

X-Cor 夹层结构压缩强度有限元分析

党旭丹¹ 卫 萌² 张红松¹ 肖 军³

(1 河南工程学院机械工程系, 郑州 451191)

(2 郑州大学材料科学与工程学院, 郑州 450001)

(3 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

文 摘 利用有限元软件获得了 X-Cor 夹层结构的应力场, 并对其压缩强度进行分析。提出了适合于 X-Cor 夹层结构失效机理分析的失效判据和材料刚度退化规则, 明确其失效过程和模式。根据失效判据, 采用有限元模型中发生刚度退化的单元及其分布模拟失效的类型及扩展路径, 说明 X-Cor 夹层结构在压缩载荷下的失效机理。有限元研究表明: 压缩过程中, 树脂区首先失效, 其次是 Z-pin, 主要的失效模式是 Z-pin 屈曲失效, 失效单元的扩展路径有一定的分散性。通过有限元分析结果与试验值的比较, 数值吻合较好, 计算误差为 -7.6% ~ 9.5%。

关键词 X-Cor 夹层结构, 压缩强度, Z-pin, 有限元, 失效判据, 退化规则

Finite Element Analysis of X-Cor Sandwich's Compressive Strength

Dang Xudan¹ Wei Meng² Zhang Hongsong¹ Xiao Jun³

(1 Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191)

(2 School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

(3 College of Material Science and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The finite element software was used to get the X-Cor sandwich's stress fields and its compressive strength was also analysed. During the compressive strength analysis, the failure criterion and materials stiffness degradation rules fitting for the analysis of the X-Cor sandwich's failure mechanism were proposed and the X-Cor sandwich's failure process and modes were also clarified. According to the failure criterion we used the elements with stiffness degradation and their distributions in the finite element model to simulate the types and propagation path of the failure and the failure mechanisms of the X-Cor sandwich under compression were explained. The finite element analysis indicates that during the compression firstly the resin regions fail and secondly the Z-pins fail. The main failure mode is the Z-pin's elastic buckling failure and the propagation paths of the failure elements are dispersive. By contrasting the finite element results and experiments the values are consistent well and the error range is -7.6% to 9.5%.

Key words X-Cor sandwich, Compressive strength, Z-pin, Finite element, Failure criterion, Degradation rule

0 引言

夹层结构^[1-2]广泛应用于航空航天领域。2001年美国 Aztex 公司发明了一种新型芯子 X-Cor^[3]。X-Cor 夹层结构也可视为 Z-pin 增强技术在泡沫夹层结构上的应用^[4-5]。

Marsaco^[6]和 Partridge 等^[7]研究了 X-Cor 夹层结

构, 说明 X-Cor 夹层结构比刚度大于普通夹层结构, 但强度稍低; Cartie 等^[8]阐述了 Z-pin 和泡沫对其压缩性能的贡献。田旭等^[9-10]试制了 X-Cor 夹层结构, 并研究其成型工艺和力学基本性能; 杜龙等^[11-17]提出了 X-Cor 夹层结构剪切刚度、强度以及压缩强度的预报模型; 郝继军等^[18-21]研究了 Z-pin 的植入参数对

收稿日期: 2011-12-09; 修回日期: 2012-01-17

基金项目: 河南省教育厅 2011 年度自然科学研究计划项目 (2011B430003)

作者简介: 党旭丹, 1979 年出生, 博士, 讲师, 主要从事 X-Cor 夹层结构制备及性能分析。E-mail: dangxudan2009@haue.edu.cn

X-Cor 夹层结构压缩性能的影响。

目前已有一些文献对其强度和失效行为进行了研究,但这些模型都做了较大程度的简化,预测值相对偏低。本文利用有限元方法分析 X-Cor 夹层结构的压缩强度和失效机理,为实现其压缩强度的预测奠定基础。

