

文章编号: 1000-8055(2009)12-2802-06

X-cor 夹层结构压缩强度模型改进与实验验证

党旭丹, 肖 军, 谭永刚, 李 勇, 原永虎
(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要: 详细阐述了 X-cor 夹层结构固化工艺过程中残余应力的产生过程, 分析结果为碳纤维 Z-pin 受残余拉应力。考虑工艺过程残余应力的影响, 将 Z-pin 视为弹性基础上梁, 提出一种 X-cor 夹层结构压缩强度改进计算模型, 并计算其压缩强度。制作了不同 Z-pin 密度、直径和角度的 X-cor 夹层结构实验件用于压缩强度实验。实验值和模型计算值的对比验证了该压缩强度计算模型的正确性。工艺过程中 Z-pin 所受残余拉应力随 Z-pin 直径、植入密度增加而增加, 随 Z-pin 植入角度增加而减小。

关 键 词: X-cor 夹层结构; 压缩强度; Z-pin; 残余应力; 计算模型
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Computational modified model and experimental verification of compressive strength of the X-cor sandwich

DANG Xu-dan, XIAO Jun, TAN Yong-gang, LI Yong, YUAN Yong-hu
(College of Material Science and Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The generation process of residual stress during the curing process of X-cor sandwich was described, and the analytical results indicate that carbon fiber Z-pins are subject to residual tensile stress. In consideration of the effects of residual stress, Z-pins were treated as beams upon an elastic foundation, then a sort of compressive strength computational modified model of X-cor sandwich was proposed and its compressive strength was computed. The X-cor sandwich samples of different density, diameter and angle of Z-pins were made for compressive strength experiments. Through contrast between experimental and computational results the computational model was verified. The residual stress increases as the Z-pin's diameter and density become bigger, or decreases as the Z-pin's angle increases.

Key words: X-cor sandwich; compressive strength; Z-pin; residual stress; computational model

夹层结构由面板和芯材胶结而成, 抗弯刚度高、结构质量系数低, 广泛应用于对刚度和质量要求高的飞行器构件, 如壁板、翼面、尾梁等。芯材常用蜂窝、泡沫等轻质材料。蜂窝夹层结构在航空上已有悠久的历史, 例如直升机发动机整流罩即由阻燃环氧树脂体系和 Nomex 蜂窝夹芯制备而成^[1-2]。高性能泡沫的出现使泡沫夹层结构能够

用于航空航天器。为了进一步提高泡沫夹层结构性能和减轻质量, 增强泡沫的夹层结构迅速发展。X-cor 即是一种增强泡沫芯材, 在泡沫中植入与外表面呈一定角度的单向纤维针状物 (Z-pin) 形成空间网架结构。在有网架结构的泡沫上铺覆预浸料经固化即可得到 X-cor 夹层结构。

Marasco 等^[3]通过实验研究了 X-cor 夹层结

收稿日期: 2008-12-04; 修订日期: 2009-01-08

基金项目: 科研计划 (J PPT-1446)

作者简介: 党旭丹 (1979 -), 女, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事 X-cor 夹层结构制备及性能研究。

构的平压、平拉和剪切性能,结果表明,Z-pin 的植入能够大幅度提高 X-cor 夹层结构厚度方向力学性能. 郝继军、张佐光和张蕾^[4]通过实验研究了 Z-pin 植入参数对 X-cor 夹层结构力学性能的影响,给出其力学性能随 Z-pin 植入参数变化的规律. 与传统蜂窝夹层结构相比,X-cor 夹层结构具有突出的抗剪、抗压刚度,是飞机结构复合材料的重要发展方向. 美国的飞机结构^[5]已采用 Aztex 公司开发的 X-corTM材料替代部分蜂窝芯材制造夹层结构.

