

玻璃纤维-铝合金层板 (GLARE) 的残余应力

The Residual Stresses in Glass Fiber Reinforced Aluminium Laminates (GLARE)

郭亚军 郑瑞琪 (北京航空材料研究院)

Guo Yajun Zheng Ruiqi

(Institute of Aeronautical Materials, Beijing, China)

[摘要] 对确定纤维金属层板残余应力的几种方法的基本原理进行了介绍,用X光衍射法,解析法和腐蚀去层法确定了玻璃纤维-铝合金层板(GLARE)的残余应力,对以上几种测试方法的优缺点进行了分析,提出了确定纤维金属层板残余应力的建议。

关键词 纤维金属层板 残余应力 测试方法

[Abstract] Several testing methods for determining the residual stresses in fiber reinforced metal laminates were introduced in this paper, and the residual stresses in glass fiber reinforced aluminium laminates (GLARE) were measured. Based on the testing results, the advantages and disadvantages of the above testing methods were analyzed. Some suggestions for determining the residual stresses in fiber reinforced metal laminates were presented.

Keywords fiber reinforced metal laminates GLARE residual stress testing method

1 前言

纤维金属层板是由金属薄板和纤维复合材料交替铺层后,在一定温度和压力下固化而成的一种层间混杂复合材料。目前主要有两类纤维金属层板,即芳纶-铝合金层板 (ARALL), 和纤维-铝合金层板 (GLARE)。由于铝合金与纤维复合材料的热膨胀系数不同,固化后不可避免地存在残余温度应力。确定纤维金属层板残余应力的方法有多种,其中应变片包埋法需要在层板固化前事先将应变片粘贴在金属薄板上,叠层后一同固化,通过应变输出测定层板在固化过程中和固化后的残余应力。该方法的优点是可以监测固化过程中层板残余应力的变化,缺点是必须在层板固化前将应变片贴好,操作较麻烦,一般只作研究之用。X光衍射法只能测定层板表面(约20~30 μm)的残余应力,且受到层板表面质量的严重影响,所以一般只能作定性分析。解析法是根据层板各组分材料热膨胀系数的差别和层板固化后残余应力自平衡的原理确定层板的残余应力。腐蚀去层法是用腐蚀液去掉层板某一侧的表面铝层,导致层板翘曲,通过测定层板的翘曲曲率确定层板的残余应力。

用于本文研究的GLARE层板所用的铝合金为LY12CZ,弹性模量为67.5GPa,单层厚0.325mm,热膨胀系数为 $\alpha_{\text{Al}} = 23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [1]。复合材料层为玻璃纤

维(S4)增强环氧树脂(SY14),弹性模量为48.9GPa,单层厚度为0.25mm,热膨胀系数为 $\alpha_{\text{m}} = 4.89 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,层板固化温度 T_c 为180 $^{\circ}\text{C}$ 。

2 X光衍射法

X光衍射法是测定金属材料残余应力的经典方法[2],通过测定金属晶面间距的变化度量应变而计算残余应力,可用来测定纤维金属层板表面的残余应力。

图1是用X光衍射法测量层板残余应力的原理示意图。其中N为试样表面法线,n为衍射面法线, ϕ 为试样表面法线与衍射面法线之间的夹角, ϕ_0 为试样表面法线与入射线之间的夹角, η 为入射线与衍射面法线之间的夹角,即 $\eta = 90^{\circ} - \theta$, θ 为布拉格角。

用衍射仪测量残余应力常用 0° ~ 45° 法(或 0° ~ 30° 法),即用两个入射角 ϕ_0 (0° 和 45°)分别测定两个入射角对应的衍射角 2θ 代入下式求残余应力

$$\sigma_{\phi_0} = - \frac{E}{2(H+V)} \cotg \theta_0 \frac{2\theta_{\phi_0 45} - 2\theta_{\phi_0 0}}{\sin^2(\eta + 45^{\circ}) - \sin^2 \eta} \quad (1)$$

如用 0° ~ 30° 法,上式中的45换成30即可。

X光衍射法测定铝板和GLARE层板的残余应力结果见表1。可见铝板有较大的残余压应力,相对铝板来说,2/1GLARE层板的残余应力为16MPa,3/2GLARE层板的残余应力为34MPa。从表1可见,用X

光测定的残余应力值分散性很大。由于用 X 射线测定残余应力时, 受到材料表面质量和材料内部结构的严重影响, 而且 X 光衍射法只能测定材料表面 (约 20-30 μm 深) 的残余应力, 所以只能作定性分析之用。

