复 合 材 料 学 报 第 20 卷 第 2 期 4 月 2003 年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 2 April 2003

文章编号: 1000-3851(2003)02-0076-05

三维四步法圆型编织结构分析

陈 利, 李嘉禄, 李学明
(天津工业大学 复合材料研究所, 天津 300160)

摘 要: 三维编织中,编织纱线趋向于沿携纱器运动的方向运动。本文作者根据携纱器的运动规律,采用定义代表性控制域的方法,详细地研究了三维圆型编织中所形成的空间纱线交织结构。在此基础上,获得的预成型件结构单胞模型包含四种内部单胞和两种表面单胞。预成型件的整体结构可由六种单胞组装而成,且单胞的几何特性与其在预成型件横截面内所处的位置有关。单胞与预成型件具有相同的取向,有利于材料的力学性能分析。

关键词: 编织; 单胞; 纺织复合材料
中图分类号: TB332; TB330.1 **文献标识码:** A

ANALYSIS OF 4-STEP 3-D TUBULAR BRAIDING STRUCTURES

CHEN Li, LI Jialu, LI Xueming
(Composite Materials Research Institute, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: In the 3-D braiding procedure, the braiding yarn is tended to move along the direction of its carrier movement. Based on the movement of carriers, this paper presents a control region method to analyze the yarn traces systematically in 4-step 3-d tubular braided preforms. Then, four interior cells and two surface cells are established. For the whole structure of the preform, it can be assembled by these unit cells. The geometry of each cell is deeply dependent on its position in the cross-section of the preform. All cells are oriented in the same reference frame as the preform, which is quite suitable for the analysis of the mechanical properties.

Key words: braid; unit cell; textile composites

三维编织复合材料是近年来迅速发展的工程结构复合材料,具有整体性能好、力学结构合理、高的损伤容限和显著的抵抗裂纹扩展的能力,为复合材料应用于主承力结构件提供了广阔的前景。国内外对这种新型结构材料的研究首先集中于其纱线编织结构分析之上,并已取的了一些研究成果[1~5]。但多数的研究主要集中于三维方型编织,对于三维圆型编织的分析不多。三维四步法圆型编织已广泛地应用于制造各种管件、锥套体以及复杂曲面的中空构件等。圆型编织中编织纱线的排列方式不同于方型编织,所形成的纱线交织结构也有别于方型编织。因此,分析圆型编织结构,建立编织工艺参数之间的关系,对于三维四步法圆型编织复合材料的力学性能评价、结构优化设计具有重要意义。

本文作者主要讨论三维圆型编织中编织纱线的运动规律。在此基础上,得到了结构的单胞模型。

1 三维圆型编织过程

三维四步法圆型编织中,主体携纱器按周向和径向排成的主体纱阵,其中半径方向的携纱器数称为层数,用 m 表示,圆周方向的携纱器数称为列数,用 n 表示,n 需为偶数。附加携纱器间隔排列在主体纱的外围。如图 1 所示。每一携纱器上携带一根编织纱线。编织过程由行和列的四步间歇运动实现。第一步,相邻列的携纱器以相反的方向在径向移动一个携纱器的位置;第二步,相邻层的携纱器以相反的方向在周向移动一个携纱器的位置;第三步,各列携纱器的运动方向与第一步的相反;第四步,各层携纱

收稿日期: 2001-12-27; 收修改稿日期: 2002-04-23
基金项目: 天津市自然科学基金项目(013604411)
作者介绍: 陈 利(1968-),男,博士,副教授,主要从事纺织复合材料的研究。
通讯作者: 陈 利, E-mail: chenli@tjpu.edu.cn

器的运动方向与第二步的相反。经过四步运动, 完成一个机器循环。在一个机器循环中获得的预成型件长度定义为花节长度, 用 h 标识。重复上述编织步骤, 纱线将相互交织而形成一定长度的预成型件。

