

非线性拟合方法用于透射式脉冲红外技术测试碳/碳复合材料的热扩散系数

李晓丽 Sun Jian-Gang 陶宁 曾智 赵跃进 沈京玲 张存林

Application of nonlinear data fitting method to thermal diffusivity of carbon-carbon composite measured by transmission pulsed thermography

Li Xiao-Li Sun Jian-Gang Tao Ning Zeng Zhi Zhao Yue-Jin Shen Jing-Ling Zhang Cun-Lin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 188702 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.188702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Ba/Ag 双掺杂对 \$\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9\$ 基热电氧化物热传输性能的影响](#)

[Effect of double substitution of Ba and Ag on thermal transport of \$\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9\$ -based thermoelectric oxide](#)

物理学报.2013, 62(18): 187201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.187201>

[基于对数二阶微分极小峰值时间的测厚方法研究](#)

[Logarithmic minus peak second derivative time based depth prediction](#)

物理学报.2013, 62(13): 138701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.138701>

非线性拟合方法用于透射式脉冲红外技术测试 碳/碳复合材料的热扩散系数*

李晓丽¹⁾ Sun Jian-Gang²⁾ 陶宁³⁾ 曾智⁴⁾ 赵跃进^{1)†}
沈京玲³⁾ 张存林³⁾

1) (北京理工大学光电学院, 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081)

2) (Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory, IL 60439)

3) (首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京成像技术高精尖中心, 北京 100048)

4) (重庆师范大学计算机与信息科学学院, 机器人与智能装备工程研究中心, 重庆 400047)

(2017年4月9日收到; 2017年6月6日收到修改稿)

为了测试碳/碳复合材料的热扩散系数, 本文提出了非线性拟合用于透射式脉冲红外检测的数据处理方法. 非线性拟合通过循环迭代的方法持续调整拟合参数, 让理论值不断逼近实验值, 直至获得最佳结果. 传统的透射式脉冲红外成像技术利用半高时间法测试材料的热扩散系数, 但通常会受到采集时间不足和信噪比差的限制. 本文提出的非线性拟合方法可以有效消除或减弱这两种影响. 在使用该方法之前, 首先选用常见的304不锈钢评估了该方法的测量精度及拟合长度对测试结果的影响. 结果显示304不锈钢的测量精度达到0.3%, 且当拟合长度不小于半高时间法采集时间的1/5时, 拟合长度对非线性拟合结果影响很小. 随后使用该拟合方法测试了不同厚度的碳/碳复合材料试件, 并通过热扩散系数测量结果分析了试件之间的热参数差异性和材料自身的均匀性.

关键词: 非线性拟合, 透射式脉冲红外检测, 碳/碳复合材料, 热扩散系数

PACS: 87.63.Hg

DOI: 10.7498/aps.66.188702

1 引言

由于碳/碳复合材料优异的物理性能, 如高温强度不降低、不粘接, 导热性能好, 比热容大, 热膨胀低等, 已被广泛用于航空、航天产品^[1,2]. 其中热扩散系数代表材料散热和趋于热平衡的能力, 在碳/碳复合材料的应用中是一项重要的热性能指标.

在四个热学参数中, 蓄热系数 e 与导热系数 k 、密度 ρ 及比热容 C 具有关系 $e = (k\rho C)^{1/2}$, 而热扩散系数 $\alpha = k/(\rho C)$, 因此在 $e, \alpha, k, \rho C$ 四个参数中知道任意两个, 其他两个可以通过相互关系求得.

有多种方法测试材料的热参数, 包括差示扫描

量热法^[3]、防护热流计法^[4]、周期热法^[5]、光声调制法^[6]、热探针法^[7]等. 但这些方法通常对被测试件的形状要求较高, 有的甚至需要专门制样将探针埋入. 而且这些方法均只能得到测试区域的平均值, 信息量有限. 脉冲红外方法利用激光或闪光灯脉冲加热试件表面, 同时用红外热像仪快速记录加热面或加热背面的温场变化, 通过分析热变化过程既可以得到材料的热扩散系数、比热容、热导率、蓄热系数等热参数^[8-12], 也可以分析得到材料厚度/深度和内部缺陷等^[13-15]信息. 相比其他方法, 它的优点在于速度快, 测试时间通常是几秒至几十秒; 单次检测范围大, 并以图像的形式显示; 此外还有不

* 北京市教育市属高校创新能力建设项目 (批准号: TJSHG201510028008) 和国家自然科学基金 (批准号: U1233120) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

接触、不破坏、受检测面曲率的影响小等特点. 用脉冲红外方法测试热扩散系数, 通常使用温度升至最高温度的一半时所对应的时间作为特征时间, 在已知材料厚度的情况下可以得到其热扩散系数(半高时间法)^[8,9]. 这种方法受两方面因素的影响: 首先它需要探测足够的时间以使背面温度达到最高; 其次在信噪比较差时, 温度信号有时出现波动, 对于升温过程的判断造成干扰, 降低测量精度. 本文依据理论公式, 采用非线性拟合, 通过对热扩散系数迭代使理论计算值不断地逼近实验数据, 得到满足所设定的精度要求的热扩散系数(非线性拟合法). 这种方法可以消除或降低由于采集时长不足或信噪比差带来的影响.

