

涂层材料瞬态传热实验与导热系数辨识

陈 学¹, 卢国鹏¹, 孙 创¹, 夏新林¹, 王秦阳², 康宏琳²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航天科工集团有限公司 第三研究院 北京空天技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 针对涂层-基体一体化的双层结构, 为测试评估其中涂层材料的导热性能, 提出基于瞬态平面热源法(transient plane source, TPS)的涂层材料导热系数反演辨识方法。根据 Hot-Disk 实验测试原理, 建立基体-涂层-探头整体的二维非稳态传热模型; 结合测量过程中的瞬时温升数据信息, 采用粒子群优化算法反演辨识获得涂层材料的导热系数; 并通过实验和数值模拟论证了上述方法的可靠性。结果表明: 该测量方法能够有效获得涂层导热系数, 测试反演的数值偏差小于 4.0%。最后, 实际测量和反演辨识获得了一种涂层材料常温至 773 K 的导热系数, 随温度提高呈现增大趋势, 数值范围为 0.18~0.29 W/(m·K)。

关 键 词: 涂层导热系数; 瞬态平面热源法(TPS); 二维非稳态传热模型; 粒子群算法; 反演辨识

中图分类号: V219; TK124

文献标志码: A

Transient heat transfer experiment and thermal conductivity identification of coating materials

CHEN Xue¹, LU Guopeng¹, SUN Chuang¹, XIA Xinlin¹,

WANG Qinyang², KANG Honglin²

(1. School of Energy Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Beijing Aerospace Technology Institute, The Third Academy,

China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to evaluate the thermal conductivity of the coating material in the coating substrate integrated double-layer structure, an inversion method of thermal conductivity of coating materials based on transient plane source (TPS) was proposed. According to the Hot-Disk experimental measurement process, a two-dimensional unsteady heat transfer model of substrate-coating-probe was established. Combined with the instantaneous temperature rise data in the experimental test, the thermal conductivity of coating materials was obtained by inversion identification using particle swarm optimization algorithm. The reliability of the above method was demonstrated by experiments and numerical simulation. The results showed this technology can effectively acquire the thermal conductivity of coating with a low deviation less than 4.0%. Finally, the thermal conductivity of a coating material from room temperature to 773 K was obtained by actual measurement and inversion identification. A gradual increase was found as the temperature increased and the numerical range was 0.18—0.29 W/(m·K).

收稿日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(51806046); 中国博士后科学基金(2020T130145)

作者简介: 陈学(1985—), 男, 讲师、硕士生导师, 博士, 研究方向为涂层传热特性、红外辐射传输。

通信作者: 夏新林(1966—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 研究方向为高温能量转换、耦合热传递。E-mail: xiaxl@hit.edu.cn

引用格式: 陈学, 卢国鹏, 孙创, 等. 涂层材料瞬态传热实验与导热系数辨识[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 777-786. CHEN Xue, LU Guopeng, SUN Chuang, et al. Transient heat transfer experiment and thermal conductivity identification of coating materials[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 777-786.

Keywords: thermal conductivity of coating; transient plane source (TPS); two-dimensional unsteady heat transfer model; particle swarm optimization algorithm; inversion identification

涂层作为一种重要的功能材料被广泛应用于电力、化工、航空、航天领域,如高超速飞行器表面热防护涂层、燃气轮机叶片热障涂层、发动机燃烧室壁面隔热涂层等^[1-3],降低基体表面温度以确保安全性能。因而,获取涂层的传热性能参数是热设计过程中不可或缺的部分。

目前,制备金属/陶瓷功能涂层的方法有气相沉积、激光熔覆、自蔓延高温合成、等离子喷涂等技术^[4]。其中,最常用的方法为等离子喷涂和电子束物理气相沉积^[5]。采用该制备工艺,涂层厚度很小(微米~亚毫米级)且与基体紧密配合,形成一体化双层结构。涂层与其本征材质的块体材料性质不同,且单独的涂层材料无法制备成块状或薄膜状,增加了导热系数的测量难度。虽然对于单一薄膜状物体导热系数的测量已发展多种先进测试技术,如激光闪光法、微桥法、光热反射法^[6],但是针对涂层-基体一体化结构,测量其中涂层材料的导热系数,上述方法均难以实现。

基于瞬态平面热源法(transient plane source, TPS), Hot-Disk 热分析仪作为高精度的物体导热系数测量仪器广泛应用于固体、液体、复合材料等的导热系数测量^[7-10]。20 世纪 90 年代, Gustafsson^[11]就介绍了 TPS 法测量物体导热系数的理论,并应用于固体材料的导热系数测量。He^[12-13]系统性推导了 TPS 法测量物体导热系数的数学物理模型,给出 TPS 法测量薄板材料导热系数的思路。Mihiretie 等^[14]建立了 Hot-Disk 探头的三维传热模型,利用 COMSOL 软件模拟获得了与实验测试探头温升曲线基本一致的结果。Gustafsson 等^[15]对 Hot-Disk 探头所采用的聚酰亚胺绝缘薄层的导热系数进行了测量。Zhang 等^[16]通过二维非稳态导热数值模拟,分析了 Hot-Disk 测量薄膜导热系数的可靠性。Hot-Disk 测量涂层导热系数时受限于一维传热假设,适用于低热扩散率或低导热系数;对于高热扩散率或高导热系数的涂层材料误差较大^[16-17]。

针对涂层-基体一体化双层结构,本文建立基体-涂层-探头整体的二维非稳态导热模型,通过 Hot-Disk 测试获取温度响应曲线,结合粒子群算法进行反演辨识,以获得其中涂层材料的导热

系数。

1 数学物理模型

Hot-Disk 测试装置如图 1 所示,包括热传导分析仪、常温样品支架、高温加热炉及支架、真空泵等组件。其中,实验过程最为关键的元件为加热和测温的探头,它是由双螺旋结构镍丝和聚酰亚胺复合而成,其中镍丝既是加热元件又是测量元件,聚酰亚胺薄膜层起到为镍丝保形和电绝缘作用。测试时,将探头加装在两块一致的待测样件中间,保持对称特性,通过给予探头一定热功率,获取探头随时间变化的温升曲线。



