

C/SiC 复合材料结构动态特性研究*

文潘涛 吕胜利 高行山 邓子辰

(西北工业大学国防科技研究院,西安 710072)

摘要 针对 C/SiC 轻质复合材料结构,将三维编织 C/SiC 复合材料看作是组分材料的空间结构物,由有序的细观结构单胞叠合而成.采用细观结构单胞作为离散单元对三维编织复合材料结构进行宏观网格剖分,利用有限元方法研究复合材料悬臂板动态特性.计算结果与理论值符合较好.

关键词 复合材料 三维编织 单胞模型 动态特性

引言

C/SiC 复合材料是一种耐高温、低密度陶瓷基热结构复合材料,可以满足 1650℃ 以下长寿命、2000℃ 以下有限寿命、2800℃ 以下瞬时寿命的使用要求,在高推重比航空发动机、卫星姿控发动机、空天往返防热系统、液体和固体火箭发动机等武器装备领域及涡轮燃气电站和核能反应堆等民用领域具有广阔的推广应用前景.三维编织复合材料从根本上克服了传统层合板的分层问题.鉴于其增强方式的特性,这类材料的性能分析与优化一直是工程应用中的技术难点.根据三维编织结构的特点,先后提出了纤维交织模型、纤维倾斜模型、有限单胞模型、有限多相单元模型等^[1-5].对于三维编织陶瓷基复合材料,由于其特有的成型工艺造成的纤维性能的改变,界面层、空洞又使得问题复杂化.目前国内外对此方面的研究尚处于初级阶段,本文针对 C/SiC 轻质复合材料结构,将三维编织 C/SiC 复合材料看作是组分材料的空间结构物,由有序的细观结构单胞叠合而成,利用有限元法研究复合材料悬臂板的动态特性.

1 编织复合材料的结构以及单胞模型分析

三维编织复合材料是近十年发展起来的一种新型的材料,跟其它类型复合材料一样也是由纤维和基体组成,由于纤维结构的特殊性,也可以看作一种特殊的结构.根据三维多向编织复合材料单胞几何模型,进一步建立有限元分析模型.以三维四

向编织复合材料为例,四步法编织工艺中,每个载体都在平面内的两个互相垂直的方向运动而不停地交换位置.假定载体每运动一步沿两个方向所前进的距离是相同的,则定义为 [1,1] 编织模式(类似地可以定义 [1,2]、[2,1] 等).

一个典型的四步法编织织物的单胞结构通常采用图 1 所示模型描述,单胞尺寸为 $a \times b \times c$.假设编织方向与 z 轴一致,显然对于 [1,1] 编织模式有 $a = b$,在该单胞结构中纤维束沿着长方体的四个对角线方向排列.将纤维束与编织方向所夹角度定义为编织角,则编织角 θ 与单胞尺寸间存在如下关系

