复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 28 卷 第 2 期 4 月 2011 年
Vol. 28 No. 2 April 2011

文章编号：1000-3851(2011)02-0235-07

复合材料 Z-pinning 工艺过程诱导的非均匀纤维分布

张俊乾*[1,2]，朱晓光[1,2]

(1. 上海大学 上海市力学在能源工程中的应用重点实验室，上海 200444；2. 上海大学 力学系，上海 200444)

摘 要： 通过建立二维有限元模型，研究了 Z-pinning 增强工艺过程中 Pin 针的嵌入对预成型件纤维变形区域的改变，定量表征了工艺引起的基体富集区的形状和大小，以及局部纤维方向变化和纤维含量非均匀分布的特征参数，得到纤维非均匀分布的规律。在此基础上，模拟了不同直径的 Pin 针对层合板面内微观结构的影响规律。结果表明：Pin 针直径的改变对基体富集区的影响较大；局部纤维偏转角和纤维体积含量随着 Pin 针直径的增大而增大，但其最大值变化不明显。

关键词： 复合材料层合板；Z-pin；纤维弯曲；有限元；富脂区

中图分类号： TB332；O34 **文献标志码：** A

Non-uniform fibre distribution in composites caused by Z-pinning process

ZHANG Junqian*[1,2], ZHU Xiaoguang[1,2]

(1. Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy and Environment Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Department of Mechanic, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Based on the 2D finite element model, changes of the fibre distortion region in the preform were investigated during the Z-pinning process. The shape and size of the resin zone were quantitatively characterized. Characteristic parameters of the fibre misalignment angle and the non-uniform distribution of local fibre content were made, and the rule of the fibre non-uniform distribution was obtained. On this basis, influence of the Pin diameter on the microstructure of the laminates was numerically analyzed. The results show that the Pin diameter has a great impact on the resin rich zone. The misalignment angle and fibre volume fraction increase with the Pin diameter, however, the maximum does not change significantly.

Keywords: composite laminates; Z-pin; fibre distortion; finite element; resin-rich zone

复合材料层合板的层间韧性较差，在低能量冲击下易产生层间分层，从而导致结构失效[1-3]。Z-pinning 技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一种提高复合材料层间力学性能的三维增强技术，可大幅度提高层合板的抗冲击阻抗和抗冲击韧性。Freitas[4]等通过实验测试，发现在层合板中引入少量的 Z-pin（体积分数低于 5%）能在保持 91%～98%的面内拉伸强度的条件下，使层间断裂韧性提高 18 倍，冲击分层减少 50%。

现阶段大部分研究都致力于 Z-pinned 复合材料力学性能的研究，对 Z-pinning 工艺过程中层合板面内细观结构变化的研究较少，只有 Chang[5]等人根据 Z-pinned 复合材料的实验照片，对面内纤维变形区长度和富脂区张开角等做了部分研究工作。目前，尚未发现对层合板面内任意点纤维的方向变化和纤维含量非均匀分布的研究。

本文中基于有限元法和周期性边界条件建立了二维有限元模型，提出了纤维变形的预测方法，详细探讨了不同直径的 Pin 针在工艺过程中对层合板面内纤维变形区域、局部纤维方向变化和纤维体积含量非均匀分布的影响。

1 Z-pinning 技术的工艺特点

Z-pinning 技术是在预浸件中直接嵌入固化好的纤维或金属短棒，然后再固化预浸件形成层合板。Pin 针的直径一般在 0.2～1 mm 之间，可以用

收到初稿日期： 2010-04-10；**收到修改稿日期：** 2010-08-15
基金项目： 国家自然科学基金（10772105）；上海市重点学科建设项目(S30106)
通讯作者： 张俊乾，教授，博士生导师，研究方向为材料力学、断裂与疲劳等 E-mail: jqzhang2@shu.edu.cn

金属(不锈钢、铝合金和钛合金等)或非金属(碳纤维、玻璃纤维和 Kevlar 纤维等)材料制作，体分比一般在 0.5%～4%之间[6]。由于 Pin 针的直径很小，为防止 Pin 针在嵌入过程中发生屈曲或折断，因此在嵌入时要采用泡沫支撑。

一般可采取两种方式向预浸件嵌入 Z-pin：多个排列有序的 Pin 针一次性整体嵌入；利用高压枪单个 Pin 针逐点嵌入[7-10]，其中前者较适用于平面结构且耗时少，后者则更有灵活性，并可用于曲面结构的加工。目前最常用的方法是利用超声波枪进行 UAZ(Ultrasonically Assisted Z-Fiber)工艺加工[11-12]。通过超声波枪的高频率，产生足够大的压力和热量，把预先排列在泡沫板中的 Pin 针压入预浸件中，具体加工过程如图 1。

