

文章编号: 1000-8055(2024)11-20220425-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220425

基于激光加热的各向异性材料导热系数 瞬态测试分析

郑宁悦, 陈 学, 孙 创, 夏新林

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对激光加热试样的瞬态过程, 建立各向异性材料的传热模型, 讨论不同激光功率及试样厚度下, 加热时长、光斑直径等参数对典型材料温升的影响, 通过分析确定激光参数及样件尺寸的合理范围。进一步, 结合基于温升的导热系数反演辨识模型, 对该瞬态测试方法的敏感性及其影响因素进行分析。结果表明: 不考虑实验中温度测试误差时, 对导热系数、加热功率及表面发射率同时反演辨识, 反演偏差均小于 2%。而在实际测试过程中, 初始温度场均匀性和发射率的影响较大。当测试温度 800 K、测温误差为 1% 时, 导热系数反演精度高(小于 2%), 表面发射率偏差较大。而当材料发射率已知, 材料初始温度场非均匀性为 0.13% 时, 对导热系数及初始温度场修正系数同时反演, 轴向及径向导热系数的反演偏差可明显降低。

关 键 词: 各向异性材料; 导热系数; 激光激励; 粒子群算法; 瞬态测试

中图分类号: V19; TK124

文献标志码: A

Analysis on transient test of thermal conductivity of anisotropic materials based on laser heating

ZHENG Ningyue, CHEN Xue, SUN Chuang, XIA Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Considering the transient process of laser heating sample, the heat transfer model of anisotropic material was established. The influences of heating time, spot diameter and other parameters on the temperature rise of typical materials under different laser power and sample thickness were discussed. The reasonable range of laser parameters and sample size was determined by analysis. Furthermore, the sensitivity and influencing factors of the transient test method were analyzed by combining the identification model of thermal conductivity inversion based on temperature rise. The results showed that the inversion errors of thermal conductivity, heating power and surface emissivity were less than 2% without considering the temperature test error in the experiment. In the actual test process, the initial temperature field uniformity and emissivity had a greater impact. When the test temperature was 800 K and the error was 1%, the inversion accuracy of thermal conductivity was high (less than 2%) and the deviation of surface emissivity was large. When the emissivity of material was obtained and the non-uniformity of initial temperature field was 0.13%, the deviations of axial and radial thermal conductivity can be reduced obviously by simultaneous inversion of thermal conductivity and correction coefficient of initial temperature field.

收稿日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(51806046); 黑龙江省博士后资助(LBH-Z18081)

作者简介: 郑宁悦(1998—), 女, 硕士生, 主要从事高温热防护结构的传热特性研究。E-mail: NingyueZheng@163.com

通信作者: 陈学(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事高温耦合传热和红外辐射传输研究。E-mail: hit_chenxue@hit.edu.cn

引用格式: 郑宁悦, 陈学, 孙创, 等. 基于激光加热的各向异性材料导热系数瞬态测试分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20220425. ZHENG Ningyue, CHEN Xue, SUN Chuang, et al. Analysis on transient test of thermal conductivity of anisotropic materials based on laser heating[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20220425.

Keywords: anisotropic materials; thermal conductivity; laser excitation;
particle swarm algorithms; transient tests

近年来,诸如多孔泡沫、夹芯蜂窝、多层复合材料等功能材料及结构,具有优良的耐热性和抗变形能力,已广泛应用于飞行器热防护^[1]、太阳能热利用^[2]、空间卫星技术^[3]等领域。此类材料通常有比较明显的各向异性特征,导热系数作为评价其传热性能的重要参数之一^[4-5],因而获取此类材料或结构的导热系数已成为一个亟待解决的问题。

各向异性材料导热系数的实验测量方法主要有稳态测试法、瞬态测试法两类。稳态测试法主要是基于傅里叶定律,带入实测温度与热流数据可直接计算得到测试方向的导热系数。瞬态测试法主要基于测试原理构建其传热过程数理模型,通过控制方程求解获得各向异性材料的导热系数。另外,基于稳态或瞬态测试物理过程,结合实测温度数据和物理控制方程,采用各类数值优化算法,进行导热系数反演辨识的方法也得到了发展和大量应用,其中优化算法如遗传算法^[6]、PSO (particle swarm optimization) 优化算法^[7]、模拟退火算法^[8]等。实验测试中,温度的获取方式主要基于热学信息、光学信息、电学信息等方法。平板法^[9]、热线法^[10]、光热辐射法(PTR, photothermal radiometry)^[11]和闪光法等主要是采用热电偶、热像仪等直接测量温度信号。而瞬态时域热反射法(TDTR, time-domain thermoreflectance)、瞬态频域热反射法(FDTR, frequency domain thermoreflectance)^[12-13]、光热偏转法(PTD, photothermal deflection)^[14-15]、瞬态平面热源法(TPS, transient plane source)^[16-17]以及 3ω 法^[18]等是基于光、电等间接信号与温升内在关联以获得温度数据。

上述测量方法中,保护平板法、瞬态热线法及TPS方法等,耗时长且难以做到无损测量,对于各向异性材料需要多角度、分步测量^[19-21]。而通过折射率、反射率等光电信号获取各向异性材料导热系数的方法(如TDTR、FDTR)^[22-24]对材料光电敏感性、材料表面以及测量设备要求高,适用范围窄;同时TDTR、FDTR和 3ω 方法通常用于测量薄膜的面内热导系数^[25]。

