

X-cor 夹层结构拉伸模量有限元分析

Finite Element Computation of X-cor
Sandwich's Tensile Modulus

党旭丹¹, 卫 萌², 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)

DANG Xu-dan¹, WEI Meng², XIAO Jun³

(1 Department of Mechanical Engineering, Henan Institute of Engineering,

Zhengzhou 451191, China; 2 School of Materials Science and Engineering,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3 College of

Material Science & Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 通过分析 X-cor 夹层结构中 Z-pin 端部的微观结构, 提出 Z-pin 端部树脂区椭圆形态的基本假设并建立 X-cor 夹层结构拉伸模量的有限元模型, 利用大型有限元软件 ANSYS 对其拉伸模量进行了数值计算。研究了 Z-pin 植入角度、直径和密度的改变对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响。结果表明: X-cor 夹层结构的拉伸模量随 Z-pin 植入角度增加而减小, 随 Z-pin 直径和密度增加而增加。通过有限元模型的计算, 得到了 X-cor 夹层结构参数对其拉伸模量的影响规律, 数值计算结果误差范围是 $\pm 10\%$, 验证了所提的有限元模型的合理性, 说明该模型可用于预测其拉伸模量。

关键词: X-cor 夹层结构; Z-pin; 拉伸模量; 有限元

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)06-0080-06

Abstract: After analyzing photomicrographs of Z-pin ends' micro-structures in X-cor sandwich, the basic hypothesis that the resin regions around Z-pin ends are elliptic is proposed. The finite element model of X-cor sandwich's tensile modulus was established and the finite element software ANSYS was used in the computation of tensile modulus. The effects of Z-pin angle, diameter and density on the X-cor sandwich's tensile modulus were analyzed. The numerical analysis results indicate that as the Z-pin angle increases the X-cor sandwich's tensile modulus decreases, as the Z-pin diameter increases the X-cor sandwich's tensile modulus increases and as the Z-pin density increases the X-cor sandwich's tensile modulus also increases. Through the analysis of finite element model, the effect trends of X-cor sandwich' parameters to the tensile modulus are achieved and the error range is $\pm 10\%$. So the rationality of proposed finite element model is verified and the finite element model can be used to evaluate the X-cor sandwich's tensile modulus.

Key words: X-cor sandwich; Z-pin; tensile modulus; finite element

夹层结构因能增加结构刚度, 减轻结构质量, 能够充分发挥材料复合效应优越性, 同时具有良好的可设计性, 从而在航空航天工业广泛应用。2001 年美国 Aztex 公司发明了一种 X-cor 新型芯材, 它是将细长拉挤纤维针 (即 Z-pin) 按照一定角度植入泡沫基体中而形成的一种增强泡沫芯材^[1]。Z-pin 在泡沫基体中呈桁架结构, 其端部超出泡沫基体一小段并嵌入上下面板中就构成了 X-cor 夹层结构, X-cor 夹层

结构横截面如图 1 所示。



图 1 X-cor 夹层结构照片

Fig. 1 Photograph of a X-cor sandwich

自 X-cor 夹层结构提出以来,国内外学者对其进行了广泛的研究。在国外,Marsaco 等^[2]和 Danis^[3]研究了 X-cor 夹层结构的面外拉伸、剪切和压缩性能,说明其结构刚度大于普通夹层结构但强度稍低;Vaidya 等^[4,5]通过实验研究了该结构在冲击载荷下的力学性能,结果显示:X-cor 夹层结构的抗冲击性能优于蜂窝和纯泡沫夹层结构。国内对于 X-cor 夹层结构的研究始于 2003 年,田旭、党旭丹和肖军等^[6-8]开展了 X-cor 夹层结构成型工艺和基本力学性能研究;杜龙等^[9]结合空间网架结构和等效夹杂方法,研究了该结构的剪切性能,并提出了该结构的剪切刚度预测模型及剪切、抗压强度理论预测模型;郝继军等^[10]通过实验分析,指出增大 Z-pin 的植入角度、体积分数和半径能够增加 X-cor 夹层结构的平压性能。