圆型编织预成型件可由主体纱的层数和列数定义。对于 m×n 圆型编织预成型件, 编织纱线的总根线为

$$N_t = m(n+1) \tag{1}$$

因此, 图 1 中所示的编织纱线总根数为 80。

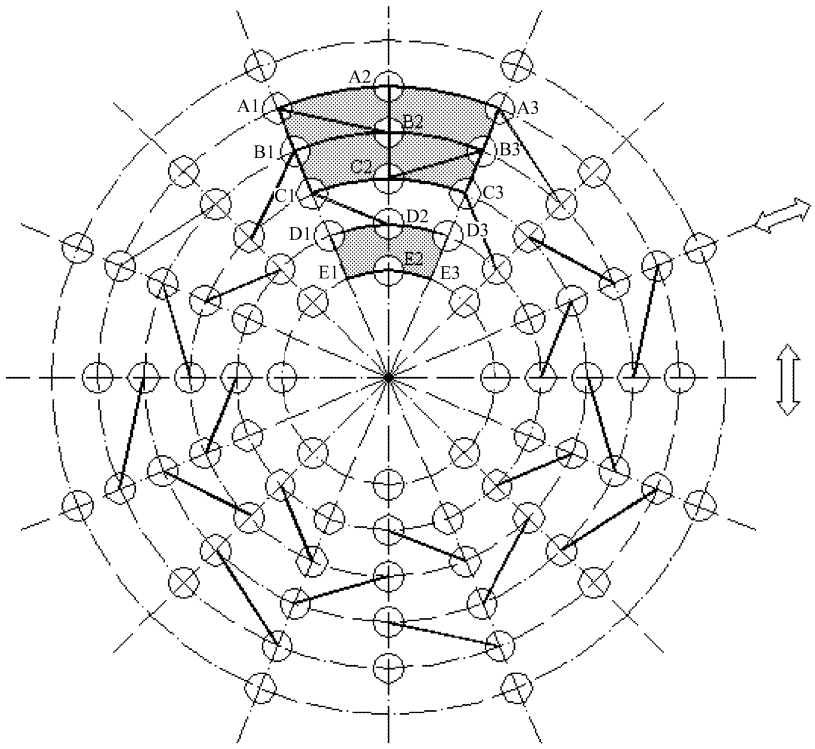


图 1　三维圆型编织中携纱器的运动规律

Fig. 1　Carrier movement in the 3D braiding procedure

2　携纱器的运动规律

在编织过程中, 机器每运动一步, 携纱器沿着径向或周向移动一个携纱器位置。图 1 描述了携纱器的运动规律。图中实线相连的携纱器在第二步运动后交换了各自的位置, 如携纱器 A1 和 B2。这种携纱器对偶交换使得编织纱线相互交织。此外, 由于每步运动相邻的列或层的运动方向相反, 使得携纱器的对偶交换具有重复性, 如图中携纱器 A1-B2 和 C1-D2。位于边纱层的携纱器的运动不同于主体纱阵中的携纱器, 边纱层的携纱器只有径向运动, 没有周向运动。

3　编织纱线的运动规律

根据携纱器的运动规律, 将圆形编织预成型件划分为内部和表面区域来研究其编织结构。根据携纱器对偶交换的特点, 分别定义两个区域的代表性控制域。

3.1　内部编织结构

内部区域的代表性控制域定义为图 1 中的 A1A3C3C1, 包括四个子域, 即 A1A2B2B1, A2A3B3B2, B1B2C2C1 和 B2B3C3C2。这四个子域可以叠合成整个内部区域。以子域 A1A2B2B1 为例, 讨论在连续编织过程中落入该域内的编织纱线交织情况。图 2 给出了连续编织过程中控制域 A1A2B2B1 内携纱器的运动情况。图中每一平面显示了每一步运动后携纱器的位置, 间距为编织花节的四分之一。平面间用细实线相连的携纱器为同一携纱器。由携纱器携带的编织纱线的运动轨迹为携纱器连续运动的趋势线, 即编织纱线的运动轨迹通过携纱器的相邻运动位置点连线的中点[5], 图中用粗实线表示。在一个机器循环中形成的编织结构如图 3(a) 所示, 定义为单胞 A。单胞的起始位置比携纱器的初始位置沿编织方向下移 1/8 花节长度, 横截面为一扇面形, 高为一个花节长度。单胞中含有四种走向的编织纱线。编织纱线与编织轴向的夹角定义为内部编织角 V。

