第10卷 第4期 复合材料学报 Vol.10 No.4
1993年 12月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Decem 1993

预应力法调整纤维-铝合金胶接层板的残余应力*

胡宏军 李宏运 郑瑞琪

(北京航空材料研究所，100095)

摘 要 本文采用预应力法调整了纤维-铝合金胶接层板的残余应力；分析了层板的预应力、层间残余应力和温度之间的关系并给出了表达式；用应变片法测量了层板中铝层的残余应力；讨论了预应力与层板主要力学性能的关系。

关键词 层板，预应力，残余应力

1 引 言

芳纶纤维-铝合金胶接层板（ARALL）具有优异的疲劳性能、损伤容限、阻尼特性和轻质高强特性，已引起各国航空航天界和材料部门的极大关注。由于组分间热膨胀系数差异引起的层间残余应力限制了这类复合材料优异特性的发挥。因此，调整层板残余应力具有重要的学术意义和实用价值。

调整层板残余应力的方法主要有预应变法和预应力法。预应变法是拉伸固化后的层板使其产生0.4～0.7%的塑性变形，从而使纤维处于拉伸状态；预应力法是在层板固化过程中给纤维施加拉应力直至固化后卸去，从而调整了层板的残余应力。目前在国外被广泛采用的预应变法会降低层板的压缩屈服强度[1]，而预应力法由于成型工艺的复杂性，目前尚未有报道。本文工作旨在为探索预应力法调整层板的残余应力打下基础。

本文用已校准的弹簧对纤维施加预应力，并用应变片法监测了预应力层板成型过程中残余应力的变化；同时测定了不同预应力层板拉伸性能和疲劳裂纹扩展速率。

2 实 验

本实验用的层板为3/2铺层，采用175℃固化的Kevlar-49芳纶纤维/改性环氧单向预浸料（厚度0.2mm）。铝合金为LY12CZ（厚度0.3mm），表面处理采用磷酸阳极化法。实验中将超高精密级耐高温电阻应变片埋入层板层间，记录层板固化和冷却过程中铝层的残余应变。拉伸试验按GB3354-82进行；疲劳试样宽度为70mm，中心裂纹2a＝6mm，最大应力为

本文1992年7月28日收到，*国家自然科学基金资助项目

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

150MPa，应力比为0.1，试验频率为10HZ。

3 结果与讨论

3.1 预应力层板中铝层残余应力的分析

层板残余应力测试结果表明，层间残余应力主要是在降温过程中形成的，在降温过程中（Tg以下）铝层和纤维层的热膨胀系数的差异对积累残余应力起主导作用。预应力层板中铝层在温度T时的残余应力可用下式表示：

$$\frac{\sigma_1}{E_1}=-\frac{\varepsilon_0}{1+\frac{E_1t_1}{E_2t_2}}+\frac{1}{1+\frac{E_1t_1}{E_2t_2}}(\alpha_1-\alpha_2)(T_0-T) \qquad (1)$$

其中：ε_0为给纤维施加预应力后纤维产生的应变；T_0为固化温度；t、E、α分别表示组分的厚度、杨氏模量和热膨胀系数；1、2分别表示铝合金和芳纶纤维层。

（1）式表达了层板中铝层的残余应力与预应力及温度的关系，在一定温度范围内，当忽略组成的模量、热膨胀系数随温度的变化时，层板中铝层的残余应力、预应力及温度的关系为一空间平面（见图1）。当某一温度下，残余应力σ_1与预应力σ_0呈线性关系，截距$\left(1+\frac{t_1E_1}{t_2E_2}\right)^{-1}\Delta\alpha\Delta TE_1$为这一温度下自由层板中铝层纤维方向的残余应力。图2给出了几种不同温度下铝层残余应力与预应力的关系，实测值和理论值吻合较好。