2 原理

透射式脉冲红外热成像方法实验原理如图1所示. 闪光灯和热像仪置于被测试件的两侧, 在被测试件不能覆盖整个视场时需要进行遮挡, 避免加热光直接进入视场产生干扰. 闪光灯瞬时加热被测试件的上表面, 表面吸收热量后温度升高, 且热量由表面向内部传导, 逐步扩散到被测试件背面, 背面开始升温, 直至达到最高温度. 高速红外热像仪记录试件背面加热前后的温度变化过程, 通过数据处理和分析计算, 可测得被测试件的热扩散系数.

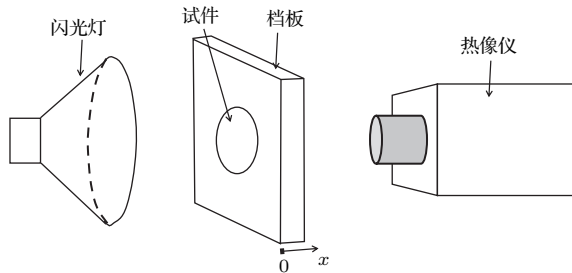


图1 透射式脉冲红外热成像方法实验原理图

Fig. 1. Schematic diagram of transmission pulsed thermography.

在绝热测试环境下, 对于一个厚度为 d 的均匀材料, 在任一深度为 x 的点其初始温度为 $T(x, 0)$, 在随后的时间里温度分布可表示为^[8]

$$T(x, t) = \frac{1}{d} \int_0^d T(x, 0) dx + \frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{d^2}\right) \times \cos \frac{n \pi x}{d} \int_0^d T(x, 0) \cos \frac{n \pi x}{d} dx \right], \quad (1)$$

其中 α 为材料的热扩散系数. 假设在表面 $x = 0$ 处受到单位面积能量为 Q 的脉冲加热后, 能量被靠近 $x = 0$ 面极小深度 m 的材料吸收,

$$T(x, 0) = Q/(\rho C m), \quad 0 < x < m,$$

$$T(x, 0) = 0, \quad m \leq x \leq L.$$

在材料背面 $x = d$ 处温度随时间 t 的变化 $T(d, t)$ 表示为

$$T(d, t) = \frac{Q}{\rho C d} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 \alpha t}{d^2}\right) \right], \quad (2)$$

其中, ρ 为材料的密度, C 为比热容.

忽略材料在空气中的能量交换^[16], 单位面积热量为 Q 的能量最终被厚度为 d 的材料吸收后的温升为

$$T_{\infty} = \frac{Q}{\rho C d}. \quad (3)$$

令 $\omega = \pi^2 \alpha / d^2$, (2) 式可写成

$$T(d, t) = T_{\infty} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \omega t) \right]. \quad (4)$$

根据(4)式可以得到被测试件在前表面受到加热后背面随时间的变化曲线如图2所示.

当 $T/T_{\infty} = 0.5$ 时^[8], $\pi^2 \alpha t / d^2 = 1.38$. 即

$$\alpha = 1.38 d^2 / \pi^2 t_{1/2}, \quad (5)$$

其中, $t_{1/2}$ 为温度升至半高时对应的时间.

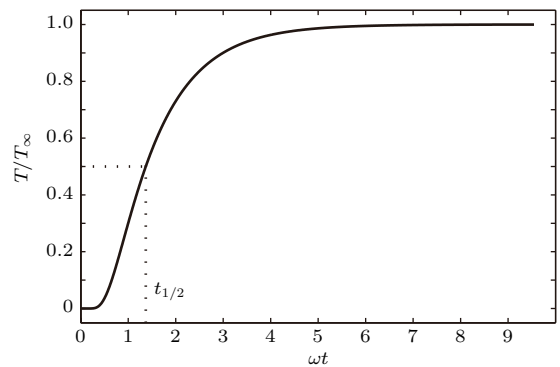


图2 透射式脉冲红外热成像方法升温理论曲线

Fig. 2. Theoretical temperature rise curve of transmission pulsed thermography.