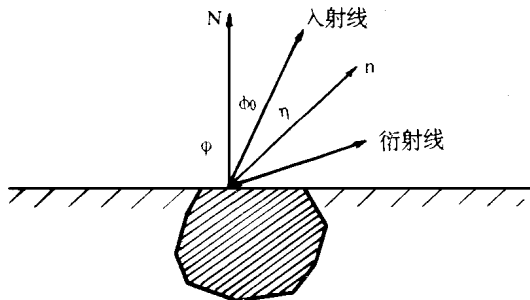


图1 X 光衍射法测定残余应力的原理

Fig. 1 Schematic showing the method for determining the residual stress by X-ray diffraction

表1 X 光衍射法测定的铝板和 GLARE 层板的残余应力

Table 1 Results of the residual stresses in GLARE and aluminium alloy sheet by X-ray diffraction

材料 类型	残余应力, MPa				平均值
	1#	2#	3#	4#	
铝板	- 38	- 38	- 12	- 24	- 28
2/1GLARE	- 12	- 24	- 12	0	- 12
3/2GLARE	24	0	12	- 12	6
相对残余应力: 2/1GLARE: $\sigma_{r,Al} = 16\text{MPa}$; 3/2GLARE: $\sigma_{r,Al} = 34\text{MPa}$					

3 解析法

1977年 S. Oken 和 R. R. June^[3] 利用固化后复合材料残余应力自平衡的原理, 根据复合材料各组分材料热膨胀系数的差异, 假定固化后的降温过程中各组分材料呈线弹性响应, 提出了如下的残余应力计算公式:

$$\sigma_{r,Al} = E_{Al} \left[1 + \frac{E_{Al} t_{Al}}{E_{fm} t_{fm}} \right]^{-1} [(\alpha_{fm} - \alpha_{Al}) (T_T - T_C)] \quad (2)$$

其中 $\sigma_{r,Al}$ 表示金属薄板内的残余应力, E_{Al} 、 t_{Al} 分别为金属薄板的弹性模量和厚度, E_{fm} 、 t_{fm} 分别为纤维-树脂层的弹性模量和厚度, α_{Al} 、 α_{fm} 为金属薄板和纤维-树脂层的热膨胀系数, T_T 、 T_C 为测试温度和层板固化温度。

本文计算残余应力时取 $T_T = 20$ 。2/1结构的 GLARE 层板和3/2结构的 GLARE 层板的残余应力计算结果见表2。

表2 解析法得到的 GLARE 层板残余应力

Table 2 Results of the residual stresses in GLARE from Equation (2)

	铝层 $\sigma_{r,Al}$, MPa	复合材料层 $\sigma_{r,fm}$, MPa
2/1GLARE	42.6	- 110.8
3/2GLARE	53.0	- 103.4

4 腐蚀去层法

以2/1结构的 GLARE 层板为例, 说明用去层法计算层板残余应力的原理。层板固化后, 是三层的对称层板, 残余应力处于自平衡状态, 无翘曲。用腐蚀液 (如氢氧化钠溶液) 去掉层板单侧金属层, 变成两层层板, 由于不对称, 层板将翘曲, 如图2所示, 翘曲后层板的曲率半径为 ρ 。如果在所去掉的铝层中心位置反向施加与铝层的残余应力相平衡的外力 $\sigma_1 t_1$ (σ_1 为铝层的残余应力, t_1 为单层铝合金的厚度), 层板将恢复到无翘曲的状态 (如图3a 所示)。图3a 所示的受力状态等效于图3b 所示的受力状态, 设各层间到层板几何中心轴 (x 轴) 的距离为 z_1 , 有

$$z_0 = - \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad z_1 = z_0 - t_2 = \frac{t_2 - t_1}{2} \text{ 和}$$

$$z_2 = t_1 + z_1 = \frac{t_1 + t_2}{2}。$$

轴向应力和弯矩为

$$N_x = \sigma_1 t_1 \quad (3)$$

$$M_x = \sigma_1 t_1 \left(z_0 + \frac{t_1}{2} \right) = \frac{1}{2} \sigma_1 (2t_1 + t_2) \quad (4)$$

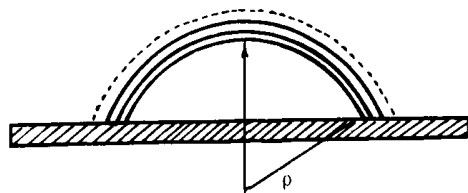


图2 去层后2/1GLARE 层板示意图

Fig. 2 Schematic for the remainder of etched 2/1 GLARE

根据经典层板理论^[4], 有

$$\begin{bmatrix} A_{11} & B_{11} \\ B_{11} & D_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \kappa_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x \\ M_x \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中

$$A_{11} = \sum_{i=1}^2 E_i (z_i - z_{i-1}) = E_1 t_1 + E_2 t_2 \quad (6)$$

$$B_{11} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^2 E_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) = \frac{t_1 t_2}{2} (E_1 - E_2) \quad (7)$$