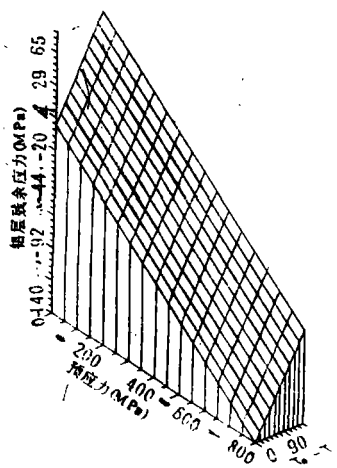

图1. 残余应力与预应力及温度的关系

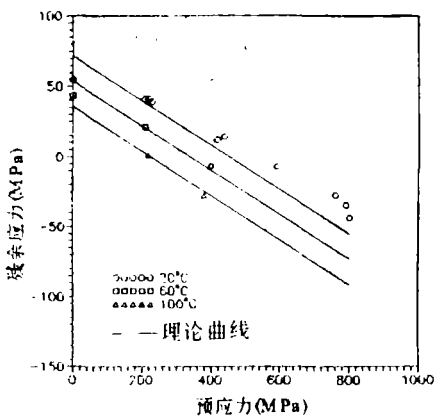

图2. 不同温度下预应力层板铝层残余应力的实验值

3.2 层板中残余应力的调整

自由层板的残余应力测试实验曲线示于图3。由图3可以看出，层板在升温及恒温固化过程中基本不产生残余应力，因为此时胶粘剂处于流动状态。残余应力主要是在固化后的降温过程中形成的。室温下自由层板中铝层的拉伸残余应力为61±6MPa，芳纶纤维复合材料层

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

所受的压缩应力可达到140MPa。这一不合理的残余应力严重影响了层板的耐疲劳性能[2]。

预应力层板固化冷却过程残余应变变化见图4。在预应力未释放前，随着温度的降低，铝层的残余应变以近似线性方式增大，其斜率与预应力无关而与各组分的厚度、模量及热膨胀系数有关，实验曲线与(1)式吻合较好。当层板冷却到室温并将预应力释放后，由于此时层板固已化为一个整体，应力将在层板中重新分配，铝层中的拉伸残余应力垂直下降、预应力越大，铝层中的残余应力下降得越多。通过控制预应力的大小，可获得不同残余应力的层板。

3.3 残余应力对层板主要力学性能的影响

表 1 列出不同预应力层板的静态拉伸性能，图 5 给出不同预应力层板的拉伸特性曲线。从表 1 和图 5 可以看出，预应力层板的拉伸模量明显高于自由层板，这是因为预应力层板中的纤维在固化过程中受拉伸而处于一种完全伸展的整齐排列状态，能与铝层同时承载；预应力层板的屈服强度明显高于自由层板，这是因为由于残余应力的作用在同样的载荷下，自由层

