

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.05.013

预制体织造过程的数字单元法模拟研究

檀晨晨, 单忠德, 孙正, 王尧尧

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 预制体作为复合材料的增强相, 决定着复合材料的性能。而预制体的性能往往取决于纱线的空间结构, 为了反映织物内部纤维束的宏观三维空间结构和微观截面几何构型, 通过将纱线离散化, 用数值模拟和仿真方法模拟织造过程。本文综述了复合材料预制体织造过程的数字单元法模拟研究进展。在微观几何结构方面, 详述了数字单元法研究由理论到应用的发展历程, 对先进的数字单元建模方法进行了介绍, 指出当前模型对于数字单元法模拟纺织过程较为理想化, 未考虑纤维的抗弯刚度、空气阻尼效应以及横向压缩引起的能量损失等工艺参数, 指出今后的研究中可进一步优化数字单元法, 实现参数化建模, 深入研究纤维束变形机理以获得纤维更为真实的微观几何结构模型。

关键词: 纺织复合材料; 织造过程; 数字单元法; 摩擦磨损; 微观几何结构

中图分类号: TS155.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)05-0889-10

Research on Digital Element Method Simulation of Weaving Process of Preforms

TAN Chenchen, SHAN Zhongde, SUN Zheng, WANG Yaoyao

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As the reinforcing phase of the composites, the preform determines the performance of the composites. The performance of the precast often depends on the spatial structure of the yarn. To reflect the spatial configuration and micro-geometric structure of the yarn inside the fabric, through the discretization of the yarn, the weaving process is simulated by numerical simulation and simulation methods. We review the progress on digital element method simulation of the weaving process of composite preforms. In terms of micro-geometric structure, this paper details the development process of digital element method research from theory to application and introduces the advanced digital element modeling method. It points out that the current model is idealized for the digital element method to simulate the textile process, and does not consider the bending stiffness of the fiber, the air damping effect and the energy loss caused by lateral compression, etc. This paper also points out that the digital element method can be further optimized in future research and parametric modeling can be realized, and that the deformation mechanism of the fiber bundle is studied to obtain a more realistic micro-geometric structure model.

Key words: textile composites; weaving process; digital element method; friction and wear; microscopic geometry

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究专项项目。

收稿日期: 2022-04-01; **修订日期:** 2022-09-13

作者简介: 檀晨晨, 女, 博士研究生, E-mail: 13101882677@nuaa.edu.cn。

通信作者: 单忠德, 男, 南京航空航天大学校长, 中国工程院院士, 研究员, 博士生导师, 机械结构力学与控制国家重点实验室主任。以第一完成人获国家科技进步一等奖、国家技术发明二等奖、中国专利金奖、中国机械工业科学技术奖特等奖、北京市科学技术奖一等奖; 国家杰出青年科学基金项目获得者、第一批中组部“万人计划”科技创新领军人才; 获何梁何利科学与技术青年创新奖及“第二届全国创新争先奖状”等。E-mail: shanzd@nuaa.edu.cn。

引用格式: 檀晨晨, 单忠德, 孙正, 等. 预制体织造过程的数字单元法模拟研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 889-898. TAN Chenchen, SHAN Zhongde, SUN Zheng, et al. Research on digital element method simulation of weaving process of preforms[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 889-898.

复合材料由于具有低密度、高强度等特性受到了广泛的关注,纤维束在复合材料预制体内部相互交织,构成空间互锁整体网状增强体^[1]。复合材料在航空航天结构上的应用实现了轻质化的目标,其用量已经成为航空航天技术先进性的标志之一。预制体是用以制造复合材料制品的增强材料形式^[2],是由碳纤维通过机织、编织、针织或其他方法制成的具有特定外形纺织品的总称,是复合材料的骨架。预制体的空间几何构型主要取决于纤维的分布、取向和体积分数,不仅影响着复合材料中孔隙分布和几何形状,同时也决定了复合材料的机械性能^[3]。

而预制体的结构由织造方法及工艺参数共同决定,预制体的本质是一种宏观、细观和微观并存的纤维集合体,具有空间结构多尺度化、组分材料异质化的特征^[4],其力学性能与三维几何结构高度关联。因此,开展织物多尺度几何模型结构构建与力学性能仿真模拟表征工作研究,具有重要理论意义。

深入研究预制体的宏观、细观和微观的多尺度模型是进行力学性能研究的基础,而对织物结构的优化离不开模拟仿真。本文从纺织过程的数字单元法模拟这个方面进行综述,回顾了其发展历程,分析了当前研究的热点问题及方法,并对后续研究方向进行了展望,希望通过本文的工作为相关研究人员全面了解该领域的研究现状提供一定的参考。

1 纺织过程的数字单元法

1.1 纱线的微观几何模型

碳纤维复合材料具有可设计性,其多尺度结构及组成分数决定了材料的机械力学性能。20世纪90年代,研究人员逐步建立起符合纱线尺度上微观结构的单胞模型,并据此建立了预制体织造工艺参数与其细观结构模型参数之间的关系。邵将等^[5]在李毓陵^[6]研究的基础上,针对三维纵横编织物的建模仿真问题,通过计算机模拟纵横步进编织运动并采用Bezier样条曲线对纱线空间运动轨迹进行拟合,利用计算机三维图像技术对三维编织结构进行展示,从而解决了纵横编织工艺预制体的仿真问题,得到比较精确的织物宏观结构。矩形编织物的编织工艺图如图1所示。而后张小萍等^[7]以三维管状编织物为例,在分析纱线运动规律的基础上,构建纱线的虚拟现实建模语言(Virtual reality modeling language, VRML),模型如图2所示,提出了参数化计算编织织物的算法,实现参数化构建三维管状编织织物的模型,并对编织工艺过程进行了动画仿真。马文锁等^[8]由点群、点阵到空间群映射的方法推导三维编织几何结构,用编织点群、平移群和点式空间群的矩阵表示对代表性纱线段进行变换,推导三维空间纱线交叉几何结构,为新三维编织方法的开发研究提供了理论支持。

