

几种单向铺层碳纤维复合材料 超低温下动态性质的研究^{*}

李伟洲 王正道^{*} 张培强

(中国科技大学, 合肥, 230026)

(* 中科院低温中心, 北京, 100080)

摘要 主要研究了几种应用于航天、航空领域的单向铺层复合材料在超低温到常温大温区范围内的动态力学性质, 运用的振动模态参数识别的时域方法, 研究了用这几种材料制成的悬臂梁的自由振动, 给出了它们的动模量、阻尼随温度变化的曲线, 通过比较低温下这几种材料动态性质的不同, 研究了纤维、基体对材料模量、阻尼大小、阻尼峰的影响。

关键词 碳纤维复合材料 低温 动态力学性质

1 序言

具有高比刚度、比强度、绝缘、抗磁等突出优点的树脂基复合材料在低温条件下得到了广泛的应用^[1], 这些材料常被用做结构材料. 由于这些构件要承受动载荷, 特别是复合材料因为本身的高阻尼特性, 常被用做减振结构, 获得其在低温下的动态力学性质就显得尤为重要. 近年来, 玻璃纤维复合材料、聚合物的低温动态性质的测量曾有报道^[2-5], 而 Adams 等人对一些常规碳纤维 (T300) 复合材料在 100-500K 温区的动态性质进行了研究^[6-7]. 由于碳纤维的模量、阻尼性质几乎不随温度变化, 其低温下的应用越来越受到重视, 尤其是新工艺制成的高强度碳纤维, 其应用更加广泛. 进一步获得超低温 (4-100K) 环境的动态性质, 对于低温阻尼变化的微观解释, 扩展材料的应用范围都有重要意义. 本文研究的几种复合材料都是目前我国航天、航空领域正在或将要使用的, 实验中获得的数据是进行结构设计的基本参数. 实验对四种碳纤维单向铺层复合材料制成的悬臂梁在 4K 到 300K 的温区内进行动态测试, 应用时域 Ibrahim 法获得系统的动态参数 (固有频率、阻尼) 随温度的变化关系, 并应用欧拉梁理论最终给出动模量、阻尼随温度变化的曲线和通过线膨胀系数修正的结果. 本文对不同铺层方向 (0°、90°) 的结果进行了比较, 为多向铺层的复合材料的低温性质预测提供了实验数据, 对阻尼峰的测定为这几种复合材料温度诱发相变的研究提供了实验基础.

* 国家自然科学基金 (No. 19732001, No. 1947061), 中科院院长基金

1998-06-16 收到第 1 次稿, 1999-03-23 收到修改稿

2 实验的理论基础

实验中使用脉冲激励, 应变片拾振, 获得悬臂梁的自由响应数据, 由 Ibrahim 法求得各阶固有频率和阻尼, 再应用欧拉梁理论可得到梁的动态模量^[8]。

Ibrahim 时域分析法:

对 N 自由度线性系统, 自由振动方程为:

$$[m]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = 0$$

其中 $\{x\}$ 为各点响应, $[m]$ 为质量矩阵, $[c]$ 为阻尼矩阵, $[k]$ 为刚度矩阵。

其中响应 $\{x\}$ 可表示为:

$$\{x\} = \sum_{i=1}^{2N} \{\Phi_i\} e^{\lambda_i t}$$

其中 $\{\Phi_i\}$ 为第 i 阶特征向量, λ_i 为相应的特征值。取采样时间分别为 $t_j, t_j + \Delta t, t_j + 2\Delta t$, 通过处理可获得如下形式:

$$([R][R]^{-1} - e^{\lambda_i \Delta t} [I])\{p\}_i = 0$$

式中 $[R]$ 为 $t_j, t_j + \Delta t$ 时刻的响应的组合矩阵, $[R]$ 为 $t_j + \Delta t, t_j + 2\Delta t$ 时刻的响应的组合矩阵。 $\{p\}_i$ 为:

$$\{p\}_i = \begin{Bmatrix} \{\Phi_i\} \\ \{\Phi_i\} e^{\lambda_i \Delta t} \end{Bmatrix}$$