常规应用此理论计算材料的热扩散系数时, 是通过寻找起始温度和最高温度, 进而得到半高温度对应的时间 $t_{1/2}$, 然后根据(5)式计算热扩散系数 α ^[8,9], 即半高时间法. 这种方法通常认为精度可以达到3%^[16]. 但当遇到如下两种情况时半高时间法不再适用: 首先, 当被检测材料较厚时, 因为加热

能量有限, 背面升温较小, 信噪比较差, 寻找起始及最高升温位置困难或者误差较大; 其次, 通常采集时间和厚度的平方成比例, 随着厚度的增加, 采集时间快速增长, 但在采集时间受限时, 不能采集到升温最高位置, 也便无法通过寻找 $t_{1/2}$ 的方法得到热扩散系数.

非线性拟合是通过循环迭代的方法不断调整拟合参数, 使其对应理论值逼近实验值, 从而得到最优拟合值. 非线性拟合通常需要先给定拟合系数的初值, 并得到该系数下的理论值序列, 然后通过理论值与实验值的最小平方差来判断其拟合程度, 再据此调整参数循环迭代, 最终得到最优结果. 或者在数据与理论无法匹配时得到拟合失败结果. 参数判断与调整的方法有很多, 比如牛顿法、最速下降法、共轭梯度法等^[17,18]. 本文理论(4)式中有两个系数未知, T_∞ 和 ω , 先假定 T_∞ 和 ω 的初始值, 通过不断调整 T_∞ 和 ω 让理论温度逼近实验数据, 从而最终得到 ω 值. 由于材料厚度 d 已知, 从而可计算热扩散系数 α , 或者在材料热扩散系数 α 已知的情况下, 也可以用来计算材料厚度 d . 非线性方法不但可以减弱信噪比较差带来的影响, 同时对于测试时长没有严格要求.

3 实验

3.1 实验系统

实验中使用两只闪光灯加热被测试件表面, 每只闪光灯能量为 4.8 kJ, 脉冲宽度 2 ms. 热像仪置于被测试件的另一侧, 用于采集加热前后一段时间的温度变化. 量子阱制冷热像仪的采集频率 60 Hz, 空间分辨率 320×240 , 室温下的温度分辨率为 20 mK. 实验环境温度为 23 °C.

3.2 304 不锈钢实验验证

由于碳/碳复合材料的特殊性, 生产工艺的差别对材料的性能影响很大, 很难找到一个可靠的热参数验证测试结果的准确性, 因此我们选择常见的 304 不锈钢对检测系统和检测方法进行验证.

根据文献检索结果, 在 20 °C 时, 304 不锈钢的热扩散系数为 $3.45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[19], 在 27 °C 时, 热扩散系数为 $3.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[20]. 按线性关系估算, 在实验温度 23 °C 时 304 不锈钢的热扩散系数为 $3.66 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. 304 不锈钢试件尺寸为

50 mm × 50 mm × 5 mm, 因此按(5)式可知其半高时间为 0.95 s.

在半高时间法中有研究认为, 通常采集的时间长度需要为半高时间的 5 倍^[21]. 在采集长度为半高时间的 5 倍时, 温升到达最高温升的 0.998, 基本认为达到了最高温度. 而非线性拟合方法相比半高时间法最大的优势在于它不需要采集到最高温升, 但这种方法在采集长度较短的情况下拟合结果的稳定性如何? 为了研究参与拟合的数据长度对测试结果的影响, 分别将 4 倍、3 倍、2 倍、1 倍、4/5 和 1/2 的半高时间的数据参与拟合, 对比其拟合所得热扩散系数的差别. 图 3 为不同拟合长度的原始数据及其拟合结果. 为了方便阅读和比较, 根据不同拟合长度对图 3 的时间轴做了不同程度的缩放, 结果见图 4.

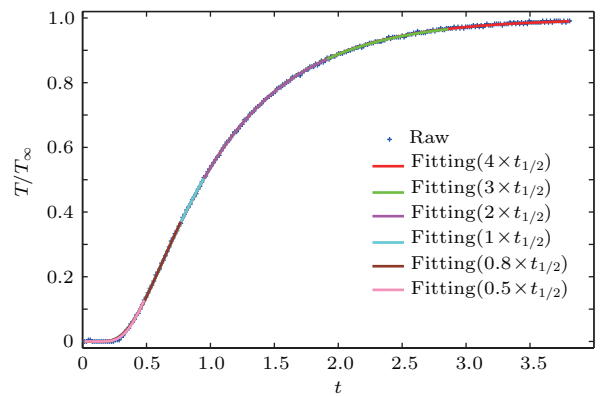


图 3 (网刊彩色) 对于不同拟合长度, 304 不锈钢热扩散系数测试实验及拟合曲线的比较

Fig. 3. (color online) The comparison of raw data and fitting curves for thermal diffusivity of stainless steel 304 under the condition of different data fitting length.

