复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第23卷 第1期 2月 2006年
Vol. 23 No. 1 February 2006

文章编号: 1000-3851(2006)01-0135-07

三维七向编织结构细观分析

李典森[1], 卢子兴[*1], 陈 利[2], 李嘉禄[2]
(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083; 2. 天津工业大学 复合材料研究所, 天津 300160)

摘 要: 根据三维编织的主要工艺, 系统地分析了三维七向编织物纱线的面内和空间运动规律。在此基础上, 建立了能反映其基本结构的几何单胞模型, 并推导了编织参数之间的数学关系, 为进一步分析三维七向编织复合材料的力学性能奠定了基础。

关键词: 三维七向编织; 复合材料; 单胞模型; 细观结构
中图分类号: TB332 **文献标识码**:

Microstructure analysis of 3-dimensional 7-directional braided structure

LI Diansen[1], LU Zixing[*1], CHEN Li[2], LI Jialu[2]
(1. School of Aeronautical Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Composite Materials Research Institute, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: The planar and spatial yarn paths were analyzed systematically based on a 3D braiding process. A geometric unit cell model of the three-dimensional and seven-directional braided composite is established to describe the basic structure, and the relationship between braiding parameters is deduced. This paper proposes the base for the analysis of the mechanical properties of 3D and 7D braiding composites.

Keywords: 3-D & 7-D braiding; composites; unit cell model; microstructure

三维编织复合材料是一种新型的纺织复合材料, 具有多向纤维构成的空间精细网状结构。其整体性好、力学结构合理, 具有高的层间强度和抗冲击损伤能力, 这为复合材料应用于主承力结构件提供了广阔的前景。编织复合材料的细观结构是建立单胞模型、进行力学性能分析和有限元计算的基础, 对此国内外学者已进行了一些研究, 但以往的工作主要集中在三维四向[1~6]、三维五向编织结构方面[7~10], 对于三维七向编织复合材料的细观结构及力学行为的研究还未见相关的文献报道。三维七向编织复合材料的结构形式复杂, 是在三维四向编织物的基础上, 沿编织成型方向加入轴纱, 以及在垂直于编织成型方向的面内加入两组互相垂直的横向纬纱和纵向纬纱, 分别形成第5、第6、第7组份而得到的。三维七向编织结构不仅可以改善三维四向编织物沿编织方向的性能, 还可以使其面内的力学性能明显提高。本文作者在研究纱线运动规律的基础上, 系统分析了三维七向编织物纱线的面内和空间运动规律。在此基础上, 提出了三维七向编织复合材料的单胞模型。

1 三维七向编织过程

在三维七向方型编织中, 所有纱线分为两组, 其中一组纱线(编织纱线、轴纱)为机器底盘上携纱器所携带, 另一组纱线(即垂直的横向纬纱和纵向纬纱)在空中沿携纱器行与行以及携纱器列与列之间一根根喂入, 在同一平面上, 来回穿梭所有行与列。类似于机织物中纬纱的喂入。主体携纱器在机器底盘上按预制件截面形态排列成 m 行和 n 列方阵形式, 如图1所示。挂编织纱线携纱器的运动由沿行和列的交替运动组成, 与四步法携纱器运动步骤相同, 携纱器每运动一步后, 沿携纱器行向和列向喂入横向纬纱和纵向纬纱。第1步, 相邻的行携纱器相互错动一个动程, 之后, 在空中沿携纱器行与行之间喂入横向纬纱; 第2步, 相邻的列携纱器相互错动一个动程, 之后, 在空中沿携纱器列与列

收稿日期: 2005-05-13; **收修改稿日期**: 2005-06-24
基金项目: 航空科学基金资助项目(04B51045)
通讯作者: 卢子兴, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复合材料力学、泡沫材料力学 E-mail: luzixing@263.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