问题变为解特征值问题, 由上式可求得各阶模态参数。由于噪声等因素的影响, 会在时域分析中引入虚假模态。为了剔除虚假模态, 定义模态置信因子为:

$$[MCF]_i = \left| \frac{\{\Phi_i\}}{\{\Phi_i\} e^{\lambda_i \Delta t}} \right|$$

当 $[MCF]$ 接近 1 时为真实模态, 否则为虚假模态。

欧拉梁理论:

对于细长梁, 不考虑剪切作用, 弯曲振动方程为:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0$$

其中 E 为杨氏模量, ρ 为材料密度, A 为梁的横截面积, x 为梁沿长方向的坐标, v 为梁的横向位移。对悬臂梁, 边界条件为一端固支, 一端自由, 由上式可求得自由振动的模量与固有频率的关系:

$$E = 48\pi^2 \rho \left(\frac{f_i L^2}{B_i h} \right)^2 \times 10^{-12}$$

其中 ρ 为材料密度 (g/cm^3), f_i 为第 i 阶固有频率 (Hz), L 为梁长 (mm), h 为梁的厚度 (mm), B_i 为常数, 当 $i=1$ 时为 3.516。当知道各阶固有频率后即可求出相应的动模量。

3 线膨胀系数的影响

由于材料在低温下收缩, 而梁的各种几何参数是在常温下测得的, 应考虑线膨胀系数的影响, 进行修正。定义 E 为真实模量, E_i 为表观模量, 因为随温度变化的量为 ρ, L, h , 而

$\rho = \frac{m}{Lhw}$, w 为梁宽, 整个梁的质量 m 不随温度变化, 因此:

对 0 方向的梁 (纤维铺层方向与梁长方向相同) 有:

$$\frac{E}{E_t} = \frac{(1 - \alpha_0(300 - t))^3}{(1 - \alpha_{90}(300 - t))^3(1 - \alpha_{90}(300 - t))} = \frac{(1 - \alpha_0(300 - t))^3}{(1 - \alpha_{90}(300 - t))^4}$$

其中, α 为 0 方向的线膨胀系数, α_{90} 为 90 方向的线膨胀系数.

由于 $\alpha \ll \alpha_{90} \ll 1$, 则可近似认为:

$$e = \frac{1}{(1 - \alpha_{90}(300 - t))^4} E_t$$

对 90° (纤维铺层方向与梁长方向正交) 方向:

$$\frac{E}{E_t} = \frac{(1 - \alpha_{90}(300 - t))^3}{(1 - \alpha_{90}(300 - t))^3(1 - \alpha_0(300 - t))} = \frac{1}{(1 - \alpha_0(300 - t))}$$

由于 $\alpha \ll \alpha_{90} \ll 1$, 则可近似认为:

$$E = E_t$$

4 实验装置及实验方法

线膨胀系数的测定:

本实验采用低温应变片测量材料的线膨胀系数. 实验中将一片应变片贴在待测试件, 另一片贴在石英基片上, 用来补偿应变片本身由于温度变化引起的电阻变化. 石英晶体的线膨胀系数很小, 在测试温区内呈线性且已知. 实验时将试件及石英基片降温至 4K, 调零; 升温并记录响应应变值及温度值, 至室温 (300K).

振动测试过程:

实验使用悬臂梁自由振动获得材料动态性质, 电磁簧片激振, 低温应变片贴于材料表面拾振. 实验时先降温至 4K, 由电炉加热至每一测试温度点, 激振, 采集相应数据. 实验中采用液氮降温, 注入液氮后在杜瓦瓶底保持一定的液面, 同时用电炉加热试件升温, 此时升温速度大约为 3 分钟/K. 当试件温度升至 40-50K 时, 液氮基本蒸发完毕, 此时会有一急剧升温过程, 温度大约在 1 分钟内上升 20K, 此段的数据基本未记录. 之后温度的上升速度随温度的升高而变慢, 平均为 10 分钟/K.

5 结果分析与讨论

实验中使用的复合材料梁的参数如表 1.

