

三维编织复合材料宏观结构的计算机图形模拟^{*}

董纪伟 孙良新 洪平

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京 210016)

文 摘 从三维编织复合材料的编织工艺——四步法入手,分析了纱线的空间位置,利用计算机较为精确地模拟织物的宏观结构。采用合理的单胞划分的方法,对该宏观模型进行剖分,获得了较精确的织物细观结构,得到了有关细观结构的一些重要规律,以便于下一步对编织复合材料进行力学分析。

关键词 三维编织复合材料,计算机图形模拟,宏观结构,单胞

Computer Emulation of Fabric Macro and Microstructure in Three-dimensionally Braided Composites

Dong Jiwei Sun Liangxin Hong Ping

(College of Aerospace Engineering, NUA, Nanjing 210016)

Abstract In this paper, the 3D braid technique for composites—four-step procedure is introduced first, and then the spatial location of the yarn is analyzed. By computer, macrostructure of the fabric can be obtained precisely. By using a proper method to divide the fabric into unit cells and dividing the completed macrostructure, the microstructure of the fabric can be emulated precisely. Some important laws about the microstructure can also be found, then mechanics performance of the composites can be expediently analysed.

Key words 3D braided composite, Computer graphic display, Macrostructure, Unit cell

1 引言

三维编织复合材料是20世纪80年代发展起来的一种新型先进复合材料,它除了具有一般纤维增强复合材料所具有的比强度高、比模量高、性能可设计等优点以外,由于增强长纤维束在空间相互交织形成整体,从而克服了层合复合材料层间强度低、易分层的缺点,具有良好的抗冲击、损伤、疲劳的能力,因此其几何结构和力学性能已成为当今研究热点。由于织物内部结构过于复杂,

力学模型的建立比较困难,直接采用宏观的有限元分析方法,通常是自由度数目繁多,除了占用大量内存外,计算精度也难以得到保证,有时甚至计算结果面目全非。实际上,织物存在着周期性的细观结构,研究并利用其周期性可以使得宏观结构的力学分析大为简化。

本文针对四步法(3×3)编织成的三维四向正方形截面预成型体,分析其纱线的空间位置,通过计算机模拟,得到比较精确的织物的宏观结构,然后根据

收稿日期:2003-09-19

^{*}国家自然科学基金(50275074)和航空科学基金(01B52007)资助

董纪伟,1979年出生,博士研究生,主要从事编织复合材料的几何细观结构和强度分析的研究工作

宇航材料工艺 2004年 第4期

— 21 —

编织物在内部、表面和角柱处几何细观结构的不同,对该宏观模型进行剖分,可以较为精确地得到几种单胞模型,并能观察到纱线在几种不同单胞中的不同走向以及织物细观结构的周期性变化。

2 四步法编织工艺简介

四向编织复合材料是先在编织机上用四步法将纤维束(又称纱线)编织成预制件(又称增强体织物),再被基体(如环氧树脂等)浸渍,然后固化而成。每根纤维束的一端固定在底盘的上方,另一端通过牵引线和底盘上的一个引纱器相连。引纱器在底盘

上排成矩形阵列。编织时,先把引纱器移到各自初始位置,然后通过多次移动引纱器和对已交织纤维束的打紧操作织出预制件。一个编织循环中每个纺纱器都移动四步,故称四步法。第1步,奇数行左移一列,偶数行右移一列;第2步,奇数列下移一行,偶数列上移一行;第3步,奇数行右移一列,偶数行左移一列;第4步,奇数列上移一行,偶数列下移一行。图1为3×3编织物在一个机器循环中的四步法引纱器移动示意图。所谓3×3就是指图1中虚线所包围的区域的纱线数目是3×3。

