DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.022
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

三维四向编织复合材料结构模型的几何特性

卢子兴 杨振宇 刘振国

（北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100083）

摘 要：建立合理的三维编织复合材料结构模型，对其力学性能的有限元计算结果具有重要影响.以成型后的三维四向编织复合材料为研究对象，在实验观察和以往研究的基础上，提出了一个新的有限元胞体结构模型，该模型正确地反映了纤维束的交织方式，更符合三维四向编织复合材料的实际细观结构.基于该单元模型推导了编织参数与结构模型参数之间的几何关系，计算了胞体中纤维体积比并讨论了其几何特性.研究结果表明：当纤维束中的纤维丝根数和纤维束半径，以及纤维体积含量一定时，编织物的花节长度和厚度随着纤维编织角的增大而分别减小和增大，三维四向编织复合材料结构的纤维体积比理论上可以达到68%.

关 键 词：三维编织；复合材料；结构模型；几何特性

中图分类号：TB 330.1；TB 332

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0092-05

Geometrical characteristics of structural model for 3-D braided composites

Lu Zixing Yang Zhenyu Liu Zhenguo

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: It has significant effects on the FEA(finite element analysis) results of the mechanical properties of braided composite to set up a reasonable structural model of 3-D(three-dimension)braided composite. The braided composite after molding was taken as a study object. According to the experimental result and former research, a new model of representative volume elements for FEA of braided composite was proposed. The new model truly reflected the braided manner, coinciding with the actual configuration of the 3-D and four-direction braided composites. On the basis of the new model, the relationship between the braiding parameter and the parameters of unit model was derived and the volume fraction of fibers in this representative volume element was calculated. By studying the geometrical characteristics of the braided composite, it indicates that if the volume fraction of yarn, the radius of yarn bundle and the number of yarns in a yarn bundle are invariable, the pitch length and thickness of composites will increase and decrease respectively with the increase of braiding angle, and the volume fraction can reach as much as 68% theoretically.

Key words: three-dimension braided; composites; structural model; geometrical characteristics

自从20世纪80年代三维编织复合材料受到重视以来，为了准确预测三维编织复合材料的力学性能，对其细观结构的几何特性进行了较为深入的研究，提出了不同的几何模型，来建立编织过程参数、结构参数与力学性能之间的关系[1].例如，Du和Ko[2]介绍了4种不同的三维编织复合材料的编织方式，通过单元胞体的方法建立了三维编织的几何实体模型，给出了纤维编织角和纤维体积含量与关键编织参数间的关系.Soheil[3]也研究了三维编织复合材料的细观结构，分别对内部、表面、角上的纤维结构进行了讨论，将内部的结构分为2种不同结构的组合，并对表面、角上的纤维

收稿日期：2004-11-08

基金项目：航空科学基金资助项目(04B51045)；北京市教育委员会共建项目建设计划资助项目(XK100060522)

作者简介：卢子兴(1960—)，男，河北枣强人，教授，luzixing@263.net.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结构的影响进行了分析.Pandey 和 Hahn[4] 则通过 CAD 建模来描述三维编织纤维复合材料的代表性单元体,生动地再现了复合材料的内部复杂结构.在国内,吴德隆[5]最早提出了以四步法为基础的三细胞模型,它包括可重复的基元、面元和柱元.庞宝君等[6]则以四向编织复合材料为对象,从几何上建立了材料单胞的组织结构模型,讨论了单胞的内部纤维束在空间上的分布规律,并进行了细观上的实验验证.韩其睿和李嘉禄等[7]也根据三维四步法的编织工艺过程,建立了三维编织结构的单元体模型,考虑了纤维的宏观尺寸,并推导出相关参数之间的数学关系.此外,作者[8]也曾对三维四向编织复合材料的参数化建模技术进行了研究,提出了一种"米"字型体胞的有限元计算模型.然而,这种"米"字型体胞的有限元计算模型与编织物的真实细观结构存在较大的差异,它虽能给出较好的模量预测结果,但给出的全场应力分布却不尽合理.为了较为真实地模拟三维四向编织复合材料的细观结构,本文以成型后的编织复合材料为研究对象,根据实验的结果,在以往研究的基础上,提出了一个新的有限元胞体结构模型,该模型正确地反映了纤维束的交织方式,更符合三维四向编织复合材料的实际结构.

