复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 27 卷 第 5 期 10 月 2010 年
Vol. 27 No. 5 October 2010

文章编号：1000-3851(2010)05-0101-07

缝纫泡沫夹芯复合材料的刚度预测与试验验证

马元春[1,2]，韩海涛[1]，卢子兴*[1]，卢文书[2]
（1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191；2. 沈阳飞机设计研究所，沈阳 110035）

摘 要： 基于材料细观结构，建立了缝纫泡沫夹芯复合材料的刚度预测模型，并进行了刚度性能的相关试验验证。其中，对缝纫复合材料层合面板部分，考虑了缝纫角对单胞尺寸和富脂区大小的影响，以及缝纫前后层合面板厚度的变化对复合材料面板纤维体积含量的影响，采用改进的纤维弯曲模型计算了缝纫复合材料层合面板的刚度；对缝纫增强的泡沫夹芯部分，把缝线树脂柱看作是泡沫基体中的增强相，将其简化为特殊的单向增强复合材料，提出了用串并联组合模型来预测其刚度。试验测试了缝纫泡沫夹芯复合材料板试件的刚度。应用本文模型对缝纫层合面板和缝纫泡沫夹芯复合材料板的刚度进行预测，结果均与试验结果吻合较好。采用理论模型系统研究了缝纫参数和结构参数对缝纫泡沫夹芯复合材料刚度的影响。

关键词： 缝纫；夹芯结构；复合材料；泡沫夹芯；刚度
中图分类号： TB332；TB330.1 **文献标志码：** A

Theoretical prediction and experimental study of the stiffness of stitched foam-core sandwich composites

MA Yuanchun[1,2], HAN Haitao[1], LU Zixing*[1], LU Wenshu[2]
(1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: A stiffness prediction model was established for stitched foam-core sandwich composites based on the microstructure, and the equivalent stiffness was also achieved by experiments. Considering different sizes of representative volume element (RVE) and resin enriched zone caused by different stitching angles, a modified fiber waviness model was developed to evaluate the stiffness of stitching laminated face-panels, and the effect of thickness variation of the face panels after stitching was also included. The stitched foam core, stiffened by the resin cylinder, was simplified as a unidirectional composite, and its stiffness was estimated by a mixed series parallel model. Stiffness experiments of stitched foam-core sandwich composite panels were performed. The predicted equivalent moduli of the stitched face panel and the stitched foam-core sandwich panels show good agreement with the experimental data. The effects of stitching parameters and structural parameters on the stiffness were discussed.

Keywords: stitched; sandwich structures; composites; foam-core; stiffness

传统的泡沫夹芯复合材料结构在船舶、汽车、航空等领域有着广泛的应用，但其横向性能一般较差，尤其是面板与夹芯的界面强度较低，容易发生分层破坏。Adams 等人[1]提出了缝纫泡沫夹芯复合材料的新概念，并改进传统缝合技术，用韧性缝线在厚度方向将面板和夹芯缝合，然后采用 VARTM 工艺将低温固化树脂注入并固化，制成缝纫泡沫夹芯复合材料。已有研究表明，缝纫工艺显著地提高了夹芯复合材料结构的强度，尤其是厚度方向的强度和抗冲击能力[1-6]。因此，作为一种新的结构形式，缝纫泡沫夹芯复合材料有着广阔的工程应用前景。近年来，国内外对各种缝纫增强的复合材料研究较多，但多集中于缝纫复合材料层合板壳结构方面[7-8]，且对缝纫泡沫夹芯复合材料的工作多为试验研究和有限元计算[2-6]，相关的理论模型研究较少。其中，文献[9]将缝线等效为均匀泡沫基体中的圆柱状夹杂，采用 Mori-Tanaka (MT)方法预测了缝纫增强的泡沫夹芯的面内剪切模量。

收稿日期： 2009-10-12；**收修改稿日期：** 2010-01-04
基金项目： 国家自然科学基金(10932001)；北京市教育委员会共建项目建设计划(XK100060522)
通讯作者： 卢子兴，教授，研究方向为泡沫材料力学及复合材料结构强度 E-mail: luzixing@buaa.edu.cn

