

# 碳纤维/环氧复合材料典型铺层的热膨胀系数及其复合计算

张锡昌 居筱曼

## 摘 要

本文采用当前我国飞机上使用的国产碳纤维复合材料制成七类典型铺层层压板,精确测定上述各类典型结构的各不同方向或不同铺层角的热膨胀系数,为材料研究和应用设计提供一整套可靠的实测数据。同时利用这些实测数据,对膨胀系数复合公式进行验算,得到很好的一致性。应用这些复合公式,可对各种铺层碳纤维复合材料各不同方向的热膨胀系数进行计算,以及设计出各种热膨胀系数(包括零膨胀系数)的碳纤维复合材料。

## 一、前 言

碳纤维/环氧复合材料由于性能优越,在飞机上得到越来越多的应用,预计将成为飞机的主要材料之一。

材料的热膨胀系数是材料应用和产品设计的重要性能数据,在确定模具大小、保证制件尺寸、防止翘曲、变形和减少内应力等方面,都是必不可少的。碳纤维复合材料是由两种膨胀系数不同的材料复合而成,其热膨胀系数是随复合材料的铺层结构和使用方向而变的一系列数值。由于碳纤维和树脂的热膨胀系数相差甚大,致使单向复合材料具有高度的各向异性,加上碳纤维的负膨胀行为,再经铺层复合,则其热膨胀行为相当复杂,可引起尺寸的复杂变化及翘曲变形,如果与金属部件结合或在与总体工程装配中,则问题就更加严重。

碳纤维复合材料的特点之一,与其它复合材料一样,即性能的可复合性,除力学性能可复合外,热膨胀性能也可以按照制件的要求进行复合。在复合材料膨胀系数与铺层结构及有关力学性能等相关性研究的基础上,提出复合材料膨胀系数复合的数学公式,用它计算各种铺层的碳纤维复合材料各方向的膨胀系数,进而进行材料设计,并生产符合一定膨胀系数

(包括零膨胀)的材料。零膨胀或近零膨胀碳纤维复合材料,在要求尺寸稳定性高或要求热应力平衡的部件上已经得到应用,如飞机的活动翼面、光学仪器部件、人造卫星本体、微波天线反射盘和太阳能电池基板等<sup>[1]</sup>。

碳纤维复合材料热膨胀系数的测定和复合计算,常见于报道,但由于各研究目的不同和研究条件所限,材料品种和质量并不一样,铺层结构也只有二、三种,因此这些数据不能为我国当前碳纤维复合材料研究、生产及飞机设计直接应用。为了更好地结合实际情况,本课题采用当前我国飞机上使用的碳纤维复合材料所用的树脂、纤维和工艺,制成各典型铺层的层压板,精确测定各温度下的各种不同铺层结构的不同方向的热膨胀系数,为材料研究和飞机设计提供一整套可靠的实测数据。同时利用这套实测数据,对热膨胀复合公式进行验算,评定其可应用性的程度,以便使这些公式在材料研究、生产和飞机部件设计中得到应用。

## 二、试 验

根据飞机用碳纤维复合材料的一般使用情况,选择七类典型铺层,测定其不同方向的热膨胀系数。这七类典型铺层的名称、铺层和测定方向见表1。

热膨胀系数试验方法采用国家标准 GB2572—81《玻璃钢平均线膨胀系数试验方法》，对试样尺寸因各铺层碳纤维复合材料样品厚度不能任意加厚，所以将试样厚度改为2 mm。试样均经固化温度(150℃)处理3h。试验升温速度为 $1 \pm 0.1$ ℃/min，测定20℃到70℃，90℃，110℃，130℃和150℃的平均热膨胀系数。每个试验结果为3~5个试样测定值的平均值。

表1 典型铺层名称、铺层和测定方向

样品编号	典型铺层名称	铺层	测定方向或铺层角
I	单向铺层	$[0^\circ]_{16}$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
II	交叉铺层	$[\pm\theta^\circ]_4$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
III	交叉+纵向铺层	$[0^\circ_2/\pm\theta^\circ]_{2s}$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
IV	交叉+横向铺层	$[90^\circ_2/\pm\theta^\circ]_{2s}$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$
V	正交铺层	$[0^\circ_2/90^\circ_2]_{2s}$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
VI	双正交铺层	$[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{2s}$	$0^\circ, 7.5^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ$
VII	正交+纵向铺层	$[45^\circ/0^\circ_2/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/-45^\circ_2/0^\circ/45^\circ]_{1s}$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$

