异型截面三维编织复合材料细观结构分析

李典森 卢子兴 许晓燕

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083)

摘 要：阐述了异型截面三维编织物编织的基本原理，以“口”字型截面为例，系统地分析了携纱器在机器底盘上的运动规律以及纱线在面内和空间的交织运动规律. 采用控制体积单元法建立了异型截面三维编织复合材料中除普通方型三维编织复合材料所具有的内胞、面胞和角胞外，在矩形与矩形相连区域的相连内部单胞、相连表面单胞和相连角单胞模型. 这些单胞模型的表面与预制件的表面平行，有利于今后的力学性能分析. 此外，在假设纱线具有椭圆形横截面的基础上，推导了编织工艺参数之间的数学关系，为进一步分析异型截面三维编织复合材料的力学性能奠定了基础.

关 键 词：细观结构；复合材料；三维编织；异型截面；单胞模型

中图分类号：TB 332

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)06-0714-05

Micro-structural analysis of three dimensional braided composites with profiled section

Li Diansen Lu Zixing Xu Xiaoyan

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The fundamental theory of braiding process of three dimensional braided preform with profiled section was described. The movement rules of the carriers in the machine plane and the planar and spatial yarns paths were analyzed systematically based on the preform with square section. The unit models in the joint rectangle region of interior, surface, and corner of three dimensional braided composites with profiled section were established besides the unit model of interior, surface, and corner of three dimensional rectangular braided composites by means of a control volume method. The surface of these models is parallel to the surface of perform, which is suitable for the analysis of the mechanical properties. In addition, the math relationship between braiding parameters was deduced on the hypothesis of the yarns with the elliptical cross-section. It would be a solid base for the analysis of the properties of three dimensional braided composites with profiled section.

Key words: microstructure; composites; 3D braiding; profiled section; unit cell model

在实际工程中，三维编织复合材料结构件大多具有复杂的异型截面，如常见的“口”字梁、“工”字梁和“品”字梁等. 对这些异型截面编织复合材料结构件细观结构的正确认识是进一步对其力学性能进行分析的重要基础. 目前，关于三维编织复合材料细观结构方面的研究大多数集中在普通的矩形截面方面[1-7]，而对于异型截面编织复合材料的相关分析则较少涉及[8]. 本文首先对异型件编织的一些基本原理进行了阐述，然后以“口”字型截面为例，研究了携纱器在面内的运动，并基于纱线的投影轨迹，分析了纱线在空间的交织规律，得到了异型编织件除普通矩形制件所具有的内胞、面胞和角胞外，在矩形与矩形相连区域的相连内部单胞、相连表面单胞和相连角单胞模型. 并

收稿日期：2006-06-10

基金项目：航空科学基金资助项目(04B51045)；北京市教育委员会共建计划资助项目(XK100060522)；北航博士创新基金资助项目

作者简介：李典森(1978—)，男，福建建阳人，博士生，lidiansen@163.com.

且,所取单胞的表面与预制件的表面平行,这将利于今后的力学性能分析.