缝纫泡沫夹芯复合材料可以看作由上下两层缝纫增强面板和中间的缝纫增强的泡沫夹芯组成的三层准层状结构，分析时可以对面板和夹芯刚度分别进行计算。复合材料面板缝纫后，由于缝纫角度不同，会导致缝纫层合面板代表性体积单元(单胞)尺寸的变化，同时还会引起富脂区宽度的变化。此外，缝纫前后层合面板厚度增加，使得面板面内纤维体积含量减少，对面内性能的预测显得至关重要，而现有文献中对此考虑得较少[10]。缝纫增强的泡沫夹芯(以下简称缝纫泡沫夹芯)可以看作是由缝线树脂柱增强的泡沫结构，但由于缝线树脂柱在泡沫基体内并非均匀分布，且基体和增强相也并非简单的串联或并联关系，故传统的单向复合材料预测公式不再对其适用。因此，本文作者考虑了由缝纫角导致的富脂区大小的不同和缝纫前后层合面板厚度的变化情况，并采用改进的纤维弯曲模型计算了缝纫复合材料层合面板的刚度，预测值与文献中试验结果符合得很好；而对于缝纫泡沫夹芯，将其分成几个不同部分，提出了串并联组合模型，预测了其弹性刚度；在此基础上，计算了缝纫泡沫夹芯复合材料的整体刚度，得出了与本文试验一致的结果。

1　理论模型

1.1　缝纫层合面板的刚度预测模型

根据缝纫后层合面板的细观结构，选取合适的单胞模型，并采用适当的简化假设，建立数学模型来确定缝纫层合面板任意位置的材料属性，进而通过积分方法获得缝纫层合面板的刚度。

众所周知，缝纫会使得层合面板局部纤维发生弯曲变形，从而改变复合材料层合面板的细观结构。假设针孔为周期性分布，可选取如图 1 所示的缝纫层合面板单胞(RVE)模型[11]。文中按照材料分布的不同将面板单胞分成 4 个区域，即：缝纫面线组成的厚度增强区(Ⅳ区)；加压固化后在针孔内充入树脂形成的富脂区(Ⅲ区)；缝线和树脂的引入使得纤维体积含量及纤维方向发生变化而形成的纤维偏转区(Ⅱ区)；距离针孔较远区域的层合面板未发生变化，定义为未变形区(Ⅰ区)。缝纫层合面板单胞长度为 $2L$，宽度为 $2H$。富脂区宽度为 $2R$，变形区长度和宽度分别为 $2l$ 和 $2h$。根据针脚交错模型[12-13]，有

$$2L=(m\cos\theta+n|\sin\theta|) \tag{1}$$

$$2H=mn/(m\cos\theta+n|\sin\theta|) \tag{2}$$

$$R=r_s(1+|\sin\theta|) \tag{3}$$

其中：θ 为缝纫角；r_s 为缝线半径；m 为缝纫行距；n 为缝纫针距。可见，缝纫角不同，则缝纫层合板单胞尺寸和富脂区宽度也不相同。

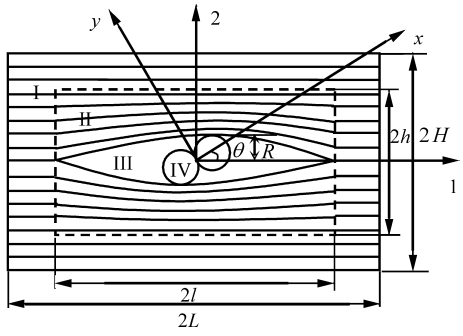

图 1　缝纫层合面板单胞

Fig. 1　RVE of stitching laminated face-panel

为了描述单胞模型内的纤维走向和体积含量分布，特做出如下简化假设[11]：(1) 因缝纫线的加入，在变形区内纤维发生弯曲变形，故假设纤维在变形区内用如下余弦函数来描述：

$$y'=a\cos\left(\frac{\pi x'}{l}\right)+b\ (0\leqslant x'\leqslant l,\ y_m\leqslant y'\leqslant w) \tag{4}$$

式中，a 和 b 为待定参数；x' 和 y' 为铺层坐标系下的坐标；y_m 为纤维偏转压的下界；w 为纤维偏转压的宽度。纤维偏转角在缝纫线边缘最大，随着离缝纫孔距离的增加而减小，到一定距离后偏转角为零。纤维最大偏转角由纤维种类决定，对碳纤维为 8.5°，对玻璃纤维为 20°[14]。(2) 缝纫线的引入使得变形区内纤维并非均匀分布，距离缝纫孔越远则纤维越稀疏，体积含量越小。在纤维偏转区和未变形区的边界处，纤维的体积含量与未变形区纤维的体积含量相同。因此，简单起见，假设纤维体积含量沿 2 轴线性变化。

