

# 基于光纤传感水热平衡法测量碳纤维圆筒结构的热扩散系数

周雅斌<sup>1</sup> 曾捷<sup>1</sup> 张倩昀<sup>1</sup> 石庆华<sup>2</sup> 李继峰<sup>1</sup> 曹海东<sup>1</sup> 张先辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏南京 210016)

<sup>2</sup> 中航工业集团公司北京航空制造工程研究所, 北京 100024

**摘要** 基于光纤布拉格光栅和傅里叶热传导方程提出了一种实现复合材料圆筒结构热扩散系数测量的水热平衡法, 并进行了理论分析和实验研究。当圆筒结构内部流体温度升高, 由初始低温平衡状态向高温平衡状态过渡, 其内部流体热量从内向外传递, 由于热阻的存在, 而使内外壁呈现不同的温度特性, 导致内外壁温度分布呈现差异性; 依此原理, 利用光纤布拉格光栅温度敏感特性, 获取中心波长与温度函数关系及中心波长与时间函数关系, 确定圆筒结构温度分布函数; 根据傅里叶一维导热方程和边界条件即可求得结构热扩散系数。实验表明, 升温测量与降温测量结果具有一致性, 证明了该测量方案的可行性与可靠性。该测量系统具有传感元件简单、稳定性好、可操作性强等优点, 为此类圆筒结构热扩散系数测量提供了一种新颖可行的方法。

**关键词** 测量; 热扩散系数; 水热平衡法; 碳纤维复合材料; 光纤布拉格光栅

**中图分类号** TN253; TB332 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1108001

## Measurement of the Thermal Diffusivity of Carbon Composite by Water-Heat Balance Method

Zhou Yabin<sup>1</sup> Zeng Jie<sup>1</sup> Zhang Qianyun<sup>1</sup> Shi Qinghua<sup>2</sup> Li Jifeng<sup>1</sup>  
Cao Haidong<sup>1</sup> Zhang Xianhui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China  
<sup>2</sup> Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute,  
AVIC, Beijing 100024, China

**Abstract** Based on fiber Bragg grating and Fourier heat conduction equation, a method of water-heat is used to measure the thermal diffusivity of composite cylindrical structure, with theoretical analysis and experimental research represented. When the temperature of fluid in cylindrical structure rises, the initial low-temperature equilibrium state of cylindrical structure transits to high-temperature equilibrium state, its internal fluid heat is transmitted from inside to outside, the structure exhibits different temperature characteristics due to the thermal resistance. According to this principle, the center wavelength with temperature function relationship is obtained by experiment, followed to get the relationship between the center wavelength and time functions, the cylindrical structure temperature distribution function is conclude. Based on the Fourier one dimensional heat conduction equations and boundary conditions, the structural thermal diffusivity can be obtained. Result shows that the cylindrical structure thermal

**收稿日期**: 2013-04-23; **收到修改稿日期**: 2013-06-21

**基金项目**: 国家自然科学基金(51275239)、国家自然科学基金国际交流(51161120326)、江苏省科技支撑计划(BE2011181)、航空科学基金(20125652055)、博士学科点专项科研基金(20123218110003)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

**作者简介**: 周雅斌(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤布拉格光栅结构健康监测方面的研究。

E-mail: zhoyabin1989@126.com

**导师简介**: 曾捷(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤传感与结构健康监测方面的研究。

E-mail: zj2007@nuaa.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

diffusion coefficient in heating and cooling process is consistent, which proves the feasibility of the measurement program. Water-heat balance method is simple, stable, operable, which provides a novel and feasible method for such cylindrical structure of the thermal diffusivity measurement.