在 X-cor 夹层结构中,Z-pin 的嵌入造成面板纤维弯曲,从而在其端部出现树脂区,导致端部的约束条件变得非常复杂。国内外学者目前对这一树脂区的研究较少,本研究旨在通过对 Z-pin 端部树脂区的显微镜观察,提出树脂区形态的基本假设,给出描述树脂区细观结构的参数方程。结合参数方程,提出 X-cor 夹层结构拉伸模量的有限元模型,并对其拉伸模量进行计算分析。

1 细观结构实验观察

X-cor 夹层结构制作完成后,分离面板与泡沫,留下 Z-pin 与面板的结合部位,利用扫描电子显微镜观察 Z-pin 端部细观结构,图 2 为 Z-pin 端部树脂区照片。

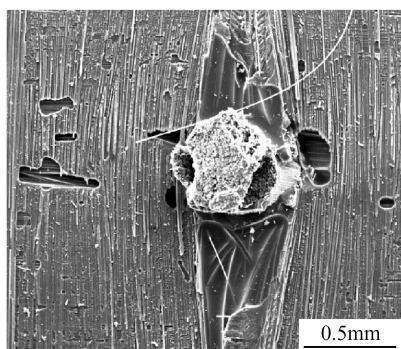


图 2 Z-pin 端部树脂区的显微镜照片

Fig. 2 Electron micrograph of Z-pin tip's resin region

由图 2 可见 Z-pin 嵌入面板中,面板纤维明显弯曲,Z-pin 端部的树脂区呈“眼睛”状,两端尖,中间宽。根据 Z-pin 端部树脂区的照片,得到树脂区的结构示意图,见图 3。为便于有限元建模,将“眼睛”状树脂区两端尖角由圆弧过渡替代,则树脂区的形状近似为椭圆形。

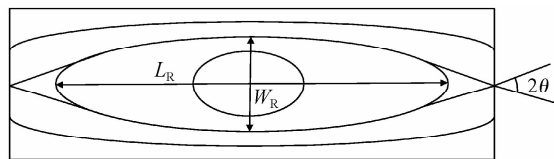


图 3 Z-pin 端部树脂区示意图

Fig. 3 Schematic of Z-pin tip's resin region

图 3 中参数 θ 为纤维偏离角度,即 Z-pin 植入造成的面板局部纤维相对其原方向的偏离角度, L_R 为椭圆形的长轴长度, W_R 为椭圆形的短轴长度。Z-pin 是否以一定角度嵌入面板对树脂区的影响较小^[11],因此,纤维偏离角度 θ ,椭圆长轴长度 L_R 和短轴长度 W_R 均与 Z-pin 直径呈线性关系,且纤维偏离角度 θ 和长轴长度 L_R 对 Z-pin 直径的依赖性较强,而短轴长度 W_R 对其直径的依赖性则较弱。利用上述规律,带入由本实验中显微镜照片得到的参数,可得与树脂区形态有关的三个方程:

$$\theta = 14.3d \quad (1)$$

$$L_R = 5.6d \quad (2)$$

$$W_R = 1.8d \quad (3)$$

2 单胞的几何分析模型

X-cor 夹层结构几何分析模型由四部分组成,分别是 Z-pin、树脂区、面板和泡沫,各组成部分几何关系见图 4。

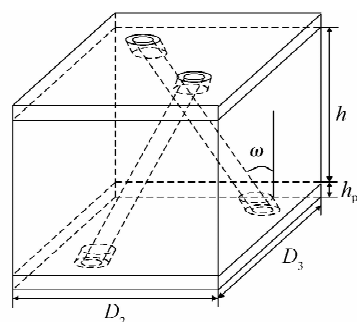


图 4 X-cor 夹层结构单胞几何分析模型

Fig. 4 Geometric analysis model of X-cor sandwich's unit cell

在图 4 中,直角坐标系的三个坐标轴分别对应几何模型的长度、宽度和厚度方向。其中 D_2 为模型的长度, D_3 为模型的宽度, h_p 为面板的厚度, h 为泡沫的厚度, ω 为 Z-pin 的植入角度。