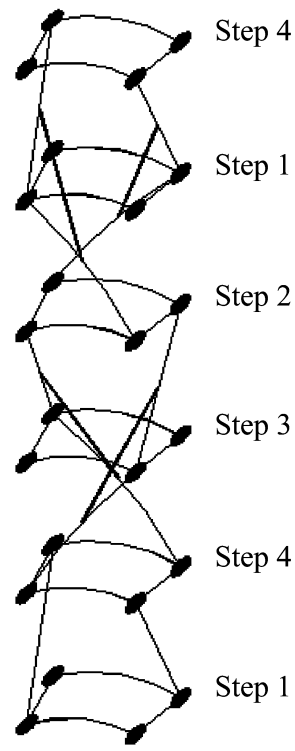


图 2　控制域 A1A2B2B1 中编织纱线的运动轨迹

Fig. 2　Yarn trace in the control region A1A2B2B1

同理, 可以获得其它三个子域的单胞模型, 如图 3 所示。子域 A2A3B3B2, B1B2C2C1 和 B2B3C3C2 中单胞模型分别定义为单胞 B, 单胞 C 和单胞 D。四个内部单胞具有各自不同的编织结构, 但每个单胞中编织纱线的走向是相似的。

由于单胞的选取方式不同, 所得内部单胞模型不同于文献[2]和[3]给出的单胞模型。文献[2]和文献[3]的内部单胞模型是相同的, 单胞的横截面与预

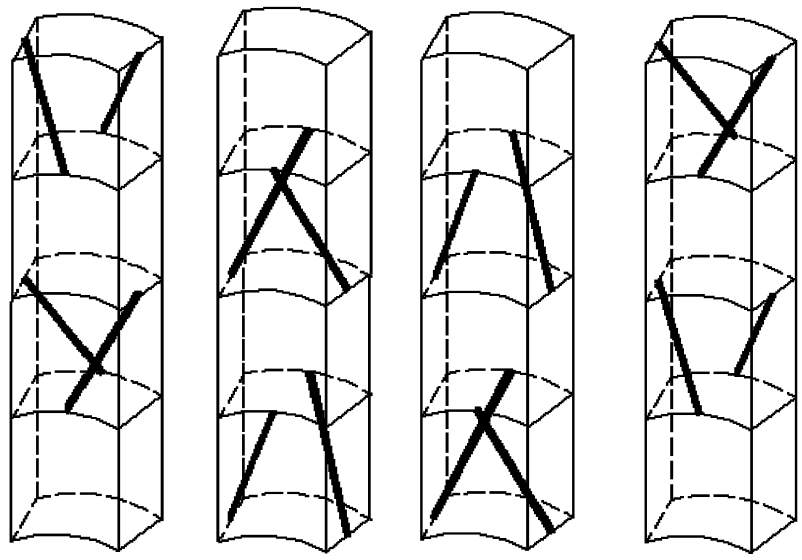


图 3　圆型编织预成型件内部区域的单胞模型

Fig. 3　Unit cells for the interior of tubular braided preforms

成型件的横截面之间关于编织轴向有 45°的旋转。而本文的内部单胞的扇面形横截面和预成型件的横截面具有相同的取向。在进行结构或力学分析时，单胞和预成型件可以选用统一的坐标系描述。

3.2　表面编织结构

表面区域的代表性控制域定义为图 1 中的 D1D3E3E1，包括两个子域 D1D2E2E1 和 D2D3E3E2。连续编织过程中，子域 D1D2E2E1 内携纱器的运动规律如图 4 所示。图中平面间细实线连接的为同一携纱器。携纱器 1 由内部运动到边界后，停动一步后改变运动方向返回内部。粗实线为携纱器的运动趋势线，也即编织纱线的运动轨迹。实际中，编织纱线在预成型件表面应为空间曲线。为了简化模型，这里用线段代替。该线段一端点 S 与内部编织纱线的运动轨迹相连(线 12 的中点)，另一端点 P 为携纱器位置点 2、3、4 和 5 的距离平方和最小点，即梯形 2345 的对边中点连线的交点。

