

文章编号: 1000-3851(2005) 05-0162-10

三维管状编织复合材料及其构件

可变微单元几何分析模型

马文锁^{1,2,*}, 冯伟¹

(1. 上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072 ;

2. 焦作大学 机电工程系, 焦作 454003)

摘 要: 针对工程实际中的管状和空间三维编织复合材料构件中力学性能存在梯度的情况, 提出一种性能可以变化的六面体微单元几何模型来描述三维编织复合材料及其构件的几何特性。这种微单元的结构根据三维编织立体几何结构的不同而不同。找出微单元几何形状的变化规律和编织纱线在单元中的位置及体积百分数的变化趋势, 为确定这些因素与微单元局部力学性能的关系提供了一种切实可行的分析模型。以轴线为直线的管状三维编织复合材料为例, 建立了可变微单元几何模型, 详细分析了各个参数之间的变化关系。这里等轴向编织花节矩形断面复合材料分析成为可变微单元分析方法的一种特殊情况, 同时这种模型还可用于描述空间复杂形状多维编织复合材料的几何特性描述, 有助于这类材料及构件的力学分析。

关键词: 三维编织复合材料; 可变微单元; 几何分析模型

中图分类号: TB 330. 1 **文献标识码:** A

VARIABLE MICROSTRUCTURAL UNIT-CELL GEOMETRICAL ANALYSIS

MODEL OF 3 D BRAIDED TUBULAR COMPOSITES AND COMPONENTS

MA Wensuo^{1,2,*}, FENG Wei¹

(1. Shanghai Institute of Applied Mathematic and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Department of Mechanical and Electric Engineering, Jiaozuo University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract : A sort of hexahedral microstructure unit-cell (MUC) geometric model is presented, whose performances are variable, aimed at resolving the troubles of the mechanical analysis about the gradient characteristics in the tubular and 3D braided composites components. The microstructure of MUC is diverse in multifarious 3D braided composites. Finding out the rules of the MUC geometric diversifications and the changed trends of its yarns volume fraction along with its coordinates, a feasible analysis model is provided for making certain the relationships among these factors and local mechanical performances in the MUC. A geometrical model was constituted for a kind of tubular 3D braided composites, of which the symmetrical axes are straight. The function relationships among the parameters were demonstrated in detail. The model about rectangular 3D braided composites preform is oversimplified. It might be used to describe the physical performances of spatial complicated and multi-dimensions braided composites and rebound to mechanical analysis for the composites.

Keywords : 3D braided composites; variable microstructural unit-cell; geometrical analysis model

三维编织复合材料(Three dimensional braided

composites, 简称为3 D BC) 具有高的比强度、比

模量、高的损伤容限和断裂韧性, 耐冲击、不分

层、抗开裂和疲劳; 可一次成型复杂的零部件, 减

少二次加工量。而且这种编织技术还具有优良的可

设计性, 通过改变编织纱线的密度和方向角(或编

织角) 来达到理想的力学性能。因而在航空航天、

交通、国防和医疗、体育等领域倍受推崇。在编织

过程中我们可以根据实际零件所处的受力状态改变

编织角的大小和方向, 进而改变复合材料及构件的

物理及力学特性, 来满足特殊的受力状态。也可采用不同的增强纤维混合编织达到优化材料性能的设计目的, 使之呈现理想的梯度效应来满足工程实际需要和降低生产成本。

三维编织复合材料的力学性能取决于织物的细观结构, 采用细观力学的分析方法, 预测编织复合材料的细观结构形式对其宏观性能的影响, 是实现其性能优化的重要基础。在众多分析方法中, 基于单胞(或称代表性体积单元 RVC, Representative Volume Unit-Cell)几何模型的细观力学性能分析, 即单胞法模型被科研工作者广泛用于预测矩形断面复合材料的等效弹性常数。这方面早期的据有代表性的工作有大单胞纤维倾斜模型^[1,2,3]、三单胞模型^[4,5,6]和五单胞模型^[3,7]等。用单胞的属性来表达整体复合材料构件在诸多文献中得到共识。Li W, Hammad M 等人^[2]通过沿各种横截面切割的方法观察了四步法编织复合材料中纱线的结构, 并证实了预制件内部单胞的存在和用这种模型进行分析的合理性; Wang Y Q, Wang A S D^[8]研究了四步法 1×1 三维编织的一般拓扑结构; 在文献[3,4,5]中, 作者描述了纱线在内部、表面及角部区域单胞形状的不同, 并分别建立了几何结构模型, 用于这种复合材料的力学性能预测。Gu Bohong 在其文章[9]中用实验的方法验证了编织纱线在预制件中为直线的结论, 建立了编织纱线几何结构的数学模型。D Amato 在文献[10]中描述了用计算机辅助设计专用工具软件(TIS3D)建立单胞几何模型, 并进行网格划分, 探讨了力学分析可行性。在Bigaud David的文章[11]中, 作者充分考虑了纱线在编织过程中的几何变形, 建立了一种多重网格几何模型, 解决了单胞中有限元网格划分时出现夹杂相而难于数值计算的问题。黄小平在其博士论文[12]中对这种矩形三维编织复合材料的单胞划分方法进行了修正, 更为合理地对矩形三维四步编织复合材料的单胞划分方法进行了描述。

在上述微结构的单胞划分方法中, 通过一种或几种单胞的性能来对材料的整体性能进行分析, 对复杂的三维空间编织结构的描述则无法满足要求。

三维管状断面编织已广泛地在制造各种管件、锥套体以及复杂曲面的中空构件中应用。而多年来力学工作者对于这种编织形式的分析并不多。陈利^[13]等人将单胞的划分方法拓展到圆形直管状编织, 并进一步细分, 对几何模型的物理特性进行了

描述。早期文献对复合材料直管状构件的力学性能描述曾用过同心圆柱状芯层和表面层几何模型, 而当芯层尺寸较大时忽略表面层的影响, 这种方法用于描述直管状构件且未曾考虑由于编织结构的梯度效应对复合材料力学性能的影响。Wang 等人于1996年曾从复合材料编织纱线在构件中的分布特点, 用交叉曲面层板模型^[14]对直管状编织结构从几何角度进行过描述, 用半解析的方法描述了复合材料在径向物理性能的变化规律, 引用纵向有效模量和纵向泊松比的混合率计算式, 用平均方法对直管状复合材料的弹性性能进行了数值计算并与实验结果作了对比。多数文献只是对直管状编织结构的几何关系进行论述, 很少涉及如图4(a)火箭喷管^[15]等复杂曲面轮廓的三维编织复合材料构件的有关分析。

本文作者将用可变微单元的概念对轴线为直线的回转体管状三维编织构件的几何模型加以描述。讨论该编织构件的几何影响因素和纤维百分数的变化趋势。

1 三维管状编织复合材料构件可变微单元几何模型

可变微单元(Variable Microstructural Unit-Cell, 简称VMC)与实际编织结构有着密切关系, 其划分依据具体的编织形式, 与织物的几何形状、编织过程有关。

圆型编织中编织纱线的排列方式与方型编织不完全相同, 所形成的纱线交织结构也有别于方型编织^[14]; 矩形断面实体三维编织复合材料的轮廓尺寸决定于纱线阵列和打紧程度, 而管状构件除决定于以上因素外, 更重要的是芯轴的轮廓尺寸和纱线的几何尺寸。因而决定了三维管状构件力学分析的复杂性。在这些复杂的实际工程构件中, 管状构件沿径向按性能一致的单胞代表整体存在较大的偏差。事实上这种由内到外的胞体的力学性能是连续变化的, 传统的力学特性系数已经不能简单地用某一个常数近似表达, 而是随某些参数变化的函数。这种变化与编织参数(如编织样式、纤维编织角等)和材料参数(如纱线型号、纱线和基体的力学参数)有密切的关系。而编织工艺参数(如编织速率、编织纱的轴向力、轴向纱与编织纱的比率等)和基体渗透及固化工艺对分析这种复合材料构件也至关重要^[4]。

