三维五向编织复合材料弹性性能的数值预报

李典森 刘子仙 卢子兴

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 基于三维五向编织复合材料细观结构模型,通过假设挤压固化后编织纱线和轴纱分别具有六边形和正方形横截面以及分析纱线之间的空间几何关系,建立了该类材料的有限元模型.并且,采用有限元方法计算得到了三维五向编织复合材料的弹性性能,分析了编织角和纤维体积含量对弹性性能的影响规律,并与三维四向编织复合材料的相应结果进行对比,同现有的实验数据进行了比较,验证了数值预测的有效性.结果表明:三维五向编织复合材料具有良好的力学性能,轴纱的加入使得轴向力学性能得以增强.

关 键 词: 三维五向编织; 复合材料; 有限元法; 弹性常数; 单胞

中图分类号: O 34; TB 332; TB 330.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)08-00891-05

Numerical prediction for the elastic properties of three dimensional and five directional braided composites

Li Diansen Liu Zixian Lu Zixing

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The finite element model is established based on the micro-structure of three dimensional and five directional braided composites and the assumption of the braiding yarn with the hexagon section and the axial yarn with the square section and the analysis of geometrical relationship of yarns in three dimensions. The elastic constants of three dimensional and five directional braided composites are calculated by the finite element method and compared with the corresponding results of three dimensional and four directional braided composites. The influences of the braiding angle and fiber volume fraction on the elastic constants are also analyzed. In addition, the predictions were compared with the experiment results which verified the validity of the finite element analysis. The results show that three dimensional and five directional braided composite has good mechanical properties and it improves the axial mechanical performance of the material by joining the axial yarns.

Key words: three dimensional and five directional braiding; composite; finite element method; elastic constants; unit cell

三维五向编织复合材料在保持四向编织复合材料优良性能的同时,对编织方向进行了有效增强,因而满足了工程中一些特殊需要,近年来受到人们的高度重视.文献[1]最早提出了三维五向编织复合材料的三细胞模型;文献[2]根据纱线的面内和空间运动轨迹,建立的具有4个内胞、2个面胞、1个角胞的改进单胞模型较真实地反映了三维五向编织复合材料的细观结构;文献[3]采用刚度平均化方法对三维五向编织复合材料的弹性性能进行了理论预测.但是,到目前为止还未见到三维五向编织复合材料力学性能分析的有限元方面论文的发表.本文基于文献[2]建立的细观结构模型,通过假设挤压固化后纱线截面形状并利用纱线之间的空间几何关系,建立了五向编

收稿日期: 2007-07-10

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资助项目(XK100060522); 北航博士创新基金资助项目

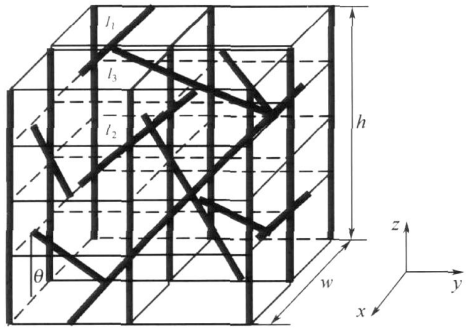
作者简介: 李典森(1978-),男,福建建阳人,博士生, lidiansen@163.com.

织复合材料的有限元模型.然后,通过有限元方法计算得到了三维五向编织复合材料弹性性能随编织角和纤维体积含量的变化规律,并同三维四向编织复合材料的相应计算结果进行了比较.同时,为说明有限元分析的有效性,还将计算结果同现有文献中的实验数据[4-6]进行了对比.

1 有限元建模

1.1 单胞的结构

根据文献[2],选用图1所示的内部单胞模型进行有限元建模,图中,倾斜直线代表编织纱,垂直直线代表轴纱.

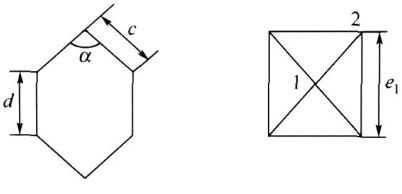


w—单胞宽度; h—一个花节的长度; θ—内部编织角; l_1, l_2, l_3—异面中心线.

