

# 层间增韧复合材料研究\*

矫桂琼 宁荣昌 卢智先

(西北工业大学 西安 710072)

杨宝宁

(中国空间技术研究院 北京 100086)

**文 摘** 研究了一种采用在复合材料层压板层间插入韧性薄膜的方法,改善复合材料层压板层间韧性和损伤容限的技术。有限元分析和层间断裂韧性试验结果表明,层间加胶层复合材料层压板的层间应力有明显下降,层间断裂韧性有显著的增加。

**关键词** 复合材料,层压板,插入层

## A Study on Interleaved Composites

Jiao Guiqiong Ning Rongchang Lu Zhixian

(Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Yang Baoning

(Institute of Spacecraft System Engineering Beijing 100086)

**Abstract** A technique to improve interlaminar toughness and damage tolerance of composite laminate with interleaving film is investigated. The results of FEM evaluation and interlaminar fracture toughness tests show that interlaminar stress in composite laminate decrease obviously and interlaminar fracture toughness increase significantly.

**Key words** Composite, Laminate, Interleaf

### 1 前言

复合材料飞机主承力结构在使用中受到外来物低速冲击后会在层压板内形成严重的不可见分层损伤,另外结构中层压板的自由边、变厚度区域和孔边也会因层间应力集中形成分层并扩展。分层的存在,将造成复合材料层压板或层压结构强度和刚度的显著下降,以致于限制了复合材料飞机主承力构件设计应变的进一步提高,使复合材料的高减重效率优点不能充分发挥。因此如何抑制分层损伤,提高复合材料层压板和层压结构的抗冲击损伤和抗分层的能力,一直是复合材料飞机结构损伤容限设计

与分析研究的热点,提出了各种抗分层设计思想。在层压板层间插入韧性胶膜层(Interleaf),增加层间韧性,达到抑制分层形成和扩展目的的设计概念即为其中之一<sup>[1]</sup>,该技术最大的优点是不改变现有工艺,基本上不增加多少工艺步骤,就能达到较大程度地提高复合材料层压结构的抗冲击损伤和抗分层的能力。为此欧美各先进国家相继在 Interleaf 技术方面开展了广泛研究<sup>[2]</sup>,并已经在飞机结构上正式使用。如美国波音 777 客机尾翼中的蒙皮、桁条、翼梁以及地板梁的层压板均使用日本 Toary 公司提供的一种带有 Interleaf 层的 T800/3900—2 预浸带<sup>[3]</sup>。作

收稿日期:2000-11-06;修回日期:2001-01-30

\*航空基础科学基金资助:97B53018

矫桂琼,1945年出生,教授,主要从事复合材料力学方面的研究工作

为有效的“软化”技术,Interleaf 是一种切实可行的改善层压板抗分层和抗冲击性能的方法。

本论文主要研究了 Interleaf 胶膜的制作,加胶膜的典型复合材料层压板的层间应力分析以及胶膜对复合材料层压板间断裂韧性的影响。

2 试验研究

2.1 Interleaf 胶膜制作

作为复合材料层压板结构用的 Interleaf 胶膜应当具备三个特点,即:(1)韧性高,使层间韧性大幅度提高;(2)与层压板基本性能匹配,固化工艺相同;(3)较薄,一般在 0.1 mm 以下。

本研究采用热固性和热塑性树脂共混的方法制备韧性胶膜,厚度为 0.06 mm 左右,该胶膜具有和 5405 双马来酰亚胺树脂基复合材料相同的工艺。胶膜是由常温下用溶剂稀释了的共混树脂制成,成形后的胶膜在溶剂挥发后几乎无粘性,便于保存和转运。使用时稍加温即有足够粘性,可以直接铺粘在预浸带上。

2.2 层间断裂韧性试验

为了考核 Interleaf 对复合材料层压板的层间断裂韧性的影响,本研究完成了以下试验:

- (1)  $G_c$ 层间断裂韧性试验;
- (2)  $G_c$ 层间断裂韧性试验;
- (3)  $G_c$ 边缘分层试验。

其中  $G_c$ 和  $G_c$ 试验采用 HB7402、HB7403 规定的标准试样。胶膜铺在试样厚度对称面上,试样有未铺胶膜和 1 层胶膜两种。边缘分层试样的一层胶膜铺在 - 30°层和 90°层之间,即(±30°±30°F/90°90°)s,F 表示 1 层胶膜,试样形式如图 1 所示。

