

文章编号: 1000-3851(2002) 03-0124-03

纤维复合材料的热膨胀系数

王培吉, 范素华

(山东建材学院 物理系, 济南 250022)

摘要: 提出了一种利用压电光声技术测量材料热膨胀系数的实验方法, 并测试了单向复合材料 C/C、C/Al 的横向、纵向的热膨胀系数。根据已有的理论计算方法与实验结果对该方法的测试结果进行验证, 证明了该检测方法的可靠性, 进而又测量了 C/C、C/Al 材料在任一方向上的热膨胀系数。这种方法克服了理论计算过程复杂以及常规手段无法测量任一方向上热膨胀系数的缺陷。

关键词: 热膨胀系数; 压电光声技术; 复合材料

中图分类号: TB332; O482.2 文献标识码: A

THERMAL EXPANSION COEFFICIENT OF FIBER COMPOSITES

WANG Pei-ji, FAN Su-hua

(Dept. of Physics, Shandong Institute of Building Material, Jinan 250022, China)

Abstract: The thermal expansion coefficients of fiber composites are studied in this paper. A method of measuring the thermal expansion coefficient by piezoelectric photoacoustic technique was proposed. An intensity-modulated Ar^+ laser beam was used as the incident light. The beam was focused on an about 1 μm diameter spot and illuminated collinearly the sample surface. Using the technique, piezoelectric photoacoustic signals as a function of different frequencies were experimentally measured. The thermal expansion coefficients can be obtained by fitting the experimental data. On the other hand, the thermal expansion coefficients of one-way composite C/C and C/Al in the transverse, longitudinal directions were measured. The measured results are reliable by comparing with other calculation methods and experimental results. Thermal expansion coefficients in arbitrary directions of C/C and C/A were given. The defects of the theoretical calculation method, which is complicated and by which the thermal expansion coefficient in arbitrary directions can not be measured, are overcome.

Key words: thermal expansion coefficient; piezoelectric photoacoustic technique; composite

纤维复合材料特别是碳纤维复合材料, 由于其优越的性能, 在航空、电子封装等方面得以广泛应用^[1, 2]。众所周知, 复合材料性能的优劣, 热膨胀系数是衡量其性能的一个重要方面。而获得热膨胀系数的方法有: (1) 通过实验测量, 常用的方法有光学干涉法、机械法与电学法等; (2) 理论计算, 目前还没有一个统一的计算公式, 同一种材料对不同的计算公式有时相差很大, 并且无论是理论计算, 还是实验测量都只能给出横、纵向的结果^[3, 4]。压电光声技术是近几年来发展起来的一种无损检测技术, 它具有实验简单、灵敏度高等特点, 能够检测不同条件下材料的光声信号, 进而测量出材料的各种性能。因而,

本文中将利用压电光声检测技术测量单向纤维复合材料的横向、纵向的热膨胀系数, 并将测量结果与现有的理论计算结果进行比较。在此基础上, 进一步测量材料任一方向上的热膨胀系数。

1 原 理

1.1 测试原理

当一束经过频率 f 调制的激光照射到试样上时, 试样由于部分或全部吸收了光能, 而将光能转变为交变的热能; 试样吸热之后产生膨胀或压缩, 从而产生形变, 形变引起的弹性波传到压电传感器; 压电传感器在交变外力作用下, 产生了交变的压电信号

输出, 这就是光声信号; 当试样为光学不透明材料时, 压电传感器检测到的光声信号为^[5]

$$P = M \frac{T_f p_0}{kcdl} \tag{1}$$

式中: P 为压电光声信号, T_f 为试样的热膨胀系数, p_0 为光功率, c 为试样的比热, d 为试样的密度, M 为与换能器有关的常数, l 为试样的厚度, $k=2f$ 为激光调制圆频率。

在不同频率下检测试样的光声信号, 根据所检测到的光声信号, 利用上式即可拟合出材料的热膨胀系数。

1.2 实验测试

图 1 为压电光声技术测量材料热膨胀系数的实验装置图。约 1.5 W 的 Ar^+ 激光器经 PAR192 型斩波器调制后入射到平面反射镜上, 光束经反射和聚焦后射入压电传感器中的试样上, 压电传感器所检测到的光声信号经 5204 型锁相放大器后进入计算机进行数据处理; 反射镜和聚焦透镜固定在同一步进电动机上, 步进电动机的移动由计算机控制; 这样, 根据入射到试样上的不同频率和步进电动机不同的移动方向, 即可检测出试样在不同频率下不同方向上的光声信号, 从而测量出试样的热膨胀系数。

