

基于相位的热障涂层厚度及其脱粘缺陷红外定量识别

陈 林, 杨 立, 范春利, 石宏臣, 赵小龙

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 为了促进热障涂层红外无损检测的定量检测研究, 建立了轴对称圆柱坐标下的热障涂层脉冲相位检测模型, 针对研究模型, 采用有限体积法求解出脉冲热激励下的温度场, 将温度进行 FFT 变化得到相位分布, 分析了不同因素对检测表面相位差分布的影响。在此基础上, 采用 LM 算法研究了轴对称圆柱坐标下对热障涂层厚度的大小和脱粘缺陷的位置进行量化检测的方法, 分析了不同因素对检测结果的影响。研究表明: 当不存在测温误差时, 不同的初始假设、采样窗口时间下都能得到很高的识别精度, 其对定量识别的影响不大, 当测温仅存在均匀误差时, 涂层厚度和脱粘缺陷位置识别精度都很高, 均匀误差对识别无影响, 识别结果的精度会随测温随机误差的增大而降低, 但在较大的随机误差下仍有较高的识别精度。

关键词: 热障涂层; 无损检测; 脱粘缺陷; 反演识别; 脉冲相位

中图分类号: TK38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2050-07

Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse phase technology

Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, Shi Hongchen, Zhao Xiaolong

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to promote quantitative detection of thermal barrier coating by pulse phase, the pulse phase nondestructive testing model of thermal barrier coating in axisymmetric cylindrical coordinates was established. Temperature field was solved by using a finite volume method in the heat pulse excitation. And the phase of the model was accepted by FFT. The impacts of different factors on the phase were analysed. Based on this, quantitative detection of coating thickness and position of the bonding defect of thermal barrier coating were researched in axisymmetric cylindrical coordinates by using the method of LM. The impacts of different factors on quantitative detection were analysed. The research results show that the recognition accuracy of results are high in different initial assumption and different modulation time when there is no measurement error, the effect of initial assumption and modulation time on quantitative recognition is little, the recognition accuracy of results are high in different uniform temperature measurement error, uniform temperature error would not change the result of recognition, the accuracy of the identification results would decrease with the increase of the random temperature error,

收稿日期: 2014-11-11; 修订日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(50906099, 51479203)

作者简介: 陈林(1986-), 男, 博士生, 主要从事定量红外缺陷检测方面的研究。Email: chenlinhonghu@163.com

导师简介: 杨立(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事传热传质热流体学应用及量测方面的研究。Email: lyang39@hotmail.com

but there is still a high recognition accuracy under large random temperature error, the effectiveness of the quantitative identification method was proved.

Key words: thermal barrier coating; non-destructive testing; bonding defect; inversion identification; pulse phase

0 引言

热障涂层(Thermal Barrier Coating, TBC)已广泛应用于各种燃气轮机和柴油机上^[1],其常见结构由陶瓷层、粘结层和耐高温基体构成,其中陶瓷层是机械或部件正常工作的保证,而脱粘缺陷是热障涂层常见的缺陷之一,因此对涂层厚度及其脱粘缺陷的检测具有重要的现实价值,对于此类问题,红外无损检测相对于微波检测^[2]、超声检测^[3]等方法具有不接触、适应大面积检测等优点。参考文献[4]研究了涂层缺陷的红外检测方法,参考文献[5]对涂层厚度的检测方法进行了研究,参考文献[6-7]通过数值模拟的方法对热障涂层红外热无损检测的建模和热障涂层厚度不均的热无损检测进行了研究,参考文献[4-7]的研究都只是基于表面温度,且研究还都处于定性阶段,远不能满足工程应用的需要,而脉冲相位检测作为一种新的红外检测方法,相比于表面温度法,具有对表面发射率变化和加热不均不敏感、抗反射干扰强等优点^[8-9],然而现有文献大都是在二维导热下对脉冲相位检测进行研究的,而二维导热的简化处理往往会带来较大的检测误差,所以参考文献[10-11]在确定真实的缺陷时都要通过曲线拟合的方法对结果进行修正,而这种拟合修正得到的结果属于一种半经验的方法,有时误差很大,并且不同的检测材料需要分别进行拟合。现有的脉冲相位检测法在缺陷定量识别时需要准确确定峰值频率和“盲频”,但在脉冲相位检测中,频率是一些离散的值,有时可能因频率的细化程度不足而无法准确确定峰值频率和“盲频”,从而难以准确定量识别缺陷,因而参考文献[12-13]提出了对频率进行细化的不同方法,然而这种细化后的频率值仍然是一些有限的离散值。因此,研究基于相位的热障涂层定量检测对于提高检测精度及脉冲相位检测的应用范围具有重要意义。