表 1

	HM/TDE-86 HM/4211		T300/QY8911		T300/5228	
	0°	0°	0°	90°	0°	90°
梁长 (mm)	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0
梁厚 (mm)	2.63	2.05	2.02	2.09	2.05	2.06
密度 (g/cm)	1.63	1.63	1.61	1.61	1.62	1.62
铺层	24	24	16	16	18	18

其中 HM 为一种高强度碳纤维, TDE-86, 4211, 5228 都是环氧类的树脂, QY8911 为双马树脂.

90 方向线膨胀系数的测定结果如图 1:

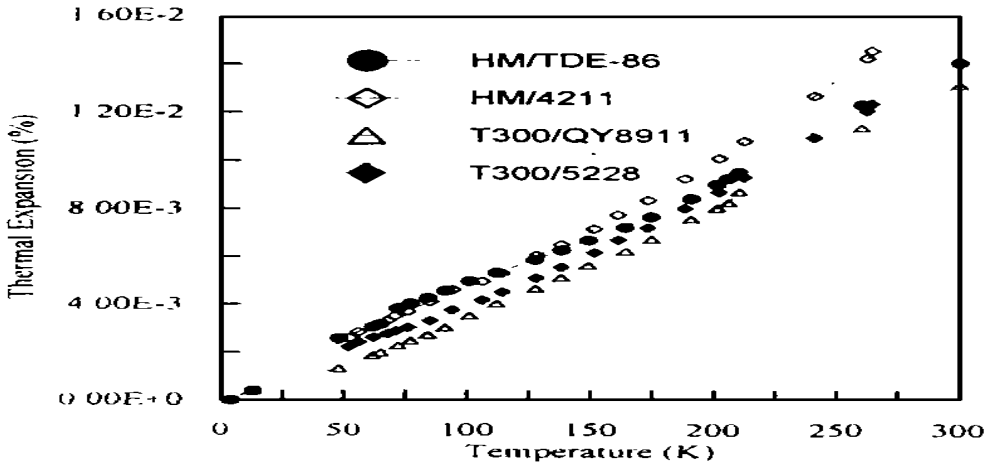


图 1

在上图中各种材料在测试温度段内, 线膨胀系数基本为常数, 由测试结果可得三种材料 90 方向的线膨胀系数为如表 2.

表 2

	HM/TDE-86	HM/4211	T300/QY8911	T300/5228
线膨胀系数 ($\times 10^{-6}/K$)	43.78	54.51	43.95	46.53

由梁的一阶固有频率得出的材料模量 (真实模量、表观模量)、阻尼结果见图 2- 7, 四种复合材料梁的一阶固有频率在 150- 300Hz 之间.