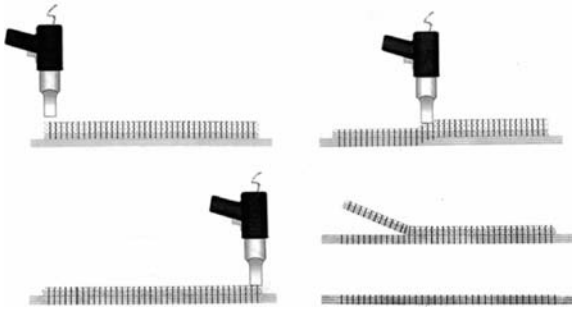


图 1　UAZ 工艺示意图[12]

Fig. 1　Schematic of the UAZ process[12]

在 Z-pinning 工艺过程中，由于 Pin 针的嵌入，迫使原来均匀分布的面内纤维发生局部变形，造成面内纤维弯曲且分布严重非均匀，出现了纤维变形区，在 Pin 针两侧形成树脂富集区，如图 2 所示。这些面内微观结构的改变是引起层合板面内力学性能变化的主要原因，因此系统的研究 Z-pinning 工艺过程中层合板面内微观结构的变化是研究层合板面内力学性能的基础。

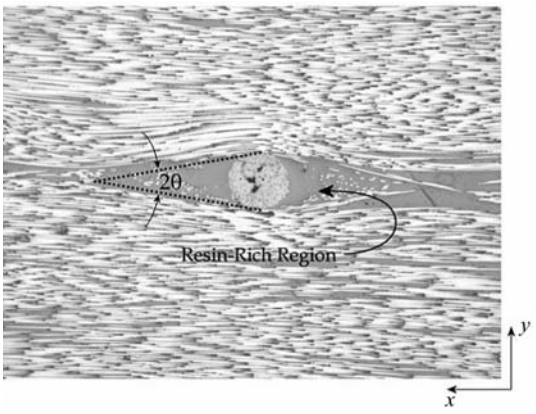


图 2　纤维变形区胞元[5]

Fig. 2　Unit cell of wavy fibres and resin-rich zone [5]

2　有限元模型的建立

假设在 Z-pinning 工艺之前，层合板面内的纤维是单向分布的，相互平行且均匀分布。本文中主要研究 Pin 针均匀且周期性地分布于层合板面内的情况，且 Pin 针的间距足够大，以至于可以忽略它们之间的相互干涉。因此，取包含单个 Pin 针的胞元进行研究，基于对称性，仅对胞元右下角 1/4 区域建立有限元模型。

建立如下坐标系：以胞元下边界中心为原点，x 轴平行于纤维方向，y 轴垂直纤维方向。用孔边接触弹性模型来模拟 Z-pinning 工艺过程中 Pin 针的嵌入，有限元模型如图 3 所示。

在二维模型中将纤维和基体简化为矩形，并假设纤维区域的等效宽度等于纤维直径，基体区域的等效宽度通过体积分数得到[13]：

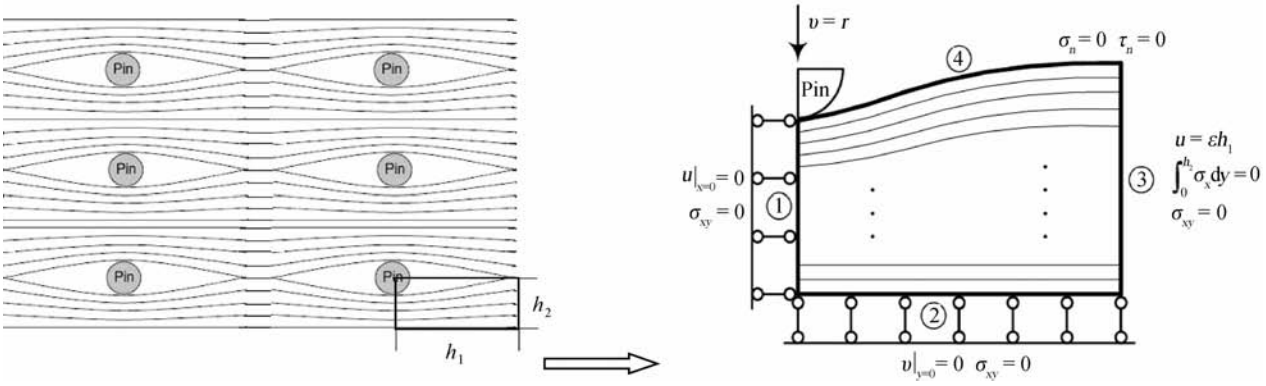


图 3　层合板面内 1/4 胞元的有限元模型

Fig. 3　Model of 1/4 unit cell of Z-pinned composite laminates

$$D^{\mathrm{f}}=2r,\ D^{\mathrm{m}}=\left[\frac{\pi(V_{\mathrm{m}}+V_{\mathrm{f}})}{4V_{\mathrm{f}}}-1\right]D^{\mathrm{f}} \tag{1}$$