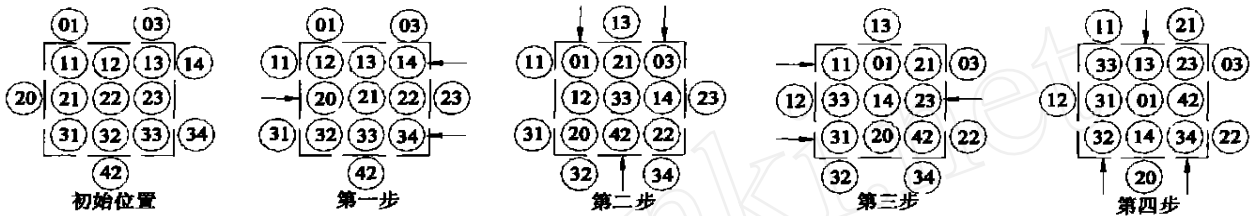


图1 一个机器循环中引纱器的移动规律

Fig. 1 Movement law of carriers during a machine cycle

3 宏观结构的计算机图形建模

3.1 工艺参数及预制件的基本几何尺寸

根据引纱器每一步的移动位置,可以确定每根纤维束所连的引纱器的轨迹,由于纤维束在牵引线的拉紧作用下取最短路径,故纤维束的轨迹在织物横截面上的投影不同于引纱器的轨迹^[1]。通过绘制引纱器的轨迹图,不难发现以下两个规律:(1)3×3编织物每一根纤维束所连引纱器都是经过20步又回到原来的位置;(2)根据引纱器的路线的不同可以把纤维束分为三组,每组有四根纤维束,这四根纤维束所连的引纱器移动路线相同,只是走步位置依次滞后4步。由于在纵向纤维束每经过一步都移动1/4个花节长度 h ,通过绘制出纤维束在织物横截面上的投影图,就可以确定纤维束经过每一步后的空间位置了。这里所提到的花节长度 h ,是指一个机器循环中纤维束在纵向生成的长度,其计算公式如下:

$$h = 4d/\tan \quad (1)$$

式中,为内部编织角, d 为纤维束的直径。于是,可以得出区域(图1中虚线包围的区域)为 m 行 n 列

的预制件的长度 W_m 和宽度 W_n 的表达式如下^[2]:

$$W_m = (\sqrt{2}m + 1)d \quad (2)$$

$$W_n = (\sqrt{2}n + 1)d \quad (3)$$

3.2 计算机图形模拟

不论编织物的结构形式多么复杂,都可以看作是由内胞、面胞和角胞三种单胞所构成。纱线在织物内部走的是直线路径,而在表面和角柱处走的是曲线路径^[3,4]。假设^[5]:(1)纱线的横截面为圆形,直径为 d ,且在垂直于中心线的截面内沿径向没有变形,这将保证在建模过程中,用最大编织角产生的预成型实体内各纱线之间的相对位置应处于极限状态,即经过了打紧工艺以后,彼此间既无相互侵入,又无大的空隙,此时的预成型为最密实的状态;(2)纱线有足够的柔韧性,这将保证纱线在面胞和角胞内为平滑过渡,不产生折角,在下面的模型建立过程中,面胞和角胞内的纱线路径采用Bezier曲线拟合,与实物较为吻合;(3)编织工艺方法足够稳定,这将保证整个编织结构沿编织方向以均匀的拓扑形式扩展。根据以上假设,用计算机建立织物的三维宏观

