热障涂层红外热无损检测的建模和有限元分析

郭兴旺 丁蒙蒙

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：在柱坐标系下以轴对称模型描述热障涂层结构 TNDT(Thermal Non-Destructive Testing)的瞬态热传导，建立相应的物理模型.用有限元分析软件 ANSYS 计算热障涂层结构受热脉冲激励后的温度场，研究 TNDT 可检信息参数(如最大温差和最大对比度)与脱粘缺陷半径、深度、涂层厚度的关系.结果表明，在涂层厚度一定时，最大温差和最大对比度与脱粘缺陷半径成非线性关系，它们随着缺陷半径的增大而增加，且存在上限饱和值；在缺陷半径一定时，最大温差和最大对比度与涂层厚度成非线性关系，且随着涂层厚度的增加而减小.这些研究结果为热障涂层内部脱粘的红外热无损检测及表征提供了基本理论依据.

关 键 词：红外；无损检测；建模；有限元分析；热障涂层

中图分类号：TG 115.28

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)02-0174-05

Modeling and finite element analysis of thermal barrier coatings in IR NDT

Guo Xingwang Ding Mengmeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The transient heat conduction of TBC(thermal barrier coatings) structures in TNDT (thermal non-destructive testings) was described by an axisymmetrical model in a cylindrical coordinate, and the corresponding physical model was constructed. The temperature field of TBC structures stimulated by a heating pulse was analyzed by using the FEA(finite element analysis) software ANSYS, and the relations between information parameters(such as maximum differential temperature and maximum contrast) and defect parameters(such as defect radius, depth, coating thickness and thickness difference) were studied. The results show that, at a fixed coating thickness, the maximum differential temperature and maximum contrast are a nonlinear function of the defect radius respectively and increase with the defect radius, and their saturation value exist. At a fixed defect radius, the maximum differential temperature and maximum contrast are a nonlinear function of the coating thickness respectively, and decrease when the coating thickness increasing. These results provide a theoretical support for the detection and characterization of delamination in TBC structures by infrared thermography.

Key words: infrared; nondestructive testing; modeling; finite element analysis; thermal barrier coatings

热障涂层(TBC, Thermal Barrier Coatings)广泛应用在航空涡轮发动机的燃烧室和涡轮叶片等多种热端部件上，其完好性是部件正常工作的基本保证，因此对 TBC 的内部缺陷进行无损检测和评估都是非常必要的.常见的缺陷是陶瓷层和基体的空气脱粘缺陷.对此类缺陷的检测，红外热无损检测(IR TNDT, Infrared Thermal Non-Destructive Testing)具有明显的优势.事实上，由于

收稿日期：2008-07-20

基金项目：航空科学基金资助项目(2006ZD51030)；航天支撑技术基金资助项目；北京市教育委员会共建项目专项资助

作者简介：郭兴旺(1964—)，男，内蒙古和林人，副教授，xingwangguo@buaa.edu.cn.

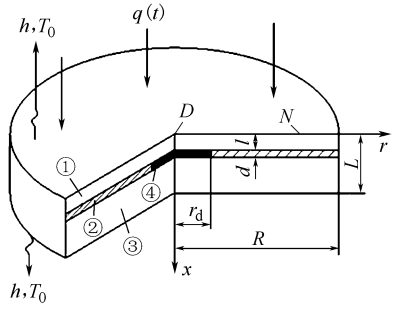
TBC 的多孔性,常规的无损检测法,如超声波法难以胜任. IR TNDT 具有单次检测面积大、速度快、非接触、可单面检测、可在现场使用、安全以及操作简便等优点,近年来在国际上受到了广泛的重视. Bison 等的研究工作表明,脉冲热像法不仅可以检测热障涂层的缺陷和厚度,还可以利用热像信号变换后的特征参数进一步对缺陷进行分类[1]. Shepard 等在脉冲热激励下,通过 TSR (Thermographic Signal Reconstruction)方法对获取的热像时间序列进行处理,成功地检测了热障涂层的厚度,并对涂层厚度呈阶梯式分布的试件进行检测实验,用处理软件显示了 TSR 厚度图[2]. 近几年国际上在热障涂层结构 IR TNDT 上取得的进展表明,IR TNDT 在热障涂层结构的无损检测中有广阔的应用前景.

