

# 复合材料热胀系数影响因素分析

闫亮<sup>1</sup> 陈海峰<sup>1</sup> 徐鹤<sup>2</sup> 冉治国<sup>3</sup>

(1 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

(2 北京卫星制造厂,北京 100094)

(3 北京机械设备研究所,北京 100854)

**文 摘** 为了分析复合材料热胀系数的影响因素,对复合材料热胀系数设计起到指导意义,通过理论分析方法对纤维树脂体系、铺层顺序、铺层角度偏差、纤维体积分数等复合材料热胀系数影响因素做了相应研究。结论表明:同种基体不同纤维,其热胀性能表现出较大的差异;不同基体对同一种纤维热胀系数有较大的影响;0°铺层在管的外层会有助于降低轴向热胀系数,同时也会对径向热胀系数的增大有一定贡献;铺层角在30°~60°时,由于角度偏差带来的热胀系数偏差较大。复合材料管件的轴向热胀系数与纤维体积分数之间呈现出高度的非线性与非单调性,径向的热胀系数呈现出单调的降低现象。

**关键词** 复合材料,热胀系数,影响因素

中图分类号:V423.42

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.004

## Analyses on Affecting Factors of Composite Thermal Expansion Property

YAN Liang<sup>1</sup> CHEN Haifeng<sup>1</sup> XU He<sup>2</sup> RAN Zhiguo<sup>3</sup>

(1 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

(2 Beijing Spacecraft, Beijing 100094)

(3 Beijing Institute of Mechanical Device, Beijing 100854)

**Abstract** Factors affecting the thermal expansion coefficient of composite is of guiding significance for the design of thermal expansion coefficient of composite. The influence factors of thermal expansion coefficient of composite, such as fiber resin system, layer order, layer angle deviation and fiber volume content, are studied and the conclusions are given in this paper. The thermal expansion performance of the same matrix varies greatly, and the different matrix has a great influence on the thermal expansion coefficient of the same fiber. The outer layer of the 0° layer will help to reduce the axial thermal expansion coefficient, and will also contribute to the increase of the radial thermal expansion coefficient; the layer angle is from 30° to 60°, The deviation of thermal expansion coefficient caused by angle deviation is large. The axial thermal expansion coefficient of the composite tube and the volume content of the fiber shows a high nonlinear and non monotone, and the radial thermal expansion coefficient shows a monotonous decrease.

**Key words** Composite, The thermal expansion coefficient, Affecting factors

### 0 引言

复合材料以其优异的力学-热学性能在航空航天等领域得以广泛应用。国外在许多卫星上也采用了低热胀系数复合材料,如“哈勃”太空望远镜高尺寸稳定的复合材料支架构件热胀系数纵向达 $0.14 \times 10^{-6}/K$ ;日本的 ASCA 卫星的 X 射线探测器主结构为

复合材料结构达到 $0.2 \times 10^{-6}/K$ ;日本的 SOLAR-B 望远镜结构热胀系数达到 $0.1 \times 10^{-6}/K$ ;俄罗斯采用高模量碳纤维复合材料的精确测量设备达 $0.6 \times 10^{-6}/K$ 。在航天应用中,大型空间平板天线需要使用可展开支撑桁架(ESS)进行支撑;ESS 对空间环境下的热变形要求较高,因此需要进行低热胀系数碳纤维复合

收稿日期:2018-04-10

第一作者简介:闫亮,1985 年出生,硕士,工程师,主要从事航天器结构设计研究。E-mail:103354928@qq.com

材料管件的研制,其关键在于对桁架中的每根管件进行定热胀系数管件的设计,因此复合材料的基本性能尤其是热胀性能<sup>[1-6]</sup>的设计及精确预测至关重要。

本文对铺层顺序、铺层角度、纤维体积分数等复合材料热胀系数影响因素给出了研究结论,可用于复合材料热胀系数工程设计参考。

### 1 复合材料热胀系数理论计算方法

在温度变化条件下,层板中单层在平面应力状态下的应力和应变有如下关系<sup>[7]</sup>:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = [\bar{S}]_k \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{Bmatrix} \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中, $k$  为单层的序号; $[\bar{S}]_k$  为第  $k$  单层的柔度矩阵; $\{\alpha\}_k$  为第  $k$  单层热胀系数。可由下面转换公式求得:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_\theta \\ \alpha_{x\theta} \end{Bmatrix}_k = [T]_k \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$[T]_k = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ 2\sin\theta\cos\theta & -2\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}_k \quad (3)$$

式中, $\theta$  为第  $k$  单层的铺设角; $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为单向板纵向和横向的热胀系数。(1)式右端第一项为单层在应力作用下产生的应变;第二项为由于温度变化而产生的应变,两者之和等于左端的单层总应变。