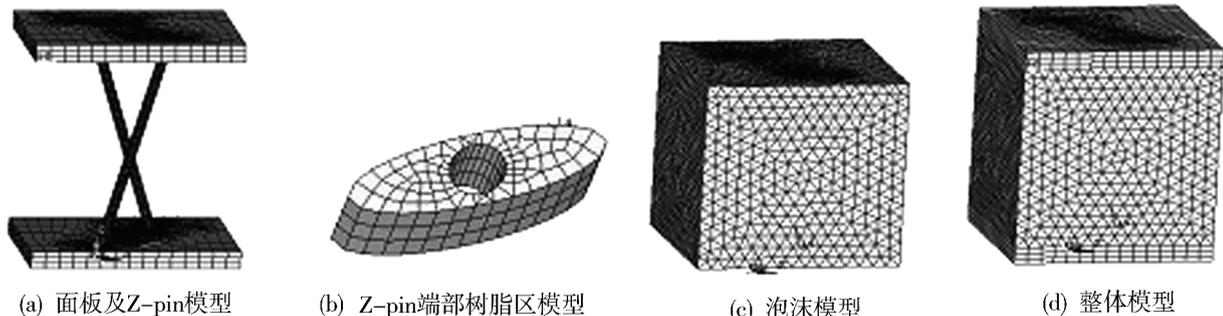


图1 X-Cor 夹层结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of X-Cor sandwich

Z-pin 和面板的拉伸强度可通过材料拉伸试验获得,其他基本强度参数由细观力学计算公式确定^[22-23](表1)。

表1 X-Cor 夹层结构有限元单胞模型各组分基本强度性能参数

Tab.1 Basic strength properties of each components of X-Cor sandwich finite element model

组分类别	X_t /MPa	X_c /MPa	Y_t /MPa	Y_c /MPa	S_{xy} /MPa	S_{yz} /MPa
碳纤维 Z-pin	1495	785	71	138	44.7	75
玻璃纤维 Z-pin	1707	610	71	118	72	80
碳纤维面板	700	650	700	650	100	75
玻璃纤维面板	213	213	213	213	80	80
树脂	71	71	71	71	33.2	33.2
泡沫	1.0	0.4	1.0	0.4	0.4	0.4

经有限元分析、计算可知,Z-pin 是主要承载组分,在等应变条件下,Z-pin 内部将产生远比树脂和泡沫大的应力。应力极值出现在 Z-pin 与树脂区的界面处,说明整个模型的薄弱环节是 Z-pin 与树脂区间的界面,Z-pin 与树脂区间存在着复杂的相互作用,试验中观察到的 Z-pin 端部的有限转动即证明了这一结论。

1.2 有限元分析流程

X-Cor 夹层结构压缩强度的分析流程见图2。试验中未观察到 X-Cor 夹层结构的面板和泡沫发生破坏,失效发生于 Z-pin 端部的树脂区和 Z-pin 部位,因此压缩强度的分析以树脂区和 Z-pin 为核心展开,采用分级失效的方式进行压缩强度分析。

在压缩载荷下,载荷通过面板经由树脂区传至 Z-pin,树脂区很难承受较大的载荷,首先发生失效。

1 有限元分析

1.1 有限元模型

X-Cor 夹层结构中,Z-pin 的嵌入造成面板纤维的弯曲,从而在 Z-pin 端部出现树脂区,这会对 X-Cor 夹层结构的力学性能产生较大影响。X-Cor 夹层结构的有限元模型如图1所示。

树脂区的失效导致面板对 Z-pin 的约束减弱,Z-pin 的端部出现有限转动,影响整个结构的压缩强度。当压缩载荷增至高于 Z-pin 的临界屈曲载荷时,Z-pin 将发生屈曲失效,导致 X-Cor 夹层结构的最终失效。因此,X-Cor 夹层结构中组分的失效顺序为树脂区—Z-pin。

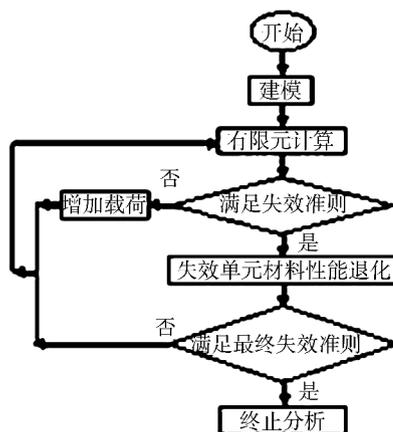


图2 X-Cor 夹层结构压缩强度分析流程图

Fig.2 Flow chart of the compressive strength analysis of X-Cor sandwich

1.3 强度判据及材料刚度退化规则

选用蔡-胡失效判据与其他失效判据组合,同时结合材料刚度退化规则分析压缩强度。材料刚度退化规则的假设前提是在有限元分析中,某个单元的失效仅仅对该单元的弹性性能有影响,而不影响其他单元的有效性。