本文主要对热障涂层内部脱粘缺陷模型进行建模和仿真分析. 研究内容是:建立热障涂层结构 TNDT 的物理模型,用有限单元法对涂层结构 TNDT 的传热过程进行数值模拟,研究表面温差、最大温差和最大对比度等可检信息参数与热障涂层缺陷半径、陶瓷层厚度等参数之间的关系,揭示缺陷结构参数对可检信息参数的影响规律,从而为热障涂层缺陷红外热无损检测的机理分析及检测条件优化提供可靠的理论依据.

1　物理模型

最常用的热障涂层结构由低导热率的氧化物陶瓷面层、金属粘结层和金属基体构成.

为了简化分析,本文不考虑材料热导率各向异性的情况,采用轴对称模型在柱坐标系下建立热障涂层结构 TNDT 的物理模型,如图 1 所示. 模拟试件的总厚度为 L,半径为 R. 在粘结层的中心部位有一圆盘状脱粘缺陷. 缺陷半径为 r_d,缺陷深度即陶瓷层厚度为 l,缺陷厚度和粘结层厚度均为 d. 试件上下表面与周围空气的换热系数为 h,在边界 $r=R$ 处绝热. 试件初始温度场均匀且等于环境温度 T_0. 点 D 为缺陷区中心,点 N 为无缺陷区中心. 在 $x=0$ 的边界,从 $t=0$ 开始受到瞬时矩形脉冲热流 $q(t)$(加热功率的面密度)的作用.



① 陶瓷层　② 粘结层　③ Ni 基高温耐热合金
④ 空气(脱粘造成的空气隙)

图 1　热障涂层脱粘 TNDT 的物理模型

$$q(t)=\begin{cases} q_{\max} & 0\leqslant t\leqslant t_h \\ 0 & t>t_h \end{cases} \tag{1}$$

式中,$q_{\max}$为脉冲加热强度;t_h 为加热时间.

2　瞬态温度场的有限元分析

瞬态温度场不仅是空间域的函数而且也是时间域的函数,即 $T=T(x,r,t)$. 这决定了瞬态温度场有限元计算是有限单元和有限差分的混合解法,即在空间域内用有限单元网格离散,在时间域内用有限差分网格离散.

首先将空间域离散为有限个单元体,在典型单元内温度 T 可以近似地用结点温度 T_i 插值得到,同时注意此时结点温度是时间的函数. 用泛函变分法或迦辽金法均可推导出瞬态热传导的有限元方程[3]:

$$\boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{T}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{T}=\boldsymbol{F} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{D}$ 是非稳态变温矩阵;$\boldsymbol{K}$ 是温度刚度矩阵;$\boldsymbol{F}$ 是节点温度载荷列阵;$\boldsymbol{T}$ 是节点温度列阵;$\dot{\boldsymbol{T}}$ 是节点温度对时间的导数列阵,即 $\dot{\boldsymbol{T}}=\dfrac{\partial \boldsymbol{T}}{\partial t}$.

式(2)是一组以时间 t 为独立变量的线性常微分方程组,不能对它直接求解,一般采用数值积分法求解. 数值积分法的基本概念是将时间域离散化,用在离散的时间点上满足方程组代替在时间域上处处满足方程组.