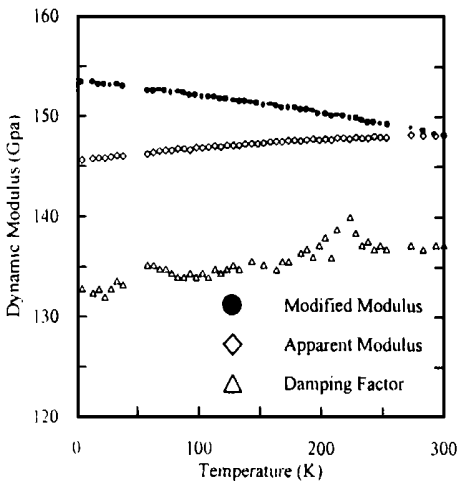


图 2 HM/TDE-860 方向

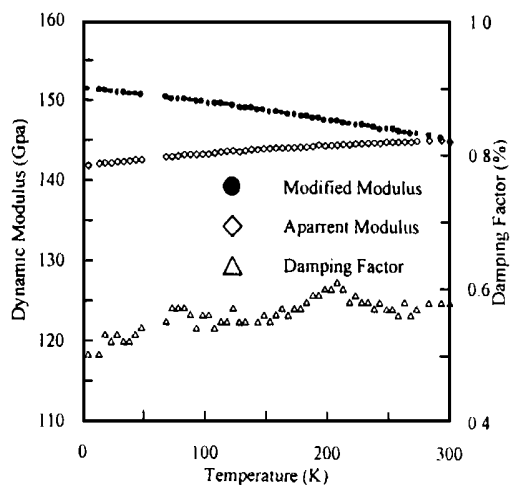


图 3 HM/42110 方向

由图 2, 3, 4, 6 可以看出, 对 0 方向梁的动模量的测试结果中, 若不考虑线膨胀系数的影响, 不能正确反映模量随温度变化的趋势 (表观模量基本是随温度的降低而降低的). 修正后可以看出, 模量随温度的降低而升高, 对大多数材料来说都有此性质. 经典复合材料理论认

为,对单向铺层的复合材料,0方向的模量主要由纤维决定,90方向的模量主要由基体决定,因此0方向的模量一般比90方向大很多.实验中使用的两种碳纤维—HM、T300,从0方向的材料性质看, HM 纤维复合材料在各种温度下,模量都比 T300 纤维复合材料高很多,表明 HM 比 T300 有更优越的性质.