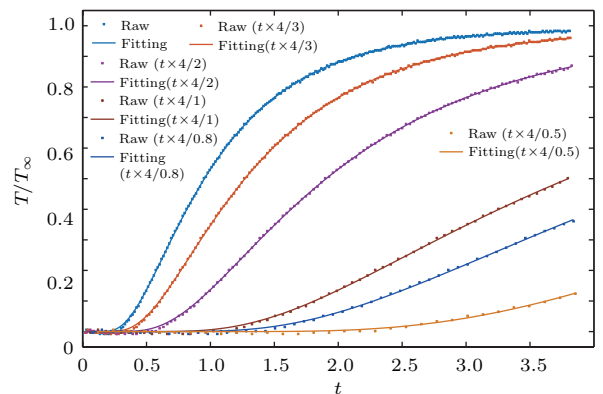


图 4 (网刊彩色) 对于不同拟合长度, 304 不锈钢热扩散系数测试实验及拟合曲线的比较 (缩放图 3 横坐标)

Fig. 4. (color online) The comparison of raw data and fitting curves for thermal diffusivity of stainless steel 304 under the condition of different data fitting length (rescaled abscissa for Fig. 3).

图3和图4中不同时间长度的的原始数据根据(4)式进行非线性拟合, 求取 ω , 进而得到热扩散系数. 不同数据长度拟合得到的热扩散系数值及其测试误差如表1所列. 从表1可以看到, 当拟合数据长度大于或等于半高时间时, 长度对于拟合值的影响非常微弱, 拟合值的变化量不足1%. 甚至在数据长度为4/5的半高时间时, 拟合值的变化量仍不足3%. 但当拟合数据长度减小到1/2的半高时间时, 误差急骤增大. 因此建议使用非线性拟合方法的数据长度要不小于半高时间. 当选用拟合数据长度等于半高时间时, 这只有半高时间法所需时间长度的1/5.

表1 碳/碳材料试件A, B面热扩散系数均值及均方差
Table 1. Variance diffusion values of the carbon-carbon samples.

拟合长度	拟合值/mm ² ·s ⁻¹	误差/%
$4 \times t_{1/2}$	3.6686	0.23
$3 \times t_{1/2}$	3.6708	0.30
$2 \times t_{1/2}$	3.6723	0.34
$1 \times t_{1/2}$	3.6416	-0.50
$0.8 \times t_{1/2}$	3.5851	-2.05
$0.5 \times t_{1/2}$	3.1552	-13.79

用非线性拟合方法得到每个像素点的 α 值, 并用图像的形式展现, 可得到如图5所示的304不锈钢件热扩散系数图. 从图5中可以看到, 除受边缘效应影响的区域, 304不锈钢材料基本均匀. 选取如图5中部方形虚线所示区域, 计算该区域的平均值为 $3.67 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 误差0.3%, 达到了非常好的精度. 因此后续尝试将非线性拟合的方法用于碳/碳复合材料的热扩散系数测试.

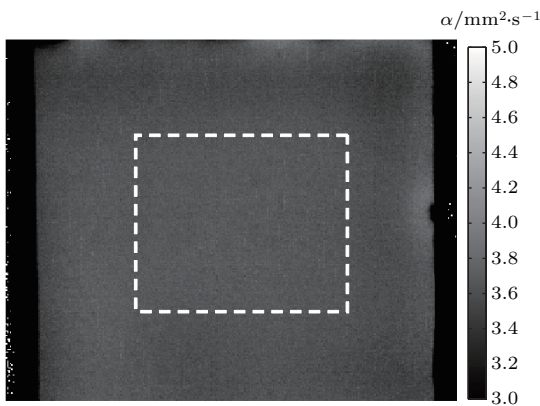


图5 304 不锈钢热扩散系数测试结果
Fig. 5. Diffusivity image of stainless steel 304.

3.3 碳/碳复合材料实验

被检测碳/碳复合材料试件共6件, 直径为 $\Phi 50 \text{ mm}$ 的试件5个, 厚度分别为3, 5, 10, 15, 20 mm, 标记为 $\Phi 50-3$, $\Phi 50-5$, $\Phi 50-10$, $\Phi 50-15$ 和 $\Phi 50-20$. 直径 $\Phi 100 \text{ mm}$ 的试件1个, 厚度为5 mm, 标记为 $\Phi 100-5$.

