

X-Cor 夹层结构的平压性能

单杭英^{1,2} 肖军² 李宁² 尚伟²

(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)

摘要:通过力学分析得到 X-Cor 夹层结构平压模量的解析式和计及泡沫对 z-pin 横向支撑的平压强度预测公式。分析 X-Cor 夹层结构平压模量的理论值与试验值误差, 提出了结构屈曲和 z-pin 的长度差异引起的刚度折减的修正模型, 修正后的夹层结构平压模量的理论值与试验值吻合。理论公式为 X-Cor 夹层结构的设计提供依据, 进而为 X-Cor 夹层结构新材料在工程领域的应用奠定了基础。

关键词:X-Cor 夹层结构; 力学分析; 平压性能; 刚度折减

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2012)02-0251-06

Compressive Properties of X-Cor Sandwich

Shan Hangying^{1,2}, Xiao Jun², Li Ning², Shang Wei²

(1. Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

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

Abstract: An analytical formula of compression modulus is derived through mechanics analysis. A predicted formula of compressive strength is acquired by considering foam transverse support. Through the analysis on the numerical error between the analytical result and test data of compression modulus, a modified model is proposed concerning the stiffness discount caused by structure buckling and z-pin length diversities. The analytical result of sandwich compression modulus of modified model is in coincidence with test data. The formula therotically supports X-Cor sandwich design and lays a foundation for the engineering application of X-Cor sandwich.

Key words: X-Cor sandwich; mechanics analysis; compressive properties; stiffness discount

复合材料夹层结构具有抗弯刚度高、结构重量系数低等优点, 在对刚度和重量要求高的航空航天器、高速列车上有着广泛的应用。但传统的蜂窝夹层材料存在面板会出现电报效应(影响气动性能)、抗潮湿性能差等缺陷。据文献报道^[1], 20年内收集的蜂窝雷达罩维修记录表明, 由于蜂窝进水需要维修的约占85%, Boeing 737飞机蜂窝雷达罩的平均无故障维修使用时间少于2年, 导致高昂的维护费用。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, 严重限制了其在飞机主承力结构上的应用^[2-3]。X-Cor泡沫夹层结构^[4]在很大程度上弥补了上述缺陷。它是采用z-pin技术增强的新型泡沫夹层结构(实物及结构示意参见图1)。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^[4]对X-Cor泡沫夹层结

