

复合材料飞机壁板厚度及准确度计算

沈阳航空工业学院 陈唤民 齐淑华 过杨

主要介绍碳/环氧树脂基复合材料中纤维的不均匀度、含胶量及固化工艺参数(压力、温度、时间等)对复合材料壁板厚度的影响。根据准确度原理建立了厚度准确度公式,通过计算与分析,证明此公式可用于实际。

Wall-thickness and Its Accuracy Computation of Composite on Aircraft Covered Plates

Chen Huanmin Qi Shuhua Guo Yang
(Shenyang Aeronautical Institute)

This paper introduces mainly the effect of non-uniformity of carbon-fibers and ratio of epoxy weight and solidified technology parameters (pressure, temperature and time etc.) on the thickness of carbon/epoxy composite. The formulae of thickness in accuracy were derived based on the principle of accuracy and then through the computation and analysis, the formulae might be proved and applied to practice.

引言

碳/环氧树脂基复合材料壁板厚度的形成与金属板件不同,金属板件的厚度通常由冶金工厂保证。在加工与装配过程中除了成形时的材料变薄与增厚外,一般不再发生变化。复合材料壁板厚度的形成与下列因素有关:首先与原材料即与碳纤维及树脂的质量有关,它们直接影响壁板的厚度;其次与纤维和树脂的体积含量比有关,两者的体积含量比不同时得到的壁板厚度也不同。此外,与采用的成形工艺方法和固化工艺参数也有一定关系,不过与前两者相比,它们的影响要小些,但也不能忽视。

本文从国内树脂基复合材料的实际出发,首先考虑碳纤维和树脂的质量及两者的体积含量比,然后再考虑固化工艺参数的影响,并根据准确度基本原理,建立树脂基复合材料板件厚度及准确度计算公式,通过计算与分析结果,为生产部门确定厚度准确度提供依据。此公式也可供国内有关部门制定复合材料板件(工件)厚度标准时参考。

一、复合材料飞机壁板厚度计算

复合材料壁板厚度与预浸料层数(n)有关,对常用的铺叠成形工艺来说,壁板厚度可按下式确定:

$$t = n \times t_1 \times (1 + \alpha) \quad (1)$$

式中: t —壁板的公称厚度;

材料工程

t_1 —预浸料的厚度(为已知);

α —固化后叠层压缩量为10~20%,通常可取15%左右。

根据铺层设计所给出的铺层数(n)按上式可求出壁板厚度的公称尺寸。

二、复合材料壁板厚度准确度的计算

1. 碳纤维与树脂混合比相对误差的计算

如已知碳纤维原丝单位长度重量为 q_k ,允许的极限偏差为 $\pm 3\%$,工件的含胶量为 W_m ,允许极限偏差为 $\pm 3\%$ 。

$$\text{已知公式 } K = \frac{W_m}{1 - W_m} \quad (2)$$

式中: W_m —固化后树脂重量百分比;

K —树脂与纤维重量的混合比。

如对(2)式取偏导数:

$$\frac{\partial K}{\partial W_m} = \frac{1}{(1 - W_m)^2} \quad (3)$$

如已知: $\Delta K = \frac{\partial K}{\partial W_m} \cdot \Delta W_m$

$$\text{则 } \left(\frac{\delta K}{K} \right)_x = \pm \frac{1}{(1 - W_m)} \times \frac{\Delta W_m}{W_m} \quad (4)$$

2. 壁板厚度的计算

根据体积不变的假设知复合材料板件体积可按下式计算:

$$V = V_f + V_e + V_b \quad (5)$$

式中: V —板件体积;

V_f —纤维体积；

V_r —树脂体积；

V_h —气泡与空隙所占体积通常 $<1\%$ ，故可忽略不计。

将上式除以面积 F ，并忽略 V_h ，可得到：

$$t = \frac{V}{F} = \frac{V_f}{F} + \frac{V_r}{F} \quad (6)$$

已知： $K = \frac{W_m}{1 - W_m}$

$$\therefore G_r = K \cdot G_f$$

代入 (6) 式可得到：

$$t = \frac{1}{F} \left(\frac{G_f}{r_f} + \frac{G_r}{r_r} \right) = \frac{G_f}{F} \left(\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r} \right) \quad (7)$$

$$\text{令：} D = \frac{G_f}{F}$$

上式又可写成：

$$t = D \left(\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r} \right) \quad (8)$$

上两式中： G_f —纤维重量；

r_f —纤维比重；

G_r —树脂重量；

r_r —树脂比重；

D —预浸料单位面积内纤维含量。

如取一单位面积 (1×1) m^2 的无纬布，则它含有的纤维重量为在 $1m$ 宽范围内含有 n 束 $1m$ 长的纤维总重量，可按下列式计算：

$$D = n \times 1 \times q_L \quad (9)$$

如排布机排带间距为 h 时，则：

$$n \times h = 1 \quad \therefore n = \frac{1}{h} \quad (10)$$

将 (9)、(10) 式代入 (8) 式：

$$t = \frac{q_L}{h} \left(\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r} \right) \quad (11)$$