数值积分法有很多种,ANSYS 中默认用向后欧拉方程来进行时间积分[4],即

$$\boldsymbol{T}^{p+1}=\boldsymbol{T}^{p}+\Delta t\dot{\boldsymbol{T}}^{p+1} \tag{3}$$

式中,Δt 是时间步长;p 是时间步;$\boldsymbol{T}$ 和 $\dot{\boldsymbol{T}}$ 的含义同式(2). 把方程(3)代入方程(2),得

$$\left(\frac{\boldsymbol{D}}{\Delta t}+\boldsymbol{K}\right)\boldsymbol{T}^{p+1}=\boldsymbol{F}+\frac{\boldsymbol{D}}{\Delta t}\boldsymbol{T}^{p} \tag{4}$$

当初始温度已知时,可从时间 $t=0$(对应的时间步 $p=0$)开始计算. 根据前一时间步 p 的温度值,通过方程(4)可以求得时间步 $p+1$ 的温度值. 即通过求解由方程(4)描述的系统方程,就可以求出节点在各离散时间点上的温度.

3　TNDT 有限元分析

3.1 信息参数的定义

为了研究可检测的表面温度信号与隐含缺陷或结构特征之间的关系，这里要定义一些典型的可检信号特征参数，即信息参数.

过余温度是指试件温度与周围环境(空气)温度的差，用 θ 表示.

设缺陷中心对应的表面 D 点的过余温度为 θ_D，无缺陷中心对应的表面 N 点的过余温度为 θ_N，则缺陷区和无缺陷区表面的温度差可用 D 点和 N 点的过余温度之差来表示，即

$$\Delta\theta = \theta_D - \theta_N \tag{5}$$

简称温差，亦称缺陷上(D 点)的温度信号.

对比度定义为

$$C = \Delta\theta / \theta_N \tag{6}$$

C 表达了缺陷区和无缺陷区温度信号的相对差别，与 $\Delta\theta$ 相比其优点是最大程度地去掉了对加热强度的依赖.

此外，设 $\Delta\theta_m$ 为 $\Delta\theta$ 的最大值，称为最大温差；C_m 为 C 的最大值，称为最大对比度；$\Delta\theta_m$ 表明了红外热无损检测的可行性；C_m 表明了缺陷在热像序列中的清晰程度，C_m 越大，缺陷越容易检出.

3.2 有限元计算方案

材料的热物性参数如表 1 所示.

表 1 结构材料的热物性参数

结构和材料	ρ/ (kg·m^{-3})	C/ (J·(kg·℃)$^{-1}$)	λ/ (W·(m·℃)$^{-1}$)
基体[5] (镍基高温耐热合金)	8300	440	9.5
粘结层[5] (NiCoCrAlY)	7320	450	4.3
陶瓷层[5] (ZrO_2+8% Y_2O_3)	6037	500	1.5
空气[6]	1.2	1005	0.07

如果不作另行说明，其它有关参数的选取如下：环境温度 T_0=20 ℃，试件与周围环境的对流换热系数 h=10 W/(m^2·K)，热脉冲强度 q_{max}=10^6 W/m^2，脉冲加热时间 t_h=0.02 s，圆柱体半径 R=20 mm，基体层厚 2 mm，粘结层和缺陷厚度 d=0.1 mm.

根据上述参数，在 ANSYS 中建立有限元计算模型. 采用映射网格划分方式进行有限元网格划分. 为保障解的精确性，选择合理的时间步长很重要，本文在加热阶段选择时间步长 0.001 s，在散热阶段选择时间步长 0.01 s. 然后对 FEM(Finite Element Method)计算结果进行二次处理，计算表面温差、最大温差和最大对比度等 TNDT 信息参数，作出 TNDT 信息参数与缺陷特征参数的关系曲线，最后归纳分析 TNDT 信息参数随缺陷特征参数的变化规律.

3.3 热障涂层脱粘的 TNDT 的有限元分析

1) 缺陷半径对表面温度信号的影响

当涂层厚度固定为 l=0.2 mm，缺陷半径分别取 r_d=0.3，0.6，0.9 mm 时，根据计算结果得出的表面温差和表面对比度的时间历程曲线分别如图 2 和图 3 如示.

