

# X-Cor 夹层结构的平压性能试验

单杭英<sup>1,2</sup> 肖 军<sup>2</sup> 李 宁<sup>2</sup> 尚 伟<sup>2</sup>

(1 南京航空航天大学无人机研究院,南京 210016)

(2 南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

**文 摘** 通过对不同的 z-pin 角度、面板厚度、去除泡沫处理的 X-Cor 夹层结构试样进行平压性能试验和分析比较,得到其破坏模式及不同设计参数对性能的影响。试验结果表明:X-Cor 夹层结构中 z-pin 和泡沫存在协同增强效应;增大 z-pin 端部约束和减少 z-pin 的植入角度能提高平压性能;但 z-pin 角度为 0° 的夹层结构平压性能对植入角的角偏差缺陷更敏感,缺陷的存在影响承力性能。

**关键词** X-Cor 夹层结构,平压性能,对比试验,角偏差缺陷

## Experimental on Compressive Behavior of X-Cor Sandwich

Shan Hangying<sup>1,2</sup> Xiao Jun<sup>2</sup> Li Ning<sup>2</sup> Shang Wei<sup>2</sup>

(1 Institute of UAV, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

(2 College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

**Abstract** Comparison tests of compressive properties were carried out on different z-pin angle, face skin thickness, with and without foam, which could be acquired the failure modes of X-Cor sandwich and the effect of different design parameters on compressive properties. Experimental results show that the combination of z-pins and foam core lead to a synergistic strengthening. Increasing restriction of z-pin's end and decreasing the angle between z-pin and face sheet can enhance the compressive properties. But the compressive properties of z-pin angle with 0° are more to sensitive to angle deviation error, and it directly affects behavior of perfect mechanicals properties.

**Key words** X-Cor sandwich, Compressive properties, Comparison test, Angle deviation error

### 0 引言

复合材料夹层结构具有比强度、比刚度高的特点,在航空航天领域有着广泛的应用。常见的夹层结构有蜂窝夹层、泡沫夹层等。蜂窝夹层面板在蜂窝芯孔处容易出现凹坑,影响结构的气动性能;并且蜂窝夹层抗潮湿性能差,吸湿容易造成胶层脱胶,维修率高<sup>[1]</sup>。闭孔硬质泡沫夹层结构表面平整、吸湿性低,克服了蜂窝夹层复合材料的不足。但泡沫夹层结构存在压缩和剪切性能低、面板和芯材容易发生脱粘和分层等缺点,严重限制其在飞机主承力结构上的应用<sup>[2-3]</sup>。X-Cor 泡沫夹层结构<sup>[4]</sup>在很大程度上弥补了上述缺陷。它是采用 z-pinning 技术增强的新型泡沫夹层结构。最大的特点是可设计性强:通过选取不同泡沫型号(如具有隔噪音和隔热等特性)、不同 z-pin 材料、直径、间距及其植入密度等参数设计出性能优

越的结构,因此具有很好的应用前景。

在国外,Carstensen 等<sup>[4]</sup>对 X-Cor 泡沫夹层结构进行研究,结果表明:X-Cor 的各力学性能均高于蜂窝夹层结构。Cartié 等<sup>[5]</sup>研究了钛 pin 和碳纤维 pin 增强泡沫夹层结构的准静态和动态平面压缩性能;发现 z-pin 与泡沫存在协同效应,提高了结构的平压刚度、强度以及能量吸收性能;揭示了泡沫作为弹性基础抵抗 z-pin 弹性屈曲、延缓 z-pin 屈曲失效从而提高结构强度的机理。Marasco 等<sup>[6-7]</sup>通过试验研究了 X-Cor/K-Cor 泡沫夹层结构的压缩、剪切和拉伸性能,并与相同面板 Nomex 蜂窝芯夹层结构的结果进行对比,得出 X-Cor 与 K-Cor 夹层结构的比刚度优于蜂窝芯夹层结构、而比强度逊于后者的结论。国内,田旭等<sup>[8]</sup>研究了 X-Cor 夹层结构,结果显示 X-Cor 泡沫夹层的压缩、弯曲和剪切性能分别为空白泡沫夹层