文中主要研究热障涂层厚度及其脱粘缺陷的定量识别。针对所研究的问题建立了一个热障涂层红

外无损检测模型,采用有限体积法对所建立的模型进行数值模拟,得到研究模型表面温度场,将得到的温度进行FFT变换,从而得到相位,分析表面热流强度、涂层厚度、缺陷宽度以及调制窗口时间对相位差的影响,在此基础上,将相位作为定量检测的依据,通过LM反演算法实现对热障涂层厚度及其脱粘缺陷位置的定量识别,分析了不同因素对检测结果的影响。

1 红外检测正问题模型

如图1所示,文中研究问题为轴对称圆柱坐标下的热障涂层检测。模拟试件的半径总长为 $L_r=20\text{ mm}$,陶瓷层厚度为 L_y ,参数 L_y 决定缺陷的深度,粘结层的厚度为 $L_d=0.1\text{ mm}$,耐高温金属合金基体的厚度为 $L_s=2\text{ mm}$,在粘结层中有圆弧状的脱粘缺陷(其间充满空气),缺陷厚度与粘结层厚度相同,为 $L_d=0.1\text{ mm}$,缺陷左侧距圆柱体中心距离为 L_{r1} ,缺陷右侧距圆柱体边界距离为 L_{r2} ,参数 L_{r1} 和 L_{r2} 决定缺陷的位置大小。模型的加热面与周围空气的换热系数为 α ,为简化分析,模型侧面 $L_r=20\text{ mm}$ 处为绝热,非加热面考虑为绝热化处理,也视为绝热,假设物体是均匀的,各向同性,则轴对称圆柱坐标下瞬态导热偏微分方程为:

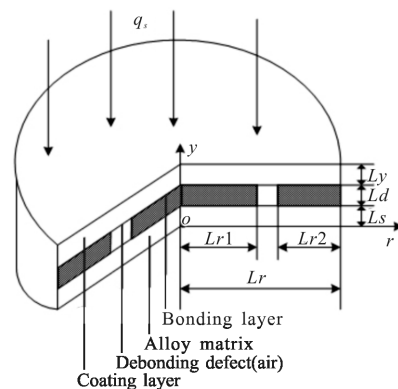


图1 TBC脱粘缺陷红外检测模型

Fig.1 Nondestructive testing model of TBC by infrared technology

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T(r,y,t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T(r,y,t)}{\partial y} \right) = \rho c \frac{\partial T(r,y,t)}{\partial t} \quad (1)$$

初始条件:

$$T|_{r=0}=20\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

边界条件:

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}|_{y=(L_s+L_d+L_y)}=\alpha_y q_s+\alpha(T_f-T) \quad (3)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=L_r,0}=0 \quad (4)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}|_{y=0}=0 \quad (5)$$

式中: T 为试件内各离散点的温度, $^{\circ}\text{C}$; k 为试件的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为密度, kg/m^3 ; c 为比热容, $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ (各材料的物性参数如表 1 所示); T_f 为环境温度取为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_y=0.9$ 为试件表面对热量的吸收系数; $\alpha=10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 为表面换热系数; 在 $t=0\sim 0.1\text{ s}$ 时, 热流强度 $q_s=10^6\text{ W}/\text{m}^2$, 在 $t>0.1\text{ s}$ 时, $q_s=0$ 。如无特殊说明, 文中参数值都如上所述。

表 1 不同材料的物性参数

Tab.1 Thermal properties of different materials

Material	Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Specific heat/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
Coating layer	6 037	500	1.5
Bonding layer	7 320	450	4.3
Alloy matrix	8 300	440	9.5
Air	1.2	1 005	0.025 7

2 基于脉冲相位的反演识别法

2.1 Levenberg-Marquardt 反演算法

Levenberg-Marquardt 反演优化算法通常是对目标函数 $S(P)$ 进行最小化求解^[14-15]:

$$S(P)=[Y-\Phi(P)]^T\cdot[Y-\Phi(P)]=\sum_{i=1}^m [Y_i-\Phi_i]^2 \quad (6)$$

式中: $P=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为待识别的参数向量, 对于文中的热障涂层厚度及其脱粘缺陷位置的定量识别, $P=(Lr1, Lr2, Ly)$; Y_i 为实际测温值 FFT 变换后得到的离散相位值; Φ_i 为理论计算温度值 FFT 变换后得到的相位值; m 为离散数值点。