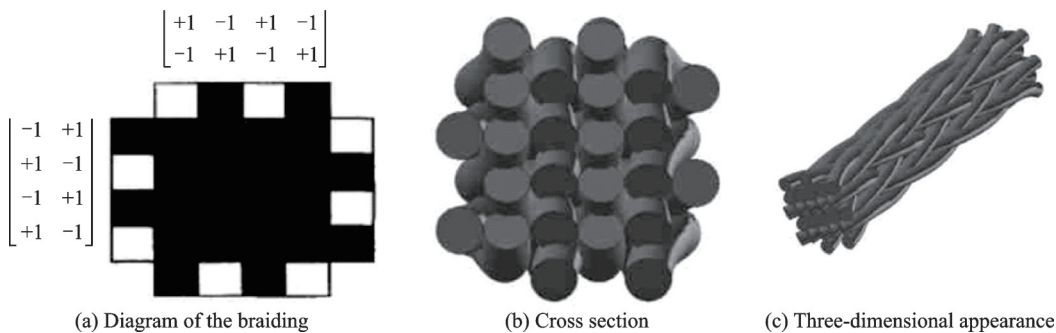


图1 四步法4×4矩形编织物的编织工艺图及计算机模拟

Fig.1 Weaving process diagram of four-step method 4×4 rectangular weave and computer simulation



图2 纱线的VRML模型

Fig.2 VRML model of yarn

对于三维旋转编织预制体的模型构建问题,肖田华等^[9]在前人的基础上,分析了旋转编织设备原

理和工艺过程,以矩阵换算的方式描述携纱器携带纱线进行编织过程的坐标转换,并建立了携纱器的坐标变换与拨盘状态矩阵之间对应关系的数学模型,利用计算机编程和三维图形软件实现了预制体三维空间结构的建模。

Liao等^[10]为了简化带芯模编织并调整工艺参数来实现复杂形状的编织过程和推进这一技术,开发了一个CAD模型来描述三维圆形编织的外部 and 内部的几何形状。与其他不同模型的模拟结构以及与实际纱线的比较表明,模拟织物具有更高的准

确性,并能更好地对真实预制件进行视觉表征。该模型考虑了纱线的结构特点和纤维的有限尺寸,考察了纱线卷曲、组织形式和管状形状对预制件中纱

线外观的影响。

目前现有的典型模拟方法及其特点如表 1 所示。本文针对数字单元法做详细综述。

表 1 现有的典型模拟方法及其特点

Table 1 Typical existing simulation methods and their characteristics

模拟方法	特点	适用范围
梁弯曲理论	认为纤维束横截面形状发生变化,而面积保持不变	忽略纤维之间的接触,精度较差
数字单元法	将纤维束看作弹性梁,描绘纤维之间的接触及摩擦状态	模拟纱线状态较为真实,精度较高
图像传感器探测技术	获得纤维束一系列截面图像	精度高,但所需实验成本较高

1.2 数字单元法模拟纱线接触

Wang 等^[11]提出了用控制体积的方法来建立预制体中纤维束的细观拓扑结构,将方形预制体分为 3 个区域,分别建立内部单胞、表面单胞和角单胞模型。在纱线摩擦磨损过程中,研究人员^[12-13]只能研究其拓扑结构,无法用解析几何来描述其中力学的变化。随着三维软件技术的发展,研究人员开始着手于建立能够反应复合材料内部微细观结构的实体三维模型。

Wang 等^[14]提出了数字单元法(Digital element approach,DEA)的概念,对纤维束的变形机理进行探索。数字单元法将每根纱线建模为无摩擦节点连接杆单元链,这些杆单元被定义为数字单元,纱线间的接触由接触单元建成。由于数字单元分析的数值过程与有限元分析相似,因此在最初发布时,它被称为有限元方法。

后来,由于两者概念上的差异,将其重新命名为数字单元法。Wang 等^[15]将数字单元法用于模拟纺织过程和纺织织物微观几何形状,如图 3 所示。该模型中,纱线被认为是具有圆形截面的柔性构件,由一组数字杆单元表示。

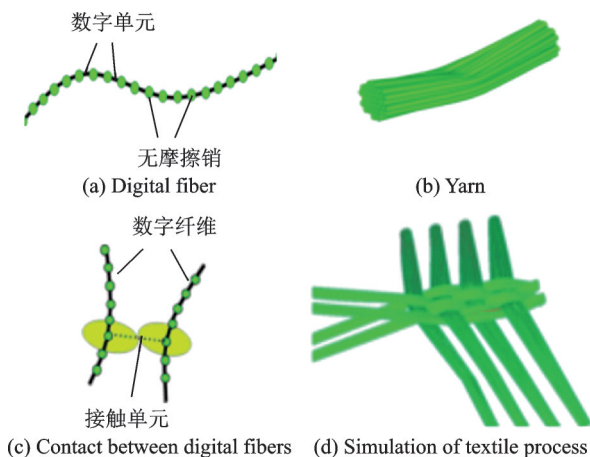


图 3 数字单元仿真的概念

Fig.3 Concept of digital element simulation

由于纱线的伸长量对预制体的微观几何形状影响太小,纱线的弹性可以忽略不计,因此可以用正值较大的惩罚因子 G 来代替 $\frac{EA}{\Delta L}$ 。其中, E 为纱线的弹性模量, A 为截面的面积, L 为单元的长度。因此,数字单元的刚度可以写作

$$K = \begin{bmatrix} G & 0 & 0 & -G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