图1 单胞模型

1.2 纱线的截面形状

由于纱线之间的挤压,使得固化后三维编织复合材料的编织纱截面近似呈六边形形状[7],因此,假设编织纱截面为规则的六边形,参数为 c, d, α;考虑到轴纱与编织纱间的排列关系,假设轴纱的截面为正方形(1为中心点,2为角点),边长为 e_1,如图2所示.



a 编织纱 b 轴纱

图2 编织纱和轴纱的截面图

1.3 单胞的几何特性

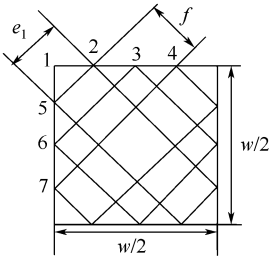
通过纱线之间的接触关系来确定单胞内部的几何关系.图3a为1/4单胞模型的俯视图,它显示了纱线间的第1种接触关系,即编织纱和轴纱之间的接触情况.面2-4-7-5和面1-2-5分别为编织纱和轴纱的面内投影,线2-5为编织纱和轴纱的接触交线投影.根据接触关系,由图2和图3可得

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

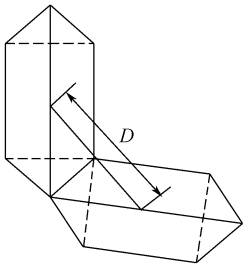
$$2\sqrt{2}\left(c\sin\frac{\alpha}{2}+\frac{e_1}{2}\right)=\frac{w}{2} \tag{2}$$

图3b描述了纱线间的第2种接触情况,即编织纱之间的接触,其中两编织纱线的中心线为异面直线,D为两异面直线间的最短距离,由图3b可得

$$D = 2\left(c\cos\frac{\alpha}{2}+\frac{d}{2}\right)\sin\frac{\alpha}{2} \tag{3}$$



a 第1种接触



b 第2种接触

图3 纱线间的两种接触关系

以图1中的两空间纤维束对应的异面中心线 l_1 和 l_2 为例: l_1 通过空间两点: $\left(\frac{w}{4},0,\frac{3h}{4}\right)$ 和 $\left(0,\frac{w}{4},h\right)$,而 l_2 通过空间两点: $\left(\frac{w}{4},0,\frac{h}{4}\right)$ 和 $\left(\frac{w}{2},\frac{w}{4},\frac{h}{2}\right)$;联立空间两异面直线之间的距离公式以及从图1得到的单元胞体尺寸和 θ之间的关系式,即

$$\tan\theta = \frac{\sqrt{2}w}{h} \tag{4}$$

可得

$$D = \frac{w}{2\sqrt{\frac{\tan^2\theta}{2}+1}} \tag{5}$$

通过 l_1 和 l_2 分别作平行于 l_3 的平面,则两个平面形成的钝角即为图2中纤维束的截面角 α根据空间几何的关系可得

$$\alpha = 2\arcsin\frac{1}{\sqrt{1+\cos^2\theta}} \tag{6}$$

根据轴纱和编织纱截面面积之间的关系可得

$$c^2 \sin\alpha + 2dc\sin\frac{\alpha}{2} = e^2 = re_1^2 \qquad (7)$$

式中, r为轴纱截面积和编织纱截面积之比; e^2 为编织纱线的截面面积.

此外,三维编织复合材料的 θ与编织角 θ_s存在如下关系[2]:

$$\tan\theta = \sqrt{2}\tan\theta_s \qquad (8)$$

联立式 (1) ~式 (8),可求得建立有限元单胞模型所需的各参数 w, h, c, d, e_1 和 α 结合这些参数关系以及图 1中纱线的空间走向,可以确定单胞内部纱线和胞体表面交点的关键点坐标,根据这些关键点,即可建立三维五向编织复合材料有限元单胞模型,采用 Solid45单元,如图 4所示.

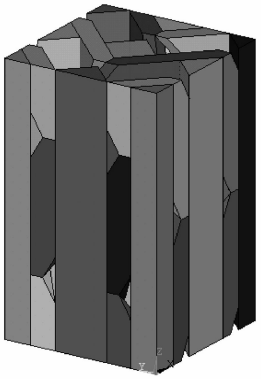


图 4　有限元单胞模型

2　有限元计算

三维五向编织复合材料可以看作由两种材料组成,一种为树脂基体,另一种为单向纤维增强树脂基复合材料柱体,其等效弹性常数的计算参见文献[8],所用纤维与基体的性能参数如表 1所示. 表中弹性常数的下标 1为沿纤维轴线的方向, 2, 3方向符合右手定则. 由于纱线在空间沿不同方向取向,故应沿着每一种取向的纱线建立独立的局部坐标系,分别设置材料的属性. 网格划分时,为了保证胞体之间网格划分的连续性和周期性,必须保证胞体相对的两个面上划分的单元节点数目及分布位置一一对应,图 5给出了有限元模型的网格划分结果.