**Key words** measurement; thermal diffusivity; water-heat balance method; carbon fiber composite; fiber Bragg grating

**OCIS codes** 060.2300; 060.2370; 060.2290; 290.6815

## 1 引 言

碳纤维复合材料是一种高比强度、高比模量、耐高温的先进结构材料,在特殊环境中具有很好的尺寸稳定性和使用耐久性<sup>[1]</sup>,碳纤维圆筒结构作为航天复合材料常用的典型结构单元形式,与相同形状实心结构相比具有质量轻、刚性好、强度大、耐腐蚀、抗冲击等优势,在工程上得到了广泛应用。在外力作用下,圆筒结构能够承受较大弯扭作用,在双向拉伸作用下应力分布更为均匀。当在温度载荷作用下,结构沿径向发生热量辐射,材料内部由于温度梯度存在,会不可避免产生热应变,导致结构在宏观尺寸发生变化,甚至失效<sup>[2-3]</sup>,与实心结构相比,圆筒结构厚度方向散热具有一定特殊性,与结构材料成分和形状密切相关;因此,研究一种新颖有效的测量方法对于监测圆筒结构健康状况以及寿命评估显得尤为重要。

热扩散是材料的重要热物理性质,用于直接表征物质导热能力,对于结构健康监测、使用寿命评估具有重要影响。国内外对于此性能参数的研究从测量方法和性能规律方面产生了一定成果,墨西哥 Sandoval 等<sup>[4]</sup>采用光热偏转法测量液体的热扩散系数,加拿大 Li 等<sup>[5]</sup>曾针对亚麻纤维的热扩散系数、比热、热传导率进行深入研究,加拿大 Astrath 等<sup>[6]</sup>采用光声混合方法测量复合材料固体的热扩散系数;国内罗爱华等<sup>[7]</sup>采用两束脉冲激光干涉形成瞬态热栅的方法,测量半导体/合金和金属等固体材料的热扩散率,高椿明等<sup>[8-9]</sup>采用光声压电技术对相同厚度不同金属材料、工程塑料热扩散特性进行分析。但是由于复合材料是非均质各向异性材料,内部结构复杂,采用常规方法对复合材料的热扩散系数进行测量比金属材料更困难,而且所用仪器昂贵、操作复杂、对周围环境有严格要求,因此大大限制了复合材料热物理性能的研究;此外,针对航空航天领域复合材料热物理参数监测的传感器必须具有结构相容性良好、功耗低、体积小等特点,为实现在线实时多点测量,研究结构不同位置热扩散系数不均匀性,传感元件还必须易于构建传感网络,并能降低监测系统成本和复杂性。

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种典型的波长调制型无源光学器件,波长信号受光源功率和系统损耗影响甚小,具有功耗低、直径细、质量轻、耐腐蚀、抗干扰<sup>[10-11]</sup>等优点,能够集传感与信号传输于一体,易于构成空分/波分复用性多通道监测系统,在复合材料性能监测领域被国内外学者们公认为是最合适的传感器类型<sup>[12-15]</sup>。

基于上述分析,本文以航空航天器中典型复合材料圆筒结构模型为研究对象,根据在稳态传热过程中被测结构温度随时间变化的关系,提出了一种基于光纤布拉格光栅水热平衡原理监测复合材料热扩散系数的新方法。为这类结构材料热物理参数测量进行了新探索,该方法对于揭示材料热物理属性,优化复合材料设计具有重要工程应用价值,对复合材料的发展以及应用起到十分重要的作用。

## 2 测试原理与理论分析

在物体受热升温(降温)的非稳态导热过程中,进入物体的热量沿途不断地被吸收而使局部温度升高,在此过程持续到物体内部各点温度全部趋于均衡和稳定。热传导这种特定方式传热依靠物体内部的温度梯度从高温区域向低温区域传递能量,热扩散系数是表征材料由温度不均匀状态趋向均匀化的热物理量,即表征材料传递热量的快慢程度,通常由材料导热系数、密度、热容 3 个参数计算得到。在热传导过程中,该物理量是与热流密切相关;热流是传递能量大小的量度,不能采用直接方法测量,但由于它与可观测的温度标量相联系,因此,可以从宏观温度的角度研究热流与温度梯度的基本规律,确定物体内部温度分布函数,即确定物体温度在时间和空间位置的分布情况,结合热流路径和传导方程,测算材料热扩散系数。

