

三维编织结构的计算机图形显示

孙义林 黄小平 徐宁光 孙良新

(南京航空航天大学飞行器系, 南京 210016)

摘要 通过计算机图形建模解决了三维编织复合材料内部编织结构分析困难的问题, 从而便于进行下一步编织复合材料力学性能的分析. 同时针对三维编织复合材料中目前较为流行的一种编织工艺——四步法, 提出了一种定量描述三维编织物内部复杂构造的方法. 即首先利用计算机绘制三维实体模型来模拟织物内部各纱线的空间位置, 并用动画显示纱线的运动过程, 从而能够方便直观地观察到各纱线具体走向, 进而通过对已生成的三维实体模型完成简单的操作, 来剖析织物结构的内部构造, 实现对其内部各纱线的分离、切割和观察内部纱线间的相对位置关系. 并且还验证了传统的几何方法描述中已经提出的一些结论.

关键词 复合材料 计算机图形显示 三维编织结构

中图分类号: TP391.41 TS105.113 文献标识码: B 文章编号: 1006-8961(2000)05-0443-04

Computer Emulation of Fabric Structure in Three-Dimensionally Braided Composites

SUN Yi-lin, HUANG Xiao-ping, XU Ning-guang, SUN Liang-xin

(Department of Aircraft Engineering, N U A A Nanjing 210016)

Abstract A complicated question which structure analysis in Three-Dimension braided composites is solved by modeling computer graphics, then the composites mechanics performance will be expediently analysed. This paper presents a quantificationally descriptive method of complicated fabric structure in Three-Dimension braided composites for the prevalent braided technology-four-step procedure. By emulating the spatial location of optional yarn as computer Three-Dimension model, the yarn trend in Three-Dimension braided composites is shown conveniently and clearly, and every yarn can be separated and dissected for observing relative position by simply operating the completed model. Some presented conclusions of geometrical description are also validated.

Keywords Composites, Computer graphic display, Three-dimensional braided structure

0 引言

纤维增强复合材料是一种新型的结构材料, 具有比强度高和材料性能可根据需要进行设计等优点. 然而随着层合板复合材料的广泛应用, 其层间强度低、抗冲击损伤能力差的缺点也随之暴露出来. 目前人们对纤维复合材料结构的研究日益深入, 已开发出了三维编织复合材料. 但在研究过程中, 也发现织物内部纱线结构过于复杂, 力学模型的建立困难, 不便于对其耐久性、损伤容限、安全系数和许用值、

验证实验和计算方法等开展专题的研究.

本文针对四步法(2×2)编织成的正方截面预成型实体, 在三维织物实体模型中, 可以精确地得到每一根纱线的几何参数, 这在采用有限元分析计算进行后续研究过程中, 对这种复杂结构单元的刚度矩阵的建立, 以及进一步对预成型结构进行力学性能分析提供了必要和可靠的依据.

通过计算机对三维模型空间任意点的准确定位, 及对其进行方便、精确的网格划分, 也为各种大型分析计算软件提供了必要的前置处理.

1 三维织物预成型概述

对三维编织复合材料性能的研究,首先要从确定织物的空间结构入手,从力学模型中萃取出结构内在的力学特性,以便进一步分析.对于编织结构来说,纱线的拓扑形式决定了整个织物的空间构架.由于一般纱线织物的拓扑形式在给定的编织工序情况下就已经确定下来,并且可以将编织后的预成型清晰分解为几种基本单元,因此,如果具有相同的编织工序,尽管它们预成型的横截面形状不同,但却有相同的基本单元,而且在基体固化期间,即使预成型的横断面形状被扭曲了,一般,其内部纱线的拓扑形式也没有改变,仅仅是一些特征参数(如:编织角 γ 、表面角 θ 、角单胞倾角 θ 等)会随着截面形式变化而改变.由于拓扑形式没变,因此不影响我们用类比的方法具体分析.编织结构的这一特性,使得我们能够很容易从纱线结构的初始形态入手,通过一种恰当的拓扑映射,来确定固化后三维编织复合材料内部的纱线形态.

四步法 2×2 维编织物预成型模型如图1所示.