图 1 Hot-Disk 测试装置

Fig. 1 Schematic diagram of the Hot-Disk test setup

实验测试过程中,探头区域非常薄,两个涂层基底材料之间的间隙非常的小;测试时为了保护 TPS 实验探头,控制其温升在一定温度范围以内;整体实验样件温升非常小,而且测试过程中使用了遮热罩,故认为测试过程中空气侧对流可以忽略。因此,整体可简化为二维非稳态导热问题,示意图如图 2 所示。图中, D 为试件直径, h 为基体厚度, Δh 为涂层厚度, r 、 z 分别表示半径方向和高度方向。本文使用有限体积法对其二维非稳态导热模型进行计算求解。

控制方程可以表示为

$$\frac{\partial (\rho_i c_{p,i} T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

式中 λ 为材料的导热系数, ρ 为密度, c_p 为比定压热容, T 为温度, t 为时间;下标 $i = 1$ 为聚酰亚胺薄膜探头镍丝; $i = 2$ 为探头聚酰亚胺绝缘层; $i = 3$ 为空气侧; $i = 4$ 为涂层材料; $i = 5$ 为基体材料。

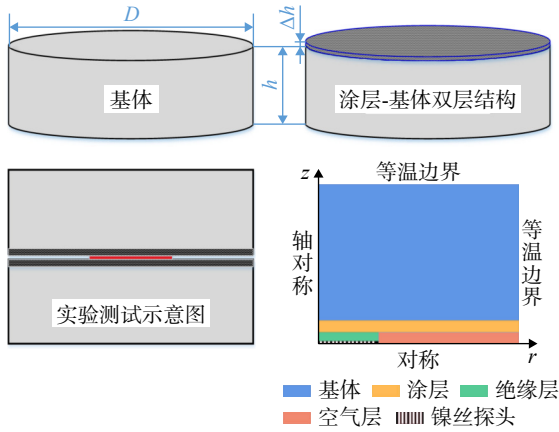


图2 实验测试端简化物理模型

Fig. 2 Physical model of the experimental testing part

初始温度为测试环境温度, 边界条件如图2所示, 左侧面与下侧面为对称边界, 上侧面与右侧面为等温边界, 下侧面探头区域给定加热边界。具体形式如下:

$$t = 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq Z \quad T = T_{\text{amb}} \quad (2)$$

$$z = 0, R_1 \leq r \leq R \quad -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$r = 0, 0 \leq z \leq Z \quad -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$z = Z, 0 \leq r \leq R \quad T = T_{\text{amb}} \quad (5)$$

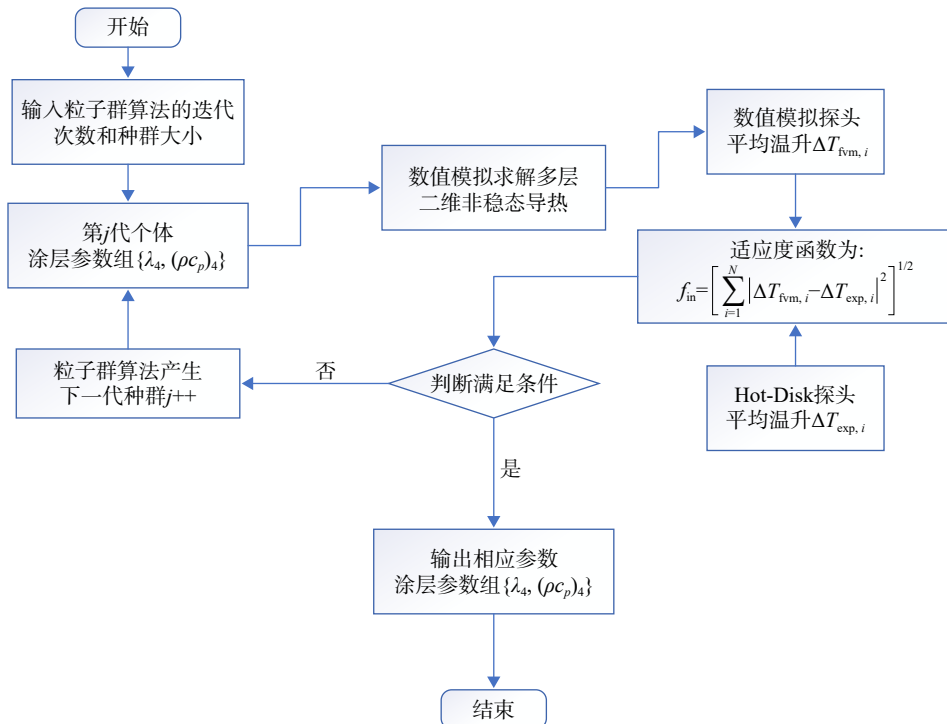


图3 导热系数反演辨识流程图

Fig. 3 Flow chart of the inverse identification process for the thermal conductivity.

$$r = R, 0 \leq z \leq Z \quad T = T_{\text{amb}} \quad (6)$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq R_1 \quad -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{P}{A_s} \quad (7)$$

式中 R 为样件总半径, Z 为总厚度 ($h + \Delta h$), R_1 为探头半径, A_s 为探头面积, P 为施加功率, T_{amb} 为测试环境温度。

2 涂层导热性能参数反演辨识方法

针对涂层-基体一体化双层结构, 通过 Hot-Disk 测量难以直接获得涂层材料的导热系数。本文基于实验测试时所施加功率、温升响应数据、几何信息以及基体热物性等, 结合多层结构的导热过程, 建立涂层导热系数的反演辨识模型; 即利用传热学中反问题求解思路^[18]。具体反演辨识流程如图3所示。