之间喂入纵向纬纱；第 3 步，携纱器运动与第 1 步相反，纬纱的喂入与第 1 步相同；第 4 步，携纱器运动与第 2 步相反，纬纱的喂入与第 2 步相同。如此，携纱器运动四步后，构成一个循环，一个循环后所获得的预制件长度为一个编织花节高度 h。机器连续运动后，便可得到所需长度的三维七向编织预制件。

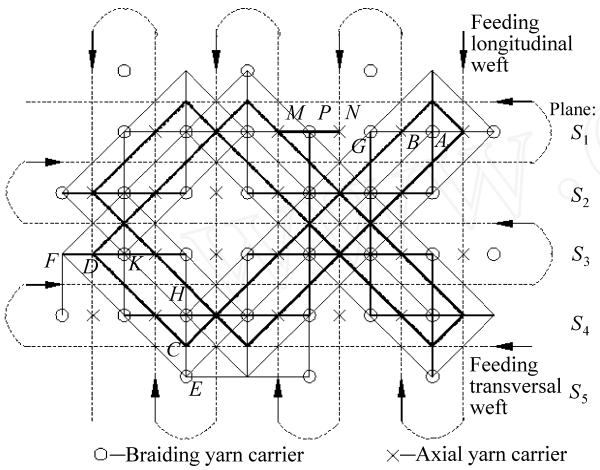

图 1　携纱器运动规律图

Fig. 1　Run chart of yarn carriers

三维七向方型编织预制件可由主体纱的行数和列数来定义。在 $m \times n$ 方型预制件中，编织纱线的总根数为：$N_1 = mn + m + n$；轴纱总根数为：$N_2 = mn$；同一平面内，横向纬纱根数为：$N_3 = m + 1$；同一平面内，纵向纬纱根数为：$N_4 = n + 1$。

因此，图 1 中所示的编织纱线总根数为 34 根，轴纱根数为 24 根，横向纬纱为 5 根，纵向纬纱为 7 根。图 1 中，挂编织纱线的携纱器(A)在运动过程中，沿行向和列向交替运动，形成“Z”字形运动轨迹，并沿倾斜的方向穿过内部区域运动到边界，在边界区域停动一步后，改变运动方向返回内部区域，在连续的编织过程中，携纱器将遍历所有的边界，经过若干步后，回到起始位置。相应携纱器所携带的编织纱线也将通过织物的宽度和厚度方向。而挂轴纱的携纱器(M)，第 1 步，由 M 运动到 N；第 2 步，保持不动；第 3 步，由 N 运动到 M；第 4 步，保持不动。如此，不断循环。由于携纱器在运动过程中，只沿行向运动，而沿列向不动，因此，其运动轨迹为沿行向平动的直线，经过四步后，又回到初始位置。另外，纬纱由于不挂在携纱器上，不随携纱器的运动而运动，横向纬纱在空中沿携纱器行与行之间喂入(如图 1 中箭头所示方向)，从第 1 行的右边横跨织物宽度穿到左边，再从第 2 行的左边穿到右边，在同一平面内，如此不断来回穿梭，直至所有携纱器行与行之间都加满一组横向纬纱为止。纵向纬纱在空中沿携纱器列与列之间喂入(如图 1 中箭头所示方向)，从第 1 列的后边横跨整个织物厚度穿到前边，再从第 2 列的前边穿到后边，在同一面内，如此不断循环，直至所有携纱器列与列之间都加满一组纵向纬纱为止。纬纱在空中运动，横穿整个编织物的外形尺寸，纬纱不参加编织，均匀地夹在编织纱线之间。