光纤布拉格光栅是一种对温度和应变敏感的传感元件<sup>[16-17]</sup>,当受到温度和轴向外力时,其光栅周期和纤芯折射率将发生变化,使反射波长峰值产生变化,波长偏移量与应变和温度呈线性关系<sup>[18-19]</sup>。可以通过实验标定方法拟合求出温度灵敏度系数,进一步由中心波长变化分析温度变化趋势。

圆筒结构是工程中最常见的结构,假设圆筒结构内、外半径分别为  $r_1$ 、 $r_2$ ,长度  $l$  大于  $10r_2$ ,那么当内、外壁面温度各维持等温  $T_1$ 、 $T_2$ ,对于圆筒壁来说,各个等温面都将是彼此同心的圆柱面,这些圆柱面表面积为  $2\pi rl$ ,并且随着半径  $r$  增大而增大。在此前提下,认为这种长圆筒的壁内温度分布为轴对称一维温度场,热流朝着径向,而且在没有内热源的稳定工况下,热流沿途不变<sup>[20]</sup>。对于圆筒结构,在柱坐标下傅里叶热传导方程可以化为如下形式<sup>[21]</sup>:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial G}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( r \frac{\partial G}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial G}{\partial z} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial G}{\partial t}, \quad (1)$$

式中  $G$  代表温度分布函数, $r$ 、 $\phi$ 、 $z$  代表柱坐标的三个分量, $\alpha$  代表材料的热扩散系数。

对于圆柱面为  $2\pi rl$  的圆筒壁,根据导热基本定律可得

$$Q = -2\pi r l \beta \frac{dG}{dr}, \quad (2)$$

式中  $\beta$  为材料导热系数。

根据假设,可知  $\frac{\partial G}{\partial t} = 0$ ,无内热源,而且是径向一维,(2)式可简化为

$$\frac{d}{dr} \left( r \beta \frac{dG}{dr} \right) = 0, \quad (3)$$

亦即

$$r \beta \frac{dG}{dr} = C_1, \quad (4)$$

对比(2)~(4)式,可知  $C_1 = -\frac{Q}{2\pi l}$ ,分离变量,对圆筒壁积分,则

$$\frac{Q}{2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} \beta dt \equiv \beta_m (T_1 - T_2), \quad (5)$$

$$Q = \frac{2\pi l \beta_m (T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (6)$$

如果(5)式改由  $r_1$  积分到  $r$ ,相应的温度由  $T_1$  积分到  $T$ ,则  $\beta$  为常量时,有

$$G = T_1 - \frac{Q}{2\pi l} \ln \frac{r}{r_1}, \quad (7)$$

与(6)式联立消去  $Q$ ,得到

$$G = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r}{r_1}. \quad (8)$$

从热力学角度来看,如果知道了所考察介质在边界上的温度状况(或热量交换状况)和介质在初始时刻温度,就可以确定介质在以后各时刻的温度。这样热传导方程最自然同时也最基本的一个定解问题就

是在已给初始条件和边界条件下求方程的解<sup>[22]</sup>。

内径为  $r$  的圆筒结构,具有中心对称特性,因此可以不考虑环向热传导,轴向上由于热绝缘材料的存在,近似认为不发生热传递,则沿径向的热传递满足一维非稳态导热,根据傅里叶第二定律,得到如下二维传导方程:

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 G}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial G}{\partial r} \right). \quad (9)$$

如果结构的初始温度分布均匀,则初始条件与边界条件分别为:初始条件: $t = 0, G = T_0$ ,边界条件: $r = 0, \frac{\partial G}{\partial r} = 0; r = r_0, G = T_b$ ,式中  $T_0$  为结构初始温度, $T_b$  为结构热平衡后的温度, $r$  为结构半径。

假设温度  $T_1 = f_1(t)$ ,  $T_2 = f_2(t)$ ,均为随时间变化的函数,则根据温度分布函数,可得到

$$\frac{\partial G}{\partial t} = f_1'(t) - \ln \frac{r}{r_1} \frac{f_1'(t) - f_2'(t)}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial r^2} = \frac{f_2(t) - f_1(t)}{r^2 \ln(r_2/r_1)}, \quad (11)$$