首先, 通过样件实验测试, 可以得到 Hot-Disk 探头在一定加载功率下的温升响应 (基准实验值), 即 $\{\Delta T_{\text{exp},1}, \Delta T_{\text{exp},2}, \dots, \Delta T_{\text{exp},N}\}$, N 表示温升监测时间点。再结合粒子群算法产生待定参数 $\{\lambda_4, (\rho c_p)_4\}$, 对所建立的二维非稳态导热模型采用有限体积法求解, 获得其模拟过程的探头温升, 即模拟值 $\{\Delta T_{\text{fm},1}, \Delta T_{\text{fm},2}, \dots, \Delta T_{\text{fm},N}\}$ 。由此建立适应度函数 f_{in} :

$$f_{in} = \left[\sum_{i=1}^N |\Delta T_{fvm,i} - \Delta T_{exp,i}|^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

最后,通过优化算法寻找最优数值,辨识出涂层材料的物性参数数据。其中,控制方程的离散采用全隐式离散格式,边界条件采用附加源项法,求其方程的解采用双共轭梯度法,每个时间步下收敛残差为 10^{-12} 。

3 涂层材料导热性能参数反演方法可靠性分析

3.1 正问题计算验证

正问题求解的实验验证采用如下思路:采用基体上加装一层已知物性的材料,形成双层结构,通过 Hot-Disk 测量获得其探头温升数据;同时,通过数值模拟进行直接比较验证。这里选用的薄层材料为导热系数 $1.32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、厚度 5 mm 的石英玻璃,基体为导热系数 $9.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、厚度 25 mm 的合金材料。图 4 为基体加装薄层石英玻璃来模拟涂层-基体双层结构的实验测试。

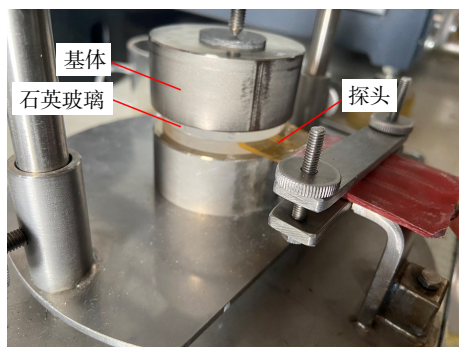


图 4 模拟涂层-基体双层结构的实验测试

Fig. 4 Experimental test of the simulated coating-substrate double-layer structure

图 5 为 4 组不同加热功率下,实验和数值模拟探头的平均温升曲线及绝对偏差(δ)。可以看出,整体趋势和数值基本一致,数值模拟结果相对于实验温度数值略微偏低,最大偏差为 0.12 K (2.6%);这是因为数值模拟中没有考虑石英玻璃与基体之间的接触热阻。

3.2 导热系数反演辨识计算验证

首先,针对无涂层已知物性的基体材料,利用反演辨识的方法获取导热系数进行算法校验。基体导热系数和热扩散率分别 $9.35 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $2.628 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。基体样品半径 $R=25 \text{ mm}$ 、厚度 h 选用 15 mm 和 25 mm 。反演辨识过程中使用的粒子群算法的种群数目为 100,迭代收敛判据为适

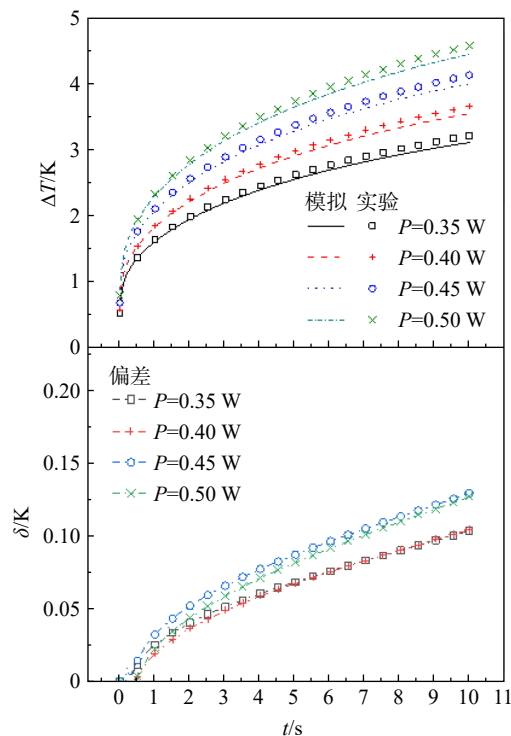


图 5 探头温升数值模拟与实验结果比较

Fig. 5 Comparison between numerical and experimental results of the probe temperature rise

应度函数小于 1×10^{-2} 或者迭代步数超过 200 步。无涂层基体材料导热系数中选定的反演范围为 $1 \sim 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

导热系数反演辨识结果如图 6 所示,对于基底材料而言,10 组测试反演辨识得到的导热系数结果基本都在 $9.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 附近,说明反演辨识基底材料导热系数时粒子群算法没有掉到局部最优解中。最后反演辨识获得的结果偏差都小于 4%。厚度为 25 mm 的基底测量获得的导热系数的偏差较厚度为 15 mm 的基底小,这是由于测试过程中厚度较薄的物体热量容易穿透到外表面,不符合图 2 所示边界条件造成。最后,将获得的导热系数进一步模拟探头温升曲线与实验结果比较,见图 7,两者吻合很好。