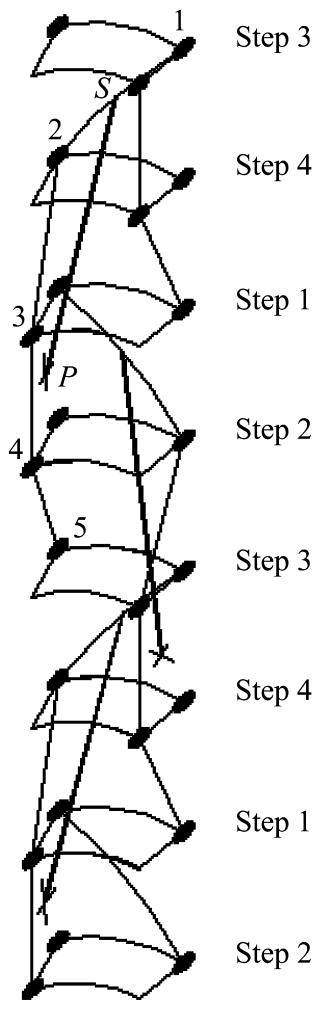


图 4　控制域 D1D2E2E1 中编织纱线的运动轨迹

Fig. 4　Yarn trace in the control region D1D2E2E1

在一个机器循环中形成的编织结构如图 5(a)所示，定义为单胞 E。单胞的起始位置比携纱器的初始位置沿编织方向下移 1/8 花节长度，横截面为一扇面形，高为一个花节长度，包含两组相互交织的纱线。编织纱线与编织轴向的夹角定义为表面编织角[。同理，可以定义控制子域 D2D3E3E2 内的单胞 F 如图 5(b)所示。这里得到的是圆型编织预成型件内表面的纱线交织结构。预成型件外表面与内表面具有相似的交织结构，且内、外表面的单胞结构成镜面对称。考虑编织纱线具有一定的宽度，预成型件表面的交织结构如图 6 所示。定义编织纱线在预成型件表面形成的交织纹路角称为预成型件的编织角 T，编织角 T的正切等于预成型件表面的花节宽度与花节长度之比。编织角 T是一个重要的编织工艺设计参数，同时可以通过实验测得，作为制件的一个质检指标。

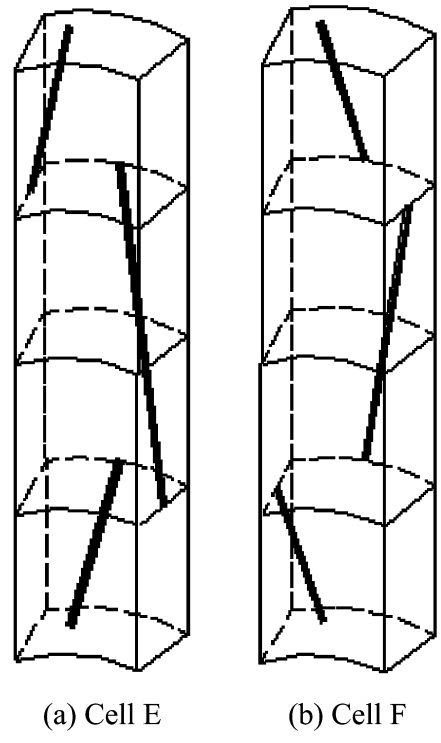
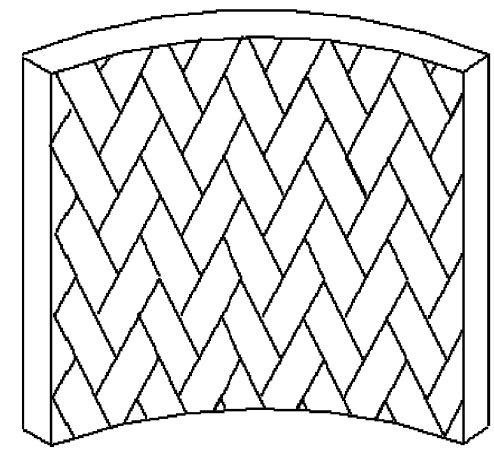