### 三、试验结果

各种典型铺层的各方向角( $\theta^\circ$ )或铺层角( $\theta^\circ$ )的平均热膨胀系数( $\alpha$ )和温度(20~t℃)的关系曲线如图1~7。

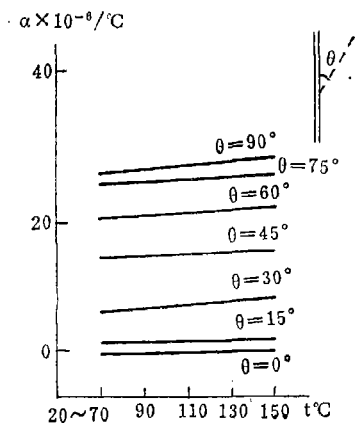


图1 单向铺层 $\alpha$ -t曲线

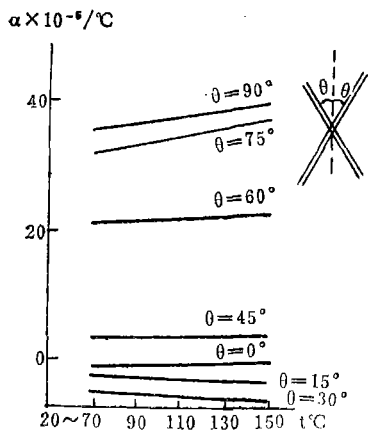


图2 交叉铺层 $\alpha$ -t曲线

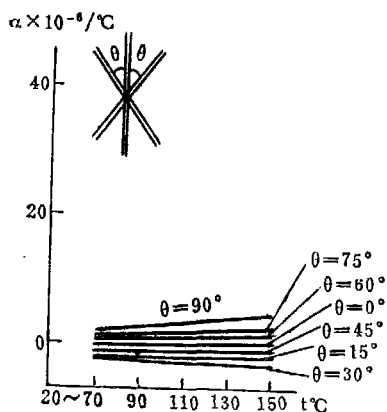


图3 交叉+纵向铺层 $\alpha$ -t曲线

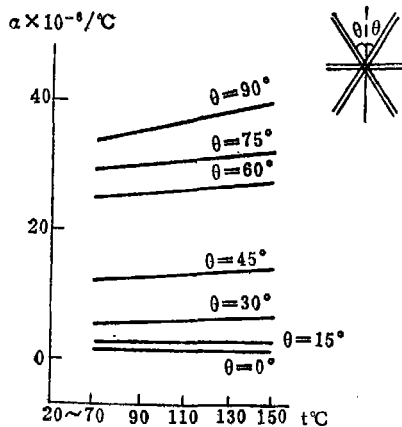


图4 交叉+横向铺层 $\alpha$ -t曲线

### 四、膨胀复合公式验算

#### 1. 单向铺层各方向热膨胀系数的计算

利用单向铺层碳纤维复合材料 $0^\circ$ 方向和

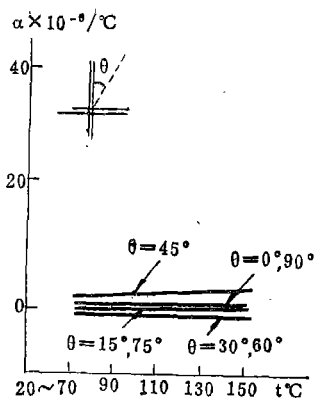


图 5 正交铺层 $\alpha$ - $t$ 曲线

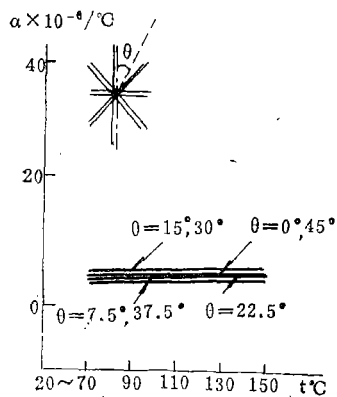


图 6 双正交铺层 $\alpha$ - $t$ 曲线

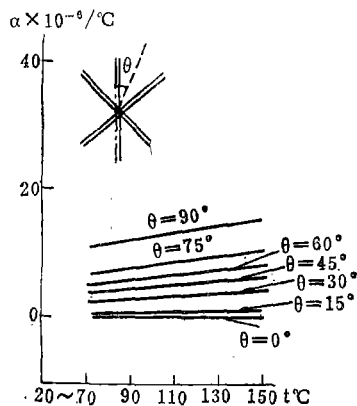


图 7 正交+纵向铺层 $\alpha$ - $t$ 曲线

90°方向的热膨胀系数,计算其各方向的热膨胀系数,一般采用下列公式<sup>[2]</sup>:

$$\alpha_{\theta} = \alpha_{11} \cos^2 \theta + \alpha_{22} \sin^2 \theta$$

式中

$\alpha_{\theta}$ ——取样方向为 $\theta^\circ$ 角时的 $\alpha$ ;