为验证双层结构下的导热系数反演可靠性,同样采用文中第 3.1 节所述的材料组合。通过实验获得探头温升曲线,反演辨识石英玻璃导热系数。因接触热阻的存在,在反演辨识时需增加接触热阻这个辨识参数,其在方程中主要体现为下式:

$$-n_d \cdot q_d = -\frac{1}{R_{eq}} (T_u - T_d) \quad (9)$$

$$-n_u \cdot q_u = -\frac{1}{R_{eq}} (T_d - T_u) \quad (10)$$

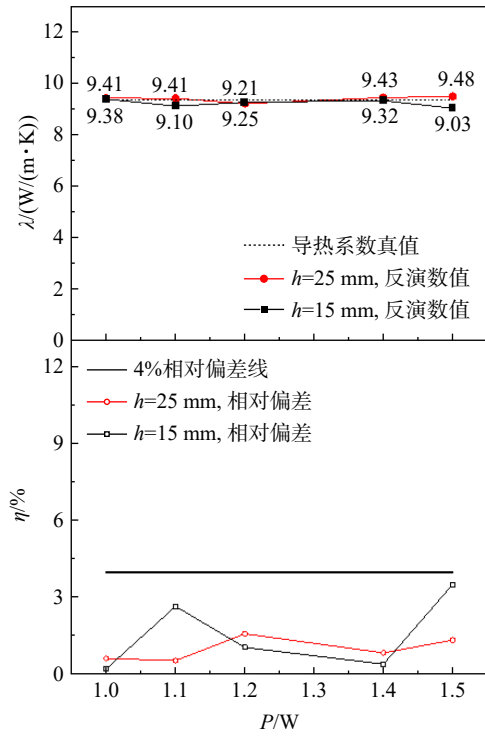


图6 不同加热功率下反演结果

Fig. 6 Identified results under different heating powers

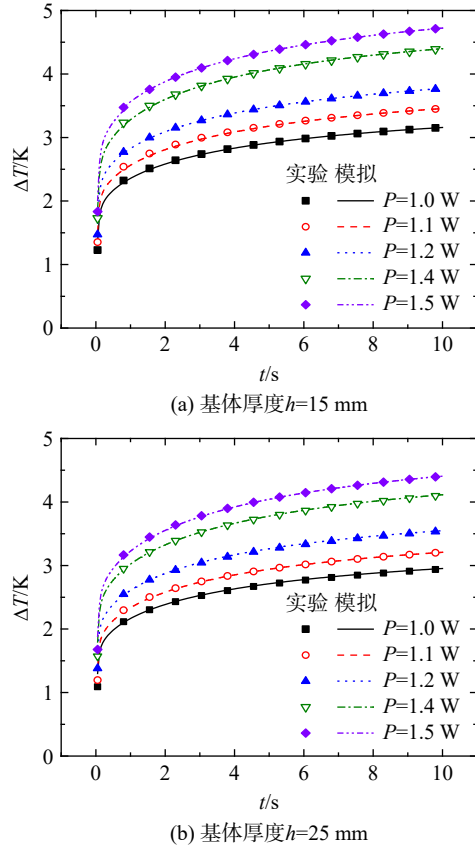


图7 不同情况下探头温升曲线

Fig. 7 Probe temperature rise curve under different conditions

式中下标 d 表示涂层与基体接触的下侧, 下标 u 表示上侧, R_{eq} 表示接触热阻大小, q 表示热流密度, n 表示外矢量方向。

反演辨识中粒子群算法的种群数目和收敛判据与文中第 3.2 节所述内容相同。反演辨识涂层材料导热系数的选定范围为 $0.1 \sim 5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。图 8 为实验测试探头温升曲线与数值模拟得到的探头温升结果, 两者重合良好, 反演过程达到收敛。5 mm 厚玻璃导热系数反演辨识结果如图 9 所示,

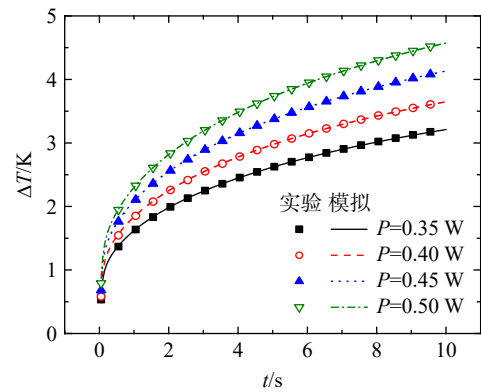


图8 双层结构时不同情况下探头温升曲线

Fig. 8 Probe temperature rise curve under different conditions for double-layer structure

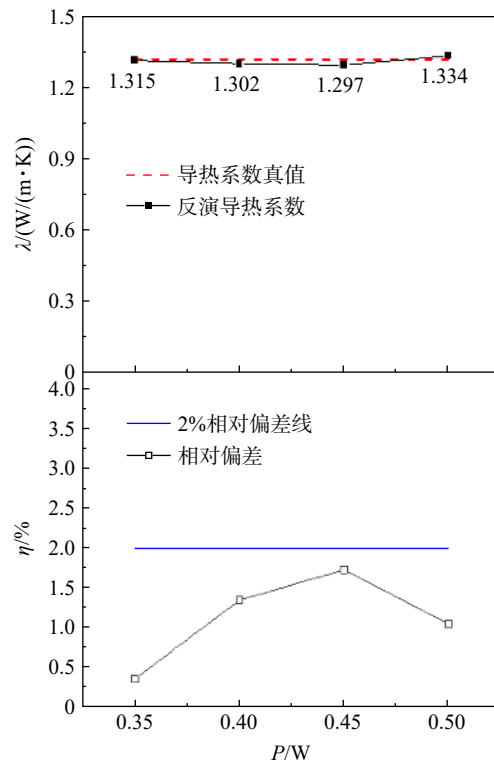


图9 双层结构时反演模型验证比较

Fig. 9 Validation of the inversion model for double-layer structure

四组测试反演辨识得到的导热系数结果基本都在 $1.31 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 附近,说明反演辨识基底材料导热系数时粒子群算法没有掉到局部最优解中。同样在图 9 中可以看出,所辨识得到的导热系数与真值相对偏差小于 2%。得到石英玻璃与基体的接触热阻为 $0.0125 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 。通过该实验过程证明了该方法对于测量涂层材料导热系数的可行性。