式中：D^{f} 为纤维在模型中的等效宽度；r 为 Pin 针半径；D^{m} 为基体的等效宽度；V_{f} 为纤维体积含量；V_{m} 为基体体积含量。边界条件如下。

(1) 左边界为对称边界，其对称条件为

$$u\big|_{x=0}=0,\quad \sigma_{xy}=0 \tag{2}$$

(2) 下边界为对称边界，其对称条件为

$$v\big|_{y=0}=0,\quad \sigma_{xy}=0 \tag{3}$$

(3) 由于在 Z-pinning 工艺过程中复合材料为自由的、没有约束，且周期性条件要求右边界保持直线，因此，可得右边界的边界条件为

$$u=\varepsilon h_1,\quad \int_0^{h_2}\sigma_x\,\mathrm{d}y=0,\quad \sigma_{xy}=0 \tag{4}$$

式中，ε 为 Z-pinning 引起的轴向平均应变，是未知的。

(4) 由于半固化状态的基体的强度很低，忽略其对 Pin 针嵌入的阻碍效应，上边界为自由边界，其边界条件为

$$\sigma_n=0,\quad \tau_n=0 \tag{5}$$

Z-pinning 工艺过程中 Pin 针的嵌入，模型中用 Pin 针在 $-y$ 方向加载一个位移为 r(Pin 针的半径)的载荷来表示。假设纤维为横观各向同性材料、基体为各向同性材料，计算中需要的材料参数由表 1 给出。

表 1　有限元模型计算中需要的材料参数

Table 1　Basic material properties used in the finite element models

	Fibre(T300)	Matrix (Epoxy resin)	Pin (T300/9310)[14]
Axial modulus E_1/GPa	230	3.2	144
Transverse modulus E_2/GPa	13.8	3.2	7.31
Poisson radio ν	0.20	0.35	0.25
Shear modulus G_{12}/GPa	87.5	1.3	4.45

3　算例分析

取单向复合材料层合板的初始纤维体积含量为 40%，Pin 针直径为 0.51 mm 作为典型算例，模型 x 轴方向长度(h_1)为 3 mm，y 方向长度(h_2)为1.5 mm，面内共计 125 根纤维。具体分析 Pin 针在嵌入过程中对层合板面内纤维变形和非均匀分布影响的规律。

3.1　纤维轮廓图

Pin 针嵌入层合板，迫使纤维向两边移动，靠近 Pin 针的纤维，紧贴 Pin 针的表面弯曲，并通过挤压树脂，依次影响周边的纤维，造成局部纤维发生较大聚集，偏转角也发生极大改变。由于纤维聚集而形成的空洞则在固化压实阶段由树脂填充，形成树脂富集区。远离 Pin 针的纤维则变形较小，在变形区以外，纤维几乎不发生弯曲。本文中定义模型面内纤维从上到下为第 1 根纤维，第 2 根纤维，依次类推，直到模型底部的第 125 根纤维。通过有限元计算结果可得到 Z-pinned 复合材料层合板单元体面内纤维的轮廓示意图，如图 4 所示。

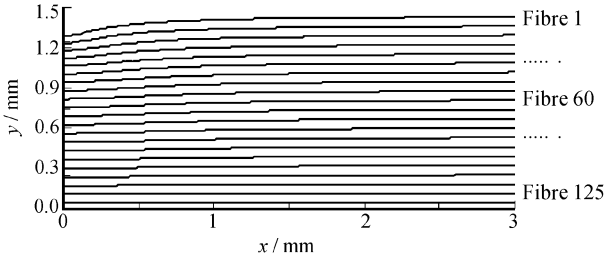


图 4　Z-pinning 工艺后面内纤维分布轮廓示意图

Fig. 4　Calculated fibre profile after Z-pinning

3.2　纤维偏转角

定义任意点纤维偏转角

$$\phi=\arctan(\mathrm{d}y/\mathrm{d}x) \tag{6}$$

通过对有限元计算结果的分析，得到层合板面内任意点纤维的偏转角，如图 5 所示。可知在纤维横向方向，靠近 Pin 针的纤维发生了较大的偏转，随着与 Pin 的距离增大，纤维重新趋于水平分布。在纤维的纵向方向上，纤维弯曲程度也随着与 Pin 针距离的增大而逐渐变小，并逐渐趋于未变形前的状态。