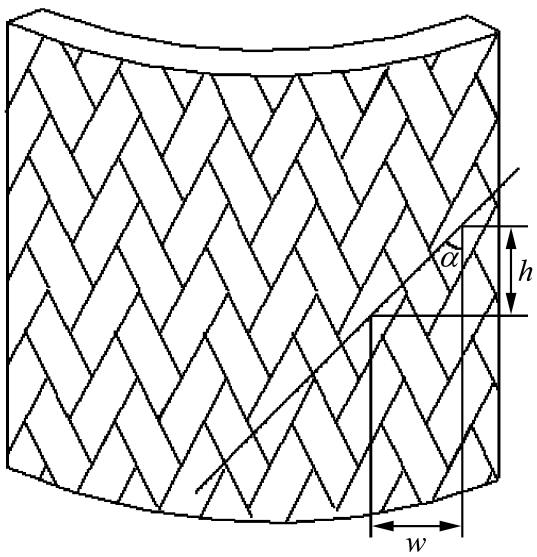
图 5　预成型件表面的单胞模型

Fig. 5　Unit cells for the surface of tubular braided preforms

与文献[3]给出的表面单胞模型相比，本文的表面单胞模型反映了编织纱线由预成型件内部运动到



(a) Inner surface



(b) Outer surface

图 6　圆型编织预成型件表面图貌

Fig. 6　Surface patterns of the tubular braided preform

表面后又返回到内部的连续运动状态，保证了编织纱线运动的连续性和编织结构的完整性。而文献[3]给出的表面单胞模型中的编织纱线不能与内部单胞中的纱线正确连接，造成了编织纱线的间断。

3.3　纱线在预成型件横截面内的运动轨迹

将结构单胞中编织纱线投影在预成型件的横截面上，可以获得编织纱线在预成型件横截面内的运动轨迹，如图 7 所示。图中曲线表示了编织纱线在预成型件横截面内的连续运动轨迹。每一条轨迹代表一组纱线，它们具有相同的运动规律。对于 m×n 圆型编织预成型件，编织纱线的组数为

$$G_t = \frac{2mn}{\text{Least Common Multiple of } 2m \text{ and } n} \quad (2)$$

每组纱线中的纱线根数为

$$M_t = \frac{N_t}{G_t} \quad (3)$$

图 7 给出了本文作者所定义的单胞模型在预成型件横截面内的相应位置。图中可以看出：预成型件由六种结构单胞有机组合而成，制件的内部由四种内部单胞按一定的规律叠成，制件的表面由两种面单胞组成，且内外表面的单胞结构成镜面对称。不同的纱线排列形式将导致不同的结构单胞的组合。此外，各结构单胞与预成型件具有相同的取向。单胞的几何特性与其在预成型件横截面内所处的位置有关。

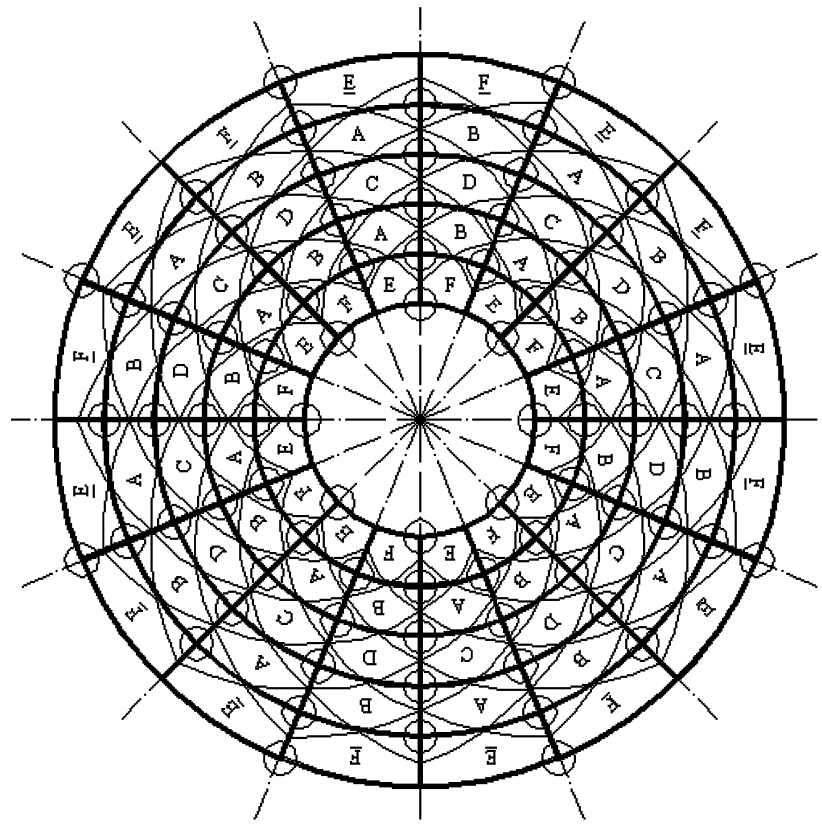


图 7　编织纱线运动轨迹的水平投影

Fig. 7　Plane projection of all yarn traces

4　结构单胞模型的几何特性

为了分析单胞的几何特性，建立如下假设：

(1) 编织纱线具有椭圆形横截面，短轴为 d，形状因子为 λ；

(2) 所有编织纱线具有相同的几何特性；

(3) 编织过程稳定，编织结构均匀。

从图 7 可以看出，编织纱线在预成型件的内表面停动一步后，经过(2m+1)步运动到外表面，从内向外记为 0, 1, 2, …, 2m。根据几何关系，可得编织纱线第 i 步运动位置点到预成型件中心点的距离 R_i