三维编织的所有纱线在空间交织处有相互交织的节点。节点的选取以交织部位两根纱线的几何中心为准，将任意形状的三维编织复合材料构件用空间六面体可变微单元理想化分割。编织打紧过程限制了每加工一个编织花节时，打紧平面必与织物瞬时成型方向(x 向) 垂直，见图1。

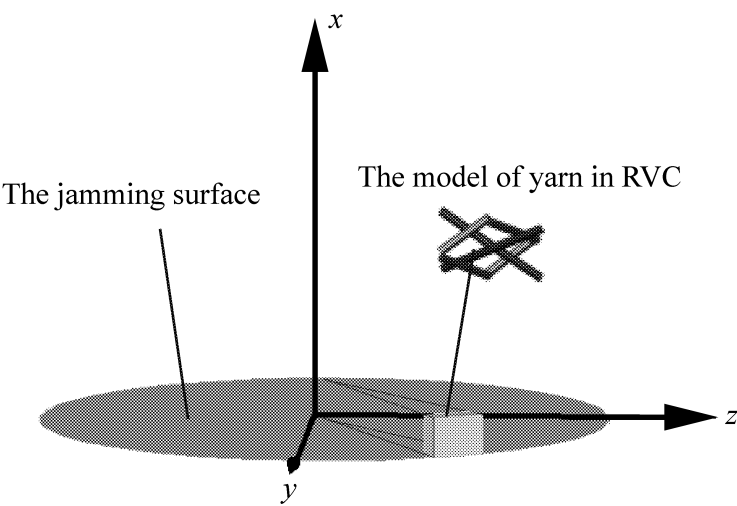


图1 三维编织打紧面与瞬时织造方向的正交关系
Fig. 1 The orthogonal relations of the jamming surface of 3D braided preforms and the instantaneous fabricating direction

整根纱线可以看成随微单元几何形状而变化的折线链，链中每根纱线段之间的联接可假想为铰链形式，如图2 所示。纱线的横截面积不变，但形状因编织纱线在编织时相互挤压而发生复杂变形(图3(b)) 。与文献描述纱线横截面为椭圆或凸透镜等形状不同，本文作者将纱线的有效轴向投影等效视为可变等腰三角形截面。

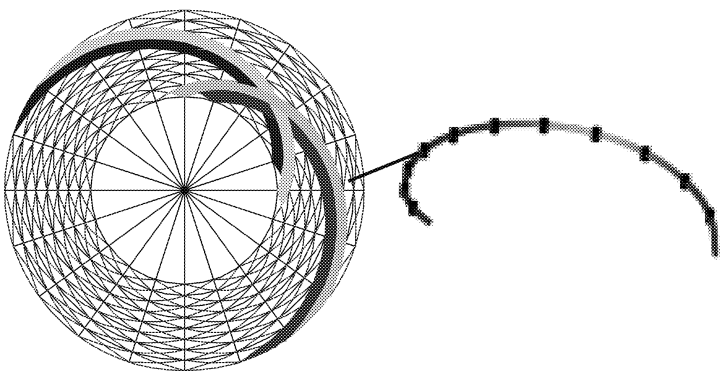
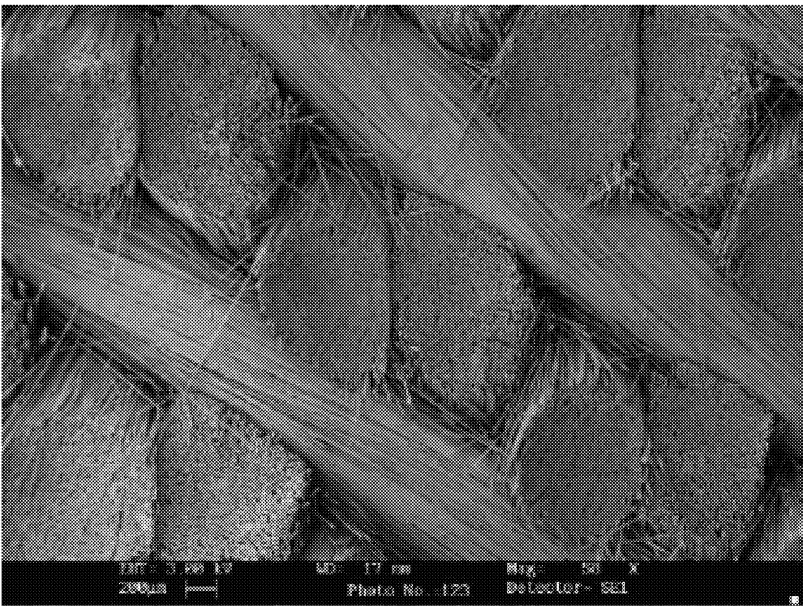
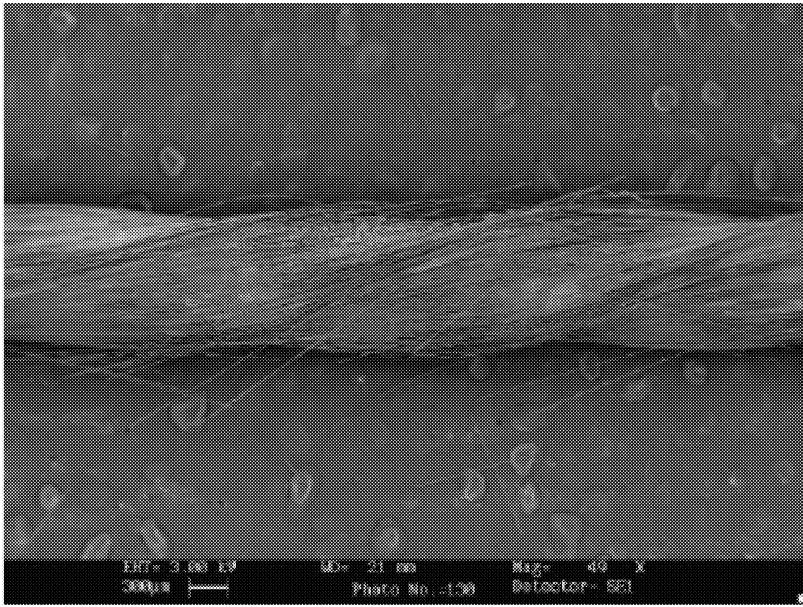


图2 三维编织物中单根纱线链式模型
Fig. 2 The catenarian model of single yarn in 3D braided preforms

从图3 观察，每根纱线是被一根发散趋势相同但编织角方向相反的纱线和发散方向相反的另外两根纱线所包络。如果不考虑内外表面纱线的不同，整根纱线是这三根纱线相互挤压状态的周期性重复，且认为对每根纱线的机会相等。从纱线轴向观察，三根纱线的挤压近似为等腰三角形。该假设在图3 剖面显微图片^[3] 中也可得到证实。详细几何描述参见图5。



(a) The profile chart of the preforms



(b) The yarn in the preforms

图3 四步法1 ×1 三维编织预制件显微图片^[4]
Fig. 3 The micrograph of the 3D braided preforms by the four-step 1 ×1 method

对轴对称回转体三维编织复合材料结构件来说，其特点是打紧平面相互平行，轴线为一直线，沿轴向的纱线阵列数不发生变化。可采用等编织花节，也可以通过使用适合于工程构件形状的芯轴和改变纱线方向角进而改变编织花节，得到满足几何结构形状要求的工程构件。

如图4 所示。设这种构件的纱线在 yz 面的环状有效阵列为 $M \times N$ ，复合材料三维空间内表面曲线可由描述芯轴的外轮廓线绕轴线回转而成。过轴线的平面将这种构件分割(如图4(b)) 。描述芯轴的外轮廓线平面曲线 $R_i = F_0(x)$ (直管状构件为 $R_i = \text{常数}$) 即是复合材料的内表面轮廓线用于分割微单元的同轴曲面的轮廓线的曲线簇方程，为 $R_{i+1} = F_i(x)$ (共 $N+1$ 个曲面， $0 \leq i \leq N$ ，整数)。编织花节的尺寸为 h ，可以根据编织具体条件决定，也可以通过实验确定其实际大小。这里设为常量，即 $h =$ ，那么在对构件进行分割时取平