实验测量各向异性材料导热系数的关键在于获得热源激励后的温度信息。Chanda等^[26]提出了一种在稳态条件下获取的温度数据结合人工神

经网络计算的方法,评估了碳纤维面板和层状铝芯蜂窝复合材料主轴方向的热导系数,误差小于10%。侯亚东等^[27]利用红外热像仪对SiC/SiC平板复合材料的热侧壁面温度场进行测量、分析了复合材料的气膜冷却效果。Adamczyk等^[28-29]采用激光器进行加热,利用红外热像仪测量表面温度,采用Levenberg-Marquardt算法反演获得室温下碳纤维板两个主轴方向的导热系数。Kim等^[14]基于背面光热偏转法的测试原理,对三维非稳态导热方程应用复变换,采用相位曲线法得到了透明各向异性材料蓝宝石玻璃的导热系数。在高温测量方面,Sans等^[30]通过辐射加热的方法获得了1373 K的实验环境,采用激光加热试样表面,反演获得热扩散系数及陶瓷泡沫面内及垂直面的等效导热系数。

采用激光作为激励热源,结合试样温度响应与反演算法获取导热系数的方法成为一种趋势。但其中,瞬态反演时,初场温度非均匀性和材料表面发射率对测试结果有较大影响。本文针对以激光激励方式获取各向异性材料导热系数的测试过程,建立正交各向异性材料的二维轴对称传热模型,分析激光加热过程中不同导热材料的温度响应情况;同时基于表面温度的瞬态变化数据,结合粒子群优化算法,反演辨识获得其导热系数;对该方法进行了敏感性和适用性分析,探究了材料初始温度场非均匀性和表面发射率对导热系数反演精度的影响。

1 各向异性材料导热系数的测试分析方法

图1为基于激光加热的各向异性材料导热系数测试方法流程。针对基于激光加热的测试过程,首先建立二维各向异性导热模型(正问题),采用有限元方法求解温度数据。前期根据导热系数大致量级,预先模拟分析,初步确定激光参数和样品的几何尺寸。再基于实验测试得到的温升数据,采用粒子群算法进行迭代优化(反问题求解),最终获得材料正交方向的真实导热系数。

根据傅里叶定律,各向异性材料中热流张量可表示为

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

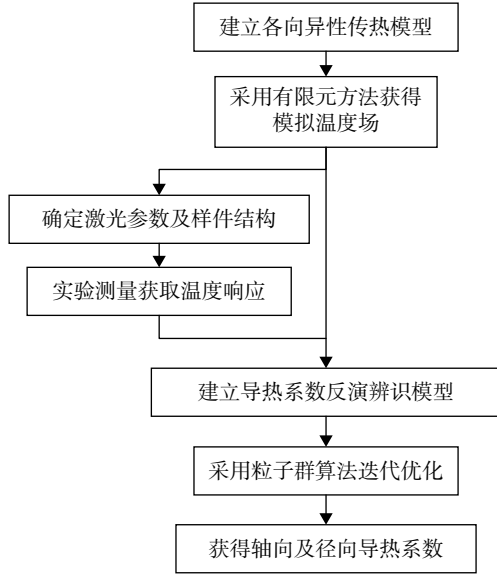


图 1 测试方法主要流程图

Fig. 1 Flow chart of test analysis method

其中各向异性导热张量 $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix}$; λ_{ij} 为导热系数分量, $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ 。

针对正交各向异性的圆柱试样, 其柱坐标系 (r, z) 下无内热源的二维轴对称非稳态各向异性导热控制方程为

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

式中 λ_r 为径向导热系数, λ_z 为轴向导热系数。

图 2 所示为激光光源加热下圆柱体块状试样的几何模型以及圆柱截面内的二维轴对称瞬态传热模型。其中 H 为试样厚度; R 为试样半径; R_1 为光源半径。该传热模型包含以下假设:

1) 试样初始置于恒温、静止的环境中, 其内部温度场均匀分布且不考虑表面的对流换热。

2) 在整个传热过程中, 激光热流未穿透试样侧壁面。试样整体温升在一定阈值范围内 ($\Delta T \leq 10 \text{ K}$), 因此不考虑传热过程中物性参数的变化。

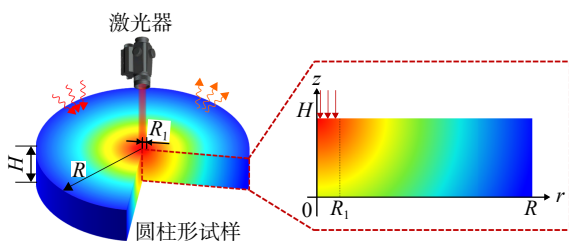


图 2 圆柱形试样二维轴对称传热模型

Fig. 2 Two-dimensional axisymmetric heat transfer model of cylindrical specimen

3) 试样表面视为漫发射灰体, 试样外部气体视为透明体。

当激光加热时, 试样上表面光斑半径内的边界条件为定热流边界, 光斑半径外为表面对环境辐射边界; 激光停止加热后, 试样所有表面边界条件为表面对环境辐射边界。则初始条件及边界条件可表示为

$$\tau = 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq H, T = T_e \quad (3)$$

$$z = 0, 0 \leq r \leq R, -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = -\sigma \varepsilon (T_e^4 - T^4) \quad (4)$$

$$\begin{cases} z = H, \\ 0 \leq r \leq R_1, -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{F(\tau) \cdot q_s}{\pi R_1^2} - \sigma \varepsilon (T_e^4 - T^4) \\ R_1 \leq r \leq R, -\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} = -\sigma \varepsilon (T_e^4 - T^4) \end{cases} \quad (5)$$

$$r = 0, 0 \leq z \leq H, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$r = R, 0 \leq z \leq H, T = T_{\text{const}} \quad (7)$$

式中 r 表示半径 (m); q_s 为激光加热功率 (W); τ_1 为加热时间 (s); σ 为黑体辐射常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$); ε 为试样表面发射率; T 为试样温度 (K); T_e 为环境温度 (K); T_{const} 为试样侧壁面温度 (K); ρ 为试样密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c 为试样比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); t_1 为激光加热时间 (s); 激光输出信号为矩形波, 表示为

$$F(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 < \tau \leq t_1 \\ 0, & \tau \leq 0 \text{ or } \tau > t_1 \end{cases} \quad (8)$$