对于制备涂层-基底一体化材料,其制备工艺常采用电镀或者喷涂,形成过程中内部结构十分致密,所以对于制备好的涂层材料的而言,可以不考虑涂层与基底材料之中的接触热阻。

3.3 灵敏度分析

3.3.1 涂层导热系数对反演辨识方法精度的影响

文中第 3.1 节和第 3.2 节中因缺少已知物性涂层材料,故使用厚度为 5 mm 的玻璃来代替涂层,以验证测试方法的可靠性;本节重点关注较真实情况下涂层材料导热系数对其反演辨识方法的精度的影响。选定基底尺寸材料与上述一致,但其涂层材料的厚度 $\Delta h = 300 \mu\text{m}$ 。在探头不同加热功率前提下,研究了涂层导热系数为 0.1 、 1.0 、 5.0 、 $10.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 五种情况的涂层材料对其反演精度的影响。在数值实验中,式(8)中的实验温升测量数据可以由数值模拟数据加上一定的随机误差来模拟。

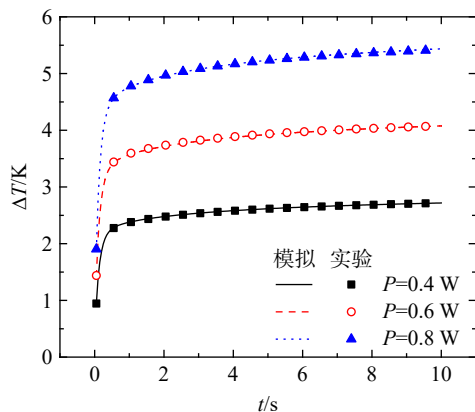
$$\Delta T_{\text{exp},i} = \Delta T_{\text{fvm},i} + \sigma^2 \times R_{\text{and}} \quad (11)$$

其中 σ 为温升测量的方差,Hot-Disk 的探头为双螺旋结构,测量精度较高,设置为 1%, R_{and} 为 $0 \sim 1$ 的高斯分布随机数。

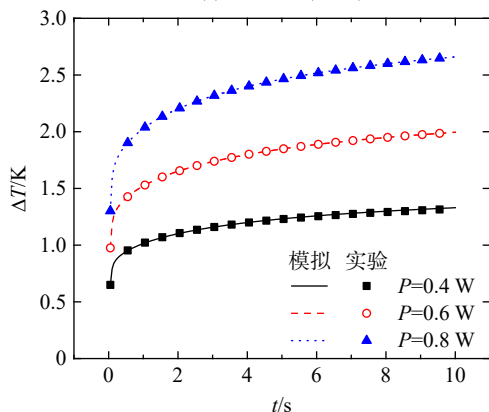
同样的,反演辨识中粒子群算法的种群数目和收敛判据与文中第 3.2 节所述内容相同。反演辨识涂层材料导热系数的选定范围为 $0.01 \sim 20 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。图 10 为数值实验测试探头温升曲线与数值模拟得到的探头温升结果,其迭代步数超过 200 步后残差保持不变,即粒子群算法进入收敛条件。

涂层材料导热系数辨识偏差结果如图 11 所示,五种情况下反演辨识获得的涂层材料导热系数偏差基本都保持在 4% 以内;并且,在导热系数较低的情况下,通过该方法反演辨识获得的涂层材料的导热系数非常接近真实值。但是随着涂层材料导热系数的不断增加,反演辨识获得的涂层材料的导热系数的偏差逐渐增大;在涂层导热系数超过 $10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 情况下时,反演辨识获得的涂

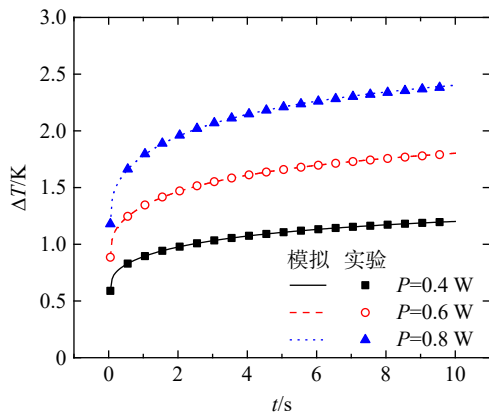
层材料导热系数的偏差较大。



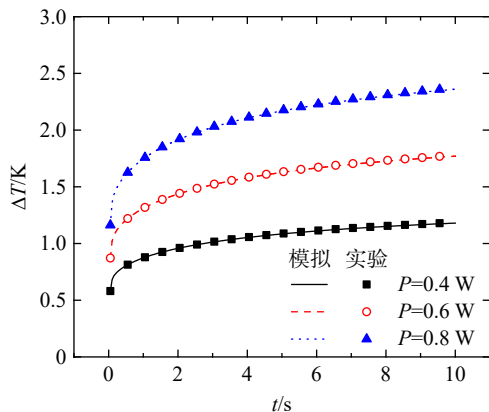
(a) $\lambda=0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$



(b) $\lambda=1.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$



(c) $\lambda=5.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$



(d) $\lambda=10.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

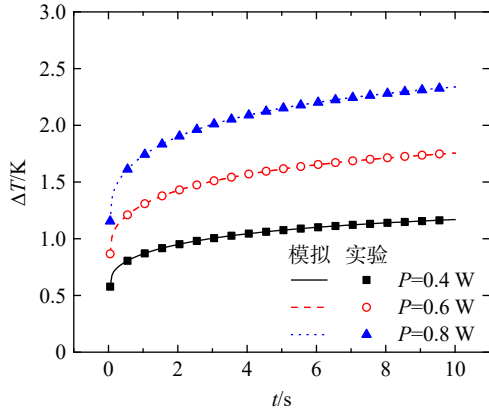


图 10 不同涂层导热系数情况下探头温升曲线图

Fig. 10 Probe temperature rise curve under different thermal conductivity conditions for the coating

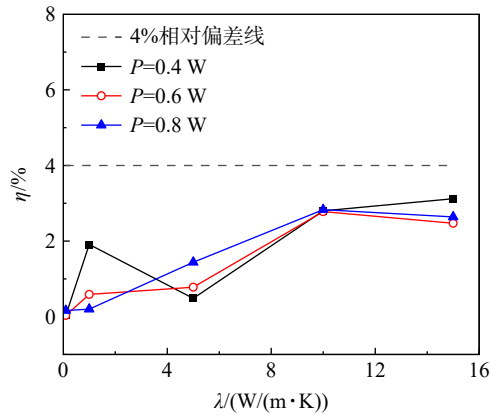


图 11 涂层不同导热系数下反演模型相对偏差

Fig. 11 Relative deviation of inversion model under different thermal conductivities of coating

