厚度; 红外热波检测; 相位特征; 小波分解

中图分类号: TG115.28;V250.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0904003

Phase spectra extract of thermal wave with wavelet decomposition and coating thickness estimation

Guo Wei, Dong Lihong, Wang Haidou, Xu Yawei, Xu Binshi

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the thickness estimating problem of thermal barrier coatings during preparation, the transient thermal response spectrum of NiCrAlY coating on nickel-based superalloy was researched through numerical simulation method. Further more, the phase spectra of original thermal waves with different coating thickness was analysed, which suggested that the phase value and coating thickness comply with linear relationship in a special range of frequency. But the absolute phase D-value is too little to evaluate coating thickness in engineering application. So a method of wavelet decomposition was proposed to increase the phase D-value between different coating thickness, the 2nd level details coefficient was employed for thermal wave reconstruction, and the phase D-value of reconstructed thermal wave increase about more than 500 times, which is extremely conducive to raise the accuracy rate in coating thickness estimation. At last, the analog result was confirmed by experimental test.

Key words: thermal barrier coating; thickness; infrared thermal wave detection; phase spectra; wavelet decomposition

收稿日期:2017-01-16; 修订日期:2017-02-27

基金项目:国家自然科学基金(51675532,51535011)

作者简介:郭伟(1988-),男,博士生,主要从事红外热波检测方面的研究。Email: gwhy@163.com

通讯作者:董丽虹(1972-),女,副研究员,博士,主要从事无损检测与寿命评估方面的研究。Email: lihong.dong@126.com

0 引言

热喷涂涂层广泛应用于工程结构和装备零件表面防护领域,如高温涡轮叶片表面的热障涂层、轴类零件表面的耐磨涂层、舰船和潜艇表面的防腐涂层等,这些涂层发挥着防腐、耐磨、隔热等作用,延长了结构和零件的使用寿命。涂层厚度是热喷涂涂层的重要性能参数,厚度的变化对涂层功能发挥和界面结合强度均有直接影响。如航空发动机涡轮叶片表面热障涂层的厚度直接影响其隔热效果,涂层厚度不足会导致其隔热能力不够而使叶片合金基体承受过高温度而断裂,涂层太厚又会由于内应力增大而导致界面结合强度降低^[1]。因此,在涂层制备过程中对厚度和厚度均匀性的控制十分重要。

目前较为成熟的涂层无损测厚技术根据其原理可分为磁性测厚、涡流测厚、超声波测厚和微波测厚等。然而这些测厚方法受技术原理限制具有材料选择性,磁性测厚法适用于导磁基体上非导磁涂层测厚;涡流法适用于导电基体上非导电涂层测厚;超声和微波方法对于具有多孔结构的热喷涂层不适用^[2-4]。在国内航空发动机叶片生产和维修工厂,生产过程中仍然采取目视检查和经验判断方法,结合破坏性抽查切割检测手段对热障涂层厚度和厚度均匀性进行控制,缺乏一种有效的无损检测手段进行涂层厚度检测和厚度均匀性评价。

红外热波检测技术是一种新型无损检测技术,该技术基于热传导与热辐射原理对材料质量与表层缺陷进行评估,与上述几种测厚方法相比,红外热波检测技术具有非接触、高效率、可大面积检测等特点^[5]。近年来国内外研究者对该技术在涂层厚度检测和厚度均匀性评价方面进行了研究,针对涂层的定量测厚问题,参考文献[6]和[7]通过材料表面温度分布情况,对涂层厚度与表面热波时域特征参数之间的定量关系进行了研究,以此来探索涂层测厚的方法;参考文献[8-10]通过对一定时间内序列热图的处理,提取材料表面热波变化的频域相位信息,建立热波相位信息与涂层厚度的对应关系实现涂层厚度评价。比较而言,通过热波的时域信息表征涂层厚度,受加热不均和表面状态影响较大,厚度评价可靠性较低;而热波的相位特征不易受上述检测

因素的干扰,因此检测精度较高,采用相位特征进行厚度表征的关键在于相位特征与涂层厚度对应关系的准确建立。

文中紧贴实际工程中热障涂层制备时遇到的涂层厚度评估问题,基于 Ansys 数值模拟平台,分析了光脉冲激励过程中,热障涂层表面热波的响应过程,以及热波相位特征随涂层厚度的变化规律;重点针对原始热波相位差较小,不利于涂层厚度定量评价的缺点,提出了通过小波分解和热波重构,提高不同厚度涂层之间热波相位差的方法,并通过试验手段对模拟研究结果进行了验证,以期推动红外热波检测技术在喷涂层厚度评价方面的应用。