当节点 m 和节点 l 之间的距离 d_{ml} 小于纱线的直径 D 时,两根纱线之间就会发生接触。当两根纱线发生接触时,会存在两种物理状态:粘着或滑动。如图 4 所示, x,y,z 轴是接触单元的局部坐标。 x 轴垂直于两根纱线,即在接触线方向上; y 轴和 z 轴垂直于 x 轴。接触单元在 x 方向上存在压力,在 y,z 方向上存在摩擦力。

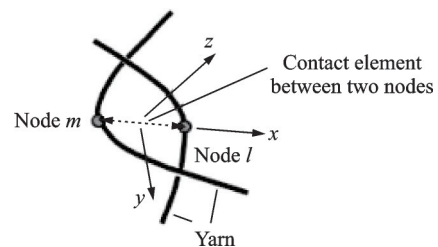


图 4 三维接触单元

Fig.4 3-D contact element

当 $\mu|F_{xm}| > |F_{ym} + F_{zm}|$ 时,两根纱线将会粘着。 μ 为摩擦因数, F_{xm}, F_{ym} 和 F_{zm} 表示节点力。节点力增量与位移增量之间的关系为

$$\begin{bmatrix} -k_n & 0 & 0 & +k_n & 0 & 0 \\ 0 & -k_{sy} & 0 & 0 & +k_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{sz} & 0 & 0 & +k_{sz} \\ +k_n & 0 & 0 & -k_n & 0 & 0 \\ 0 & +k_{sy} & 0 & 0 & -k_{sy} & 0 \\ 0 & 0 & +k_{sz} & 0 & 0 & -k_{sz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{xm} \\ \Delta U_{ym} \\ \Delta U_{zm} \\ \Delta U_{xl} \\ \Delta U_{yl} \\ \Delta U_{zl} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \Delta F_{xm} \\ \Delta F_{ym} \\ \Delta F_{zm} \\ \Delta F_{xl} \\ \Delta F_{yl} \\ \Delta F_{zl} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 k_n, k_{sy}, k_{sz} 分别为压缩刚度和黏性刚度。为避免横截面变形,往往选择足够大的刚度。

当 $\mu|F_{xm}| \leq |F_{ym} + F_{zm}|$ 时,两根纱线将会滑动。两根纱线之间的摩擦可以表示为

$$|F_{sm}| = |F_{ym} + F_{zm}| = \mu|F_{xm}| \quad (3)$$

在 y, z 方向上的节点力可以表示为

$$\begin{cases} F_{ym} = |F_{sm}| \cos \alpha_{ysm} \\ F_{zm} = |F_{sm}| \cos \alpha_{zsm} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\alpha_{ysm}, \alpha_{zsm}$ 为滑动方向和 y, z 方向之间的夹角,可以由前一步骤中的位移来确定,即

$$\begin{cases} \cos \alpha_{ysm} = (\Delta U_{ym} - \Delta U_{yl}) / \sqrt{(\Delta U_{ym} - \Delta U_{yl})^2 + (\Delta U_{zm} - \Delta U_{zl})^2} \\ \cos \alpha_{zsm} = (\Delta U_{zm} - \Delta U_{zl}) / \sqrt{(\Delta U_{ym} - \Delta U_{yl})^2 + (\Delta U_{zm} - \Delta U_{zl})^2} \end{cases} \quad (5)$$

在 x 方向上的节点力和位移的增量之间的关系为

$$\begin{bmatrix} -k_n & k_n \\ k_n & -k_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_{xm} \\ \Delta U_{xl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_{xm} \\ \Delta F_{xl} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当两根纱线沿着相同的直线接触时,全局刚度矩阵会变为奇异矩阵,如图5所示,通过位移微扰法消除奇异矩阵。如图6所示,取 $D=1.96 \text{ mm}$ 、 $\frac{G}{\Delta} = 10^4 \text{ GPa}$ 、数字单元的长度 $l = \frac{d}{4}$ 进行模拟,验证了该模型的有效性。利用数字单元法模拟三维编织预制体模型如图7所示。

该模型与传统的有限元方法相比,传统的有限元方法保持了离散体的物理性质,该模型的单元本身并不保留其物理属性,而是由单元链的物理属性决定。但该模型假设纱线截面在织物内部保持不变,而事实上,纱线的截面会因为纱线间的压缩和摩擦变化而发生变化。