1　几何模型的假设

三维四向编织复合材料编织成型后,由于受提升装置的拉紧作用,并且灌注了树脂基体,纤维束之间会发生接触甚至挤压.为此,在建立三维四向编织复合材料结构单元实体模型的过程中,需做如下假设:1)经过挤压成型的编织复合材料内部的纤维束,由于周围纤维束的作用,它的截面保持为六边形,如图 1 所示,且截面形状沿纤维束轴线方向保持不变;2)相邻的纤维束都是互相紧密接触的,所有纤维束具有相同的特性;3)由于编织过程中提升运动的拉伸作用,所以预成型体内部纤维束不发生弯曲.在以上的假设中,假设 1)是根据文献[9]中的研究结果显示预成型织物中纤维束的截面近似为六边形的形状而做出的,而假设 2)和 3)都反映了纤维束的实际情况.

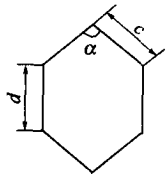


图 1　纤维束截面图

2　单元胞体的选取和几何特性

在三维四步(1×1)矩形编织复合材料编织过程中,根据对其内部结构中纤维束运行路径的分析,可取出图 2 所示的单元胞体($A\times A\times B$)在空间上呈周期排列.考虑到纤维束的截面形状,采用 CAD 软件模拟出单元胞体的实体模型如图 3 所示,为了清楚起见,图中并没有画出由相邻单元胞体穿插过来的非主要纤维.由于这个模型中纤维的空间关系看起来很复杂,为了研究所取胞体中纤维束之间的几何位置关系,以及它们与模型尺寸之间的关系,可从这个胞体中截取一个同样能够反映这些关系,并且能让其关系清晰可见的分析 模型(如图4所示,以下简称分析模型).所以

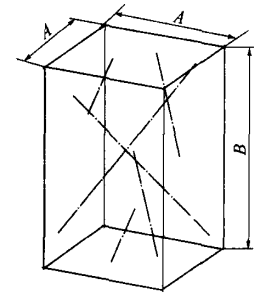


图 2　单元胞体中主要纤维轴线的空间位置

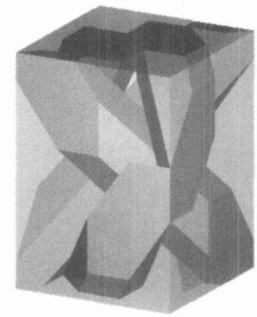


图 3　单元胞体的实体模型

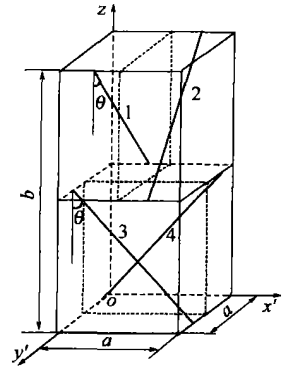


图 4　提取的几何分析模型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计算模型与所取分析模型之间的关系为：$A=\sqrt{2}a$，$B=b$，胞体的高度相同，均为一个编织花节的长度.根据上面对纤维束截面形状的假设，经过挤压后纤维束的形状可以由 c，d，α 三个参数来确定.通过实体模型中纤维束之间的接触关系来确定胞体内部的几何关系.例如，从分析模型的顶视图，可以看到纤维束的接触情况若是图5所示的第一种接触方式，则可以得到

$$4c\sin\frac{\alpha}{2}=a \tag{1}$$

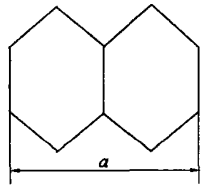


图5 纤维束的第一种接触方式

若纤维束1和纤维束3在空间上的面接触是图6所示的第二种情况，则很容易得到它们两轴线间最小距离 D 为

$$D=2\left(\frac{d}{2}+c\cos\frac{\alpha}{2}\right)\sin\frac{\alpha}{2} \tag{2}$$

同时，根据两根轴线在空间的位置关系，可解出 D 的另一种表达形式：

$$D=\frac{\sqrt{2}}{2}\frac{ab}{\sqrt{2a^2+b^2}} \tag{3}$$

同理，可求得轴线1与轴线4的空间距离与上面的结果相同.由视图的对称性可得到轴线2分别与轴线3和轴线4的距离也应该与此距离相等.

