

# X - cor夹层结构剪切性能

谭永刚 肖军 李勇 原永虎

(南京航空航天大学,南京 210016)

**文摘** 研究了 Pin 植入角、直径对 X - cor 夹层结构剪切强度、模量的影响,并同泡沫夹层结构进行对比。结果表明: Pin 对 X - cor 夹层结构的纵向剪切强度、模量的增强效率很高,而对 X - cor 横向剪切性能的增强作用相对可忽略; Pin 对 X - cor 夹层结构纵向剪切性能的增强效率随 Pin 植入角的减小而降低。

**关键词** X - cor, Pin, 纵向剪切, 横向剪切

## Shear Property of X - cor Sandwich Structure

Tan Yonggang Xiao Jun Li Yong Yuan Yonghu

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** The influence of Pin's angle and diameter on X - cor's shear strength and modulus was experimentally studied and compared with foam sandwich structure. The results show that Pin can obviously improve the longitudinal shear strength and modulus of X - cor sandwich structure, while the reinforcing effect on X - cor's transverse shear property can be relatively ignored. The efficiency of Pin reinforcing X - cor's longitudinal shear property decreases as Pin's angle decreases.

**Key words** X - cor, Pin, Longitudinal shear, Transverse shear

### 1 引言

X - cor 是一种新型的泡沫夹层结构,将碳纤维复合材料针状物 (Pin) 以一定角度植入泡沫中形成三维桁架芯材结构。X - cor 夹层结构有以下突出优点: (1) 夹层结构的复合材料面板直接与嵌入面板的 Pin 共固化,无需胶膜,既简化了工艺又提高了强度且降低了结构质量; (2) Pin 构成的三维桁架具有很高的结构效率; (3) 由于 Pin 的角度和密度均可以设计,夹层结构有更大的设计自由度,实现局部高承载。

2001 年美国陆军实验室<sup>[1]</sup>的研究表明,在含有和不含冲击损伤的情况下, X - cor 夹层结构与具有相同压缩和剪切强度的蜂窝夹层结构相比,可减重 10% ~ 15%。NASA 兰利研究中心<sup>[2]</sup>研究了三点弯曲、单轴拉伸和拉弯组合试验条件下 Pin 与蒙皮结合区的破坏模式。美国北达科他州立大学<sup>[3]</sup>的研究表明, Pin 可以有效抑制高应变冲击载荷下芯材的变形。2003 年,英国剑桥的 Carti 等<sup>[4]</sup>研究了 X - cor 夹层结构的准静态和动态压缩性能。2005 年,英国克兰菲尔德大学的 Andrea 等<sup>[5]</sup>研究了 Z - Pin 增强泡沫夹层结构面外的力学性能,并与蜂窝夹层结构进行对比。此外, S. R. Kalidindi 等人<sup>[6~10]</sup>对 X - cor

夹层结构剪切性能试验方法进行了研究。在国内,田旭等<sup>[11]</sup>于 2004 年率先试制了 X - cor,并研究了三点弯曲、平面压缩和纵向剪切性能。

本文研究 Pin 植入角和 Pin 直径对 X - cor 夹层结构剪切性能的影响。

### 2 实验

#### 2.1 原材料

X - cor 夹层结构采用 Rohacell - 31 IG 泡沫作为基体芯材,厚度为 12 mm; Pin 为 T300/FW - 63 复合材料拉挤杆,包括直径 0.5 和 0.7 mm 两种规格;面板采用光威公司 12500 单向预浸布铺叠而成,采用的铺层顺序为 [0/90/0/90]。

#### 2.2 试样制备及性能测试

采用自行研制的 Pin 数控植入机制备 X - cor 芯材,铺覆蒙皮后,采用程序控温真空固化装置固化。X - cor 夹层结构剪切试样的尺寸为 150 mm × 60 mm × 13 mm,试样中 Pin 的列间距为 5 mm,行间距为 10 mm。试验采用新三思电子万能拉伸机按 GB 1455—88 进行。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 纵向剪切性能