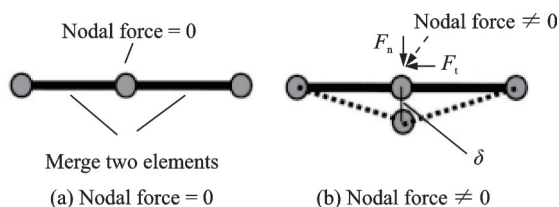


图5 对相邻元素的特殊处理

Fig.5 Special treatment for two aligned neighboring elements

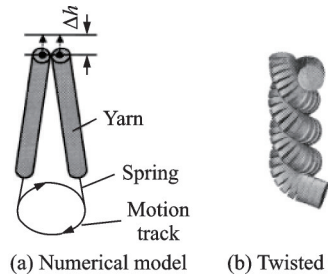


图6 扭转过程的数字模型和仿真结果

Fig.6 Digital model and simulation results for the twisting process

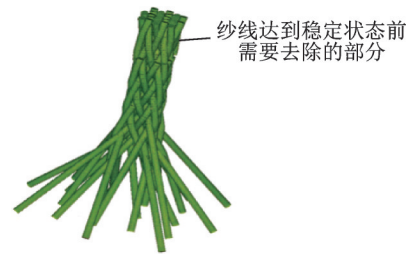


图7 数字单元法模拟三维编织预制体模型

Fig.7 3-D preform braided by digital-element simulation model

为了更加贴合实际,Zhou等^[16]考虑了纱线内部每根纤维之间的接触及纱线截面的变化,提出了多链数字单元法,提供了比单链数字单元法更真实的织物微观几何形状和织物变形的模拟。将纱线离散成数字链,即利用19~50个数字链表示纱线的截面几何形状进行纱线组装。图8给出了纱线处于单面压缩状态下的多链数字单元模型。但在该模型中,数字链之间的接触是通过节点的接触建模。接触单元的长度表示两条数字链之间的距离。由于数字杆节点单元的长度趋近0,因此该数字链具有很高的柔度,能够很好地模拟纤维束受力后产生的变形。该建模方法将纤维束与纤维束之间的相互作用因素考虑到模型中去,建立的三维织物十分接近真实结构。此外,该方法不仅可以用于预测织物的力学行为,还在预测复合材料力学行为方面存在一定的潜能。然而,采用这种方法建立复合材料力学行为分析模型前需要对织物模型进行大量的人工处理工作,改进该建模方法使其能够高效地建立复合材料分析模型迫在眉睫。马莹等^[17-18]在前人的基础上,建立了4、7、12、19和37根数字纤维表征微观几何结构数值模型,并得出结论:当每束纱线由19根数字纤维组成时,所建织物的微观几何结构模型与织造织物样本内部切片图像较为吻合。刘岳岩等^[19-20]基于数字单元法理论,对纱线首尾两端施加周期性边界条件,并对纱线施加恒定张力,实现了织物在织造型过程中的动态仿真。

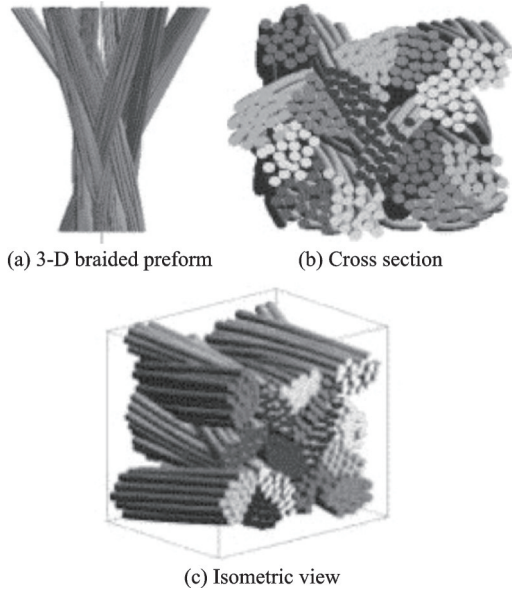


图 8 多链数字单元法生成的三维编织预制体

Fig.8 3-D braided preforms generated by digital element model

为了克服效率问题, Miao 等^[21]采用改进的接触单元公式, 引入两项修正相。如图 9(a)所示, 引入计算两个数字链之间的接触距离, 即 i 到 j' 之间的距离用来计算接触力的大小, 并引入两个数字链之间压缩接触力方向, 提高了接触力的准确性。如图 9(b)所示, 节点 i 的压力可以推导为

$$F'_i = \frac{T}{|T|} \times \frac{F_i \times T}{|F_i \times T|} |F_i| \quad (7)$$

式中 $|F_i|$ 由修正后的距离计算。同理可得 F'_i 。改进的接触单元允许使用相对粗糙的数字单元网格, 节约了近 90% 的计算时间。

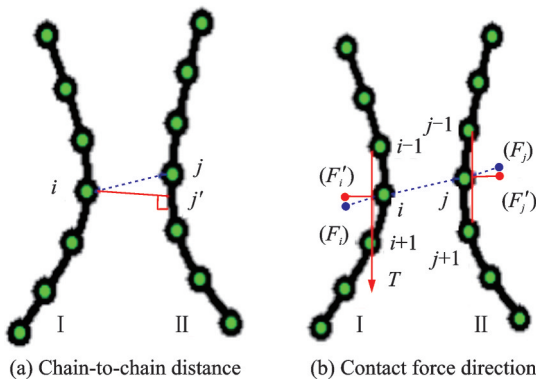


图 9 改进的接触单元

Fig.9 Contact element modification

由于数字单元法对纺织工艺进行分布模拟, 故耗时太长。为了解决这一问题, Miao 等^[21]还提出了静态松弛法。该模型假设织物的微观几何形状主要是由织物的拓扑结构和纱线最终状态的张力和纱线间的压力所决定。静态松弛法首先基于织

物拓扑结构建立织物的初始结构, 再将每根纱线离散成 19~25 数字链, 并对数字链施加初始应变, 最后计算每个节点所受的非平衡力, 将其松弛, 织物一直变形直到达到新的平衡状态。在数值模拟过程中, 初始应变是增量增加的, 每个加载过程包括: 计算节点力得到全局刚度矩阵, 从方程 $[K]\{U\}=\{F\}$ 和 $\{X\}=\{X\}+\{U\}$ 中计算新的节点位置, 再返回计算节点力直到节点力小于允许的误差。最后计算数字链和纱线的张力。与分步织物模拟相比, 生成相同织物只需要不到 10% 的计算机资源。在静态松弛法中采用改进的接触单元公式, 所需要的计算时间仅为原过程的 1%~2%。

Mahadik 等^[22]和 Durville^[23]将纤维离散成多个单元, 利用有限元软件对微观结构进行分析, 可以准确预测织物内部的纱线路径和截面形状, 但仍然需要相当多的计算机资源。基于此, Huang 等^[24]基于周期边界条件下的动态松弛方法, 确定了织物三维微观几何形状。在每个动态松弛过程中, 对每根纱线施加预定的张力, 再计算节点力、单胞内节点速度、加速度和位移, 通过周期原理将单胞内的节点位置映射到周围的边界区域, 松弛过程不断进行直到节点力和节点速度为零。动态松弛过程不需要建立全局刚度矩阵, 节省了大量的计算机存储空间。该方法具有周期性边界条件, 以预测不同纱线类型的三维织物预制体的内部微观几何形状, 结果与实际织物预制体吻合良好。