根据以上假设，可以推导出变形区内任意点处纤维体积含量与纤维偏转角的显式表达式[11]。

由于在面内方向缝线与树脂弹性模量相近，且缝线半径相对很小，所以刚度预测时可以将缝线与富脂区作为一种材料处理。同时，不考虑不同铺层角时富脂区形状的变化，因此，缝纫层合面板单胞模型具有对称性，可取四分之一单胞进行计算。将其离散为 $\mathrm{d}x\times\mathrm{d}y$ 的微元体，在纤维偏转区和未变形区，微元体可以看作横观各向同性的复合材料单层板，而富脂区和缝线区的微元由单一材料组成。纤维偏转区的等效刚度可以采用刚度平均法[12-13]，通过下式积分得到

$$C_{\mathrm{II}}^{\mathrm{eq}}=\int_0^l\int_{y_{\mathrm{low}}}^h C_{\mathrm{II}}(x,y)\mathrm{d}y\mathrm{d}x/\int_0^l\int_{y_{\mathrm{low}}}^h \mathrm{d}y\mathrm{d}x \tag{5}$$

其中：$C_{\mathrm{II}}(x,y)$为纤维偏转区微元刚度矩阵，根据材料组分和性质由单向纤维增强复合材料细观力学方法得到；y_{low}为纤维偏转区的下边界方程。由刚度平均法，可得缝纫面板代表性体积单元的等效刚度矩阵为

$$C=C_{\mathrm{I}}^{\mathrm{eq}}v_{\mathrm{I}}+C_{\mathrm{II}}^{\mathrm{eq}}v_{\mathrm{II}}+C_{\mathrm{III}}^{\mathrm{eq}}v_{\mathrm{III}}+C_{\mathrm{IV}}^{\mathrm{eq}}v_{\mathrm{IV}} \tag{6}$$

其中，$C_{\mathrm{I}}^{\mathrm{eq}}$、$C_{\mathrm{II}}^{\mathrm{eq}}$、$C_{\mathrm{III}}^{\mathrm{eq}}$、$C_{\mathrm{IV}}^{\mathrm{eq}}$和$v_{\mathrm{I}}$、$v_{\mathrm{II}}$、$v_{\mathrm{III}}$、$v_{\mathrm{IV}}$分别为未变形区、纤维偏转区、富脂区及厚度增强区的等效刚度和体积分数。

缝纫后整体固化成型过程中因层合面板渗入树脂引起厚度的增加，但面板纤维总量不变，故面板纤维体积含量相应地减小，且层合面板厚度与纤维体积含量近似地满足反比关系。

1.2 缝纫泡沫夹芯的刚度预测模型

首先根据缝纫泡沫夹芯的组成结构确定单胞模型。缝纫泡沫夹芯结构整体固化后，针孔内的树脂与缝线贯穿泡沫夹芯，可以作为其中的增强体。对于厚度方向(z向)，假设垂直缝线轴向的平面在承受轴向载荷后仍为平面，即泡沫、树脂和缝线的轴向应变相等，此为并联关系。但对于缝线的横向(y向和x向)，由于缝线树脂柱在泡沫基体内并非均匀分布，而是集中于泡沫基体中心位置，各组分之间并非简单的串联或并联关系，因此传统的单向复合材料公式此时不再适用，故本文中提出了串并联组合模型。下面仅以缝纫泡沫夹芯面内x方向等效模量E_x^{c}为例给出其具体的推导过程。

将图2所示缝纫夹芯的单胞分成a～e几个不同区域，如图3(a)所示，其中a区为缝线树脂柱，其余区域均为泡沫。图3(b)中f为图3(a)中a、b和d三部分的等效区域。设各部分的体积和x方向弹性模量分别为V_i和E_i(i=a, b, …, f)，在x方向，有

$$E_{\mathrm{b}}=E_{\mathrm{c}}=E_{\mathrm{d}}=E_{\mathrm{e}}=E_{\mathrm{p}},\ E_{\mathrm{a}}=E_{\mathrm{m}} \tag{7}$$

其中，E_{p}和E_{m}分别为泡沫和缝线树脂柱的弹性模量(由于缝线横向弹性模量与树脂弹性模量相差不大，且缝线在缝线树脂柱中所占体积很小，因此取缝线树脂柱x向弹性模量近似为树脂弹性模量E_{m})。如图3(a)所示，假设a、b和d三部分在x向载荷作用下应力相等，则满足串联关系，有

$$\frac{V_{\mathrm{f}}}{E_{\mathrm{f}}}=\frac{V_{\mathrm{a}}}{E_{\mathrm{a}}}+\frac{V_{\mathrm{b}}}{E_{\mathrm{b}}}+\frac{V_{\mathrm{d}}}{E_{\mathrm{d}}} \tag{8}$$