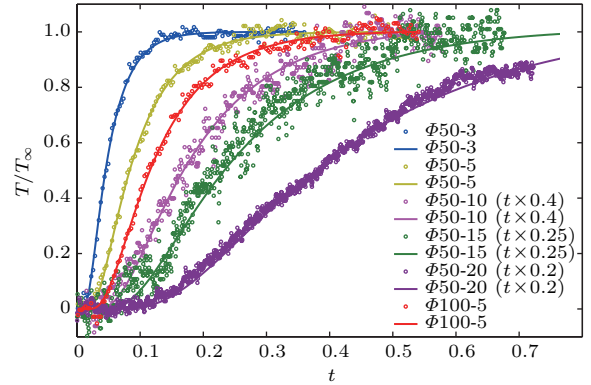


图6 (网刊彩色) 碳/碳材料热扩散系数测试实验及拟合曲线

Fig. 6. (color online) Typical examples of raw data and fitting curves of 6 carbon-carbon samples.

如图6所示为6个碳/碳复合材料试件中心某点的实验值及拟合曲线. 同样, 为了方便阅览和比较, 横坐标根据厚度做了不同程度的缩放. 从图6中可以看出, 尽管随着碳/碳复合材料厚度的增加, 信噪比变差, 但拟合曲线和实验数据依然可以很好地契合, 而且拟合数据也未受到采集时间的限制.

图7和图8是被检测碳/碳复合材料件分别从A, B两面测试的热扩散系数图. 从两组图中可以看出, 不仅被检测试件之间热扩散系数有差异, 而且同一个被测试件的不同区域也有差异. 这种情况也符合材料的特点, 比如容易出现孔洞、密度不均等缺陷^[22]. 此外, 由于理论公式是基于一维热传导的模型下建立的, 即热只从加热面向探测面传导, 不考虑横向热扩散, 这种模型从材料整体考虑是适用的, 但材料本身是编织沉积结构, 从单个像素点区域来看, 它难免会受到横向热扩散的影响, 影响的效果是: 结构越靠近探测面, 横向扩散的时间越短, 影响越小, 从而结构在图像结果中越清晰. 以 $\Phi 50-5$ 试件为例, 从A面热扩散系数图中可见其条形区域差别特征, 而B面探测结果这种特征表现的没有这么突出, 相反编织结构更加明显, 可以初步分析导致区域差别特征的位置更接近A面, 而编织结构差异更接近B面.

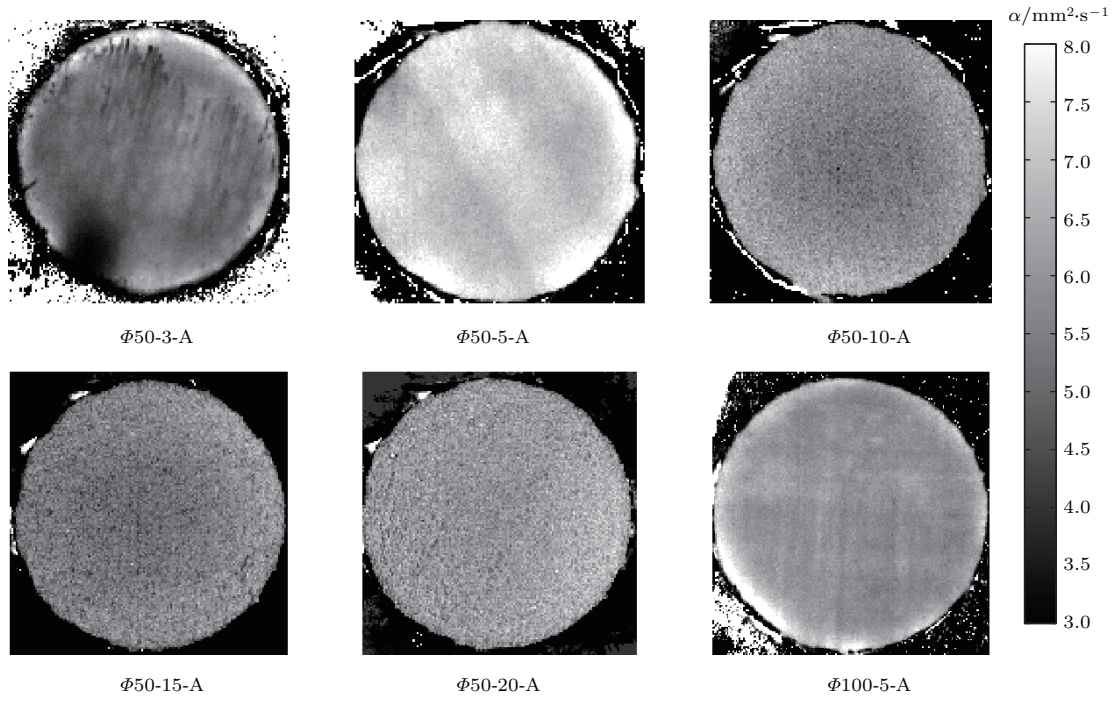


图7 碳/碳材料A面热扩散系数图
Fig. 7. The diffusivity images of A-side of carbon-carbon samples.