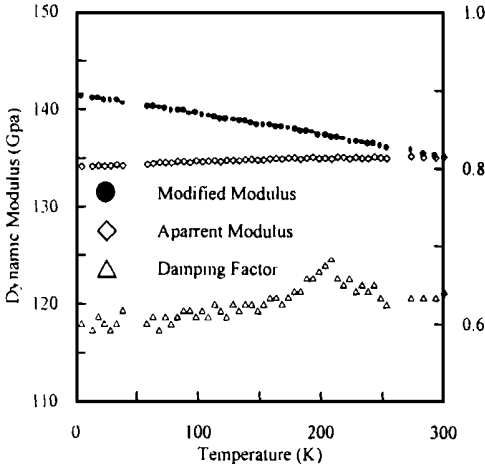


图4 T300/QY8911 0方向

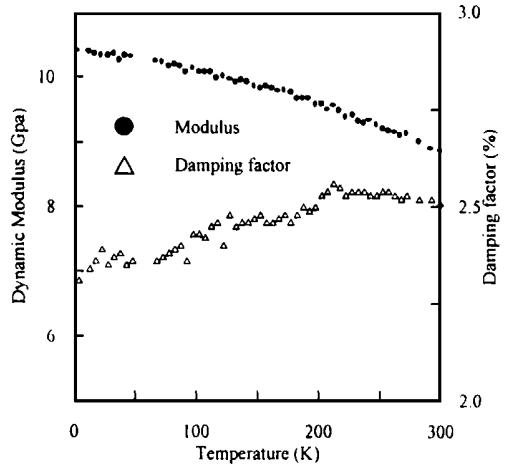


图5 T300/QY8911 90方向

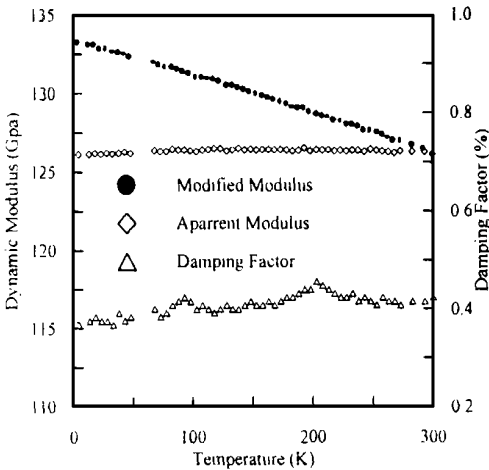


图6 T300/5228 0方向

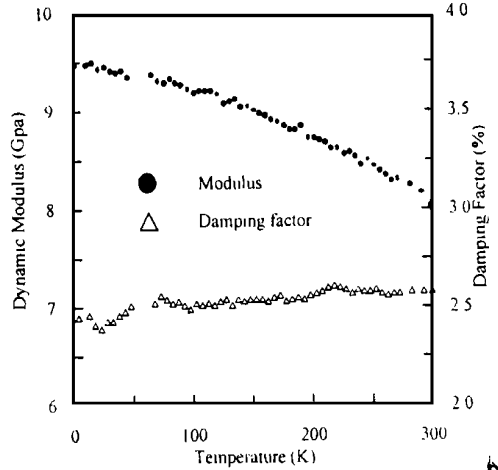


图7 T300/5228 90方向

由阻尼-温度曲线可以看出,这几种复合材料随温度降低阻尼有下降的趋势,但在一些温度点有阻尼峰存在.通常的高分子聚合体阻尼-温度曲线上随温度由高到低会有三个阻尼峰出现,分别称为 α 、 β 、 γ 峰. α 峰即所谓的主转变内耗峰,一般出现在材料的玻璃态转化点,本实验没用覆盖这段温区. β 峰一般出现在180K-300K之间, γ 峰则出现在更低的温区.对 β 峰、 γ 峰,一般认为在低温条件下,材料处于极度的收缩状态,由于基体的结构为不均匀的非晶体,特别是侧链的影响,造成内应力的存在,此时聚合体的分子链会转化到一个新的形

态, 这个转化过程反映到阻尼-温度图上就形成了阻尼峰. 与 α 峰不同的是, β 峰、 γ 峰的出现并没有伴随着模量的急剧下降, 并且峰的高度要低的多, 这表明其形成机理有很大差别. 一般认为, 复合材料的阻尼性质基本由基体的性质决定. 从实验的结果看, 对于 T300/QY8911 和 T300/5228 这两种材料, 90° 方向阻尼要远大于 0° 方向 (图 4-7), 而阻尼峰出现的温度点也不相同, 0° 方向 β 阻尼峰的出现温度要偏低, 这表明纤维的加入对高分子聚合体的阻尼的大小、相变温度点有很大的影响. 需要指出的是, 温度诱发的相变是一个复杂的过程, 常常出现的并不是单一的峰, 有时峰并不明显 (如图 5, 6, 7), 阻尼峰不仅同温度有关, 还与湿度、应变率等因素有关, 实际应用中应综合考虑.

参 考 文 献

- 1 Reed R P, Golda M. Cryogenic properties of unidirectional composites, *Cryogenic*, 1994, 34 (11): 909-928
- 2 Okada T, Nishijima S *et al.* Dynamic Young's modulus and internal friction in composite material at low temperatures, *Advances in Cryogenic Engineering (Materials)*, 1984, 30: 9-16
- 3 Hartwig G and Schwarz G. Correlation of dielectric and mechanical damping at low temperatures, *Advances in Cryogenic Engineering (Materials)*, 1984, 30: 61-69
- 4 Ledbetter H M. Dynamic elastic modulus and internal friction in G-10CR and G-11CR fiberglass-cloth-epoxy composites, *Cryogenics*, 1980, 20 (11): 637-640
- 5 Ledbetter H M and Maerz G. Temperature dependence of Young's modulus and internal friction of G-10CR and G-11CR epoxy resins, *Cryogenics*, 1980, 20 (11): 655-657
- 6 Maher M R, Adams R D and Gaitonde J M. The effect of temperature on the dynamic characteristics of heat-resistant thermoplastic composites, *Composites Science and Technology*, 1996, 56: 1425-1434
- 7 Adams R D and Gaitonde J M. Low-temperature thermal expansion of PEEK, HTA and some of their carbon fiber composites. *Composite Science and Technology*, 1993, 47: 271-287
- 8 杨景义, 王信义. 实验模态分析. 北京理工大学出版社, 1990

The Dynamic Characteristics of Several Unidirectional Carbon Fiber Composites at Ultra-low Temperature

LI Weizhou WANG Zhengdao* ZHANG Peiqiang

(University of Science and Technology of China, Hefei Anhui, 230027)

(* Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080)

Abstract Cantilever free vibration tests for four kinds of unidirectional carbon fiber composites are carried out under different temperature conditions (4K-300K). By using the time domain vibration analysis (Ibrahim method), the dynamic mechanical properties (dynamic modulus and damping factor) are obtained. The influence of ambient temperature on the mechanical properties is examined.

Key words carbon fiber composites, low temperature, dynamic characteristics