基金项目: 军品配套(JPPT-1146)资助项目。

收稿日期: 2011-06-29; 修订日期: 2012-01-09

通讯作者: 肖军, 男, 教授, 博士生导师, 1959年3月生, E-mail: j. xiao@nuaa.edu.cn。

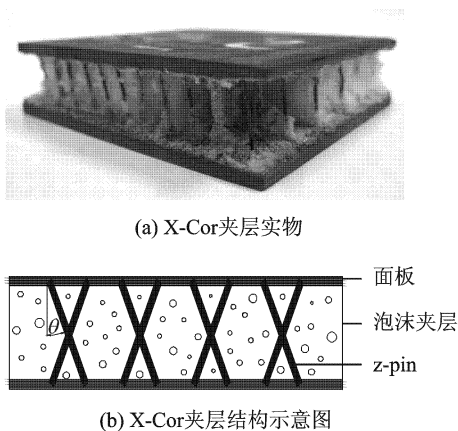


图1 X-Cor 夹层结构

构进行研究,试验分两部分:(1)平拉、平压、侧压和剪切性能;(2)大结构件试验,包括侧压和剪切性能。研究表明,X-Cor 的各力学性能均高于蜂窝夹层结构。Cartié^[5]试验研究了钛pin 和碳纤维pin 增强 X-Cor 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^[6-7]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。O'Brien 和 Paris^[8]研究了 X-cor 增强泡沫夹层过渡区域在 3 点弯曲、单轴拉伸以及拉弯组合下的破坏机理,试验观察到:试件中间部分芯材与面板发生脱粘,过渡区域部分上下面板分层;在拉伸载荷作用下,观察到过渡区域中 z-pin 发生屈曲以及 z-pin 被拔出现象。国内田旭等^[9]试制了 X-Cor 夹层结构并对其基本性能进行了试验研究,研究结果显示 X-Cor 泡沫夹层的抗压、抗弯和抗剪性能分别为空白泡沫夹层结构的 1.5, 3.5 和 5.45 倍。郝继军等^[10]应用材料力学方法对 X-Cor 夹层结构的平压模量和强度进行了理论预测,并完成了碳/环氧 X-Cor 夹层结构的平压试验,针对平压模量理论预测值与试验有较大差异。文献^[10]指出分析模型比较理想化,需要针对具体情况引入经验系数修正,但并未给出具体修正方法和修正值大小。党旭丹^[11]利用均匀化理论得到 X-Cor 夹层结构压缩模量理论预测公式,针对平压模量理论预测值与试验有较大差异,提出压缩模量的修正系数 M_{cm} ;确定针对文献^[11]中的试验水平 M_{cm} 值

为 0.3;只指出 M_{cm} 是制备过程及其他缺陷的折算系数而未阐明物理意义。如何合理修正 X-Cor 夹层结构压缩模量和阐述,迄今未见报道。

本文通过力学分析推导出 X-Cor 夹层结构平压模量的解析式和计及泡沫对 z-pin 横向支撑的平压强度预测公式。分析 X-Cor 夹层结构平压模量的理论值与试验值误差,提出了结构屈曲和 z-pin 的长度差异引起的刚度折减的修正模型,修正后的夹层结构平压模量的理论值与试验值吻合。理论公式为 X-Cor 夹层结构的设计提供依据,进而为 X-Cor 夹层结构新材料在工程领域的应用奠定了基础。

1 理论分析

夹层材料通常是由比较薄的板材作面板,比较厚的低密度材料作芯子。一般面板采用高强、高模的材料,主要承受面内拉伸、压缩和面内剪切载荷;芯子支撑面板承受垂直于面板的压缩应力^[12]。所以夹层材料在承受面外载荷时,材料的平压性能主要取决于芯子的平压性能。故本文研究 X-Cor 夹层结构的平压性能时,暂不考虑面板的影响,只研究芯子的平压性能(包括芯子的平压模量和平压强度)。

1.1 X-Cor 夹层结构的平压模量

取一个 X-Cor 夹层结构的单胞进行分析(图 2)。定义 z-pin 的半径为 r ,直径为 d ,z-pin 的植入角度为 θ (z-pin 与面板法线方向),夹层结构厚度为 h ,z-pin 长度为 l ,单胞结构的受压面积为 A 。

