

基于导热反问题的复合材料内壁不规则缺陷 Ansys 二次开发 红外诊断识别

吕事桂, 阳再清, 丛书全

(中国人民解放军 92419 部队, 辽宁 兴城 125106)

摘要: 针对人工编程数值建模进行缺陷识别反问题求解存在编程复杂、分析效率低的局限性, 提出了采用通用有限元数值计算软件 Ansys 结合共轭梯度算法进行二次开发对复合材料内壁不规则缺陷进行红外诊断定量识别的方法, 并引入了相对敏感系数的概念用于比较评估试件检测状态对缺陷边界形状定量识别的影响。通过相对敏感系数分析发现, 不同检测状态下内壁不规则缺陷的可检测性并不相同, 采用检测面达到最大温差时刻点的瞬态检测比稳态检测更具优越性。数值试验验证了 Ansys 二次开发红外诊断识别的可行性和相对敏感系数比较评估的有效性。

关键词: 导热反问题; 红外检测; 缺陷识别; Ansys 二次开发; 共轭梯度法

中图分类号: TK38 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1204002

Secondary development of Ansys to the infrared diagnosis of irregular inner-wall surface defect of complex material based on inverse heat conduction problem

Lv Shigui, Yang Zaiqing, Cong Shuquan

(The Unit 92419 of PLA, Xingcheng 125106, China)

Abstract: As to the complexity and low analysis efficiency of defect identification inverse problem solution by manual programming model, with the conjugate gradient algorithm, a method for the secondary development of the universal finite element numerical computation software Ansys was put forward in this paper, which is successfully applied to the diagnosis of the irregular inner-wall surface defect by infrared inspection. And a new concept of relative sensitivity was introduced here in order to assess the influence of inspection state to the quantitative identification of defect boundary shape. Through analyzing the relative sensitivity, it was found that the inspectability of the irregular inner-wall surface defect was different in the different inspection states, and the inspection carried out at the time with maximum inspection surface temperature difference was more desirable than that in the steady heat transfer state. Both of the feasibility of the infrared diagnosis with Ansys secondary development and the validity of the relative sensitivity assessment were verified by the numerical experiment.

Key words: inverse heat conduction problem; infrared inspection; defect identification;
Ansys secondary development; conjugate gradient method

收稿日期: 2016-04-12; 修订日期: 2016-05-20

作者简介: 吕事桂(1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事飞机红外检测与故障诊断方面的研究。Email: shiguilv@hotmail.com

0 引言

红外检测诊断技术因具有快速、非接触、检测范围大、测量结果直观形象等优点,在金属、陶瓷、复合材料等的缺陷故障检测诊断中得到了广泛应用并取得了显著效果^[1-2]。表面温度判断法、相对温差判断法、同类比较法、热普分析法、档案分析法等^[3]传统红外检测诊断方法只能作出定性的故障诊断结果,具有一定的主观经验性,对检测者专业水平要求较高。近年来,为提高红外检测诊断结果的可靠性,国内外学者借助于导热反问题的思路逐步将红外检测诊断从定性研究阶段过渡到定量阶段,使目前基本处于经验层次的红外检测诊断技术逐步上升为具有完整理论体系的红外热诊断学^[4]。

于慧等从理论上证明了利用红外检测诊断技术与导热反问题相结合的方法对设备内部缺陷进行定量识别诊断的可行性^[5]。李斌等采用边界元离散的正问题求解方法,利用共轭梯度算法对几何边界进行了定量识别^[6]。范春利等利用 Levenberg-Marquardt 算法对矩形内部缺陷的尺寸、方位进行了红外检测定量识别^[7-8]。Huang 等人利用最速下降法对二维多个缺陷^[9]和三维边界面上缺陷^[10]的形状进行了识别研究,取得了较好的效果。