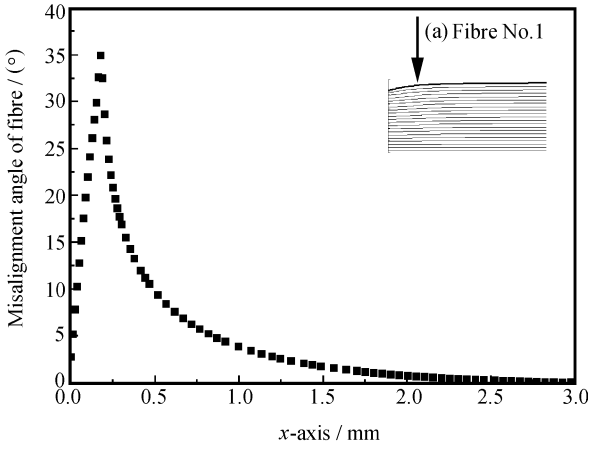
3.3　纤维体积含量

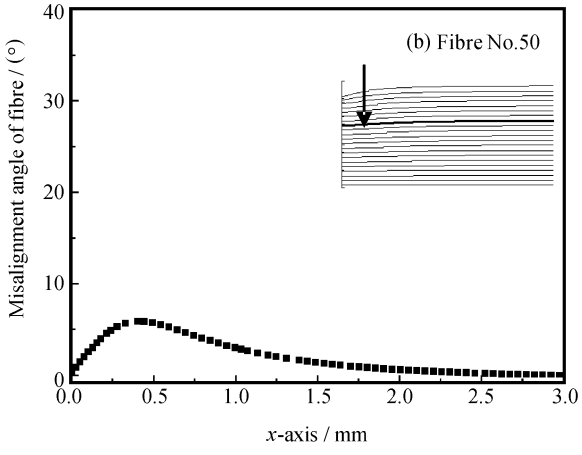
根据式(1)，Z-pinning 工艺后纤维体积分数可按下式计算：

$$V_{\mathrm{f}}=\frac{\pi D^{\mathrm{f}\prime}}{4(D^{\mathrm{f}\prime}+D^{\mathrm{m}\prime})} \tag{7}$$

式中：$D^{\mathrm{f}\prime}$ 为 Z-pinning 后的纤维等效宽度；$D^{\mathrm{m}\prime}$ 为 Z-pinning 后的基体等效宽度。

Z-pinning 工艺之前，面内纤维是均匀分布的，纤维体积含量为 40%。在 Z-pinning 工艺之后，由于纤维的弯曲、聚集和富脂区的形成，不同位置处的纤维体积含量发生明显改变，呈现非均匀分布，通过对模型计算结果的分析，可得到纤维体积含量示意图