1.3 考虑纱线的摩擦因数

在之前的研究中, 摩擦因数被假定为常数, 并没有考虑实际的摩擦行为。采用 Y151 型纤维摩擦因数测定仪对高性能纤维进行摩擦因数测定, 纤维种类对摩擦因数的影响如表 2 所示^[25]。

表 2 纤维种类对摩擦因数的影响
Table 2 Effect of fiber type on friction coefficient

纤维名称	摩擦因数
Twaron 2000	0.470
Kevlar 29	0.385
Kevlar 49	0.340
Kevlar 129	0.347
Dyneema SK65	0.187

2014 年, Chakladar 等^[26]对碳纤维的摩擦行为进行了详细的实验研究, 采用有限元分析和实验结合的方法, 建立了两个纤维间摩擦的数值模型, 一个将 10 根碳纤维丝作为同质束一起建模, 另一个将 10 根碳纤维单独建模, 研究摩擦因数与丝束间

夹角、丝束中单丝数量、接触压力的函数,计算摩擦的大小。纵向-纵向摩擦的评估取决于图10所示的原理。在这个原理中,两根绞合的纤维束在两端受到相同的预加张力 P_1 。然后,在4根纤维的其中一端连续渐进地施加拉伸力 $P_2(P_2 > P_1)$ 。当 P_2 小于 P_1 和纤维间最大静摩擦力之和时,纤维束间交织接触面保持相对静止。当 P_2 大于上述总和时,纤维束之间发生滑动。通过实验记录值、滑动时刻以及其他实验参数,可以计算出摩擦因数。一些研究人员在不同的实验台上使用了这一原理,以评估长度-长度($l-l$)方向摩擦。长度-长度($l-l$)方向静摩擦因数的计算方法为

$$\mu = \frac{(P_2 - P_1)L}{2(P_2 + P_1)\pi^2 n^2 r} \quad (8)$$

式中: L 、 r 为螺旋接触的长度和半径; n 为纤维螺旋线圈的数量。

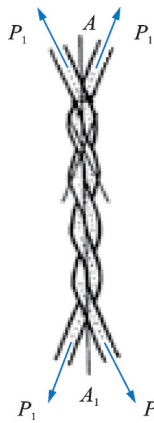


图10 长度-长度($l-l$)方向摩擦原理

Fig.10 Length-length ($l-l$) direction friction principle

近年来,研究人员^[30]针对长度-半径方向摩擦原理(Longitudinal-to-transversal, $l-t$)做了一系列研究。如图11所示,纤维束 F_{L1} 的一端固定于 O 点,另外一端跨过固定纤维束 F_{L2} 在重力 G 作用下自由悬挂。当在 F_{L2} 作用下纤维束在水平方向上移动时,在摩擦力作用下带动纤维束的自由端一起移动,直到纤维束的自由端有滑动趋势,根据偏转角、滑动距离等变量可求解获得对应条件下的摩擦因数。 $l-t$ 方向摩擦因数的计算方法为

$$\mu = \frac{Mg \sin \alpha}{Mg \sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{X}{S} \quad (9)$$

式中 M 为配重的质量。

如图12所示,除了长度-长度(Longitudinal-to-longitudinal, $l-l$)方向和长度-半径($l-t$)方向纤维束-纤维束摩擦行为的摩擦原理外,(Transversal-to-transversal, $t-t$)方向摩擦原理进行纤维束摩擦学特性的研究也尤其重要。2017年,

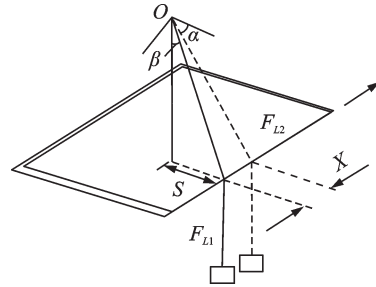
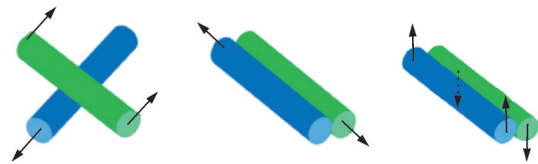


图11 $l-t$ 方向摩擦原理

Fig.11 $l-t$ direction friction principle



(a) $l-t$ direction friction (b) $l-l$ direction friction (c) $t-t$ direction friction

图12 按方向划分的摩擦分类

Fig.12 Classification of friction according to directions

Shanwan等^[31]首次对半径-半径($t-t$)方向的摩擦进行了研究,设计了如图13所示的测量机器。而后,Gassara等^[32]提出了两个斜交叉之间的纤维摩擦横向分量并对其进行评估,设计了如图14所示的装置。