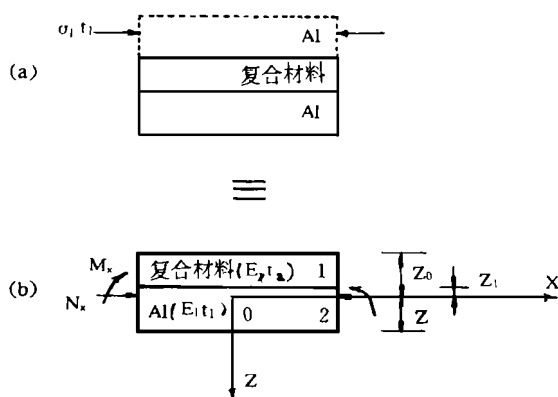


图3 腐蚀去层法确定2/1 GLARE层板残余应力的原理

Fig. 3 Schematic showing the method for determining the residual stress by etching technique

$$D_{11} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^2 E_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) = \frac{1}{12} [E_1 t_2 (t_2^2 + 3t_1^2) + E_2 t_1 (t_1^2 + 3t_2^2)] \quad (8)$$

$$k_x = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

这里 ρ 为曲率半径, 由实验测定。将 (4)、(6)、(8)、(9) 式代入 (5), 有

$$\sigma_1 = \frac{D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}}}{0.5t_1 (2t_1 + t_2) - \frac{B_{11}t_1}{A_{11}}} \frac{1}{\rho} \quad (10)$$

对于3/2结构的纤维金属层板, 重复上述推导过程, 可得到层板内铝板的残余应力计算公式为

$$\sigma_1 = \frac{D_{11} - \frac{B_{11}^2}{A_{11}}}{t_1 (1.5t_1 + t_2) - \frac{B_{11}t_1}{A_{11}}} \frac{1}{\rho} \quad (11)$$

其中

$$A_{11} = \sum_{i=1}^4 E_i (z_i - z_{i-1}) = 2 (E_1 t_1 + E_2 t_2) \quad (12)$$

$$B_{11} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 E_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) = t_1 t_2 (E_1 - E_2) \quad (13)$$

$$D_{11} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 E_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) = \frac{1}{3} [E_1 t_1 (2t_1^2 + 3t_1 t_2 + 3t_2^2) + E_2 t_2 (2t_2^2 + 3t_1 t_2 + 3t_1^2)] \quad (14)$$

根据层板残余应力自平衡的原理可知纤维层的残余应力为

$$\sigma_2 = \frac{t_1}{t_2} \sigma_1 \quad (15)$$

用氢氧化钠溶液腐蚀掉 GLARE 层板的单面铝层,

层板翘曲, 测定层板的翘曲曲率, 然后用 (10) 式、(11) 式和 (15) 式即可求出 2/1 GLARE 层板和 3/2 GLARE 层板的残余应力值, 见表3。

表3 腐蚀去层法得到的 GLARE 层板残余应力结果

Table 3 Results of the residual stresses in GLARE by etching technique

层板类型	A ₁₁	B ₁₁	D ₁₁	铝层 σ _{r, Al} , M Pa	复合材料层 M Pa
2/1GLARE	34162.5	755.6	922.4	44.7	- 116.2
3/2GLARE	68325.0	1511.2	7492.3	55.0	- 107.3

注: 试验测定的曲率半径: 2/1 GLARE 为145.8mm, 3/2 GLARE 为583.3mm。

5 结论

用腐蚀去层法, 解析法和 X 光衍射法测定了玻璃纤维铝合金层板 (GLARE) 固化即时状态的残余应力值。用腐蚀法和解析法确定的 GLARE 层板的残余应力值很接近, X 光衍射法得到的残余应力值相差较远, 且分散性较大。以腐蚀去层法最为直接, 结果最可靠。如果有层板组分材料的热膨胀系数, 则用解析法最为方便。解析法假设层板在固化之前的升温过程中没有残余应力, 忽略应力松弛的影响, 并假定层板各组分材料在固化后的降温过程中应力-应变呈线弹性响应, 因此解析法的准确性受到胶粘剂粘弹性性能的影响。X 光衍射法只能作定性分析, 一般不能对层板的残余应力作定量测量。

参考文献

- 1 中国航空材料手册, 北京: 中国标准出版社, 第三册, 1989, 95
- 2 C. Balasingh, et al. Residual Stresses in Aluminium Alloy Sheet/ Aramid Fiber Laminated Composites, N 89-15992
- 3 S. Oken, R. R. June. Analytical and Experimental Investigation of Aircraft Metal Structures Reinforced with Filamentary Composites, NASA CR 1895, 1977
- 4 沈观林. 复合材料力学, 北京: 清华大学出版社, 1996, 156 ~ 159

稿件收到日期: 1997. 5. 18

郭亚军, 男, 1965年12月生, 博士, 在北京航空材料研究院, 从事复合材料力学, 疲劳与断裂研究, 联系地址: 北京市81信箱3分箱 (邮编100095)。