为建立 X-cor 夹层结构细观几何参数与宏观力学性能间的关系,杜龙和矫桂琼^[6-7]等利用等效夹杂理论进行了 X-cor 夹层结构剪切刚度的预报研究,预测值与实验结果吻合较好. 关于 X-cor 夹层结构压缩强度的计算,研究文献相对较少. Cartie 和 Fleck^[8]认为,X-cor 夹层结构的压缩强度由 Z-pin 的弹性屈曲所控制,将 Z-pin 端部约束条件视为铰支,考虑泡沫作为弹性基础提供侧壁支撑的影响,提出了 X-cor 夹层结构压缩强度的计算模型. 杜龙和矫桂琼^[9-10]在 Cartie 模型的基础上,引入 Z-pin 在不同约束条件下的相当长度,并计及泡沫压缩强度的影响,提出 X-cor 夹层结构压缩强度的修正模型. 本工作研究了固化工艺过程对 X-cor 夹层结构压缩强度的影响,根据文献^[8-10],提出一种 X-cor 夹层结构压缩强度的计算模型. 压缩强度实验值与计算值的对比,证明了该模型的正确性.

1 X-cor 夹层结构压缩强度实验研究

1.1 实验件制备

X-cor 夹层结构中 Z-pin 由 T300 碳纤维拉挤所制,基体为环氧树脂;泡沫芯材为 Rohacell 31IG(PMI);面板为光威公司 12500 型单向碳纤维预浸布,铺放顺序为 $[0/90/0/90]_s$.

X-cor 夹层结构的制备流程是:Z-pin 拉挤 - X-cor 植入 - X-cor 夹层结构固化. Z-pin 所受的残余应力即产生于 X-cor 夹层结构固化过程. 固化工艺必须满足面板树脂固化和 Z-pin 嵌入面板的双重需要. 为满足 Z-pin 尖端嵌入面板的要求,X-cor 夹层结构固化过程需要施加一定的压力. 根据 X-cor 夹层结构所采用的泡沫芯材在固化温度下的压缩强度、变形特性以及面板树脂的要求,选用固化压力为 0.1 MPa. X-cor 夹层结构固化工

艺曲线如图 1 所示.

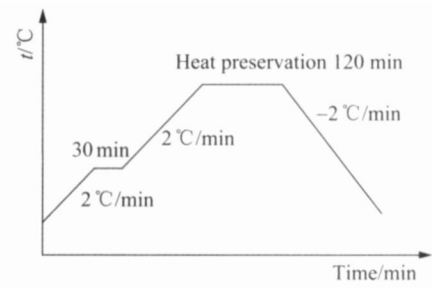


图 1 固化工艺曲线
Fig. 1 Curing process curve

通过严格控制工艺参数,所制备实验件表面光滑平整,没有凹坑和 Z-pin 穿出面板现象. X-cor 夹层结构实验件如图 2 所示(为显示 Z-pin 空间架构,图中挖去部分泡沫).

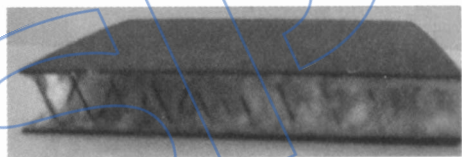


图 2 X-cor 夹层结构实验件
Fig. 2 Sample of X-cor sandwich

根据 Z-pin 的密度、直径和角度的不同,X-cor 夹层结构实验件的规格共有 5 种,列于表 1.

表 1 X-cor 夹层结构实验件规格
Table 1 Samples of X-cor sandwich

规格	直径/mm	角度/(°)	密度/ (mm×mm)	体积分数/%
I	0.50	30	5×10	0.43
II	0.50	22	5×10	0.42
III	0.50	30	15×10	0.13
IV	0.50	30	10×10	0.19
V	0.70	0	5×10	0.78

1.2 实验结果

根据 GB/T 1453-1987 非金属夹层结构或芯子平压性能试验方法^[11],测试其压缩强度,保证每种规格实验件的有效结果数为 5 个. 实验仪器采用深圳新三思公司生产的 CM T5504 微机控制万能试验机. 实验件的典型压缩载荷-位移曲线如图 3 所示.