图1 四步法 2×2 编织物预成型模型

1.1 四步法简介

图2所示为纱梭(纱线的载体,即在编织过程中,通过对其操纵控制,从而完成整个编织过程)在编织过程中经过每一步后的位置.一个编织循环分为四步,纱梭的每一步移动,只能沿横向或者纵向步进.第1步,纱梭按行向交错式步进,第2步,纱梭按列向交错式的步进(正如图示的箭头方向),第3步,纱梭的步进方向与第1步相反,同样,第4步的纱梭移动也与第2步相反.并且我们注意到,经过四步,梭子的排列形式与初始时相同,因此称为一个编织循环.一般情况下,每个编织循环过后,都有一个打紧纱线的过程,使得编织结构更加紧凑,经过均匀的打紧工艺,使得预成型沿长度方向保持定常的截距.

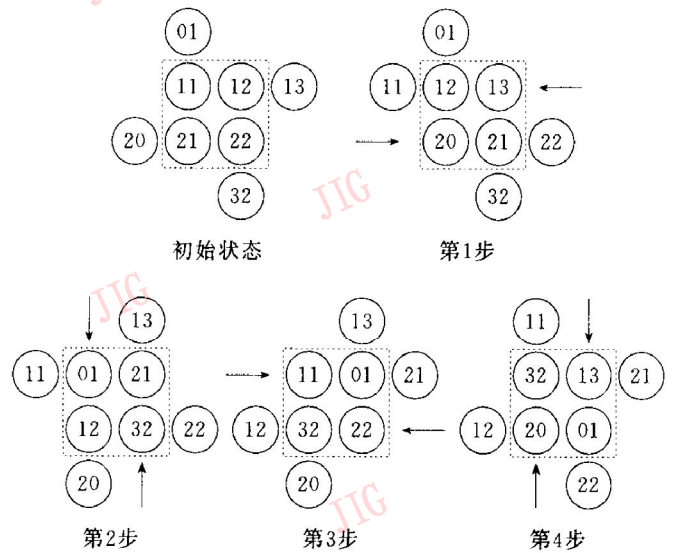


图2 四步法纱梭称动示意图

1.2 预成型截面

综上所述,纱梭排列的模式确定了预成型的截面形状,而截面实际尺寸又和采用的纱线规格及打紧工艺有关,另外,预成型最终的尺寸和截面形状还可能在基体固化期间被改变.此例中 2×2 维的编织物预成型横断面为正方形.

2 纱线结构的图形建模

目前对三维编织复合材料织物的宏观结构研究,不外乎都是单从空间几何的角度出发,来建立组成织物的各单根纱线在空间的相对位置,这尽管在一定程度上已能够反映出织物结构的某些特征,但始终没有对编织体的三维结构给出整体模型及几何参数,因而也就不能够对三维编织复合材料的力学性能进行准确、切合实际的分析.因为纱线在编织体内的走向路径,在一个循环周期内是不规则的曲线(曲线的具体形状也受其它因素的影响,如打紧过程中的打紧程度及纱线的柔度等),且无法用解析式给出.本文采用计算机图形来描述编织实体的几何模型,解决了直接寻找纱线运动轨迹的困难,它可直接在计算机内根据编织体实物的几何约束条件(如截面尺寸、纱线直径、编织角等),借助于计算机强大的图形操作手段,并在几点假设的前提下,构造出编织物三维几何模型.

2.1 基本几何描述

正如上面提到的,编织结构由几类基本单胞构成,各单胞的几何位置关系如图3、4所示.假定每一个编织步骤过后,纱线都已经过了均匀的打紧工艺,则各纱线被最终校正了位置(未打紧时与打紧后的

纱线空间位置关系存在很大差异). 在编织结构内部, 纱线是沿着两类平面 $ABCD$ 、 $EFGH$ 跨越整个预成型体, 这两类平面垂直正交(如图 4 所示), 且与预成型的表面各成 45° 角.

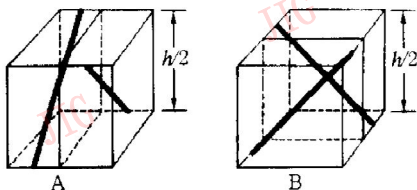


图 3 内部单胞的两种形式

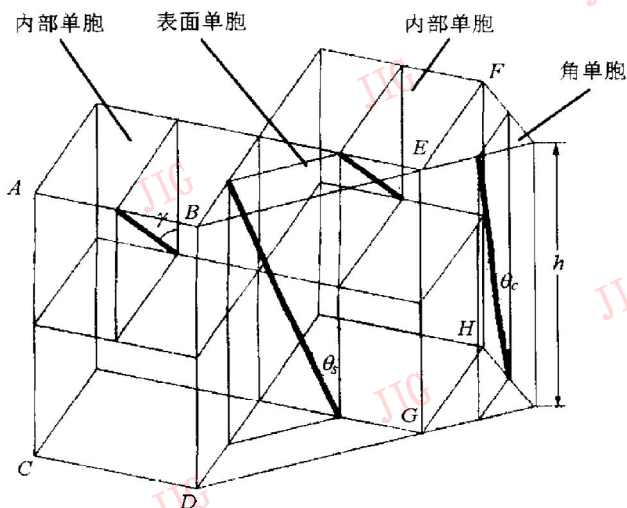


图 4 编织结构内部的三种单胞

编织结构的基本单胞可以分成以下三类^[1,2]:

(1) 预成型内部单胞(interior cell)

纱线倾斜角 γ , 即内部单胞内纱线与编织方向间的夹角; 截距 h , 即每个编织循环内纱线沿编织方向的步进位移. 内部单胞有 A, B 两种形式(如图 3 所示).

(2) 预成型表面单胞(surface cell)

表面角 $\pm\theta$, 即表面单胞内纱线与编织方向间的倾角.

(3) 预成型角单胞(corner cell)

角单胞倾角 θ , 即角单胞内纱线与编织方向的夹角.

由图 4 几何关系, 不难得出:

$$\tan\gamma = 2\sqrt{2}(\tan\theta) \quad (1)$$

$$\tan\theta = (\tan\gamma) / 6 \quad (2)$$

基于这种关系, 纱线在预成型表面的拓扑方式完全可以由织物结构内部参数 γ 及 h 来表征.

2.2 计算机图形描述

假设: (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; (2) 纱线有足够的柔韧性; (3) 编织工艺方法足够稳定.

其中, 假设(1)保证了在建模过程中, 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该处于极限状态, 即经过了打紧工艺后, 彼此间既无相互侵入, 又没有大的空隙, 此时的预成型为最密实的状态; 假设(2)则保证纱线在角单胞内为平滑过渡, 不产生折角, 在下面的模型建立过程中, 角单胞内的纱线路径采用贝塞尔曲线拟合, 与实物更加吻合; 假设(3)则保证整个编织结构沿编织方向以均匀的拓扑形式扩展.

几何限制条件: 若纱线直径为 d , 则编织结构被限定在边长为 $4d \times 4d$ 的正方形截面内^[1,2].

图 5~ 图 8 为建立的织物结构模型. 由图 7、图 8 横断面可见, 编织物的整体是密实的, 各纱线之间的相对位置处于极限状态, 既没有相互侵入, 也没

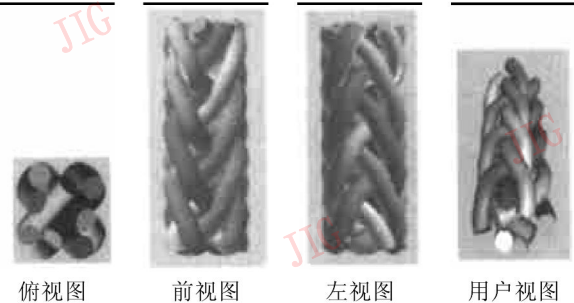


图 5 纱线在织物内存在的形式

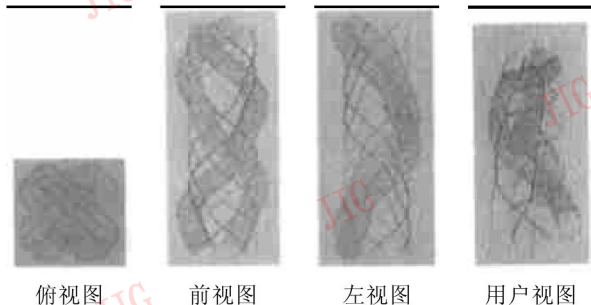


图 6 纱线的三维网格图(为清晰起见, 其中仅示两根)

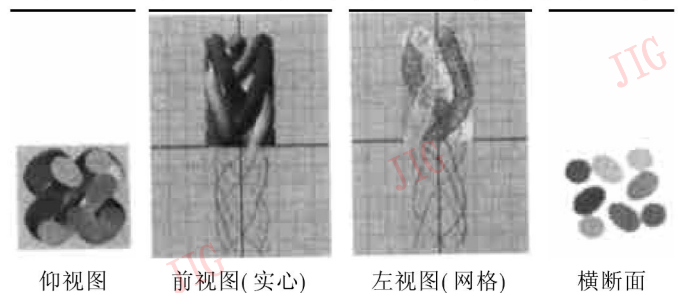


图 7 织物的横断面(沿 xy 平面)