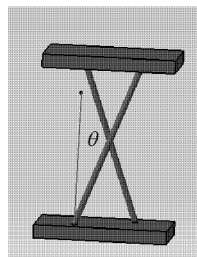


图2 X-Cor 夹层结构单胞三维模型

X-Cor 夹层结构中芯子是由 z-pin 增强的泡沫组成的,面外载荷由泡沫和 z-pin 共同从上面板传递到下面板

$$F = F_f + F_p \quad (1)$$

式中: F_f 和 F_p 分别为泡沫、z-pin 承担的面外载荷; F 为面外载荷。

X-Cor 夹层结构单胞中的 2 根 z-pin 是对称的,取出其中一根对其进行受力分析(图 3),z-pin 嵌入

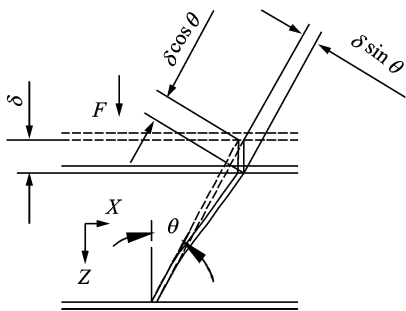


图3 X-Cor 夹层结构中z-pin 受力示意图

面板内,两端与上下面板可视为固支连接。假定结构在面外载荷作用下Z方向的位移为 δ ,z-pin的轴向力 N 和剪力 Q 分别为

$$N = \pi r^2 E_a \frac{\delta \cos \theta}{l} \quad (2)$$

$$Q = \frac{12 E_a I \delta \sin \theta}{l^3} \quad (3)$$

式中: E_a 为z-pin的轴向压缩弹性模量; $I = \frac{\pi r^4}{4}$ 为z-pin的截面惯性矩。则z-pin承担的面外载荷 F_p 可写成

$$F_p = N \cos \theta + Q \sin \theta = \frac{\pi r^2 E_a \delta}{l} \left[\cos^2 \theta + 3 \sin^2 \theta \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] \quad (4)$$

夹层结构的应变为

$$\epsilon = \frac{\delta}{h} \quad (5)$$

将式(1)两边分别除以 A 和 ϵ ,得到夹层结构平压模量

$$E = \frac{A_f}{A} E_f + \frac{F_p}{A \epsilon} = V_f E_f + \frac{\pi r^2 E_a}{A} \left[\cos^2 \theta + 3 \sin^2 \theta \cos \theta \left(\frac{r}{l} \right)^2 \right] = V_f E_f + V_p E_a \cos^4 \theta + 3 V_p E_a \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left(\frac{r}{l} \right)^2 \quad (6)$$

式中: E_f 指泡沫的弹性模量; V_f, V_p 分别为X-Cor夹层结构中泡沫和z-pin的体积百分比,并且

$$V_f + V_p = 1 \quad (7)$$

$$V_p = \frac{\pi r^2}{A \cos \theta} \quad (8)$$

$$h = l \cos \theta \quad (9)$$

式(6)的右边第1项是夹层结构中泡沫对平压模量的贡献;第2项是z-pin轴向受力对平压模量的贡献;第3项是z-pin弯曲对平压模量的贡献。式(6)中右边第3项相对第2项是个小量

$\left(\left(\frac{r}{l} \right)^2 \right)$ 数量级为 10^{-3} ,故可忽略不计。所以X-Cor泡沫夹层结构z-pin杆单元受力以轴向力为主,每根z-pin杆单元产生轴向变形,而产生的弯曲变形忽略不计。X-Cor泡沫夹层结构的平压模量可表示为

$$E = (1 - V_p) E_f + V_p E_a \cos^4 \theta \quad (10)$$

1.2 X-Cor 夹层结构的平压模量刚度折减

但基于上述分析模型得出的X-Cor夹层结构的平压模量公式偏于理想化,得出的理论值远大于试验值。X-Cor夹层结构分析模型与受力实际情况相对比,存在以下两点差异性较大:(1)X-Cor夹层结构在承受面外载荷时,结构屈曲破坏^[5],结构因屈曲引起的变形大于理想理论模型(未考虑结构屈曲)计算得到的变形,刚度减小;(2)公式中 V_p 是X-Cor夹层结构中z-pin的体积百分比,理想理论分析模型中假定了结构中z-pin均匀受力,但在实际结构中z-pin植入的长度在植入过程及成形过程中都存在着误差。z-pin的长度差异影响了结构受力的一致性,导致结构变形增大,刚度降低。