1 基本原理与模型建立

1.1 三维瞬态热传导基本原理

红外热波检测过程是一个瞬态导热过程,其温度场分布随时间变化,要求解各个时间点的瞬态温度场(transient temperature field),根据傅里叶导热定律,笛卡尔坐标系下三维瞬态导热微分方程为^[11]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \Phi \quad (1)$$

式中: t 、 λ 、 ρ 、 c 、 Φ 、 τ 分别为材料温度、材料的导热率、密度、比热容、单位体积内热源生成热(单位 W/m^3)、时间。在红外热像无损检测问题中由于材料温升很小,一般小于 $10\text{ }^\circ\text{C}$,因此材料导热系数可看成常数,对于常物性、无内热源的情况上述三维导热微分方程可简化为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式中: $a=\lambda/\rho c$,即热扩散率。求解导热问题就是对导热微分方程在规定的定解条件下的积分求解,瞬态温度场同时是空间域和时间域的函数。因此,对于空间域采用有限单元分割方法结合插值计算来确定任意位置的温度;对于时间域,采用有限差分网格离散,和数值积分法计算每一时间步的离散节点温度,ansys 中默认使用向后欧拉方程进行时间积分^[12],即:

$$t^{p+1} = t^p + \Delta \tau \cdot \dot{t}^{p+1} \quad (3)$$

式中: p 为时间步; $\Delta \tau$ 为时间步长; \dot{t} 为节点温度对时间的导数,即 $\dot{t}=\partial t/\partial \tau$ 。将公式(3)代入公式(2)可

以求出模型中任意节点在某一时刻的温度值,通过插值即可得到三维实体在任意时刻的温度场分布。

1.2 涂层结构模型建立

所构建模型的基体材料为镍基高温合金,涂层材料为涡轮叶片热障涂层粘结层常用合金 NiCrAlY,两种材料的热物性参数如表 1 所示。数值模拟的原则是在尽可能考虑所有影响因素的基础上采用简单模型进行计算,提高模拟计算的准确度。对于均匀涂层的厚度测量问题,其任意截面的横向热传导是双向对等的,因此可以简化为一维模型进行计算^[13];而非均匀涂层厚度测量则不可以简化为一维模型,因为沿厚度梯度方向涂层内部截面的横向传热量非双向对等。因此,文中建立三维模型,采用 solid90 二十节点六面体三维实体单元,该单元多节点的特点可以提高后处理时对模型特定位置(尤其是非节点位置)温度分析的精确度^[14]。为了使模型更加接近工程实际中涂层厚度不均的真实情况,对涂层导热规律进行更准确模拟,所建立涂层模型厚度在空间中逐渐变化,而非阶梯式梯度变化。如图 1 所示,模型长宽尺寸为 100 mm×50 mm,基体厚度设置为 3 mm,模型中涂层厚度由左至右沿模型长度方向从 0~100 μm 呈斜坡式线性增加,在模拟计算过程中采取由粗到细的网格划分方式进行网格优化,最终模型划分有限单元后,模型中单元数量为 2 925 个,节点数 13 632 个。

表 1 材料热物性参数

Tab.1 Thermal properties of materials

	$\lambda/W \cdot m^{-1} \cdot K$	c /J·kg ⁻¹ ·K	ρ /kg·m ⁻³
Coating	4.3	500	7 320
Substrate	9.5	440	8 300

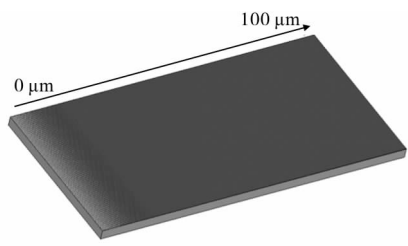


图 1 数值计算模型

Fig.1 Model for numerical calculation

2 脉冲激励下表面热波瞬态响应过程

2.1 边界条件与加载过程

边界条件:初始系统温度和环境温度均设置为 20℃,总模拟时间为 0.4 s,实体四个侧面设置为隔热面,整个过程中环境温度保持 20℃不变。加载过程分两个载荷步:0~0.02 s 时间段为第一载荷步,时间步长 0.000 1 s,涂层表面输入热流密度载荷代表热灯激励源,热流密度 $q=10^5 W/m^2$,基体下表面与空气对流换热系数 $h=10 W/(m^2 \cdot K^{-1})$;0.02~0.4 s 时间段为第二载荷步,时间步长 0.001 s,表面热流密度被对流空气载荷代替,下表面依然为空气对流载荷,换热系数均为 $h=10 W/(m^2 \cdot K^{-1})$ 。