根据对 Z-pin 及其端部树脂区几何形状的观察,在分析中对问题作如下假设:(1)Z-pin 的横截面为圆形,且沿 Z-pin 轴向纤维平直,几何形状不变;(2)Z-

pin 的端部贯穿面板,端部为平面;(3)“眼睛”状树脂区的两端为圆弧连接;(4)Z-pin 端部树脂区的材料分布均匀;(5)几何分析模型中所含 Z-pin 为完整的 Z-pin(未切断)。

根据 X-cor 夹层结构几何模型中各参数间的关系,Z-pin 的体积分数可利用下式计算:

$$V_p = \frac{n\pi d^2}{4D_2D_3\cos\omega} \times 100\% \tag{4}$$

其中 n 为单胞内 Z-pin 的数量。由此式可知,在只有一个参数改变的情况下,Z-pin 的体积分数随 n,d 的增加而增加;随 D_2,D_3 的增加而减小。

3 单胞的有限元模型

3.1 有限元模型

X-cor 夹层结构主要依靠大量的 Z-pin 与面板连接形成的三维网架结构承担载荷,见图 5。

利用 ANSYS 软件建立 X-cor 夹层结构的单胞模型并计算其力学性能,由于可以采用更精密的单元网格,因此有力地提高了运算速度和计算精度,同时还能

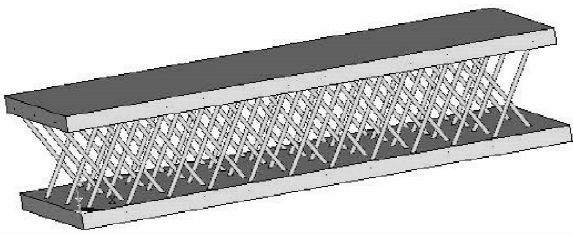


图 5 Z-pin 与面板组成的三维网架结构
Fig. 5 3D networks composed of Z-pin and face-sheets

够得到可视化的结果。

X-cor 夹层结构拉伸模量的有限元分析由 ANSYS 有限元分析/建模软件完成。利用 ANSYS 的参数化设计语言,可建立 X-cor 夹层结构的实体模型。研究采用三维八节点实体等参数单元 Solid45 对 X-cor 夹层结构的实体模型进行离散,该单元每个节点有 x,y,z 三个方向的自由度。为有效地逼近连续实体,对 Z-pin 与面板的连接部位划分较细密的网格以提高计算精度,模型其余部位网格尽量均匀。X-cor 夹层结构主要依靠大量的 Z-pin 与面板连接形成的三维网架结构承担载荷,有限元模型见图 6。

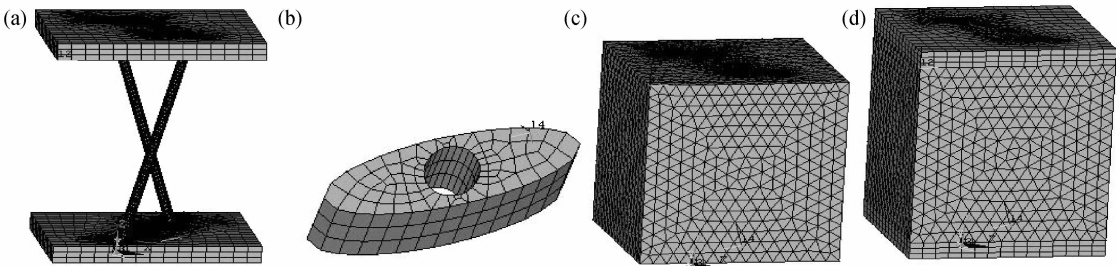


图 6 X-cor 夹层结构有限元模型
(a)面板及 Z-pin 模型;(b)树脂区模型;(c)泡沫模型;(d)整体模型

Fig. 6 Finite element model of X-cor sandwich

(a)model of face-sheet and Z-pin;(b)model of resin region;(c)model of foam;(d)model of X-cor sandwich

3.2 材料参数

由 X-cor 夹层结构可知,Z-pin 在整体坐标系下的材料属性随其植入角度的变化而变化,因此需对有限元模型中各个单元的材料属性分别进行定义。单胞有限元模型的组分中,面板和 Z-pin 均为各向异性材料,树脂区和泡沫为均质各向同性材料。在将材料属性赋予单元时,建立局部坐标系,将各向异性材料属性赋予相应面板和 Z-pin 单元,Z-pin 中纤维方向即为材料主方向。Z-pin 分别采用碳纤维和玻璃纤维两种材料制备,其弹性性能参数见表 1。