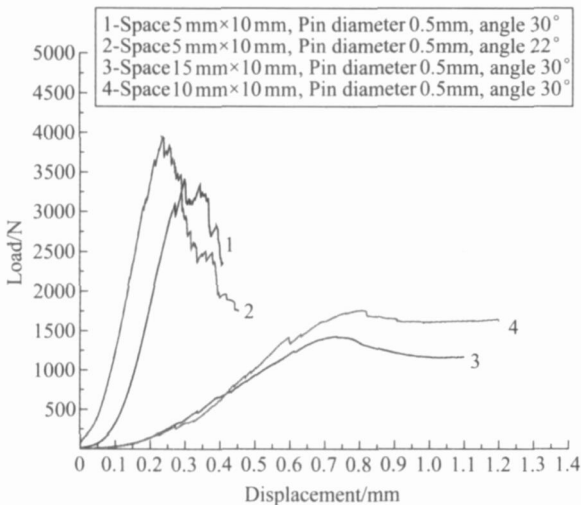


图 3 压缩载荷-位移曲线

Fig. 3 Compressive load versus displacement

2 考虑工艺影响的 X-cor 夹层结构
压缩强度计算模型

2.1 残余应力的产生机理分析

对于 X-cor 夹层结构的压缩强度有影响的因素有:泡沫芯材对 Z-pin 的侧壁支撑、Z-pin 的相当长度、泡沫的压缩强度和工艺过程的残余应力等.其中前三项影响因素已在文献[8-10]中有详细的阐述,本工作研究固化工艺过程中残余应力的产生机理及其对压缩强度的影响.

固化工艺过程中,X-cor 夹层结构内存在残余应力的根本原因是 Z-pin 和泡沫芯材热膨胀系数的不匹配.需要说明的是,与结构厚度方向的尺寸相比,上下面板厚度较小,且与固化装置中的铝板贴合较好,故其变形很小,未考虑其厚度方向变形的影响.为简化起见,主要考虑 Z-pin 和泡沫的变形.另外,X-cor 夹层结构为对称结构,因此文中在建立泡沫与 Z-pin 的变形协调方程时,未考虑结构横向变形效应.

根据固化工艺曲线,X-cor 夹层结构将依次经历升温-保温-降温的过程.Rohacell 31IG 泡沫抗热变形温度为 180 °C,远高于固化工艺所使用的 130 °C,因此整个固化过程中视泡沫在线弹性阶段工作,弹性模量不发生改变.残余应力产生机理的分析分为两个阶段进行,如图 4、5 所示.两图中的数字表示工艺过程中泡沫和 Z-pin 的变形结束位置,相同的数字为同一点.需要指出,升温过程为 20~130 °C,中间的 80 °C 保温 30 min 阶段,由于树脂未固化,对 Z-pin 和泡沫的受力状态

不产生影响,故不再将此保温阶段单独拿出分析.

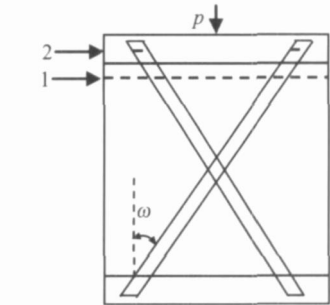
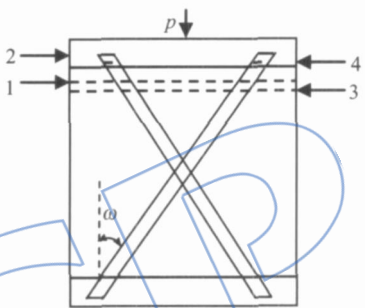
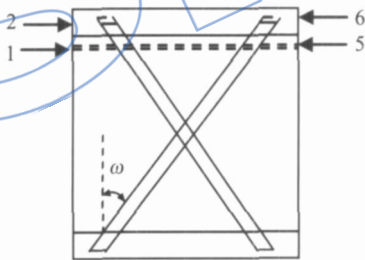


图 4 固化过程第一阶段

Fig. 4 First phase



(a) 降温阶段



(b) 压力去除阶段

图 5 固化过程第二阶段

Fig. 5 Second phase

第一阶段是升温-保温阶段.泡沫和 Z-pin 的变形如图 4 所示,其中 ω 为 Z-pin 的植入角度.