$$R_{i+1} = R_i + [d/(2\sin h)] \quad (4)$$

式中：i= 1, 2, …, 2m-2；h 为预成型件横截面内编织纱线运动轨迹与径向线的夹角，即

$$h = \cos^{-1}\{[d\cos(\pi/n)]/[4R_i\sin(\pi/2n)]\} + \pi/2n$$

边界条件为　$R_1 = D_{in}/2 + d$，D_{in}是预成型件的内径。

预成型件的外径 D_{out}为

$$D_{out} = 2(R_{2m-1} + d) \quad (5)$$

根据单胞的几何关系和单胞在预成型件横截面的位置，可得内部单胞中的内部编织角和纤维体积

含量

$$\tan V_j = 4L_j / h, \qquad j = 1, 2 \tag{6}$$

$$V_{in} = \frac{\pi d^2 \wedge k}{8A_{in}} \left(\frac{1}{\cos V_1} + \frac{1}{\cos V_2} \right) \tag{7}$$

式中: A_{in}, L 和 k 分别为内部单胞的横截面积、单胞内编织纱线的水平投影长度和编织纱线的填充因子, 且

$$A_{in} = \frac{\pi (R_{i+2}^2 - R_i^2)}{n}$$

$$L_j = \frac{2R_{i+j-1} \sin(\pi/2n) \sin(h_{i+j-1} + \pi/2n)}{\cos(\pi/n)} + \frac{d}{2\tan h_{i+j-1}}, \qquad j = 1, 2$$

预成型件表面单胞中的表面编织角和纤维体积含量分别为

$$\tan[_s = 2L_s / h \tag{8}$$

$$V_s = \frac{\pi d^2 \wedge k}{4A_s} \frac{1}{\cos[_s} \tag{9}$$

对于预成型件的内、外表面, 单胞的横截面积, 单胞内编织纱线的水平投影长度分别为

$$A_{is} = \frac{\pi (2R_1 d - d^2)}{n}$$

$$L_{is} = \sqrt{(2R_1^2 - R_1 d)(1 - \cos(c/n)) + d^2/4}$$

$$A_{os} = \frac{\pi (2R_{2m-1} d + d^2)}{n}$$

$$L_{os} = \sqrt{(2R_{2m-1}^2 + R_{2m-1} d)(1 - \cos(\pi/n)) + d^2/4}$$

根据编织角 T的定义, 预成型件内、外表面的编织角可表示为

$$\tan T_{is} = \frac{2\pi D_{in}}{nh} \tag{10}$$

$$\tan T_{os} = \frac{2\pi D_{out}}{nh} \tag{11}$$

5 结　论

三维编织中, 编织纱线由携纱器携带, 沿携纱器的运动趋势线方向运动。根据携纱器的运动规律, 定义了内部和表面控制域, 详细研究了三维圆型编织中所形成的空间纱线交织结构。在此基础上, 获得的预成型件结构单胞模型包含四种内部单胞和两种表面单胞。预成型件的整体结构可由六种单胞组装而成, 且单胞的几何特性与其在预成型件横截面内所处的位置有关。单胞的取向平行于预成型件的取向, 有利于材料的力学性能分析。

参考文献:

[1] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391- 404.

[2] Li W, Hammad M, EI-Shiekh A. Structural analysis of 3-D braided preforms for composites, Part Ⅰ: The four-step preform [J]. J Text Inst, 1990, 81(40): 515- 537.

[3] Wang Y Q, Wang A S D. On the topological yarn structure of 3-D rectangular and tubular braided preforms [J]. Composites Science and Technology, 1994, 51(4): 575- 586.

[4] 陈　利, 李嘉禄, 李学明, 邱冠雄. 三维方型编织预成型件的纱线编织结构 [J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 1- 5.

[5] 修英姝. 四步法三维编织复合材料力学性能的有限元分析 [D]. 天津: 天津工业大学, 2001. 10- 30.