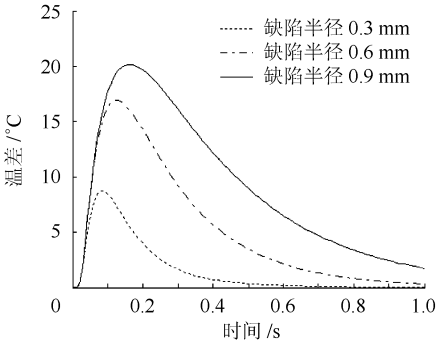


图 2 缺陷半径对温差的影响

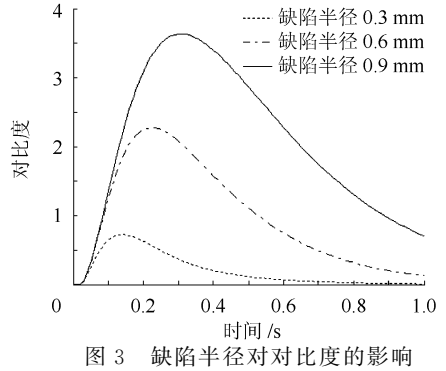


图 3 缺陷半径对对比度的影响

从图中可以看出，随着缺陷半径的增加，表面温差和对比度增大，最大温差和最大对比度出现的时刻向后推移，这是由于缺陷半径越大，缺陷区域积累热量越多，从而使表面温差和对比度增大，最大温差时间和最佳检测时间增大. 同时也说明，对处在同一深度下的缺陷，其面积越大，越容易被检测到.

2) 陶瓷层厚度对表面温度信号的影响

当缺陷半径固定为 r_d=0.6 mm，陶瓷层厚度(即缺陷深度)分别取 l=0.15，0.20，0.25 mm 时，根据计算结果得出的表面温差和表面对比度的时间历程曲线，分别如图 4 和图 5 如示.

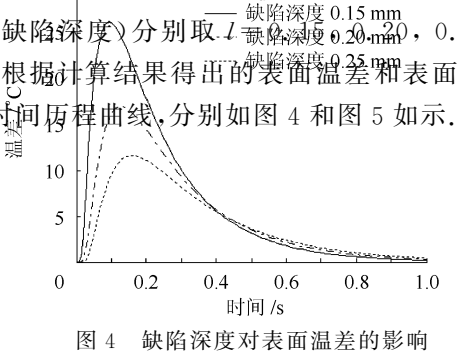


图 4 缺陷深度对表面温差的影响

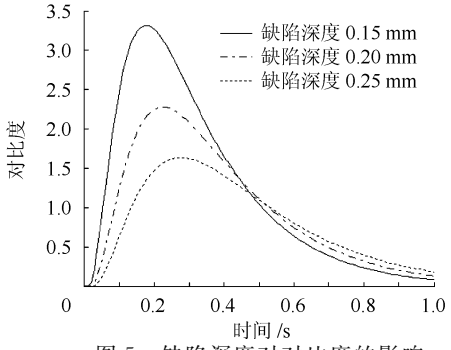


图 5　缺陷深度对对比度的影响

从图中可以看出,随着缺陷深度的增加,表面温差和对比度减小,最大温差和最大对比度出现的时刻向后推移.同时也说明,对缺陷半径相同的缺陷,其距离表面越近,越容易被检测到.

3) 最大温差和最大对比度与缺陷半径的关系

分别取 3 组不同的陶瓷层厚度 $l=0.15$, 0.20, 0.25 mm,缺陷半径取较小值时,按 $r_d=0.3\sim0.9$ mm、间隔 0.1 mm 变化,缺陷半径取较大值时,按 $r_d=2\sim7$ mm、间隔 1 mm 变化,从 ANYSY 热分析计算结果中提取出最大温差和最大对比度数据,做出的散点图和曲线如图 6 和图 7 如示.