由此可以求得热扩散系数  $\alpha$ 。

### 3 热扩散系数监测系统

实验中选用的碳纤维圆筒结构,其密度为  $1787 \text{ kg/m}^3$ ,热传导系数为  $0.43 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。由于复合材料自身内部结构较为复杂,因此在测量其宏观性能参数时,将材料内部因素予以简化,如图 1(a)所示,圆筒结构简化为等厚度空心圆柱体。结构内壁布置光纤光栅传感器 FBG1,用来监测圆筒内壁温度变化情况,在外壁布置光纤光栅传感器 FBG2,监测热流向外传递过程中圆筒外壁温度变化情况,两根光栅位置相对,其中 FBG1 初始中心波长为  $1528.05 \text{ nm}$ ,FBG2 初始中心波长为  $1527.80 \text{ nm}$ 。光纤光栅轴向和圆筒轴向保持一致,在光纤光栅无预应力的情况下采用防水环氧树脂胶涂盖,在此过程中严格控制涂胶量、胶层厚度和宽度,经过  $24 \text{ h}$  固化再进行试验。

为保证热量从复合材料内壁向外壁传输,即放射状向外扩散,因此在圆筒结构轴向两端用热绝缘材料密封,保证轴向方向上没有热量损失,在内腔中灌注水作为传热介质。光纤布拉格光栅 FBG1 和 FBG2 通过跳线接入 Si425 解调仪,获取中心波长信号,测量内壁和外壁的光纤布拉格光栅波长随时间变化情况,以实现对内外壁温度变化监测,实验系统如图 1(b)所示,其中热电偶探头布置在光纤光栅表面,用来观察温度平衡状态和标定温度灵敏度。

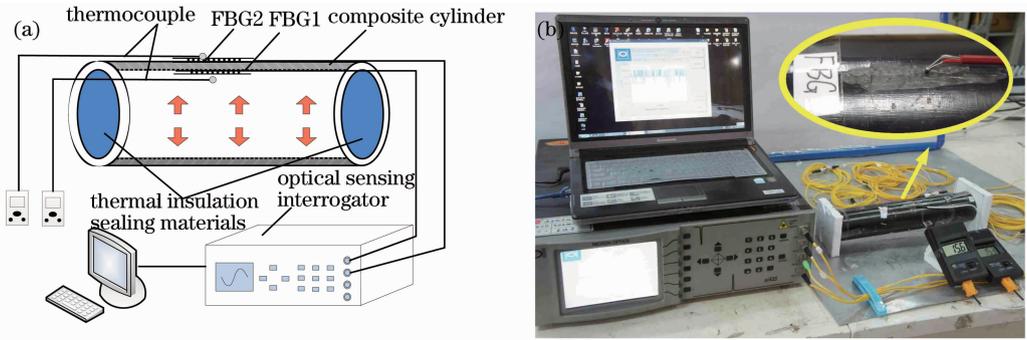


图 1 热扩散系数测量系统。(a) 原理图;(b) 系统图

Fig. 1 Measurement system of thermal diffusivity. (a) Experimental schematic; (b) experimental system

## 4 实验结果分析与讨论

### 4.1 中心波长与时间变化拟合

圆筒结构内部水温逐渐升高,监测复合材料圆筒结构热传导过程,采集光纤布拉格光栅中心波长随时间变化数据,如图 2(a)和(b)所示,圆圈代表采集的离散数据,红色实线为拟合结果。从曲线可知,

温度上升过程具有非线性,初始时刻中心波长变化速度慢,之后波长增大速率较快,直至水温恒定,中心波长逐步达到稳定状态,由图可知在 8400s 以后,中心波长趋于稳定,内外壁温度达到平衡状态,将采集数据进行多项式拟合,得到中心波长与温度的函数关系。