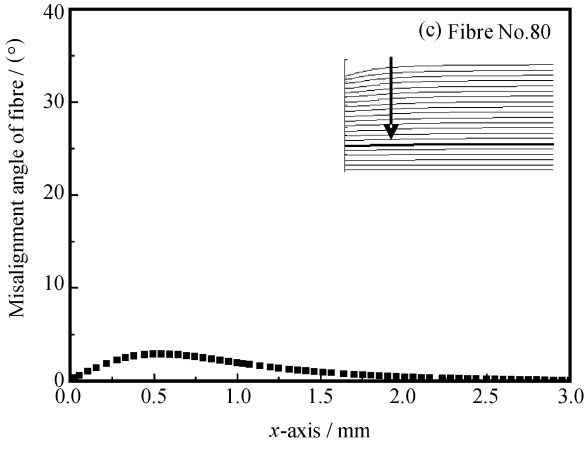
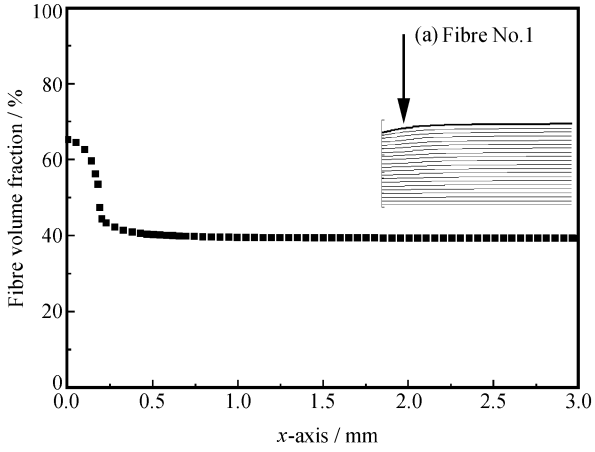
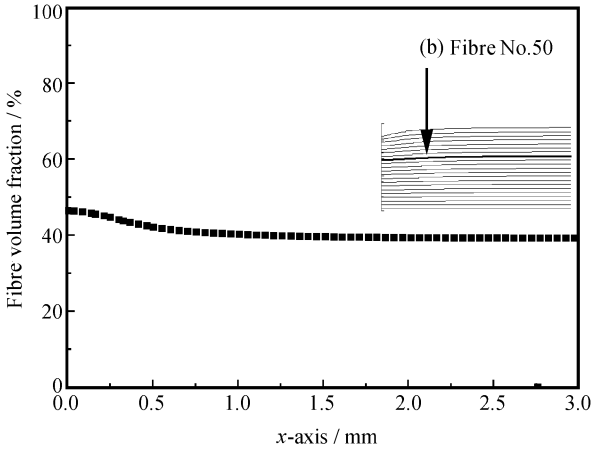


图 5　Z-pin 直径为 0.51 mm 时胞元面内不同位置纤维偏转角沿 x 轴分布图

Fig. 5　Misalignment angle of fibres varies along x-axis when Z-pin diameter is 0.51 mm





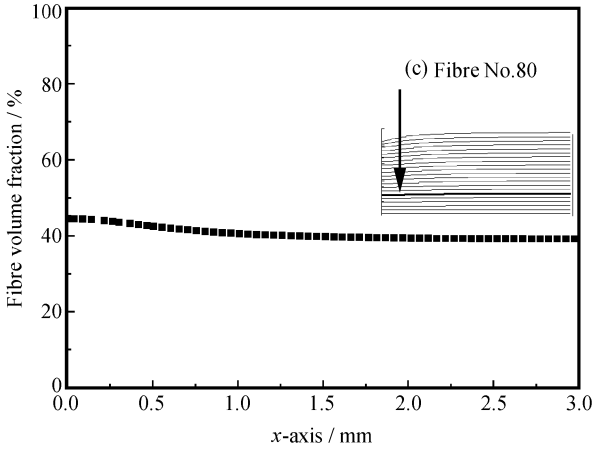


图 6　Z-pin 直径为 0.51 mm 时胞元面内不同位置纤维体积含量沿 x 轴分布图

Fig. 6　Volume fraction of fibres varies along x-axis when Z-pin diameter is 0.51 mm

(图 6)。在 Pin 针附近纤维最密集，纤维体积含量达到了 65.2%，无论是纤维的纵向方向还是横向方向，距离 Pin 针越近，纤维聚集程度越大，距离 Pin 针越远，聚集程度就越小，并逐渐趋于未变形前的分布状态。

3.4　Z-pin 间距对细观结构的影响

Z-pinning 工艺中，如果 Pin 针排列过于密集，层合板面内纤维变形就会产生相互干涉现象[6]。当 Pin 针直径为 0.51 mm 时，Pin 针嵌入所影响的区域范围接近 1.5 mm×1 mm，所以在算例中取模型 x 轴

方向长度(h_1)大于 1.5 mm，y 轴方向长度(h_2)大于 1 mm。

本文中取 3 组不同的 Z-pin 间距 1.8 mm×1.2 mm、2.3 mm×1.41 mm 和 3 mm×1.5 mm 进行分析比较，如图 7、图 8 所示，发现 2.3 mm×1.41 mm 和3 mm×1.5 mm 这两组 Z-pin 间距对面内微观结构的影响几乎一致，较小 Z-pin 间距(1.8 mm×1.2 mm)的最大纤维偏转角 ϕ 和纤维体积分数 V_f 比其他 2 组 Z-pin 间距的稍大。说明当Z-pin间距足够大时，它们对面内微观结构的影响是一致的。