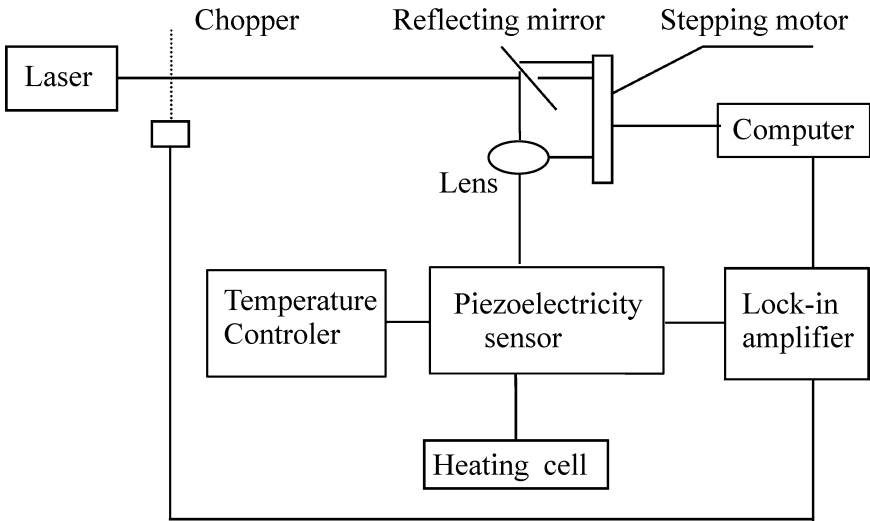


图 1 压电光声检测技术结构示意图
Fig. 1 Schematic of piezoelectric photoacoustic detection technique

为保证试样与压电材料之间有良好的耦合, 采用了如图 2 所示的传声腔结构, 激光束通过窗口入射到试样上, 试样与压电材料之间的耦合剂为硅油; 弹簧的作用是使传感器与试样之间始终保持紧密的接触, 这样保证能量能够较好地传输。同时, 为了减少外界对信号的干扰以及提高测量的精确度, 一方面, 对传声器加了屏蔽罩, 另一方面利用计算机控制步进电动机的转速和采样速率, 使每个数据点均是五次采样的平均值。

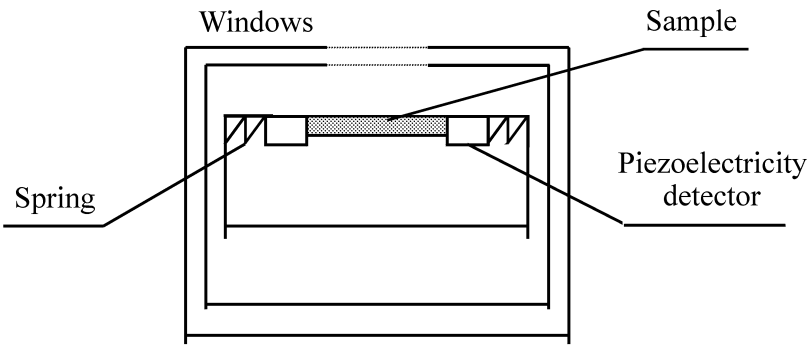


图 2 压电传声器结构示意图
Fig. 2 Schematic of piezoelectric microphone structure

1.3 测试结果

在不同的频率下测量出试样的压电光声信号, 根据公式(1)即可拟合出各试样的热膨胀系数。测量时, 首先测量试样横向、纵向的热膨胀系数, 沿某一方方向每间隔 1 mm 测量一个点, 共测量 5 个点, 每个数据点由式(1)利用最小二乘法的误差最小原则, 即可拟合出试样在该点处的热膨胀系数, 每个方向上的测量值是 5 次测量的平均值, 表 1 给出了各试样横向与纵向的拟合结果。

2 讨论与分析

当纤维与基体在同一方向上其性能均为同性的前提下, Schapery^[3]和 Rosen & Hashin^[4]分别提出了不同的计算方法。

Schapery(SC)的计算公式为

$$T_L = (E_L^f T_L^f V^f + E^m T^m V^m) / (E_L^f V^f + E^m V^m) \tag{2}$$

$$T_f = (1 + \frac{E^m}{E_L^f}) T^m V^m + (1 + \frac{E_L^f}{E^m}) T_L^f V^f - T_{L-T} \tag{3}$$

表 1 各试样横向、纵向热膨胀系数的实验结果

Table 1 Experimental results of thermal expansion coefficients in transverse, longitudinal directions of composite
 $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Composite	Detecting direction	Piezoelectric photoacoustic method		Experimental result of TP ^[6]	Calculated value of RH method	Calculated value of SC method
		Experimental results	Fitting errors Q/ %			
C/ C	Transverse	7. 36	2. 38	7. 62	7. 75	5. 23
	Longitudinal	0. 68	1. 89	0. 73	0. 82	0. 54
C/ Al	Transverse	7. 56	1. 75	7. 75	7. 69	8. 78
	Longitudinal	0. 27	2. 05	0. 31	0. 37	0. 47