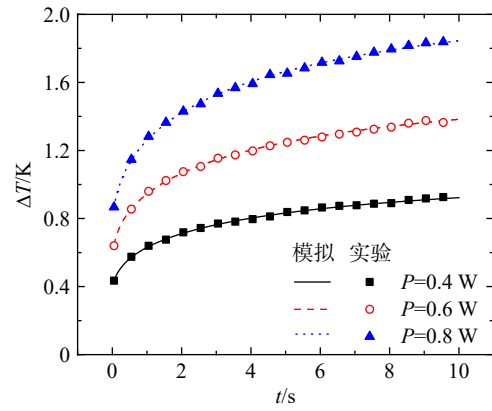
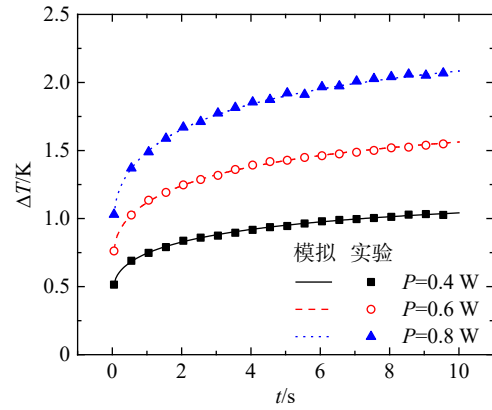
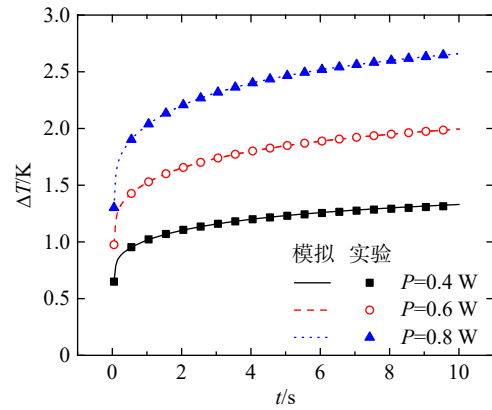
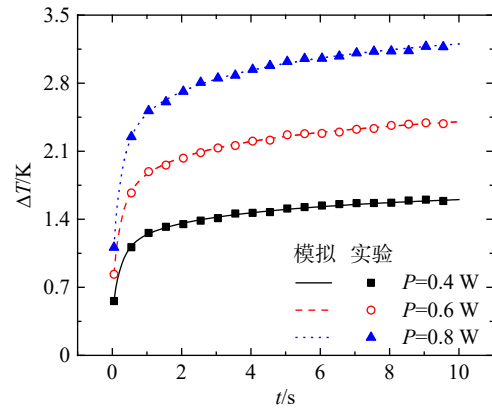
3.3.2 涂层厚度对反演辨识方法精度的影响

与文中第 3.3.1 节使用的基底材料尺寸相同,但其涂层材料的导热系数设置为 $1.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。在探头不同加热功率前提下,研究了涂层厚度 Δh 为 20、100、300、500 μm 和 1000 μm 五种情况的涂层材料厚度对其反演精度的影响。

反演辨识涂层材料导热系数的选定范围为 $0.01 \sim 3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。图 12 为数值实验测试探头温升曲线与数值模拟得到的探头温升结果,其迭代步数超过 200 步后残差保持不变,即粒子群算法达到收敛条件。

反演辨识不同厚度情况下涂层材料导热系数的偏差结果如图 13 所示。数值实验结果显示,虽然随着涂层厚度的不断增加,反演辨识方法的偏差有略微增加,但反演辨识获得导热系数总体偏差都在 4% 以内;对于实际应用过程该偏差可以被接受。受限于加工工艺,在涂层材料的厚度在

极小的情况下时,造成反演偏差的不是反演过程,而是真实情况下涂层厚度的测量结果。

(a) $\Delta h=20 \mu\text{m}$ (b) $\Delta h=100 \mu\text{m}$ (c) $\Delta h=300 \mu\text{m}$ (d) $\Delta h=500 \mu\text{m}$

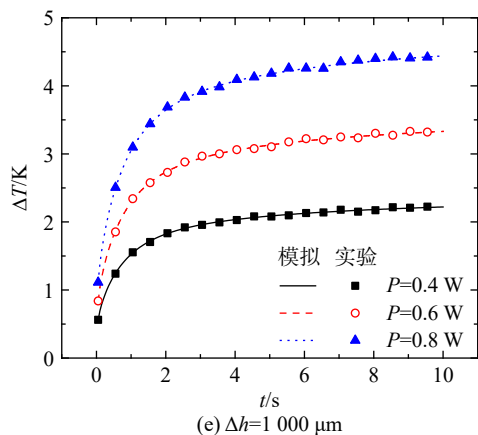


图 12 涂层不同厚度情况下探头温升曲线图

Fig. 12 Probe temperature rise curve under different coating thickness

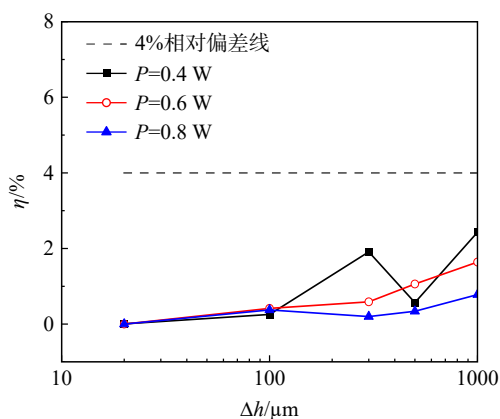


图 13 涂层不同厚度下反演模型相对偏差

Fig. 13 Relative deviation of inversion model under different coating thicknesses