从前人借助于导热反问题思路进行红外检测定量识别的研究成果来看,多数研究都是采用边界元、有限元和有限体积等传热数值计算的方法,进行人工编程建模,存在编程复杂、分析效率低和建模正确性难以保证的局限性,特别是对于复杂的工程设备工作量巨大,不具有很好的实际适用性。笔者为解决这一现实困难,以复合材料内壁不规则缺陷识别为例,提出了结合导热反问题算法对 Ansys 大型通用有限元分析软件二次开发来进行缺陷红外检测定量诊断识别的方法,并引入了相对敏感系数的概念用于比较评估试件检测状态对定量识别结果的影响。

1 复合材料内壁缺陷的传热模型

复合材料内壁面产生腐蚀缺陷后的物理模型如图 1 所示。基于导热反问题的内壁不规则缺陷诊断以测量得到的物体内部或边界上的温度信息为依据,进而采用反问题算法求解出内壁缺陷的边界形

状。忽略内外材料层之间的接触热阻,相应的正问题可表示为无内热源的导热微分方程:

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

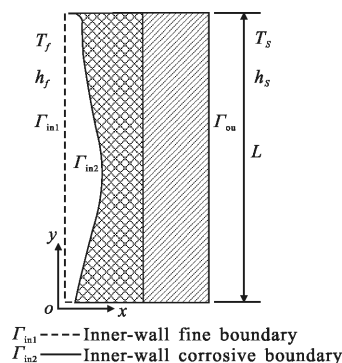


图 1 复合材料内壁缺陷示意图

Fig.1 Schematic of inner-wall defect of complex material

初始、边界条件为:

$$\begin{cases} T|_{\tau=0} = T_0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} |_{\Gamma_{in1} \text{ 或 } \Gamma_{in2}} = h_f(T_f - T_{in}) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} |_{\Gamma_{out}} = h_s(T_{out} - T_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中:导热系数 λ 、比热容 c 、密度 ρ 针对复合材料的不同材料层需取不同的材料属性值。 T_f, h_f 为内壁面的流体温度和对流换热系数; T_s, h_s 为外壁面所处的环境温度和自然对流换热系数。内材料层未腐蚀时的厚度为 d_{in} ,相应内边界用 Γ_{in1} 表示,腐蚀后的内边界用 Γ_{in2} 表示;外材料层的厚度为 d_{out} ,相应外边界用 Γ_{out} 表示。

2 Ansys 二次开发与缺陷反问题求解

Ansys 是融结构、流体、电场、磁场、声场等多物理场分析于一体的大型通用有限元分析软件,并且具有强大的前后处理功能,可广泛应用于核工业、航空航天、能源等一般工业及科学研究中^[11]。Ansys 提供了宏(MACRO)、参数化设计语言(APDL)、用户界面语言(UI)和用户可编程特性(UPFS)几种工具方便用户的二次开发。因此,可利用 Ansys 强大的热分析能力采用 APDL 对 Ansys 进行二次开发,反演求解复合材料腐蚀内壁面的缺陷边界形状。

2.1 APDL

APDL 参数化设计语言是一种类似于 FORTRAN

的解释性语言,提供一般程序语言的功能,如参数、标量、向量及矩阵运算、分支、循环、重复以及访问 Ansys 有限元数据库等。利用 APDL 的程序语言与宏技术组织管理 Ansys 的有限元分析命令,就可以实现参数化建模、施加参数化载荷与求解以及参数化后处理结果的显示,从而实现参数化有限元分析的全过程。在这种参数化的分析过程中可以简单地修改其中的参数达到反复分析各种尺寸、不同载荷大小的多种设计方案或者序列性产品,极大地提高分析效率、减少分析成本。

基于 APDL 程序语言的上述优点,对于缺陷识别反问题的求解,首先可以使用 APDL 按照正问题求解方法编制相应的参数化建模分析求解批处理宏文件(正问题求解宏文件),同时根据反问题算法规则编制缺陷参数修正识别的 APDL 分析命令流,然后在 Ansys 软件中从某一给定的缺陷初始假设出发执行正问题求解宏文件,并利用反问题算法的 APDL 分析命令流反复修正识别缺陷参数和执行正问题求解宏文件直至满足收敛标准最终获得缺陷反问题求解结果。

2.2 共轭梯度算法(CGM)