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c} \quad (1)$$

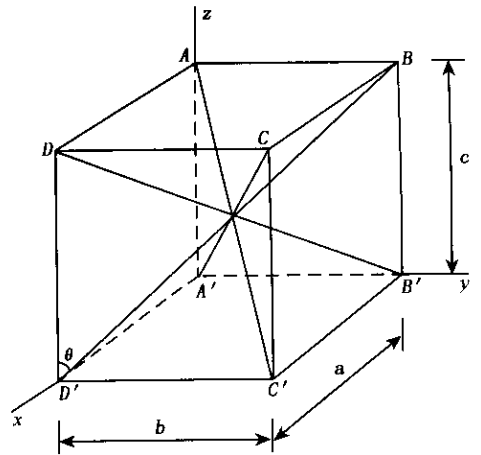


图 1 三维四向编织复合材料单胞模型

Fig. 1 The cell model of 3D braided composites

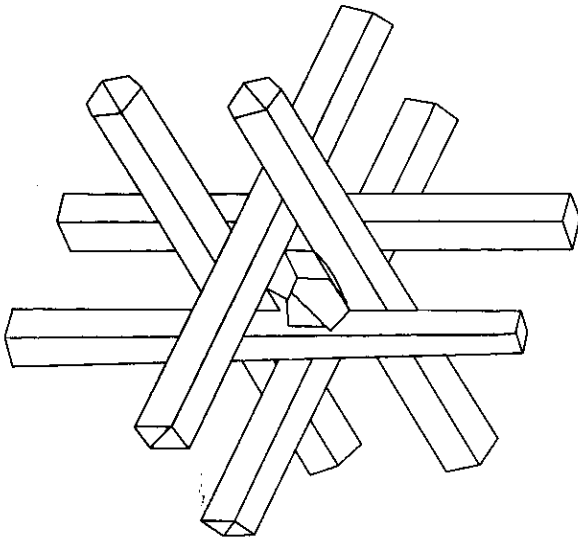


图2 织物纤维束排列

Fig.2 The fiber rods form of composites

在复合材料的实际单胞结构中,纤维束的方向沿着长方体的对角线方向,而各方向纤维束相互错开排列,如图2所示.为了更深入研究纤维束在单胞结构中的位置及方向,现假设:

- (1)纤维束为圆截面,直径为 D ,与基体复合后,纤维束仍保持为圆柱状;
- (2)纤维单丝之间没有间隙地紧密相切;
- (3)编织模式为[1,1].

利用上述假设,如果已知单胞的尺寸为 $a \times b \times c$,编织方向与 z 轴重合,则其编织角由上式(1)确定.

可确定其纤维束直径 D 为

$$D = \min \left\{ \frac{ab}{2\sqrt{a^2 + b^2}}, \frac{bc}{2\sqrt{b^2 + c^2}}, \frac{ac}{2\sqrt{a^2 + c^2}} \right\} \quad (2)$$

纤维束体积分数 V_R 为

$$V^R = \frac{\pi}{4} \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \min \left\{ \frac{ab}{(a^2 + b^2)c}, \frac{bc}{(b^2 + c^2)a}, \frac{ac}{(a^2 + c^2)b} \right\} \quad (3)$$

另一方面,如果已知纤维束直径为 D ,编织角为 θ ,则复合材料单胞的尺寸参数及体积分数可确定为

当 $\theta \leq \tan^{-1}\sqrt{2}$ 时

$$a = b = 2\sqrt{2}D, c = \frac{4}{\tan\theta}D$$

$$V^R = \frac{\pi}{8} \sqrt{1 + \tan^2\theta} \quad (4)$$

当 $\theta > \tan^{-1}\sqrt{2}$ 时

$$a = b = 2\sqrt{2 + \tan^2\theta} \cdot \sqrt{2}D,$$

$$c = \frac{2\sqrt{2 + \tan^2\theta}}{\tan\theta} \cdot D$$

$$V^R = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{1 + \tan^2\theta}}{2 + \tan^2\theta} \quad (5)$$

当编织角 $\theta = 54.74^\circ$ 时,纤维束的体积分数达到最大 $V_R^{\max} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi$.

2 单胞模型的简化与有限元分析

单胞的实际结构是比较复杂的,如果直接使用这种结构来对其进行有限元分析,工作量是相当大的,而且也是相当困难的,所以应对单胞的结构进行简化分析.对该单胞做如下的基本假定:

- 1)各纤维束截面形状及均匀度完全不变;
- 2)编织过程均匀,纤维束无时紧时松;
- 3)纤维、基体在弹性范围内满足正交各向异性及各向同性线弹性本构关系;
- 4)纤维单丝截面为圆截面.

本文所建立的单胞结构是矩形六面体,纤维束占据了六面体的四个体对角线,其示意图见图1.三维编织复合材料可以看成是许许多多的单胞结构的组合体.纱线之间的互锁可在单胞的交点处产生,例如对四向编织复合材料可看成图1所示的单胞组装.图中主要强调纱线的取向,而不是纱线间的相互作用(忽略中心交叉部分的相互作用).为了方便清楚起见,仅是显现出编织结构中的一组对角线,每一条纱线是连续的,从材料中的长度贯穿到底,但在单胞的互锁交点处改变其方向.

假设材料是[1×1]编织,碳纤维穿越长方体基体的四个体对角线,基体为碳化硅.取三维四向编织复合材料的工艺参数纤维编织角、纤维单丝直径和每束纤维包含的单丝数分别为为: $\theta = 41^\circ$, $d = 7.6 \mu\text{m}$, $N_f = 6000$.由上公式以及基本假设可以得到: $a = b = 1.6 \text{ mm}$, $c = 2.7 \text{ mm}$, $V_f = 54\%$.