模型表示在图 2 中。

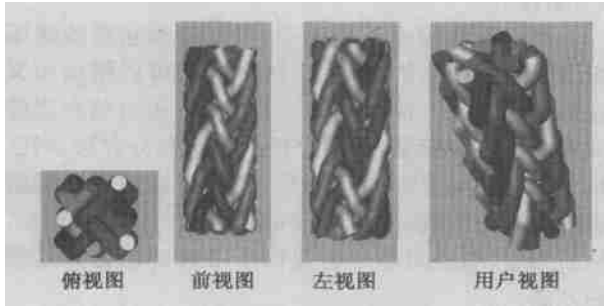


图 2 编织物的三维视图

Fig. 2 Three-dimensional view of fabric

4 细观结构的计算机图形建模

4.1 单胞的划分

如何合理地划分单胞是细观结构建模的关键。

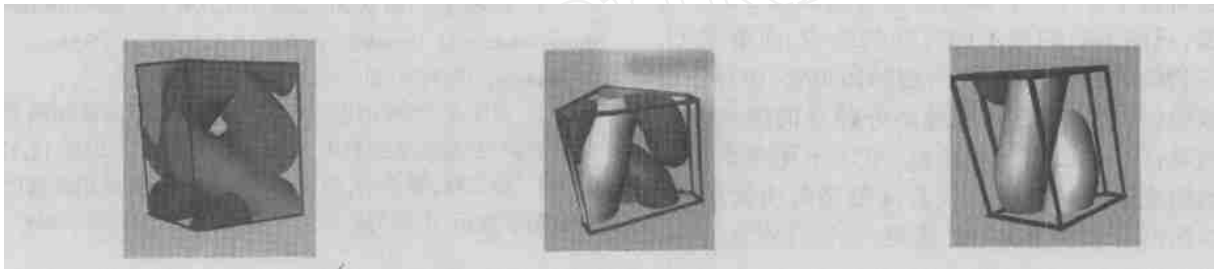
事实上,内部纱线的轴线分布在沿材料纵向且与材料表面成 45° 的纵向平面上,而且对于本文所研

究的四向矩形编织材料,内部纱线共有 4 个方向,又因为经过一个机器循环后引纱器又回到了初始位置,于是可以取一个花节的长度为单胞的高度,并沿与材料表面成 45° 的纵向平面剖分宏观预制件得到内胞,然后根据三种单胞的位置关系,得到面胞和角胞。

为了能够清楚地显示内部纱线的四个方向,并在以后的力学分析中易于利用周期性边界条件,本文采用 $2d \times 2d \times h$ 为一个内胞的尺寸。

4.2 单胞的计算机图形显示

宏观模型建立好以后,通过布尔运算,可以把宏观模型剖分成细观模型,图 3 显示了通过这种方法得到的三种单胞模型。从图 3 可以清楚地看出内部纱线的 4 个方向,并且可以验证出内胞不只包含 4 根纱线,而是 8 根。纱线在织物表面和角柱处的曲线路径也清晰可见。



(a) 内胞

(b) 面胞

(c) 角胞

图 3 三维编织结构的单胞模型

Fig. 3 Unit cell models of 3D braiding

纱线在内胞和角胞处的过渡情况见图 4。

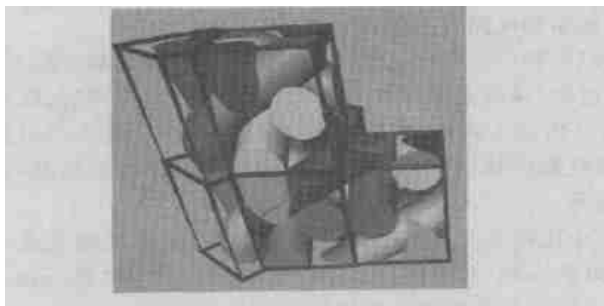


图 4 纱线在内胞和角胞处的过渡

Fig. 4 Transition of yarn between interior and corner cells

从图 4 中,我们不难看出以下几点:

(1) 纱线在织物内部是直线路径,到了角柱处就变成了曲线;

(2) 在织物纵向,细观结构呈现周期性,周期为一个花节的长度;

(3) 在横向,两个相邻的内胞的结构不同,应该作为两种单胞处理。

同样地,通过剖分可以显示出纱线在三种单胞处的过渡情况,如图 5 所示。

从图 5 中除了可以看出上述几点以外,还可以看到:

(1) 纱线在面胞里的路径也是曲线;