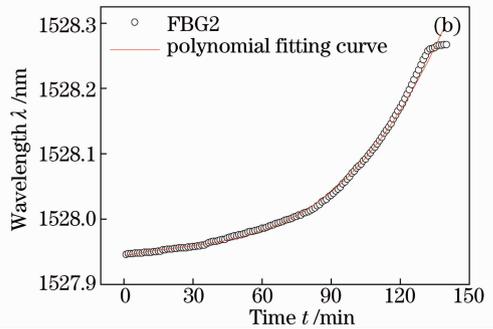
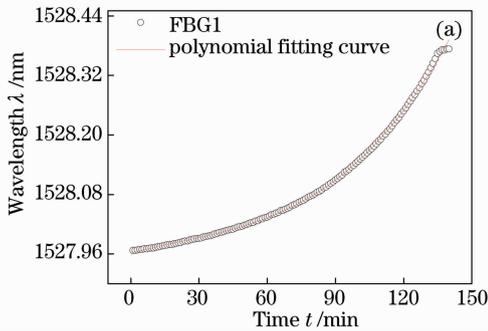


图 2 升温过程光纤布拉格光栅波长与时间拟合曲线。(a) 结构内壁 FBG1; (b) 结构外壁 FBG2

Fig. 2 Fiber Bragg grating wavelength and time fitting curve in heating process. (a) FBG1 in inner wall; (b) FBG2 in outer wall

实验中,采用液态水作为热源,水温升高速率由水箱加热速率决定,对系统达到热平衡状态时间和曲线变化斜率有重要影响,而在降温过程中,水箱停止加热,热量通过热扩散和热辐射效应向外传递,可

以避免由加热产生的误差。因此,可以对复合材料圆筒结构在降温过程中温度场特性进行检验,以验证测量结果。根据光纤布拉格光栅中心波长与时间变化数据,绘制中心波长与时间变化曲线如图 3 所

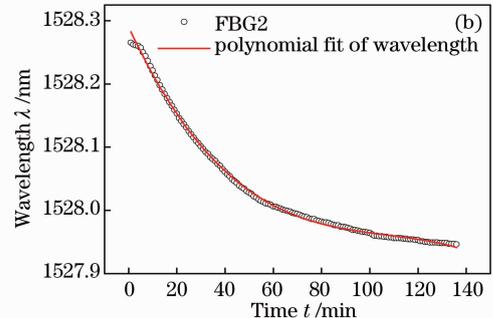
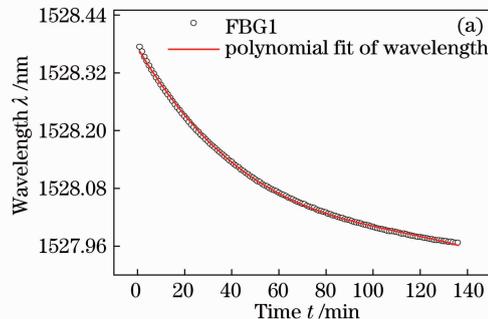


图 3 降温过程光纤布拉格光栅波长与时间拟合曲线。(a) 结构内壁 FBG1; (b) 结构外壁 FBG2

Fig. 3 Fiber Bragg grating wavelength and time fitting curve in cooling process. (a) FBG1 in inner wall; (b) FBG2 in outer wall

示,在 8200s 时,系统达到平衡状态。

#### 4.2 中心波长与温度拟合曲线

光纤布拉格光栅具有对温度敏感的特性,当粘贴在基体表面的时候,受到基体热物理性能的影响,中心波长随着温度发生波动和漂移。实验过程中,加热温度从 30 °C 至 80 °C,温度每上升 5 °C 保温