2　纱线水平面内运动轨迹

机器底盘上的每个携纱器上都携带有一根纱线，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运动，因此，纱线总是沿携纱器连续运动的方向运动，由于橡皮筋张力的作用，纱线在水平面内不可能形成像携纱器那样的“Z”字形运动轨迹。图 1 中，携纱器 A 沿折线轨迹从 A 运动到 E，在 E 点停动一步后改变方向运动到 F 位置，始终在两条平行线 AE 和 GH 以及 EF 和 HK 内运动，携纱器 A 所携带的编织纱线也将会在这两条平行线内运动，且运动轨迹应平行于 AE 和 GH。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，将携纱器在机器上的排布看成是预制件横截面的映射，得到编织纱线的面内运动轨迹为携纱器在运动过程中相邻位置点中点的连线，图 1 中 BCD 即为携纱器 A 所携带编织纱线的面内运动轨迹，编织纱线的运动较携纱器晚半步。同理可得携纱器 A 从 A 点开始再回到 A 点时的完整运动轨迹及完整编织纱线的面内运动轨迹。另外，由于挂轴纱的携纱器 M 在整个编织循环中，始终在 MN 内运动，其所携带的轴纱也将在 MN 内运动，可获得轴纱的面内轨迹为一个点，即 M 和 N 的中点 P。轴纱不参加编织，在编织成型方向上均匀地夹在编织纱线之间。而横向纬纱和纵向纬纱在携纱器每运动一步后，分别于所有携纱器行与行之间以及所有携纱器列与列之间来回穿梭，纬纱也不参加编织，在横截面面内方向均匀地夹在编织纱线之间。因此，横向纬纱的面内投影为水平直线，纵向纬纱的面内投影为铅垂直线。三维七向编织物所有纱线的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

水平面内运动轨迹如图 2 所示。相互平行的斜直线为编织纱线的运动轨迹, 定义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编织纱线的水平取向角 φ。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。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。每一组相邻的平行轨迹中编织纱线的运动方向相反。表面区域的编织纱线运动轨迹共有两个方向, 且相邻纱线运动方向相反。图中“ ○”为轴纱的水平投影, 均匀地夹在编织纱线之间。此外, 水平直线为横向纬纱的运动轨迹, 铅垂直线为纵向纬纱的运动轨迹。

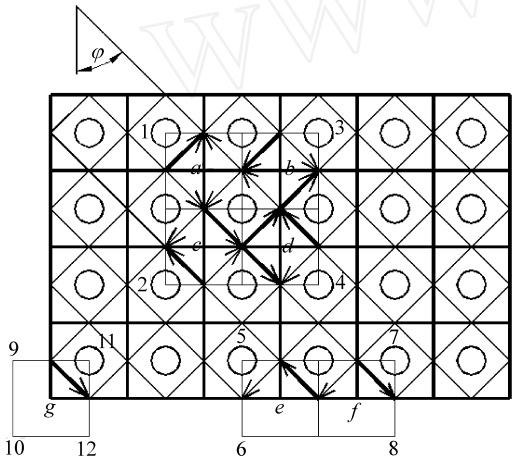

图 2 纱线水平面内运动轨迹

Fig. 2 Yarn path figure of horizontal projection

3 基本假设

为分析三维七向编织预制件的细观结构, 推导有关编织工艺参数之间的关系, 提出如下假设[2, 9]:

(1) 编织纱线、轴纱及纬纱的横截面均为椭圆形, 短轴为 d, 横截面变形因子为 k, 沿长度方向均匀。

(2) 加轴纱比例为 1∶1, 即满加轴纱。

(3) 在一个机器循环中加两次横向纬纱和纵向纬纱, 每次加横向纬纱比例为 1∶1, 即满加横向纬纱; 加纵向纬纱比例为 1∶1, 即满加纵向纬纱。

(4) 编织过程稳定, 编织结构均匀, 纱线处于挤紧状态。

(5) 所有纱线具有相同的细度和柔韧性。

(6) 在空间不同纤维的编织过程中, 在纤维的交点处, 纤维由于相互作用而产生的互锁与弯曲被忽略。

4 纱线空间运动规律及单胞几何模型

携纱器在机器内部, 表面和棱角区域的运动规律具有不同的特点, 这将导致各个区域具有不同的纱线交织结构, 根据编织工艺过程, 纱线在携纱器的引导下进行运动并在空间取向, 每个机器循环后所有纱线将相互交织形成一定长度的编织物, 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形状和位置, 得到纱线的空间运动轨迹, 从而得到单胞模型。