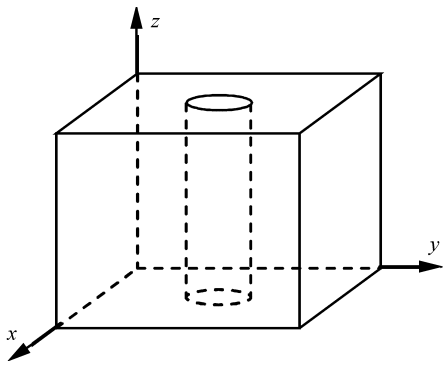

图2 缝纫泡沫夹芯单胞

Fig. 2 RVE of stitched foam-core

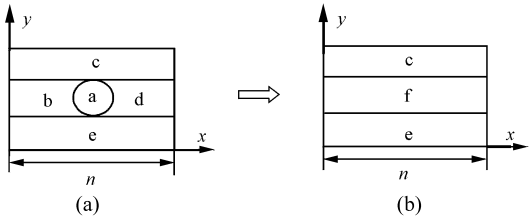

图3 串并联组合模型

Fig. 3 Mixed series parallel model

如图3(b)所示，假设c、e和f三部分具有相同的x向应变，则满足并联关系，有

$$E_x^{\mathrm{c}}(V_{\mathrm{c}}+V_{\mathrm{e}}+V_{\mathrm{f}})=E_{\mathrm{c}}V_{\mathrm{c}}+E_{\mathrm{e}}V_{\mathrm{e}}+E_{\mathrm{f}}V_{\mathrm{f}} \tag{9}$$

由式(7)～式(9)即可得到由串并联组合模型得到缝纫泡沫夹芯x向的等效模量E_x^{c}。其余弹性常数的推导过程类似，不再赘述，这里直接给出所有弹性常数的计算公式如下：

$$\begin{cases}
E_z^{\mathrm{c}}=E_{z\mathrm{m}}v_{\mathrm{m}}+E_{z\mathrm{p}}v_{\mathrm{p}},\\
E_x^{\mathrm{c}}=E_y^{\mathrm{c}}=\dfrac{E_{\mathrm{m}}E_{\mathrm{p}}v_1'}{E_{\mathrm{m}}v_2+E_{\mathrm{p}}v_1}+E_{\mathrm{p}}v_2',\\
G_{xy}^{\mathrm{c}}=G_{xz}^{\mathrm{c}}=G_{yz}^{\mathrm{c}}=\dfrac{G_{\mathrm{p}}(G_{\mathrm{m}}v_1+G_{\mathrm{p}}v_2)}{(G_{\mathrm{m}}v_1+G_{\mathrm{p}}v_2)v_2'+G_{\mathrm{p}}v_1'},\\
\nu_{zx}^{\mathrm{c}}=\nu_{zy}^{\mathrm{c}}=\dfrac{\nu_{\mathrm{m}}\nu_{\mathrm{p}}v_1'}{\nu_{\mathrm{m}}v_2+\nu_{\mathrm{p}}v_1}+\nu_{\mathrm{p}}v_2',\\
\nu_{yx}^{\mathrm{c}}=E_y^{\mathrm{c}}/(2G_{xy}^{\mathrm{c}})-1,\ \nu_{yz}^{\mathrm{c}}=\nu_{zy}^{\mathrm{c}}E_y^{\mathrm{c}}/E_z^{\mathrm{c}},\\
\nu_{xz}^{\mathrm{c}}=\nu_{zx}^{\mathrm{c}}E_x^{\mathrm{c}}/E_z^{\mathrm{c}},\ \nu_{xy}^{\mathrm{c}}=\nu_{yx}^{\mathrm{c}}E_y^{\mathrm{c}}/E_x^{\mathrm{c}}.
\end{cases} \tag{10}$$

其中各部分体积分数$v_1=V_{\mathrm{a}}/(V_{\mathrm{a}}+V_{\mathrm{b}}+V_{\mathrm{d}})$；$v_2=1-v_1$；$v_1'=V_{\mathrm{f}}/(V_{\mathrm{c}}+V_{\mathrm{e}}+V_{\mathrm{f}})$；$v_2'=1-v_1'$，如图3所示。式中：$v_{\mathrm{m}}$为树脂的体积分数；$v_{\mathrm{p}}$为泡沫的体积分数。