结构的 1.5、3.5 和 5.45 倍。

本文通过对比试验来研究分析不同的 z-pin 角度、面板厚度、去除泡沫处理的 X-Cor 夹层结构的压缩性能,得到其破坏模式及不同设计参数对压缩性能的影响。

## 1 实验

X-Cor 夹层结构试样芯材采用德固赛公司 Rohacell 311G 泡沫,泡沫厚度 11.5 mm。面板采用光威 12500 单向碳纤维预浸布制备,面板有 1 mm 和 2 mm 两种,铺层分别为  $[0/90/0/90]_s$ 、 $[0/90/0/90/90/0/90/0]_s$ 。z-pin 采用 T300/FW-125 环氧树脂复合材料拉挤杆,树脂体积分数 60%,直径为 0.5 mm。试样长、宽均为 60 mm,z-pin 的分布均为  $5 \times 10$ ,z-pin 角度有  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  三种。z-pin 在 1 mm 面板内的植入深度  $t \geq 0.5$  mm,z-pin 在 2 mm 面板内的植入深度  $t \geq 1$  m。试样的编号及几何参数见表 1。本文仅研究 z-pin 的夹层结构的平压性能,方法是用镊子将泡沫剔除,剔除过程最小程度地减少对 z-pin 的破坏,以保持 z-pin 的原有状态。

表 1 试样参数表<sup>1)</sup>  
Tab. 1 Data of samples

试样	面板厚度/mm	泡沫类型	z-pin 参数	
			直径/mm	角度/ $^\circ$
1 <sup>#</sup>	1	无	0.5	0
2 <sup>#</sup>	1	311G	0.5	0
3 <sup>#</sup>	1	无	0.5	20
4 <sup>#</sup>	1	311G	0.5	20
5 <sup>#</sup>	1	无	0.5	30
6 <sup>#</sup>	1	311G	0.5	30
7 <sup>#2)</sup>	1	311G		
8 <sup>#</sup>	2	无	0.5	0
9 <sup>#</sup>	2	311G	0.5	0
10 <sup>#</sup>	2	无	0.5	20
11 <sup>#</sup>	2	311G	0.5	20
12 <sup>#</sup>	2	无	0.5	30
13 <sup>#</sup>	2	311G	0.5	30

注:1) 泡沫类型无指去除泡沫;2) 7<sup>#</sup> 试样为空白泡沫夹层结构。

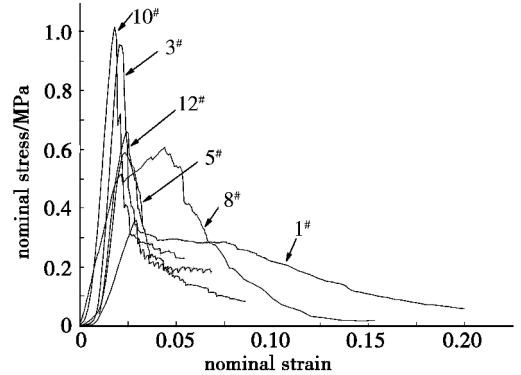
X-Cor 夹层结构平压性能测试参照 GB 1453—2005 进行。采用的仪器为新三思电子万能试验机,加载速率为 0.5 mm/min。

## 2 结果分析

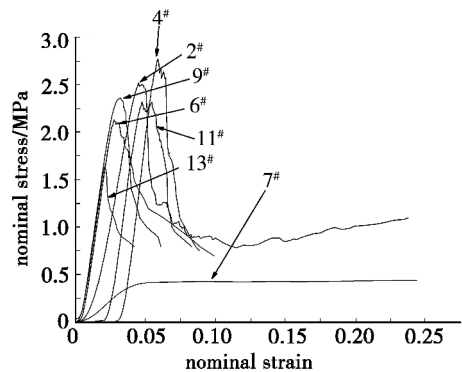
z-pin、X-Cor 及空白泡沫夹层结构平压试验应力—应变曲线见图 1。对比试验研究包括不同面板厚度、不同的 z-pin 角度对夹层结构平压性能的影响及泡沫对 z-pin 屈曲提供的横向支撑作用。

从图 1 看出,先进入线弹性增长阶段,之后达到

最大值,接着进入塑性下降区域。观察试验中发现:应力达到最大值时,试样突然发出一声脆响,之后可听到接连不断的“噼啪”响,应力迅速下滑,期间伴随大规模的“噼啪”响。经观察分析,“噼啪”响为 z-pin 失稳断裂发出的声音。z-pin、X-Cor 夹层结构的破坏模式见图 2。