4.1 内部交织结构及内部单胞模型

从编织工艺原理可知, 主体阵列内的携纱器在运动过程中, 相邻的行(或列)的运动方向相反, 相间的行(或列)的运动方向相同, 因此, 选取主体携纱器阵列中的 3 行 3 列阵列为研究对象, 讨论预制件内部区域主体纱的交织结构。考虑图 1 中, 平面 S_1 和平面 S_2 间所有携纱器在一个机器循环中的运动, 以及一个机器循环中, 所加横向纬纱和纵向纬纱在空中的运动, 如图 3 所示。图 3 中每一平面表示相应机器运动步骤后携纱器所处的位置。“ ○”为挂编织纱线携纱器, “ ×”为挂轴纱携纱器, 平面间间距为编织花节高度的四分之一, 平面间细实线连接的为同一携纱器, 采用前述当满足各携纱器控制点到运动轨迹的距离之和为最小时, 可得空间携纱器的运动趋势线, 即纱线的空间运动轨迹。由于编织纱线的运动总是较携纱器滞后半步, 因此, 携纱器相邻位置点中点连线即为编织纱线的空间运动轨

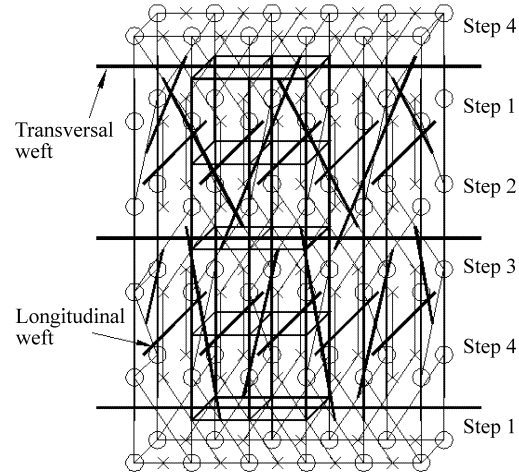

图 3 内部纱线空间运动规律

Fig. 3 Spatial movement of internal yarn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