由于本试验使用的带有胶膜试样的载荷—位移

曲线呈现出非线性特征不十分突出,因此在数据处理方面  $G_c$ 和  $G_c$ 均采用了和线弹性试样相同的公式,即:

$$G_c = \frac{mP}{2aW}$$

式中, $a$ 为裂纹长度, $W$ 为试样宽度, $P$ 、分别为加载点载荷和位移, $m$ 是柔度曲线的拟合幂函数曲线的幂指数。

$$G_c = \frac{9Pa^2}{2W(2L^3 + 3a^3)}$$

$L$ 为试样的半跨距,边缘分层的  $G_c$  计算式为:

$$G_c = 0.16E_0\epsilon_0^2h$$

式中  $E_0$ 为试样的拉伸弹性模量, $\epsilon_0$ 为试样发生分层时的应变, $h$ 是试样的厚度。

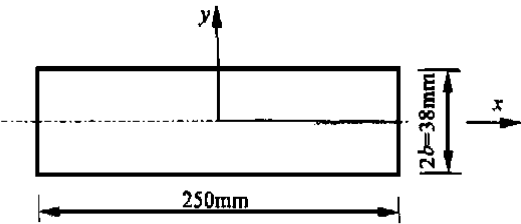


图 1 边缘分层试样

Fig.1 Edge delamination specimen

2.3 Interleaf 对层间断裂韧性的影响

表 1 给出了加胶膜与未加胶膜的 T300/5405 复合材料层压板的层间断裂韧性试验值。Interleaf 的引入对层压板的层间断裂韧性提高是明显的。尤其是使  $G_c$ 提高接近 1 倍,使  $G_c$ 提高三分之一强,混合型层间断裂韧性提高三分之二。已有的研究表明, $G_c$ 与层压板的冲击后压缩强度(CAI)是相关的,即  $G_c$ 高,CAI 也相应地高。

表 1 加胶膜与未加胶膜的 T300/5405 层压板的层间断裂韧性

Tab.1 Interlaminar fracture toughness of interleaved T300/5405 laminate

试样	$G_c/J \cdot m^{-2}$			$G_c/J \cdot m^{-2}$			边缘分层 $G_c/J \cdot m^{-2}$		
	未加胶膜	加胶膜	增量/ %	未加胶膜	加胶膜	增量/ %	未加胶膜	加胶膜	增量/ %
01	166.9	239.9		583.5	997.3		206.6	338.7	
02	168.0	226.5		618.3	1 071.7		232.5	406.8	
03	173.8			692.6	1 369.3		222.1	357.4	
04				685.4	1 454.3				
05				625.4	971.1				
平均值	169.5	233.2	37.6	641.0	1 172.7	83	220.4	367.6	66.8

### 3 Interleaf 对层间应力的影响

为了讨论加入 Interleaf 胶层对典型复合材料层压板的层间应力的影响,采用三维有限元程序计算了准各向同性铺层层压板(45°/0° - 45°/90°)s 试样和高层间应力的层压板(±30°/±30°/90°/90°)s 试样在加入和未加入胶膜情况下,受到沿 0° 纤维方向拉伸时的层间应力。单向层压板性能为:

$$E_1 = 149 \text{ GPa}, E_2 = E_3 = 9.4 \text{ GPa}$$

$$G_{12} = G_{13} = 7.5 \text{ GPa}, G_{23} = 3 \text{ GPa}$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.29, \nu_{23} = 0.45$$

$$\text{胶膜: } E = 2.45 \text{ GPa}, \nu = 0.38$$

对(45°/0° - 45°/90°)s 板计算了(45°/0°)、(0° - 45°)和(-45°/90°)层间的应力,对(±30°/±30°/90°/90°)s 板计算了(-30°/90°)层间的应力,结果如图 2~图 5 所示,其中,  $\sigma_0$  为外加应力,  $b$  为板半宽度。