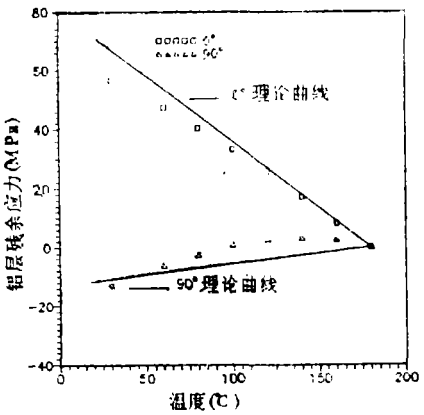

图 3. 自由层板铝层残余应力实验曲线

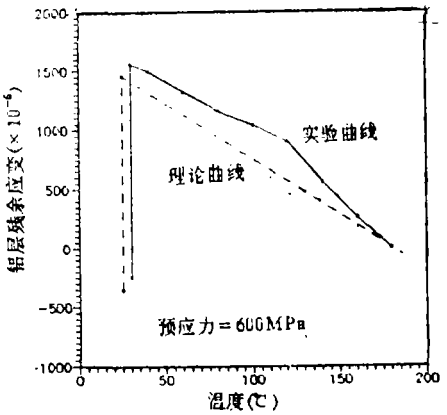

图 4. 预应力层板铝层残余应变实验曲线

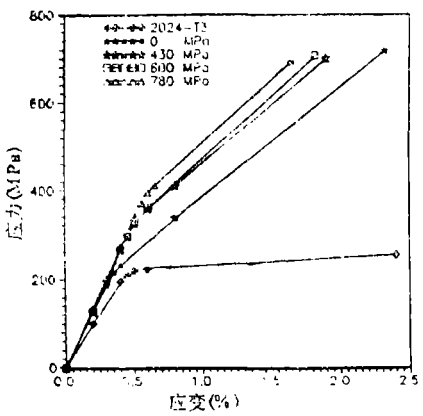

图 5. 预应力层板纵向拉伸应力-应变曲线

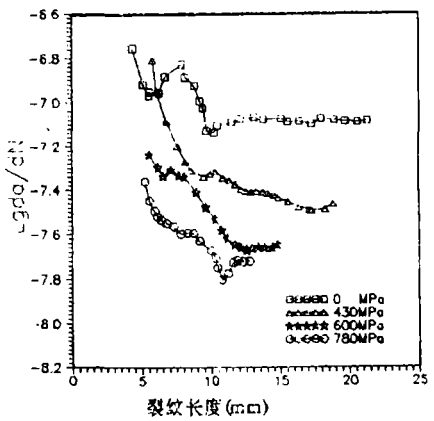

图 6. 预应力层板疲劳裂纹扩展速率

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

板中的铝层所受的拉伸应力较大：相反，纤维层在预应力层板中所受的拉伸应力比在自由层板中小，由于纤维层的断裂应变远小于铝合金，层板在拉伸过程中首先破坏的是纤维层，所以，预应力层板的断裂应变小于自由层板，图 6 示出不同预应力水平层板的拉-拉疲劳裂纹扩展速率曲线。由图 6 可以看出，预应力层板的疲劳裂纹扩展速率明显低于自由层板，这是因为自由层板中纤维受压缩残余应力，在拉-拉疲劳载荷作用下，纤维实际承受的是拉-压循环载荷。而芳纶纤维是一种压缩敏感性的高度取向高分子材料，在这种拉-压循环载荷作用下更容易破坏。通过在固化过程中给纤维施加预应力，调整了层板的残余应力，使纤维处于拉伸状态，从而使层板的疲劳性能得到提高。

表1 预应力层板的拉伸性能

层板编号	预应力 (MPa)	铝层中纤维方向残余应力25°C(MPa)	强度 (MPa)	模量 (GPa)	断裂应变 (%)	泊松比
1	0	61.0	715	63	2.36	0.329
2	229	41.5	729	69	2.27	0.418
3	430	10.2	686	73	1.92	0.350
4	600	−8.4	710	69	1.88	0.321
5	780	−54	701	71	1.69	0.364

4 结 论

1. 预应力法可以有效地调整层板的层间残余应力。
2. 式(1)可以作为预应力法调整层板残余应力的参考依据。
3. 预应力法能提高层板的疲劳性能、拉伸模量和屈服强度，但会降低其断裂应变。

参 达 文 献

1 Vogelesang L B, Gunnink J W.Aramid Aluminum Laminate(ARALL): A Material for the Next Generation of Aircraft, a State of Art.N84—21674

2 Vogelesang L B, Gunnink J W.New Developments in ARALL Laminates. ICAS.1988; 5—10—3

MODIFYING RESIDUAL STRESSES IN ARALL LAMINATES BY PRESTRESSING

Hu Hongjun Li Hongyun Zheng Ruiqi

(Institute of Aeronautcal Materials, Beijing 100095)

Abstract Tensile stress was applied to the fiber prepreg to modify the residual stresses in ARALL during curing.The residual stresses in"as cured" and prestressd ARALL were analysed, and the relationships between residual stress and prestress at different temperatures were given.The residual stresses were measured by means of strain gauges.The influences of prestress on tensile and fatigue properties of ARALL were also studied.

Key words laminates, prestress, residual stress

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net