$\alpha_{11}$ ——取样方向为 $0^\circ$ 角时的 $\alpha$ ;

$\alpha_{22}$ ——取样方向为 $90^\circ$ 角时的 $\alpha$ ;

$\theta^\circ$ ——取样方向角。

用实测结果与公式计算结果进行比较,二者相当吻合,见表2和图8。

表 2

$\theta^\circ$	实 测 值 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理 论 值 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	0.12	0.12
15	2.22	2.16
30	7.96	7.73
45	16.27	15.34
60	22.81	22.94
75	28.48	28.51
90	30.55	30.55

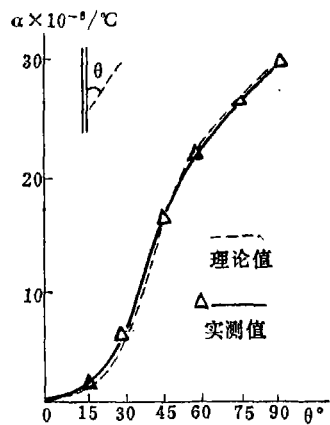


图 8 单向铺层 $\alpha$ - $\theta$ 曲线

## 2. 双向铺层的热膨胀系数复合

采用Halpin公式<sup>[3]</sup>计算交叉铺层的铺层角 $2\theta^\circ$ 中线方向的热膨胀系数,其计算结果与实测数值能很好吻合。Halpin公式及计算步骤如下:

$$\epsilon = \frac{A_{22}R_1 - A_{12}R_2}{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}$$

式中

$$R_1 = J_1 h + J_2 H_1;$$

$$R_2 = J_1 h - J_2 H_1;$$

$$A_{11} = U_1 h + U_2 H_1 + U_3 H_2;$$

$$A_{22} = U_1 h - U_2 H_1 + U_3 H_2;$$

$$A_{12} = U_4 h - U_3 H_2;$$

$$J_1 = (U_1 + U_4) W_1 + 2 U_2 W_2;$$

$$J_2 = U_2 W_1 + 2 W_2 (U_1 + 2 U_3 - U_4);$$

$$W_1 = 1/2 (\alpha_{11} - \alpha_{22});$$

$$W_2 = 1/4 (\alpha_{11} - \alpha_{22});$$

$$H_1 = \sum_{n=1}^N h_n \cos 2\theta_n;$$

$$H_2 = \sum_{n=1}^N h_n \cos 4\theta_n;$$

$$U_1 = 1/8 (3Q_{xx} + 3Q_{yy} + 2Q_{xy} + 4Q_{ss});$$

$$U_2 = 1/2 (Q_{xx} - Q_{yy});$$

$$U_3 = 1/8 (Q_{xx} + Q_{yy} - 2Q_{xy} - 4Q_{ss});$$

$$U_4 = 1/8 (Q_{xx} + Q_{yy} + 6Q_{xy} - 4Q_{ss});$$

$$Q_{xx} = \frac{E_x}{1 - \nu_x \nu_y};$$

$$Q_{yy} = \frac{E_y}{1 - \nu_x \nu_y};$$

$$Q_{ss} = E_s;$$

$$Q_{xy} = \frac{\nu_y E_x}{1 - \nu_x \nu_y};$$

$E_x$ —纵向拉伸模量;  
 $E_y$ —横向拉伸模量;  
 $E_s$ —剪切模量;  
 $\nu_x$ —纵向泊松比;  
 $\nu_y$ —横向泊松比;  
 $\alpha_{11}$ —纵向(纤维方向)热膨胀系数;  
 $\alpha_{22}$ —横向热膨胀系数;  
 $h$ —试样厚度;  
 $h_n$ —试样内第 $n$ 层厚度。

碳纤维复合材料的实测结果和公式计算结果比较见表3和图9。

### 3. 三向铺层的热膨胀系数复合

用Halpin公式计算交叉+纵向和交叉+横向铺层的各铺层角 $20^\circ$ 中线方向的热膨胀系数,并和实测数据进行比较,结果见表4、图10和表5、图11。

表 3

$\theta^\circ$	实 测 值 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理 论 值 $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	0.13	0.12
15	-1.79	-1.39
30	-5.85	-6.06
45	4.13	3.20
60	25.63	26.41
75	37.24	37.76
90	40.25	40.28