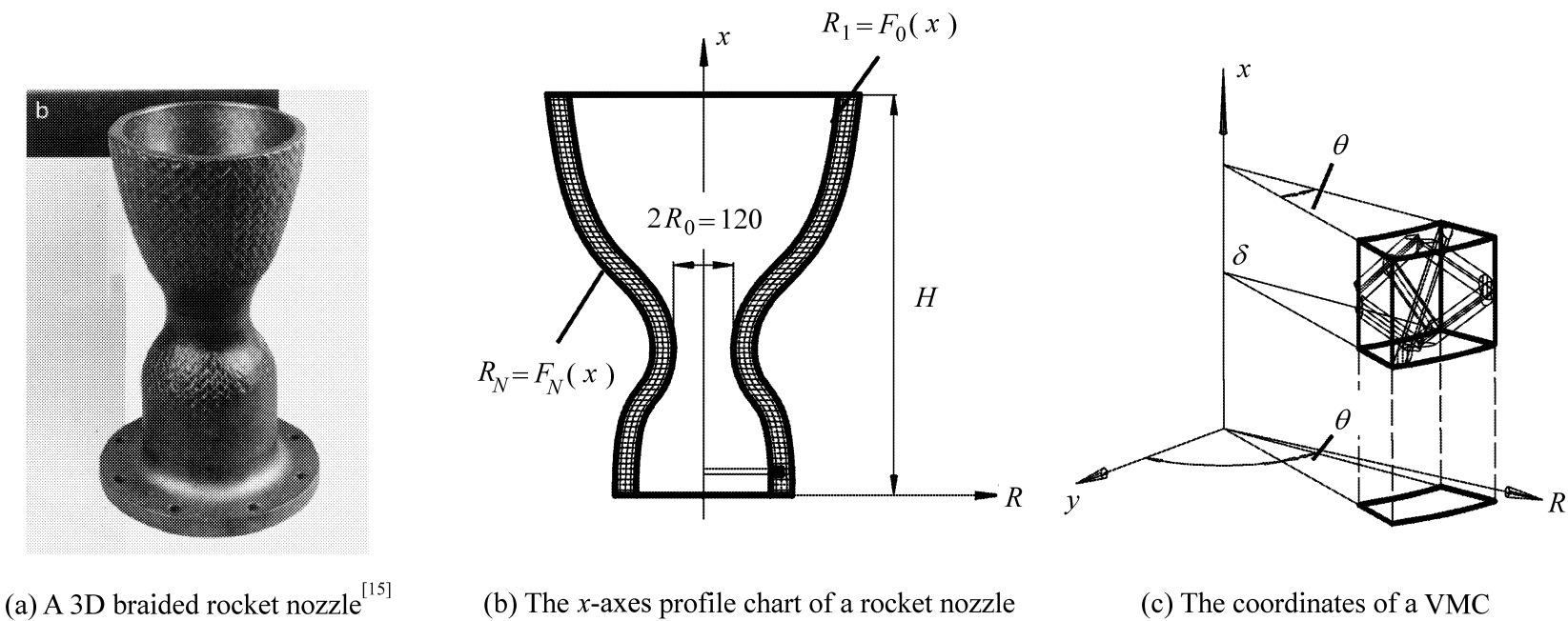


图4 三维编织火箭喷管及其模型
Fig 4 A 3D braided rocket nozzle and its model

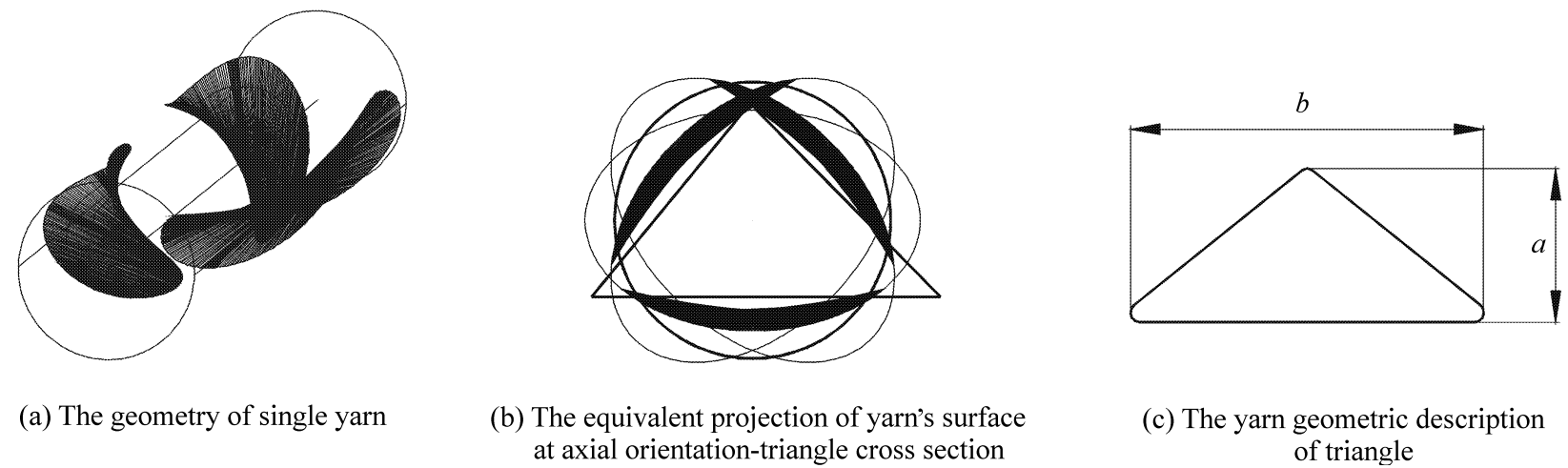


图5 单根纱线等效横截面
Fig 5 The equivalent cross section of single yarn

面簇 $x_n = n$ ($0 \leq n \leq H/\Delta x$, 整数。H 为构件的轴向尺寸)。在坐标系中, 可以认为该面即为预制件的打紧平面。

(1) 忽略构件表面单元与内部单元的不同, 任意可变微单元的体积计算。

在垂直于 x 轴的平面内, 第 $n+1$ 层第 $i+1$ 个代表性可变微单元的体积表达式为:

$$U_{n+1,i+1} = \frac{\int_{x_n}^{x_{n+1}} (2F_i(x) R_{i+1} + R_{i+1}^2) dx}{M} \quad (0 \leq i \leq N-1, 0 \leq n \leq H/\Delta x; \text{整数}) \quad (1)$$

式中: R_i 为沿径向第 i 层单元径向半径增量(修正后); $F_i(x)$ 为可变微单元内表面轮廓曲线。

(2) 描述纱线断面形状的 a 、 b , 倾斜状态的角度 α 、 β 。

根据前文的假设, 纱线的等效几何垂直截面如图5所示。设面积为 $A_f = ab/2$; 纱线未变形前的圆截面积 $A_f = d^2/4$ (d 为纱线截面直径)。为满足