选择固化完成的复合材料面板,按照要求制备试样并进行玻璃纤维面板的拉伸实验。对碳纤维面板,铺层方式为对称正交铺设,其面内拉伸模量和剪切模

表 1 Z-pin 弹性性能参数
Table 1 Elastic properties of Z-pin

| Z-pin type | Tensile modulus/GPa | Shear modulus/GPa | Poisson's ratio |
|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------|
| Carbon fiber Z-pin | $E_x=132.61^*$ | $G_{xy}=3.49$ | $\nu_{xy}=0.26$ |
| | $E_y=8.78$ | $G_{xz}=3.49$ | $\nu_{xz}=0.26$ |
| | $E_z=8.78$ | $G_{yz}=3.03$ | $\nu_{yz}=0.34$ |
| Glass fiber Z-pin | $E_x=61.02^*$ | $G_{xy}=3.49$ | $\nu_{xy}=0.26$ |
| | $E_y=8.27^{**}$ | $G_{xz}=3.49$ | $\nu_{xz}=0.26$ |
| | $E_z=8.27^{**}$ | $G_{yz}=3.03$ | $\nu_{yz}=0.34$ |

Note:①*:data are from tests;②**:data are from literature^[12]; ③other data are from formula^[13]. In table 1, E_x,E_y,E_z are the Z-pin's tensile moduli in different directions respectively, G_{xy},G_{xz},G_{yz} and $\nu_{xy},\nu_{xz},\nu_{yz}$ are the Z-pin's shear moduli and Poisson's ratios in different planes respectively.

量可根据表 1 中碳纤维单向复合材料的基本弹性参数,利用下述公式计算得到。玻璃纤维面板由单层织物铺设制成,共测试了两种类型,一种是普通玻璃纤维面板,另一种是植入 Z-pin 后的面板。测试结果为:普通玻璃纤维面板的拉伸模量为 18.7GPa,植入 Z-pin 后面板的拉伸模量为 18.1GPa,其值略小。说明 Z-pin 的植入将损伤面板的纤维,使面板的面内弹性性能下降,但性能下降不明显,因 Z-pin 的植入而造成的面板性能下降为 3%。除拉伸模量外,玻璃纤维面板的其余弹性参数对 X-cor 夹层结构力学性能影响的波动较小。两种面板的弹性性能参数列于表 2,表中同时也给出了树脂及泡沫的基本弹性参数。

表 2 面板和其余组分弹性性能参数

| Table 2 Elastic properties of face-sheet and other parts | | | |
|--|------------------------|--------------------|-----------------|
| Face-sheet type | Tensile modulus/GPa | Shear modulus/GPa | Poisson's ratio |
| Carbon fiber face-sheet | $E_{face1}=70.69^{**}$ | $G_{12}=3.49^{**}$ | $\nu_{12}=0.26$ |
| | $E_{face2}=70.69^{**}$ | $G_{13}=3.49^{**}$ | $\nu_{13}=0.26$ |
| | $E_{face3}=8.78$ | $G_{23}=3.03$ | $\nu_{23}=0.34$ |
| Glass fiber face-sheet | $E_{face1}=18.12^*$ | $G_{12}=3.49$ | $\nu_{12}=0.26$ |
| | $E_{face2}=18.12^*$ | $G_{13}=3.49$ | $\nu_{13}=0.26$ |
| | $E_{face3}=8.27$ | $G_{23}=3.03$ | $\nu_{23}=0.34$ |
| Resin region | $E=4^{**}$ | | $\nu=0.3$ |
| Foam | $E=0.036$ | $G=0.013$ | $\nu=0.3$ |

Note:①*:data are from tests;②**:data are from literature^[14];③other data are from formula^[15]. In table 2, E_{face1} , E_{face2} , E_{face3} are the face-sheets' tensile moduli in different directions respectively, G_{12} , G_{13} , G_{23} and ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} are the face-sheets' shear moduli and Poisson's ratios in different planes respectively.