2.2 表面热波瞬态响应过程

实际检测中,红外热像仪只能采集涂层表面热图,最终检测结果的分析要在表面热图的基础上进行,因此对涂层表面热波瞬态响应过程的分析是进行检测参数优化和特征参数提取的前提。

图 2 展示了 0.02 s 时刻涂层表面温度分布情况,由图可见随着涂层厚度增加,表面温度程升高趋势。在涂层表面沿厚度增加方向画一条直线 a ,沿直线 a 涂层厚度从 0 增加到 100 μm。在直线上等距离取 A、B、C、D、E、F 六个点,六个点处涂层厚度分别为 0、20、40、60、80、100 μm。图 3 展示了 0~0.4 s 时间内这六个位置表面温度的变化过程,由图可见所有位置表面温度变化规律相同,在激励施加过程中(0.02 s 之前)表面温度迅速升高,激励结束后表面温度迅速下降,大约 0.2 s 后六个位置的表面温度已经降到约 20.5℃,且由于热扩散作用,降温过程中不同位置的表面温度差异逐渐减小。

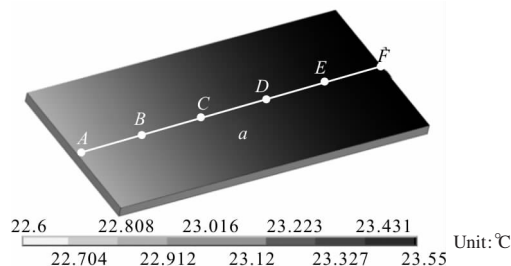


图 2 0.02 s 时刻涂层表面温度分布

Fig.2 Temperature distribution on coating surface at 0.02 s

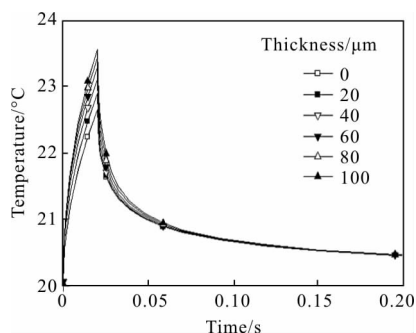


图 3 不同厚度涂层表面温度变化过程

Fig.3 Surface temperature change process of coatings with different thickness

3 热波相位特征与涂层厚度的关系

3.1 涂层表面热波相位特征

在热波信号频域幅值与相位特征的提取中,最常用的方法是离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT)。一维热波信号的离散傅里叶变换公式如下:

$$F(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} T(n) e^{-i2\pi n f / N} = R(f) + iI(f) \quad (4)$$

式中: N 是热波信号 $F(t)$ 的采样数; $R(f)$ 和 $I(f)$ 分别是热波信号 $F(t)$ 变换后的实部和虚部, 由实部和虚部进一步计算热波相位的公式为:

$$\varphi(f) = \arctan \left[\frac{I(f)}{R(f)} \right] \quad (5)$$

分别对 A、B、C、D、E、F 六个点表面热波进行 FFT 变换, 获得六个点处热波相位频谱曲线, 如图 4 所示。图中可见, 在 45 Hz 频率附近, 六个点的相频曲线近似等间隔分布, 即热波相位与涂层厚度之间呈线性关系。然而, 不同涂层厚度之间的相位差绝对