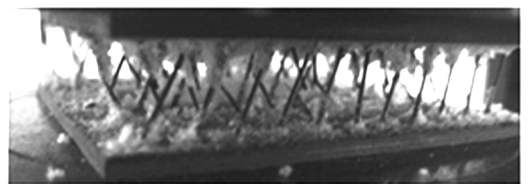


(a) Z-pin 夹层结构

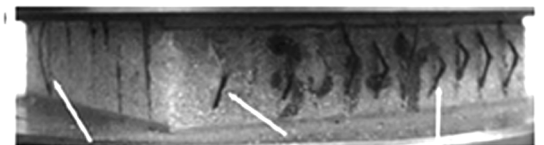


(b) X-Cor 及空白泡沫夹层结构

图 1 Z-pin、X-Cor 及空白泡沫夹层结构应力/应变曲线对比  
Fig. 1 Comparison of compressive stress-strain curves



(a) Z-pin 夹层破坏模式



(b) X-Cor 夹层破坏模式

图 2 Z-pin 及 X-Cor 夹层破坏模式

Fig. 2 Failure modes of z-pin and X-Cor sandwich

试验数据显示 311G 空白泡沫夹层的应力为 0.4 MPa,z-pin 夹层结构的压缩最大应力介于 0.35 ~ 1.0 MPa,X-Cor 夹层结构的压缩最大应力介于 1.8 ~ 2.75 MPa。试验数据结果表明 X-Cor 夹层的压缩最大应力大于 z-pin 和空白泡沫夹层结构的压缩最大

应力之和。所以 X-Cor 夹层结构中 z-pin 和泡沫存在协同增强效应。

从图 1(a) 可看出, 试样在承受面外载荷时, 载荷由 z-pin 从上面板传递到下面板。在 z-pin 角度相同情况下其末端的约束情况是影响 z-pin 承力性能的重要因素。从图 2(a) 中可看出: z-pin 角度相同情况下, 试样面板 2 mm 的压缩最大应力比面板 1 mm 的都大, 所以面板 2 mm 对 z-pin 末端的约束比面板 1 mm 的强。

从图 1 中看出面板厚度相同情况下 z-pin 的植入角度为 20° 的试样的压缩最大应力比 z-pin 的植入角度为 30° 的大。而 z-pin 的植入角为 0° 时的 z-pin 夹层结构压缩最大应力明显偏低, z-pin 的植入角为 0° 时的 X-Cor 夹层结构的压缩最大应力也偏低。在测试过程中发现 z-pin 的植入角为 0° 的 z-pin 夹层结构先发生整体失稳, 后单根 z-pin 失稳断裂。观察未做的试样发现本次 z-pin 的植入角度为 0° 的试样中存在初始微缺陷, 夹层结构中的 z-pin 往同一方向偏 ≤ 2° (图 3)。

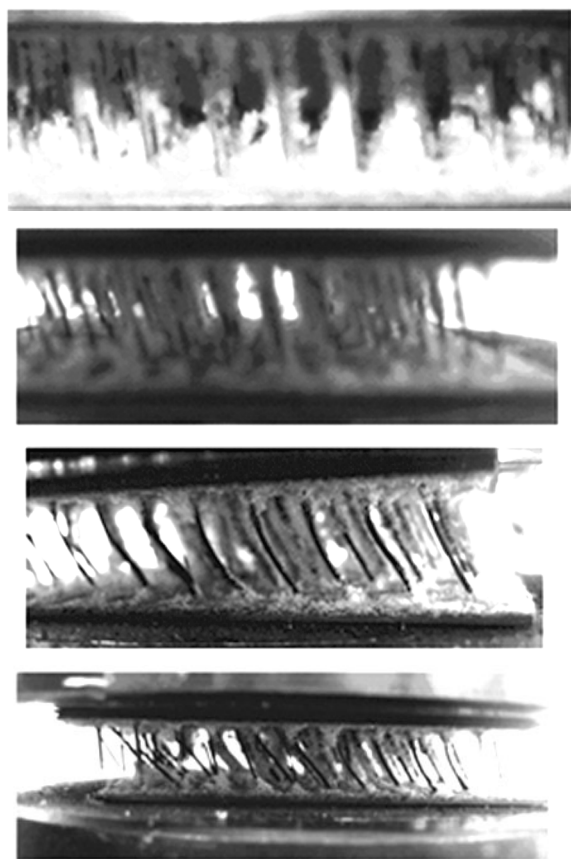


图 3 0° 去除泡沫试样破坏模式

Fig. 3 Failure modes of X-Cor sandwich with angle 0° without foam

试验结果表明 z-pin 的植入角度为 0° 的试样平压性能对角偏差缺陷更敏感, 缺陷的存在使之不能发挥其优异的承力性能。试样整体失稳及 z-pin 发生断

裂见图 3。分析产生这种现象的原因: z-pin 的植入角度为 0° 为设计参数, 但实际结构中 z-pin 往同一方向偏微小角度, 在载荷作用下结构变为机构<sup>[9]</sup>, 承载能力大大降低。而 z-pin 的植入角度为非 0° 时, z-pin 交错排列, 即使存在角偏差缺陷, 结构仍是可靠的而没有变成机构。