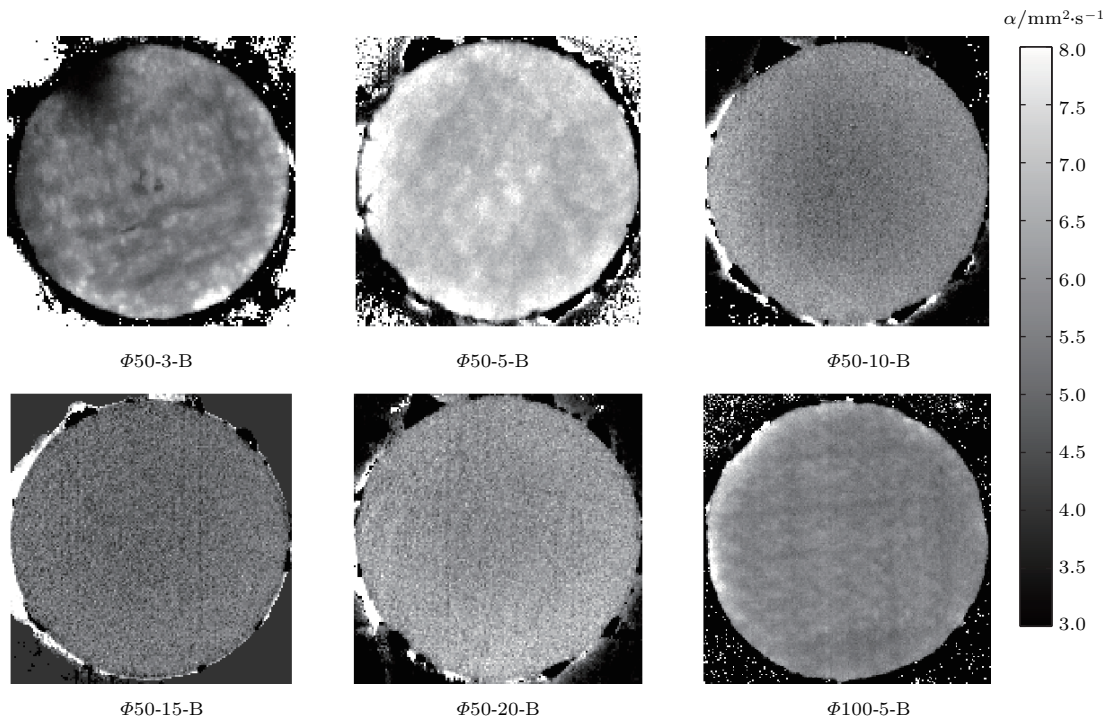


图8 碳/碳材料B面热扩散系数图
Fig. 8. The diffusivity images of B-side of carbon-carbon samples.

4 讨论分析

为了对比六个被测碳/碳材料试件之间热扩散系数的差别,统计计算了各被测碳/碳复合材料试

件圆心周围80%半径范围内的热扩散系数平均值,计算结果如表2所列.各材料从A和B两面测得的结果差别不大,从0.1%到2.8%.但是各被测试件之间差别较大,从5.125 mm²/s到6.915 mm²/s,幅度约为其中值的30%.对于碳/碳复合材料热扩

散系数的报道较少, 从材料性能数据网(matweb.com)检索到其中一种碳/碳复合材料与此结果相符合^[23]. 据文献^[23]报道, 在50 °C下, 型号为201LD的碳/碳复合材料垂直方向的密度为1.75 g/cc, 比热容0.85 J/g·K, 导热率8 W/m·K, 因此可以计算得到其热扩散系数为5.38 mm²/s. 但由于测试温度不同, 此值不能直接用于比较, 仅作为参考.

此外, 为了评价各个被测试件的热扩散系数的均匀性, 我们进一步计算了圆心周围80%半径范围内像素点的标准差, 评价公式为^[24]

$$F = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_x \sum_y (\text{diff}(x, y) / \bar{u} - 1)^2}, \quad (6)$$

式中 F 为标准差计算值, $\text{diff}(x, y)$ 为像素点的热扩散系数值, \bar{u} 为区域内 N 个像素点的平均热扩散

系数值. 但考虑碳/碳复合材料本身的结构特点, 由于其编织沉积结构, 有些均匀存在的差异具有合理性. 为了消除这种由结构本身引起的合理差别, 在运用(6)式计算之前先进行了 5×5 像素的平均, 最终标准差计算结果如表2所列. 结合图7和图8各个被检测试件热扩散系数图来看, $\Phi 50-3$ 靠近边缘局部有较大差别, $\Phi 50-5$ 有条形区域差别, $\Phi 50-10$ 和 $\Phi 50-15$ 都表现为中部热扩散系数小边缘相对较大, 而 $\Phi 500-5$ 和 $\Phi 50-20$ 相对较为均匀, 这个现象与表2中所计算出的平均误差基本符合. 作为比较, 利用本方法, 未对每个像素点周围平均, 得到304不锈钢的标准差仅为0.01%, 而碳/碳复合材料对每个像素周围 5×5 平均以后, 得到最小的标准差为2.31%. 此差别也体现了碳/碳复合材料的结构和特点.