LM 算法的收敛条件为目标函数 $S(P)$ 达到最小化, 即

$$S(P)<\varepsilon \quad (7)$$

式中: ε 为一个给定的极小的正数。

为求得目标函数 $S(P)$ 的最小值, 对公式(6)进行偏微分求导:

$$\nabla S(P)=2\left[-\frac{\partial\Phi^T(P)}{\partial P}\right][Y-\Phi(P)]=0 \quad (8)$$

将 Φ_i 通过泰勒级数展开并去掉高阶项, 再将衰减因数 μ^k 添加到计算结果中去, 从而得到 LM 算法的迭代公式:

$$\Delta P=P^{k+1}-P^k=[(J^k)^T J^k+\mu^k \Omega^k]^{-1}(J^k)^T [Y-\Phi(P^k)] \quad (9)$$

式中: $J^k=\left[\frac{\partial\Phi^T(P^k)}{\partial P^k}\right]^T$; $\Omega^k=\text{diag} [(J^k)^T J^k]$; k 为迭代次数; 衰减因数 μ^k 为调节系数。迭代开始时, 初始假设结果与真实值相差较大, 为提高迭代收敛速度, 取较大值, 随着迭代计算的进行, 其结果越来越接近真实值, μ^k 将逐渐减小直至得到精确的辨识结果。

2.2 迭代求解过程

(1) 给定一个脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的初始假设 P^0 , 将 P^0 作为输入条件带入迭代计算。

(2) 在识别参数向量 P^k 下求解方程(1)~(5)得到试件表面温度, 将表面温度进行 FFT 变换, 得到各个离散点的相位 $\Phi(P^k)(k=0, 1, 2, \dots)$ 。

(3) 求解目标函数 $S(P^k)$, 并判断其是否满足收敛条件(公式(7)), 如果满足收敛条件则停止迭代, 将其作为定量辨识结果, 否则依据公式(9)对参数 P^k 进行修正得到下次的识别参数 P^{k+1} , 并返回步骤(2)。

3 检测表面相位差变化规律及分析

3.1 不同热流强度对相位差的影响

保持缺陷左侧距圆柱体中心距离为 $Lr1=12\text{ mm}$, 缺陷右侧距圆柱体边界距离为 $Lr2=6\text{ mm}$, 陶瓷层的厚度 $Ly=0.3\text{ mm}$ 不变, 热流强度分别取为 10^6 、 2×10^6 、 $3\times 10^6\text{ W}/\text{m}^2$, 采样频率为 10 Hz (下同), 采样窗口时间(采样的时间总长)为 50 s (下同), 计算得到缺陷表面(取脱粘缺陷中心对应的检测表面)与非缺陷表面(取圆柱体中心)的相位差变化如图 2 所示。由图 2 可知, 随着热流强度的增加, 缺陷表面和非缺陷对应表面的相位差没有变化, 可见热流强度不影响缺陷表面和非缺陷对应表面间的相位差, 较小的热流强度就能准确识别缺陷的存在。

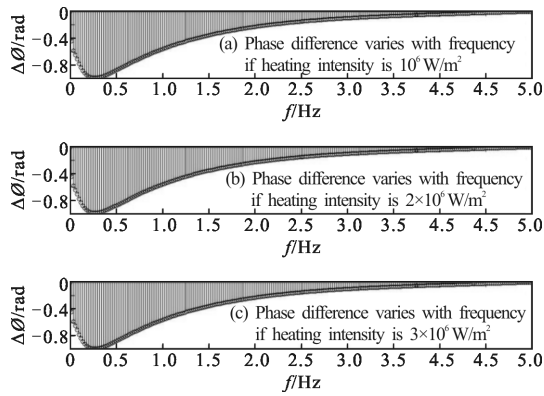


图 2 不同热流强度下的表面相位差

Fig.2 Surface temperature difference between the defect and the nondefect in different heat sources

3.2 不同陶瓷层厚度对表面相位差的影响

保持缺陷左侧距圆柱体中心距离为 $Lr1=12\text{ mm}$ ，缺陷右侧距圆柱体边界距离为 $Lr2=6\text{ mm}$ ，热流强度为 10^6 W/m^2 不变，陶瓷层的厚度 L_y 分别取为 0.2、0.3、0.4mm，计算得到相位差的变化如图 3 所示。由图 3 可知，随着陶瓷层厚度的增加，缺陷表面和非缺陷对应表面的相位差最大值(指绝对值)减小。