文中采用共轭梯度算法(CGM)对缺陷进行反演求解,它是通过如下目标函数 $S(P)$ 的最小化来获得缺陷的识别诊断结果:

$$S(P)=[Y-T(P)]^T \cdot [Y-T(P)]=\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^M [Y_{ij}-T_{ij}(P)]^2 \quad (3)$$

式中: I 为测温时刻点总数; M 为每一个测温时刻点下测温点数; Y_{ij} 为第 j 个测温点在第 i 个测温时刻点时的测量温度; $T_{ij}(P)$ 为在一个估计的缺陷边界 P 下通过求解导热正问题得到的第 j 个测温点在第 i 个测温时刻点时的计算温度; P 为描述缺陷边界形状的参数向量; Y 、 $T(P)$ 分别为不同时刻点下各测温点处测量温度与计算温度向量。

缺陷边界形状描述参数向量 P 的迭代修正识别规则为:

$$P^{k+1}=P^k-\beta^k \cdot d^k \quad (4)$$

式中:上标代表迭代次数(下同); β^k 为搜索步长; d^k 为第 k 次迭代的下降方向,其计算公式如下:

$$d^k=\nabla S(P^k)+\gamma^k \cdot d^{k-1} \quad (5)$$

式中: $\nabla S(P^k)$ 为梯度方向; γ^k 为共轭系数,即:

$$\gamma^k=\frac{\nabla S(P^k) \cdot \nabla S^T(P^k)}{\nabla S(P^{k-1}) \cdot \nabla S^T(P^{k-1})}, \gamma^0=0 \quad (6)$$

式中: $\nabla S(P^k)$ 可通过在待估计缺陷参数向量 P^k 处对目标函数 $S(P)$ 取微分得到:

$$\nabla S(P^k)=-2(J^k)^T[Y-T(P^k)] \quad (7)$$

式中: J^k 为敏感系数矩阵; $J(P)=[\partial T^T(P)/\partial P]^T$,它反映了缺陷边界描述参数单位扰动引起的测温点处温度变化。

搜索步长 β^k 的表达式为:

$$\beta^k=\frac{[J^k \cdot d^k]^T \cdot [T(P^k)-Y]}{[J^k \cdot d^k]^T \cdot [J^k \cdot d^k]} \quad (8)$$

根据偏差原理,当共轭梯度分析命令流运行达到以下收敛标准时则停止程序执行,完成缺陷边界反问题求解识别工作:

$$S(P^{k+1})<\varepsilon \quad (9)$$

式中:不考虑测温误差时, ε 为一无穷小的正数;考虑标准差为 σ 的测温误差时, $\varepsilon=IM\sigma^2$, I 为温度的测量时刻点总数, M 为每一时刻点上测量温度的数量。

3 算例与分析

以长度 L 为 0.3 m、总厚度 D 为 0.06 m 的二维矩形双层复合材料为研究对象(如图 1 所示),其两层材料厚度 d_m 、 d_{ou} 相等。内材料层的导热系数 $\lambda_1=36 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、密度 $\rho_1=7800 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容 $c_1=460 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;外材料层的导热系数 $\lambda_2=236 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 、密度 $\rho_2=2710 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容 $c_2=902 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。复合材料初始均匀温度 $T_0=27^\circ\text{C}$,内壁面流体温度 $T_f=700^\circ\text{C}$ 、对流换热系数 $h_f=1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,环境温度 $T_s=27^\circ\text{C}$ 、自然对流换热系数 $h_s=8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

依据检测面 Γ_{ou} 的红外检测温度,采用数值试验的方法对 Ansys 二次开发反演求解识别复合材料内壁不规则腐蚀缺陷边界形状的准确性、稳定性等进行验证。检测面 Γ_{ou} 的实际测量温度根据已知缺陷形状通过求解导热微分方程(1)、(2)得到真实温度的基础上叠加一个随机测量误差来模拟:

$$Y=T(P_{\text{true}})+\omega \cdot \sigma \quad (10)$$

式中: P_{true} 为描述真实缺陷边界形状的参数向量; ω 为 $[-1, 1]$ 内均匀分布的随机变量; σ 为测温误差的标准偏差。

如图 1 所示,在直角坐标系下,复合材料腐蚀内边界的形状可用其上离散点的 x 坐标描述,即 $p_i=x_i$

($i=1, 2, \dots, n$)。考虑如下正弦型(Case A)和三角型(Case B)两种腐蚀内边界 Γ_{in2} 形状的 Ansys 二次开发诊断识别,它们对应的缺陷边界形状函数表达式为:

正弦型(Case A):

$$p_i=0.5155+0.0075 \times \sin\left(\frac{2\pi y_i}{L}\right) \quad (11)$$

三角型(Case B):

$$p_i=\begin{cases} 0.52-0.018 \times \frac{2y_i}{L}, & (0 \leq y_i \leq \frac{L}{2}) \\ 0.52-0.018 \times \frac{2(L-y_i)}{L}, & (\frac{L}{2} \leq y_i \leq L) \end{cases} \quad (12)$$

敏感系数矩阵 $J(P)$ 反映了红外检测面温度对缺陷边界形状各描述参数单位扰动的敏感程度,为了评估在某一测温误差范围内缺陷边界形状参数的定量可识别性,定义相对敏感系数 $J_r(p_i)$ 为:

$$J_r(p_i)=\max(|J(p_i)|) \times (E_r \times p_i) \quad (13)$$

式中: $\max(|J(p_i)|)$ 反映了参数 p_i 单位扰动引起的检测面最大温度变化; $(E_r \times p_i)$ 表示参数 p_i 定量识别预期相对误差为 E_r 时的最大允许扰动量。所有待识别参数的平均相对敏感系数 \bar{J}_r 可表示为:

$$\bar{J}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n J_r(p_i) \quad (14)$$

对于同一缺陷边界形状来说,不同时刻反映在检测面的红外热特征显著程度可用最大温差 ΔT_{max} 表示,即相同时刻点红外检测面最大和最小温度之差^[12-13]。

在测温误差 $\sigma=0^\circ\text{C}$ 时,以检测面热特征最显著时刻(ΔT_{max} 最大)为检测时间,通过 Ansys 软件二次开发对复合材料内壁不规则缺陷边界进行反演求解识别,得到的复合材料真实温度和估计温度分布如图 2 所示,其中,图 2(a)、(c)为两种腐蚀情况下的真实温度,图 2(b)、(d)为两种腐蚀情况下的估计温度。比较图中真实温度和估计温度分布可发现二者分布云图基本相同,内壁边界识别结果逼近真实边界形

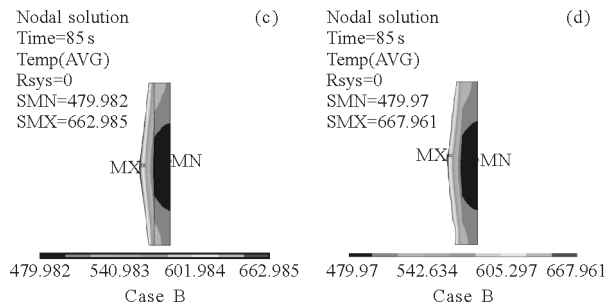
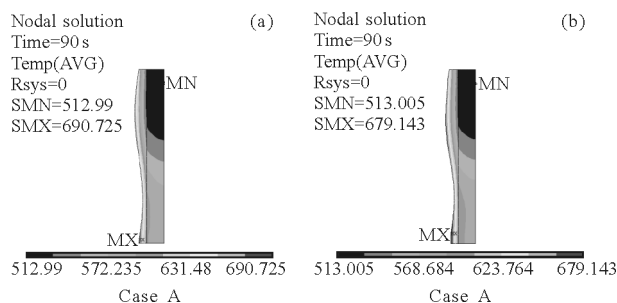


图 2 复合材料内边界 Ansys 二次开发求解温度分布图

Fig.2 Temperature distribution of the inner boundary of the complex material solved by secondary development of Ansys