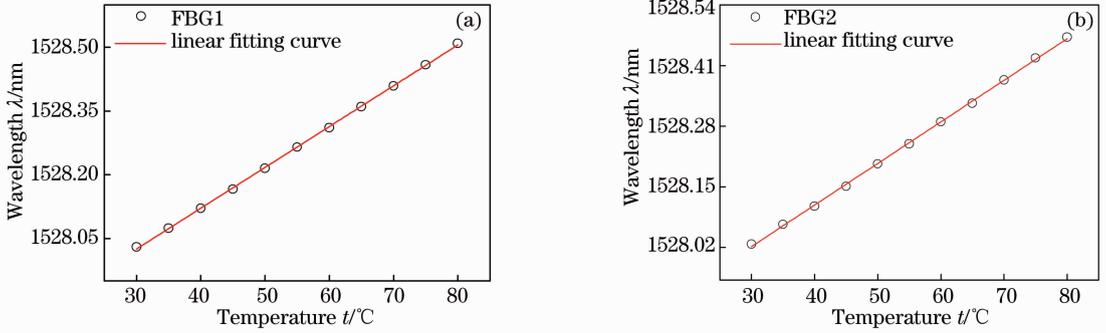


图4 光纤布拉格光栅中心波长与温度拟合曲线。(a) 结构内壁 FBG1; (b) 结构外壁 FBG2

Fig. 4 Fiber Bragg grating wavelength and temperature fitting curve. (a) FBG1 in inner wall; (b) FBG2 in outer wall

根据傅里叶一维热传导方程求解可得,升温过程热扩散系数  $\alpha$  为  $2.1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。降温过程热扩散系数  $2.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ,两者相差 8.7%,分析原因可能是来自于轴向热量散失,因此在测量过程中会有温度误差;另一方面,复合材料本身的结构对热流传递具有一定影响,层与层之间接触面如果不光滑,挤压又不够,不能紧密接触,将会形成热阻,从而使传热性能明显下降。与其他研究成果<sup>[23]</sup>对比发现,碳纤维复合材料热扩散系数数量级为  $10^{-7}$ ,但是不同材料在数值大小上有所差别,这是因为在生产过程中由于各组分差异以及制作工艺不同,导致测量结果在数值大小上略有差异。由此说明,该测量结果具有一定的可靠性。

## 5 结 论

针对航空航天领域典型圆筒结构热扩散系数监测需求,选取碳纤维复合材料圆筒为研究对象,提出一种基于光纤布拉格光栅和傅里叶热传导方程的水热平衡测量方法,分别获取光纤光栅中心波长与温度、时间的函数关系,然后确定圆筒结构温度分布函数求得热扩散系数。

1) 水热平衡法具有简单、准确的特点,将热量径向传递界面离散为多个光滑的同心圆柱层,利用光纤布拉格光栅构建的测量系统简单可靠,实验证明,所建立的测量系统具有较好的重复性和准确性,可应用于类似结构工程测量;

2) 热量传递过程中,结构外壁和内壁温度变化

1 min,读取中心波长数值。根据光纤光栅温度传感特性,用线性拟合方法获取中心波长和温度之间函数关系,如图 4(a)和(b)所示,测量光纤布拉格光栅中心波长随温度的变化,圆圈为采样点,红色实线为线性拟合曲线。

速率不同,随时间推移,温度趋于一致和稳定;从升温 and 降温过程测量结果的对比可以看出,该测量方法需要尽量减少热量损失,增强光纤布拉格光栅对温度的敏感性;

3) 本文所采用的方法亦可用于测量金属材料圆筒结构热扩散系数;而对于非圆筒结构的薄壁材料,需采用更为合理的加热方式,这有待进一步实验研究。

## 参 考 文 献

- Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1–12.  
杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1–12.
- Lin Dechun, Pan Ding, Gao Jian, *et al.*. Application of carbon fiber composite materials in aerospace [J]. Fiber Reinforced Plastics, 2007, (1): 18–27.  
林德春, 潘 鼎, 高 健, 等. 碳纤维复合材料在航空航天领域的应用[J]. 玻璃钢, 2007, (1): 18–27.
- Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103004.  
朱 凯, 龙连春. 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103004.
- Sandoval-Romero G E, Garcia-Valenzuela A, Sanchez-Perez C, *et al.*. Device for characterization of thermal effusivity of liquids using photothermal beam deflection [J]. Rev Sci Instrum, 2007, 78(10): 104901.
- X Li, L G Tabil, I N Oguocha, *et al.*. Thermal diffusivity, thermal conductivity, and specific heat of flax fiber-HDPE biocomposites at processing temperatures [J]. Composites Science and Technology, 2008, (68): 1753–1758.
- F B G Astrath, N G C Astrath, J Shen, *et al.*. A composite photothermal technique for the measurement of thermal properties of solids [J]. J Appl Phys, 2008, 104(6): 066101.
- Luo Aihua, Zhao Chaoxian, Zhang Shuyi, *et al.*. Measurement