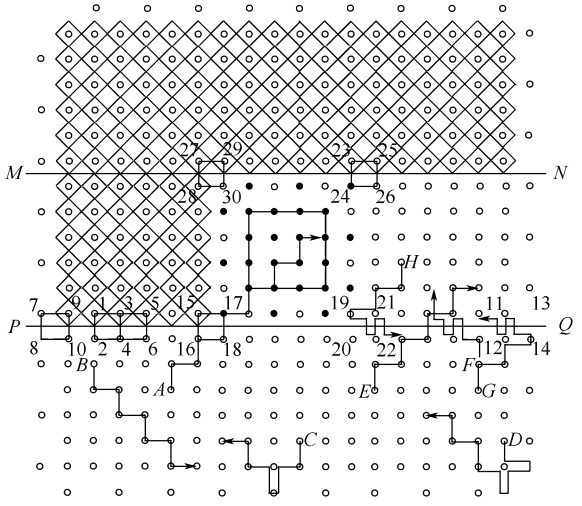
1　编织原理

确定出合理的编织底盘结构和携纱器在机器底盘的初始排列以及编织模式等是制作异型截面预制件的基础.异型件的编织是由包含异型截面的规则矩形主体阵列($m\times n$)和附加阵列所构成的,主体阵列和附加阵列的大小依据不同的需要进行相应的设计.实际编织中,主体阵列各行(列)左右(上下)两边的附加阵列数目应相等.在编织过程中,携纱器沿整行和整列步进运动,因此,主体阵列内必须填满携纱器,否则,携纱器无法驱动传力.携纱器上是否载纱,并不影响携纱器的步进运动.附加携纱器应与主体携纱器相邻排列,以保证能不断地补充到主体阵中,且行向的附加携纱器只能沿列向运动,列向的附加携纱器只能沿行向运动.因此,在主体阵列内,用载纱携纱器排布出异型截面,再根据编织模式确定合适的附加载纱携纱器与空载携纱器的位置,以构成异型件编织的初始阵列.普通的编织模式有 1×1,2×1,1×3 等,而异型件的编织需要有多种编织模式以适应不同的要求.通常,也可采用某一种编织模式,分别对复杂异型截面的多个常规矩形进行编织.

2　携纱器的运动规律

携纱器的运动决定了异型件的单元结构.图 1 示出了"口"字型制件初始的携纱器排布图.

倘若采用普通的四步法进行编织,携纱器 A



• —空载携纱器;◦—载纱携纱器;

MN,PQ—相连两矩形的分界线.

图 1　携纱器运动规律图

将以"Z"字形运动轨迹进入"口"字形空框内,所携带的纱线将在空框内参加编织.因此,根据编织原理,可分别对"口"字型制件的 4 个矩形截面(图 2 中,1～4)进行编织.在 1～4 步同时编织矩形 1 和 4,5～8 步编织矩形 2 和 3.8 步后,完成一个机器循环,形成一个花节高度 h.编织过程中,MN,PQ 两侧的携纱器将作为附加携纱器进行编织,每编织 4 步后,所有附加携纱器回复到原始位置,以便下一矩形的编织.

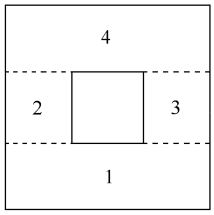


图 2　"口"字形截面简图

在单个矩形阵列内,携纱器的运动与普通四步法的运动相同,如图 1 中携纱器 B 点、C 点和 D 点分别在矩形 1 的内部、表面和棱角区域的运动轨迹.但在矩形相连区域,携纱器的运动规律不同.在矩形相连的内部区域,携纱器的运动具有两种特殊规律,如携纱器 E,第 1～4 步参与矩形 1 的编织,编织了矩形 1 的一个花节高度;4 步后,到达矩形相连部分;第 5～8 步携纱器无间歇地通过边界 PQ,参与矩形 3 的编织,同时也编织了矩形 3 的一个花节高度.整个 8 步后,携纱器运动的轨迹与普通四步法相同,但携纱器所携带纱线在成型方向编织了一个花节高度,而在面内携纱器却运动了相当于普通四步法编织两个花节高度的水平位移.携纱器 F 的运动与 E 的运动明显不同,其并不直接通过界线 PQ,进入矩形 3 参与编织,而是在相连区域有一个来回曲折反复的过程.8 步后,这将造成携纱器在面内运动类似普通四步法编织一个花节高度的水平位移,而纱线在成型方向编织形成的长度为 2 个花节高度.在矩形相连表面区域内携纱器的运动,如 G 点所示,其不同于 C 点的运动规律,在相连区域的运动不像普通四步法一样的一进一出,而是有一个来回曲折的过程.同理,在矩形相连的棱角区域,如携纱器 H 所示,与普通矩形内的携纱器 D 在棱角上的运动也不相同,在两个矩形相连部分都有一个来回运动反复的过程.正是由于携纱器在两矩形相连区域的运动,并不同于普通矩形沿行向和列向的交替运动,从而导致了在相连矩形区域具有特殊的细观结构.