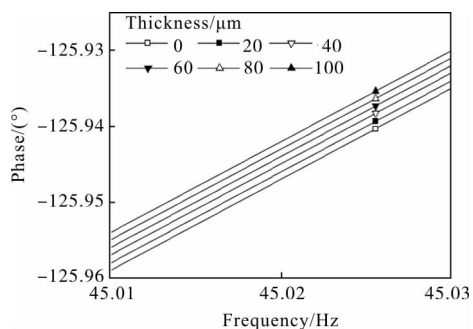


图 4 不同厚度涂层表面的原始热波相位特征

Fig.4 Phase spectra of original thermal waves with different coating thickness

值较小, 20 μm 厚度差对应的相位差绝对值大约为 0.001°, 加之实际检测中表面热波易受环境因素的干扰, 不同厚度之间的相位差可能被热波噪声覆盖而无法进行涂层厚度评估。因此, 需要进一步对热波数据进行处理, 放大不同涂层厚度之间的相位差。

3.2 小波分解后重构热波的相位频谱特征

小波分解算法可以对信号的低频和高温部分进行分离, 从而获得信号任意频段分量进行分析, 一维热波信号的小波分解公式如下:

$$WD_{k-1} = \sum_{k=0}^{k-1} x[2n-k]g[k] + \sum_{k=0}^{k-1} x[2n-k]h[k] \quad (6)$$

式中: x 是原始热波; k 是小波分解层数; $g[k]$ 是第 k 层分解的近似系数, 反映了热波的低频分量; $h[k]$ 是第 k 层分解的细节系数, 反映了热波的高频分量。

对上述六个点的表面热波进行小波分解, 提取第二层小波细节系数对各点的热波曲线进行重构, 对重构后的热波曲线进行 FFT 变换并提取其相位频谱曲线, 结果表明, 在 45±20 Hz 频段六条相频曲线分布规律性最好, 为近似等间距分布, 如图 5 所示。由图可见, 重构后不同涂层厚度之间的相位差明显增大, 20 μm 厚度差对应的相位差绝对值约为 0.5°, 比原始热波相位差升高约 500 倍, 且相位与厚度之间仍然呈线性关系(如图 6 所示)。这是由于通过小波分解, 分离了原始热波中差异较小的低频部分, 而选择了差异较大的高频部分对热波进行重构, 因此在重构热波中不同涂层厚度之间的热波相位差更加显著。

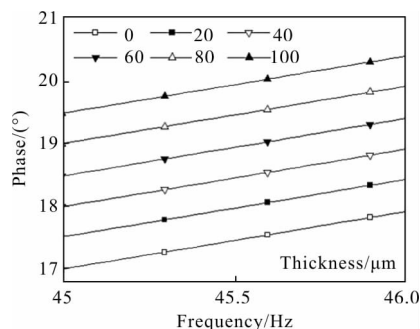


图 5 不同厚度涂层表面的重构热波相位特征

Fig.5 Phase spectra of reconstructed thermal waves with different coating thickness

由频率为 45 Hz 的热波分量相位绝对值与涂层厚度拟合可以获得涂层厚度与热波相位的对应关系

曲线,如图 6 所示,两者呈近似线性关系,由该曲线可对 0~100 μm 范围内的涂层厚度进行定量评估。

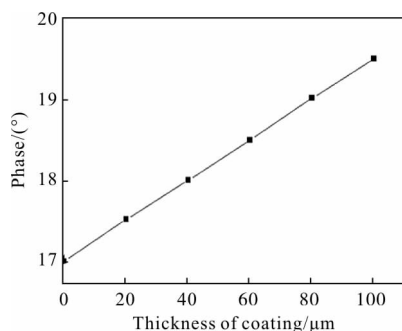


图 6 涂层厚度与热波相位值对应关系

Fig.6 Phase value of thermal wave vs coating thickness

4 试验结果分析

为了验证上述模拟分析结果,采用等离子喷涂方法,在 3 mm 厚的镍基高温合金板表面制备 NiCrAlY 涂层,通过设计喷涂路径和喷涂次数,在平板试样表面获得近似梯度厚度分布的非均匀涂层,厚度约在 0~400 μm 之间。之后采用脉冲红外热像技术,使用两个大功率脉冲闪光灯对涂层表面进行激励,每个热灯单次脉冲能量为 8 kJ,闪光时间 2 ms,使用 NEC R300 型红外热像仪采集整个过程中的序列热图,采集时间 6 s,采集频率 100 Hz。在整个激励和降温过程中,涂层表面原始热图变化较小,通过原始热图(如图 7 所示)几乎无法分辨不同厚度的涂层区域。



图 7 涂层表面原始热像图(0.2 s 时刻)