如对 (11) 式求偏导数可得到：

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial q_L} = \frac{1}{h} \left(\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r} \right) \\ \frac{\partial t}{\partial K} = \frac{q_L}{h r_r} \end{cases} \quad (12)$$

3. 壁板厚度准确度的计算

常用的计算准确度的方法有 3 种：

(1) 极值法

$$\begin{aligned} \text{已知：} \delta_t &= \sum A_i \delta_i \\ &= \left(\frac{\partial t}{\partial q_L} \delta q_L + \frac{\partial t}{\partial K} \delta K \right) \end{aligned}$$

将式 (11)、(12) 代入上式并考虑分布带中点值均为零的情况，简化后可得到下式：

$$\left(\frac{\delta t}{t} \right)_x = \pm \left[\frac{\delta q_L}{q_L} + \left(\frac{1}{r_r} \times \frac{1}{\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r}} \right) K \cdot \frac{\delta K}{K} \right] \quad (13)$$

(2) 按误差呈正态分布时的概率法计算

$$\begin{aligned} (\delta_t)_x &= \pm \sqrt{\left(\epsilon \frac{\partial t}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \\ (\delta_t)_x &= \pm \sqrt{\left(\frac{\delta q_L}{q_L} \right)^2 + \left(\frac{1}{r_r} \times \frac{1}{\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r}} \right)^2 K^2 \left(\frac{\delta K}{K} \right)^2} \quad (14) \end{aligned}$$

(3) 按概率法实用经验公式计算

$$\left(\frac{\delta_t}{t} \right)_x = \pm H \sqrt{\left(\frac{\delta q_L}{q_L} \right)^2 + \left(\frac{1}{r_r} \times \frac{1}{\frac{1}{r_f} + \frac{K}{r_r}} \right)^2 K^2 \left(\frac{\delta K}{K} \right)^2} \quad (15)$$

国外一些飞机公司规定复合材料壁板的含胶量为 35%，允许的极限偏差为 $\pm 3\%$ ，可按上述同样方法分别计算。

对不同的含胶量计算的结果进行比较 (表 1)。

表 1 计算结果

计算方法	相对误差	固化后树脂重量百分比		
		$W_{m1}=30\%$	$W_{m2}=35\%$	$(W_{m2}-W_{m1})$
极值法		$\pm 8.2\%$	$\pm 8.3\%$	$\pm 0.1\%$
概率法	$\left(\frac{\delta t}{t} \right)_x$	$\pm 6.0\%$	$\pm 6.1\%$	$\pm 0.1\%$
经验公式		$\pm 7.3\%$	$\pm 7.4\%$	$\pm 0.1\%$

从上表列出的计算结果表明，对两种不同的含胶量按 3 种方法分别计算，得到的 $\left(\frac{\delta t}{t} \right)_x$ 其相对差很小，可忽略不计，故均可按含胶量为 30% 进行计算。

三、固化工艺参数对复合材料壁板厚度的影响

复合材料壁板厚度除与前述纤维质量、含胶量等直接有关外，还受到固化过程中工艺参数 (压力、温度、时间) 的影响。

如图 1 所示为碳/环氧树脂基复合材料的典型固化曲线，表明固化过程中压力、温度与时间的关系。不同的树脂该曲线可能有所变化，但整个过程则类似。由于实际的温度、压力与工艺规程中规定的温度、压力有差别，它的变化对厚度的影响也不能忽略，实践已证明这一点。

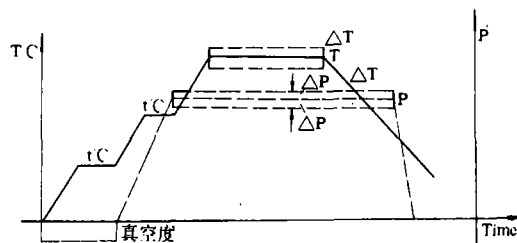


图 1 典型固化曲线

1. 压力变化对复合材料壁板厚度的影响

在固化过程中，加压时机与压力变化对复合材料板件厚度的影响较明显。通常加压时机要与升温过程相协调，如加压时机过早，熔化的树脂流失较多，会降低含胶量，使复合材料厚度变薄；如加压时间滞后，树脂已开始凝固，加压不能使树脂与纤维压成密实的整体，内部疏松则板件变厚。通常对不同树脂基体在固化工艺规范中规定固化压力的名义值。固化压力与采用的成形工

艺方法有关,在加压过程中由于工件形状(单、双曲面)和尺寸不同,实际压力会大于或小于固化压力。通常加压时机可通过实验加以测定,而压力变化则受多种因素制约,较难控制。压力与厚度的关系,可用下式表示:

$$t = K_1 \frac{P_0}{P} \quad (16)$$

式中: K_1 —减薄系数为 0.8~0.9;