### 3 协同增强效应机理分析

z-pin 夹层结构中面外载荷由 z-pin 从上面板传递到下面板、空白泡沫夹层结构中面外载荷由泡沫从上面板传递到下面板、而 X-Cor 夹层结构中面外载荷由泡沫和 z-pin 共同从上面板传递到下面板。

假设所有 z-pin 均匀受力并忽略 z-pin 对泡沫的扰动影响, 则 X-Cor 泡沫夹层结构在面外载荷作用下的压缩强度为

$$\sigma_x = \sigma_f + V_p \sigma_p \cos^2 \theta \quad (1)$$

式中,  $\sigma_x$ 、 $\sigma_f$ 、 $\sigma_p$  分别为 X-Cor 夹层结构、泡沫、z-pin 的应力;  $\theta$  为 z-pin 植入角 (z-pin 与面板法线方向夹角);  $V_p$  为 X-Cor 夹层结构 z-pin 的体积分数:

$$V_p = \frac{n\pi r^2}{A \cos \theta} \quad (2)$$

式中,  $A$  为夹层结构受压面积;  $n$  为夹层结构中 z-pin 根数;  $r$  为 z-pin 半径。

式(1)中,  $V_p = 0$ , 则  $\sigma_x$  为空白泡沫夹层结构应力;  $\sigma_f = 0$ , 则  $\sigma_x$  为 z-pin 夹层结构应力。

夹层结构 z-pin 的长径比较大 (本文试验数据), 满足文献 [10] 中条件  $\lambda \geq \lambda_1$ , 属于大柔度压杆。X-Cor、z-pin 夹层结构承受面外载荷时, z-pin 发生屈曲。z-pin 夹层结构中 z-pin 发生屈曲破坏, 结构失效。但 X-Cor 夹层结构中泡沫对 z-pin 屈曲提供横向支撑, 其失稳形式不同于 z-pin 夹层结构中的 z-pin 屈曲, 应考虑泡沫对 z-pin 屈曲提供的横向支撑。

文献 [11-12] 考虑泡沫对 z-pin 屈曲提供的横向支撑以及 z-pin 端部与面板连接转动约束效应对临界载荷的影响, 得到修正公式:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_a I}{(\mu l)^2} \left( m^2 + \frac{\beta l^4}{m^2 \pi^4 E_a I} \right) \quad (3)$$

式中,  $P_{cr}$  为临界载荷,  $\mu$  为长度系数, 与 z-pin 端部所受约束有关。当  $\mu = 0.5$  时, 对应固支约束; 当  $\mu = 1.0$  时, 对应简支约束;  $m$  为整数, 表示压杆发生屈曲时形成的半正弦波个数;  $E_a$  为 z-pin 的轴向压缩模量;  $I = \frac{\pi r^4}{4}$  为 z-pin 的截面惯性矩;  $l$  为 z-pin 长度。

文献 [5] 通过将钢针拉过泡沫的方法来测量  $\beta$ , 得出泡沫是 Rohacell 31 时,  $\beta = 1.74$  MPa, 泡沫是 Rohacell 51 时,  $\beta = 2.92$  MPa。通过 X 光观测到当夹层厚度为 5 和 10 mm 时,  $m$  取 1, 当夹层厚度为 20 mm