(2) 引纱器移动 6 步,纱线在织物的角柱处形成完整的一段,引纱器移动 3 步,纱线在织物的表面处

形成完整的一段。

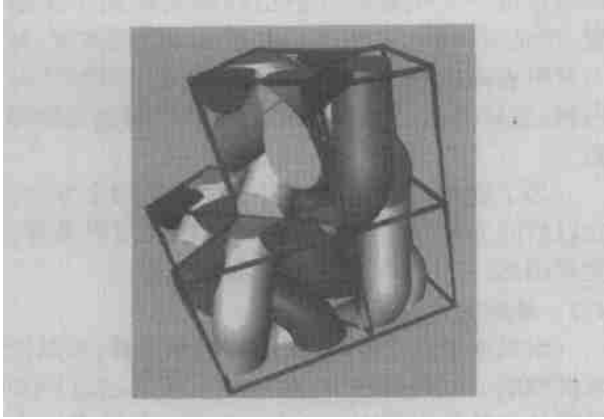


图 5 纱线在三种单胞处的过渡

Fig. 5 Transition of yarn among three types of unit cells

以上得到的细观模型比直接分析细观结构得到的模型有以下优点:(1)如果直接从细观入手建立内胞模型,只能包括四根不同方向的纱线,而事实上,由于织物结构的整体性,在内胞的边角处,也存在着部分纱线(见图 3),因此通过剖分建立的细观模型更加精确;(2)对于面胞和角胞,可以不用考虑怎样与内胞组成平滑的连接以及自身复杂的曲线形式,通过本法剖分以上情况自然满足,对保持宏观结构

的完整性大有益处。

5 结论

从四步法编织工艺入手,可以精确获得纱线编织结构的各种几何参数,用计算机就可以精确而又直观地模拟每一根纱线的运动轨迹,从而建立起较为准确的宏观模型,采用合理的单胞划分方法,对已建立好的宏观模型进行剖分,便于直观清晰地观察织物的内部细观结构、纱线的走向、单胞的周期性,从而为宏、细观力学分析提供了准确的数据和简捷的方法。

本法也可用于任意 $m \times n$ 的编织物。

参考文献

- 1 韩其睿. 复合材料三维编织工艺底盘运动规律. 天津纺织工学院学报, 1994; (2): 1 ~ 5
- 2 Li W, Hammad M, El-Shiekh A. Structural analysis of 3D braided preforms for composites. part I: The four-step preforms. Journal of the Textile Institute, 1990; (4): 491 ~ 514
- 3 Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms. Composites Science and Technology, 1999; 59: 391 ~ 404
- 4 黄小平. 四向矩形编织复合材料几何细观结构和力学性能研究. 南京航空航天大学博士学位论文, 2001: 12, 13
- 5 孙义林, 黄小平, 徐宁光, 孙良新. 三维编织结构的计算机图形显示. 中国图象图形学报, 2000; 5(5): 443 ~ 446

自动冲孔机

本成果是用于控制轴承保持架冲窗孔加工的设备。由两部分组成:与冲床衔接的冲孔模具和电子控制系统。控制系统由微机控制部分、光电输入电路、电磁铁控制电路、显示电路、步进电机驱动电路等五部分组成。

全系统在统一时钟脉冲的控制下完成各种功能,当启动开关闭合后,程序使气夹电磁通电,并由 CPU 输出数个脉冲,经驱动电路按要求使步进电机旋转某一角度,然后电机自锁,这称为寻零过程,从而消除了机械传动间隙误差。寻零后,吸合执行电磁铁,随即冲头下落。当冲头离开工作时,固定在冲床上的光电头给出冲头离位信号,此时通过微机再次使步进电机旋转一确定角度,再等待冲头二次下落,如此重复上述过程,便可实现所需孔数的连续冲孔加工过程。显示器随时显示即时孔数。当冲完一个孔后,工件数累加进一,孔数复位为零,并给出声响报警信号。

本成果可实现 10 ~ 60 孔的轴承保持架的冲窗孔加工。具有连续冲孔和单发点射冲孔的功能,能一次连续地完成一个工件的冲孔加工,也可单发加工工件上的某一孔位。冲孔频率为 0 ~ 130 次/min,若孔数超过 20 孔,频率可达 240 次/min。可连续工作 24 h。本成果为国内首创的用微机控制自动分度的高精度加工轴承保持架窗孔的设备。其等分精度 ± 0.1 mm,达到国际同类产品水平。应用该成果可大大提高生产效率、减轻劳动强度、延长模具寿命、节省工时、提高成品率,其经济效益和社会效益显著。

(130032 长春光机学院)

· 李连清 ·

宇航材料工艺 2004 年 第 4 期