几何计算的需要, 引入纱线截面折减系数 λ 。

$$a \times b = 2 A_f / \lambda, \quad A_f = A_f / \lambda \quad (1) \quad (2)$$

反映纱线倾斜状态的方向角 α 、 β 如图6所示。建立局部坐标系 $xy'z'$, x' 向指向编织方向, 与图4中的编织方向一致。

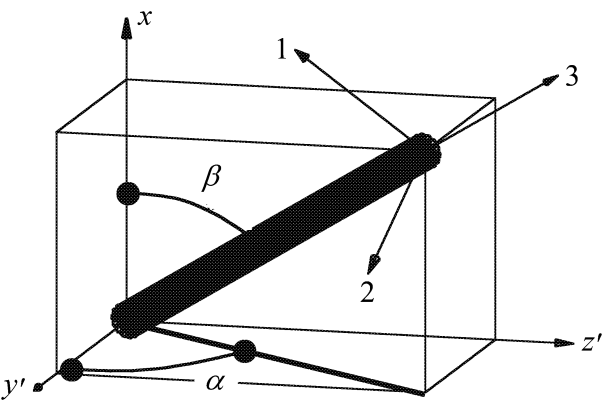


图6 方向角 α 、 β
Fig 6 The orientation angles of yarn α 、 β

图7(b) 是纱线在微单元剖面中的分布示意图, 图7(c) 为编织体的代表性可变微单元沿对角线并与 x 向平行的剖面(左)和可变微单元的 x 向投影(右)。

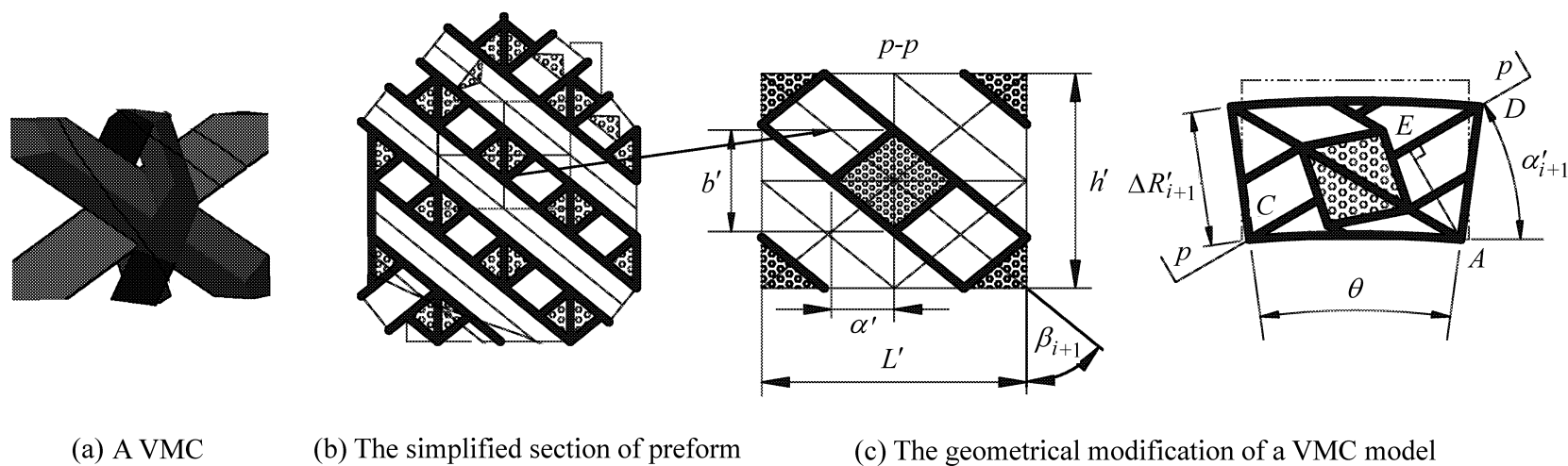


图 7 可变微单元的几何描述

Fig 7 The geometrical description of a VMC

由关系式:

$$\begin{aligned} \overline{AC} = B = \frac{2 R_{i+1}}{M} \cos \alpha' &= \frac{B}{L}, a \times b = 2 A_f \\ B = \frac{a}{\sin \alpha'} + \frac{b \cos \alpha'}{\cos \alpha'} &, L = \frac{2a}{\sin 2 \alpha'} + \frac{b}{\cos \alpha'} \\ &= \frac{2b}{\sin \alpha'} \operatorname{tg} \alpha' = L \end{aligned} \quad (3)$$

推得

$$\begin{aligned} a &= \frac{4 A_f B}{B^2 + 64 A_f^2} \\ b &= \frac{B^2 + 64 A_f^2}{2 B} \\ \cos \alpha' &= \frac{B^2 - 64 A_f^2}{B^2 + 64 A_f^2} \\ \sin \alpha' &= \frac{B^2 + 64 A_f^2}{B^2 + 64 A_f^2} \end{aligned} \quad (4)$$

代入 $B = 2 R_{i+1} / M$ 得描述纱线截面参数变量随半径变化的函数: $a = f(R_{i+1})$, $b = g(R_{i+1})$ 及描述纱线轨迹变化的函数: $L = h(R_{i+1})$, $\alpha' = \mu(R_{i+1})$ 。

可变微单元径向厚度即半径增量为:

$$R_{i+1} = \frac{8 A_f^2 + B^2}{B^2 - 64 A_f^2} \quad (B > 8 A_f) \quad (5)$$

在上述推导过程中, 采用了微单元内侧宽度为直线 L 、对应长度为圆弧长度的立方体的假设。为了与实际管状微单元吻合, 需将立方体映射为符合实际情况的扇形体, 如图 7(c 右) 所示。同时需要对单元的几何形状进行修正。点划线形状为变形前的形状。假设微单元变形前后的体积、编织花节、纱线的变化趋势和纱线百分数不变, 而描

述纱线的方向的角度及径向增量 R_{i+1} 发生了变化。基于这种映射关系的变化对上述三个参数进行修正。

设修正后的半径增量为 R_{i+1} :

$$R_{i+1} = R_i^2 + 2 R_i R_{i+1} - R \quad (6)$$

修正后为:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{R_{i+1}}{2 R \operatorname{tg}(\alpha' / 2) + 1} \quad (7)$$

修正后为:

$$\operatorname{tg} \alpha' = [2 R \sin(\alpha' / 2) + R_{i+1} \times (\operatorname{tg} \alpha' \cos(\alpha' / 2) + \sin(\alpha' / 2))] / \cos \alpha' \quad (8)$$

(3) 微单元中对角纱线的长 L_{i+1} 和可变微单元中纱线的总体积 $U_{f,i+1}$ 。

单束对角纱线的长度表达式:

$$L_{i+1} = L_{i+1} = \frac{B^2 + B^2}{B^2 - 64 A_f^2} \quad (B > 8 A_f) \quad (9)$$

由图 7 可以看出, 沿非对角线的四段纱线可等效为两根空间取向角为 (α', β_{i+1}) 、 $(\alpha', -\beta_{i+1})$ 的对角纱线。由于编织结构的连续性, 长度也可分别取为可变微单元的对角线长 $L_{i+1} / 2$ 。那么纱线的总体积:

$$U_{f,i+1} = 4 A_f L_{i+1} = 4 A_f L_{i+1} / 2 \quad (10)$$

(4) 可变微单元中纱线及基体的百分数

可变微单元中纤维的百分数函数:

$$V_f = f(R_{i+1}, x) = \frac{U_{f,i+1}}{U_{N+1,i+1}} \times 100 \% \quad (11)$$

将式 (1) 的积分结果和式 (10) 带入上式得纤维的百分数随半径或对应弧长变化的函数。可变微单元基体的百分数 V_m 为:

$$V_m = 1 - V_f \quad (12)$$

(5) 用可变微单元的几何特性推得已知芯轴三维编织管状复合材料的外层几何尺寸。

由式 $R_i = F_i(x)$ 推得描述任意可变微单元在整

体坐标系内外轮廓曲线通式:

$$R_{i+1} = F_i(x) + R_{i+1} \tag{13}$$

(0 ≤ i ≤ N, N 为纱线径向可变微单元的层数)

三维编织复合材料的最外层轮廓曲线方程为:

$$R_N = F_N(x) = F_0(x) + \sum_{i=0}^{N-1} R_{i+1} \tag{14}$$

(6) 由上述公式推导过程中可知 $B > 8 A_f$, 可以作为可织与否的条件。代入 $B = 2 R_0 / M$, $A_f = A_f$, 可得 $R_0 > 4 M A_f$ 。其中通过已知构件的最小 R_0 , 可以决定纱线的阵列与编制纱线截面面积之间的函数变化关系。

2 例子及讨论

以上几何分析模型公式推导适用于轴线为直线的三维编织回转体构件。本文作者分别以直管状和火箭喷管状三维四步1×1 编织回转体预制件结构的复合材料构件为例展开分析。推导过程中两种情况均取等编织花节。