压缩失效判据由三种判据组成,针对 Z-pin 的失效判据,一种是蔡-胡失效判据,判断单向复合材料 Z-pin 的失效,蔡-胡二阶张量多项式判据如下:

$$F_{ij} \cdot \sigma_i^e \cdot \sigma_j^e + F_i \cdot \sigma_i^e = 1 \quad (i, j = 1, 2, 6) \quad (1)$$

针对 Z-pin 失效的另一种判据是屈曲失效判据^[24],判据是:

$$\sigma_1^e / \left[\frac{4\pi \cdot E_p \cdot I_p}{(\mu l_p)^2 \cdot d^2} \cdot \left(m^2 + \frac{\beta \cdot l_p^4}{m^2 \cdot \pi^4 \cdot E_p \cdot I_p} \right) \right] \geq 1 \quad (2)$$

式中, σ_1^e 即为 Z-pin 单元在主方向的应力。在局部坐

$$\sigma_m^e = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1^i - \sigma_2^i)^2 + (\sigma_1^i - \sigma_3^i)^2 + (\sigma_3^i - \sigma_2^i)^2 + 6 [(\tau_{12}^i)^2 + (\tau_{23}^i)^2 + (\tau_{31}^i)^2] \}} \quad (3)$$

式中, σ_1^i, σ_2^i 和 σ_3^i 分别为第 i 个单元内的 3 个主应力分量, σ_m^e 为树脂区单元的 Von-Mises 应力。

根据以上失效判据,一旦有限元单胞模型中树脂区或 Z-pin 的某个单元失效,则通过折减该单元弹性常数的方法模拟该处的失效。文献[25]给出的弹性常数退化规则为退化至原常数的 1%,基于该材料刚度退化规则,本文提出了改进的材料刚度退化规则, Z-pin 及树脂区失效时的弹性常数退化系数见表 2。

表 2 材料刚度退化规则

Tab. 2 Materials stiffness degradation rules

失效种类	材料刚度退化规则
Z-pin 端部失效	$E'_{xx} = 0.06 \cdot E_{xx}, E'_{yy} = 0.06 \cdot E_{yy}, E'_{zz} = 0.06 \cdot E_{zz},$ $G'_{xy} = 0.06 \cdot G_{xy}, G'_{xz} = 0.06 \cdot G_{xz}, G'_{yz} = 0.06 \cdot G_{yz}$
Z-pin 屈曲失效	$E'_{xx} = 0.07 \cdot E_{xx}$
树脂区失效	$E'_{xx} = 0.0675 \cdot E_{xx}$

最终失效判据是指随应变增加,应力下降,则认为 X-Cor 夹层结构已达到其极限强度,结构失效,即终止分析。

1.4 压缩载荷下的失效机理

为分析泡沫和 Z-pin 破坏的顺序,提取试样破坏前 ($\varepsilon_z = 0.007$) 泡沫与 Z-pin(端部)上的应力数值,并将应力数值与其各自许用应力相比较,列于表 3,其中应力方向为与 Z-pin 的局部坐标系方向一致, σ_p 为 Z-pin 屈曲应力,此种破坏顺序与载荷大小无关。

表 3 压缩载荷下泡沫与 Z-pin 上应力与其各自许用应力的比较

Tab. 3 Contrast of Z-pin's practical stresses to its allowable stresses

应力方向	应力比值	泡沫/%	Z-pin/%
x	$\sigma_x / [\sigma_p]$	7.80	53.2
y	$\sigma_y / [\sigma_y]$	7.30	8.80
z	$\sigma_z / [\sigma_z]$	6.50	9.30
xy	$\tau_{xy} / [\tau_{xy}]$	5.50	23.7
yz	$\tau_{yz} / [\tau_{yz}]$	4.10	2.50
xz	$\tau_{xz} / [\tau_{xz}]$	6.10	27.9