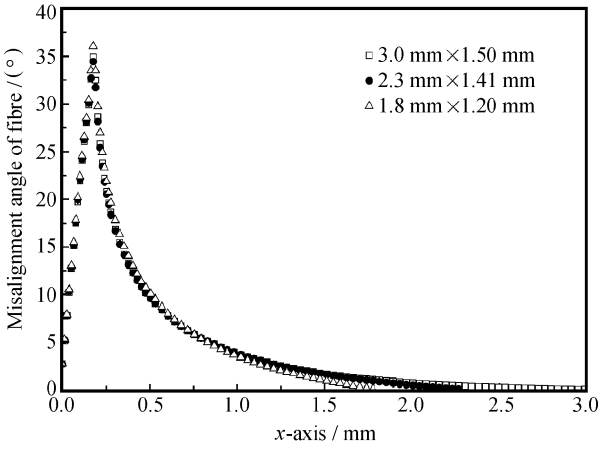


图 7　不同尺寸模型的第一根纤维偏转角沿 x 轴分布

Fig. 7　Misalignment angle of fibre 1 varies along x-axis when Z-pin diameter is 0.51 mm

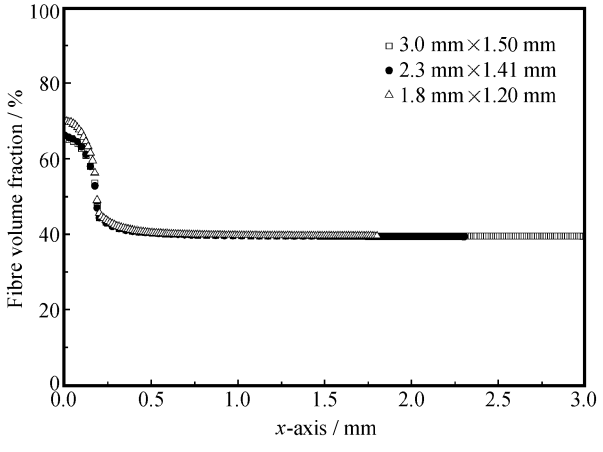


图 8　Z-pin 直径为 0.51 mm 时不同尺寸模型的第一根纤维体积含量沿 x 轴分布

Fig. 8　Volume fraction of fibre 1 varies along x-axis when Z-pin diameter is 0.51 mm

4　不同直径的 Z-pin 对细观结构的影响

本文中定量表征了直径为 0.02 mm、0.04 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.2 mm、0.28 mm、0.51 mm、0.69 mm、0.76 mm、0.94 mm 的 Pin 针在嵌入过程中对层合板面内细观结构变化的影响。不同直径的 Pin 针对应的模型尺寸分别为 0.5×0.3、0.8×0.5、1×0.6、1.5×0.78、1.8×0.9、2×1.02、3×1.5、3×2.1、3×2.4、4×2.97(单位是 mm)。

4.1　纤维变形区长度

纤维变形区长度在实验中较难确定，本文中参考其他文献对纤维变形区的研究，定义纤维偏转角 $\phi \geqslant 2°$的区域，即为纤维变形区。综合考察不同 Pin 针直径对变形区长度的影响，通过与 Mouritz[15] 的

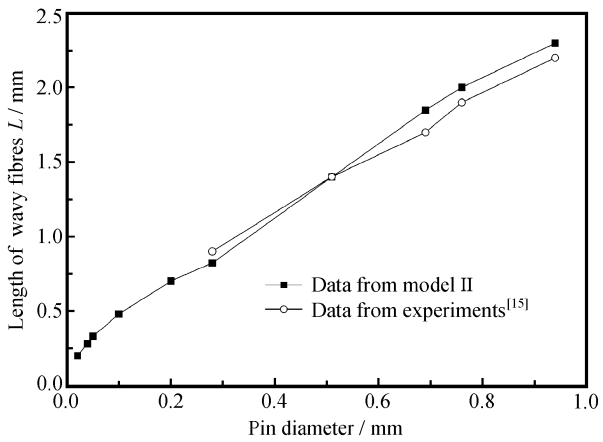


图 9　不同直径 Z-pin 引起的纤维变形区长度的有限元计算值和实验值的比较

Fig. 9　Influence of Z-pin diameter on the length of wavy region in a unidirectional carbon/epoxy composite

实验观测数据的比较，发现计算结果和实验数据吻合较好(如图 9)。可知随着直径的增大，变形区长度也会相应扩大，同时引起富脂区域的扩大。

4.2　富脂区张开角

本文中定义富脂区张开角

$$\theta = \arctan(R/L) \tag{8}$$

同样通过与 Mouritz[15] 的实验观测数据的比较，计算结果与实验数据也基本吻合(图 10)。可知随着 Z-pin 直径的增大，富脂区张开角也随着增大，但变化幅度比纤维变形区长度小，可见 Pin 针直径的变化对富脂区张开角的影响较弱。