这一阶段分两部分进行讨论.①在升温部分,抽真空后,0.1 MPa 压力下,X-cor 夹层结构的温度由 20 °C 升至 130 °C 这一过程中,泡沫受热有膨胀趋势,Z-pin 受热有收缩趋势.对于泡沫,其受热膨胀产生应变小于其在固化压力下产生的压应变,因此泡沫产生压应变,被压至图 4 中 1 点.对于 Z-pin,其升温收缩未受限制,故仅有收缩变形,端部收缩至图 4 中 2 点.Z-pin 和泡沫间不约束彼此变形,泡沫产生变形大于 Z-pin 产生变形.②在保温部分,X-cor 夹层结构在 130 °C 高温下保温 120 min.此时,面板内的树脂处于流变状态,发生固化反应,Z-pin 内部无残余应力.这一阶段结束时,Z-pin 与面板形成刚性连接,X-cor 夹层结构

固化完成。

第二阶段是降温阶段, Z-pin 内部将产生残余应力。泡沫和 Z-pin 的变形如图 5 所示。

这一阶段主要进行了两步操作, 降温和 0.1 MPa 压力的去除。①0.1 MPa 压力下, X-cor 夹层结构的温度由 130 °C 降至 20 °C 这一过程中, 泡沫因温度降低有收缩趋势, Z-pin 有膨胀趋势, 而面板与 Z-pin、面板与泡沫间均为刚性连接, 因此泡沫的收缩和 Z-pin 的膨胀均会受到约束。因降温, Z-pin 产生的膨胀变形小于泡沫产生的收缩变形, 故泡沫继续受压, 产生新的压应变。泡沫被压至图 5(a) 中的 3 点, 同时, Z-pin 也受压, 其端部位置被压至图 5(a) 中的 4 点。②到达室温, 0.1 MPa 压力的去除。整个过程中施加 0.1 MPa 压力的原因是面板固化工艺的需要, 也是为了防止降温过程中 X-cor 夹层结构产生翘曲, 保证实验件质量。在 X-cor 夹层结构固化完成且降温之后, 去除 0.1 MPa 的压力将使泡沫膨胀反弹。为恢复至初始位置, 泡沫和 Z-pin 都产生新的变形。对于泡沫, 新产生的应变不能完全抵消之前的压应变, 故泡沫最终存有压应变, 变形终止位置在图 5(b) 中的 5 点。而 Z-pin, 新产生的应变可以完全抵消之前的压应变, 故最终 Z-pin 存有拉应变, Z-pin 端部变形终止位置为图 5(b) 中的 6 点。

综合起来看, 对于碳纤维 Z-pin 增强的 X-cor 夹层结构, Z-pin 最终受到残余拉应力的作用。X-cor 夹层结构的压缩强度由 Z-pin 的弹性屈曲控制, Z-pin 内部残余拉应力的存在使夹层结构的压缩强度增大。残余拉应力的数值与 Z-pin 的角度和体积分数有关, 是 Z-pin 角度和体积分数的函数。

2.2 压缩强度计算力学模型

完成工艺过程中残余应力的产生过程分析后, 以下给出基于工艺分析的压缩强度计算修正模型。

1) 固化工艺的第一阶段, 泡沫受到的热膨胀应力、压缩应力和固化应力三力平衡, 则泡沫产生的压应变为

$$\varepsilon^1 = \frac{\sigma - \alpha \cdot E_t \cdot \Delta t}{E_t} \quad (1)$$

2) 固化工艺的第二阶段。

①降温过程中, X-cor 夹层结构的平衡方程为

$$\sigma + \alpha^1_t - \alpha^1 - \alpha^1 - \alpha^1_t - \alpha^1 = 0 \quad (2)$$