由表 3 可知,随着载荷增加,Z-pin 先达到其许用应力值而发生破坏,因此模型的分析主要以 Z-pin 和宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期

标系下,Z-pin 单元的轴向应力达到其临界屈曲应力就判定该处单元失效。其中 μ 为约束修正系数, β 为地基系数。

针对树脂区的失效判据,采用 Von-Mises 失效判据判定,即

其端部的树脂区为主。

在压缩载荷下,Z-pin 端部的应力随载荷的增加而增大,应力集中逐渐严重,其端部单元的强度比越来越小,开始有单元发生失效。这部分失效的单元都位于 Z-pin 端部和树脂区的结合部位,说明 Z-pin 端部和树脂区的界面最先发生失效。失效的界面单元大致沿着平行和垂直于 Z-pin 中纤维方向逐渐增多(图 3)。

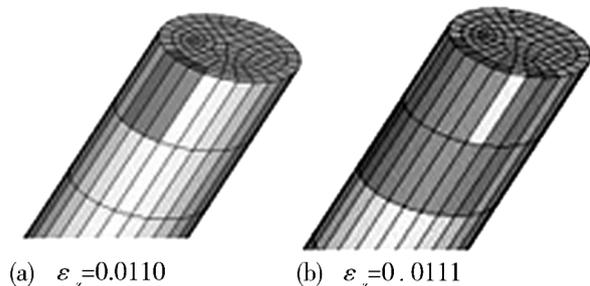


图 3 Z-pin 端部失效单元随应变增加的扩展

Fig. 3 Propagation of the Z-pin end's failure elements

Z-pin 端部的界面单元失效之后,结构整体力学性能有一定下降,但由于发生刚度退化的单元较少,所以整体复合材料的强度仍有增加的趋势。接着,树脂区单元达到其强度极限,开始失效,其失效从树脂区与 Z-pin 的界面开始,然后向远离界面部位扩展。树脂区单元失效的扩展见图 4。由图 4 可知,随树脂区单元失效的逐渐扩展,Z-pin 端部受到的约束减弱,结构整体性被破坏,X-Cor 夹层结构的力学性能受到较大的影响,刚度进一步下降。

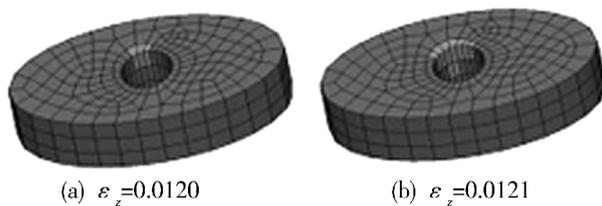


图 4 Z-pin 端部树脂区失效单元随应变增加扩展

Fig. 4 Propagation of resin region's failure elements

树脂区单元失效以后,虽然 Z-pin 端部受到的约束减弱,但由于 Z-pin 与面板保持接触,此时 Z-pin 仍能承担较大的载荷。因此,结构的强度仍然会增加,只是趋势变缓。随载荷的继续增加,Z-pin 轴向受到

的压应力不断增大,一旦超过 Z-pin 的屈曲临界应力,Z-pin 上将有单元发生刚度退化。随刚度退化单元的增多,Z-pin 将因屈曲而失去承载能力,导致整个结构失效,复合材料达到其极限强度。从 Z-pin 屈曲时的应力情况看,其轴向应力远没有达到其压缩强度,说明 Z-pin 此时是稳定性不足,而非强度不够。Z-pin 单元因屈曲失效的扩展情况见图 5,失效单元大致沿着其轴向扩展。

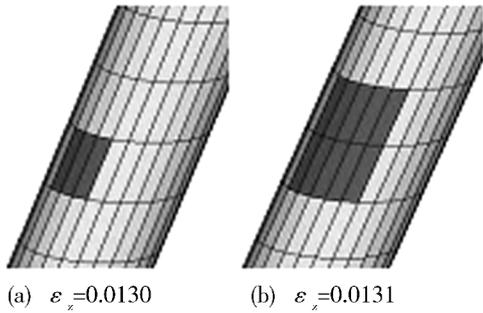


图 5 Z-pin 上屈曲失效单元随应变增加的扩展

Fig. 5 Propagation of Z-pin's buckling failure elements

通过以上分析,X-Cor 夹层结构的失效由 Z-pin 和树脂区间的界面开始,树脂区的失效为一级失效,Z-pin 的屈曲为二级失效,最终整个结构失效模式是 Z-pin 屈曲(图 6)。