由第1个原因而引起的结构刚度降低折减系数为 M_1 ,第2个原因而引起的结构刚度降低折减系数为 M_2 。将 M_1 和 M_2 引入对X-Cor夹层结构的压缩模量公式进行修正。修正后的预测公式为

$$E = M_1 \times M_2 \times [(1 - V_p) E_f + V_p E_a \cos^4 \theta] \quad (11)$$

式中 $M_1 = \frac{d^2}{4 \xi^2}$, ξ 为杆件屈曲引起的最大横向位移,

$$\xi = \sqrt{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{d}{24}$$

$$\frac{q}{2} = -\frac{d^3}{13\ 824} - \frac{0.0254 l^2 d [\sigma]}{E_a}$$

$$\frac{p}{3} = -\frac{d^2}{576}$$

$[\sigma]$ 为z-pin材料许用应力; $M_2 = 0.5$ 。

1.3 X-Cor 夹层结构的平压强度

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平压强度为

$$\sigma_x = \sigma_f + V_p \sigma_p \cos^2 \theta \quad (12)$$

式中 $\sigma_x, \sigma_f, \sigma_p$ 分别为X-Cor夹层结构,泡沫,z-pin的应力。

X-Cor夹层结构承受面外载荷时,如果结构是

压溃破坏,那么 σ_t, σ_p 就是泡沫,z-pin材料的极限压缩强度。由于z-pin为细长杆,有较大的长径比,夹层结构在承受面外载荷时z-pin有可能发生屈曲失稳,且泡沫尚未发生屈服(泡沫为硬质泡沫,不易发生屈曲失稳),此时 σ_t, σ_p 分别为z-pin发生屈曲时泡沫,z-pin的应力。但X-Cor夹层结构中的泡沫材料对z-pin起支撑作用,其失稳形式不同于普通压杆失稳,需考虑泡沫对z-pin失稳提供的横向支撑。文献[13]提出了利用文克尔型地基模型(图4),即地基表面任一点上所受单位面积上的压力与相应的地基的竖向位移成正比,公式为

$$P = \beta \times y \quad (13)$$

式中 β 为泡沫弹性支撑模量。

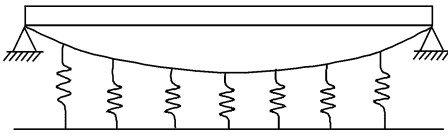


图4 弹性地基梁计算示意图

X-Cor夹层结构中z-pin两端嵌入面板中,两端存在有限转动而不是完全无转动约束,需要根据z-pin端部与面板连接考虑转动约束效应对临界载荷的影响^[14],得到修正公式

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_a I}{(\mu l)^2} \left(m^2 + \frac{\beta l^4}{m^2 \pi^4 E_a I} \right) \quad (14)$$

式中: μ 长度系数,与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。

文献[5]通过将钢针拉过泡沫的方法来测量 β ,得出泡沫是Rohacell 311G时, $\beta=1.74$ MPa,泡沫是Rohacell 51W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

$$\epsilon_c = \frac{P_{cr}}{\pi r^2 E_a \cos^2 \theta} \quad (15)$$

将式(14,15)代入式(12),得到z-pin屈曲失稳时X-Cor夹层结构的压缩强度

$$\sigma_x = E_t \epsilon_c + V_p \sigma_{cr} \cos^2 \theta \quad (16)$$

式中 σ_{cr} 为z-pin临界失稳应力。

2 试 验

实验室制备了X-Cor夹层结构试样。其中泡沫采用德国赛公司Rohacell 31泡沫和Rohacell 51泡

沫,泡沫厚度分别为11.5和13 mm,z-pin采用T300/FW-125环氧树脂复合材料拉挤杆,试样大小为长、宽均为60 mm,试样的编号及几何参数见表1。X-Cor夹层结构平压性能测试参照GB 1453—2005标准进行。采用的仪器为新三思电子万能试验机,加载速度为0.5 mm/min,室温条件下进行试验。X-Cor夹层结构压缩性能试验装置见图5。试验装置中上端为加载块,下端采用球面自适应平板加载,以确保载荷垂直于试样表面。