表2 碳/碳材料试件 A 和 B 面热扩散系数均值及标准差

Table 2. Mean values and standard deviation of diffusivity of the carbon-carbon samples.

被测试件描述	A 面均值/mm ² ·s ⁻¹	B 面均值/mm ² ·s ⁻¹	A, B 两面均值/mm ² ·s ⁻¹	A 面标准差/%	B 面标准差/%
$\Phi 50-3$	5.06	5.19	5.125±0.065(1.3%)	7.90	7.95
$\Phi 50-5$	6.95	6.88	6.915±0.035(0.5%)	4.72	4.31
$\Phi 50-10$	5.73	5.45	5.59±0.14(2.5%)	5.25	4.73
$\Phi 50-15$	6.18	6.17	6.175±0.005(0.1%)	5.93	5.14
$\Phi 50-20$	6.10	6.01	6.055±0.045(0.7%)	3.52	4.55
$\Phi 100-5$	5.79	5.47	5.63±0.16(2.8%)	2.31	2.57

5 结 论

本文利用透射式脉冲红外检测理论, 结合非线性拟合的处理方法测试了碳/碳复合材料的热扩散系数. 在测试碳/碳复合材料之前使用304不锈钢对检测方法进行了验证, 一方面研究了拟合数据长度对测试结果的影响; 另一方面验证了方法的适用性与精度. 结果表明, 在拟合数据长度不小于半高时间时, 拟合长度对检测结果影响很小. 利用非线性拟合方法测试304不锈钢材料的热扩散系数精度可达到0.3%.

使用非线性拟合方法测试了碳/碳复合材料的热扩散系数. 从6个碳/碳复合材料试件的检测结果看, 材料从A, B两面测得的热扩散系数差别不大, 最大差别为2.8%, 而最小的仅为0.1%. 但被测试件之间的热扩散系数存在较大的差异性, 最小的

5.125, 最大的6.915, 幅度约为其中值的30%. 此外, 由于红外测试是一种成像检测方法, 单次可以检测一个较大区域的热参数, 且区域内分别对应相应的图像位置, 信息量大. 因此这种方法除测试材料的热扩散系数值外, 还可以为材料均匀性信息评估提供依据.

参考文献

- [1] Windhorst T, Blount G 1997 *Mater. Design* **18** 11
- [2] Li H J, Luo R Y, Yang Z 1997 *J. Mater. Eng.* **8** 8 (in Chinese) [李贺军, 罗瑞盈, 杨峥 1997 材料工程 **8** 8]
- [3] ASTM E1225-04 2004 *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique* (West Conshohocken: ASTM International) pp1-8
- [4] Tan J C, Tsipas S A, Golosnoy I O, Curran J A, Paul S, Clyne T W 2006 *Surf. Coat. Technol.* **201** 1414
- [5] Lipaev A A 2012 *Meas. Tech.* **54** 1264