1.3 缝纫泡沫夹芯复合材料的刚度预测模型

基于所得到的缝纫层合面板和缝纫泡沫夹芯的刚度预测模型，并将缝纫泡沫夹芯复合材料看成是由1个缝纫泡沫夹芯和2个缝纫层合面板组成的三

层准层状结构，在面内方向采用等应变假设，在厚度方向采用等应力假设，即可得到由缝纫层合面板和缝纫泡沫夹芯组成的缝纫泡沫夹芯复合材料的等效刚度预测公式。

2 试　验

通过平压、侧压和三点弯曲试验，测试了缝纫泡沫夹芯复合材料板试件的刚度性能，以验证刚度预测模型的正确性。

试验件先缝合，然后经过 VARI 工艺成形。试验件上下面板为 T300(G0827)/BA9912 复合材料，铺层顺序均为$[45/-45/0/90/0/-45/45]_T$。缝纫前面板纤维体积含量为 57%，单层厚度为 0.155 mm，缝纫后单层厚度为 0.175 mm。泡沫芯基体材料为硬质聚甲基丙烯酰亚胺，且为闭孔泡沫 ROHACELL 51WF，厚度为 7 mm。缝纫线为 Kevlar 29，面线为 400 Denier，底线为 1500 Denier。采用改进锁式缝纫方式，且缝纫线面内为沿 0°铺层纤维方向，面外为垂直厚度方向，缝纫针距和行距均为 5 mm。试验在 CSS 44200 电子万能试验机上完成。

试验件分为平压、侧压和三点弯曲 3 组，每组 6 个试件。试验参照夹层结构性能试验国家标准 GB 1453－88、GB 1454－88 和 GB 1456－88 进行，由平压和侧压试验可以分别得到缝纫泡沫夹芯板试件厚度方向及面内方向的等效模量 E_z 和 E_x，由外伸梁三点弯曲试验可以得到试件等效剪切模量 G_{xz} 和抗弯刚度 EI。

3 结果与讨论

3.1 结果对比

为了验证本文模型的正确性，分别对缝纫层合面板和缝纫泡沫夹芯复合材料板试件的等效模量进行了理论预测，并分别与文献[12]及本文试验结果进行了对比。

采用本文模型对 3 种不同铺层形式的缝纫层合面板 x 向等效模量 E_x^f 进行预测，并与文献[12]中的试验结果对比，如表 1 所示。可见相对误差均在 7%以内，本文模型预测结果与试验值吻合得较好。

此外，分别采用本文模型和 MT 方法[9]计算缝纫后泡沫夹芯的等效模量，进而得到缝纫泡沫夹芯板试件的等效模量，并将缝纫泡沫夹芯板试件等效模量的预测结果与本文试验值的相对误差列于表 2 中。可见本文模型预测结果相对误差均在 10%以内，能更好地预测缝纫泡沫夹芯复合材料结构的刚度。

3.2 缝纫参数和结构参数对刚度性能的影响

已有试验研究表明，缝纫泡沫夹芯复合材料的刚度性能受针距、行距、夹芯厚度以及缝纫针孔半径等因素的影响较大，故本文中对此进行了系统的理论分析和讨论。

图 4 为缝纫泡沫夹芯复合材料相对模量或相对抗弯刚度随缝纫参数即针距 n 和行距 m 的变化趋势。其中，相对模量定义为缝纫泡沫夹芯复合材料等效模量与无缝纫泡沫夹芯复合材料等效模量的比值，相对抗弯刚度的定义类似。等效模量 E_x 和 E_z 对应的相对模量分别为 E_x^* 和 E_z^*，等效抗弯刚度 EI 对应的相对抗弯刚度为 EI^*。

表 1　缝纫层合面板等效模量 E_x^f 理论预测结果与试验结果[12]对比

Table 1　Comparison of equivalent modulus E_x^f between experimental results[12] and theoretical results of stitching laminated face-panel

Stacking sequence	Stitch angle/(°)	Experimental results/GPa	Present model/GPa	Relative error/%
$[45/0/-45/90]_{4S}$	0	46.7	49.9	6.8
	45	46.2	45.9	0.6
	90	46.1	47.9	3.9
$[0/45/0/-45/90/-45/0/45/0]_{2S}$	45	65.7	64.4	1.9
	90	65.3	65.0	0.5
$[90/45/90/-45/0/-45/90/45/90]_{2S}$	0	32.5	33.5	3.2
	45	33.5	30.8	8.2
	90	32.8	32.9	0.4