在试样表面布置的多个测点, 获取各个测点在不同时刻的实测温升记为 $\{\Delta T_{\text{exp},ij}\}$, 其中 $i=1, 2, \dots, m$; m 为时间步; $j=1, 2, \dots, n$; n 为测温点数量。根据粒子群优化算法确定待辨识参数值, 带入上述数学物理模型, 进行瞬态传热过程数值模拟, 获得试样表面温升变化模拟值记为 $\{\Delta T_{\text{sim},ij}\}$, 优化迭代使得实测温升与数值模拟温升偏差最小。取实测与数值模拟的瞬态温升值的偏差的平方根作为优化目标函数式 (9), 基于粒子群算法的计算流程图如图 3 所示。

$$J = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\Delta T_{\text{exp},ij} - \Delta T_{\text{sim},ij}|^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

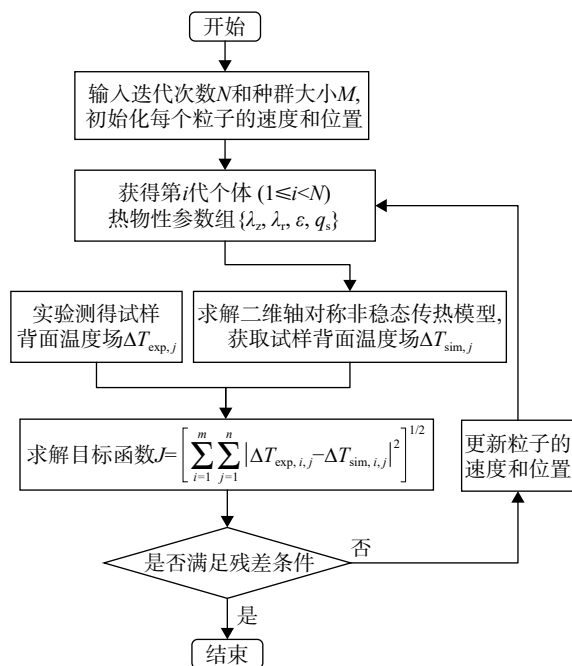


图 3 粒子群算法流程示意图

Fig. 3 Flow diagram of particle swarm algorithms

2 计算可靠性验证

本文采用有限元法 (COMSOL) 进行正问题求解, 粒子群算法进行目标函数优化反演辨识, 最终获得各向异性材料导热系数等参数。采用文献 [31] 圆柱形电池进行各向异性导热计算, 验证本文正问题的求解方法。其中, 模型半径为 0.013 m, 高为 0.065 m, 其余物性参数为 $\rho=2\,285\text{ kg/m}^3$, $c=1\,605\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\lambda_r=\lambda_0=0.2\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_z=300\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 内热源 $\dot{\phi}=80\text{ kW/m}^3$, 侧面与环境为对流换热边界, $h=300\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。电池中部径向稳态温度值如图 4 所示, 由图可知本文数值计算结果与文献高度吻合, 误差小于 1%。

由于低导热系数材料在高温传热计算时, 网格数及时间步长对数值稳定性影响大, 因此本节采用某气凝胶材料 [32] 进行网格及时间无关性验

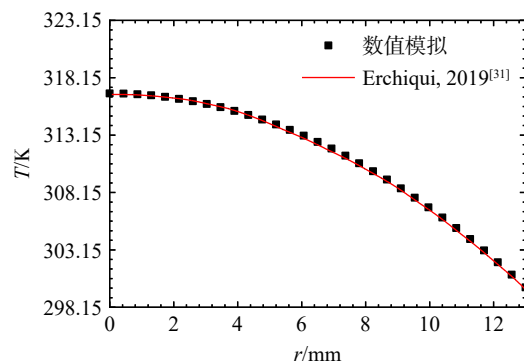


图 4 数值方法验证结果示意图

Fig. 4 Diagram of numerical method verification results

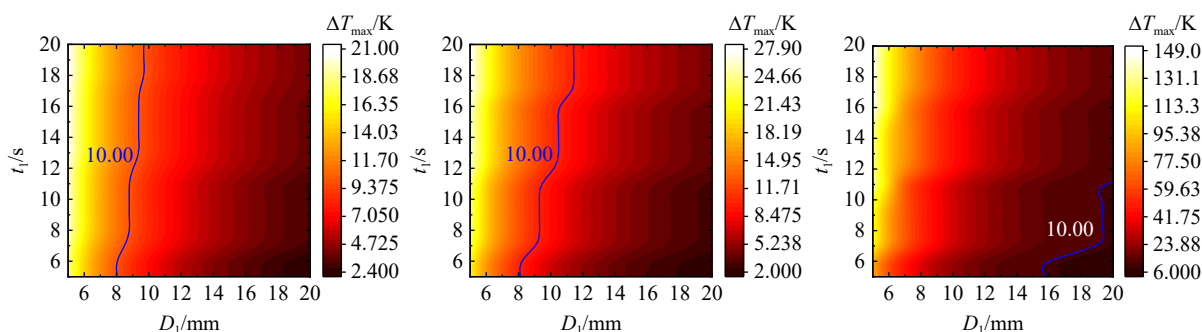
证。结果表明, 当网格数超过 8 803 个时, 时间步长小于 1 s 时, 温升曲线基本重合, 误差小于 0.09%。