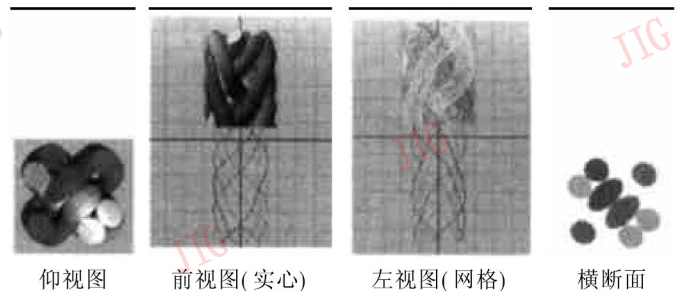


图 8 织物的横断面(平行 xy 平面, z 轴截距 h 处)

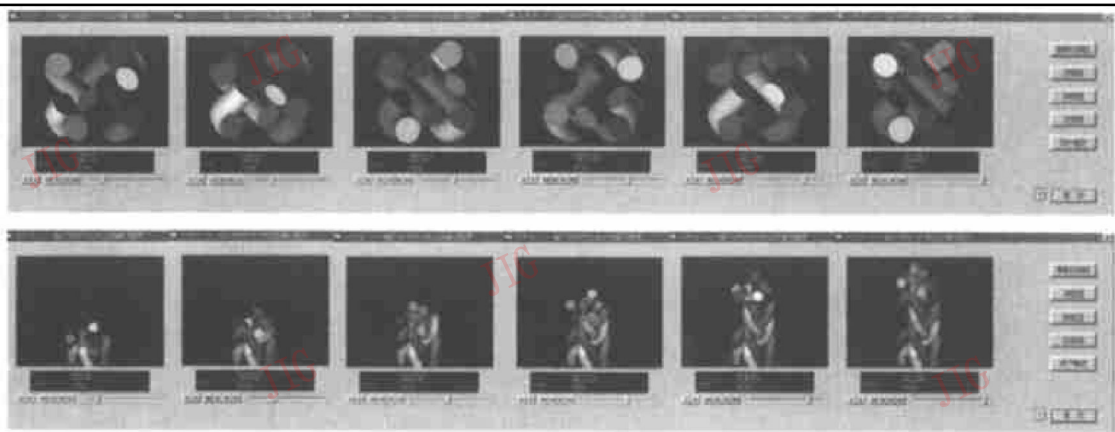
有大的空隙. 这说明建立的模型与打紧的实际结构几何特征相一致.

尽管对于不同维数的织物结构内部的纱线走向均不一致, 但通过解决几类相对简单的织物构造, 从中提取出织物内可能存在的共性单元, 就可以分析更加复杂的编织结构. 虽然实际编织结构的纱线维数很多, 但其结构不外乎由这几种单元构成, 因此也可以采用此例的方式来建立模型. 通过对此例的三维视图的观察不难发现, 编织结构仅由内部单胞及角单胞构成, 而只有维数大于 2×2 的织物结构才有

表面单胞的出现, 正是由于织物内部单元与外部边界单元的差异, 才使得三维编织复合材料从整体上表现出来的是一种具有各向异性力学性能的非均质材料.

2.3 动态图形描述

以动画的形式能够更加生动直观地显示编织过程中织物内纱线的具体运动情况, 下图(分别为左视图和用户视图)为四步法编织过程中纱线运动动画演示程序中的几帧画面.



3 结论

通过对几种基本单元模型微观结构的简单剖析, 可以精确得到纱线编织结构的各种几何参数, 从而为力学模型的建立和有限元分析计算提供了准确的数据, 同时还以动画的形式再现了纱线的运动轨迹, 使我们能够直观地观察纱线运动走向, 从而为这方面研究提供了更直观手段.

参考文献

- 1 Wang Y Q, Wang A S D. On topological mapping of yarn structures in 3-D braided preforms. In: Proc. 9th Annual Meeting, American Society for Composites. Technomic. 1994.
- 2 Wang Y Q, Wang A S D. Microstructure property relationships in 3-dimensionally braided fiber composites. In: ed. M R Piggott. Univ. Proc. Mesostructure & Mesomechanics Specialist Meeting, Toronto. Toronto. Canada, 1994, 174.



孙义林 南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为编织复合材料结构的计算机图形仿真.

黄小平 南京航空航天大学博士研究生, 研究方向为编织复合材料强度的有限元分析.

徐宁光 副教授, 主要从事复合材料结构损伤分析和图形显示研究.

孙良新 教授, 博士生导师, 长期从事复合材料结构强度分析.