表 2 不同模型等效模量计算结果与本文试验结果对比

Table 2 Comparison of equivalent modulus of different methods with experimental results

Equivalent modulus	E_x	E_z	G_{xz}	EI
Relative error of MT method/%	3.44	3.87	16.1	6.33
Relative error of present model/%	3.38	0.81	9.54	6.38

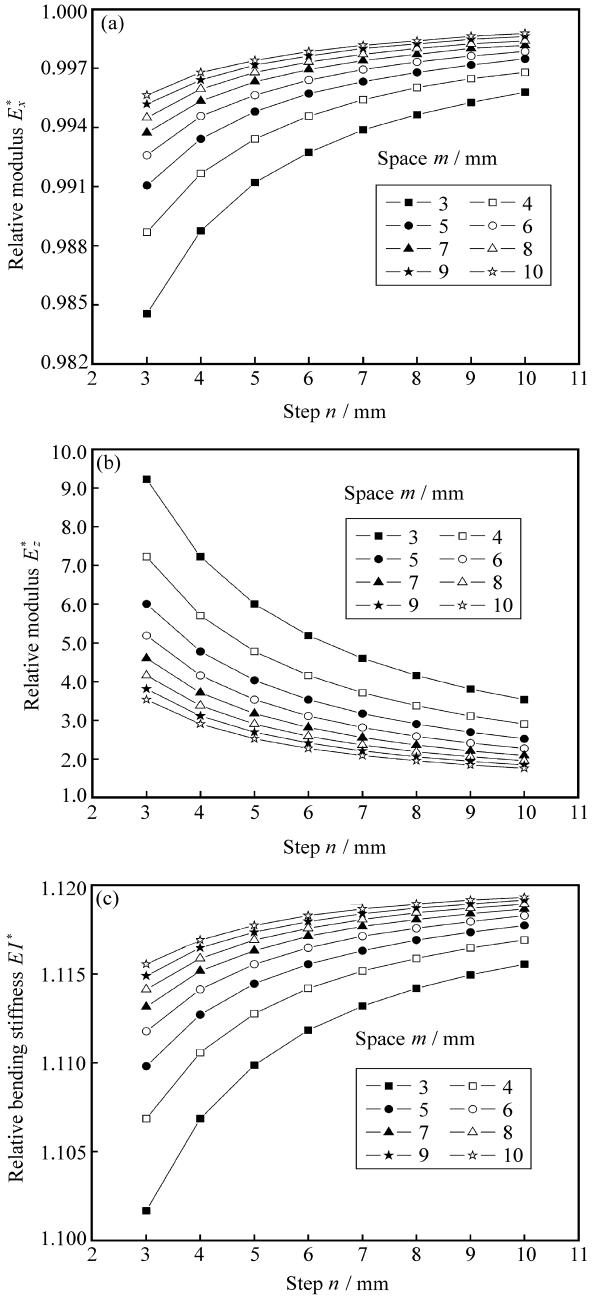

图 4 相对模量和相对抗弯刚度随缝纫参数的变化

Fig. 4 Relative modulus and relative bending stiffness vs stitching parameters (step n and space m)

图 4(a)为面内相对模量 E_x^* 的变化趋势。可见，由于缝纫后部分纤维发生偏折，且内部含有富脂区，x 方向相对模量 E_x^* 稍有下降。随着针距和行距的逐渐增大，单位面积内缝纫带来的损伤逐渐减小，x 方向的等效模量逐渐增大，且逐渐趋近于无缝纫泡沫夹芯复合材料 x 方向的等效模量。

图 4(b)为厚度方向相对模量 E_z^* 随针距 n 和行距 m 的变化趋势。可见，缝纫线和积聚在针孔附近的树脂明显地提高了泡沫芯厚度方向的刚度。但是，随着针距和行距逐渐增加，这种增强作用逐渐减小，即缝纫密度越低，这种增强作用越弱，且厚度方向等效模量逐渐趋近于无缝纫泡沫夹芯复合材料厚度方向的等效模量。