3 结果与讨论

3.1 各向异性材料温度响应的影响因素分析

获取各向异性材料导热系数的关键在于测量激光加热后的温度响应, 针对不同导热能力的材料, 测试过程中的激光参数及样件尺寸将会影响温度场的获取, 进而影响导热系数的反演精度。本节讨论了 3 种典型的正交各向异性材料在不同激光加热时间及光斑直径下, 激光加热功率和试样厚度对温度场的影响; 可作为激光参数和样件尺寸选择的主要依据。为反应材料表面最大温升, 记录了激光加热过程中上表面中心点的最高温升 $\Delta T_{\max}$ 如图 5 所示。其中, $q_s=0.8\sim 1\text{ W}$, $H=0.01\text{ m}$, $T_e=800\text{ K}$, $D_1=5\sim 20\text{ mm}$, $t_1=5\sim 20\text{ s}$, 3 种材料分别为氢氧化钙晶体、树脂基碳纤维及陶瓷面板, 其余基本计算参数如表 1 所示。

由图 5 可知, 当光斑直径增大, 加热时间减小时, 3 种材料的最大温升逐渐减小。最大温升受 D_1 影响较大, 受 t_1 的影响较小。随着材料导热系数减小, 样品表面的最大温升逐渐增大。其中, 材料 3 的表面最大温升高达 148.77 K。因此采用

(a) $q_s=1\text{ W}$

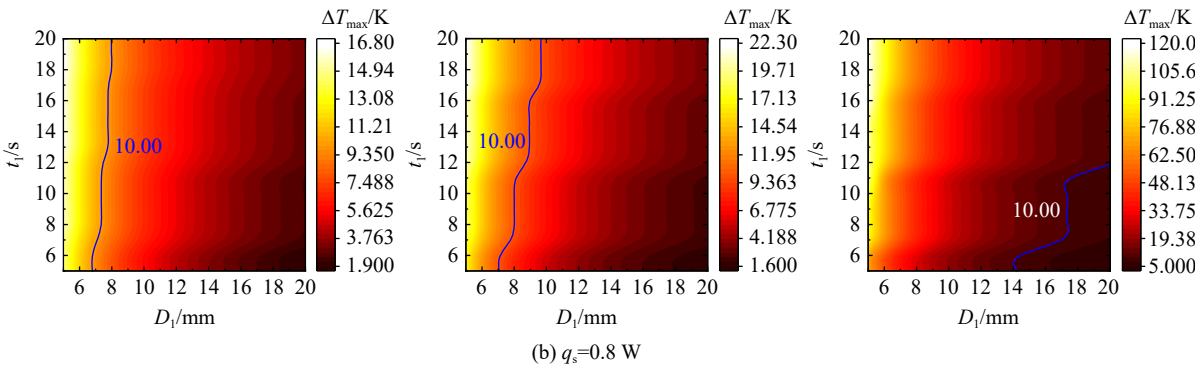


图 5 激光功率不同时材料表面的最大温升云图

Fig. 5 Maximum temperature rise of the material surface at different laser power

表 1 材料的基本热物性参数表^[33-35]

Table 1 Basic thermophysical parameters of materials^[33-35]

材料	$\lambda_z/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	$\lambda_r/(\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$	ε_1	$c/(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K}))$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
1	1.94	16.10	0.86	1 178.00	2 239.00
2	7.81	2.00	0.86	800.00	1 770.00
3	0.80	0.40	0.86	661.03	1 806.44

激光激励低导热系数材料时,应采用较大的光斑直径和较短的加热时间。

为避免温升过高导致导热系数发生变化,本文考察了导热系数随温度变化的 3 种材料。发现当温度变化 10 K 时,3 种材料的导热系数变化均小于 2%^[33-35]。因此,本文将材料受激光加热时最大温升小于 10 K 的激光参数作为测试分析范围。图 5 所示蓝线表示最高温度为 10 K 时 R_1 和 τ_1 的临界组合,则蓝线右侧区域的参数组合满足要求。定义激光激励后最大温升小于 10 K 的温升云图面积占云图总面积的比值为 ξ_1 。经统计,3 种材料的可用激光参数范围 ξ_1 见表 2。当 $q_s=1$ W 时,材料 1 的 ξ_1 最大,可达 72.94%;但材料 3 的 ξ_1 仅为 4.33%,为防止材料因局部温度过高而改变物性,材料 3 的 R_1 不应小于 15.81 mm, τ_1 不应大于 11.18 s,说明对低导热系数材料应减小激光功率。

表 2 不同激光功率下不同材料的最大温升和 ξ_1

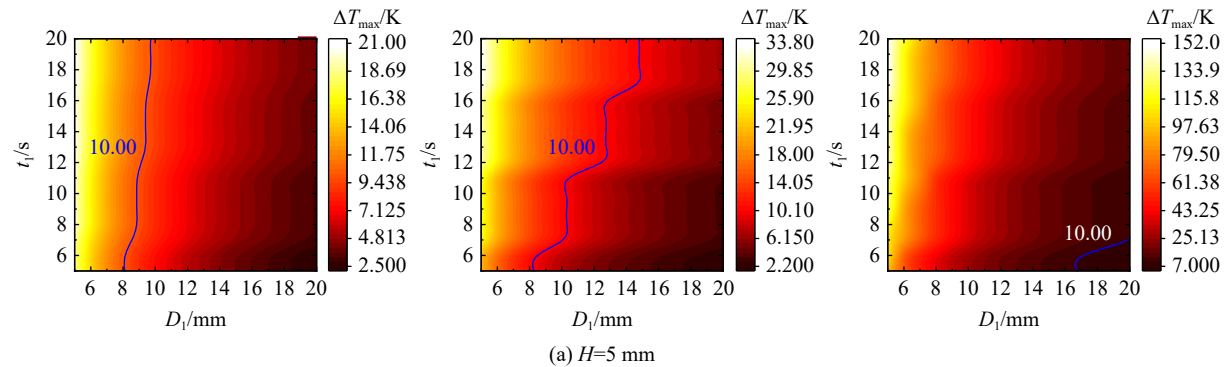
Table 2 Maximum temperature rise and ξ_1 of different materials under different laser power