此外,为保证胞体在各种载荷下都能保持空间上的连续性和周期性特征,这里采用文献[8]的基本思想,针对不同的受载模式,边界条件做不同的处理. 其中,纵向弹性模量 E_z的计算,可以通过对胞体施加 Z向位移载荷,由有限元方法计算胞体 $Z = h$面上所有节点在 Z向的节点力之和,进一步求得胞体的平均应力和应变,从而得到等效弹性模量. 计算横向弹性模量 E_x时,边界条件的处理与计算 E_z类似,只是将原来 Z方向上的位移载荷加在了 X方向,然后对不受载荷的 4个侧面上的节点施加约束方程. 关于剪切模量及泊松比的确定,也采用与文献[8]类似的方法,这里不再赘述.

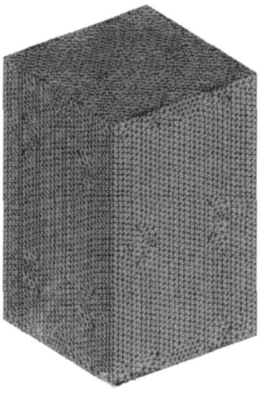


图 5　单胞的网格划分

3　计算结果和讨论

3.1　弹性性能随编织工艺参数的变化

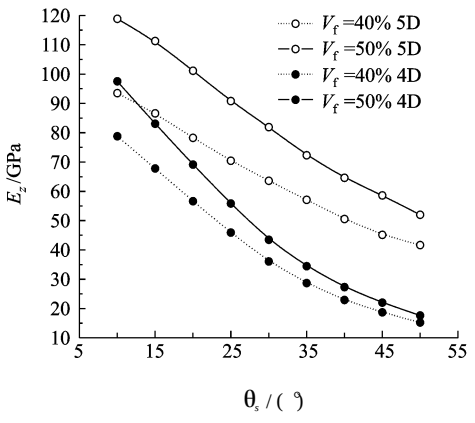
三维五向 (简称 5D)编织复合材料 (环氧树脂基)弹性性能随 θ_s及纤维体积含量的变化规律如图 6所示,图 6中还给出了同三维四向 (简称 4D)编织复合材料计算结果的比较.

表 1　材料参数

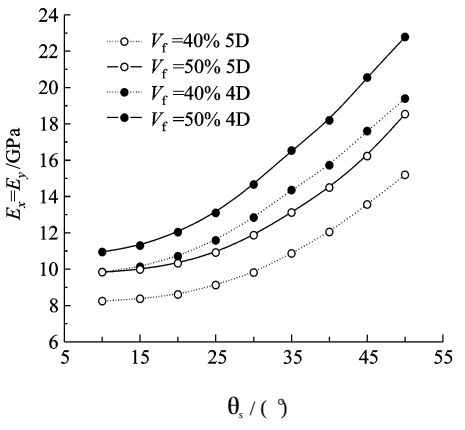
材料组分	E_1/GPa	$E_2 = E_3$/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	μ_{12}	μ_{23}
碳纤维	220.0	13.8	9.0	4.8	0.20	0.25
环氧树脂	4.5	4.5			0.34	0.34
酚醛树脂	3.2	3.2			0.35	0.35

由图 6a可见,在纤维体积含量 V_f一定时, 5D材料和 4D材料的 E_z均随 θ_s的增大而明显地减少;在 θ_s一定时, 2种材料的 E_z均随 V_f的增加而增大,并且在 θ_s较小时, E_z 随 V_f 的变化比较敏感. 对比 5D材料和 4D材料, 5D材料的 E_z明显比 4D材料要来得大,且随 θ_s的增大 E_z下降的幅度明显小于 4D材料. 另外,在 θ_s比较大时, V_f对 5D材料的影响明显大于 4D材料. 可见,轴纱对纵向性能具有明显的增强作用,提高了材料的 E_z,这充分体现了 5D材料在轴向上的优势.

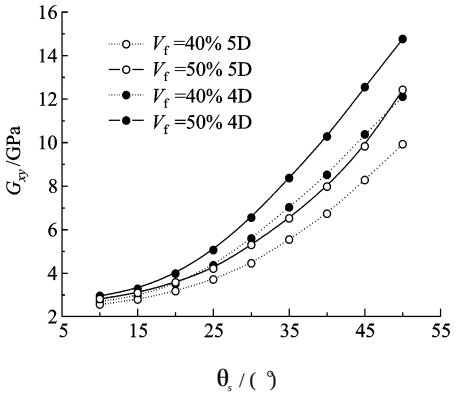
由图 6b可见, V_f一定时, 5D材料和 4D材料的 E_x均随 θ_s的增加而增大,在 θ_s较大时, E_x的增加更加明显. 同时可见, θ_s一定时, E_x 随 V_f 的增加而增大. 对比 5D材料和 4D材料, 5D材料的 E_x随 θ_s的变化趋势较 4D材料更缓慢一些. 在 θ_s和 V_f一定时, 4D的 E_x要比 5D材料大一些,这说明轴纱的加入对 5D材料的横向力学性能具有一定的削弱.