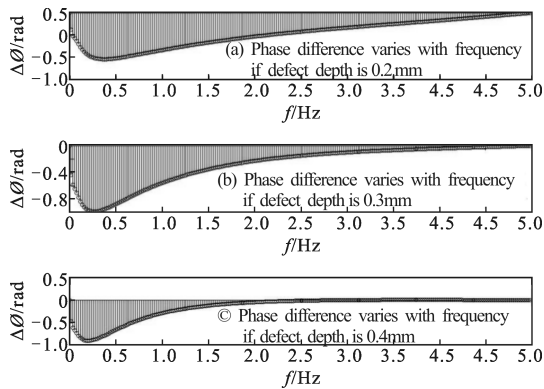


图 3 不同陶瓷层厚度下的表面相位差

Fig.3 Surface temperature difference between the defect and the nondefect in different coating thickness

3.3 不同缺陷宽度对表面相位差的影响

保持陶瓷层的厚度 $L_y=0.3\text{ mm}$ ，热流强度为 10^6 W/m^2 不变，缺陷侧距圆柱体中心距离 $Lr1$ 分别取为 12、12.4、12.8 mm，相对应的缺陷右侧距圆柱体边界距离 $Lr2$ 分别取为 6、6.4、6.8 mm，即缺陷的宽度分别为 2、1.2、0.4 mm，计算得到相位差的变化如图 4 所示。由图 4 可知，随着缺陷宽度的增加，缺陷

表面和非缺陷对应表面的相位差最大值(指绝对值)增大。

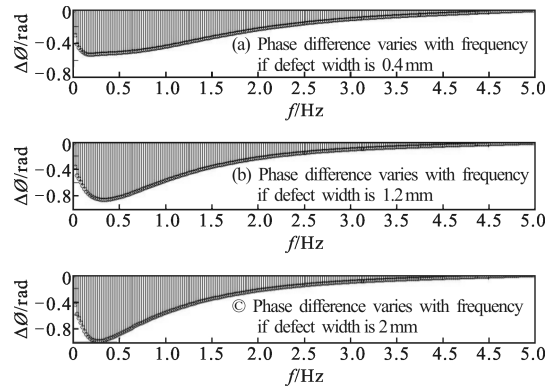


图 4 不同缺陷宽度下表面相位差

Fig.4 Surface phase difference between the defect and the nondefect in different defect width

3.3 不同窗口时间对表面相位差的影响

保持缺陷左侧距圆柱体中心距离为 $Lr1=12\text{ mm}$ ，缺陷右侧距圆柱体边界距离为 $Lr2=6\text{ mm}$ ，陶瓷层的厚度 $L_y=0.3\text{ mm}$ ，热流强度为 10^6 W/m^2 不变，采样频率为 10Hz，调制窗口时间分别选择 10s、30s 和 50s，计算得到相位差的变化如图 5 所示。由图 5 可知，选择的窗口时间越大，频率的细化程度越大，可见在传统的相位检测中，为了更好地区分出缺陷，应该延长采样窗口时间大小。

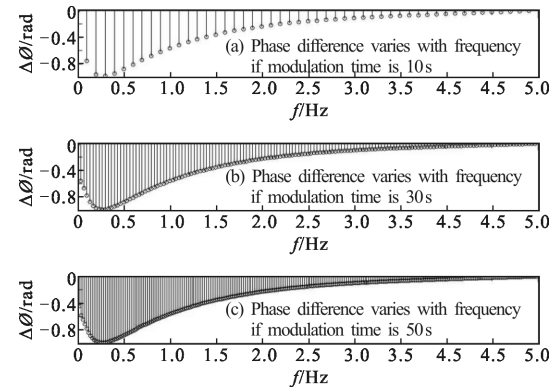


图 5 不同调制窗口时间下表面相位差

Fig.5 Surface phase difference between the defect and the nondefect in different modulation time

4 定量检测算例及分析

在进行热障涂层厚度及其脱粘缺陷的定量检测时，首先假定一组热障涂层厚度及其脱粘缺陷位置

值的真实值,由方程(1)~(5)计算得到表面的真实温度,将测量误差添加到真实值上,如公式(10)所示,以此值作为实际检测时试件表面测得的温度,对得到的温度进行 FFT 变化,得到表面的相位(反演识别时的相位值为角度值),以此作为定量识别的依据,然后假设一组热障涂层厚度及其脱粘缺陷位置值的初始值,通过迭代计算得到最终定量检测结果。

$$Y_i = Y_{i,\text{true}} + e + \omega\sigma \quad (10)$$

式中: Y_i 为在第*i*个离散点的测得温度; $Y_{i,\text{true}}$ 为计算得到的真实温度值; e 为均匀误差; σ 为偏差程度; ω 为-1.0~1.0内的随机数。