状。可见,将 Ansys 二次开发技术应用于缺陷边界形状反问题识别是方便、可行的,不考虑测温误差的影响,可以准确地识别出缺陷边界形状。

图 3 给出了复合材料红外检测面最大温差 ΔT_{max} 和相对敏感系数 J_r 随时间 t 的变化关系,从图 3 可以看出:复合材料内壁缺陷边界不同,描述参数相对

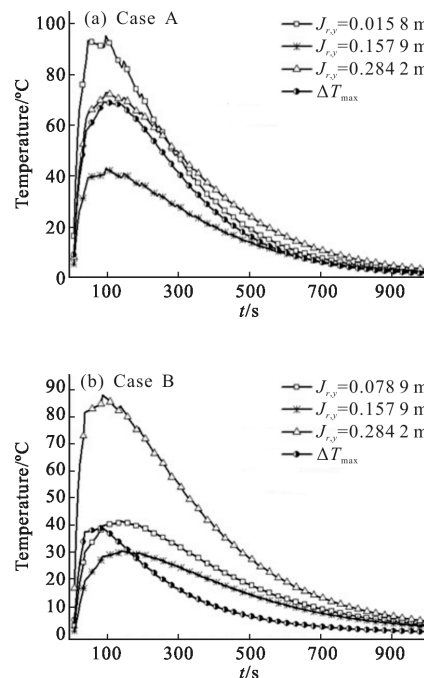


图 3 最大温差 ΔT_{max} 和相对敏感系数 J_r 随时间 t 的变化关系

Fig.3 Changes of the maximum temperature difference ΔT_{max} and relative sensitivity coefficient J_r with time

敏感系数 J_r 的最大值虽不是同一时间达到,但均出现在检测面热特征最显著(ΔT_{max} 最大)时刻点附近,且稳态传热条件下相对敏感系数 J_r 较小,缺陷边界

的定量可识别性较差。因此,为提高内壁缺陷边界识别的准确性可选择检测面热特征最为显著的时刻作为检测时间。

图 4 比较了热特征最显著的瞬态检测和稳态检测内边界识别结果,由图可知,考虑测温误差影响时,内壁缺陷的识别结果准确性降低,但在一定测温误差范围内仍能得到较为准确的识别结果,且同一测温误差下内壁缺陷边界形状的瞬态检测识别效果优于稳态检测识别效果,与前面相对敏感系数分析一致,表明了其用于比较评估边界形状定量可识别性的可行性。

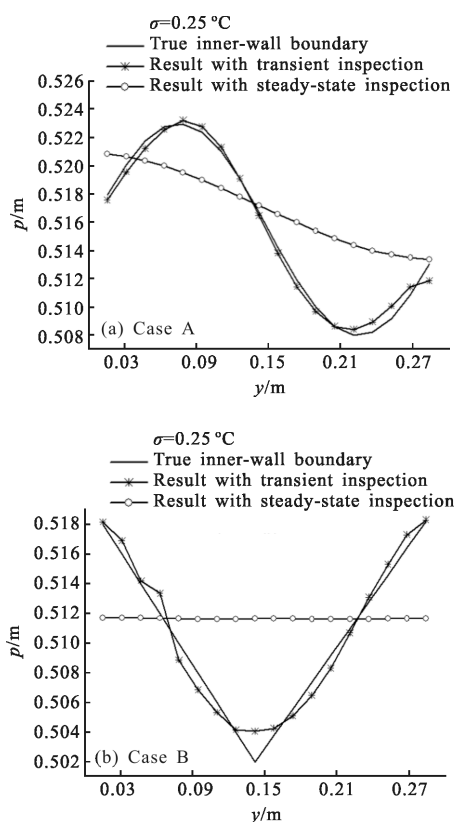


图 4 检测状态对复合材料内边界识别结果的影响
Fig.4 Influence of the inspection state on the inner boundary identification of the complex material

另外,经过数值试验发现:Ansys 计算求解一次检测面温度分布正问题的耗时上,瞬态比稳态更耗时,但二者均在十几秒范围内(稳态仅需数秒)。且从不同初始假设出发,结合共轭梯度不断迭代计算正问题最终得出内壁不规则缺陷的反问题求解结果,迭代寻优次数约为数十次,最终识别耗时约为十几至二十几分钟左右。可见,在具体识别过程上,Ansys