材料	最大温升/K		$\xi_1/\%$		$\Delta\xi_1/\%$
	$q_s=1$	$q_s=0.8$	$q_s=1$	$q_s=0.8$	
1	20.97	16.77	72.94	83.13	10.19
2	27.82	22.26	66.36	76.12	9.76
3	148.77	119.65	4.33	9.80	5.47

当 q_s 降低到 0.8 W 时,3 种材料的 ξ_1 分别增加了 10.19%、9.76% 和 5.47%,表明降低激光功率可扩大激光参数调节范围。

保持 $q_s=1$ W 不变,本节探究了试样厚度 $H=5$ mm 及 15 mm 时,材料表面温度随加热时间及光斑直径的变化情况,结果如图 6 所示,最大温升及 ξ_1 如表 3 所示。由图可知,随着试样厚度减小,3 种材料表面的最大温升增大。当 $H=5$ mm 时,材料 3 表面的最大温升高达 151.86 K。随着试样厚度增大,蓝线向左侧移动, ξ_1 略微增大。对于材料 2,当试样厚度由 5 mm 增大至 15 mm 时, ξ_1 增大了 13.72%。因此,对于低导热系数材料,可以适当增大试样厚度,从而获取更大的激光调节范围。

由图 6 可知,随着试样厚度减小,3 种材料表



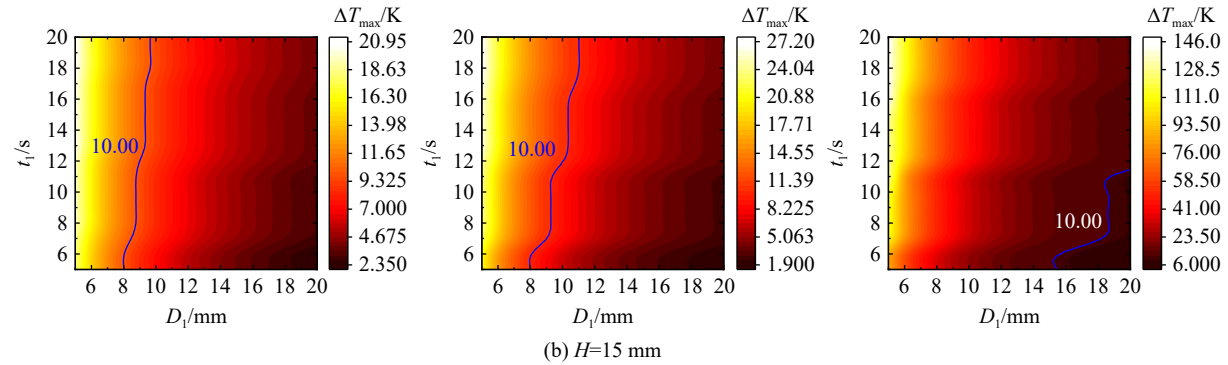


图 6 试样厚度不同时材料表面的最大温升云图

Fig. 6 Maximum temperature rise of the material surface with different sample thicknesses

表 3 不同试样厚度下不同材料的最大温升和 ξ_1

Table 3 Maximum temperature rise and ξ_1 of different materials under different sample thickness

材料	最大温升/ K		$\xi_1/\%$		$\Delta\xi_1/\%$
	H=5 mm	H=15 mm	H=5 mm	H=15 mm	
1	20.99	20.92	72.54	73.17	0.63
2	33.75	27.19	53.76	67.48	13.72
3	151.86	145.88	2.11	6.09	3.98

面的最大温升增大。当 $H=5\text{ mm}$ 时, 材料 3 表面的最大温升高达 151.86 K 。随着试样厚度增大, 蓝线向左侧移动, ξ_1 略微增大。对于材料 2, 当试样厚度由 5 mm 增大至 15 mm 时, ξ_1 增大了 13.72% 。因此, 对于低导热系数材料, 可以适当增大试样厚度, 从而获取更大的激光调节范围。

3.2 导热系数的反演辨识

本节采用正问题传热模型, 基于数值实验数据, 结合粒子群算法进行材料的轴向及径向导热系数的反演辨识。并探究热电偶测温误差及材料初始温度场非均匀性对反演精度的影响。

1) 敏感性分析

在进行参数辨识之前, 开展敏感性分析对辨识结果可靠性进行预测。根据式(10)计算各个待辨识参数的灵敏度 $\chi(a, t)$, 采用 m 个等间距的离散点来表征。待辨识参数 a 分别为轴向导热系数 λ_z 、径向导热系数 λ_r 、表面发射率 ε 及加热功率 q_s , 对应的离散点间距分别为 $\theta_{\lambda_z}=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\theta_{\lambda_r}=1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $\theta_\varepsilon=0.1$ 及 $\theta_{q_s}=0.3\text{ W}$, 参数 Δa 是待辨识参数的微小变化量, 本文取 $\Delta a=0.5\%$ 。考虑材料 2, 轴向及径向导热系数的灵敏度结果如图 7 所示。结果表明, 加热功率的敏感性系数最大, 表面发射率辨识精度最低仅为 0.0004 , 导热系数的辨识精度较好, 其中径向导热系数的精度