4.3　任意点最大纤维偏转角

从有限元计算结果中可得到 Pin 针在任一直径下的任意点纤维的偏转角，这里仅列出不同直径对应的最大纤维偏转角如图 11 所示。

结果表明：当 Pin 针直径位于在 0～0.2 mm 之

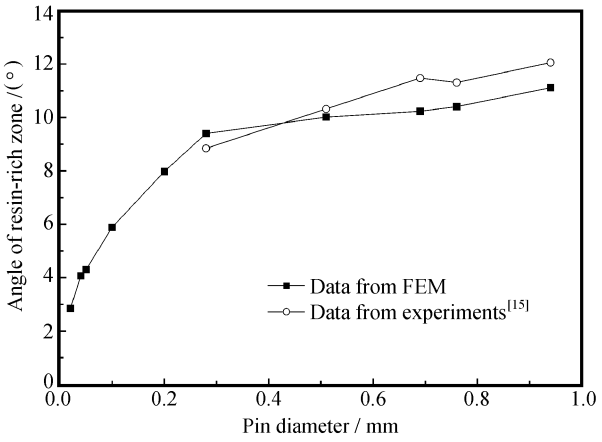


图 10　不同直径 Z-pin 引起的富脂区张开角的有限元计算值与实验值的比较

Fig. 10　Influence of Z-pin diameter on the angle of resin-rich zone in a unidirectional carbon/epoxy composite

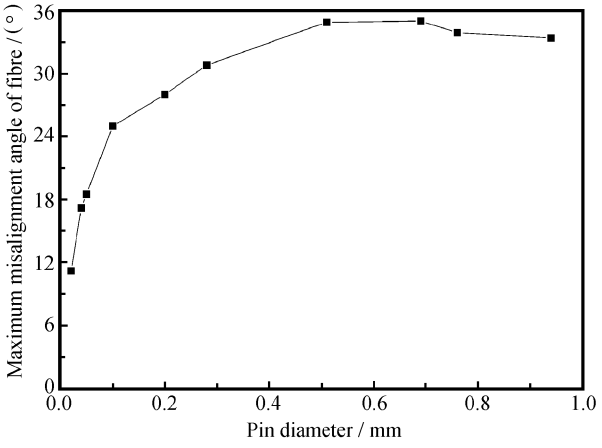


图 11　任意点最大纤维偏转角与 Pin 针直径的关系

Fig. 11　Influence of Z-pin diameter on the maximum misalignment angle of fibres

间时，Pin 针直径的增大，会引起任意点最大纤维偏转角的明显变化，但是当 Pin 针直径尺寸位于工艺常见使用范围内(0.2～1 mm)时，任意点最大纤维偏转角不会有很大变化。

4.4　最大纤维体积分数

Z-pinning 工艺之前，面内纤维均匀分布，取纤维体积含量为 40%。在 Z-pin 之后，靠近 Pin 针的纤维体积含量发生极大改变，而远离 Pin 针的纤维体积含量改变较小，在变形区以外，纤维几乎不发生偏转。不同直径下纤维体积含量的变化趋势都遵循相同规律。这里仅列出不同直径下对应的最大纤维体积分数的变化趋势，如图 12 所示。

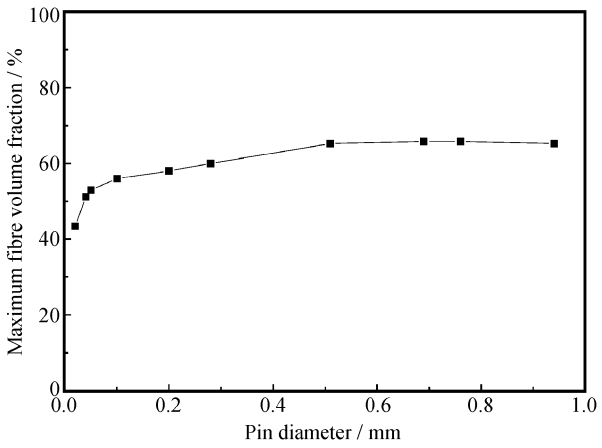


图 12　最大纤维体积含量与 pin 针直径的关系

Fig. 12　Influence of Z-pin diameter on the maximum of the fibre volume fraction

结果表明：当 Pin 针直径位于在 0～0.2 mm 之间时，Pin 针直径的增大，会引起最大纤维体积含量的明显变化，但是当 Pin 针直径尺寸位于工艺常见使用范围(0.2～1 mm)时，Pin 针直径的增加不会引起最大纤维体积分数的明显变化，基本稳定在一定范围内。