3 纱线水平面内运动轨迹

携纱器对纱线的运动起到导向作用，其在机器底盘上的运动将带动纱线在水平面内的运动. 因此，纱线总是沿携纱器连续运动的方向运动，各携纱器的位置点可视为编织纱线运动轨迹的控制点，则当满足各控制点到运动轨迹的距离之和为最小时，可获得编织纱线的面内运动轨迹[7]. 图1中画出了“口”字形截面编织物纱线在水平面左上部的运动轨迹. 由图可见，内部区域的编织纱线运动轨迹可分为两组不同方向倾斜的平行轨迹. 编织纱线由内部区域运动到表面后改变运动方向，返回内部，表面纱线的运动轨迹与内部轨迹相连. 可见，尽管携纱器在矩形相连区域的运动规律不同，但两矩形的纱线运动轨迹相连，形成一个整体. 若定义相连区域内部编织纱线在水平面内的运动轨迹方向与预制件厚度方向的夹角为相连编织纱线的水平取向角 φ，则在理想状态下，$\varphi=45°$.

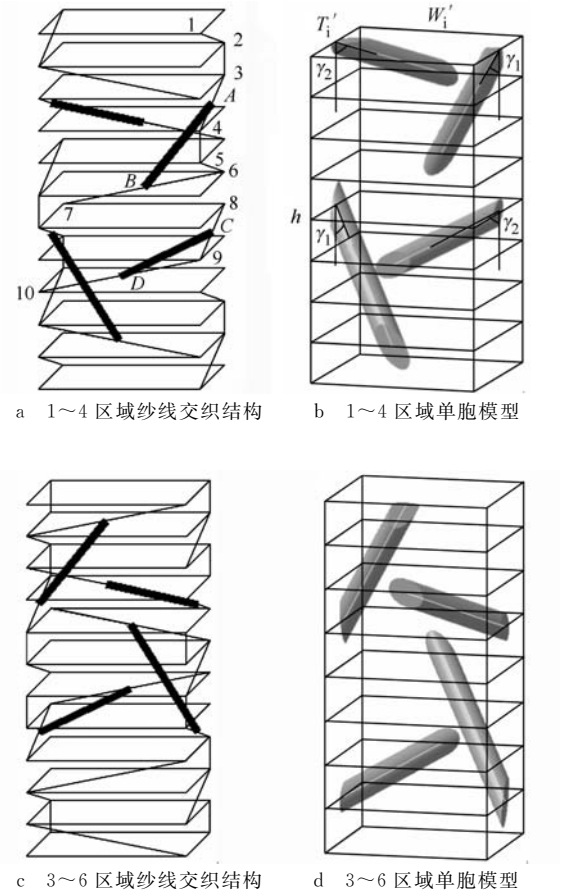
4 相连区域空间交织结构及单胞模型

为分析异型件的细观结构，推导有关编织工艺参数之间的关系，文中提出如下假设：①编织纱线的横截面均为椭圆形，短轴为 d，沿长度方向均匀；②编织过程稳定，编织结构均匀，纱线处于挤紧状态；③所有纱线具有相同的细度和柔韧性；④纱线在编织过程中，由于相互作用而产生的互锁与弯曲被忽略.

在异型件的规则矩形区域内，纱线在空间的交织结构与普通的矩形编织相同，单胞模型也相同. 而在两矩形相连区域的内部、表面和棱角区域携纱器的运动具有不同的特点，这将导致在两矩形相连的各个区域内具有不同的纱线交织结构. 纱线在携纱器的引导下进行空间的取向，从纱线的面内轨迹出发，考虑每一步中，每根纱线在编织物长度方向上的移动，就可构成每根纱线在空间的位形，从而得到相连区域的单胞模型.

4.1 相连内部交织结构及相连内部单胞模型

选取两矩形相连区域的阵列为研究对象，在图1中，考虑1～4区域内，所有纱线在空中的交织运动，如图3a所示. 图中每一平面表示相应机器运动步骤后携纱器所处的位置. 平面间间距为编织花节高度 h 的1/8，平面间细实线连接的为同一携纱器，通过最小二乘原理，对携纱器的运动