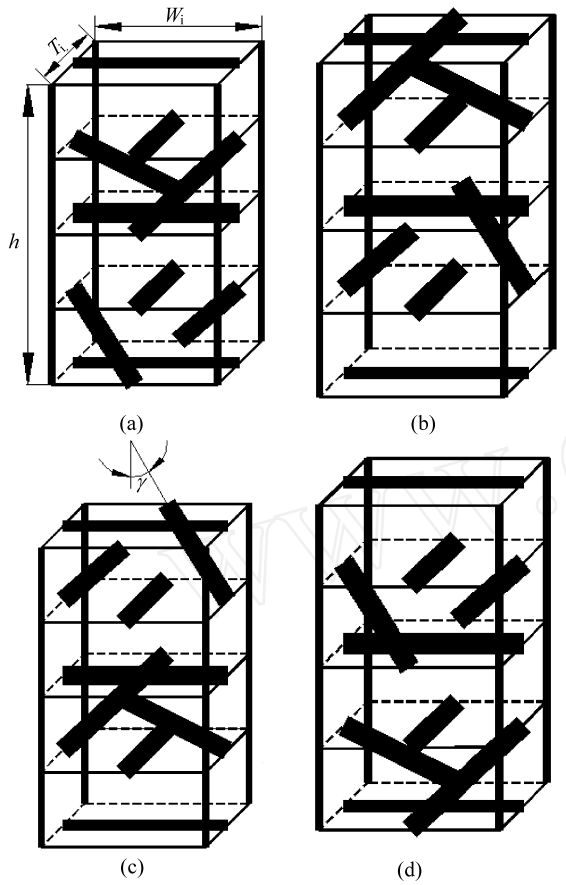

图 4　内部单胞模型

Fig. 4　Interior unit cell model

迹。此外，携纱器每运动一步后，加入横向和纵向纬纱，如图 3 标注所示。其不随携纱器的运动而运动，在空中水平夹在编织纱线之间。所有纱线的空间运动轨迹用粗实线来表示。图中包含了两个代表结构单元体，如图 4(a)、4(b)所示。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 1/8 花节高度。进一步研究表明，图 1 中平面 S_2 和 S_3 之间纱线的交织结构不同于图 3，可另外得到两个代表结构单元体如图 4(c)、4(d)所示。内部区域 4 个代表性结构单元体在面内的投影如图 2 中 1、2、3、4 所围成控制区域的 4 个子域 *a*、*b*、*c*、*d* 所示，其纱线运动规律各不相同，斜粗线表示一个编织循环中，前两步的编织纱线空间运动轨迹的水平投影，斜细线表示后两步的编织纱线空间运动轨迹的水平投影，四分之一圆为四分之一轴纱的投影。而面内水平和铅垂直线分别为所加横向纬纱和纵向纬纱的投影。根据前面的分析，分别定义这 4 个代表单元的纱线交织结构为 4 个内部单胞模型。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。

这里定义内部编织纱线与编织成型方向夹角为内部编织角 γ。每个内部单胞内含有四种取向的编织纱线和 4 根四分之一轴纱，4 组编织纱线分别分布于两组相交的平行平面内，在相邻的每组平行平面内分别以 $+\gamma$ 和 $-\gamma$ 分布。轴纱与编织成型方向平行，分布在四个边角上。此外，单胞内还含有两根横向纬纱和两根纵向纬纱，其中一根横向纬纱在单胞顶面和底面各占一半。纬纱垂直于编织成型方向，均匀分布于两个不同水平平面内。图 5 为三维七向编织预制件内部所有纱线的走向和交织图。

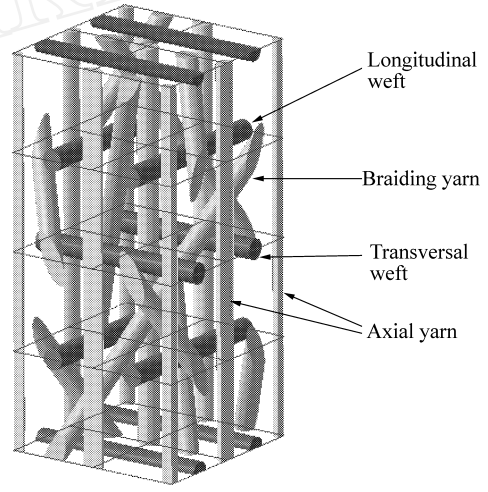

图 5　内部纱线走向和交织图

Fig. 5　Tendency and interweave of internal yarns

根据基本假设和图 4 所示的几何关系，可得到内部单胞的外形尺寸为

内部单胞横截面的宽度 $W_i = 2d/\cos\phi + d$

内部单胞横截面的厚度 $T_i = 2d/\sin\phi + d$

内部编织角　　$\tan\gamma = 2W_i/h\sin\phi$

其中：d 为椭圆形纱线的短轴长，ϕ 为编织纱线的水平取向角，h 为编织花节高度。

4.2　表面交织结构及表面单胞模型

纱线在表面位置的运动规律不同于在主体区域的运动规律，因此，纱线在织物表面的交织结构也有别于织物内部的结构。考察图 1 中平面 S_4 和 S_5 间的所有纱线在一个机器循环中的运动。如图 6 所示。

图 6 中细实线连接为同一携纱器，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。图 6 中，端点 *A* 为携纱器位置点 1、2、3、4 的距离平方和最小点，即边 1-2 和边 3-4 中点连线的中点。端点 *B* 为控制点 4、5 连线的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