4 一种隔热涂层导热系数反演辨识

针对一种隔热涂层高温下导热系数进行测试获取(基体厚度为 25 mm、涂层厚度为 0.27 mm)。在反演辨识过程中,无论是常温情况还是高温情况,都将测试过程先稳定在一个固定温度(高温模块稳定时间需超过 2 h),也就是保持一个较长的均温环境,再通过给探头一定的加热功率,通过获取探头温升曲线反演涂层材料热物性参数。为了保护加热、测温探头,即给定的加热功率较小,控制探头温升在一定范围内;测试过程中的涂层材料的物性参数随温度基本不变,因此在测试反演过程中可认为涂层材料物性参数为固定值。与此同时,在高温测试过程中,由于停留在高温情

况下时间较长,聚酰亚胺探头易损坏,因此,本文实验在高温情况下使用的实验探头为高温云母探头,其示意图如图 14 所示。



图 14 高温测量用的云母探头

Fig. 14 Mica probe for high-temperature test

对于高温情况下探头温升的获取主要受到加热炉和探头的限制,其加热炉的最高加热功率和探头的最高耐热温度决定了测试了温度范围。目前,采用 TPS2500S 实验仪器配套的加热炉最高加热温度为 1 100 K,但实验中为保护云母探头,增加其使用寿命,故对其只加热到 773 K。因此,本文最高只测量反演到了 773 K 情况下涂层材料导热系数。

高温测试模块安装示意如图 15 所示。反演辨识涂层材料导热系数的选定范围为 0.01~5 W/(m·K)。图 16 为实验测试探头温升曲线与数值模拟得到的探头温升结果,两者吻合良好。反演辨识获得常温至 773 K 下隔热涂层导热系数结果见表 1。其隔热涂层的导热系数随温度增高有所增大,变化范围 0.18~0.29 W/(m·K)。