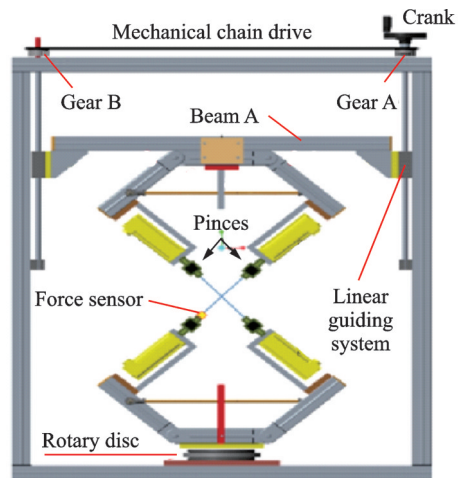


图13 实验机

Fig.13 Experimental machine

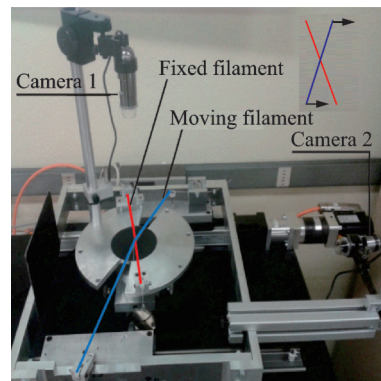


图14 实验装置

Fig.14 Experimental device

1.4 数字单元法的应用

在数字单元法的应用方面, Briscoe等^[33]和 Bhatnagar^[34]证明纱线之间的交互作用会影响织物的弹道性能。因此, Wang等^[35]利用中心差分创建了一种名为数字单元法的非线性动态显式算法, 如图15所示, 用以最小化计算机内存资源的需求, 成功对织物的弹道穿透过程进行了模拟, 并与实验结果吻合较好, 实现了基于数字单元法织物动态分析计算工具的开发。显式数字单元法分为3个步骤, 具体如下

$$\begin{cases} (\alpha_i)_n = \frac{(f_i)_n}{m_i} \\ (v_i)_{n+\frac{1}{2}} = (v_i)_{n-\frac{1}{2}} + (\alpha_i)_n \Delta t \\ (u_i)_{n+1} = (u_i)_n + (v_i)_{n+\frac{1}{2}} \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

式中: m_i 表示节点 i 的质量; α_i 表示节点 i 的加速度; v_i 表示节点 i 的速度; Δt 表示时间步长; u_i 表示节点 i 的位移; n 表示步数; f_i 表示施加在节点 i 上的合力, 由纤维张力、纤维与纤维的接触、纤维与纤维的摩擦、纤维与子弹的摩擦和纤维与子弹的接触引起。



图15 数字单元法模拟冲击织物的外平面挠度

Fig.15 Out-plane deflection of impacted fabrics from digital element simulation

Daelemans等^[36]基于虚拟纤维和数字单元法对三维织物预制体进行了有限元模拟, 如图16所示。模拟和预测了三维织物预制体的微观结构及其在拉伸和剪切载荷下的力学行为。通过使用由桁架单元链组成的虚拟纤维, 可以在不影响虚拟纤维柔韧性的情况下使用纱线的实际刚度。与实验数据比较, 验证了仿真结果的正确性。

此外, Joglekar等^[37]利用数字单元法对编织复合材料预制体的结构进行单元建模, 然后导入有限元分析软件, 计算模型用于预测压缩响应; 成功地对纤维束几何形状中的缺陷和偏差建模, 精确预测了三维编织复合材料压缩载荷下的扭转破坏。Yousaf等^[38]利用数字单元法对织物中纤维束的压缩行为进行了研究。通过计算机断层扫描实验数据验证真实的几何模型, 验证牵引横向压缩过程中微观尺度的几何变化及复合材料的性能。近年来, Xie等^[39]提出了一种三维针刺非织造布预制体虚拟纤维结构的数值模拟方法, 对其进行了针刺过程

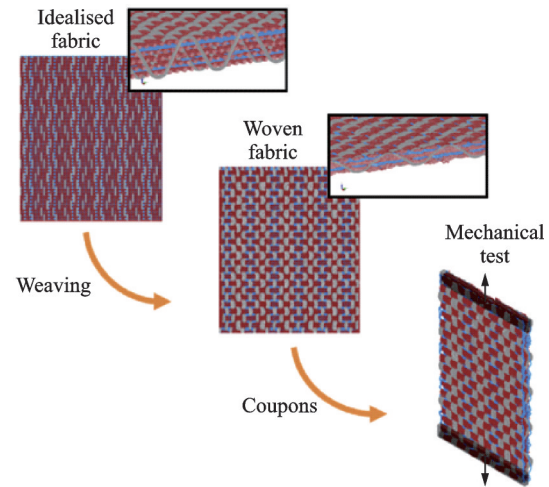


图16 建模方法示意图

Fig.16 Schematic diagram of modelling method

的数值模拟, 得到虚拟纤维结构与计算机断层扫描图像吻合良好, 为针刺复合材料分析树脂流动的渗透性和复合材料的力学性能提供了良好的基础。Liu等^[40]利用虚拟纤维对织物的变形进行模拟, 较好地反映了虚拟织造压实后纤维束的截面形状和丝束直径的变化, 并提出了数字单元建模法的通用性, 可用于各种纺织增强材料的力学模拟。

复合材料预制体中纤维束的接触受力弯曲、扭转及截面变化对其力学性能有着不可忽视的影响, 建立预制体内部真实的孔隙结构对于其复合固化过程也有着重要意义。但由于三维六向、七向编织织物中纤维束受到挤压的方向更加多样, 该方法目前尚未涉及三维多向编织领域。

2 目前存在的问题和发展趋势

国内外科研人员针对织造复合材料预制体, 通过先进的实验测试手段、理论分析和数值模拟方法联合开展了广泛的研究, 对复合材料预制体织造过程进行了表征, 明晰了预制体中纤维束的变形和失效机制, 为其产业化应用打下了扎实的基础。

在纱线与纱线的接触设置上, 数字单元法在微观尺度上建立了织物几何结构数值模型, 规避了对纱线截面形状和材料弹性常数等的简化及假设, 能够真实反映纱线截面的动态变化。然而, 数字纤维与实际纤维相比更加灵活, 数值模型中忽略了纤维的抗弯刚度, 实际的纤维和纱线具有较小的抗弯刚度, 忽略抗弯刚度会对织物的挠度剖面产生轻微的影响。在数值模拟中未考虑空气阻尼效应, 而阻尼效应会消耗能量, 且当织造工作在较大幅值时, 空气阻尼将明显增大。因此, 建立更为准确的挤压阻尼数字单元模型就非常重要。纤维具有非线性弹