二次开发求解反问题的计算速度是比较高的。

4 结论

文中结合共轭梯度反问题算法,在 Ansys 二次开发诊断识别的基础上,对复合材料内壁不规则缺陷边界形状进行了定量反演求解识别,并引入相对敏感系数的概念比较评估了试件检测状态对缺陷边界形状的影响。得出的主要结论如下:

(1) 借助于通用有限元软件 Ansys 并结合共轭梯度算法进行二次开发对缺陷边界形状诊断识别是可行的,克服了人工编程数值建模进行反问题求解存在的编程复杂、分析效率低等局限性。

(2) 引入的相对敏感系数概念可以有效评估分析试件检测状态对缺陷边界形状定量可识别性的影响,为缺陷边界形状定量识别提供可靠判据。

(3) 不考虑测温误差影响时,复合材料内壁不规则缺陷可以准确地通过 Ansys 二次开发定量诊断识别出来,提高测温精度有利于提高缺陷边界形状的识别准确性。

(4) 在检测面达到最大温差时对复合材料进行瞬态条件下的检测比稳态条件下的检测更具优越性,内壁缺陷边界形状识别准确性更高,检测时间更短。

参考文献:

[1] Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227-230. (in Chinese)
李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.

[2] Lv Shigui, Yang Li, Yang Qian. Research on the applications of infrared technique in the diagnosis and prediction of diesel engine exhaust fault [J]. *Journal of Thermal Science*, 2011, 20(2): 189-194.

[3] Maldague X P. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing[M]. US: John Wiley & Sons Inc, 2001.

[4] Dai Jingmin, Wang Zijun. Infrared thermography nondestructives testing technology and its applications [J]. *Techniques of Automation and Application*, 2007, 26(1): 1-7. (in Chinese)
戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状 [J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(1): 1-7.

- [5] Yu Hui, Guan Ronghua. Feasibility to the theory of diagnosis defects in equipment inner wall by means of infrared technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 229–232. (in Chinese)
于慧, 关荣华. 红外技术定量诊断设备内部缺陷可行性的理论证明[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 229–232.
- [6] Li Bin, Liu Linhua. An algorithm for geometry boundary identification of heat conduction problem based on boundary element discretization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(20): 38–43. (in Chinese)
李斌, 刘林华. 一种基于边界元离散的导热问题几何边界识别算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 38–43.
- [7] Fan Chunli, Zhang Mingxing, Hu Shuangxi. Identification of plate surface geometry: a numerical and experimental study [J]. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 2012, 61(1): 50–70.
- [8] Lv Shigui, Yang Li, Fan Chunli, et al. Chaos-LM hybrid algorithm for the defect identification with opposite-side thermographic testing [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(7): 1352–1356. (in Chinese)
吕事桂, 杨立, 范春利, 等. 基于对面红外检测的缺陷混沌-LM 混合识别算法 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(7): 1352–1356.
- [9] Huang C H, Ozisik M N. Inverse problem of determining unknown wall heat flux in laminar flow through a parallel plate Duct [J]. *Numerical Heat Transfer. Part A*, 1992, 21(1): 55–70.
- [10] Huang C H, Chao B H. An inverse geometry problem in identifying irregular boundary configurations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997, 40(9): 2045–2053.
- [11] Wang Song, Liu Lijuan, Dong Chunmin, et al. Finite Element Analysis Theory and Application with Ansys (Third edition) [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
王崧, 刘丽娟, 董春敏, 等. 有限元分析 ANSYS 理论与应用(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [12] Inagaki T, Ishii T, Iwamoto T. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography [J]. *NDT & E International*, 1999, 32(5): 247–257.
- [13] Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. A new quantitative thermographic identification method of subsurface defect for infrared sensor system [J]. *Journal of Electron Devices*, 2006, 29(3): 878–882. (in Chinese)
范春利, 孙丰瑞, 杨立. 红外系统的定量缺陷识别算法研究[J]. 电子器件, 2006, 29(3): 878–882.