图 4(c)为相对抗弯刚度 EI^* 随针距 n 和行距 m 的变化趋势。可见，由于面板的面内刚度比夹芯刚度大很多，且夹芯厚度相对面板的厚度大得多，故弯曲载荷主要由面板来承担，所以缝纫泡沫夹芯复合材料相对抗弯刚度随缝纫针距和行距的变化趋势与面板面内相对模量的变化趋势相似，即：随缝纫密度降低，相对抗弯刚度逐渐增大。但是，由于缝纫以后面板的厚度有明显增加，所以缝纫泡沫夹芯复合材料的抗弯刚度稍大于无缝纫泡沫夹芯复合材料的抗弯刚度。

图 5 为缝纫泡沫夹芯复合材料等效模量和等效抗弯刚度的相对系数随结构参数即夹芯厚度和针孔半径的变化规律。相对系数定义为不同夹芯厚度时缝纫泡沫夹芯复合材料等效模量或等效抗弯刚度与夹芯厚度为 7 mm 时对应的等效模量或等效抗弯刚度的比值。等效模量 E_x、E_z 和 G_{xz} 的相对系数分别为 E_x'、E_z'和 G_{xz}'，等效抗弯刚度 EI 的相对系数为 EI'。

图 5(a)为相对系数随夹芯厚度的变化。由于夹芯刚度相对于面板面内刚度很小，因此，随夹芯厚度的增大，则垂直于 x 轴方向横截面单位面积承载能力逐渐下降，相对系数 E_x'逐渐减小。在厚度方向，增强后的泡沫夹芯刚度仍然远小于缝纫层合面板的刚度，因此，随夹芯厚度增加，比例增大，缝纫泡沫夹芯复合材料厚度方向等效模量及横向剪切模量的相对系数 E_z'和 G_{xz}'逐渐减小。值得注意的是，随夹芯厚度增加，缝纫泡沫夹芯复合材料的抗弯刚度显著提高。

图 5(b)为缝纫泡沫夹芯复合材料等效模量的相对系数随针孔半径的变化规律。可见，缝纫泡沫

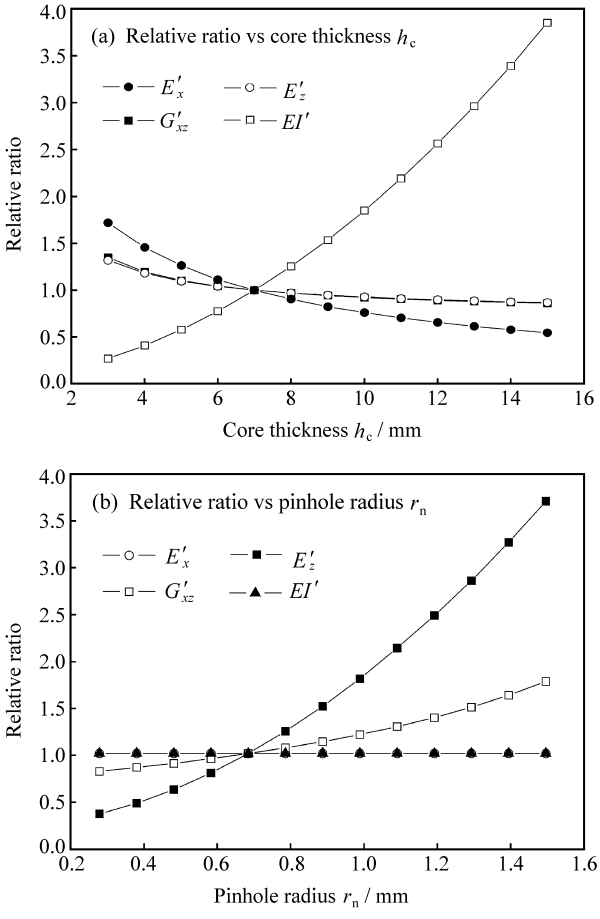

图 5　相对系数随夹芯厚度 h_c 和针孔半径 r_n 的变化

Fig. 5　Relative ratio vs structural parameters

夹芯复合材料的面内等效模量的相对系数 E'_x 基本不受针孔半径变化的影响，这是因为缝纫泡沫夹芯复合材料的面内性能主要取决于缝纫面板的性能，而影响缝纫面板富脂区大小的主要因素是缝纫线的粗细与缝纫角的大小，与针孔半径无关，因此相对系数 E'_x 基本不变。EI' 与 E'_x 的变化趋势相同，图 5(b) 中两曲线几乎完全重合。而对于厚度方向等效模量相对系数 E'_z，由于缝纫夹芯中针孔完全被树脂和缝线的混合体填满，对泡沫夹芯有明显的增强作用，且针孔半径越大，固化后缝纫泡沫夹芯中树脂所占比例越大，对厚度方向刚度性能增强效果也越好，因此，E'_z 和 G'_{xz} 均随针孔半径的增加而增大。