5　结　论

通过建立有限元模型模拟了 Z-pinning 工艺过程中 Pin 针的嵌入对局部纤维的偏转和纤维体积含量不均匀分布的影响，将计算结果与试验数据相比较，详细探讨了 Pin 针直径对层合板面内纤维弯曲和聚集的影响规律。

(1) 纤维变形区长度随着 Pin 针直径增大而增大，因此 Pin 针直径增大，由 Z-pinning 工艺而产生的富脂区的区域也随着增大。

(2) Pin 针直径对富脂区张开角的影响比对富脂区长度的影响要弱，随着 Pin 针直径的增加，富脂区张开角也随着增加，但变化不明显。

(3) 纤维偏转角最大的区域在 Pin 针附近，在工艺常见使用范围内(0.2～1 mm)，Pin 针直径的变化对任意点最大纤维偏转角的影响不明显。

(4) 纤维聚集程度最大的区域在 Pin 针附近，无论是纤维横向还是纵向方向上，距离 Pin 针越远，纤维体积含量改变越小；在工艺常见使用范围内(0.2～1 mm)，Pin 针直径的增加不会引起最大纤维体积含量的明显变化，基本稳定在一定范围内。

参考文献：

[1] 陈 纲，郦正能，程小全，等. 厚度对缝合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，et al. Effect of thickness on the mechanical properties of the stitched laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(6)：135-138.

[2] 陈 纲，郦正能，寇长河. T300帘子布/QY9512缝纫含孔板拉伸性能[J]. 复合材料学报，2005，22(4)：108-111.
Chen Gang，Li Zhengneng，Kou Changhe. Behavior of stitched uniweave T300/QY9512 laminates(with a hole) under in-plane tension[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2005，22(4)：108-111.

[3] 桂良进，范子杰，陈宗渝，等. 缝纫层合板的本构关系研究Ⅰ：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，et al. Study on constitutive relationship of stitched laminates Ⅰ：Analysis of effective elastic constants of stitched lamina[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2002，19(1)：95-100.

[4] Freitas G，Magee C，Dardzinski P. Fiber insertion process for improved damage tolerance in aircraft laminates[J]. Journal of Advanced Materials，1994，25(4)：36-43.

[5] Chang P. The mechanical properties and failure mechanisms of Z-pinned composites[D]. Melbourne：Royal Melbourne Institute of Technology，2006.

[6] Mouritz A P. Review of Z-pinned composite laminates[J]. Composite Part A：Applied Science and Manufacturing，2007，38(12)：2383-2397.

[7] Krasnov V I，Kuznetsov V A，Maksokov A Yu. Automated method of transverse reinforcement of composites by short fibres[J]. Mechanics of Composite Materials，1987，3：449-504.

[8] Huang S L，Richey R J，Deska E W. Cross-reinforcement in a GR/EP laminates[C]// Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers，Annual Winter Meeting. San Francisco，Calif，1978，12：10-15.

[9] Tomashevskii V T，Sitnikov S Y，Shalgin V N，Yakovlev V S. A method of calculating technological regimes of transversal reinforcement of composites with short-fibre microparticles[J]. Mechanics of Composite Materials，1989，25(3)：400-406.

[10] Tomashevskii V T，Shalgin S Y，Romanov D A，Sitnikov S Y. Transversal reinforcement of composite materials using ultrasonic vibrations[J]. Mechanics of Composite Materials，1988，23(6)：769-772.

[11] Boyce J S，Freitas G A，Magee C L，Fusco T M，Harris J J，Kunkle E. Ultrasonic fastening system and method：US Patent，5800672[P]. 1998-09-01.

[12] Frietas G，Magee C，Boyce J，Bott R. Service tough composite structures using Z-fibre process[C]// Proceedings of the 9th DOD/NASA/FAA conference on fibrous composites. Lake Tahoe，Nevada，1991.

[13] 曾 东，燕 瑛. 基于几何非线性梁理论的缝合复合材料弹性性能分析[C]//中国复合材料学术研讨会论文集. 2005.

[14] Grassi M，Zhang X，Meo M. Prediction of stiffness and stresses in Z-fiber reinforced composite laminates[J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，2002，33(16)：53-64.

[15] Mouritz A P. Compression properties of Z-pinned composite laminates[J]. Composites Science & Technology，2007，67：3110-3120.

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

C: ANALYSIS

analytical modelling
computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D: TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testing
optical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E: MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression moulding
consolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up(manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration(RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)