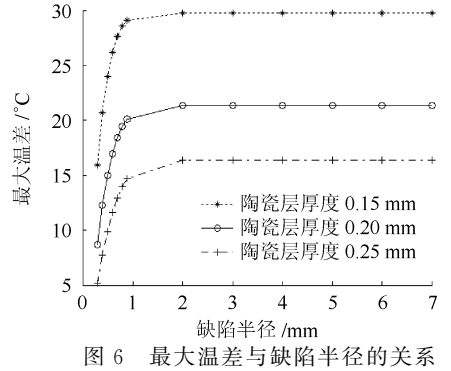


图 6　最大温差与缺陷半径的关系

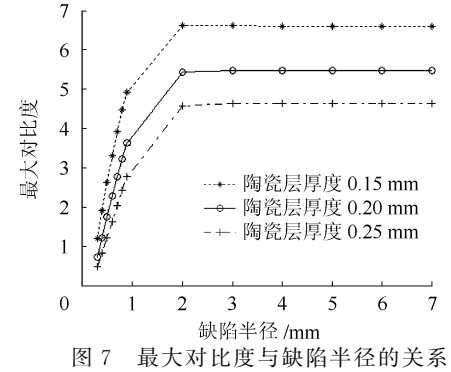


图 7　最大对比度与缺陷半径的关系

从图 6、图 7 可以看出,在涂层厚度一定时,最大温差和最大对比度与缺陷半径成非线性关系,它们随着缺陷半径的增大而增大,但是当缺陷半径足够大时,最大温差和最大对比度趋于相应的饱和值,这是缺陷半径足够大时的极限情况.

从理论上讲,当 $\Delta\theta_m$ 大于红外热像仪的温度分辨率(如 0.1 ℃)时,就可以从红外热像仪上分辨出缺陷的存在.所以,依据红外热像仪的热灵敏度(温度分辨力或相对灵敏度),利用涂层厚度一定时最大温差和最大对比度与缺陷半径的关系曲线,可以估计该涂层厚度下可检测到的最小缺陷.

4) 最大温差和最大对比度与陶瓷层厚度的关系

分别取 3 组不同的缺陷半径 $r_d=0.3$, 0.6, 0.9 mm,陶瓷层厚度 l 按 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40 mm 变化,从 ANYSY 热分析计算结果中提取出最大温差和最大对比度数据,做出的散点图和曲线分别如图 8 和图 9 如示.

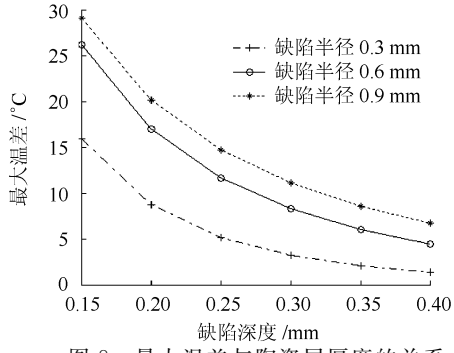


图 8　最大温差与陶瓷层厚度的关系

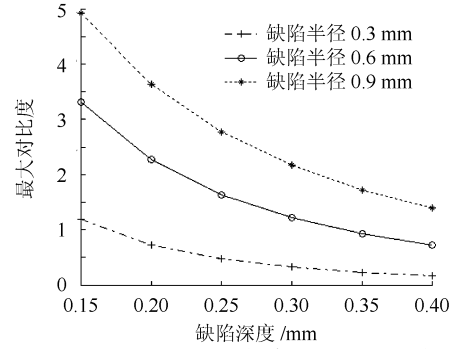


图 9　最大对比度与陶瓷层厚度的关系

由图 8 和图 9 可知,在缺陷半径一定时,最大温差和最大对比度与陶瓷层厚度 l 成非线性关系,它们随着 l 的增加而减小,并且随着 l 的增大,变化越来越缓慢.这表明 l 的增加,会增大热障涂层脱粘缺陷的检测难度.