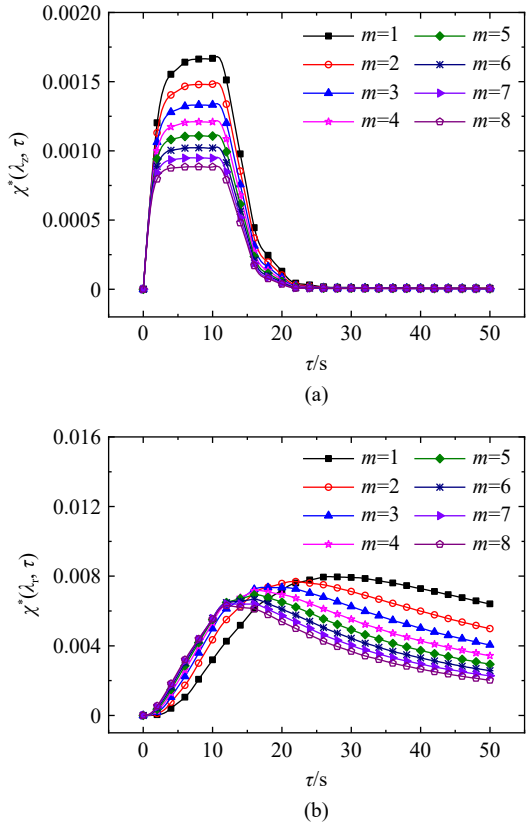


图 7 待辨识参数的灵敏度曲线

Fig. 7 Sensitivity curve of parameters to be identified

相对较高。

$$\chi(a, \tau) = \frac{\partial T(a, \tau)}{\partial a} \cdot \frac{a}{T(a, \tau)} = \frac{T(a + \Delta a, \tau) - T(a - \Delta a, \tau)}{2\Delta a} \cdot \frac{a}{T(a, \tau)} \quad (10)$$

2) 反演辨识的可靠性分析

选取测试温度为 800 K , 即将样件加热到 800 K 且温度均匀, 以此为反演辨识的初始温度场。采用激光进行加热, 监测表面测点温度。选取材料 2 的 4 个热物性参数, 设定待辨识参数 λ_r 、 λ_z 、 ε_1 、

q_s 的搜索范围, 本节将试样表面测点的温升曲线视为实验测量所得测点温升, 即 $\Delta T_{\text{exp},j} = \Delta T_{\text{sim},j}$, 测点温度坐标如表 4 所示。结合粒子群算法对各个测点温升曲线进行迭代优化, 结果如表 5 及图 8 所示。由表 5 可知, 4 个参数的反演精度都很高, 误差均在 2% 以内, 表明采用该方法对导热系数进行辨识获取可靠。由图 8 可知, 测温点温升值拟合误差均小于 0.08%。

表 4 测温点坐标

Table 4 Coordinates of temperature measuring points

测温点	(r, z)/mm	测温点	(r, z)/mm
1	(12, 10)	4	(0, 0)
2	(14, 10)	5	(5, 0)
3	(16, 10)	6	(10, 0)

表 5 反演结果及误差

Table 5 Inversion results and errors

参数	真实值	反演结果	误差/%
λ_z /(W/(m·K))	7.81	7.72	1.15
λ_r /(W/(m·K))	2.00	1.99	0.50
ε_1	0.86	0.87	1.16
q_s /W	5.00	5.01	0.20

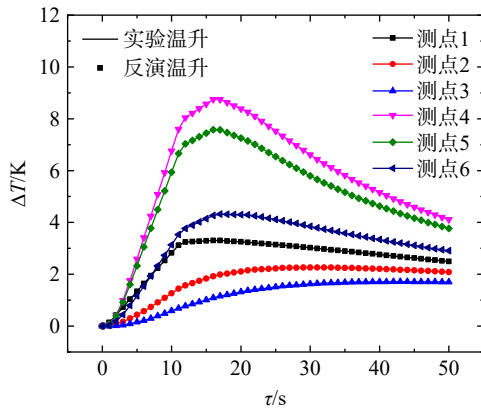


图 8 反演最优解对应温度场偏差示意图

Fig. 8 Inverted optimal solution corresponding to temperature field deviation diagram

3) 测温误差对反演精度的影响

由于热电偶等温度测量仪器的精度问题, 测量所得温度场存在一定误差。在上述计算模型的基础上, 在测点温升上引入随机误差作为实验获取的测点温升进行反演辨识。

$$\Delta T_{\text{exp},j} = \Delta T_{\text{sim},j} + \delta \times \zeta \quad (11)$$

其中测量误差 δ 设置为 1%, $\zeta \in (0,1)$ 。采用上述

方法对材料 2 的 λ_r 、 λ_z 、 ε_1 、 q_s 这 4 个参数进行反演辨识, 待辨识参数值及相对误差如表 6 所示。可知, 引入测量误差后, λ_r 、 λ_z 及 q_s 的反演误差仍小于 2%。但 ε_1 的误差高达 16.28%。这是因为表面发射率属于光信号, 采用温度信号进行反演会产生较大偏差。同时, 由于试样及环境整体温度基本均匀, 试样表面小温升引起的辐射换热量极小, 使得表面发射率难以通过反演辨识。若 ε_1 已知为 0.86, 对其余 3 个参数进行反演分析, 则 λ_r 和 λ_z 的反演精度得到了进一步提高, 均小于 0.5%。因此, 应采用其他手段获取表面发射率, 本文后续计算不再对其进行反演辨识。

表 6 考虑测温偏差后的反演结果及误差

Table 6 Inversion results and errors considering temperature deviation

参数	真实值	反演结果		误差/%	
		发射率未知	发射率已知	发射率未知	发射率已知
λ_z /(W/(m·K))	7.81	7.90	7.78	1.15	0.38
λ_r /(W/(m·K))	2.00	2.01	2.01	0.50	0.50
ε_1	0.86	0.72		16.28	
q_s /W	5.00	4.99	5.02	0.20	0.40

4) 初始温度场非均匀性对反演精度的影响

在测试中, 样件可能并未完全达到测试温度, 呈现出材料温度分布的非均匀性, 如将试样加热至 750 s 时的温度场作为初始温度场(实际达到均匀温度需加热 800 s), 此时模型温度最大偏移量为 0.13%, 即 $\tau=0$ 时, $T \neq T_c$ 。根据上文所述测温误差对反演精度影响较小, 而表面发射率影响较大, 则本节在无测温误差且表面发射率已知的前提下进行反演辨识。