表1 试样参数表

试样编号	泡沫类型	z-pin(直径/mm)/ (角度/(°))	z-pin分布 间距(L×W)/ (mm×mm)
1#	311G	0.5/0	5×10
2#	311G	0.5/20	5×10
3#	311G	0.5/30	5×10
4#	51W	0.5/0	5×10
5#	51W	0.5/20	5×10
6#	51W	0.5/30	5×10
7#	311G	0.7/0	5×10
8#	311G	0.7/20	5×10
9#	311G	0.7/30	5×10

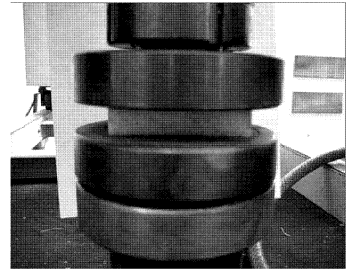


图5 X-Cor夹层结构平面压缩试验装置

2#、3#试样平压性能测试的应力-应变曲线见图6。

从图6中看出,试样在压缩载荷作用下,应力-应变曲线先进入线弹性增长阶段,之后达到最大

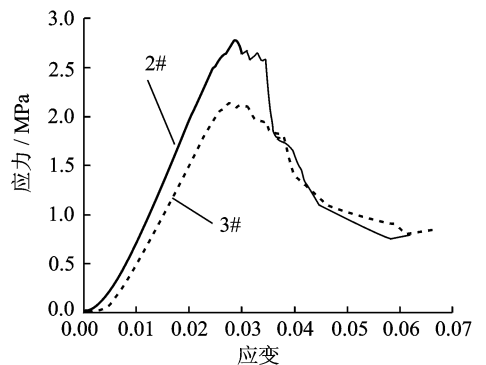


图6 应力-应变曲线

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,试样突然发出一下很脆的声响,之后可听到接连不断的“噼啪”响,应力迅速下滑。经观察分析,“噼啪”响为z-pin受压发生失稳断裂发出的声音。

X-Cor 夹层结构的破坏模式见图7。

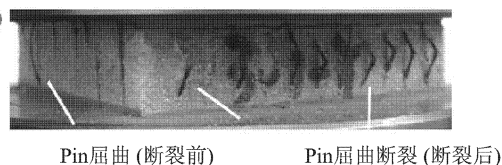


图7 X-Cor 夹层破坏模式

3 理论计算与试验对比

X-Cor 夹层结构平压模量的理论值、修正后的理论值及试验结果比较见图8。X-Cor 夹层结构平压强度的理论计算(包括失稳破坏和压溃破坏两种)与试验结果比较见图9。

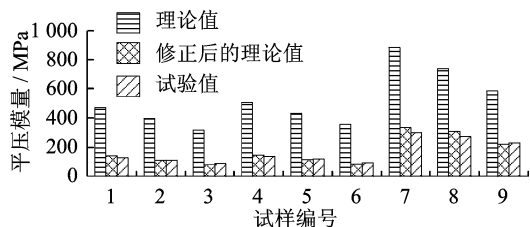


图8 平压模量理论值、修正后的理论值及试验结果对比

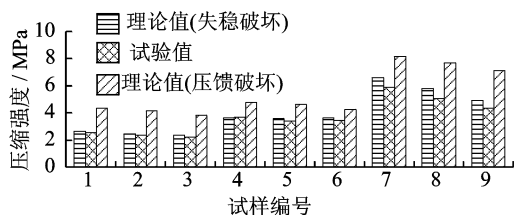


图9 平压强度理论计算(失稳破坏、压溃破坏)及试验结果对比

从图8中看出,平压模量的理论值远大于试验值,而考虑了结构屈曲引起的结构刚度折减系数 M_1 以及z-pin长度差异引起的结构刚度折减系数 M_2 的修正后的理论值与试验结果吻合性较好。X-Cor 夹层结构中z-pin直径0.5 mm,两种泡沫类型、3种z-pin植入角度的平压模量均为100~150 MPa。而X-Cor 夹层结构中z-pin直径0.7 mm的平压模量有较大幅度地提高。在z-pin角度和泡沫相同的情况下,z-pin直径增大对提高X-Cor夹