塑性横向应力-应变关系,数值模拟中没有考虑横向压缩引起的能量损失。

在数字单元法的应用上,数字单元法在三维编织领域的应用目前只存在于三维四向、五向预制体,由于三维六向、七向编织物中纤维束受到挤压的方向更加多样,该方法目前尚未涉及三维多向编织领域。而编织复合材料中纤维束的弯曲、扭转及截面变化对其力学性能有着不可忽视的影响,因此,纤维束之间的受力作用不可忽略,将数字单元法应用在三维多向编织领域极有意义。

为更加真实地对织造过程进行建模,提高仿真模拟的可靠性,需要从抗弯刚度、空气阻尼效应以及给横向压缩3个方面对数字单元模型进行优化,对纺织过程进行研究。深入研究变形机理,根据理想化的预制体来建立理论分析模型,将工艺过程的影响考虑到模型中,对三维多向编织领域进行开发,并实现参数化,以便于研究制备更优异的织物结构。

3 结 论

近年来在预制体织造过程数字单元法方面的研究成果较少,缺乏系统的理论来描述当前编织工艺方法及开发新的工艺方法,笔者认为还有以下几个方面值得深入研究:

(1) 数字单元法的优化研究。数字纤维与实际纤维相比更加灵活,数值模型中忽略了纤维的抗弯刚度,实际的纤维和纱线具有较小的抗弯刚度,忽略抗弯刚度会对织物的挠度剖面产生轻微的影响;数值模拟中未考虑空气阻尼效应;纤维具有非线性弹塑性横向应力-应变关系,数值模拟中没有考虑横向压缩引起的能量损失。为更加真实地对织造过程进行建模,提高仿真模拟的可靠性,需要从数字单元法优化的角度出发,对纺织过程开展进一步的研究,根据理想化的最终预制体建立理论分析模型,将工艺过程参数的影响考虑到模型中,并考虑由纤维的抗弯刚度、空气阻尼效应、横向压缩引起的能量损失,实现参数化模拟仿真,以获得更优异的织物结构。

(2) 变形机理的研究。当前在织造复合材料微观几何结构的研究重点在于表征复合材料中纤维束空间的真实状态,研究者们多采用多链数字单元法去模拟纤维束变形的某一方面,尽管已出现对预制体变形机理进行初步探索的方法,但建立其与工艺过程之间的关系还需要进行大量的研究工

作。在预制体成型过程中纤维束常常会受到外界应力、纤维间挤压交叉的作用,使得纤维束产生形变,进而对预制体的结构性能产生重要影响,在后续的研究中,建议对纤维束的变形机理进行深入研究,推进真实织造过程的仿真模拟。

参考文献:

- [1] 韩振宇,梅海洋,付云忠,等.三维编织预成型体的织造及三维编织复合材料微观结构研究进展[J].材料工程,2018,46(11):25-36.
HAN Zhenyu, MEI Haiyang, FU Yunzhong, et al. Research progress on preform forming and microstructure of 3D braided composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(11): 25-36.
- [2] 张美忠.三维整体编织C/C复合材料预制体结构仿真与弹性性能预测[D].西安:西北工业大学,2006.
ZHANG Meizhong. Preform structure simulation and elastic properties prediction of three dimensional braided carbon/carbon composite[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [3] 孙乐,王成,李晓飞,等.C/C复合材料预制体的研究进展[J].航空材料学报,2018,38(2):86-95.
SUN Le, WANG Cheng, LI Xiaofei, et al. Research progress on preforms of C/C composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 86-95.
- [4] 黄成杰,杨敏,李红,等.三维织造预制体微观结构及致密化[J].材料工程,2021,49(1):104-111.
HUANG Chengjie, YANG Min, LI Hong, et al. Microstructure and densification of three-dimensional weaving precasts[J]. Materials Engineering, 2021, 49(1): 104-111.
- [5] 邵将,温卫东,崔海涛.三维纵横步进编织预成型件的计算机仿真[J].纺织学报,2008,29(9):129-132,136.
SHAO Jiang, WEN Weidong, CUI Haitao. Computer simulation of three-dimensional preforms using track and column braiding[J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(9): 129-132, 136.
- [6] 李毓陵.三维矩形编织规律的研究[D].上海:东华大学,2005.
LI Yuling. Study on the law of three-dimensional rectangle braiding[D]. Shanghai: Donghua University, 2005.
- [7] 张小萍,王君泽.基于Web的三维编织物仿真系统研制[J].纺织学报,2010,31(2):129-132,137.
ZHANG Xiaoping, WANG Junze. System development of 3-D braided fabrics simulation based on Web [J]. Journal of Textile Research, 2010, 31(2): 129-132, 137.