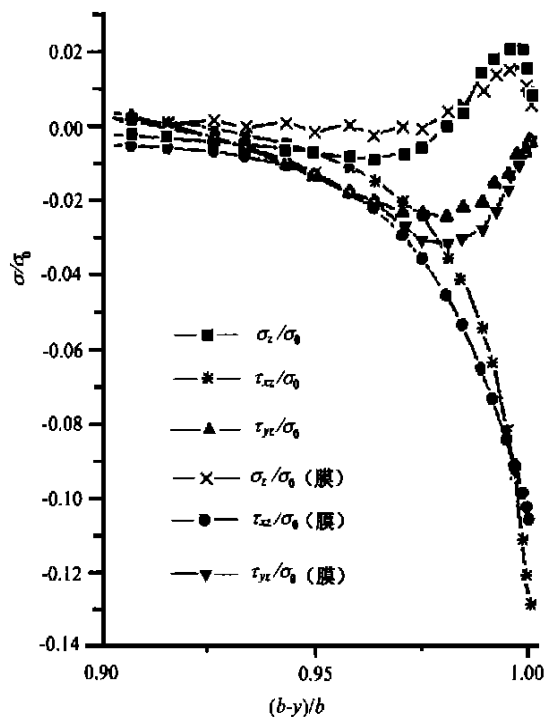


图 2 (45°/0° - 45°/90°)s 和(45°/F/0° - 45°/90°)s 层压板的(45°/0°)层间应力分布曲线

Fig. 2 Interlaminar stress distribution in (45°/0°) interface of (45°/0° - 45°/90°)s and (45°/F/0° - 45°/90°)s laminates

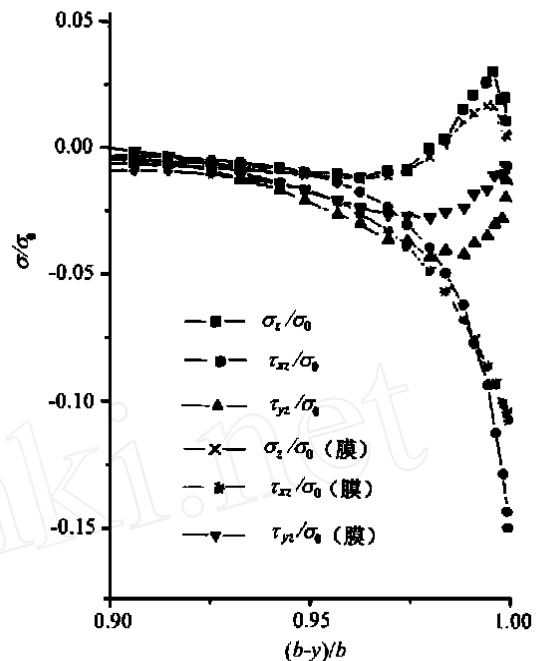


图 3 (45°/0° - 45°/90°)s 和(45°/0°/F - 45°/90°)s 层压板的(0° - 45°)层间应力分布曲线

Fig. 3 Interlaminar stress distribution in (0° - 45°) interface of (45°/0° - 45°/90°)s and (45°/0°/F - 45°/90°)s laminates

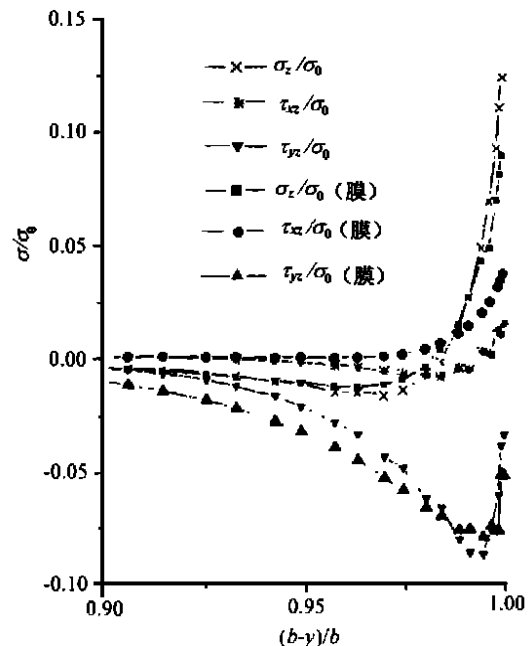


图 4 (45°/0° - 45°/90°)s 和(45°/0° - 45°/F/90°)s 层压板的(-45°/90°)层间应力分布曲线

Fig. 4 Interlaminar stress distribution in (-45°/90°) interface of (45°/0° - 45°/90°)s and (45°/0° - 45°/F/90°)s laminates