层结构的平压模量有显著的效果。

从图9中看出,X-Cor 夹层结构平压强度的理论值(失稳破坏)与试验结果吻合性较好,而理论计算(压溃破坏)的值明显高于试验值。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。在z-pin角度和泡沫相同的情况下,z-pin直径0.7 mm的X-Cor 夹层结构的平压强度比z-pin直径0.5 mm的提高50%以上。

z-pin的直径从0.5 mm增大到0.7 mm,X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度均提高50%以上。因此,在重量情况允许下,增大z-pin的直径提高X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度效果显著。

在其他参数一致的情况下,X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度随着z-pin角度增加而依次减小,即z-pin角度为 0° 的X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度高于z-pin角度为 20° 的,而z-pin角度为 20° 的X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度高于z-pin角度为 30° 的。

在z-pin直径和角度一样的情况下,X-Cor 夹层结构中采用Rohacell 51泡沫的平压模量和平压强度高于Rohacell 31泡沫,这是因为Rohacell 51泡沫比Rohacell 31泡沫密度大,刚性好。Rohacell 51泡沫提供给z-pin的横向支撑比Rohacell 31泡沫的大。

4 结 论

本文从理论计算与试验研究两个方面入手研究分析了X-Cor 夹层结构的平压性能,得出以下结论:

(1)考虑了结构屈曲引起的结构刚度折减系数 M_1 以及z-pin长度差异引起的结构刚度折减系数 M_2 的修正后的平压模量理论计算与试验结果吻合性较好;X-Cor 夹层结构平压强度的理论值(失稳破坏)与试验结果吻合性较好。X-Cor 夹层结构中z-pin为细长杆,有较大的长径比,在承受面外载荷时夹层结构发生失稳破坏。而修正后的平压模量和平压强度的理论计算公式与X-Cor 夹层结构失稳破坏情况吻合。

(2)X-Cor 夹层结构的平压模量、强度与z-pin的体积百分比、z-pin材料的弹性模量成正比,与植入角 θ 成反比。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。在重量条件许可的情况下,提高X-Cor 夹层结构的平压模量和平压强度就是要提高z-pin的稳定性。

(3)利用理论计算公式,优化设计X-Cor 夹层

结构的各个参数和选择材料:z-pin 的直径、植入角度、密度和不同的材料,设计者可以设计出自己所需要的材料,充分发挥出材料的特性。

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
Dou Runlong, Hu Pei. Foam core sandwich composites application in civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 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] Zabilhpoor 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] // 33rd International SAMPE Technical Conference. Seattle, WA, USA: Sikorsky Aircraft, 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(16): 2401-2409.
- [6] Marasco A I, Cartie D D R, 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] Marasco A I. Analysis and evaluation of mechanical performance of reinforced sandwich structures; X-cor™ and K-cor™ [D]. Cranfield: Cranfield University, 2005.
- [8] O'Brien K T, Paris I L. Exploratory investigation of failure mechanisms in transition regions between solid laminates and X-cor truss sandwich [J]. Composite Structures, 2002, 57(1/4): 189-204.
- [9] 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.
Tian Xu, Xiao Jun, Li Yong. Study on X-cor sandwich structure manufacture and its mechanical performance [J]. Aircraft Design, 2004(1): 22-25.
- [10] 郝继军,张佐光,李敏,等. X-Cor 夹层复合材料平压性能分析 [J]. 航空学报, 2008, 29(4): 1079-1083.
Hao Jijun, Zhang Zuoguang, Li Min, et al. Compression property analysis of X-cor sandwich properties [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 1079-1083.
- [11] 党旭丹. X-Cor 夹层结构制备与力学性能研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.
- [12] 杨乃宾,章怡宁. 复合材料飞机结构设计 [M]. 北京:航空工业出版社, 2002: 122-200.
- [13] 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.
- [14] 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.