拉伸刚度阵为:

$$[A] = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k (z_k - z_{k-1}) \quad (4)$$

它应满足下述方程:

$$[A] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_\theta^T \\ N_{x\theta}^T \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_\theta^T \\ N_{x\theta}^T \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N [\bar{Q}]_k \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_\theta \\ \alpha_{x\theta} \end{Bmatrix}_k \cdot \Delta T_k (z_k - z_{k-1}) \quad (6)$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_\theta \\ \alpha_{x\theta} \end{Bmatrix}_k = [T]_k \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_{12} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

联立以上方程,可解出只由温度变化而引起的中

性面的各应变值( $\varepsilon_x^0, \varepsilon_\theta^0, \gamma_{x\theta}^0$ ),当  $\Delta T=1^\circ\text{C}$  时,此时的应变值就为相应的热胀系数( $a_x, a_y, a_{xy}$ )。

### 2 复合材料热胀系数影响因素分析

#### 2.1 纤维树脂体系

对于同一种基体,不同纤维以及同一种纤维与不同基体对复合材料构件热膨胀性能影响的研究采用材料性能见表 1 及表 2。图 1 为不同纤维在相同基体条件下的热胀系数,共有 6 种不同的纤维,基体为 5208,纤维体积分数为 68%。图 2 为相同纤维(T300)不同基体时复合材料的热胀系数,两种铺层与前述铺层相同。可以看出,同种基体不同纤维,其热胀性能表现出较大的差异;不同基体对同一种纤维热胀系数有较大的影响。

表 1 分析用材料纤维性能

fiber	$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$\alpha_1$ / $10^{-6}\text{K}^{-1}$	$\alpha_2$ / $10^{-6}\text{K}^{-1}$
T300	33.8	3.35	1.30	1.20	0.20	0.40	-0.30	5.60
C6000	33.8	3.35	1.30	1.20	0.20	0.40	-0.30	5.60
HMS	55.0	0.90	1.10	0.32	0.20	0.40	-0.55	3.80
P75	79.8	1.38	1.00	0.49	0.20	0.40	-0.75	3.80
P100	115.5	1.05	1.00	0.38	0.20	0.40	-0.78	3.80

表 2 分析用基体性能

matrix	$E$ /GPa	$G$ /GPa	$\mu$	$\alpha$ / $10^{-6}\text{K}^{-1}$
934 epoxy	0.63	0.23	0.37	24.4
5208 epoxy	0.63	0.23	0.37	24.4
930 epoxy	0.63	0.23	0.37	24.4
CE339 epoxy	0.63	0.23	0.37	35.2
PMR15 polyimide	0.50	0.19	0.35	20.0
2024 aluminum	10.6	4.00	0.33	12.9
Borosilicate glass	9.10	3.80	0.20	1.80

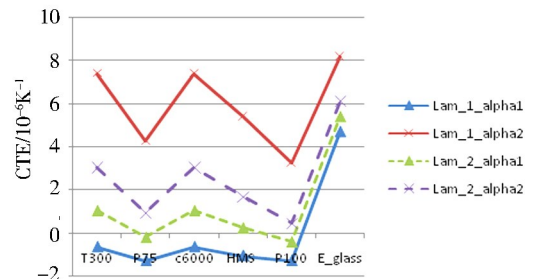


图 1 不同纤维对热胀系数的影响

Fig.1 Effects of fibers on thermal expansion

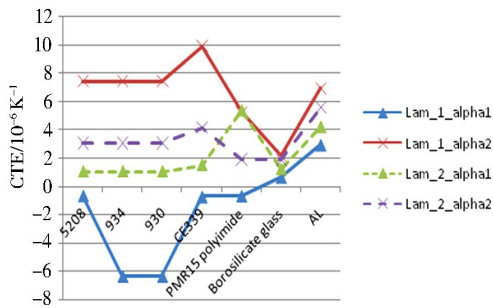


图2 不同基体对热膨胀系数的影响

Fig.2 Effects of matrix on thermal expansion

## 2.2 铺层顺序

为了探讨铺层顺序对 CTE 的影响,分析了 6 种不同的非对称铺层,分别为 ply\_1 至 ply\_6,各铺层顺序皆由管内向管外,具体如表 3 所示。

表 3 分析所用不同铺层

Tab.3 A series of of layers used for analysis

铺层	铺层顺序
ply_1	[0/0/±30/±45/±60/±75/90/90]
ply_2	[±30/0/0/±45/±60/±75/90/90]
ply_3	[±45/±30/0/0/±60/±75/90/90]
ply_4	[±60/±30/±45/0/0/±75/90/90]
ply_5	[±75/±30/±45/±60/0/0/90/90]
ply_6	[90/90/±30/±45/±60/±75/0/0]