为了判断识别结果的准确性,定义如下形式的相对误差:

$$Er_i = \left| \frac{P_i^e - P_i}{P_i} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中: Er_i 为第*i*个参数的识别相对误差; P_i^e 为第*i*个参数的识别结果; P_i 为第*i*个参数的真实值。

在不考虑测温误差时,选择不同的窗口时间为 10、30、50 s,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的真实值为 $Lr1=12\text{ mm}$ 、 $Lr2=6\text{ mm}$ 、 $Ly=0.3\text{ mm}$,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的初始假设为 $Lr1=8\text{ mm}$ 、 $Lr2=10\text{ mm}$ 、 $Ly=0.5\text{ mm}$,其识别结果如表 2 所示。从表中可以看出,当不存在测温误差时,不同的窗口时间下都能准确地识别涂层厚度和脱粘缺陷位置,可见窗口时间的选取对定量识别的影响不大,而在传统脉冲相位检测中,在确定的采样频率下采样窗口大小决定着频率的细化程度,采样窗口大小对检测结果影响较大。

表 2 不同窗口时间下的检测结果

Tab.2 Identification results in different modulation time

Modulation time/s	Identification result /mm	Relative error: Er/%
10	12.000,6.000,0.300	3.8×10^{-4} , 5.6×10^{-4} , 2.6×10^{-4}
30	12.000,6.000,0.300	6.7×10^{-6} , 7.3×10^{-6} , 3.7×10^{-6}
50	12.000,6.000,0.300	8.3×10^{-5} , 1.3×10^{-5} , 4.7×10^{-5}

在不考虑测温误差时,选取不同初始假设值,采样窗口时间为 50 s,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的真实值为 $Lr1=12\text{ mm}$ 、 $Lr2=6\text{ mm}$ 、 $Ly=0.3\text{ mm}$,其识别

结果如表 3 所示。从表中可以看出,当不存在测温误差时,不同的初始假设下识别精度都很高,即不存在测温误差时,不同初始假设下都能准确地识别涂层厚度和脱粘缺陷位置,可见初始假设对检测结果的影响较小。

表 3 不同初始假设下的检测结果

Tab.3 Identification results in different initial guess

Initial guess /mm	Identification result /mm	Relative error: Er/%
5,2,0.1	12.000,6.000,0.300	1.2×10^{-4} , 2.1×10^{-4} , 7.4×10^{-4}
8,10,0.5	12.000,6.000,0.300	8.3×10^{-6} , 1.3×10^{-6} , 4.7×10^{-6}
17,1,0.4	12.000,6.000,0.300	5.3×10^{-5} , 9.2×10^{-5} , 4.3×10^{-5}

在不考虑测温误差时,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度在不同值下的识别结果如表 4 所示,识别时采样窗口时间为 50 s,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的初始假设为 $Lr1=8\text{ mm}$ 、 $Lr2=10\text{ mm}$ 、 $Ly=0.5\text{ mm}$ 。从表中可以看出,当不存在测温误差时,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度在不同值下的识别结果精度都很高,可见脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度在不同值下都能准确识别。

表 4 不同缺陷位置下的检测结果

Tab.4 Identification results in different position

Defect position /mm	Identification result /mm	Relative error: Er/%
12,6,0.3	12.000,6.000,0.300	8.3×10^{-5} , 1.3×10^{-5} , 4.7×10^{-5}
12.4,6.4,0.2	12.400,6.400,0.200	9.7×10^{-6} , 1.6×10^{-6} , 8.5×10^{-6}
12.8,6.8,0.4	12.800,6.800,0.400	2.2×10^{-4} , 1.0×10^{-4} , 4.1×10^{-4}

实际检测中会存在测温误差,依据公式(10)的误差模拟方法研究不同类型测温误差对检测情况,采样窗口时间为 50 s,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的初始假设分别为 $Lr1=8\text{ mm}$ 、 $Lr2=10\text{ mm}$ 、 $Ly=0.5\text{ mm}$ 。当只有存在均匀误差而无随机误差时,识别结果如表 5 所示。从表中可以看出,当仅存在均匀误差时,涂层厚度和脱粘缺陷位置识别精度都很高,不同的均匀误差不改变识别结果,可见均匀误差对基于相位的检测无影响。