a 1～4区域纱线交织结构　b 1～4区域单胞模型

c 3～6区域纱线交织结构　d 3～6区域单胞模型

图3 相连内部交织结构及单胞模型

轨迹进行拟合. 当满足各携纱器控制点到运动轨迹的距离平方和为最小时，可得纱线的空间运动轨迹. 如图中粗实线所示，端点 A 为控制点1～6的距离平方和最小点，端点 B 为边6-7的中点，同理可得到 C，D 等其它点. 图3b为得到的代表性单元，代表性单元的起始位置比携纱器初始位置沿编织方向下移3/8花节高度. 进一步的研究表明，图1中，相连内部区域3～6内纱线的交织结构不同于1～4区域，采用类似方法，可得到该区域纱线的空间交织结构及代表单元，分别如图3c和图3d所示. 分别定义这两个代表单元为两个相连内部单胞. 相连内部单胞的取向平行于预制件表面，高度为一个花节高度 h. 这里定义相连内部单胞中的编织纱线与成型方向夹角为相连内部编织角. 在相连内部单胞内含有两种不同大小的相连内部编织角，分别为 γ_1 和 γ_2. 其中，γ_1 小于普通矩形件的内部编织角 γ，而 $\gamma_2>\gamma$. 这是由于携纱器在面内运动相同的水平位移时，纱线在成型方向上形成的长度不同而造成的. 每个相连内部单胞内含有4种取向的编织纱线，4组编织纱线分别分布于两组相交的平行平面内，在相对的每组平行平面内分别以 $+\gamma_1$（$+\gamma_2$）和 $-\gamma_1$（$-\gamma_2$）分布. 在相邻的每组平行平面内分别以 $|\gamma_1|$ 和 $|\gamma_2|$

分布.

根据基本假设和图 3 所示的几何关系,可得到相连内部单胞的外形尺寸,即宽度 $W_i'=d/\cos\varphi$ 和厚度 $T_i'=d/\sin\varphi$,而相连的内部编织角为 $\tan\gamma_1=8d/3h\sin 2\varphi$,$\tan\gamma_2=8d/h\sin 2\varphi$.

4.2　相连表面交织结构及相连表面单胞模型

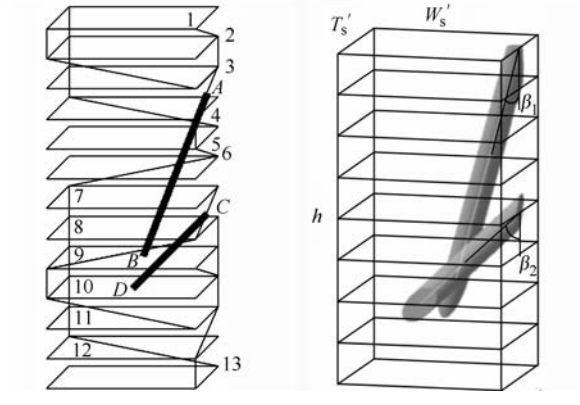
纱线在两矩形相连表面区域的交织结构不同于相连内部区域的交织结构,因此,考察图 1 中 7～10 区域所有纱线在空中的运动,如图 4a 所示.

粗实线为拟合得到的所有纱线的空间运动轨迹.理论上说,编织纱线在预制件表面应为一空间曲线,为了简化模型,采用直线段代替.端点 A 为右侧面控制点 1～6 的距离平方和最小点,即边 3-4 的中点.端点 B 为后侧面控制点 6～13 的距离平方和最小点,即边 7-12 和边 6-13 中点连线的中点,同理可得 C,D 点.在图 1 中相对应的表面位置 11～14 区域,同理可以得到纱线的空间交织结构,研究表明,其交织结构与 7～10 区域的交织结构呈镜面对称,可由其沿轴向旋转 180°得到.因此,可以从图 4a 中提炼出异型件的一个相连表面代表性单元,如图 4b 所示.代表性单元的起始位置比携纱器的初始位置沿编织方向下移 5/16 花节高度.定义该代表性单元为相连表面单胞.相连表面单胞的取向平行于预制件的表面,高度为一个花节高度 h.单胞内有两种取向的编织纱线.定义相连表面编织角 β_1 和 β_2 为表面编织纱线与成型方向夹角.其与普通矩形件的表面编织角 β 也不相同,其中,$\beta_1<\beta$,而 $\beta_2>\beta$,这也是由于携纱器在两矩形相连区域的运动有来回曲折过程的缘故.造成纱线在面内运动相同的水平位移,而在成型方向形成的花节长度不同.