式中: E 为试样的弹性模量, T 为试样的热膨胀系数, ν 为材料的泊松比; 下标 L 和 T 分别表示沿纤维方向(纵向)和垂直纤维方向(横向), 上标 m 和 f 分别表示基体和纤维, V^f 和 V^m 分别表示纤维和基体的体分比。

Rosen & Hashin(RH) 的计算公式为

$$T_L = T_L + (T_L^f - T_L^m) P_{ijkl} (S_{ij11} - S_{ij11}) \quad (4)$$

$$T_T = T_T + (T_T^f - T_T^m) P_{ijkl} (S_{ij22} - S_{ij22}) \quad (5)$$

式中: 四阶张量 P_{ijkl} 满足 $P_{klrt}(S_{rtij}^f - S_{rtij}^m) = I_{ijkl}$, $i, j, k, l, t = 1, 2, 3$; I_{ijkl} 为单位张量, S 表示材料的柔度张量, 符号 “—” 表示体积均值, 同时还采用了求和约定。

根据文献[6, 7] 所给出的纤维和基体的材料性能的参数, 由式(2) ~ 式(5) 计算出的理论值, 以及文献[6] 中 Tompkins(TP) 所给出的实验结果均列入表 1 中。由此看出, 用压电光声技术测量的热膨胀系数与 TP 方法所给出的实验结果是相吻合的; 同时, 实测值与两种理论计算结果也基本相符, 但与 RH 方法吻合得比较好, 其相差均在 10% 以内, 而与 SC 方法的结果相差比较大, 最高达到 30% 之多。因此, 通过与已有的理论值和实验结果比较, 说明压电光声技术测量材料的热膨胀系数是可行的, 反过来也说明了理论计算方法的准确性, RH 方法比 SC 方法的计算结果更精确, 这主要是由于 RH 方法利用了张量计算, 考虑的方面更合理, 但其计算也更复杂, 计算量非常大。

在成功地测量了材料横、纵方向的热膨胀系数之后, 根据步进电动机所带动的反射镜的移动方向不同, 来改变光束入射到试样的检测方向, 因而又测量了其它不同方向上的热膨胀系数, 其结果在表 2 中给出了复合材料在某些方向上的实验结果。

表 2 任一方向上复合材料热膨胀系数的实验结果

Table 2 Experimental results of thermal expansion coefficients in arbitrary directions of composite $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Composite	Detecting direction/ degree	Experimental results	Fitting errors Q/ %
C/ C	30	1. 49	2. 13
	45	3. 27	1. 78
	60	5. 86	2. 23
C/ Al	30	1. 73	2. 08
	45	3. 62	1. 89
	60	6. 08	1. 94

由于压电光声技术在测量材料横、纵方向上的热膨胀系数时是准确可靠的, 因而所测得的任一方向的热膨胀系数也应是准确的, 同时该实验结果也符合热膨胀系数随测试角度(测试方向与纤维方向所成的角度)的增加而增大的规律。

3 结 论

利用压电光声检测技术检测碳纤维复合材料的热膨胀系数, 测量了材料横、纵向的热膨胀系数, 并与其它实验结果和理论预测值进行了比较, 从而证实了压电光声检测技术测量热膨胀系数的可行性; 进而又根据压电光声检测方法中改变测量方向的方便性, 测量了材料任一方向上的热膨胀系数。所以, 利用压电光声检测技术除了可以检测常规仪器所测量的横、纵向以外, 还可以测量材料任一方向上的热膨胀系数; 同时, 由于该方法具有操作简单、灵敏度高等特点, 并对试样无特殊要求, 因而它能迅速、准确地测量出各种材料任一方向上的热膨胀系数。

参考文献:

[1] Hunt M. Electronic packaging [J]. Materials Engineering, 1991, 108(2) : 25.

[2] Zwebent C. Metal-matrix composites for electronic packaging [J]. The Journal of the Minerals Metals & Materials Society, 1992, 44(7) : 15- 23.

[3] Schapery R A. Thermal expansion coefficients of composite materials based on energy principles [J]. J Composite Materials, 1968, 2: 380- 384.

[4] Rosen B W. Hasin Z. Effect thermal expansion coefficients and specific heats of composite materials [J]. J Engineering Science, 1970, 8: 157- 173.

[5] 殷庆瑞, 王 通, 钱梦马录. 光声光热技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 91- 102.

[6] Tompkins S S. Thermal expansion of graphite reinforced polyimide-, epoxy-, and glass-matrix composites [J]. Intern J Therm-Phys, 1987, 81: 119- 131.

[7] Bowles D E, Tompkins S S. Prediction of coefficients of thermal expansion for unidirectional composites [J]. J Composite Materials, 1989, 23: 370- 388.