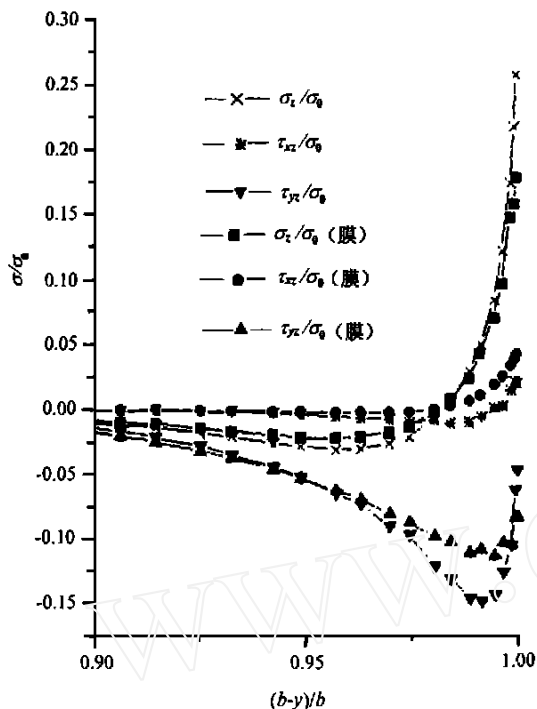


图5 (±30° ±30°/90°/90°)s和(±30° ±30° F/90°/90°)s层压板的(-30°/90°)层间应力分布曲线

Fig. 5 Interlaminar stress distribution in (-30°/90°) interface of (±30° ±30°/90°/90°)s and (±30° ±30° F/90°/90°)s laminates

对于高层间应力的层压板(±30° ±30°/90°/90°)s最高的层间应力发生在(-30°/90°)之间。从图5可以看到胶膜的引入使(-30°/90°)层间的两个主要应力 $\sigma_z$ 和 $\tau_{yz}$ 在边缘处都有明显下降。最大正应力 $\sigma_z$ 下降30%左右,剪应力 $\tau_{yz}$ 下降20%左右。边缘处层间剪应力 $\tau_{xz}$ 则略有增加,但因为 $\tau_{xz}$ 本身很小,所以无关大局。

对于准各向同性(45°/0°-45°/90°)s层压板(45°/0°、(0°-45°)和(-45°/90°)层间的层间应力分布是不同的。(-45°/90°)层间的正应力 $\sigma_z$ 和剪应力 $\tau_{yz}$ 都很高,可以认为受载后分层可能首先发生在这个层间。(45°/0°)和(0°-45°)层间的应力分布相似,只有层间剪应力 $\tau_{xz}$ 比较高,另外两个 $\sigma_z$ 和 $\tau_{yz}$ 都比较小。从图4可以发现,胶膜的引入使(-45°/90°)层间的 $\sigma_z$ 和 $\tau_{yz}$ 都有明显的下降,尤其是层

间正应力 $\sigma_z$ ,下降幅度接近30%。由于正的层间正应力对层间拉伸作用,造成层间拉伸破坏,层压板的层间的拉伸强度或者Ⅱ型层间断裂韧性一般都比较低,因此高的层间正应力对于复合材料层压板来讲是灾难性的。胶膜的引入使层间正应力下降无疑对提高层压板的承载能力是有利的。从图2和图3还可以看到胶膜的引入降低了(45°/0°)和(0°-45°)层间的主要层间剪应力的 $\tau_{xz}$ 幅度。

另外,从图4和图5可以看到胶膜的引入对于减缓层压板边缘层间应力集中程度的作用是十分明显的,和图2、图3对比,可以发现对于边缘层间应力较高的层压板,胶膜并不一定要在每一个层间均加入,只要加在层间应力最高的层间就能够达到抑制边缘分层过早发生的效果。

#### 4 结论

通过对复合材料层压板部分层间加入胶膜后对层间应力分布、边缘层间应力集中以及层间断裂韧性影响的分析和实验研究,可得到以下结论。

(1)低模量、高韧性的胶膜的引入可以使复合材料层压板边缘层间应力集中得到缓和。使高的层间正应力下降30%左右,层间剪应力下降20%左右,因而在复合材料层压板或层压结构的局部高层间应力处加入胶膜可以提高层压板的抵抗分层形成的能力。

(2)胶膜的引入使层压板层间得到“软化”的结果是使层压板的层间断裂韧性有明显的提高。初步的实验研究表明,Ⅱ型层间断裂韧性可提高三分之一,Ⅰ型层间断裂韧性提高近一倍,这表明加入胶膜可以提高层压板抵抗分层扩展的能力。

#### 参考文献

- 1 Master J E et al. Impact fracture and failure suppression using interleaved composites. SAMPE Quarterly, 1985;17:46~49
- 2 Sela N et al. The effect of adhesive thickness interlaminar toughness of interleaved CFRP specimens. Composites, 1989;20:88~93
- 3 Odagiri N et al. Torayca T800/3900-2 toughened epoxy prepreg system: toughening concept and mechanisms. In: Proceeding of the american society for composites 6th technical conference, Lancaster: 1991:43