(1) 直管状1×1 四步法三维编织管状构件

直管状1×1 四步法三维编织管状构件选用成熟的编织例子^[14]。制件用12K 石墨纤维束编织, 环氧树脂固化成型; 纱线的横截面积 $A_f = 0.447 \text{ mm}^2$ (为便于对比, 取多个 A_f 的值进行描述), 纱线截面折减系数 取为常数0.8; 纱线中的纤维的拉伸弹性模量 $E_f = 234.40 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_f = 0.22$; 环氧树脂的弹性模量 $E_f = 35.4 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu_f = 0.34$ 。构件的芯轴直径 $R_0 = 60 \text{ mm}$, 编织花节经验估算值为 $h = 4 \text{ mm}$; 取周向纱线数为 $M = 380$, 径向阵列数 N 未定。

前节所推公式得以简化: 内径轮廓线方程式简化为 $R_0 = F_0(x) = 60$; 可变微单元对应中心角 $= 360 / M (^\circ)$;

式中 $B = 2 R_{i+1} / M (\text{mm})$ 。通过编程计算得到以下分析结果:

可变微单元的径向半径增量随管状三维编织构件半径的增大而减小(如图8)。图8 中用弧长 B 作为横坐标, 与半径 R 为线性关系(后文叙述相同), 最终趋于某一数值。而当纱线断面尺寸达到或大于 0.5 mm^2 时, 纱线的半径增量在近内径处出现上升段, 这种现象实际不会存在, 因而在纱线阵列、编织花节及内径一定的情况下, 纱线的线径不能大于某一数值。这个结论在管状四步法三维编织设计时

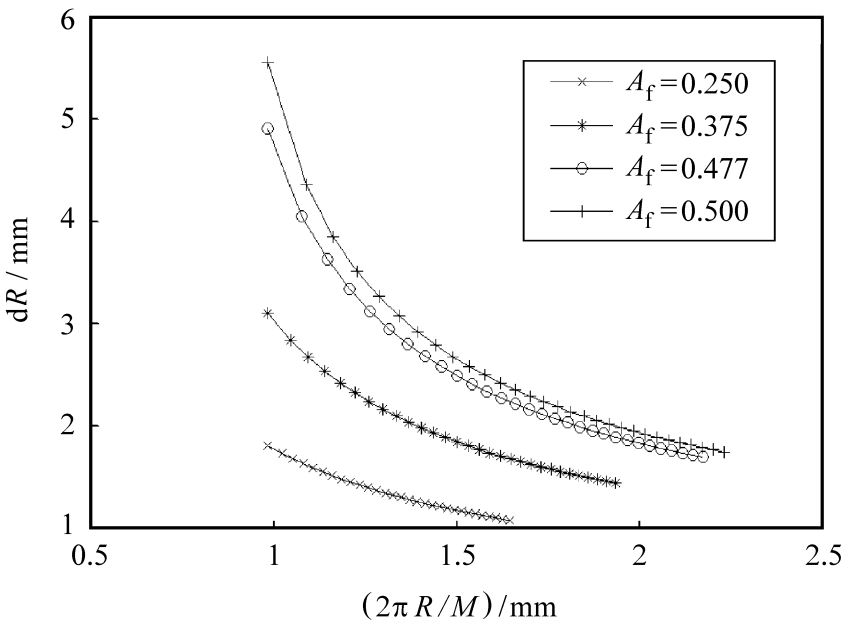


图8 可变微单元的径向半径增量随对应弧长的变化趋势

Fig 8 Tendency of the VMC radius increment with its corresponding length of arc

具有实际的指导意义。

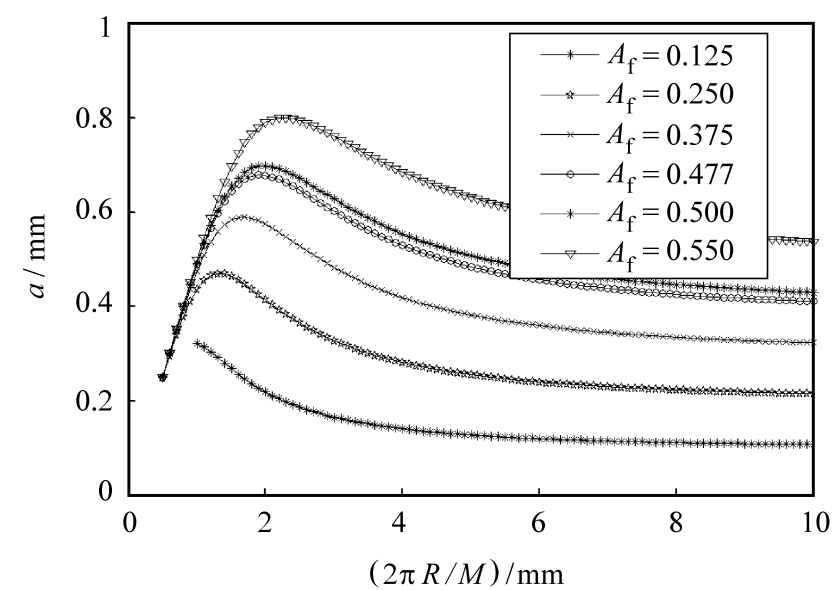
在纱线的线径取大于某一数值时, 折减几何等效三角形断面的高 a 均出现随半径的增大而增大的上升段, 达到极限值后随半径的增大而减小, 最终趋近于常量。避免随半径的增大而增大的上升段这种现象的方法是减小纱线的截面尺寸。而减小的后果是阵列的增加才可以得到相同的构件尺寸, 影响到编织设备的复杂性和可编织性能。而 b 的总体趋势是随半径的增大而呈下降趋势, 并最终趋近于常量, 如图9 所示。由于计算中用到了确定的花节尺寸, 因而 b 值趋近于某一个数值。

六面体可变微单元中的纱线空间取向角 总趋势随层数的增大而减小, 管壁足够厚时, 角度趋于恒定的值; 而编织角 随半径的增大而减小, 达到某一最小值时开始增大, 最终趋于恒定的值, 如图10 所示。

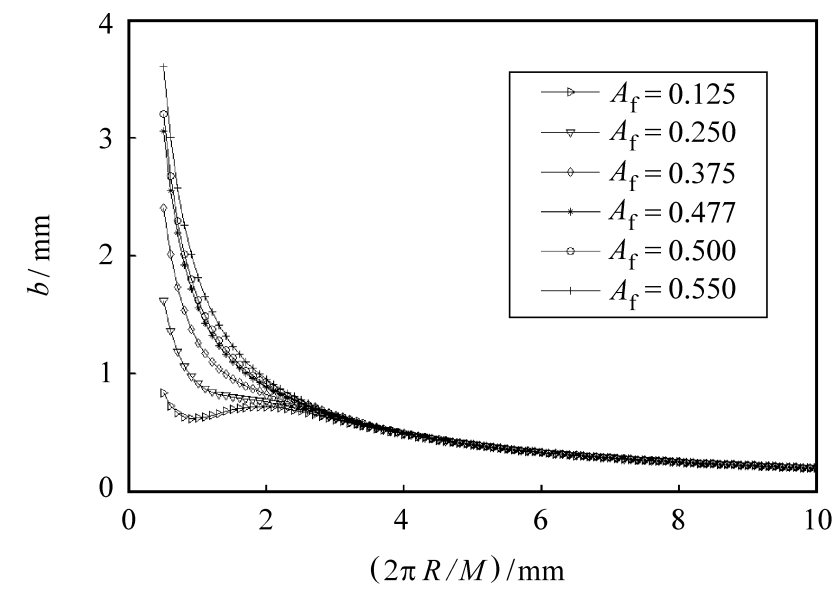
对于确定的编织阵列方案, 可变微单元中纱线的长度随半径的变化趋势如图11(a) 所示。纱线的线径将严重影响编织结构的可行性。含有下降段的纱线截面所表达的曲线, 该编织方式表示不可织或结构较差。