由于初始温度场偏移量较小, 首先采用均匀的初始温度场二维轴对称传热模型, 对 λ_r 、 λ_z 、 q_s 这 3 个参数进行反演辨识。在此基础上, 引入二次函数对初始温度场进行修正, 函数值为模型初始温度随半径方向变化的数值, 表示为 $T_{\text{ini}}(r) = ar^2 + br + c$, 进而对热物性参数 λ_r 、 λ_z 、 q_s 及二次曲线的系数 a 、 b 、 c 等 6 个参数进行反演辨识。辨识结果及误差见表 7。

结果表明, 试样初始温度场的均匀程度对反演结果影响很大。在仅对激光加热功率、轴向及径向导热系数 3 个参数的反演中, 3 个参数的反演误差均大于 20%, 其中 λ_z 和 λ_r 误差分别高达 38.28% 和 25.50%。引入温度场修正函数后, 3 个

表 7 考虑初始温度场非均匀的反演结果及误差

Table 7 Inversion results and errors considering inhomogeneous initial temperature field

参数	真值	反演结果		误差/%	
		初始温度场未修正	初始温度场已修正	初始温度场未修正	初始温度场已修正
$\lambda_z/(W/(m\cdot K))$	7.81	10.80	8.47	38.28	8.45
$\lambda_r/(W/(m\cdot K))$	2.00	1.49	1.93	25.50	3.50
q_s/W	5.00	3.79	4.83	24.20	3.40

参数的反演误差均减小了 20% 以上, λ_z 及 λ_r 的误差均减小至 10% 以内, 说明该修正方法能有效减小反演误差。因此, 在激光激励前应尽可能保持样品整体初始温度的均匀性, 或对初始温度场进行修正, 以获得可靠的反演结果。

4 结 论

本文针对瞬态激励及反演辨识获取各向异性材料导热系数的测量方法, 建立了二维轴对称传热模型, 获得了温度响应, 并分析了该方法的可靠性及影响因素。采用粒子群优化算法反演获得材料的轴向及径向导热系数。主要结论如下:

- 1) 低热导系数材料应保持较低的激光功率和较薄的厚度, 高热导率材料则反之。对于热导率数量级在 $10^{-1}\sim 10^1$ 之间的材料, 采用加热功率 $q_s=0.8\text{ W}$, 样件厚度 $H=15\text{ mm}$ 时, 可以获得更大的激光参数调节范围。
- 2) 正交方向导热系数和激光功率比发射率的识别精度更高。对正交各向异性材料, 当不考虑实验测温及材料温度非均匀性引起的误差, 测量温度为 800 K 时, 反演辨识获得导热系数的偏差小于 2%。
- 3) 测温误差对导热系数的反演精度影响较小, 而表面发射率及初始温度场均匀性的影响较大, 对温度场进行修正可以降低误差。当测温误差为 1% 时, 导热系数的反演偏差仍小于 2%, 而表面发射率的偏差较大。当材料表面发射率已知、材料表面初始温度场的非均匀性达到 0.13% 时, 对加热功率、轴向及径向导热系数同时反演的误差高达 20% 以上, 对初始温度场修正后, 导热系数的反演误差可降至 9% 以内。

参考文献:

[1] GUPTA R K, RAMKUMAR P. Titanium aluminides for metallic thermal protection system of reusable space transportation vehicle: a review[J]. *Frontiers in Aerospace Engineering*, 2015, 4(1): 14-19.

[2] ZHAO Yan, MENG Tian, JING Chengjun, et al. Experimental and numerical investigation on thermal performance of PV-driven alu-

minium honeycomb solar air collector[J]. *Solar Energy*, 2020, 204: 294-306.

[3] PATEL V K. An efficient optimization and comparative analysis of ammonia and methanol heat pipe for satellite application[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165: 382-395.

[4] 左可军, 闻洁. 预测平纹编织 C/SiC 复合材料等效导热系数的三维纤维随机模型[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(6): 1326-1335.

ZUO Kejun, WEN Jie. Three-dimensional fiber random model to predict effective thermal conductivity of plain braided C/SiC composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(6): 1326-1335. (in Chinese)

[5] 江华, 毛军逵, 屠泽灿, 等. 基于微结构识别的单向复合材料导热系数预估[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(11): 2641-2651.

JIANG Hua, MAO Junkui, TU Zecan, et al. Thermal conductivity prediction of unidirectional composites based on microstructure identification[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(11): 2641-2651. (in Chinese)

[6] 刘华. 纳米复合隔热材料高温耦合传热实验测量及物性参数辨识[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

LIU Hua. Experiment on coupled heat transfer and thermal property identification of nanocomposite insulation at high temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)

[7] 张涛, 卢玫, 陶亮, 等. 基于粒子群优化算法的寻源导热反问题研究[J]. *上海理工大学学报*, 2013, 35(4): 377-381.

ZHANG Tao, LU Mei, TAO Liang, et al. Seeking heat source in inverse heat conduction problem by using particle swarm optimization[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2013, 35(4): 377-381. (in Chinese)

[8] 文斌, 吴青柏, 蒋观利, 等. 模拟退火优化算法的冻土热传导参数反分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(8): 2401-2408.

WEN Bin, WU Qingbai, JIANG Guanli, et al. Back analysis of frozen soil thermal properties based on simulated annealing optimization algorithm[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8): 2401-2408. (in Chinese)

[9] ZHANG Hu, WU Kefan, XIAO Guangming, et al. Experimental study of the anisotropic thermal conductivity of 2D carbon-fiber/epoxy woven composites[J]. *Composite Structures*, 2021, 267: 113870.

[10] JANNOT Y, DEGIOVANNI A, SCHICK V, et al. Apparent thermal conductivity measurement of anisotropic insulating materials at high temperature by the parallel hot-wire method[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 160: 106672.

[11] KUSIAK A, MARTAN J, BATTAGLIA J L, et al. Using pulsed and modulated photothermal radiometry to measure the thermal conductivity of thin films[J]. *Thermochimica Acta*, 2013, 556: 1-5.