收稿日期: 2008 - 04 - 17; 修回日期: 2008 - 05 - 16

作者简介: 谭永刚, 1982 年出生, 硕士, 主要从事 X - cor 夹层结构制备工艺及力学性能研究。E - mail: sdwdtyg2006@yahoo.com.cn

X - cor夹层结构纵向剪切实验结果见表 1,由于 X - cor试样在切割过程中,试样边缘的 Pin被切断不

发挥增强作用,试验结果中 Pin的体积分数为试样中完整 Pin(上下两端均与面板结合)的体积分数。

表 1 X - cor纵向剪切实验结果

Tab 1 Longitudinal shear test results of X - cor sandwich

试样编号	植入角 <sup>1)</sup> / (°)	Pin直径 /mm	Pin有效体积分数 /%	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	密度提高 /%	纵向剪切强度 /MPa	纵向剪切强度提高量 /%	纵向剪切模量 /MPa	纵向剪切模量提高量 /%
z-1	30°	0.5	0.785	45.6	43	0.83	108	159	960
z-2	30	0.5	0.426	38.8	22	0.63	57.5	84	460
z-3	30	0.7	0.849	45.3	43	0.81	103	176	1073
z-4	22	0.5	0.421	38.3	20	0.55	37.5	59	293
z-5	15	0.5	0.429	38.1	19	0.50	25.0	35	133
z-6	0	0.5	0.380	37.9	19	0.44	10.0	18	20
z-7	空白			32		0.40	15.0		

注:1)植入角 30°试样 Pin列间距、行间距均为 5 mm,空白试样为没有 Pin增强的泡沫夹层结构。

图 1 为 Pin植入角 30°X - cor与泡沫夹层结构纵向剪切试验的载荷 - 位移曲线。

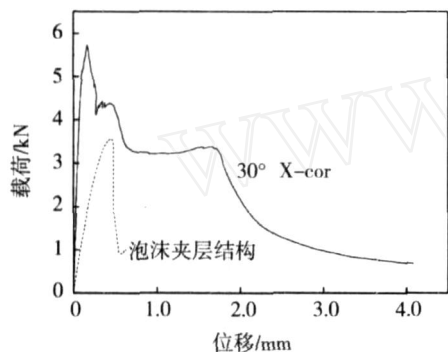


图 1 X - cor与泡沫夹层结构纵向剪切实验曲线

Fig 1 Longitudinal shear test curves of X - cor and foam sandwich structures

可以看出,与泡沫夹层结构相比,X - cor夹层结构无论强度、模量均有很大提高,同时 X - cor夹层结构在剪切失效后所具有的残余强度也要高于泡沫夹层结构,其原因是断裂或从面板中拔出的 Pin在泡沫基体中滑行依然会产生一定的阻力。同时,X - cor夹层结构的载荷位移曲线所包围的面积也远大于泡沫夹层结构,这是由于 X - cor夹层结构中 Pin的断

裂、Pin从面板中拔出以及 Pin在泡沫中滑行均吸收大量的能量,从而提高了 X - cor夹层结构的韧性。

为比较不同植入角下,Pin对 X - cor纵向剪切性能的增强效率,假设在相同植入角下,相同直径 Pin对 X - cor夹层纵向剪切强度与模量的贡献是相同的,同时 Pin对 X - cor夹层纵向剪切强度、模量的贡献与泡沫对 X - cor夹层的贡献是相互独立的,则 X - cor夹层结构的纵向剪切强度、模量可采用公式(1)、(2)表达。

$$= G_{\text{foam}} + V_{\text{Pin}} \cdot G_{\text{Pin}} \quad (1)$$

式中, $G_{\text{foam}}$ 为泡沫对 X - cor夹层结构纵向剪切强度的贡献; $G_{\text{Pin}}$ 为在植入角、Pin直径一定的条件下,体积分数 1%的 Pin对 X - cor夹层结构纵向剪切强度的贡献; $V_{\text{Pin}}$ 为 Pin体积分数。

$$G = G_{\text{foam}} + V_{\text{Pin}} \cdot G_{\text{Pin}} \quad (2)$$

式中, $G_{\text{foam}}$ 为泡沫对 X - cor夹层结构纵向剪切模量的贡献; $G_{\text{Pin}}$ 为在植入角、Pin直径一定的条件下,体积分数 1%的 Pin对 X - cor夹层结构纵向剪切模量的贡献。