3.3 施加约束和载荷条件

计算 X-cor 夹层结构的拉伸模量,可在单胞模型上施加下述边界条件,模拟拉伸载荷使其发生拉伸变形,单胞有限元模型的拉伸变形示意图见图 7。

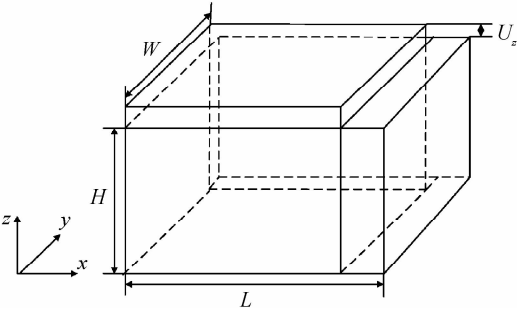


图 7 有限元模型拉伸变形示意图

Fig. 7 Tensile deformation schematic diagram

拉伸模量的求解采用位移加载的方式。求解 z 向(厚度方向)的拉伸模量,在 $z=H$ 的面上施加一非零

位移载荷 $U_z=\epsilon_z H$ 模拟一致性应变,施加应变为 1%,同时在 $z=0$ 的底面上约束节点 z 向位移。根据有限元模型周期性的特点以及防止模型发生扭转,分别在 $y=0, x=0$ 的面上约束其 y 向、 x 向位移,其余各面自由变形。

根据高斯定理,对矩形周期单胞,其平均应力可表示为相应表面上节点支反力之和与该面面积之比。因此,X-cor 夹层结构拉伸模量的计算方法为:

$$E_c = \frac{P_z}{\epsilon_z LW} = \frac{P_z H}{LW U_z} \tag{5}$$

式中: E_c 为拉伸模量; P_z 为相应约束面上所有节点在 z 方向上节点支反力之和; L 为有限元模型的长度; W 为模型宽度; H 为模型高度; ϵ_z 为施加应变; U_z 为所施加位移载荷。

4 结果与讨论

在拉伸载荷下,其他参数相同,Z-pin 植入角度对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响见图 8。

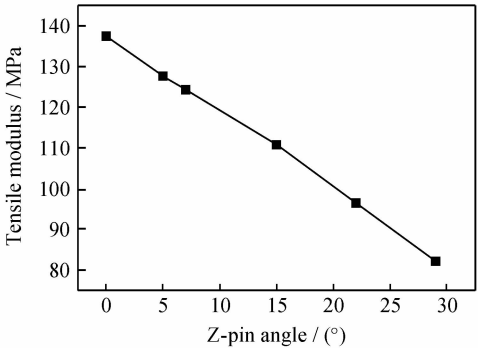


图 8 Z-pin 植入角度对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响

Fig. 8 Effects of Z-pin angle on X-cor sandwich's tensile modulus

由图 8 可知,在 Z-pin 植入角度范围 $0\sim30^\circ$ 内,X-cor 夹层结构的拉伸模量随植入角度的增加而减小,且模量下降较快。分析其原因,由于 Z-pin 为各向异性材料,随着植入角度变化,Z-pin 轴向与拉伸载荷方向的夹角发生改变,因此它对 X-cor 夹层结构弹性模量的贡献下降。目前使用的 Z-pin 植入角度一般都在 $0\sim30^\circ$ 内,可以预测, 0° 时 X-cor 夹层结构的拉伸模量最大, 30° 时则最小。由此可知,在对 X-cor 夹层结构进行结构设计时,若要结构有较高的拉伸模量,则应尽量减小 Z-pin 植入角度,以增加其对结构刚度的贡献。

在拉伸载荷下,其他参数相同,Z-pin 的直径对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响见图 9。

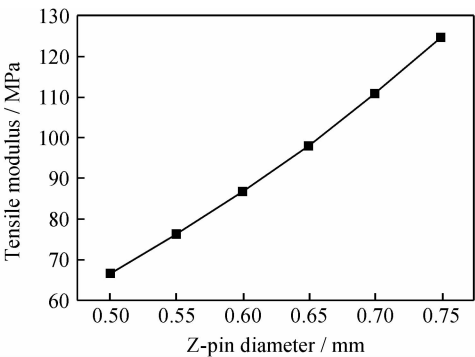


图 9 Z-pin 直径对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响
Fig. 9 Effects of Z-pin diameter on X-cor sandwich's tensile modulus