由图4中的几何关系可以得到编织角

$$\theta=\arctan\frac{2a}{b} \tag{4}$$

此外，分别通过纤维束3的轴线和纤维束4的轴线分别作平行于纤维束1轴线的两平面，由于纤维束之间为紧密接触，所以这两个平面形成的钝角即为纤维束的截面角 α，经推导可得

$$\alpha=\arccos\left(\frac{-2a^2}{b^2+2a^2}\right) \tag{5}$$

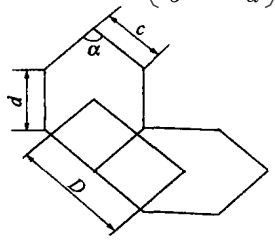


图6 纤维束的第二种接触方式

联立方程(1)～方程(5)可以确定纤维束的几何参数如下：

$$\left.\begin{aligned}\alpha&=2\arcsin\left(\frac{1}{\sqrt{1+\cos^2\theta}}\right)\\ c&=\frac{a}{4}\sqrt{1+\cos^2\theta}\\ d&=\frac{a}{2}\cos\theta\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

在编织复合材料中纤维束可看作单向复合材料，由纤维和基体材料组成，故有以下的关系：

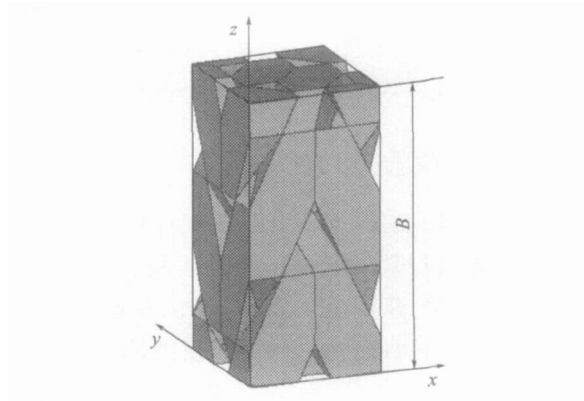
$$c^2\sin\alpha+2dc\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)=N_j\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^2\kappa_f^{-1} \tag{7}$$

其中，N_f 为纤维单丝数；ϕ 为纤维单丝直径；κ_f 为纤维束的敛集率.将(6)式代入(7)式，可以得到分析模型单元胞体的重要参数如下：

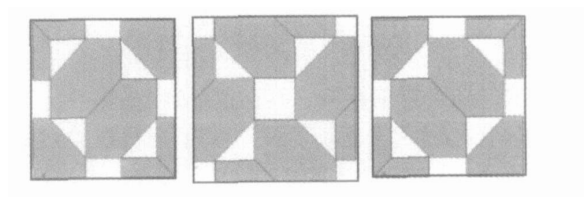
$$a=\phi\sqrt{\frac{2\pi N_f}{\cos\theta\kappa_f}} \tag{8}$$

$$b=\frac{2\phi}{\tan\theta}\sqrt{\frac{2N_f\pi}{\cos\theta\kappa_f}} \tag{9}$$

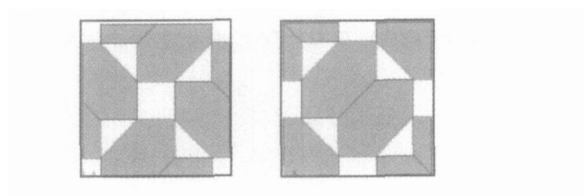
通过这些参数，便可以建立如图7a所示的单元计算胞体模型.