- [6] Nagao Y, Yamada T, Yoshida A, Kagata K 2015 *Int. J. Thermophys.* **36** 709
- [7] Batty W J, Ocallaghan P W, Probert S D 1984 *Appl. Energy* **16** 83
- [8] Parker W J, Jenkins R J, Butler C P, Abbott G L 1961 *J. Appl. Phys.* **32** 1679
- [9] ASTM E1461-07 2007 *Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method* (West Conshohocken: ASTM International) pp1-11
- [10] Min S, Blumm J, Lindemann A 2007 *Thermochim. Acta* **455** 46
- [11] Tao N, Zeng Z, Feng L C, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174212 (in Chinese) [陶宁, 曾智, 冯立春, 张存林 2012 物理学报 **61** 174212]
- [12] Sun J G, Tao N 2016 *AIP Conf. Proc.* **1706** 100004
- [13] Zeng Z, Tao N, Feng L C, Zhang C L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 138701 (in Chinese) [曾智, 陶宁, 冯立春, 张存林 2013 物理学报 **62** 138701]
- [14] Chen D P, Zeng Z, Zhang C L, Jin X Y, Zhang Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 094207 (in Chinese) [陈大鹏, 曾智, 张存林, 金学元, 张峥 2012 物理学报 **61** 094207]
- [15] Chen D P, Xing C F, Zhang Z, Zhang C L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024202 (in Chinese) [陈大鹏, 邢春飞, 张峥, 张存林 2012 物理学报 **61** 024202]
- [16] Sun J G 2007 *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* **4** 75
- [17] Xie Z, Li J P, Chen Z 2010 *Nonlinear Optimization Theory and Methods* (Beijing: Higher Education Press) pp168-186 (in Chinese) [谢政, 李建平, 陈挚 2010 非线性最优化理论与方法 (北京: 高等教育出版社) 第168—186页]
- [18] Kelley C T 1999 *Iterative Methods for Optimization* (Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics) pp13-35
- [19] Song X L, An J R 2008 *Xinbian Zhongwai Jinshu Cailiao Shouce* (Beijing: Chemical Industry Press) p1029 (in Chinese) [宋小龙, 安继儒 2008 新编中外金属材料手册 (北京: 化学工业出版社) 第1029页]
- [20] Kothandaraman C P, Subramanyan S 2013 *Heat and Mass Transfer Data Book* (London: New Academic Science) contd. 6
- [21] Sun J G 2006 *J. Heat Trans.* **128** 329
- [22] Yi F J, Liang J, Meng S H, Du S Y 2012 *J. Aeronaut. Mater.* **22** 16 (in Chinese) [易法军, 梁军, 孟松鹤, 杜善义 2012 航空材料学报 **22** 16]
- [23] Carlisle Brake and Friction http://matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=c178dc44d5d249d681f31761d022c463 [2017-1-16]
- [24] Mao S S, Cheng Y M, Pu X L 2011 *Probability Theory and Mathematical Statistics* (Beijing: Higher Education Press) p305 (in Chinese) [茆诗松, 程依明, 濮晓龙 2011 概率论与数理统计教程 (第2版) (北京: 高等教育出版社) 第305页]

Application of nonlinear data fitting method to thermal diffusivity of carbon-carbon composite measured by transmission pulsed thermography*

Li Xiao-Li¹⁾ Sun Jian-Gang²⁾ Tao Ning³⁾ Zeng Zhi⁴⁾ Zhao Yue-Jin^{1)†}
Shen Jing-Ling³⁾ Zhang Cun-Lin³⁾

1) (*Beijing Key Lab. for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Nuclear Engineering Division, Argonne National Laboratory, IL 60439, USA*)

3) (*Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Beijing Key Lab for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Lab of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

4) (*Robot and Intelligent Equipment Engineering Research Center, College of Computer and Information Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China*)

(Received 9 April 2017; revised manuscript received 6 June 2017)

Abstract

In order to measure diffusivity of carbon/carbon composite, a nonlinear fitting method for data processing of transmission pulsed infrared thermography is proposed. It is a kind of method of comparing the experimental data with the theoretical values under a fitting parameter and obtaining the optimal result by an iteration method. Traditional half rise time method calculates the diffusivity through searching the half maximum temperature rise time, which is very difficult when a long capture time is required or a big temperature rise is needed. Unlike the traditional half rise time method, the nonlinear data fitting method can effectively eliminate the capture time restriction and weaken the bad-signal-to-noise ratio effects. Before applying this method to carbon/carbon composite examination, a common stainless steel 304 specimen that has reliable diffusivity indicated in the literature, is employed to evaluate the measurement accuracy and confirm the effect of fitting length on the fitting results. The examination results illustrate that the measurement accuracy of stainless steel 304 is as high as 0.3%, and the influence is very small if the fitting data length keeps no less than 1/5 that of half rise time method ($t_{1/2}$). Specifically, the fitting result changes less than 1% when the fitting length varies from 1 to 4 times of $t_{1/2}$. With this evaluation result, the nonlinear fitting method is further applied to testing 6 carbon/carbon composite specimens from both sides of each specimen. Furthermore, the diffusivity differences among the specimens and the uniformities of the materials are analyzed through the thermal diffusivity results gained from the examination. The results demonstrate that average diffusivity values of both sides are similar, but the diffusivities among the specimens are different greatly. Of the diffusivities of specimens, the diffusivity value 5.125 is the smallest, while the diffusivity value 6.915 is the biggest. The gap between them is nearly 30% of their mean value. Some nonuniformity areas are also examined from the diffusivity images of carbon/carbon composite samples. So we can obtain not only diffusivity values but also uniformity information of the carbon/carbon composite from this nonlinear fitting transmission thermography examination.

Keywords: nonlinear data fitting, transmission pulsed thermography, carbon/carbon composites, diffusivity measurement

PACS: 87.63.Hg

DOI: 10.7498/aps.66.188702

* Project supported by the Innovation Promoting Project to City-belonging University of Beijing Education Committee, China (Grant No. TJSHG201510028008) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1233120).

† Corresponding author. E-mail: yjzhao@bit.edu.cn