表5 不同均匀误差下的检测结果

Tab.5 Identification results in distinct uniform temperature measurement error

Uniform error /°C	Identification result /mm	Relative error: Er/%
0	12.000,6.000,0.300	$8.3 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}, 4.7 \times 10^{-5}$
1	12.000,6.000,0.300	$8.3 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}, 4.7 \times 10^{-5}$
2	12.000,6.000,0.300	$8.3 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}, 4.7 \times 10^{-5}$

表6为只考虑随机误差而无均匀误差时的检测情况,采样窗口时间为50s,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度的初始假设分别为 $Lr1=8\text{ mm}$ 、 $Lr2=10\text{ mm}$ 、 $Ly=0.5\text{ mm}$ 。从表中可以看出,当不存在测温误差时,涂层厚度和脱粘缺陷位置识别精度都很高,随着测温随机误差的增大,识别结果的精度降低,即测温误差越小,越能准确识别涂层厚度和脱粘缺陷位置。

表6 不同随机误差下的检测结果

Tab.6 Identification results in distinct random temperature measurement error

σ	Identification result /mm	Relative error: Er/%
0	12.000,6.000,0.300	$8.3 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}, 4.7 \times 10^{-5}$
1	12.092,5.906,0.3006	0.76,1.67,0.3
2	11.856,6.212,0.3167	1.22,3.53,5.57

4 结论

文中利用有限体积法建立了轴对称圆柱坐标下的热障涂层脉冲相位检测模型,分析不同因素对表面相位差分布的影响,在此基础上采用LM算法对热障涂层厚度的大小和脱粘缺陷的位置进行了基于相位的定量化检测,分析了不同因素对检测结果的影响,得到的结论主要有:

(1) 相位差随着热流强度等增大而保持不变,热流强度的改变对相位差的分布无影响,相位差随着陶瓷层厚度的增加而减小,随着脱粘缺陷宽度的增加而增大。

(2) 当不存在测温误差时,在不同的初始假设、采样窗口时间下涂层厚度和脱粘缺陷位置参数都有

很高的识别精度,初始假设和采样窗口时间对定量识别的影响不大;当不存在测温误差时,脱粘缺陷位置和陶瓷层厚度在不同值下都能准确识别。

(3) 当仅存在均匀误差时,涂层厚度和脱粘缺陷位置识别精度都很高,不同的均匀误差不改变识别结果,可见均匀误差对基于相位的检测无影响。

(4) 当测温存在随机误差时,涂层厚度和脱粘缺陷位置参数的识别结果精度会随着测温随机误差的增大而降低,但在较大的测温误差下仍有较高的识别精度,表明了定量识别方法的有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Roge B, Fahr A, Giguere J S R, et al. Nondestructive measurement of porosity in thermal barrier coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2003, 12(4): 530-535.
- [4] Liu Huanan, Michiru Sakamoto, Kazushi Kishi, et al. Detection of defects in thermal barrier coatings by thermography analyses [J]. *Materials Transactions*, 2003, 44(9): 1845-1850.
- [5] Franke B, Sohn Y H, Chen X. Monitoring damage evolution in thermal barrier coatings with thermal wave imaging [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(5): 1292-1297.
- [6] Guo Xingwang, Ding Mengmeng. Modeling and finite element analysis of thermal barrier coatings in IR NDT [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(2): 174-178. (in Chinese)
- [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)
- [8] 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: Conference Series*, 2014, 501: 012008.
- [9] Stotter B, Gresslehner K H, Mayr G, et al. Estimation of

- material parameters from pulse phase thermography data[C]// AIP Conference Proceedings, 2014, 1581: 1126–1133.
- [10] Li Yanhong, Zhao Yuejin, Feng Lichun, et al. Measurement of defect depth by infrared thermal wave nondestructive evaluation based on pulsed phase [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 56–59. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] Ma Shuohan, Ma Qishuang. Pulse phase thermography chirp Z transform[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11): 1436–1438. (in Chinese)
- [13] Ma Shuohan, Ma Qishuang. Algorithm of infrared pulse phase thermography multiple modulation zoom spectrum inspection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2223–2226. (in Chinese)
- [14] Liu F B. A hybrid method for the inverse heat transfer of estimating fluid thermal conductivity and heat capacity [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50: 718–724.
- [15] Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. A quantitative identification technique for a two-dimensional subsurface defect based on surface temperature measurement [J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2009, 38(4): 223–233.