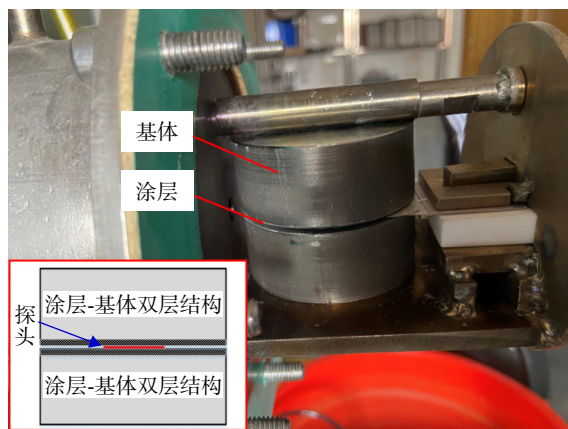


图 15 高温测试时样品安装示意图

Fig. 15 Installation layout of sample at high-temperature test

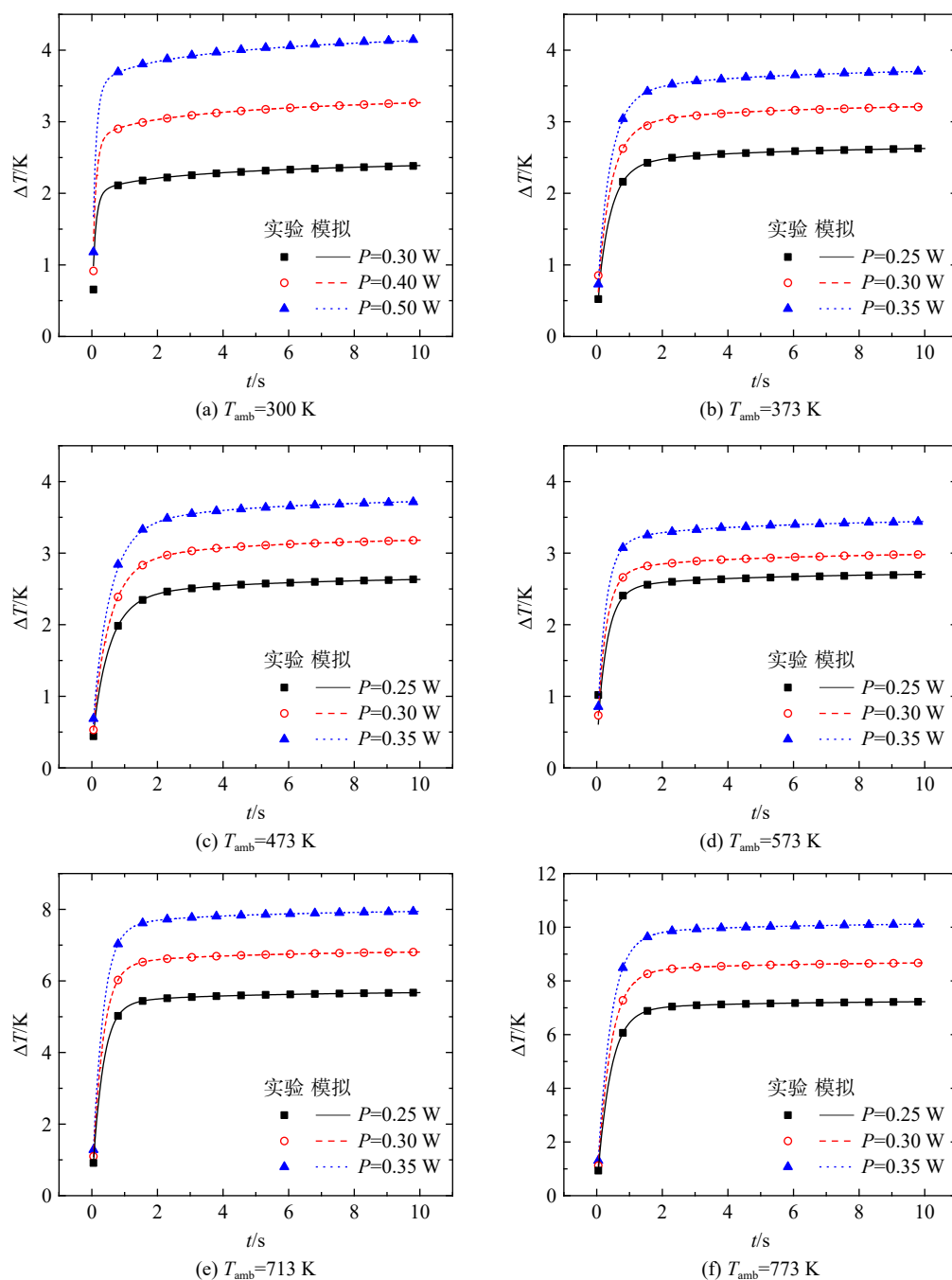


图 16 一种隔热涂层-基体双层结构不同测试温度下探头升温曲线

Fig. 16 Probe temperature rise curve under different temperatures for an insulation coating-substrate double-layer structure

表 1 隔热涂层材料在不同温度下的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of the insulation coating at different temperatures

T_{amb}/K	$\lambda/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$			均值
	P_1	P_2	P_3	
300	0.184	0.179	0.180	0.181
373	0.210	0.203	0.205	0.206
473	0.219	0.204	0.212	0.217
573	0.241	0.235	0.225	0.225
713	0.248	0.245	0.232	0.242
773	0.292	0.285	0.289	0.292

其中, 常温时探头加热功率 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 0.30、0.40、0.50 W, 对于 373~773 K, P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 0.25、0.30、0.35 W。

5 结 论

针对涂层-基体一体化双层结构, 为获取其中涂层材料导热性能参数, 基于 Hot-Disk 测试的瞬态温度响应结果, 建立了结合二维非稳态导热、粒子群优化算法的涂层导热系数反演辨识方法, 进行了实验和数值论证。主要结论如下:

1) 本文所提出的基于瞬态温升反演辨识涂层导热系数的方法,能够准确获取涂层-基体一体化结构中涂层的导热系数。

2) 测试反演辨识方法随涂层材料的导热系数与涂层厚度增大精度略有下降,但偏差仍在4.0%以内。

3) 通过测量一种隔热涂层-基体双层结构,获得涂层常温至 773 K 的导热系数,数值范围为 0.18~0.29 W/(m·K)。

参考文献:

- [1] 王志平, 费宇杰, 刘延宽. 热障涂层失效机理、改进方法及未来发展方向[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 126-137.
WANG Zhiping, FEI Yujie, LIU Yankuan. Failure mechanism, improvement method and future development direction of thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 126-137. (in Chinese)
- [2] 王利平, 张靖周, 姚玉. 敷设热障涂层气冷叶片温度分布数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 357-364.
WANG Liping, ZHANG Jingzhou, YAO Yu. Numerical investigation on temperature distribution of an air-cooled and thermal barrier coating blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 357-364. (in Chinese)
- [3] 付伟, 黄国胜, 程旭东, 等. NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ复合喷涂层的微观结构与性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 61-67.
FU Wei, HUANG Guosheng, CHENG Xudong, et al. Microstructure and properties of NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ composite coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 61-67. (in Chinese)
- [4] 周雳, 邢志国, 王海斗, 等. 等离子喷涂金属/陶瓷梯度热障涂层研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 122-131.
ZHOU Li, XING Zhiguo, WANG Haidou, et al. Research progress of metal/ceramic gradient thermal barrier coatings by plasma spraying[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 122-131. (in Chinese)
- [5] 王莉莉, 王伟, 谭世磊, 等. 热障涂层制备方法的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(18): 15-18.
WANG Lili, WANG Wei, TAN Shilei, et al. Research on preparation methods of thermal barrier coatings[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(18): 15-18. (in Chinese)
- [6] 张建生, 杨君友, 朱文, 等. 薄膜热导率测试方法研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(7): 103-107.
ZHANG Jiansheng, YANG Junyou, ZHU Wen, et al. Research advances in the measurement for the thermal conductivity of thin solid films[J]. Materials Reports, 2010, 24(7): 103-107. (in Chinese)
- [7] ZHANG H, LI Y M, TAO W Q. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 1634-1644.
- [8] AI Q, HU Z W, WU L L, et al. A single-sided method based on transient plane source technique for thermal conductivity measurement of liquids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 109: 1181-1190.
- [9] SOLÓRZANO E, REGLERO J A, RODRÍGUEZ-PÉREZ M A, et al. An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25/26): 6259-6267.
- [10] DAOUAS N, FGURI A, RADHOUANI M S. Solution of a coupled inverse heat conduction-radiation problem for the study of radiation effects on the transient hot wire measurements[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1766-1778.
- [11] GUSTAFSSON S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurement of solid materials[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(3): 797-804.
- [12] HE Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1 theoretical considerations[J]. Thermochimica Acta, 2005, 436(1/2): 122-129.
- [13] HE Y. Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 2 characterization of thermal greases[J]. Thermochimica Acta, 2005, 436(1/2): 130-134.
- [14] MIHIRETIE B M, CEDERKRANTZ D, ROSÉN A, et al. Finite element modeling of the hot disc method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 216-223.
- [15] GUSTAVSSON J S, GUSTAVSSON M K, USTAFSSON S E. On the use of the hot disk thermal constants analyser for measuring the thermal conductivity of thin samples of electrically insulating materials[J]. Thermal Conductivity, 1997, 62(3): 116-122.
- [16] ZHANG H, LI M J, FANG W Z, et al. A numerical study on the theoretical accuracy of film thermal conductivity using transient plane source method[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 72(1): 62-69.
- [17] KERR L, PAN Y, DINWIDDIE R, et al. Thermal conductivity of coated paper[J]. International Journal of Thermophysics, 2009, 30(2): 572-579.
- [18] ALIFANOV O M. Inverse heat transfer problems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.

(编辑: 张 雪)