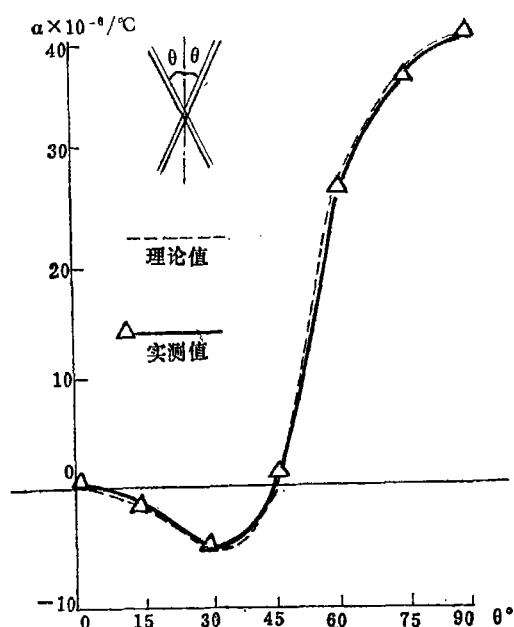


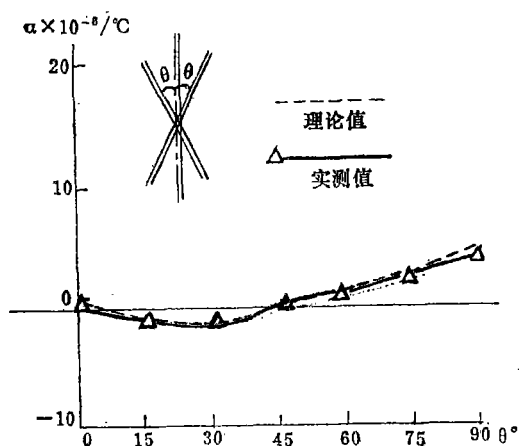
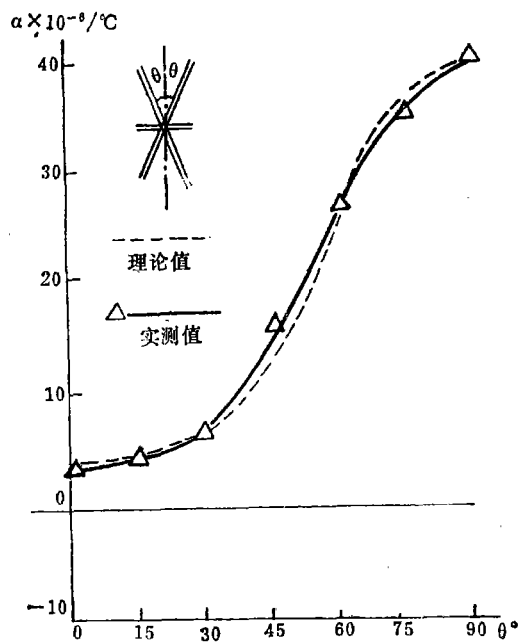
图 9 交叉铺层 $\alpha-\theta^\circ$ 曲线

表 4

$\theta^\circ$	实测值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理论值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	0.13	0.12
15	-0.97	-0.07
30	-1.46	-2.17
45	-0.09	1.11
60	1.43	1.77
75	2.57	2.87
90	2.85	3.19

表 5

$\theta^\circ$	实测值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理论值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	2.85	3.19
15	3.20	3.54
30	6.04	5.36
45	15.62	12.04
60	28.73	27.30
75	34.57	38.17
90	40.25	40.28

图 10 交叉+纵向铺层 $\alpha-\theta$ 曲线图 11 交叉+横向铺层 $\alpha-\theta$ 曲线

## 4. 正交和双正交铺层热膨胀系数复合

用Halpin公式计算正交、双正交及正交+纵向铺层的各方向的热膨胀系数, 并和实测数据进行比较, 分别见表6、表7和表8及图12、图13和图14。

表 6

$\theta^\circ$	实测值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理论值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	2.85	3.19
15	2.85	3.20
30	2.48	3.19
45	4.13	3.20
60	2.48	3.19
75	2.85	3.20
90	2.85	3.19

表 7

$\theta^\circ$	实测值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理论值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	3.22	3.20
7.5	3.08	3.20
15	3.26	3.20
22.5	3.09	3.20
30	3.26	3.20
37.5	3.08	3.20
45	3.22	3.20

表 8

$\theta^\circ$	实测值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	理论值, $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$
0	0.10	-0.01
15	0.24	0.45
30	1.89	1.64
45	3.81	2.60
60	6.51	3.93
75	8.53	6.08
90	14.06	12.90