Fig.7 Original thermal image of coating surface at 0.2 s

因为通过原始热图中的温度差无法反应不同厚度涂层的区别,为了提取不同厚度涂层的相位差,在涂层表面沿涂层厚度梯度方向随机截取等距离的十个点,如图 7 所示。提取检测过程中十个点处的温度变化数据,采用三次多项式拟合法进行拟合去噪;

之后采用小波分解第二层细节系数对每点的热波曲线进行重构;对重构热波曲线进行 DFT 变换,获得对应的相位曲线,十条相位曲线在 45 Hz 附近分布关系如图 8 所示。采用线切割方法对试样中上述十个点对应的位置进行纵向切割,露出涂层横截面,在扫描电镜下测量十个点处的涂层实际厚度,所获得结果标示于图 8 对应曲线。

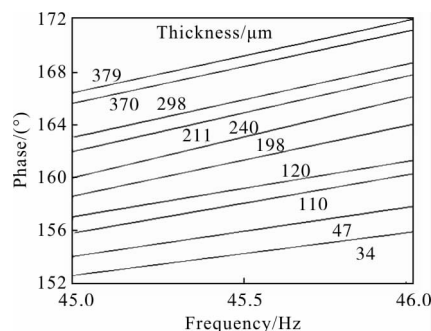


图 8 不同厚度涂层表面的重构热波相位特征

Fig.8 Phase spectra of reconstructed thermal waves with different coating thickness

取 45 Hz 频率分量对应的相位数据和涂层厚度数据,进行线性拟合获得涂层厚度与热波相位之间的线性对应关系,结果如图 9 所示,从拟合曲线上截取 A、B 两点,其相位差为 6° ,厚度差约为 220 μm ,计算可得,每 0.5° 相位差对应 18.3 μm 涂层厚度差。与模拟结果(每 0.5° 相位差对应 20 μm 涂层厚度差)之间的相对误差约为 8.5%,分析认为这是由于实际检测过程中,检测环境、仪器设备和数据处理手段的综合误差导致的。

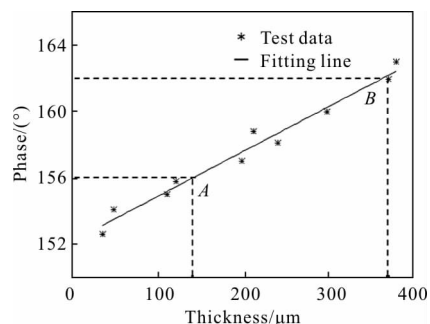


图 9 涂层厚度与热波相位线性拟合结果

Fig.9 Linear fitting of phase value of thermal wave and coating thickness

采用上述方法,对原始序列热图表面所有像素点的热波曲线进行小波分解并重构,将重构热波进

行 DFT 变换后提取 45 Hz 频率分量的相位值,进而重构试样表面热图,重构结果如图 10 所示。与原始热图相比,该相位图中不同厚度的涂层表面灰度值差异明显增大,这表明小波分解后采用重构热波相位对涂层厚度进行表征的方法是可行的。

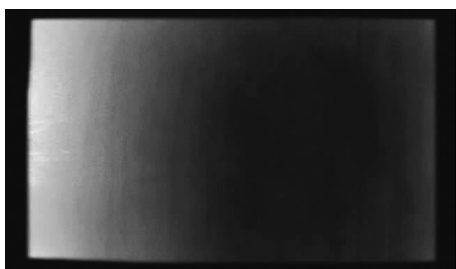


图 10 重构涂层表面相位热图

Fig.10 Reconstructed phase thermal image of coating surface

综合上述分析,相位分析和热图重构结果均证明,小波分解后重构热波的相位信息与涂层厚度具有近似线性对应关系,可以采用该参量对涂层厚度进行表征。然而,其定量表征精度仍然有待进一步提高,针对这一问题,后续研究计划从减小检测系统误差和提高数据处理精度两个方面进行。

5 结 论

针对航空发动机叶片表面热障涂层制备过程中面临的涂层厚度检测和评估难题,采用数值模拟和试验手段研究了光脉冲激励下,基于涂层表面热波相位对涂层厚度进行表征的方法,主要结论如下:

(1) 激励能量从涂层表面输入后,涂层表面不同位置的热波响应过程不同,其热波瞬态响应特征与涂层厚度有关。对不同厚度涂层表面热波相位特征的分析表明,在 45 Hz 频率附近,涂层厚度与热波相位呈线性关系,但不同涂层厚度对应的热波相位差较小,20 μm 厚度差对应的相位差绝对值大约为 0.001° ,这一相位差在实际检测中易受噪声干扰,会降低涂层厚度表征的准确性。

(2) 对原始热波进行小波分解,提取第二层细节系数对热波进行重构,重构热波的相位值在 45 Hz 频率附近与涂层厚度仍然呈线性关系,且不同涂层厚度对应的相位差比原始热波提高了约 500 倍。这一处理过程可以显著提高不同厚度涂层之间的相位差,从而提高涂层厚度评价的准确性。

(3) 试验结果证实了模拟计算的有效性,以及小波分解后重构热波相位特征表征涂层厚度的可行性。但由于实际检测过程中系统误差和数据处理误差的存在,导致该参数在涂层厚度定量表征方面误差仍然较大,因此下一步研究需继续优化热波去噪算法,在去除噪声的同时减小数据处理算法带来的误差。

参考文献:

- [1] Zhou Guodong, Chen Shuhai, Huang Jihua, et al. Effect of thermal conduction on thermal insulation of double-ceramic-layer thermal barrier coatings [J]. *Material Science & Technology*, 2012, 20(2): 1-6. (in Chinese)
周国栋, 陈树海, 黄继华, 等. 热传导对双陶瓷热障涂层隔热效果影响研究[J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20(2): 1-6.
- [2] Li Yong, Chen Zhenmao, Mao Ying, et al. Quantitative evaluation of thermal barrier coating based on eddy current technique[J]. *NDT&E International*, 2012, 50: 29-35.
- [3] Sayar M, Seo D, Ogawa K. Non-destructive microwave detection of layer thickness in degraded thermal barrier coatings using K- and W-band frequency range[J]. *NDT&E International*, 2009, 42: 398-403.
- [4] He Cunfu, Yang Yu'e, Wu Bin. Experimental study on thickness detection of thermal barrier coatings using microwave [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(11): 2590-2595. (in Chinese)
何存富, 杨玉娥, 吴斌. 反射系数法微波检测热障涂层厚度的实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32 (11): 2590-2595.
- [5] Tang Qingju. Research on the key technology of SiC coating defects detection using pulsed infrared thermal wave non-destructive testing method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
唐庆菊. SiC 涂层缺陷的脉冲红外热波无损检测关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] Stotter B, Gresslehner K H, Mayr G, et al. Estimation of material parameters from pulse thermography data [C]//AIP Conference Proceedings, 2014, 1581: 1126-1133.
- [7] Guo Xingwang, Ding Mengmeng. Simulation of thermal NDT of thickness and its unevenness of thermal barrier coatings[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2010, 31(1): 198-203. (in Chinese)
郭兴旺, 丁蒙蒙. 热障涂层厚度及厚度不均热无损检测的

- 数值模拟[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 198-203.
- [8] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse phase technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 2050-2056. (in Chinese)
陈林, 杨立, 范春利, 等. 基于相位的热障涂层厚度及其脱粘缺陷红外定量识别 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 2050-2056.
- [9] Vitali L, Fustinon D, Gramazio P, et al. Estimation of trial parameters for pulse phase thermography with low power heat sources[J]. *Journal of Physics, Conferece Series*, 2014, 501: 012008.
- [10] Yu Jiajie, Wu Naiming, Zeng Zhi, et al. FRP depth measurement based on pulsed phase thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (7): 1894-1896. (in Chinese)
俞嘉捷, 伍耐明, 曾智, 等. 基于红外脉冲相位热成像技术的玻璃钢深度测量 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1894-1896.
- [11] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 41-44. (in Chinese)
杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 41-44.
- [12] Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 322-324. (in Chinese)
Moaveni S. 有限元分析: ANSYS 理论与应用[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 322-324.
- [13] Li Yanhong, Zhao Yuejin, Zhang Cunlin. Infrared testing for translucent material coating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1502-1506. (in Chinese)
李艳红, 赵跃进, 张存林. 半透明材料涂层的红外检测[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1502-1506.
- [14] Huang Houcheng, Wang Qiuliang. Heat Transfer Finite Element Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2011: 23-25. (in Chinese)
黄厚诚, 王秋良. 热传导问题的有限元分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 23-25.