可变微单元的体积随半径变化趋势如图11(b) 所示。体积随半径变化幅度随纱线截面的减小而趋向一致。也就是说, 径向纱线数量足够多时, 管状构件的表面趋向于单向纤维复合材料的性能。

可变微单元纤维百分数变化趋势如图11(c) 所示。在靠近构件内径的微单元的纱线百分数随半径的增大而增大, 直至达到恒定的值。截面积越大的纱线的编织物在内径处的微单元纤维百分含量越小。



(a) The triangle height ‘a’ of yarn cross-section



(b) The triangle bottom-margin length ‘b’ of yarn cross-section

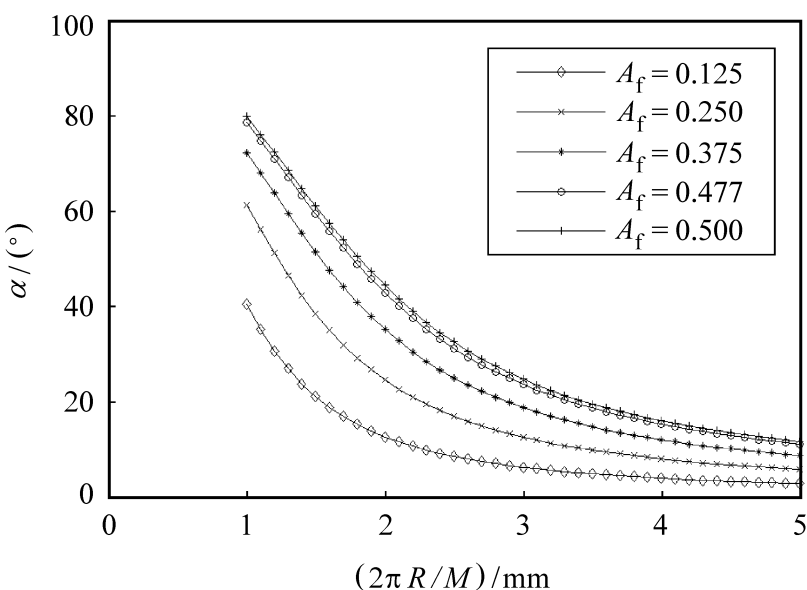
图9 纱线横截面等效折减三角形参数
随可变微单元对应弧长的变化趋势

Fig 9 Tendency of the equivalent reduction parameters of
yarn triangle cross-section with its corresponding length of arc

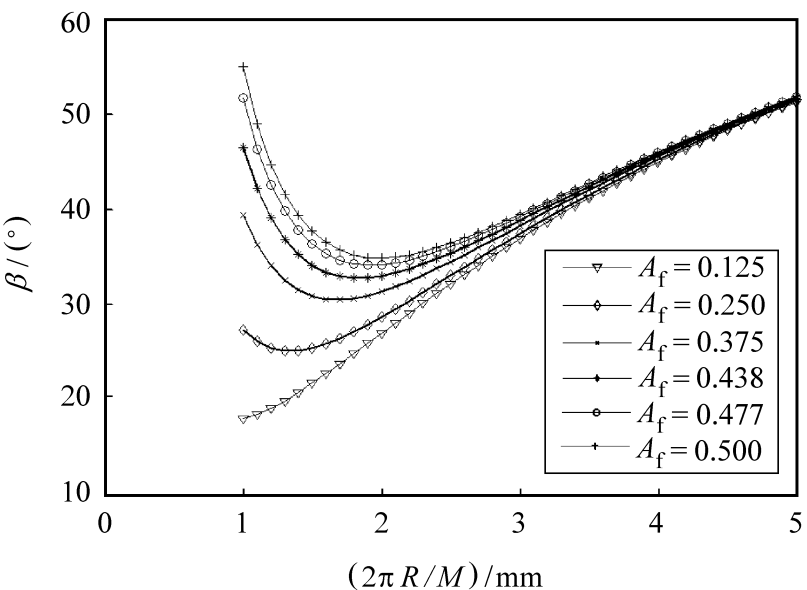
可见，纱线的线径和阵列选择是否合理将直接关系到织物是否可织及细观组织结构的合理性。在本例中，处于构件内表面的微单元纱线间距较小，单元的径向层厚比外层层厚大得多，反而造成纱线的方向角过大而影响到织物的性能。假如采取措施打紧必然使纱线产生较大屈曲。虽然增大了纱线的百分含量，但纱线在编织过程中承受预应力并有可能在编织过程中就受到损伤，从而对优化设计构件的性能造成不利影响。

(2) 四步法1×1 三维编织火箭喷管构件

四步法1×1 三维编织火箭喷管构件轴线为直线。与直管状编织构件不同的是，火箭喷管的纤维百分数不仅在半径方向，而且在轴向也发生变化。火箭喷管构件在编织过程中可能存在编织花节的变化。这里假设织机沿编织方向步进量不变，即花节为一常量。编织体的致密程度决定于编织纱线径向



(a) Tendency of angle α with its corresponding length of arc



(b) Tendency of angle β with its corresponding length of arc

图10 纱线空间取向角随可变微单元对应弧长变化趋势
Fig 10 Tendency of orientation angles of
yarn with its corresponding length of arc

压紧情况和打紧程度。

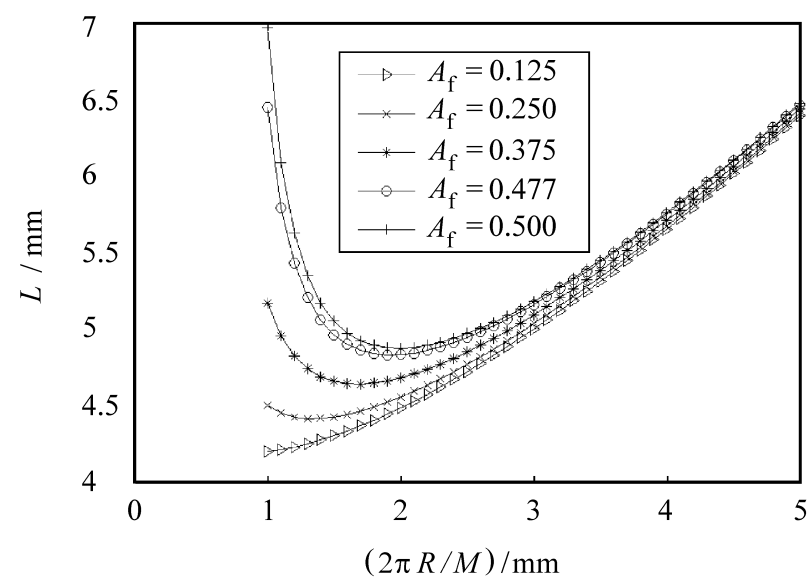
在喷管喉部(最小尺寸部位)选择与上例相同的编织纱线阵列和纱线直径，以确保整体编织工艺可行。

火箭喷管编织用芯轴轮廓曲线如图12所示。用分段函数 $R = F_0(x)$ 表示如下：

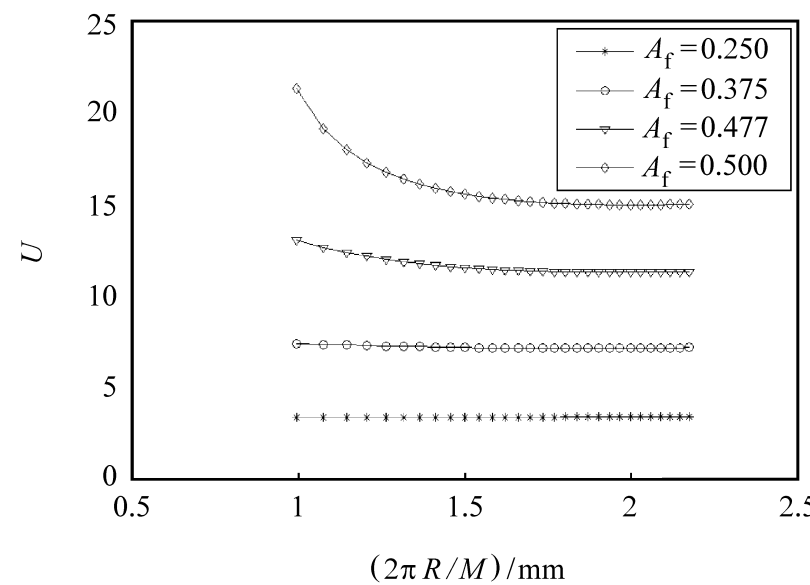
$$\begin{aligned} R &= 140 & x & \in [0, x_A] \\ R^2 + (x - x_A)^2 &= 140^2 & x & \in (x_A, x_B] \\ (R - R_C)^2 + (x - x_C)^2 &= 160^2 & x & \in (x_B, x_D] \\ R^2 + (x - x_C)^2 &= 180^2 & x & \in (x_D, x_E] \\ \frac{R - R_E}{R_E - R_F} &= \frac{x - x_E}{x_E - x_F} & x & \in (x_E, x_F] \end{aligned}$$