根据基本假设和图 4b 所示的几何关系,可得到相连表面单胞的外形尺寸,即宽度 $W_s'=d$,厚度 $T_s'=d/\sin\varphi$,相应的相连表面编织角为

$$\tan\beta_1=\frac{2d}{3h}\sqrt{1+\csc^2\varphi}$$

$$\tan\beta_2=\frac{2d}{h}\sqrt{1+\csc^2\varphi}$$

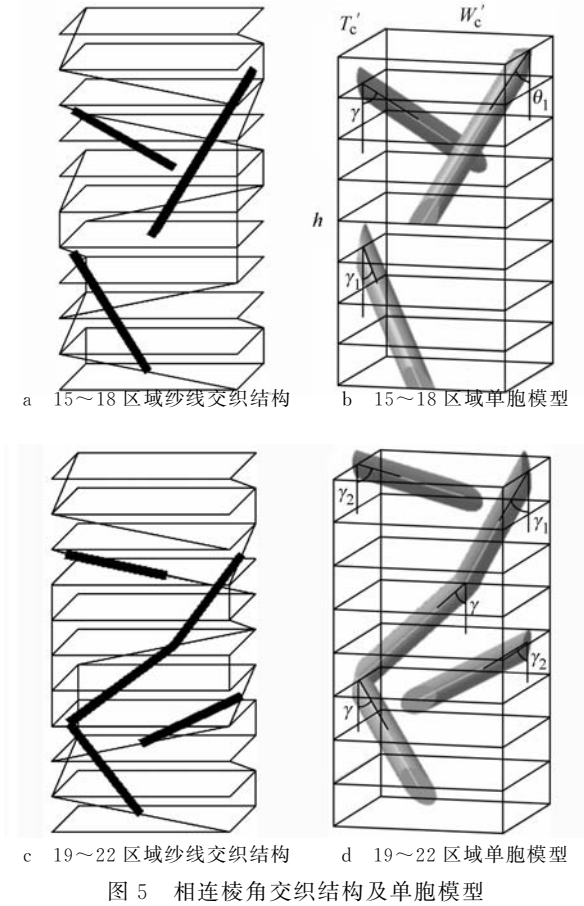


a　7～10 区域纱线交织结构　　b　7～10 区域单胞模型

图 4　相连表面交织结构及单胞模型

4.3　相连棱角交织结构及相连棱角单胞模型

棱角部分的纱线将两相连矩形表面的表面纱线连在一起.同理,考察图 1 中两相连矩形的 4 个棱角控制区域来分析异型件的棱角交织结构.研究表明,在 4 个相连棱角区域中,15～18 区域与 23～26 区域的交织结构呈镜面对称,19～22 区域与 27～30 区域的交织结构呈镜面对称.因此,考察 15～18 围成区域和 19～22 围成区域所有纱线在空中的运动,分别如图 5a 和图 5c 所示.编织纱线在预制件的棱角部分出现弯曲,理论上也呈一空间曲线,这里采用折线段来代替.在普通矩形件中,存在一个角单胞,而从图 5a 和图 5c 可得到两个相连角单胞模型,如图 5b 和图 5d 所示.在两个相连角单胞中的纱线交织结构也各不相同.并且,相连角单胞与普通角单胞的外形尺寸及纱线走向也不相同.



a　15～18 区域纱线交织结构　　b　15～18 区域单胞模型

c　19～22 区域纱线交织结构　　d　19～22 区域单胞模型

图 5　相连棱角交织结构及单胞模型

相连角单胞的取向平行于预制件表面,高度为一个花节高度 h.定义相连角单胞中的编织纱线与成型方向的夹角为相连棱角编织角.在图 5b

的角单胞内,有3种走向纱线,它们的棱角编织角各不相同,其中一根纱线(棱角编织角为 γ_1)与相连内部单胞中的纱线走向相同;第2根纱线(棱角编织角为 γ)与普通矩形件的内部纱线走向相同;还有一根纱线(棱角编织角为 θ_1)却与其它单胞中的纱线走向均不同.在图5d的角单胞内,也有3种走向纱线,但纱线的走向完全不同,可以注意到,其中一根纱线在单胞内出现弯折,开始以 γ_1 角度沿空间取向,之后分别以 γ 角度出现2次弯折沿空间取向,而另外2根纱线分别以 $+\gamma_2$ 和 $-\gamma_2$ 沿空间取向.

根据基本假设和图5的几何关系,可得到角单胞的几何尺寸,即宽度 $W'_c=d/\cos\varphi$,厚度 $T'_c=d/\sin\varphi$,相应的相连棱角编织角为 $\tan\theta_1=2d/h\sin 2\varphi$,$\tan\gamma=4d/h\sin 2\varphi$.