## 五、结 论

1. 本文系统地对碳纤维复合材料各种典型铺层的热膨胀系数进行了测定, 迄今尚未见于国内外文献。

2. 本课题选用当前国内飞机上使用的碳纤维复合材料, 铺制典型铺层样品, 严格控制工艺条件, 采用现行国家标准试验方法, 精确测定平均热膨胀系数, 从而使所有数据之间, 具有很好的统一性和可比性。共取得上千个数据、上百条曲线, 是目前国内碳纤维复合材料热膨胀系数方面较全面、较准确的数据资料, 可供国内科研、生产、设计部门应用。

3. 本课题利用实测数据, 对热膨胀系数复合公式进行验算, 证实所列公式具有很高的可应用性。单向铺层各方向热膨胀系数, 采用所列三角函数公式计算, 在各温度范围都能与实际测定结果很好吻合。交叉铺层中  $2\theta$  铺层角中线方向的热膨胀系数随  $\theta$  角增大而变化。当  $\theta$  在  $30^\circ$  附近时, 出现很大的负膨胀, 应用 Halpin 公式进行验算, 其计算值与实测值非常一致。

三种正交铺层各方向的热膨胀系数与 Halpin 公式计算结果之间, 也比较一致。此外, 还可以看到这种铺层结构中, 各方向的热膨胀系数几乎相同, 近乎各向同性的现象。

4. 应用本文的复合公式, 可对各种铺层碳纤维复合材料各个方向的热膨胀系数进行计算, 设计出符合部件要求的热膨胀系数, 包括某方向为零的膨胀系数。

## 参 考 文 献

- [1] Robert, R. Johnson, Murst, H.; Kural, George, B. Machey, NASA TR 165632.
- [2] James, R. Strife, Kar, M. Prew, J. Composite Material, Vol. 13 (1979), P. 264.
- [3] Halpin, J. C., Pagam, N. J., AFML-TR -68-395.

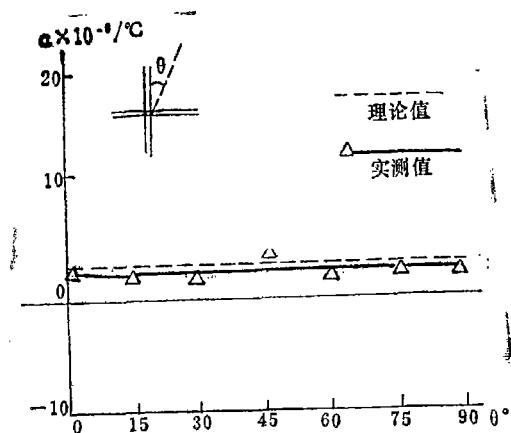


图 12 正交铺层  $\alpha-\theta$  曲线

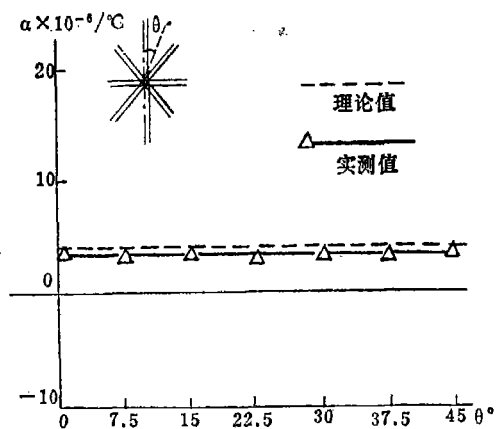


图 13 双正交铺层  $\alpha-\theta$  曲线

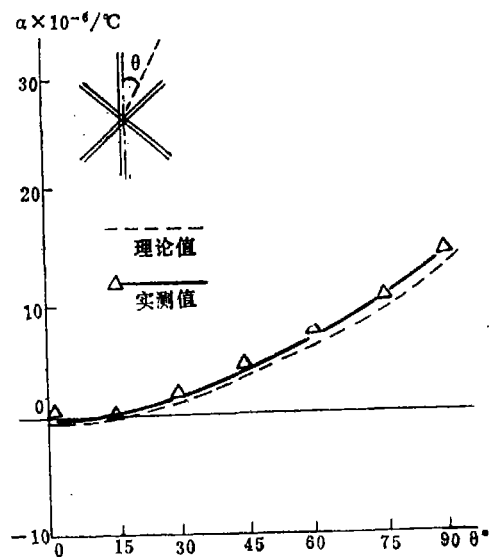


图 14 正交+纵向铺层  $\alpha-\theta$  曲线