(15)

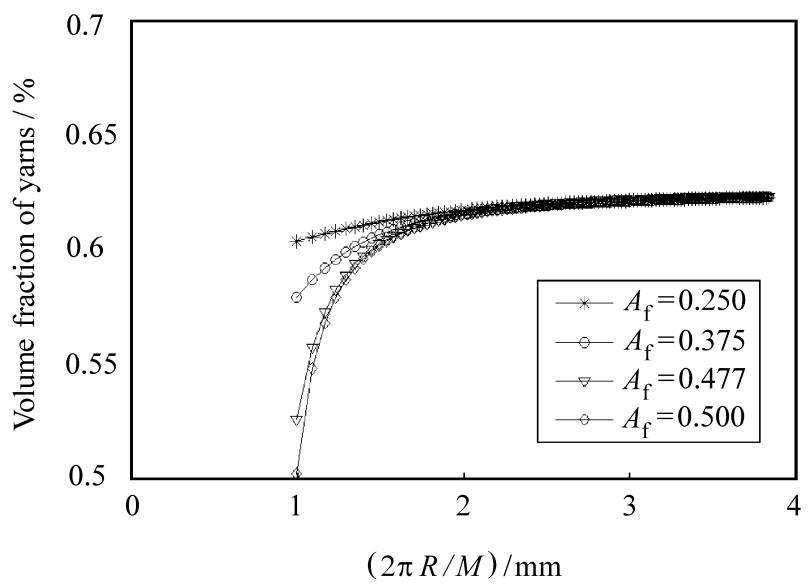
火箭喷管外廓曲线 $R_{i+1} = F_i(x)$ ($0 \leq i \leq N$, N 为整数，本例取 $N = 20$) 由式(3)、式(5)、式(6)和式(13)， R_{i+1} 按式(15)赋初值即可求得决定各层可变微单元的轮廓曲线及外层轮廓线。从而确定编



(a) Tendency of length of diagonal yarn in VMC with its corresponding length of arc



(b) Tendency of the VMC volume with its corresponding length of arc



(c) Tendency of yarn volume fraction in VMC with its corresponding length of arc

图11 可变微单元中纱线长度、体积及体积百分数
随对应弧长的变化趋势

Fig 11 Tendency of yarn length or volume and its fraction in a VMC with its corresponding length of arc

织火箭喷管的最终几何尺寸。

由图13 可以看出, 三维编织火箭喷管沿轴向壁厚出现较为明显差异。且芯轴的直径越大部位, 壁厚越小。与第一例相同的是编织阵列也受到芯轴

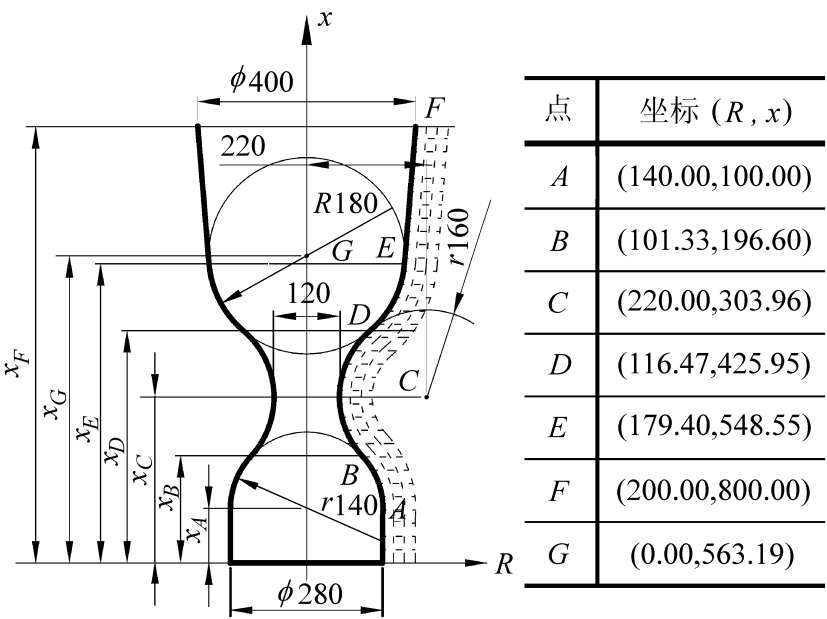


图12 三维编织火箭喷管用芯轴

Fig 12 The mandrel of a 3D braided rocket nozzle

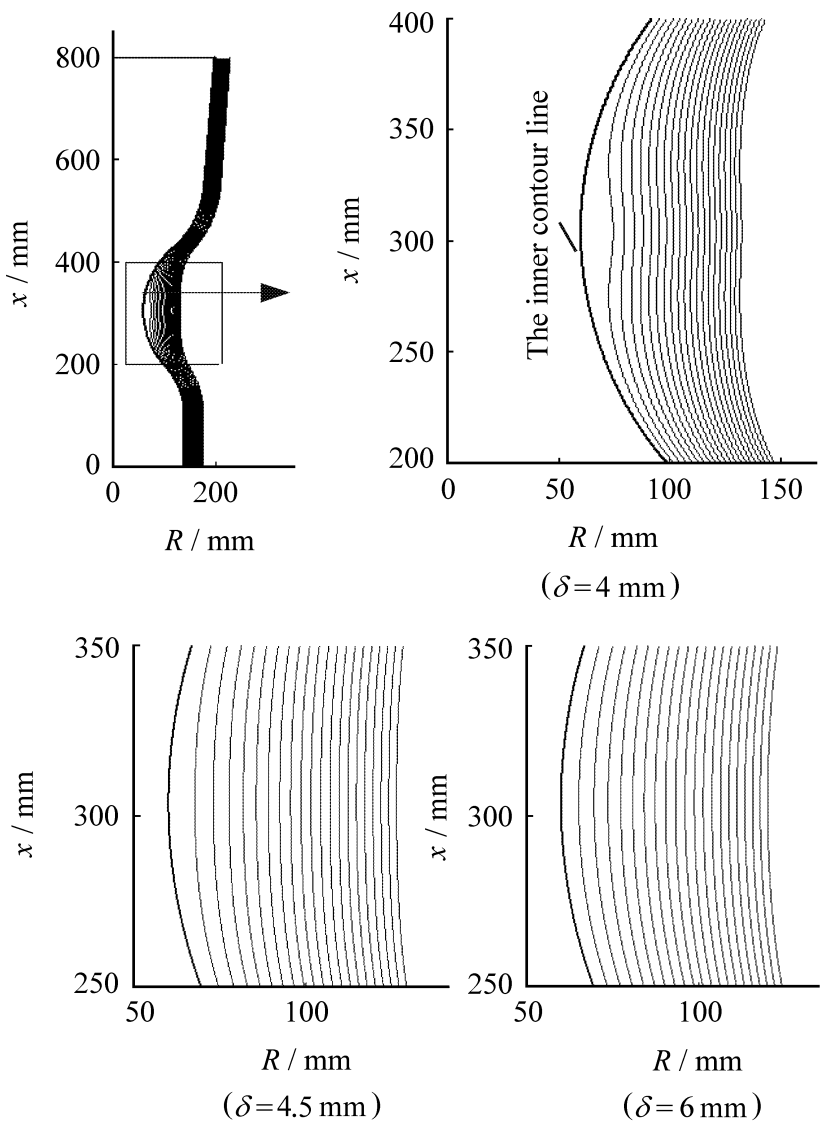


图13 编织火箭喷管剖面结构仿真图(剖面)