a 单元细胞



b 单元胞体在 $z=0$ 处的截面　c 单元胞体在 $z=1/4B$ 处的截面　d 单元胞体在 $z=1/2B$ 处的截面



e 单元胞体在 $z=3/4B$ 处的截面　f 单元胞体在 $z=B$ 处的截面

图7 三维编织的单元胞体

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　单元胞体的纤维体积比

由图 7 可以得到编织复合材料中纤维束的体积含量为

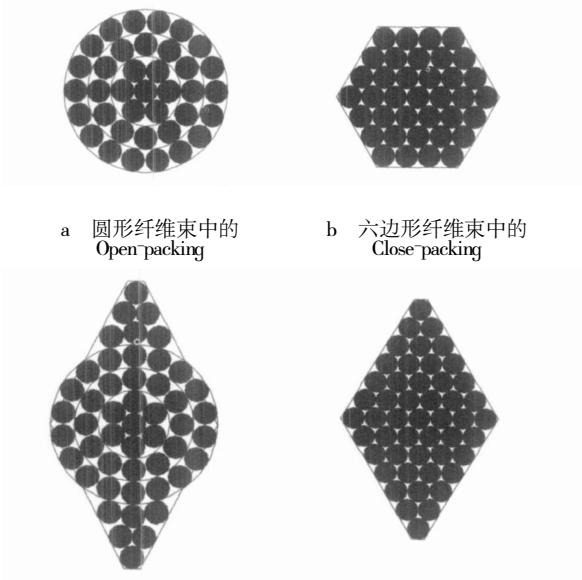
$$\nabla_f = \frac{A_f}{A_c} \tag{10}$$

其中,A_f 为纤维束沿编织方向的截面面积;A_c 为编织复合材料的横截面积.将 $A_c=\frac{a^2}{2}$ 和 $A_f=\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{d}{\cos\theta}+\frac{d+2c\cos\frac{\alpha}{2}}{\cos\theta}\right)\cdot\frac{a}{4}\cdot 2$ 代入式(10)可以得到:$\nabla_f=0.75$,即纤维束在整个胞体中占的体积含量为 75%,所以发现当纤维束处于挤压状态时,编织复合材料中的纤维束体积含量为一个常值,不会随编织角而改变,而只与纤维束的敛集率相关.即编织复合材料中纤维体积含量只与纤维束中的纤维体积含量相关.

整个编织复合材料中,纤维的体积比为

$$V_f = \nabla_f \times \kappa_f \tag{11}$$

纤维束的敛集率最大为:$\kappa_{f,max}=\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$,所以编织复合材料中最大纤维体积比为 $V_{f,max}=\nabla_f\times\kappa_{f,max}=0.68$,即三维四向编织复合材料中,纤维的体积比不可能超过 68%.如图 8[10]所示,针对不同纤维束中的纤维排列方式以及纤维排列的紧密程度,其纤维束的敛集率也各不相同.



a　圆形纤维束中的 Open-packing　　b　六边形纤维束中的 Close-packing

c　钻石形纤维束中的 Open-packing　　d　钻石形纤维束中的 Close-packing

图 8　纤维束的纤维排列

4　讨论与结论

通过(10)式可以得到所取单元胞体的边长随编织角的变化趋势如图 9 和图 10 所示.由图 9 可见,单元胞体模型的边长 A 随编织角的增大而增大,随纤维束的敛集率的增大而减小.由图 10 可知,单元胞体模型的高度 B 随编织角的增大而减小,随纤维束的敛集率的增大也减小.

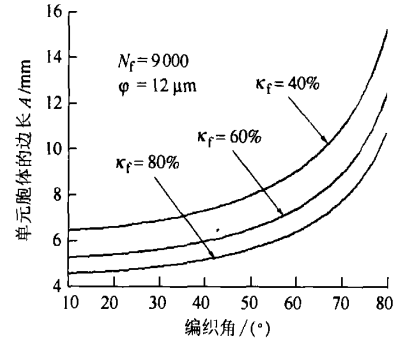


图 9　胞体边长 A 随编织角的变化趋势

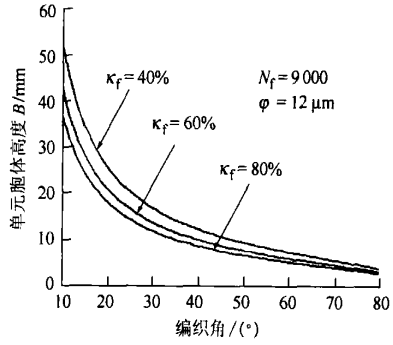


图 10　胞体高度 B 随编织角的变化趋势

显然,新提出的模型十分真实地模拟了三维编织复合材料中,纤维束与纤维束之间的接触与交织关系,以及纤维束与基体之间的空间几何关系,清晰地描述了三维编织复合材料的细观结构.此模型在空间上呈周期性分布,有利于采用有限元的方法来研究其等效力学性能.总之,根据三维编织复合材料新的有限元实体模型的讨论,可以得出如下的结论:

1) 新的实体模型十分真实地反映了编织复合材料内部纤维束的交织情况,并对纤维束之间的空间关系作出了准确的描述.同时,也确立了模型参数与编织参数之间的关系;

2) 当纤维束中的纤维丝根数和纤维直径以及纤维体积含量一定时,编织物的花节长度和厚度随着纤维编织角的增大而分别减小和增大;

3) 三维编织复合材料结构的纤维体积比理

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

论上可达到68%,这完全符合复合材料的一般要求.由于纤维束不可能处于理想状态,所以,理论计算应比实际编织物达到的体积比略大些.