P_0 —固化名义压力;

P —固化实际压力。

上式表明:如 $P = P_0$,则厚度减薄符合公式(1)的规定。如 $P > P_0$,则厚度还要进一步变薄;反之,如 $P < P_0$,厚度反而会适当增厚。

2. 温度变化对复合材料壁板厚度的影响

在固化过程中,如采用的压力为固化名义压力,当固化温度 $T > T_0$ (固化温度),此时树脂流动性好,在同样压力下失胶多,板件厚度会有所变薄。反之,如 $T < T_0$,由于树脂粘性增加,在同样压力下,溢出的胶液少,厚度反而有所增大。由于温度的滞后作用和分布的不均匀性会使实际温度偏离固化温度。根据上述可知:温度对厚度的影响是通过压力起作用,如果把温度变化对厚度的影响视作一个附加压力的作用,可用下式表示:

$$P_2 = K_2 \frac{T}{T_0} P_1 \quad (17)$$

式中: P_1 —固化时的压力;

P_2 —由温度产生的附加压力;

K_2 —修正系数为 0.5~0.6;

T_0 —固化名义温度;

T —固化实际温度。

如果综合考虑压力、温度对厚度的影响,则可以用下式表示总压力:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 = P_1 \left(1 + K_2 \frac{T}{T_0} \right) \quad (18)$$

由公式(16)已知:

$$t = K_1 \frac{P_0}{P_{\Sigma}} = \frac{K_1 P_0}{P_1 \left(1 + K_2 \frac{T}{T_0} \right)} \quad (19)$$

如果 P_1 为变量,上式又可变成:

$$t = \frac{K_1 P_0}{\left(K_2 \frac{T}{T_0} + 1 \right) P} \quad (20)$$

时间变化对复合材料板件厚度的影响比压力、温度的影响要小,计算时可忽略不计。

3. 固化过程中考虑压力及温度变化时壁板厚度准确度的计算

对(20)式偏微分后,可得到下式:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial P} = -\frac{K_1 P_0}{\left(K_2 \frac{T}{T_0} + 1 \right)} \left(-\frac{1}{P^2} \right) \\ \frac{\partial t}{\partial T} = \frac{K_1 K_2 P_0}{P T_0} \left(\frac{-1}{\left(K_2 \frac{T}{T_0} + 1 \right)^2} \right) \end{cases} \quad (21)$$

根据国外一些公司及国内制造碳/环氧复合材料飞机壁板采用的壁厚及其公差为例,并按上述计算壁厚准确度公式计算结果见表 2。

表 2 计算结果 (单位 mm)

方法	壁板厚度 (t)	3.70	4.20	4.70	5.00	5.60	6.70	7.40
	$(\Delta t)_x^*$	±0.30	±0.40	±0.40	±0.40	±0.50	±0.60	±0.65
极 值 法	1	±0.30	±0.34	±0.38	±0.41	±0.46	±0.54	±0.60
	2	±0.10	±0.11	±0.12	±0.13	0.15	±0.18	±0.20
	3	±0.40	±0.45	±0.50	±0.54	±0.61	±0.72	±0.80
概 率 法	1	±0.22	±0.25	±0.28	±0.30	±0.34	±0.40	±0.44
	2	±0.08	±0.09	±0.10	±0.11	±0.12	±0.14	±0.16
	3	±0.30	±0.34	±0.38	±0.41	±0.46	±0.54	±0.60
用 概 率 法 实 验 式	1	±0.27	±0.30	±0.34	±0.37	±0.40	±0.48	±0.54
	2	±0.09	±0.10	±0.12	±0.12	±0.14	±0.17	±0.18
	3	±0.36	±0.40	±0.46	±0.49	±0.54	±0.65	±0.72
建议用 $(\Delta t)_x^*$		±0.35	±0.40	±0.45	±0.50	±0.55	±0.65	±0.70

注: $(\Delta t)_x^*$ 为技术条件规定的公差; 1—纤维和含胶量对厚度的影响;

2—压力、温度对厚度的影响; 3—综合影响

对表 2 的结果与现行技术条件规定的壁厚公差相比较后发现:如果只考虑纤维质量与含胶量,壁厚公差除按极值法计算时个别厚度超差外,基本上均不超差,而按后两种方法计算时均不超差。过去则认为公差规定偏松,这是由于没有考虑压力、温度的影响的结果。如果考虑压力与温度变化和前者对厚度的综合影响,计算结果表明技术条件规定的公差偏严,还应适当放宽。

建议按上述计算结果修订技术条件规定的公差,修材料工程

订后的公差列于表 2 中,考虑到对公式作了一些简化和公差标准要求,选用较大的公差值则安全。

上述计算方法也适用于其它纤维与各种树脂组成的复合材料。

感谢程宝渠教授对本文提出的宝贵意见。