由图 9 可见,在 Z-pin 的直径范围 0.5~0.7mm 内,随着直径的增加 X-cor 夹层结构的拉伸模量也增加。由于 Z-pin 直径的增加使其承载能力增强,从而带来 X-cor 夹层结构拉伸模量的增加,但 Z-pin 直径过大,将对面板纤维造成较大损伤,从而影响面板对 Z-pin 端部的约束,不利于 Z-pin 增强作用的发挥;反之,Z-pin 直径过小,其增强效果就不明显,工艺上也较难实现。在对 X-cor 夹层结构进行力学性能设计时,若要结构具有较高的拉伸模量,则应尽量增加 Z-pin 的直径,提高 X-cor 夹层结构的承载能力。

在拉伸载荷下,其他参数相同,Z-pin 植入密度对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响见图 10。

由图 10 可知,在 Z-pin 密度范围 1~4Z-pin/cm² 内,随着密度的增加,X-cor 夹层结构的拉伸模量也增

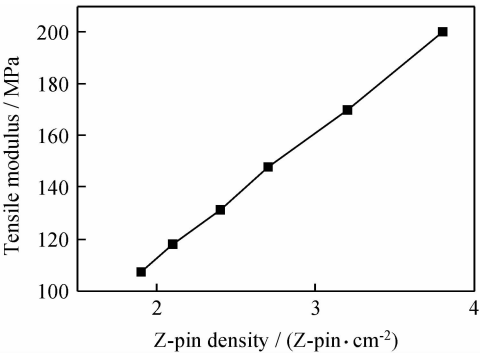


图 10 Z-pin 密度对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响
Fig. 10 Effects of Z-pin density on X-cor sandwich's tensile modulus

加。由于单位面积承载的 Z-pin 数量增加,使得 X-cor 夹层结构承载能力增强,故其拉伸模量也增加。但 Z-pin 植入密度过大,将使面板出现密集的纤维损伤,削弱面板对 Z-pin 端部的约束作用;Z-pin 植入密度过小,则难以体现其增强效果。因此,若要 X-cor 夹层结构有较高的拉伸模量,则应在一定范围内增加 Z-pin 的植入密度,提高其承载能力。

5 有限元计算值与实验结果对比

X-cor 夹层结构拉伸模量的有限元分析和测试结果的比较列于表 3。表中 X-cor 种类的含义为:第一组符号代表 Z-pin 的种类,第二组则代表面板的种类,CF (Carbon Fiber)、GF(Glass Fiber)则分别表示碳纤维制备和玻璃纤维制备。如:CF-CF 则为碳纤维 Z-pin 和碳纤维面板制备的 X-cor 夹层结构。

表 3 拉伸模量有限元计算值和测试结果比较
Table 3 Contrast of finite element computation results and test values

| X-cor type | Distance/ (mm×mm) | Diameter/ mm | Angle/ (°) | Tensile modulus test value/MPa | Tensile modulus computation value/MPa | Error/% |
|------------|----------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|--|---------|
| GF-GF | 5×10 | 0.7 | 22 | 77.4 | 82.2 | 6.2 |
| GF-GF | 5×10 | 0.7 | 30 | 76.8 | 78.9 | 2.7 |
| GF-GF | 5×10 | 0.7 | 15 | 79.9 | 83.4 | 4.4 |
| GF-GF | 5×10 | 0.7 | 0 | 80.2 | 87.0 | 8.5 |
| GF-GF | 5×5 | 0.7 | 22 | 96.0 | 89.6 | -6.7 |
| GF-GF | 5×5 | 0.5 | 15 | 75.6 | 78.2 | 3.4 |
| CF-GF | 5×10 | 0.5 | 22 | 68.5 | 73.6 | 7.4 |
| CF-GF | 5×5 | 0.5 | 22 | 97.5 | 91.6 | -6.1 |