4.4 预制件外形尺寸及各编织角之间的关系

预制件的外形尺寸是设计编织复合材料的一个重要参数.整个异型件的纱线结构,由普通规则矩形和两矩形相连区域的内部单胞、表面单胞和角单胞重组而成.对于立体编织纱为 $m_1\times n_1$,$m_2\times n_2$ 的"口"字形异型截面编织复合材料,其横截面的总体厚度为 $T=2(m_1-1)T_{i1}+2T_{c1}+(m_2-1)T_{i2}+2T'_i$,总体宽度为 $W=2(n_1-1)\cdot W_{i1}+2W_{s1}$,内部"口"字框的宽度和厚度分别为

$$T'=T-2[(m_1-1)T_{i1}+2T_{c1}]$$

$$W'=W-2[(n_2-1)W_{i2}+2W_{c2}]$$

其中,W_i,W_s,W_c 和 T_i,T_s,T_c 分别表示普通内胞、面胞、角胞的宽度和厚度.

单胞内各编织角之间的关系为

$$\tan\gamma=\frac{3}{2}\tan\gamma_1=\frac{1}{2}\tan\gamma_2=\frac{6}{\sin 2\varphi\sqrt{1+\csc^2\varphi}}\tan\beta_1=\frac{2}{\sin 2\varphi\sqrt{1+\csc^2\varphi}}\tan\beta_2=2\tan\theta_1$$

5 结束语

三维异型编织是以普通三维四向矩形编织为基础,在编织底盘上合理地确定主体、附加携纱器以及空载携纱器,通过编织不同的矩形而得到的.在矩形与矩形分界线两边,携纱器运动不像普通四步法一样的一进一出,而是有一个来回曲折反复运动的过程.纱线在两矩形相连区域的空间交织规律与普通的规则矩形不同,且在相连的内部、表面、棱角区域具有不同的特点,据此在一定假设基础上建立了全新的相连内部单胞、相连表面单胞和相连角单胞模型.异型截面三维编织复合材料的内部由4种普通内部单胞组合而成,表面由两种普通表面单胞组合而成,棱角处有普通角单胞;而在矩形与矩形的相连部分,内部由两种相连内部单胞组合而成,表面有1种相连表面单胞,而在棱角处分布有两种相连角单胞.基于相连内部单胞、相连表面单胞和相连角单胞模型,在假设纱线为椭圆形横截面的基础上,建立了编织工艺参数的数学关系和预制件外形尺寸及各编织角之间的关系.这些结果可为进一步分析异型截面三维编织复合材料的力学性能奠定基础.

参考文献(References)

[1] Ko F K. Three-dimensional fabrics for composites: an introduction to the magna weave structure[C]//Composite Material. Tokyo: Japan Soc for Composite Materials, 1982: 1609

[2] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber in clination model of three-dimensional textile structural composites[J]. Journal of Composite Materials, 1986, 20(9): 472-484

[3] Li W, Hammand M, EI-Shiekh A. Structural analysis of 3-D braided performs for composites [J]. J Text Inst, 1990, 81(4): 491-514

[4] Du Guangwu, Ko F K. Unit cell geometry of 3D braided structures[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(7): 752-768

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

[6] 李典森,陈利,李嘉禄. 三维五向编织复合材料的细观结构分析[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(6): 7-11
Li Diansen, Chen Li, Li Jialu. Microstructure analysis of 3-dimensional 5-directional braided composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2003, 22(6): 7-11(in Chinese)

[7] 李典森,卢子兴,陈利,等. 三维七向编织结构细观分析[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 135-141
Li Diansen, Lu Zixing, Chen Li, et al. Microstructure analysis of 3-dimensional 7-directional braided structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 135-141(in Chinese)

[8] 李泽宏,顾伯洪,丁辛. 矩形及其组合横截面立体编织物四步法编织纱线运动模拟[J]. 东华大学学报, 2002, 28(2): 71-76
Li Zehong, Gu Bohong, Ding Xin. Computer simulation of Yarns' movement in 4-step rectangular cross-sectional braided process[J]. Journal of Dong Hua University, 2002, 28(2): 71-76(in Chinese)

(责任编辑:张 婧)