依据红外热像仪的热灵敏度(温度分辨力或相对灵敏度),利用缺陷半径一定时最大温差或最大对比度与陶瓷层厚度的关系曲线,也可以估计该半径尺度下能检测到的缺陷的最大深度.

当缺陷半径足够大的时候,最大温差和最大对比度与陶瓷层厚度的关系分别如图 10 和图 11

所示.

图10和图11分别是图8和图9在缺陷半径增大时的极限情况,当缺陷半径足够大时,在缺陷半径不同而陶瓷层厚度相同时,其最大温差或最大对比度几乎相同,即3条曲线重合.

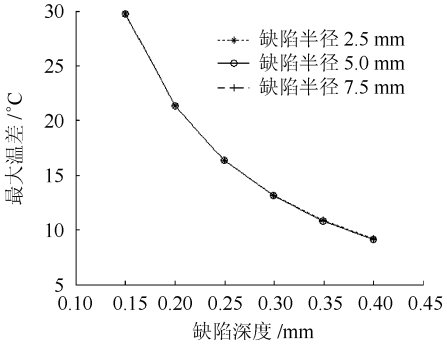


图10 最大温差与陶瓷层厚度的关系

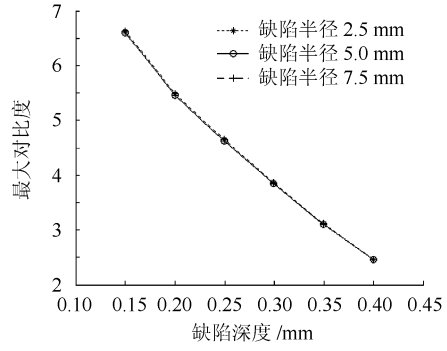


图11 最大对比度与陶瓷层厚度关系

4 结 论

本文用有限单元法分析了热障涂层内部脱粘结构在脉冲热激励下表面过余温度、最大温差和最大对比度等可检信息参数与脱粘缺陷大小、热障涂层厚度的关系,得出了多组定量关系曲线.这些曲线准确地描述了热障涂层TNDT的物理机制和规律,为热障涂层IR TNDT方案的制定提供了有益的参考.主要结论有:

1) 热障涂层脱粘的TNDT的物理机制和过程可以通过恰当的建模和有限元分析给出合理的解释和定量描述.

2) 在陶瓷层厚度一定时,最大温差和最大对比度与脱粘缺陷半径成非线性关系,它们随着缺陷半径的增大而增加,且存在上限饱和值.

3) 在缺陷半径一定时,最大温差和最大对比度与陶瓷层厚度成非线性关系,它们随着陶瓷层厚度的增加而减小.

参考文献(References)

[1] Bision P G, Marinetti S, Grinzato E, et al. Inspecting thermal barrier coatings by IR thermography[C]// Cramer K, Maldague X. Proc SPIE Thermosense XXV. Orlando: SPIE, 2003: 318-327

[2] Shepard Steven M, Hou Yulin, Lhota James R, et al. Thermographic measurement of thermal barrier coating thickness [C]// Peacock G, Burleigh D, Miles J, et al. Proc SPIE Thermosense XXVII. Orlando: SPIE, 2005: 407-410

[3] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 1986: 169-180
Kong Xiangqian. Application of finite element method in heat transfer [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 1986: 169-180 (in Chinese)

[4] Saeed Moaveni. 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
Saeed Moaveni. Finite element analysis: theory and application with ANSYS [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 322-324(in Chinese)

[5] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 9-300
China Aeronautical Materials Handbook Redaction Committee. China aeronautical materials handbook [M]. Beijing: Standard Press of China, 2001: 9-300(in Chinese)

[6] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第3版. 北京:高等教育出版社, 2004: 20-25
Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 20-25(in Chinese)