[12] ZHU Jie, WU Xuewang, LATTERY D M, et al. The ultrafast laser pump-probe technique for thermal characterization of materials with micro/nanostructures[J]. *Nanoscale and Microscale Thermo-*

- physical Engineering, 2017, 21(3): 177-198.
- [13] TKADLETZ M, LECHNER A, SCHALK N, et al. Reactively sputtered TiN/SiO₂ multilayer coatings with designed anisotropic thermal conductivity—From theoretical conceptualization to experimental validation[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 393: 125763.
- [14] KIM G, KIM D, KANG S, et al. Research on measuring thermal conductivity of quartz and sapphire glass using rear-side photothermal deflection method[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1535.
- [15] JEON P S, KIM J H, KIM H J, et al. Thermal conductivity measurement of anisotropic material using photothermal deflection method[J]. *Thermochimica Acta*, 2008, 477(1/2): 32-37.
- [16] HEADLEY A, HILEMAN M, ROBBINS A, et al. A thermal conductivity model for microporous insulations in gaseous environments[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 1278-1285.
- [17] ZHANG Hu, LI Yueming, TAO Wenquan. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 1634-1644.
- [18] RODRIGO O, BERTRAND G. Radial thermal conductivity of a PAN type carbon fiber using the 3 omega method[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 172: 107321.
- [19] ROTTMANN M, BEIKIRCHER T, EBERT H P. Thermal conductivity of evacuated expanded perlite measured with guarded-hot-plate and transient-hot-wire method at temperatures between 295 K and 1 073 K[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 152: 106338.
- [20] ZHENG Qiye, KAUR S, DAMES C, et al. Analysis and improvement of the hot disk transient plane source method for low thermal conductivity materials[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119331.
- [21] ZHAO Wenli, YANG Yi, BAO Zewei, et al. Methods for measuring the effective thermal conductivity of metal hydride beds: a review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(11): 6680-6700.
- [22] ZHANG C, BI Kedong, WANG Jianli, et al. Measurement of thermal boundary conductance between metal and dielectric materials using femtosecond laser transient thermoreflectance technique[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(4): 1044-1049.
- [23] HOPKINS P E, SERRANO J R, PHINNEY L M. Comparison of thermal conductivity and thermal boundary conductance sensitivities in continuous-wave and ultrashort-pulsed thermoreflectance analyses[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2010, 31(11): 2380-2393.
- [24] ZHU Jie, TANG Dawei, WANG Wei, et al. Ultrafast thermoreflectance techniques for measuring thermal conductivity and interface thermal conductance of thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(9): 371-379.
- [25] TANG Lei, DAMES C. Anisotropic thermal conductivity tensor measurements using beam-offset frequency domain thermoreflectance (BO-FDTR) for materials lacking in-plane symmetry[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120600.
- [26] CHANDA S, BALAJI C, VENKATESHAN S P, et al. Estimation of principal thermal conductivities of layered honeycomb composites using ANN-GA based inverse technique[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, 111: 423-436.
- [27] 侯亚东, 单勇, 李江宁, 等. 各向异性复合材料平板气膜冷却特性实验和数值研究[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(10): 2384-2393.
HOU Yadong, SHAN Yong, LI Jiangning, et al. Experimental and numerical studies on the film cooling characteristics of anisotropic composite plates[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(10): 2384-2393. (in Chinese)
- [28] ADAMCZYK W P, PAWLAK S, OSTROWSKI Z. Determination of thermal conductivity of CFRP composite materials using unconventional laser flash technique[J]. *Measurement*, 2018, 124: 147-155.
- [29] ADAMCZYK W P, OSTROWSKI Z, RYFA A. Development of a non-destructive technique for measuring thermal conductivity of material with small anisotropy based on application of the reduced order technique[J]. *Measurement*, 2020, 165: 108078.
- [30] SANS M, SCHICK V, PARENT G, et al. Experimental characterization of the coupled conductive and radiative heat transfer in ceramic foams with a flash method at high temperature[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 148: 119077.
- [31] ERCHIQI F, ANNASABI Z. 3D hybrid finite element enthalpy for anisotropic thermal conduction analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 136: 1250-1264.
- [32] 廖云丹. 纤维增强 SiO₂ 气凝胶隔热复合材料的可控制备及性能优化研究[D]. 广州: 广州大学, 2012.
LIAO Yundan. Controllable preparation and performance optimization of fiber-reinforced SiO₂ Aerogel composites for thermal insulation[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [33] BREUER S, SCHWOTZER M, SPEZIALE S, et al. Thermoelastic properties of synthetic single crystal portlandite Ca(OH)₂ - Temperature-dependent thermal diffusivity with derived thermal conductivity and elastic constants at ambient conditions[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 137: 106199.
- [34] 徐中, 殷复振, 崔健超. 陶瓷热障涂层隔热效果以及导热系数的研究[C]//第六届全国表面工程学术会议暨首届青年表面工程学术论坛. 甘肃 兰州: 青年表面工程学术论坛, 2006: 241-244.
XU Zhong, YIN Fuzhen, CUI Jianchao. Study on thermal insulation effect and thermal conductivity of ceramic thermal barrier coatings[C]//The 6th National Conference on Surface Engineering and the 1st Youth Academic Forum on Surface Engineering. Lanzhou Gansu: Youth Surface Engineering Academic Forum, 2006: 241-244. (in Chinese)
- [35] 毋克凡, Nuanyai Pontarit, 张虎, 等. 树脂基碳纤维复合材料各向异性导热系数研究[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(5): 1282-1287.
WU Kefan, NUANYAI Pontarit, ZHANG Hu, et al. Anisotropic thermal conductivity of carbon-fiber/epoxy composites[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(5): 1282-1287. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)