从图 3 看出,轴向 CTE 随着 0°铺层的外移而先略微有点增大,然后急剧下降,而径向 CTE 都将随着 0°铺层的外移而增大。

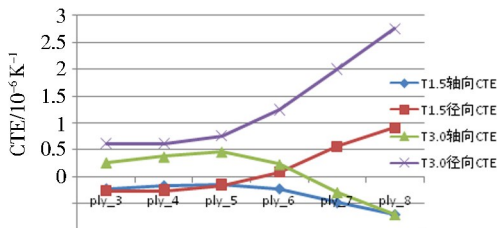


图3 铺层顺序对 CTE 的影响

Fig.4 Affects of sequence of laminated plate on CTE

这表明 0°铺层在管的外层会有助于降低轴向 CTE,同时也会对径向 CTE 的增大有一定贡献。计算结果也表明,同样的铺层、外径与边界条件下,厚壁管件的轴向与径向 CTE 都比薄壁管件对应的 CTE 要大。

## 2.3 铺层角偏差

管件在实际加工过程中,由于工艺水平的限制,对于各单层的实际铺设角可能会与设计时预定的角度有一定的偏差。目前所能达到的水平为:手工铺设误差为±2°~±3°,机器自动铺设误差为±1°~±2°。所以有必要探讨各铺设角对管件 CTE 的影响的大小,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第 3 期

即灵敏度。为了简单起见,模型中铺层设置为  $[\pm\theta]_{3s}$ ,  $\theta$  从 0°~90°,以每 15°为一间格,并且每一个  $\theta$ 、 $\theta\pm 2^\circ$  都分别作计算,计算出该  $\theta$  处的灵敏度。

从图 4 和图 5 可以看出,按该铺层方式的管件,轴向热胀系数按近似负正弦弦曲线方式变化,径向热膨胀系数则按余弦曲线方式变化。轴向 CTE 在  $\theta$  为 30°左右时取得最小值,而径向 CTE 则是在  $\theta$  为 60°左右时取得最小值。 $\theta$  取值 45°左右时,管件的轴向与径向的 CTE 近似相等。

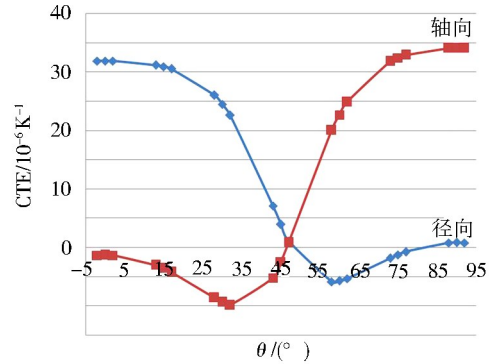


图4 同角度下轴向与径向 CTE

Fig.4 Transverse and longitudinal CTE of the same angles

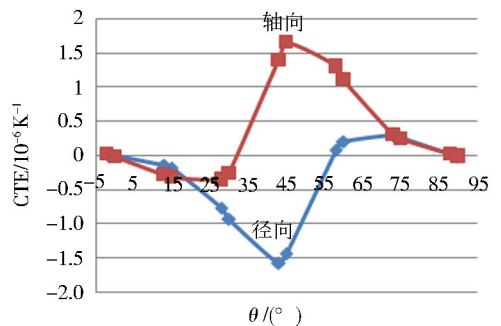


图5 同角度下轴向与径向 CTE 灵敏度

Fig.5 Sensitivity of transverse and longitudinal CTE on the same angles

图 5 是采用对每一个  $\theta$ 、 $\theta\pm 2^\circ$  处的 CTE 对  $\theta$  进行差商所得,表征了各个角度的铺层对两个方向的 CTE 的影响大小,在管件铺层设计时应主动避开那些灵敏度高的角度值,从而减小最终管件的 CTE 与预设值之间的差异。灵敏度曲线的趋势正好是负正弦与余弦的导数曲线。轴向灵敏度在 40°~60°时偏高,而此时的轴向 CTE 却很小,甚至于达到零;而径向灵敏度则在 30°~50°时较高。综合起来,铺层角在 30°~60°时要特别注意。

## 2.4 纤维体积分数

为了探讨纤维体积分数对其结果的影响,设定了如下的模型,管外径 40 mm,厚度 2.00 mm,两种铺层分别为  $[45/-45/0/30/-30/0]_s$  和  $[45/-45/0/60/-60/0]_s$ ,因此这里的纤维与基体采用航空航天里常用的