由于固化工艺过程中, 温度应力和温度应变的静不定性质, 还需补充泡沫和 Z-pin 之间的变形协调方程

$$\varepsilon_p = \varepsilon_f \cdot \cos \omega \quad (3)$$

Z-pin 产生的压应变为

$$\varepsilon_p^1 = \frac{2 \cdot \alpha \cdot E_t \cdot \Delta t - \alpha_p \cdot E_p \cdot \Delta t \cdot f \cdot \cos^2 \omega}{E_t + E_p \cdot f \cdot \cos^3 \omega} \cdot \cos \omega \quad (4)$$

②压力去除过程中, X-cor 夹层结构的平衡方程为

$$\alpha^{22} + \alpha^{21} - \alpha^{22} = 0 \quad (5)$$

Z-pin 产生的拉应变为

$$\varepsilon_p^{22} = \frac{E_t \cdot (\varepsilon^1 \cdot \cos \omega + \varepsilon_p^{21}) + E_p \cdot \varepsilon_p^{21} \cdot f \cdot \cos^3 \omega}{E_t \cdot \cos \omega + E_p \cdot f \cdot \cos^4 \omega} \quad (6)$$

经过以上两个阶段后, Z-pin 最终受到的残余拉应力为

$$\sigma_p = (\varepsilon_p^{22} - \varepsilon_p^{21}) \cdot E_p \quad (7)$$

压缩载荷测试时, 两端铰支的情况下, 弹性基础上梁受力屈曲的临界载荷为^[12]

$$p_0 = \frac{\pi^2 \cdot E_p \cdot I_p}{l^2} \left(m^2 + \frac{\beta \cdot l^4}{m^2 \cdot \pi^4 \cdot E_p \cdot I_p} \right) \quad (8)$$

考虑 Z-pin 端部的约束条件和泡沫对 Z-pin 的侧壁支撑, 引入 Z-pin 相当长度系数 μ , Z-pin 受力屈曲的临界载荷为^[9]

$$p_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_p \cdot I_p}{(\mu \cdot l)^2} \cdot \left(m^2 + \frac{\beta \cdot l^4}{m^2 \cdot \pi^4 \cdot E_p \cdot I_p} \right) \quad (9)$$

因此, 考虑工艺过程的 X-cor 夹层结构压缩强度计算模型为

$$\sigma_{\max} = f \cdot \cos^2 \omega \cdot \left[\frac{4 p_{cr}}{\pi \cdot d^2} \right] + E_t \cdot \varepsilon_f + \alpha_p \cdot f \cdot \cos^2 \omega \quad (10)$$

上述公式中, 下标 f 为与泡沫相关的参数, 下标 p 为与 Z-pin 相关的参数, 下标含有 t 的参数为与温度相关的应力, 上标 11 表示第一阶段中的参数, 上标 21 表示第二阶段中降温部分的参数, 上标 22 表示第二阶段中压力去除部分的参数。其中, σ 为固化压力, α 为泡沫的热膨胀系数, Δt 为温度的变化数值, α_p 为 Z-pin 的热膨胀系数, E_p 为 Z-pin 的弹性模量, I_p 为 Z-pin 的惯性矩, l 为 Z-pin 的长度, f 为 Z-pin 的体积分数, ω 为 Z-pin 的植

入角度, d 为 Z-pin 的直径, E_f 为泡沫的弹性模量, ε_1^1 为第一阶段泡沫的应变, σ_1^1 为第一阶段泡沫内的应力, σ_1^2 为第二阶段降温中泡沫的温度应力, σ_2^1 为第二阶段降温中泡沫内的应力, σ_2^2 为第二阶段降温中 Z-pin 的温度应力, σ_2^3 为第二阶段降温中 Z-pin 内的应力, ε_2^1 为第二阶段降温中 Z-pin 的应变, σ_2^2 为第二阶段去除压力中泡沫内的应力, σ_2^3 为第二阶段去除压力中 Z-pin 内的应力, ε_2^2 为第二阶段去除压力中 Z-pin 内的应变; m 为 Z-pin 的屈曲半波数, β 为泡沫的弹性地基系数, μ 为 Z-pin 的相当长度系数。