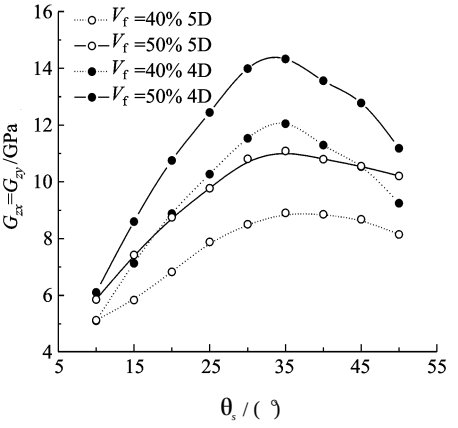
a E_z随 θ_s和 V_f变化



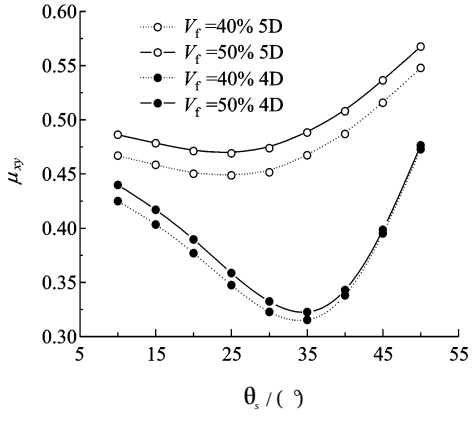
b E_x, E_y随 θ_s和 V_f变化



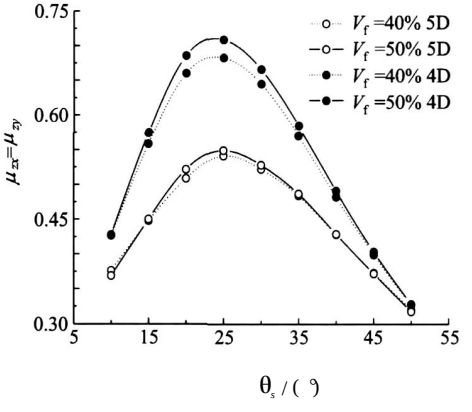
c G_{xy}随 θ_s和 V_f变化



d G_{zx}, G_{zy}随 θ_s和 V_f变化



e μ_{xy}随 θ_s和 V_f变化



f μ_{zx}, μ_{zy}随 θ_s和 V_f变化

图 6 弹性常数随 θ_s和 V_f的变化关系

由图 6c可见, V_f一定时,两种材料的横向剪切模量 G_{xy}均随 θ_s的增加而增大,当 θ_s小于 20°时,增加并不明显. θ_s一定时, 2种材料的 G_{xy}均随 V_f增加而增大,在 θ_s较小的情况下, G_{xy}受 V_f的影响较小,而当 θ_s较大时, G_{xy}随 V_f的增加呈增大趋势. 对比两种材料, 5D材料的 G_{xy}随 θ_s的变化要比 4D材料缓慢,在数值上比 4D材料要来得小.

由图 6d可见, V_f一定时, 2种材料的纵向剪切模量 G_{zx}, G_{zy}随 θ_s的增加先增大后减小,在 θ_s约等于 35时达到最大值,但 5D材料要比 4D材料变化得更缓慢些. θ_s一定时, 2种材料的 G_{zx}均随 V_f的增加而增大,并且在最大值附近它受 V_f的影响最大. 此外, 5D材料的 G_{zx}, G_{zy}小于相应的 4D情况.

由图 6e可见, θ_s是影响材料横向泊松比 μ_{xy}的主要因素. V_f一定时, 2种材料的 μ_{xy}随 θ_s的增加先减小后增大;对 4D材料, μ_{xy}在 35°左右达到最小值,而 5D材料的 μ_{xy}却在 25°左右达到最小值, θ_s大于 25°时, μ_{xy}随 θ_s的增加而增大,且 5D材料的 μ_{xy}随 θ_s的变化范围明显比 4D材料小. θ_s一定时, V_f对 μ_{xy}的影响并不太大,对 4D材料,当 θ_s大于 40°时, μ_{xy}随 V_f几乎没有变化,而对 5D材

料,却保持相当的敏感性. 此外, 5D材料的 μ_{xy}比4D材料要大,尤其是 θ_s处于 35左右时.