Fig 13 The simulation architecture of a 3D braided rocket nozzle (profile)

尺寸的限制。在图13 右图中可见在喉部区域出现与芯轴轮廓线不相吻合的情况。主要原因之一是纱线的阵列在此处过密, 或者说纱线截面尺寸过大, 造成的过度挤压而引起微单元径向尺寸增大; 另一个原因是因为该处曲率过大引起“搭桥”现象, 而导致该处的壁厚明显偏大。

避免上述现象的方法可以通过避免设计过大曲

率的腰鼓形芯轴和台阶形编织件。在编织工艺上采用减少阵列数、减小编织纱线直径或增大花节等方法。如果织机的性能能够达到变速要求，使用适时变化的速率，即变花节 $= f(x)$ ；或整体编织过程用较大的花节。如在图13中，花节分别取4 mm、4.5 mm和6 mm。可见随花节的增大，喉部区域的性能即得到改善。

在反映可变微单元轮廓曲线的系列曲线(如图13)中，随半径的增大，轮廓线由疏变密。可变微单元径向尺寸由大变小。

火箭喷管整体纤维百分数函数用式(11)求得。图14所示是三维编织火箭喷管喉部轴剖面纤维百分数梯度变化云纹图及两种花节的变化趋势比较。可见，处于喷管喉部的圆弧区域靠近芯轴的编织体部分纤维百分数最低，随半径增大百分数逐渐增大，最后稳定在某一数值；而取较大的花节($\delta = 6\text{ mm}$)时，虽然减小了喉部区域的百分数梯度，但纤维百分数则整体降低。

比得出相同阵列及芯轴尺寸情况下各参数间的相互变化关系；并对火箭喷管状编织构件的几何形状进行了仿真和对其纤维百分数的梯度变化进行了描述。文中公式常量与变量之间，可进行角色互换，所得结论可为三维四向编织构件的结构设计提供有益的参考。

可变微单元模型不仅有助于解决管状构件力学分析中复合材料弹性性能梯度变化的问题，还可用于类似的其他含有梯度性能的二维和多维编织复合材料的几何模型的建立和力学分析。这里等轴向编织花节的矩形横截面的复合材料的单胞分析模型可以看成可变微单元的一个特殊情况。

文中纱线截面几何折减系数 实际上也是随坐标变化的函数，可通过有关力学方法获得，与编织过程中的纱线的张紧程度和打紧情况有关，取为经验常数在含有梯度的三维编织复合材料分析中将引起几何分析误差，进而影响力学分析精度；分析中假设花节为一常量，对变花节的情况未作探讨；不同的固化工艺中树脂的流动方向及固化完成后复合材料的几何形状变化，也会引起纤维百分数的重新分布，进而影响力学性能。这些问题有待进一步加以完善。

参考文献:

[1] Yang J M, Ma C L, Chou T W. Fiber inclination model of three dimensional textile structural composites [J]. J Compos Mater, 1986, 20(9): 472 - 483.

[2] Li W, Hammad M, El-Shiekn A. Structural analysis of 3-D braided preforms for composites, part one: The four-step preforms [J]. J Text Inst, 1990, 81(4): 491 - 514.

[3] Sun H Y, Qiao X. Prediction of the mechanical properties of three dimensionally braided composites [J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(6): 623 - 629.

[4] 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.

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

[6] Zeng Tao, Wu Linzhi. Post-buckling analysis of stiffened braided cylindrical shells under combined external pressure and axial compression [J]. Composite Structures, 2003, 60(4): 455 - 466.

[7] Chen L, Tao X M, Choy C L. Mechanical analysis of braided composites by the finite multiphase method [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(16): 2383 - 2391.

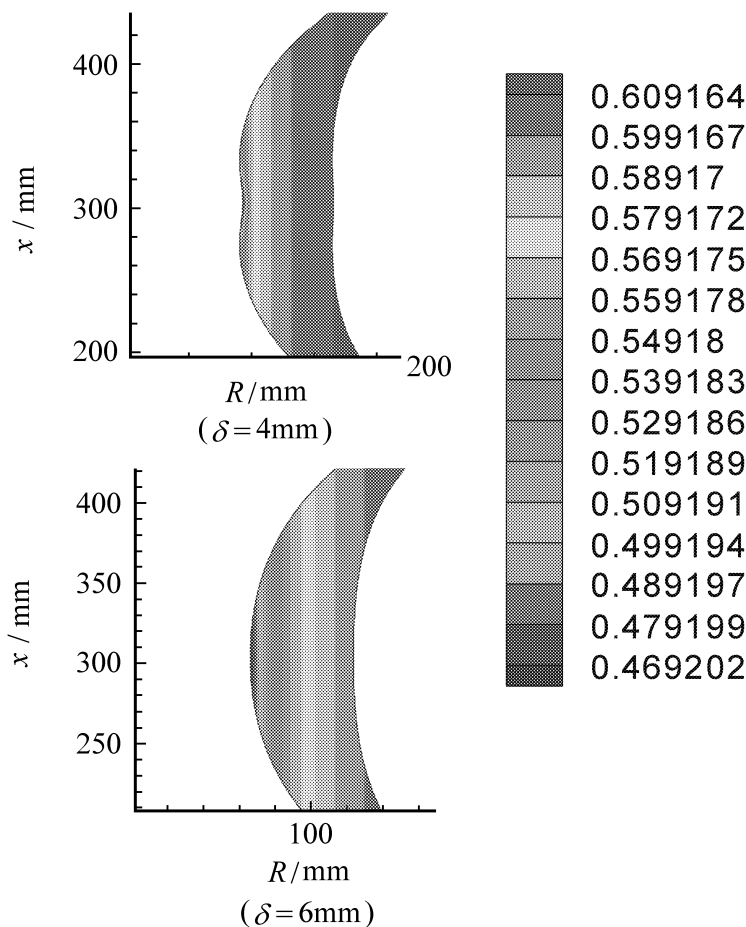


图14 火箭喷管喉部轴剖面纤维百分数变化趋势
Fig 14 Tendency of yarn volume fraction in the throat
X axes section of the rocket nozzle

3 结 论

本文作者针对工程实际中的三维管状编织复合材料构件中存在梯度的情况，提出了用可变微单元几何模型对其细观结构参数化描述的观点。通过系列公式的推导和对同种编织结构不同几何参数的对

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

[9] Gu Bohong . Prediction of the uniaxial tensile curve of 4-step 3- d imensional braided prefor m [J] . Composite Structures , 2004 , 64(2) : 235 - 241 .

[10] D Amato E. Frite element modeling of textile composites [J] . Composite Structures , 2001 , 54(4) : 467 - 475 .

[11] Bigaud David, Hamelin Patrice. Stiffness and failure modeling of 2D and 3D textile-reinforced composites by means of imbricate-type elements approaches [J] . Computers and Structures , 2002 , 80(27 - 30) : 2253 - 2264 .

[12] 黄小平. 四向矩形复合材料几何细观结构和力学性能研究 [D] . 南京: 南京航空航天大学, 2001 .

[13] 陈 利, 李嘉禄, 李学明. 三维四步法圆形编制结构分析 [J] . 复合材料学报, 2003 , 20(2) : 76 - 80 .

[14] Wang Y Q, Wang A S D. Spatial distribution of yarns and mechanical properties in 3D braided tubular composites applied [J] . Composite Materials , 1997 , 4(2) : 121 - 132 .

[15] Mouritz A P, Bannister M K, Falzon P J, et al . Review of applications for advanced three- d imensional fibre textile composites [J] . Composites Part A , 1999 , 30(12) : 1445 - 1461 .