2.3 参数的确定

压缩强度的计算模型中涉及到 3 个重要的参数, 它们分别是 Z-pin 的屈曲半波数 m , Z-pin 的相当长度系数 μ 和泡沫的弹性地基系数 β 。它们的取值方法如下。

屈曲半波数 $m = 1^{[7]}$ 。因为此时 Z-pin 的屈曲力最小, 且实验中也只观察到一个近似正弦半波。

Z-pin 的相当长度系数 μ 反映 Z-pin 端部所受到的约束条件, 其值介于 0.5~1 之间。 μ 值受很多因素的影响, 例如各组分材料的性质、Z-pin 植入面板的深度、Z-pin 植入的角度和 Z-pin 的直径等等, 精确测量较为困难。

泡沫的弹性地基系数 β 反应了弹性基础上单位长度的 Z-pin 在单位横向变形下受到的泡沫反力, 其弹性地基系数可以通过将 Z-pin 拉过泡沫的方法进行测量^[9], 与泡沫的密度和 Z-pin 的直径有关。根据文献[8], 对于 Rohacell 31IG 泡沫, 当 Z-pin 的直径为 0.5 mm 时, 泡沫的弹性地基系数 $\beta = 1.74$ MPa。不同密度的泡沫和不同直径的 Z-pin 之间弹性地基系数的换算公式为^[8]

$$\beta_2 = \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \beta_1 \tag{11}$$

其中 d 为 Z-pin 的直径, ρ 为泡沫的密度。根据换算公式, 当 Z-pin 的直径为 0.7 mm 时, 泡沫的弹性地基系数为 $\beta = 2.44$ MPa。

3 计算模型分析结果与实验对比

本文模型与其它模型计算结果的对比列于表 2。为便于验证, 采用文献中提供的参数计算。

由表 2 可知, 与模型 1 和模型 2 的计算值相比, 本文提出的模型 3 的计算值较模型 2 有所提高。因为计算中考虑了工艺过程中残余应力的影响, 更为实际地反映了 Z-pin 受力状况。

根据所建立的 X-cor 夹层结构的压缩强度计算模型, 分别对不同规格实验件的压缩强度进行计算, 结果列于表 3。

表 2 不同模型计算结果对比

Table 2 Contrast of different model results

项目	压缩强度/MPa
实验值 ^[7]	9.50
模型 1 ^[7]	6.32
模型 2 ^[8]	8.60
模型 3	8.75

表 3 计算值与实验值的比较

Table 3 Contrast between computation and tests

规格	压缩强度 (计算值)/MPa	压缩强度 (实验值)/MPa	误差/%
I	1.07	0.92	16.30
II	1.15	1.05	9.52
III	0.40	0.36	11.11
IV	0.53	0.48	10.42
V	2.96	2.89	2.42

由表 3 可见, X-cor 夹层结构压缩强度的计算值与实验值吻合较好。与未增强夹层结构的压缩强度相比, Z-pin 的植入提高了结构的压缩强度。分析表 3 数据可知: ①直径和 Z-pin 的植入角度相同时, 随 Z-pin 密度的增加, 夹层结构的压缩强度增加; 直径和 Z-pin 的密度相同时, 随 Z-pin 植入角度的增加, 夹层结构的压缩强度减小; Z-pin 的植入角度和密度相同时, 随直径的增大, 夹层结构的压缩强度增大。②工艺过程中 Z-pin 的残余拉应力使 X-cor 夹层结构的压缩强度增大, 残余应力的大小与 Z-pin 的体积分数、植入角度有关。在所研究的范围内, 直径和 Z-pin 的植入角度相同时, 随 Z-pin 密度的增大, 残余应力的增大; Z-pin 密度相同时, 随 Z-pin 体积分数的增大, 残余应力增大。

工艺过程中碳纤维 Z-pin 的残余拉应力与 X-cor 夹层结构的实测压缩强度相比不大, 但是它的存在确实能够使结构的压缩强度增大, 不可忽视。对于其他材料的 Z-pin, 其内部的残余应力也将影响 X-cor 夹层结构的压缩强度。对于 X-cor 夹层结构压缩强度的计算应该围绕增强体 Z-pin 的研究展开, 因为整个结构的强度由 Z-pin 控制。X-cor 夹层结构的固化工艺过程将决定 Z-pin 嵌

入面板的深度和 Z-pin 与面板的结合状况,这是对结构的压缩强度有关键影响的因素. 对于 X-cor 夹层结构在航天上的应用, Z-pin 嵌入面板的深度和面板约束状况相同的情况下,工艺过程中希望 Z-pin 承受一定的拉应力,从而增加结构的压缩强度,延缓 Z-pin 的失效.