根据公式(1)、(2)计算出不同 X - cor的  $G_{\text{Pin}}$ 、 $G_{\text{Pin}}$ ,结果见图 2。

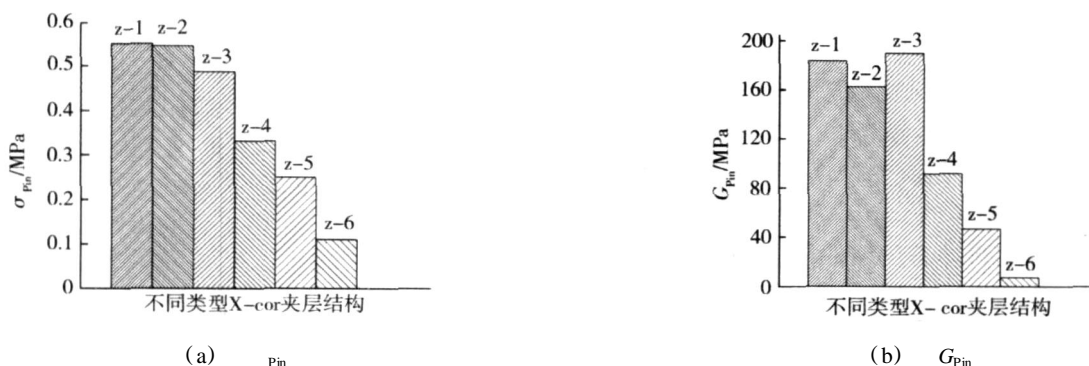


图 2 不同 X - cor的  $G_{\text{Pin}}$ 、 $G_{\text{Pin}}$

Fig 2  $G_{\text{Pin}}$  and  $G_{\text{Pin}}$  of X - cor sandwich

相对于泡沫夹层结构剪切强度 0.4 MPa、剪切模量 15 MPa而言,Pin对 X - cor夹层结构纵向剪切强

度、模量的增强效率很高,以植入角  $30^\circ$  Pin为例, Pin 体积分数为 1%的 X - cor,相对泡沫夹层结构密度提高 57%,纵向剪切模量提高 11.8 倍,纵向剪切强度提高 1.7 倍。比较 Pin 直径均为 0.5 mm、Pin 列间距 5 mm 行间距 10 mm 的 4 种不同 Pin 植入角的 X - cor,可发现,随 Pin 植入角的减小,X - cor 纵向剪切强度、模量均迅速减小。这种现象可作如下解释: Pin 可看成偏层角等于植入角的单向板中的一窄条,根据复合材料单向板理论,在偏层角  $0^\circ \sim 45^\circ$  随偏层角的减小,剪切时纤维上主应力方向与纤维方向的夹角逐渐增大,层合板剪切强度、模量逐渐减小。比较 3 种植入角为  $30^\circ$  的 X - cor,考虑到夹层结构剪切试验离散系数较大,可以认为在 Pin 体积分数相同的条件下不同直径的 Pin 对 X - cor 纵向剪切强度、模量的增强效率是相近的。