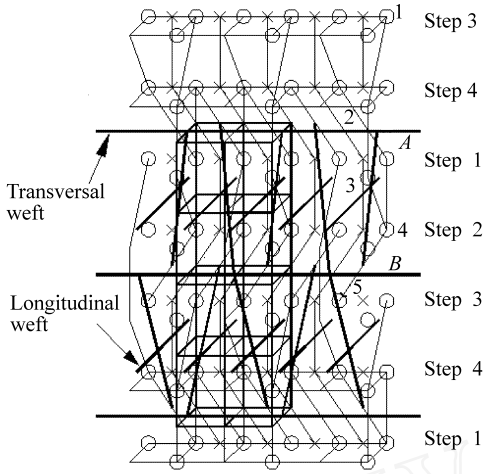

图 6 表面纱线空间运动规律

Fig. 6 Spatial movement of surface yarn

中点。同理, 可得到其它点。喂入的横向纬纱和纵向纬纱如图 6 标注所示。从图 6 中提炼出三维七向编织预制件表面 2 个代表单元, 如图 7 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 1/ 8 花节高度。两个代表性单元在面内的投影为图 2 中 5、6、7、8 所围成的控制区域的 2 个子域 e、f。定义图 7 所示的两个代表性单元为两个表面单胞。

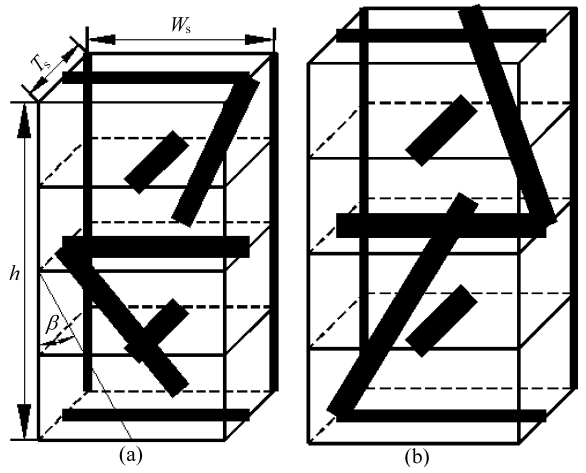

图 7 表面单胞模型

Fig. 7 Surface unit cell model

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。表面单胞内有两种取向的编织纱线和两根四分之一轴纱, 此外, 单胞内还含有两根横向纬纱和两根纵向纬纱。其中一根横向纬纱在单胞顶面和底面各占一半。定义表面编织角 β为表面编织纱线在织物表面上的投影与编织成型方向夹角。表面编织角, 通常情况下不易测量, 常常测量的是编织角 α, 其是编织物表面相邻的相同取向编织纱线排列所形成的编织纹理方向与成型方向夹角, 亦即为内部编织角 γ在编织物表面的投影。它的正切值等于织物表面的花节宽度与花节高度之比。其中, 花节宽度指沿编织物表面宽度方向相邻的相同取向表面纱线之间的宽度。其正好等于两个表面子单胞的宽度, 如图 8 所示。

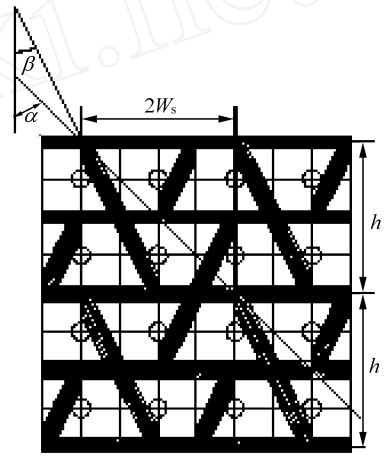

图 8 预制件表面形态模型

Fig. 8 Surface configuration of preforms

根据基本假设和图 7 的几何关系, 表面单胞的外形尺寸沿织物宽度方向为

表面单胞横截面的宽度 $W_s = 2d/\cos\phi + d$

表面单胞横截面的厚度 $T_s = d/\sin\phi + d$

表面编织角 $\tan\beta = W_s/h$

表面单胞的外形尺寸沿织物厚度方向为(图略)