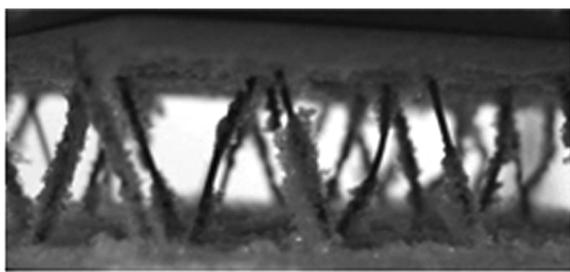
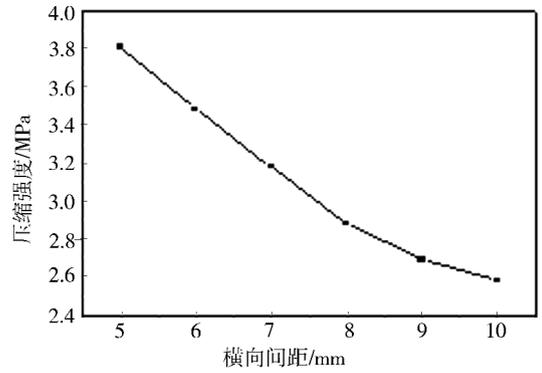


图 6 Z-pin 屈曲失效模式试验照片

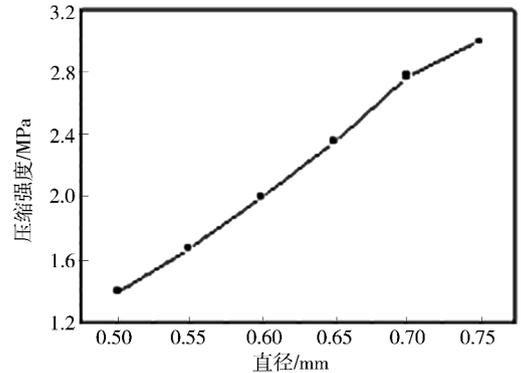
Fig. 6 Z-pin's buckling failure mode

1.5 结构参数对压缩强度的影响

Z-pin 植入角度、密度及直径对压缩强度的影响见图 7。由图 7 可知,X-Cor 夹层结构的压缩强度随植入角度的减小、密度及 Z-pin 直径的增加而增加,这与试验观察到的结果一致。



(b) 密度的影响



(c) Z-pin 直径的影响

图 7 Z-pin 植入角度、密度及直径对压缩强度的影响

Fig. 7 Effects of the Z-pin's angles, densities and diameters

2 压缩强度的理论研究和试验结果对比分析

表 4 列出了 CF-CF 型(碳纤维面板-碳纤维 Z-pin) X-Cor 夹层结构压缩强度的有限元预测值和试验值。有限元模型预测值的精度与载荷步的选择有关,载荷步越小,预测值与试验值越接近。

表 4 有限元预测结果与试验值的比较

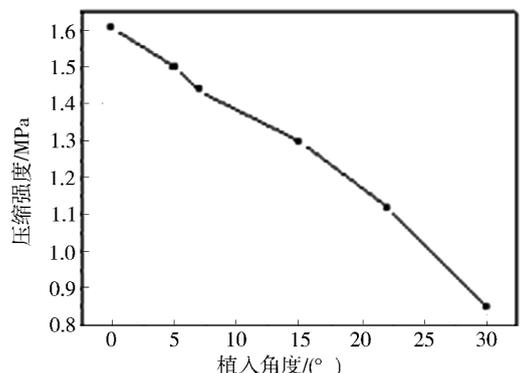
Tab. 4 Contrast of finite element predictions and test results