由表 3 可见,X-cor 夹层结构有限元分析与实验结果误差均在±10%以内,在预测值可接受的范围之

内,在 Z-pin 的材料发生改变时仍能达到较小的误差值,说明有限元模型可在一定范围内对其拉伸模量进

行预测。

分析表中数据可知,玻璃纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 10\text{mm}$,直径 0.7mm ,角度 22° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量大于碳纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 10\text{mm}$,直径 0.5mm ,角度 22° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量,尽管此处碳纤维性能较强,但在较大植入角度下,Z-pin 对拉伸模量的增强有限,大直径 Z-pin 更占优势。玻璃纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$,直径 0.7mm ,角度 22° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量大于玻璃纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$,直径 0.5mm ,角度 15° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量,分析可知,植入角度减小,拉伸模量增加,但是直径减小,则使拉伸模量减小,两种因素共同作用,结果使拉伸模量减小,说明同样植入密度下,直径的改变对拉伸模量的影响更大。玻璃纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$,直径 0.5mm ,角度 15° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量小于碳纤维 Z-pin 植入间距 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$,直径 0.5mm ,角度 22° 的 X-cor 夹层结构的拉伸模量,尽管此处玻璃纤维 Z-pin 的植入角度较小,但碳纤维 Z-pin 的高模量优势在植入密度增大的情况下得以体现,因此碳纤维 Z-pin 增强泡沫夹层结构的拉伸模量反而较高。

6 结论

(1)基于 Z-pin 端部树脂区细观结构的显微分析,提出了 X-cor 夹层结构拉伸模量有限元计算模型。

(2)利用有限元模型的分析结果阐明了 Z-pin 的植入角度、植入间距和直径对 X-cor 夹层结构拉伸模量的影响:随着 Z-pin 植入角度和植入间距的增加,X-cor 夹层结构的拉伸模量减小;随着 Z-pin 直径的增加,X-cor 夹层结构的拉伸模量增加。

(3)通过实验验证,计算结果与实验结果吻合良好,表明所提出的有限元模型可较为准确的预测 X-cor 夹层结构的拉伸模量。

参考文献

[1] CARSTENSEN T, COURNOYER D, KUNKEL E, et al. X-corTM advanced sandwich core material X-cor advanced sandwich core material[A]. 33rd International SAMPE Technical Conference

- [C]. Seattle; SAMPE, 2001. 452—466.
- [2] MARASCO A I, CARTIE DENIS 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(2): 295—302.
- [3] CARTIE DENIS D, FLECK NORMAN 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.
- [4] VAIDYA U K, MAHFUZ H, JEELANI S. Damage tolerance of resin transfer molded composite sandwich constructions, AFRL-VA-WP-TR-1999-3053 [R]. Ohio: Tuskegee University Center for Advanced Materials, 1999.
- [5] VAIDYA U K, KAMATH M V, HOSUR M V, et al. Low-velocity impact response of cross-ply laminated sandwich composites with hollow and foam-filled Z-pin reinforced core[J]. Journal of Composites Technology and Research, 1999, 21(2): 84—97.
- [6] 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.
- [7] 党旭丹, 谭永刚, 肖军, 等. X-cor 夹层结构压缩模量有限元分析[J]. 材料工程, 2009, (1): 50—54.
- [8] 党旭丹, 肖军, 李勇. X-cor 夹层结构复合材料力学性能实验研究进展[J]. 材料工程, 2008, (6): 76—80.
- [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.
- [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.
- [11] MOURITZ A P. Review of z-pinned composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(12): 2383—2397.
- [12] 李顺林, 胡增强. 复合材料力学引论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1986. 14—19.
- [13] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 260—263.
- [14] 蔡为伦, 赫汤姆斯. 复合材料力学导论[M]. 于德昌, 译. 北京: 第三机械工业部科学技术情报研究所, 1980. 12—65.
- [15] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 106—107.

基金项目: 河南工程学院博士基金资助项目(D2010002)

收稿日期: 2011-01-21; 修订日期: 2011-12-20

作者简介: 党旭丹(1979—), 女, 博士, 讲师, 从事先进复合材料制备及性能方面研究, 联系地址: 河南省郑州市新郑龙湖中山北路1号 河南工程学院机械工程系(451191), E-mail: dangxudan2009@haue.edu.cn