表面单胞横截面的宽度 $W_s' = d/\cos\phi + d$

表面单胞横截面的厚度 $T_s' = 2d/\sin\phi + d$

表面编织角 $\tan\beta' = \tan\phi\tan\beta$

编织角 $\tan\alpha = 2W_s/h$

其中: d 为椭圆形纱线的短轴长, ϕ为编织纱线的水平取向角, h 为编织花节高度。

4.3 棱角交织结构及棱角单胞模型

同理, 考虑图 1 中左下方棱角控制区域来分析棱角交织结构, 棱角部分的纱线将两相邻表面的表面纱线连在一起。如图 9 所示, 细实线连接的为同一携纱器, 粗实线为拟合得到的所有纱线的空间运动轨迹。图中, 端点 C 为携纱器位置点 1、2、3、4 的距离平方和最小点, 即边 1-2 和边 3-4 中点连线的中点。端点 D 为携纱器位置点 4、5、6、7 的距离

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平方和最小点，即边 4-5 和边 6-7 中点连线的中点。喂入的横向纬纱和纵向纬纱如图 9 标注所示。从图 9 中得到如图 10 所示的角单胞模型。角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 花节高度。角单胞在面内的投影如图 2 中 9、10、11、12 所围成的控制区域 g 所示。

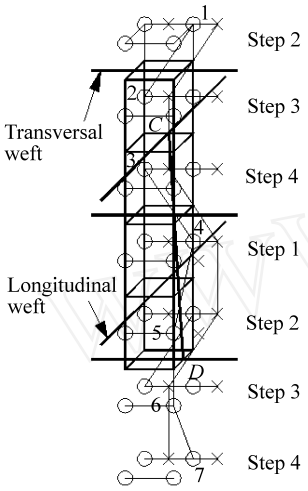

图 9　棱角纱线空间运动规律

Fig. 9　Spatial movement of corner yarn

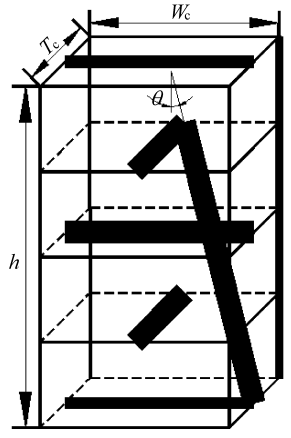

图 10　角单胞模型

Fig. 10　Corner unit cell model

角单胞的取向平行于预制件表面，单胞高度为一个花节高度 h。在角单胞中仅含有一种取向的编织纱线，与编织成型方向的夹角为棱角编织角 θ。角单胞内还含有一根四分之一轴纱以及两根横向纬纱和两根纵向纬纱，其中一根横向纬纱在角单胞顶面和底面各占一半。根据基本假设和图 10 的几何关系，角单胞的几何尺寸为

角单胞横截面的宽度 $W_c = d/\cos\phi + d$

角单胞横截面的厚度 $T_c = d/\sin\phi + d$

棱角编织角 $\tan\theta = \sqrt{\left(\frac{W_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{T_c}{2}\right)^2} \Big/ \left(\frac{3}{4}h\right)$

其中：d 为椭圆形纱线的短轴长，ϕ 为编织纱线的水平取向角，h 为编织花节高度。

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。整个预制件的纱线结构，由四个内部单胞，两个表面单胞和一个角单胞重组而成。对于立体编织纱为 $m \times n$，加轴纱比例为 1∶1，加纬纱比例为 1∶1 的三维七向编织预制件，其横截面的宽度和厚度分别为

$$\begin{aligned} W &= (n-1)W_i + 2W_c \\ &= [2n + (n+1)\cos\phi]\, d/\cos\phi \\ T &= (m-1)T_i + 2T_c \\ &= [2m + (m+1)\sin\phi]\, d/\sin\phi \end{aligned}$$