X-Cor 种类	间距/mm	直径/mm	角度/(°)	压缩强度/MPa		误差/%
				试验值	有限元	
CF-CF	5×10	0.5	30	0.92	0.85	-7.6
CF-CF	5×10	0.5	22	1.05	1.12	6.7
CF-CF	5×10	0.5	15	1.30	1.32	0.3
CF-CF	5×10	0.5	0	1.47	1.61	9.5

由 4 表可知,有限元分析结果与试验值吻合较好,证明了失效判据和材料刚度退化规则的有效性。表 4 中,植入角度为 0°的试样误差最大,其原因是与其他植入角度相比,Z-pin 植入角度为 0°的夹层结构试样的压缩性能对于角偏差缺陷更敏感,而缺陷的存在导致 Z-pin 不能发挥其优异的承力性能。对有限元分析结果,如果划分更为细致的单元则可在一定程度上进一步减小其与试验值间的误差。

3 结论

利用有限元分析,通过蔡-胡失效判据、屈曲失宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期



(a) 植入角度的影响

效判据、Von-Mises 失效判据和材料刚度退化规则的组合,对 X-Cor 夹层结构的压缩强度进行了分析。根据本文提出的强度判据,采用有限元模型中发生刚度退化的单元及其分布模拟失效的类型及扩展途径,说明 X-Cor 夹层结构在压缩载荷下的失效机理。有限元研究表明:压缩过程中,首先失效的是树脂区,其次是 Z-pin,主要的失效模式是 Z-pin 屈曲失效,失效单元的扩展路径有一定的分散性。通过有限元分析结果与试验值的比较,发现数值吻合较好,计算误差为 $-7.6\% \sim 9.5\%$ 。

参考文献

[1] 李顺林,王兴业. 复合材料结构设计基础[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,1993:120-121

[2] 李河清,赵景丽,张元明,等. 固化压力对夹层结构力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2002,30(6):16-18

[3] 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

[4] Freitas G, Fusco T, Campbell T, et al. Z-fiber™ technology and products for enhancing composite design [C] // Proceedings of the 83rd Meeting of the AGARD SMP Conference Florence, 1996:1-8

[5] Cartié D D R, Troulis M, Partridge I K. Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66:855-861

[6] Marasco A I, Cartié 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: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37:295-302

[7] Partridge I K, Cartié D D R, Bonnington T. Manufacture and performance of Z-pinned composites [M]. USA Florida Boca Raton: CRC Press, 2003:103-138

[8] 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

[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(3):22-25

[10] 李勇,肖军,谭永刚,等. X-Cor 夹层结构压缩性能研

究[J]. 航空学报, 2009, 30(3):557-561

[11] 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

[12] 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

[13] 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

[14] 杜龙, 矫桂琼, 王波, 等. Z-pin 增强泡沫夹层结构的弯曲性能 [C] // 杜善义, 第十五届全国复合材料学术会议论文集, 北京:国防工业出版社, 2008:713-717

[15] 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

[16] 黄涛, 矫桂琼, 杜龙. X-Cor 增强泡沫夹层结构力学性能试验[J]. 航空学报, 2008, 29(6):1542-1549

[17] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛, 等. Z-pin 增强对泡沫夹层结构弯曲和振动性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(6):741-745

[18] 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

[19] 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

[20] 张蕾, 张佐光, 郝继军, 等. Z-pin 植入参数对 X-Cor 夹层复合材料力学性能影响的实验研究 [C] // 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会 2007 年学术年会论文集, 深圳:2007:1-6

[21] 郝继军, 张佐光, 孙志杰, 等. X-Cor 泡沫夹层结构侧压性能实验研究 [C] // 杜善义. 第十五届全国复合材料学术会议论文集, 北京:国防工业出版社, 2008:516-520

[22] 吴德隆, 沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998:83-89

[23] Sun H Y, Qiao X. Prediction of the mechanical properties of three-dimensionally braided composites [J]. Composites Science and Technology, 2007, 57(6):623-629

[24] 党旭丹, 肖军, 谭永刚, 李勇, 原永虎. X-Cor 夹层结构压缩强度模型改进与实验验证[J]. 航空动力学报, 2009, 24(12):2802-2807

[25] Gummadi L N B. Analysis of Pin core sandwich plates [M]. Ohio: Advanced Structural Concepts Inc, 1997:309-379

(编辑 吴坚)