T300 与 5208 树脂,性能如表 4 所示。

表 4 计算用组分性能

Tab.4 Performance of components used for analysis

fiber	$E_1$ /GPa	$E_2$ /GPa	$G_{12}$ /GPa	$G_{23}$ /GPa	$\mu_{12}$	$\mu_{23}$	$\alpha_1$ / $10^{-6}K^{-1}$	$\alpha_2$ / $10^{-6}K^{-1}$
T300	33.8	3.35	1.3	1.2	0.2	0.4	-0.3	5.6
5208 epoxy	0.63	0.63	0.256	0.256	0.23	0.23	0.37	0.37

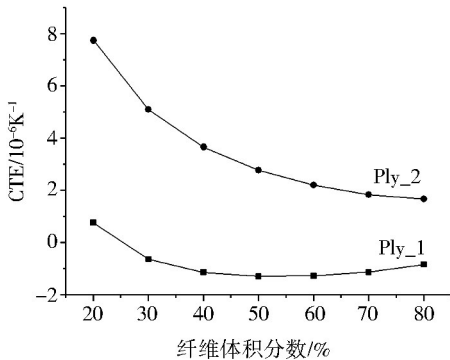


图 6 两种铺层下轴向热胀系数与纤维体积分数的关系

Fig.6 Relationship between longitudinal CTE and the two layers' fiber volume fraction

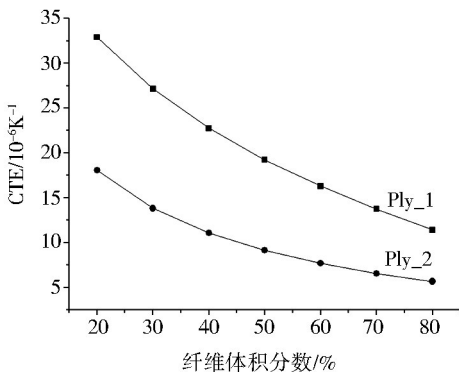


图 7 两种铺层下横向热胀系数与纤维体积分数的关系

Fig.7 Relationship between transverse CTE and the two layers' fiber volume fraction

由图 6 可知,材料的轴向热胀系数随着纤维体积分数的增加逐渐下降,纤维体积分数超过 50% 以后有小幅上升。复合材料管件的轴向热胀系数与纤维体积分数之间呈现出高度的非线性与非单调性,这不仅与纤维与基体之间的相对刚度比、热胀系数比有关系,也与管件的铺层方式有关。而径向的 CTE 呈现出单调的降低现象,见图 7。材料的径向热胀系数随着纤维体积分数的增加而下降。这是由于纤维横向

热胀系数小于基体,随着纤维体积分数的增加,纤维逐渐起主导作用,从而导致径向热胀系数单调下降。

### 3 结论

(1) 影响因素分析:同种基体不同纤维,其热膨胀性能表现出较大的差异;不同基体对同一种纤维热胀系数有较大的影响; $0^\circ$  铺层在管的外层会有助于降低轴向 CTE,同时也会对径向 CTE 的增大有一定贡献;铺层角在  $30^\circ \sim 60^\circ$  时,由于角度偏差带来的热胀系数偏差较大。复合材料管件的轴向热胀系数与纤维体积分数之间呈现出高度的非线性与非单调性,而径向的 CTE 呈现出单调的降低现象。

(2) 航天器上所用复合材料热胀系数会受到固化内应力、孔隙、铺层角度偏差等影响,纵向 CTE 相对于横向 CTE 受工艺因素影响小,在航天器高稳定结构件中尽可能使用纵向 CTE 来满足使用要求,避免工艺因素带来偏差。同时,针对特定生产厂家研制的复合材料构件,也可摸索工程系数  $K$  去校正理论分析结果。

### 参考文献

- [1] KIM R Y, CRASRO A S, SCHOEPPNER G A. Dimensional stability of composite in a space thermal environment[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60:2601-2608.
- [2] TSUYOSHI OZAKI, KIMIYOSHI NAITO, NAITO MIKAMI, et al. High precision composite pipes for SOLAR-B optical structures[J]. Acta Astronautica, 2001, 48:321-329.
- [3] LANDERT M, KELLY A, STEARN R J, et al. Negative thermal expansion of laminates[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 3563-3567.
- [4] GIUO ROMEO, GIACOMO FRULLA. Analytical and experimental results of the coefficient of thermal expansion of high-modulus graphite-epoxy materials[J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29:751.
- [5] KARADENIZ Z H, KUMLUTAS D. A numerical study on the coefficients of thermal expansion of fiber reinforced composite materials[J]. Composite Structures, 2007, 78:1-10.
- [6] SONG M H, WU G H, CHEN G Q, et al. Thermal expansion and dimensional stability of unidirectional and orthogonal fabric M40/AZ91D composites[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20:47-53.
- [7] 陈烈民. 复合材料力学和复合材料结构力学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001