根据定义，内部编织角 γ，表面编织角 β，棱角编织角 θ 以及编织角 α 之间的关系为

$$\begin{aligned} \tan\gamma &= \frac{1}{\sin\phi}\tan\alpha = \frac{2}{\sin\phi}\tan\beta \\ &= \frac{6(2+\cos\phi)}{\sin 2\phi\ \sqrt{(\sec\phi+1)^2 + (\csc\phi+1)^2}}\tan\theta \end{aligned}$$

5　结　论

三维七向编织是以三维四向编织为基础，通过增加轴纱和面内横向及纵向纬纱而成的。携纱器携带编织纱线运动，使纱线彼此交织，携纱器沿着固定的轨道运动，其所携带的纱线沿着携纱器连续运动的方向运动，纱线的运动总是比携纱器的运动滞后半步，轴纱在携纱器的引导下只在行向平动，不参加编织，均匀地夹在编织纱之间。横向纬纱和纵向纬纱分别沿携纱器行与行之间以及携纱器列与列之间喂入，纬纱也不参加编织，在同一平面内，均匀地夹在编织纱线之间。

根据三维七向编织的主要工艺，系统地研究了三维七向编织中纱线的面内和空间的交织规律，在此基础上，得到单胞模型。三维七向编织复合材料的内部由四个内部单胞组合而成，表面由两个表面单胞组合而成，棱角处有角单胞，在假设纱线为椭圆形横截面的基础上，建立了编织工艺的数学模型。本文中结果可为进一步分析材料的力学性能奠定基础。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献:

[1] Du G W, Ko F K. Unit cell geometry of 3D braided structure [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1993, 12(7): 752 - 768.

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

[3] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structure for composite materials. I: Fabric structure and fibre volume fraction [J]. *Composites Structure*, 2000, 49(4): 451 - 459.

[4] 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.

[5] **陈 利, 李嘉禄, 李学明. 三维编织中纱线的运动规律分析** [J]. **复合材料学报**, 2002, 19(2): 71 - 74.
Chen L, Li J L, Li X M. Analysis of the yarn movement in 3D braids [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(2): 71 - 74.

[6] **徐 焜, 许希武, 汪 海. 三维四向编织复合材料的几何建模及刚度预报** [J]. **复合材料学报**, 2005, 22(1): 133 - 138.
Xu K, Xu X W, Wang H. On geometrical model and stiffness prediction of 3D 4-Directional braided composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(1): 133 - 138.

[7] **李嘉禄, 王 峥. 三维五向整体编织物的细观结构** [A]. **见: 第九届全国复合材料学术会议论文集** [C]. **北京: 世界图书出版公司北京公司**, 1996. 663 - 669.
Li J L, Wang Z. Microstructure of 3-dimensional 5-directional braiding preforms [A]. In: Proceeding of the 9th National Composites Academic Conference [C]. Bejing: Beijing World Publishing Corporation, 1996. 663 - 669.

[8] Wu D L. Three-cell model and 5D braided structural composites [J]. *Composites Science and Technology*. 1996, 56(3): 225 - 233.

[9] **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.
L I D S, Chen L, Li J L. Microstructure analysis of 3-dimensional 5-directional braided composites [J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2003, 22(6): 7 - 11.

[10] **姜卫平, 杨 光. 三维五向管状织物纱束轨迹及纤维体积分数的分析与研究** [J]. **复合材料学报**, 2004, 21(6): 119 - 124.
Jiang W P, Yang G. Calculation model of 3D five-directional tubular braid's yarn trajectory and fiber volume fraction [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(6): 119 - 124.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net