4　结　论

(1) 基于材料细观结构和力学理论，采用改进的纤维弯曲细观模型、串并联组合模型和平均刚度法，分别对缝纫复合材料面板和缝纫泡沫夹芯复合材料进行了刚度预测，由此建立了缝纫泡沫夹芯复合材料的刚度预测细观模型。

(2) 通过与文献以及本文试验的对比，证明了缝纫复合材料面板和缝纫泡沫夹芯复合材料刚度的理论预测模型与试验结果相当吻合，验证了本文模型的有效性。

参考文献：

[1] Adams D O, Stanley L E. Development and evaluation of stitched sandwich panels, NASA CR－211025 [R]. Washington: NASA, 2001: 1-166.

[2] Parampal S, Valeria L S. Experimental investigation on performance of angle－stitched sandwich structures, AIAA－2004－1705 [C] // 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. New York: AIAA, 2004: 1-14.

[3] Valeria L S, Shinjiro K. Evaluation of static compression properties of notched stitched sandwich structures, AIAA－2004－1704 [C] // 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. New York: AIAA, 2004: 1-9.

[4] Lascoup B, Aboura Z, Khellil K, et al. Stitching effect on static and dynamic behavior of sandwich structures [C] // 7th International Conference on Sandwich Structures: Advancing with Sandwich Structures and Materials. Aalborg: Springer Netherlands, 2005: 681-690.

[5] 郑锡涛，孙　秦，李　野，等. 全厚度缝合复合材料泡沫芯夹层结构力学性能研究与损伤容限评定 [J]. 复合材料学报，2006，23(6)：29-36.
Zheng Xitao, Sun Qin, Li Ye, et al. Mechanical behavior and damage tolerance tests of composite through-thickness stitched foam sandwich panels [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 29-36.

[6] 邓爱民，张佐光，李　敏，等. Z 向增强泡沫夹芯阻燃复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报，2007，24(5)：50-54.
Deng Aimin, Zhang Zuoguang, Li Min, et al. Mechanical properties of Z-direction reinforced foam core sandwich fire-resistant composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(5): 50-54.

[7] Mouritz A P, Leong K H, Herszberg I. A review of the effect of stitching on the in－plane mechanical properties of fibre－reinforced polymer composites [J]. Composites Part A, 1997, 28(12): 979-991.

[8] 于　芳，燕　瑛. 缝合复合材料弹性常数细观力学模型的分析比较 [J]. 宇航材料工艺，2007，37(1)：36-39.
Yu Fang, Yan Ying. Comparison of micro－mechanical model for elastic constants analysis of stitched composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(1): 36-39.

[9] 黄　涛，矫桂琼，李　野. 缝纫泡沫夹层结构芯子剪切模量研究 [J]. 机械强度，2007，29(1)：113-117.
Huang Tao, Jiao Guiqiong, Li Ye. Study on shear modulus of

stitched foam core sandwich [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 113-117.

[10] 陈 纲，郦正能，程小全，寇长河. 厚度对缝纫层合板力学性能的影响[J]. 复合材料学报，2005，22(6)：135-138.
Chen Gang, Li Zhengneng, Cheng Xiaoquan, Kou Changhe. Effect of thickness on the mechanical properties of the stitched laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 135-138.

[11] 魏玉卿. 缝纫复合材料细观结构表征及面内力学性能的理论和模拟[D]. 上海：上海大学，2007：15-24.

[12] 曾 东，燕 瑛. 基于几何非线性梁理论的缝合复合材料的弹性性能分析[J]. 复合材料学报，2005，22(增刊)：6-10.
Zeng Dong, Yan Ying. Studies on elastic property of stitched composites based on geometric nonlinearity beam theory [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(Supplement): 6-10.

[13] 桂良进，范子杰，陈宗渝，郦正能. 缝纫层合板的本构关系研究Ⅱ：缝纫单层板有效弹性常数分析[J]. 复合材料学报，2002，19(1)：95-100.
Gui Liangjin, Fan Zijie, Chen Zongyu, Li Zhengneng. Study on constitutive relationship of stitched laminates Ⅱ: Analytical and experimental study on stiffness of stitched laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(1): 95-100.

[14] Reeder J R. Stitching vs a toughened matrix: Compression strength effects [J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29(18): 2464-2487.

KEYWORDS FOR COMPOSITES

A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

(下转 121 页)