时,  $m$  取 2。

当 z-pin 达到屈曲强度时, 结构的压缩变形:

$$\varepsilon_c = \frac{P_{cr}}{\pi r^2 E_a \cos^2 \theta} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)得到 z-pin 屈曲时 X-Cor 夹层结构的平压强度:

$$\sigma_x = E_f \varepsilon_c + V_p \sigma_{cr} \cos^2 \theta \quad (5)$$

式中,  $E_f$  为泡沫的弹性模量,  $\sigma_{cr}$  为 z-pin 临界失稳应力。

z-pin 夹层结构中考虑 z-pin 端部与面板连接转动约束效应的临界载荷为:

$$P'_{cr} = \frac{\pi^2 E_a I}{(\mu l)^2 m^2} \quad (6)$$

由式(5)看出 X-Cor 夹层结构的平压强度是泡沫提供的强度与有泡沫横向支撑的 z-pin 提供的强度之和。夹层结构中 z-pin 一般由高模量的材料拉挤成形, z-pin 的弹性模量远大于泡沫的。所以 X-Cor 夹层结构的平压强度是由泡沫提供横向支撑的 z-pin 的弹性屈曲决定的。而 z-pin 夹层结构的平压强度是由 z-pin 的弹性屈曲决定的。从理论上讲, 参考公式(3)和(6), 泡沫对 z-pin 提供的横向支撑, 延缓了 z-pin 的屈曲, 提高夹层结构的临界载荷, 从而提高结构强度; 从试验数据结果看 X-Cor 夹层的压缩最大应力大于 z-pin 夹层结构和空白泡沫夹层结构的各自压缩最大应力之和。所以可以得出结论: X-Cor 夹层结构中 z-pin 和泡沫存在协同增强效应。

#### 4 结论

X-Cor 夹层结构中 z-pin 和泡沫存在协同增强效应, 结构强度是由泡沫提供横向支撑的 z-pin 的弹性屈曲决定的。

(1) X-Cor 夹层结构中设计参数对平压性能的影响: 面板 2 mm 对 z-pin 末端的约束比面板 1 mm 的强; z-pin 角度 20° 的夹层结构的平压强度大于 z-pin 角度 30° 的; z-pin 角度 0° 的夹层结构的平压强度因试样初始角偏差缺陷使之平压强度偏低。

(2) z-pin 植入角 0° 时的 z-pin 夹层结构试验中发生整体失稳, 应力明显偏低, z-pin 植入角 0° 的 X-Cor 夹层结构试样试验的应力也略偏低。从理论上讲, z-pin 的植入角度为 0° 时的夹层结构的平压强度大于其他植入角度的。但从试验结果上看, z-pin 的植入角度为 0° 时的夹层结构没有发挥其优异的承力

性能。表明 z-pin 的植入角度为 0° 时的夹层结构试样的平压性能对角偏差缺陷更敏感, 缺陷的存在使之不能发挥其优异的承力性能。所以 z-pin 的植入角度为 0° 时的夹层结构在制造过程中要保证植入角精度, 避免角偏差缺陷。

#### 参考文献

- [1] 窦润龙, 胡培. 复合材料泡沫夹层结构在民机中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2004(3): 42-45
- [2] Majumdar P, Srinivasagupta D, Mahfuz H, et al. Effect of processing conditions and material properties on the debond fracture toughness of foam-core sandwich composites: experimental optimization[J]. Composites Part A, 2003, 34(11): 1097-1104
- [3] Zabihpoor M, Adibnazari S. Mechanisms of fatigue damage in foam core sandwich composites with unsymmetrical carbon/glass face sheets[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007, 26(17): 1831-1842
- [4] Carstensen T C, Kunkel E, Magee C. X-Cor™ advanced sandwich core material [C] // Falcone A, International SAMPE Technical Conference Series, CA: Society of Advancement Material and Process Engineering, 2001: 452-466
- [5] Cartié D D, Fleck N A. The effect of pin reinforcement upon the through-thickness compressive strength of foam-cored sandwich panels[J]. Composites Science and Technology, 2003, 63: 2401-2409
- [6] Andrea I Marasco, Cartié D D, Partridge I. K, et al. Mechanical properties balance in novel z-pinned sandwich panels: out-of-plane properties[J]. Composites: Part A, 2006, 37(2): 295-302
- [7] Andrea I Marasco. Analysis and evaluation of mechanical performance of reinforced sandwich structures: X-Cor™ and K-Cor™ [D]. Cranfield University, 2005
- [8] 田旭, 肖军, 李勇. X-Cor 夹层结构试制与性能研究[J]. 飞机设计, 2004(1): 22-25
- [9] 李廉锟. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 1-20
- [10] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 290-318
- [11] Liu T, Deng Z C, Lu T J. Design optimization of truss-cored sandwiches with homogenization [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(25): 7891-7918
- [12] 杜龙. X-Cor 夹层复合材料力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007

(编辑 吴坚)