- of thermal diffusivity of solids by transient thermal gratings method[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(12): 1478-1482.
- 罗爱华, 赵超先, 张淑仪, 等. 利用瞬态热栅法测定固体材料的热扩散率[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1478-1482.
- 8 Gao Chunming, Bi Yanfang, Sun Qiming, *et al.*. Measurement accuracy analysis of thermal diffusivities determined by the photoacoustic piezoelectric technique[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 426-429.
- 高椿明, 毕艳芳, 孙启明, 等. 压电技术测量热扩散率的精度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 426-429.
- 9 Wan Dan, Gao Chunming, Sun Qiming, *et al.*. Thermal diffusivities of engineering plastics studied by the revised hot acoustic piezoelectric technique[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2588-2591.
- 万 丹, 高椿明, 孙启明, 等. 改进后的光声压电技术对工程塑料热扩散率的测量[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2588-2591.
- 10 Zhou Li, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Mechanism and experimental research on performance degeneration of fiber grating affected by temperature[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405007.
- 周 丽, 梁大开, 曾 捷, 等. 温度影响光纤光栅传感器性能退化机理及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405007.
- 11 Yang Sha, Geng Jianxin, Ye Qing, *et al.*. Application of fiber Bragg gratings in monitoring metal corrosion[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(5): 641-644.
- 阳 莎, 耿健新, 叶 青, 等. 光纤光栅在金属锈蚀传感中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 641-644.
- 12 Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1298-1303.
- 贾子光, 任 亮, 李宏男, 等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1298-1303.
- 13 Lu guan, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Impact energy on composite material layer based on grating sensors[J]. J Vibration and Shock, 2011, 30(6): 261-264.
- 陆 观, 梁大开, 曾 捷, 等. 基于光纤光栅传感器的复合材料层合板冲击能量研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 261-264.
- 14 Tong Zhengrong, Wang Jiayu, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206001.
- 董峥嵘, 王洁玉, 杨秀峰, 等. 基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206001.
- 15 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.*. Simplified time dependant optic-mechanical transformation equation for FBG strain sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1965-1970.
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1965-1970.
- 16 Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun, *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 249-251.
- 李 阔, 周振安, 刘爱春, 等. 一种高温下高灵敏度光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 249-251.
- 17 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing, *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(1): 83-86.
- 詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 83-86.
- 18 Zhu Ji, Later Khalil, Zhang Jianzhong, *et al.*. Liquid-solid phase transition monitoring based on FBG[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010601.
- 竺 绩, Later Khalil, 张建中, 等. 基于光纤光栅的液-固相变监测[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 010601.
- 19 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050003.
- 杨章成, 徐汉峰, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050003.
- 20 W F Waite, L A Stern, S H Kirby, *et al.*. Simultaneous determination of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat in sl methane hydrate[J]. Geophys J Int, 2007, 169(2): 767-774.
- 21 Wang Buxuan. Engineering Heat and Mass Transfer [M]. Beijing: Science Press, 1982. 53-67.
- 王补宣. 工程传热传质学[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 53-67.
- 22 S G Zacharia, A O Siddiqui, J Lahiri. In situ thermal diffusivity determination of anisotropic composite structures; transverse diffusivity measurement[J]. NDT & E International, 2012, 48: 1-9.
- 23 Chen Xingkai, Xie Huaqin, Qu Yanshuang. Simulation of unsteady temperature profile during CFRP pultrusion and detection by FBG[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(5): 114-119.
- 陈幸开, 谢怀勤, 曲艳双. CFRP 垃圾过程非稳态温度场数值模拟与 FBG 实时检测[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 114-119.

栏目编辑:何卓铭