### 3.2 横向剪切性能

图 3 为  $30^\circ$  X - cor 与泡沫夹层结构横剪载荷 - 位移曲线。横向剪切实验结果见表 2。

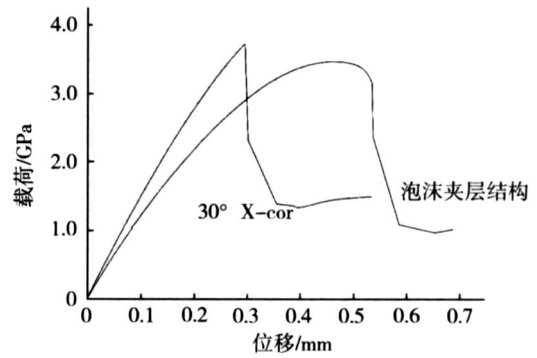


图 3 X - cor 与泡沫夹层结构横向剪切实验曲线

Fig 3 Lateral shear test curves of X - cor and foam sandwich structures

表 2 X - cor 横向剪切实验结果

Tab 2 Lateral shear test results of X - cor sandwich

试样编号	植入角 / (°)	Pin 直径 / mm	Pin 有效体积分数 / %	密度 / $\text{kg m}^{-3}$	密度提高 / %	横向剪切强度 / MPa	横向剪切强度提高量 / %	横向剪切模量 / MPa	横向剪切模量提高量 / %
h - 1	30	0.5	0.422	38.8	22	0.399	0.3	19.0	24
h - 2	22	0.5	0.391	38.3	20	0.382	-4.0	14.4	-5.9
h - 3	15	0.5	0.362	38.5	21	0.408	2.5	17.0	11
h - 4	0	0.5	0.380	37.9	19	0.440	11	18.1	18
h - 5	空白			0	0	0.398	0	15.3	0

表 2 结果表明, Pin 对 X - cor 横向剪切性能的增强效果不明显,相对于 Pin 对 X - cor 纵向剪切性能的增强作用而言,可以忽略。

### 4 结论

(1) Pin 对 X - cor 纵向剪切强度、模量增强效果显著,对横向剪切性能的增强作用可以忽略。

(2) 在植入角为  $0^\circ \sim 30^\circ$  内,  $30^\circ$  植入角 Pin 对 X - cor 纵向剪切强度、模量增强效率最高,随植入角的减小, Pin 对 X - cor 纵向剪切性能增强效率迅速降低。

(3) 在相同的植入角下,不同直径 Pin 对 X - cor 夹层结构纵向剪切性能的增强效率是相近的。

### 参考文献

- Carstensen T, Coumoyer D, Kunkel E et al. X - cor advanced sandwich core material. In: Proceedings of the 33rd international SAMPE technical conference, Seattle, WA, 2001
- O'Brien K T, Paris I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X - core truss sandwich. Compos Struct, 2002; 57: 189 ~ 204
- Vaidya U K, Kamath M V et al. Low velocity and compression-after-impact response of pin-reinforced sandwich composites. Am. Soc Mech Engrs, Mater Div (Publ) MD, 1999; 86: 1 ~ 10
- Cartie D D, Fleck N A. The effect of pin reinforcement upon

the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels. Composites Science and Technology, 2003; 63: 2401 ~ 2409

- Marasoa A I, Cartie D D R, Ivana K et al. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: out-of-plane properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006; 37(2): 295 ~ 302

- Kalidindi S R, Abusafieh A, ElDanaf E. Accurate characterisation of machine compliance for simple compression testing. Exp. Mech, 1997; 37: 210 ~ 215

- Hodgkinson J M. Mechanical testing of advanced fibre composites. Cambridge: Woodhead Publishing/CRC Press, 2000

- O'Connor D J. A comparison of test methods for shear properties of the cores of sandwich construction. J Test Eval, 1989; 17(4): 241 ~ 246

- Zenkert D. The handbook of sandwich construction. London: UK Engineering Materials Advisory Services Ltd/Chameleon Press Ltd, 1997

- Gre diac M, Dufort L. Experimental evidence of parasitic effects in shear test on sandwich beams. Exp. Mech, 2002; 42: 186 ~ 193

- 田旭,肖军,李勇. X - cor 夹层结构试制与性能研究. 飞机设计, 2004; (1): 22 ~ 25

(编辑 李洪泉)