4 结 论

1) 分析了固化工艺过程中 Z-pin 所受残余拉应力的产生机理,考虑残余应力的影响,提出一种 X-cor 夹层结构的压缩强度计算模型.

2) 碳纤维 Z-pin 受残余拉应力,使 X-cor 夹层结构的压缩强度增大. 残余拉应力随 Z-pin 直径、植入密度的增加而增加,随 Z-pin 植入角度的增加而减小.

3) 利用本文的计算模型,计算了 X-cor 夹层结构的压缩强度. 计算值与实验结果的对比分析表明,该计算模型能够较好的用于 X-cor 夹层结构压缩强度的预测.

参考文献:

- [1] 郭扬, 郭冰冰, 张巍. 整流罩用隔热材料的研制[J]. 宇航材料工艺, 2006, (增刊 I): 28-30.
GUO Yang, GUO Bingbing, ZHANG Wei. Study on heat-insulating material for helicopter engine dome[J]. Aerospace Materials and Technology, 2006, (Suppl I): 28-30. (in Chinese)
- [2] 张文军, 郭海松. 直升机整流罩结构的改进[J]. 机械工程师, 2005, (2): 97-98.
ZHANG Wenjun, GUO Haisong. Modification of helicopter engine dome[J]. Mechanical Engineer, 2005, (2): 97-98. (in Chinese)
- [3] Marasco A I, Cartie D D R, Partridge I K. Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: out-of-plane properties[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37: 295-302.
- [4] 郝继军, 张佐光, 张蕾, 等. Z-pin 植入参数对 X-cor 夹层复合材料力学性能的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 763-768.
HAO Jijun, ZHANG Zuoguang, ZHANG Lei, et al. Effects of Z-pin inserting parameters on X-cor sandwich mechanical property[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 763-768. (in Chinese)
- [5] Carsensen T C, Kunkel E, Magee C. X-cor advanced sandwich core material[C]//33rd International SAMPE Technical Conference. Seattle, WA, U. S. A.: Sikorsky Aircraft, 2001: 452-466.
- [6] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛, 等. X 状 Z-pin 增强泡沫夹层结构的剪切性能[J]. 复合材料学报, 2007, 24(6): 140-146.
DU Long, JIAO Guiqiong, HUANG Tao, et al. Shear properties of X-Z-pin reinforced foam core sandwich[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(6): 140-146. (in Chinese)
- [7] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛. X 状 Z 向碳 pin 增强泡沫夹层结构剪切刚度预报[J]. 固体力学学报, 2007, 28(4): 369-374.
DU Long, JIAO Guiqiong, HUANG Tao. Shear stiffness prediction of X-shape Z-pinned sandwich structures[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2007, 28(4): 369-374. (in Chinese)
- [8] Cartie 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.
- [9] 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.
DU Long. A study on mechanical properties of X-cor sandwich[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [10] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛. Z-pin 增强泡沫夹层结构面压缩性能研究[J]. 航空材料学报, 2008, 28(4): 101-106.
DU Long, JIAO Guiqiong, HUANG Tao. Through-thickness compression properties of Z-pin reinforced foam core sandwich[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(4): 101-106. (in Chinese)
- [11] 全国纤维增强塑料标准化委员会秘书处. 纤维增强塑料(玻璃钢)标准汇编[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [12] 铁摩辛柯 S P, 盖莱 J M. 弹性稳定理论[M]. 张福范, 译. 北京: 科学出版社, 1965: 100-104.