- [8] 马文锁,朱建勋,蒋云,等.用空间群推导三维编织的几何结构[J].材料科学与工程学报,2010,28(5):653-657,687.
MA Wensuo, ZHU Jianxun, JIANG Yun, et al. 3D braided geometric structures derived by space groups [J]. Material Science and Technology, 2010, 28(5): 653-657, 687.
- [9] 肖田华,孙志宏,顾生辉,等.旋转式三维编织预制件的计算机模拟[J].东华大学学报(自然科学版),2021,47(1):34-40.
XIAO Tianhua, SUN Zhihong, GU Shenghui, et al. Computer simulation of 3D rotary braided preforms [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2021, 47(1): 34-40.
- [10] LIAO T Y, ADANUR S. 3D structural simulation of tubular braided fabrics for net-shape composites[J]. Textile Research Journal, 2000, 70(4): 297-303.
- [11] WANG Y Q, WANG A S D. Geometric mapping of yarn structures due to shape change in 3-D braided composites[J]. Composites Science and Technology, 1995, 54(4): 359-370.
- [12] LI W. On the structural mechanics of 3-D braided preforms for composites[D]. Carolina, USA: North Carolina State University, 1990.
- [13] LI C, TAO X M, CHOY C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391-404.
- [14] WANG Y, SUN X. Determining the geometry of textile preforms using finite element analysis[C]//Proceedings of American Society for Composites. [S.l.]: American Society of Composites, 2000: 485-492.
- [15] WANG Y, SUN X. Digital-element simulation of textile processes[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(2): 311-319.
- [16] ZHOU G, SUN X, WANG Y. Multi-chain digital element analysis in textile mechanics[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(2): 239-244.
- [17] 马莹,何田田,陈翔,等.基于数字单元法的三维正交织物微观几何结构建模[J].纺织学报,2020,41(7):59-66.
MA Ying, HE Tiantian, CHEN Xiang, et al. Micro-geometric modeling of three-dimensional orthogonal woven fabrics based on digital element approach[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(7): 59-66.
- [18] 何田田.三维正交织物微观结构数值建模及其拉伸力学性能分析[D].重庆:重庆邮电大学,2020.
HE Tiantian. Filament-level modeling of 3-D orthogonal woven textile fabrics and tensile micromechanics analysis[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [19] 刘岳岩. Kevlar 49平纹织物微观尺度建模及其纱线抽拔力学性能分析[D].重庆:重庆邮电大学,2021.
LIU Yueyan. Micro-scale modeling of Kevlar 49 2-D woven fabric and analysis of yarn pull-out behavior [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [20] 刘岳岩,马莹,禄盛,等.不同纱线张力下的三维正交织物微观几何结构建模[J].复合材料科学与工程,2021(1):19-27.
LIU Yueyan, MA Ying, LU Sheng, et al. Micro-geometric of 3D orthogonal woven fabric modeling under different yarn tensions[J]. Composites Science and Engineering, 2021(1): 19-27.
- [21] MIAO Y, ZHOU E, WANG Y, et al. Mechanics of textile composites: Micro-geometry[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(7/8): 1671-1678.
- [22] MAHADIK Y, HALLETT S R. Finite element modelling of tow geometry in 3D woven fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(9): 1192-1200.
- [23] DURVILLE D. Simulation of the mechanical behaviour of woven fabrics at the scale of fibers[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(2): 1241-1251.
- [24] HUANG L, WANG Y, MIAO Y, et al. Dynamic relaxation approach with periodic boundary conditions in determining the 3-D woven textile micro-geometry[J]. Composite Structures, 2013, 106: 417-425.
- [25] 刘晓艳,陈美玉.高性能纤维的摩擦系数测试研究[J].中国纤检,2002(6):43-45.
LIU Xiaoyan, CHEN Meiyu. Coefficient of friction test study of high-performance fibers [J]. China Fiber Inspection, 2002(6): 43-45.
- [26] CHAKLADAR N D, MANDAL P, POTLURI P. Effects of inter-tow angle and tow size on carbon fibre friction[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2014, 65: 115-124.
- [27] WANG Y, LIU Z, LIU N, et al. A new geometric modelling approach for 3D braided tubular composites base on free form deformation[J]. Composite Structures, 2016, 136: 75-85.
- [28] KO F K, HARTMAN D. Impact behavior of 2-D and 3-D glass/epoxy composites[C]//Proceedings of the 31st International SAMPE Symposium and Exhibition: Materials Science for the Future. [S.l.]: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1986: 1272-1284.
- [29] KO F K. Tensile strength and modulus of a three-dimensional braid composite[D]. Philadelphia, PA, USA: Drexel University, 1986.

- [30] HOWELL H G. 27-Inter-fibre friction[J]. Journal of the Textile Institute Transactions, 1951, 42(12): 521-533.
- [31] SHANWAN A, GASSARA H E, BARBIER G, et al. New experimental device for measuring the inter-fiber transversal friction[C]//Proceedings of IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S. l.]: IOP Publishing, 2017, 254(14): 142020.
- [32] GASSARA H E, BARBIER G, KOCHER C W, et al. Experimental evaluation of transverse friction between fibers[J]. Tribology International, 2018, 119: 112-122.
- [33] BRISCOE B J, MOTAMED F. The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: The influence of interface friction[J]. Wear, 1992, 158(1/2): 229-247.
- [34] BHATNAGAR A. Bullets, fragments and bullet deformation[M]//Lightweight Ballistic Composites. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2006: 29-71.
- [35] WANG Y, MIAO Y, SWENSON D, et al. Digital element approach for simulating impact and penetration of textiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 552-560.
- [36] DAELEMANS L, FAES J, ALLAOUI S, et al. Finite element simulation of the woven geometry and mechanical behaviour of a 3D woven dry fabric under tensile and shear loading using the digital element method [J]. Composites Science and Technology, 2016, 137: 177-187.
- [37] JOGLEKAR S, PANKOW M. Modeling of 3D woven composites using the digital element approach for accurate prediction of kinking under compressive loads [J]. Composite Structures, 2017, 160: 547-559.
- [38] YOUSAF Z, POTLURI P, WITHERS P J, et al. Digital element simulation of aligned tows during compaction validated by computed tomography (CT)[J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 154: 78-87.
- [39] XIE J, FANG J, CHEN L, et al. Micro-scale modeling of 3D needled nonwoven fiber preforms[J]. Composite Structures, 2022, 281: 114995.
- [40] LIU J, XIE J, CHEN L. Effect of intra-tow flow on plain woven fabric permeability using virtual fiber-voxel element method[J]. Textile Research Journal, 2022, 92(7/8): 1135-1146.

(编辑: 胥橙庭)