由图 6f可见, θ_s也是影响材料纵向泊松比 μ_{zx}的主要因素. V_f一定时, 2种材料的 μ_{zx}均随 θ_s的增加先增大后减小,且存在一个特定的 θ_s,约为 25°;在 θ_s小于 25条件下, μ_{zx}随 θ_s的增加而增大,之后随 θ_s的增加而减小. θ_s一定时, μ_{zx}对 V_f的变化也不敏感,对 4D材料,在 θ_s大于 15且小于 45时, μ_{zx}随 V_f增加而略有增大,而对 5D材料,当 θ_s大于 15且小于 35时, μ_{zx}随 V_f增加也略微呈现增加趋势,而当 θ_s大于 35时, μ_{zx}随 V_f的增加几乎不变. 此外, 5D材料的 θ_s在数值上明显要比 4D材料的小,特别是 θ_s处于 25左右时差异最大.

3.2　数值计算与实验结果的比较

为验证模型的有效性,将有限元计算结果与文献中的实验结果[4-6]进行了对比,如表 2所示. 可见, E_z和 μ_{zx}的预测与已有的实验数据吻合较好.

从上面图 6的讨论和表 2中的数据可以看出,本文模型对三维五向编织复合材料弹性性能的预测是合理的.

表 2　数值结果与实验结果对比

编号	材料	编织纱/轴纱	θ_s/(°)	V_f/%	E_z/GPa		μ_{zx}	
					实验值[4-6]	本文	实验值[4-6]	本文
1	碳/酚醛	9k/6k	20	45	88.9	87.4	0.658	0.578
2	碳/酚醛	9k/6k	20	55	92.0	98.8	0.510	0.564
3	碳/环氧	12k/12k	12.6	46.6	96.5	104.3	0.420	0.384
4	碳/环氧	12k/12k	20	45	97.0	88.4		0.481

4　结　论

基于三维五向编织复合材料的有限元模型,采用数值方法预报了材料的弹性性能,分析了编织角和纤维体积含量对性能的影响规律,并与三维四向编织复合材料的相应结果进行了对比,还同现有的实验数据进行了比较,验证了数值预测的有效性. 结果表明,三维五向编织复合材料具有良好的力学性能,与三维四向编织复合材料相比,由于在编织方向加入了轴纱,使得该方向的力学性能得到了提高. 此外,编织角和纤维体积含量仍是影响材料力学性能的重要参数.

参考文献 (References)

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

[2] 李典森,陈利,李嘉禄. 三维五向编织复合材料的细观结构分析[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(6): 7-11
Li Diansen, Chen Li, Li Jialu. Microstructure analysis of 3-dimensional 5-directional braided composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2003, 22(6): 7-11 (in Chinese)

[3] 卢子兴,刘子仙. 三维五向编织复合材料的弹性性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 455-460
Lu Zixing, Liu Zixian. Elastic properties for 3 dimensional and 5 directional braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(4): 455-460 (in Chinese)

[4] 陈利,梁子青,马振杰,等. 三维五向编织复合材料纵向性能的实验研究[J]. 材料工程, 2005(8): 3-6
Chen Li, Liang Ziqing, Ma Zhenjie, et al. Experimental investigation on longitudinal properties of 3-D 5-direction braided composites[J]. Materials Engineering, 2005(8): 3-6 (in Chinese)

[5] 李仲平,卢子兴,冯志海,等. 三维五向碳/酚醛编织复合材料的拉伸性能及破坏机理[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 869-873
Li Zhongping, Lu Zixing, Feng Zhihai, et al. Investigation of the tensile properties and failure mechanism of integrally-braided 5D carbon/phenolic composites [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 869-873 (in Chinese)

[6] 郑锡涛,郭稳学,盛国柱,等. 三维编织复合材料力学性能试验研究[C]//王玉林. 复合材料·生命、环境与高技术. 天津: 天津大学出版社, 2002: 1108-1111
Zheng Xitao, Guo Wenxue, Sheng Guozhu, et al. An experimental investigation on the mechanical behavior of 3-D braided composites[C]// Wang Yulin. Composites-life, Environment and High Technology. Tianjin: Publishers of Tianjin University, 2002: 1108-1111 (in Chinese)

[7] 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 Materiae Compositae Sinica, 2001, 18(2): 9-13 (in Chinese)

[8] 李典森,卢子兴,蔺晓明,等. 三维四向编织复合材料弹性性能的有限元预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(17): 828-832
Li Diansen, Lu Zixing, Lin Xiaoming, et al. Finite element prediction of elastic properties of three dimensional and four directional braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(17): 828-832 (in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)