参考文献(References)

[1] 卢子兴,杨振宇,李仲平. 三维编织复合材料力学行为研究进展[J]. 复合材料学报,2004,21(2):1~7
Lu Zixing, Yang Zhenyu, Li Zhongping. Development of investigation into mechanical behavior of three dimensional braided composites [J]. Acta Mater Comp Sinica, 2004,21(2):1~7(in Chinese)

[2] Du Guangwu, Ko Frank K. Unit cell geometry of 3-D braided structures[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(7):752~768

[3] Soheil Mohajerjashi. More on the fiber architecture of 3-D braided composites[R]. AIAA-97-1404,1997

[4] Pandey R, Hahn H T. Visualization of representative volume elements for three-dimensional four-step braided composites[J]. Composites Science and Technology, 1996, 56:161~170

[5] 吴德隆,郝照平. 五向编织结构复合材料的分析模型[J]. 宇航学报,1993,3:13~16
Wu Delong, Hao Zhaoping. Analysis model of 5-directional braided composites [J]. Chinese J of Astronautics, 1993, 3:13~16(in Chinese)

[6] 庞宝君,杜善义,韩杰才. 三维四向编织复合材料细观组织及分析模型[J]. 复合材料学报,1999,16(3):135~139
Pang Baojun, Du shanyi, Han Jiecai. Meso-structure and modeling of three-dimensional multi-directional composites [J]. Acta Mater Comp Sinica, 1999, 16(3):135~139(in Chinese)

[7] 韩其睿,李嘉禄,李学明. 复合材料三维编织结构的单元体模型[J]. 复合材料学报,1996,13(3):76~80
Han Qirui, Li Jialu, Li Xueming. Unit cell geometry of 3-D braided structure of composites [J]. Acta Mater Comp Sinica, 1996, 13(3):76~80(in Chinese)

[8] 刘振国,陆 萌,麦汉超, 等. 三维四向编织复合材料弹性模量数值预报[J]. 北京航空航天大学学报,2000, 26(2):182~185
Liu Zhenguo, Lu Meng, Mai Hanchao, *et al*. Numerical Prediction of moduli of 3-D and 4 step braided composites [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(2):182~185(in Chinese)

[9] 李嘉禄,刘 谦. 三维编织复合材料中纤维束横截面形状的研究[J]. 复合材料学报,2001,18(2):9~13
Li Jialu, Liu Qian. Study on fiber tows' cross-section in 3-D braided composites [J]. Acta Mater Comp Sinica, 2001, 18(2):9~13(in Chinese)

[10] 吴德隆,沈怀荣. 纺织结构复合材料的力学性能[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1998
Wu Delong, Shen Huairong. Mechanical behavior of textile structural composites [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1998(in Chinese)

(上接第78页)

参考文献(References)

[1] Burger, Goodman J R, Kägi A. Memory bandwidth limitations of future microprocessors[A]. In: Proc 23rd Ann Int'l Symp Computer Architecture, Association of Computing Machinery[C]. New York: ACM Press, 1996.79~90

[2] Bakshi A, Gaudiot J L. Memory latency: to tolerate or to reduce [A]. In: Proceedings of the 12th Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing [C]. Brazil: Sao Pedro, 2000.24~27

[3] Stanford. Streaming supercomputer[R]. The 2002 Annual Technical Report, Chapter 5, 2002

[4] Rixner S. Stream processor architecture[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001

[5] Seznec A. A case for two-way skewed-associative caches[A]. In: Proceedings of the 20th Annual International Symposium on Computer Architecture[C]. San Diego: CA, 1993.169~178

[6] Chen T F, Baer J L. Effective hardware-based data prefetching for high performance multiprocessors[J]. IEEE Transactions on Computers, 1995, 44(5):609~623

[7] Eggers S. Simultaneous multithreading: a platform for next-generation processors[J]. IEEE Micro, 1997, 12~19

[8] Patterson D, Anderson T, Cardwell N, *et al*. A case for intelligent RAM: IRAM[J]. IEEE Micro, 1997, 17(2)

[9] Oskin M, Chong F, Sherwood T. Active pages: a model of computation for intelligent memory[A]. In: Proceedings of the 25th Annual International Symposium on Computer Architecture[C]. Barcelona, 1998.192~203

[10] Rixner S, William J. Memory access scheduling [A]. In: ISCA 2000[C]. 2000.128~138

[11] Zhou G, Menas Kafatos. Future intelligent earth observing satellites [A]. In: Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings[C]. Hanover: University of Hannover, 2002.1~8

[12] Cloude S, Papathanassiou K, Reigber A, *et al*. Multi-frequency polarimetric SAR interferometry for vegetation structure extraction [A]. In: Proceedings of IGARSS'2000[C]. 2000. 129~131

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net