利用 ANSYS 有限元分析程序建立悬臂板模型,该模型的尺寸为 $6.4 \times 3.2 \times 43.2 \text{ mm}$.根据 C/SiC 复合材料的编织方式,利用 ANSYS 软件先将复合材料板结构划分为多个单胞,对于单胞再进行单元划分,采用具有8节点、每个节点3个自由度

的 SOLID45 单元,其退化模式为四节点四面体单元.由于单胞模型是由两种材料,即纤维材料和基体材料组成,所以单胞内的纤维束和基体应分别划分网格.

本文分析增强纤维为 T300 碳纤维、基体为陶瓷基体的 C/SiC 复合材料板,所用纤维和基体的弹性性能数据如表 1 所示.

表 1 所用碳纤维和 SiC 基体的弹性性能

Table 1 Elastic performance parameters of carbon fiber and SiC matrix

	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	μ_{12}	μ_{23}	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
T300 C fiber(碳纤维)	220	13.8	9.0	4.8	0.2	0.25	1.75
SiC matrix(SiC 基体)	300	300			0.2	0.2	3.2

本文对该复合材料板施加类似于悬臂梁的边界条件,进行模态分析,计算前四阶固有频率如表

2 所示:

表 2 前四阶固有频率

Table 1 Frequency

Mode 模态	First-order(一阶)	Second-order(二阶)	Third-order(三阶)	Fourth-order(四阶)
Frequency(Hz)频率	2409.0	4704.4	14674	23163

一阶模态的位移云纹图如图 3 所示.

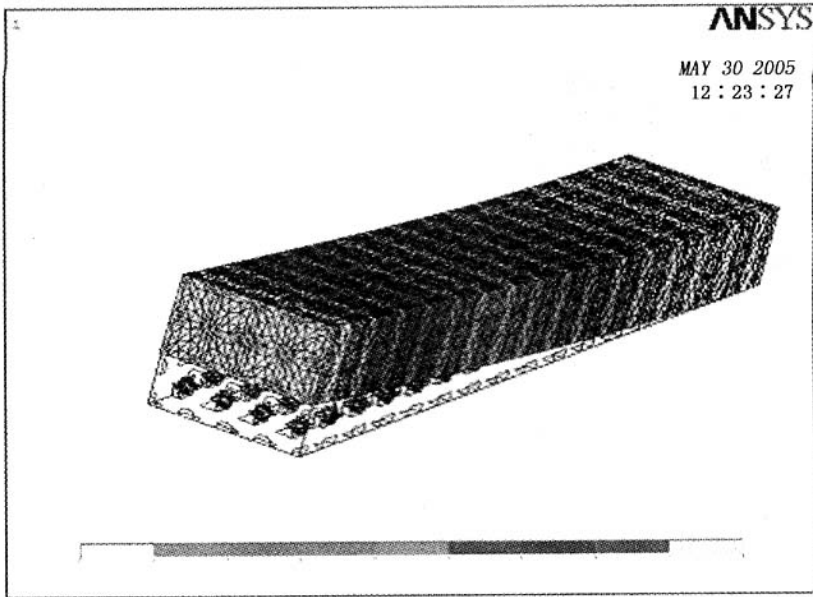


图 3 第一阶模态相对位移云纹图

Fig. 3 The nodal contour plot of the first-order mode

3 复合材料结构固有频率的理论计算

由于材料纵向拉伸模量符合等应变假设,故利用体积等效的混合准则计算纵向模量^[6].其计算的表示式如下

$$E_x = E_m f_{vm} + E_{fx} f_{vf} \quad (6)$$

其中

$$f_{vm} + f_{vf} = 1 - f_0 \quad (7)$$

上式中 f_{vm} 和 f_{vf} 分别代表基体和纤维的体积分数, f_0 代表孔洞的体积含量(值为 18%), E_m 代表基体的弹性模量, E_{fx} 代表纤维的纵向弹性模量.

通过弯曲梁理论可以得到复合材料结构的固有频率计算式为

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{E_x I / \rho A} \quad (8)$$

其中, β_i 可以根据梁的边界条件求得. 计算得到梁横向振动基阶固有频率的理论值

$$f_1 = 2507.4 \text{ Hz}$$

ANSYS 数值计算结果与理论计算结果的相对误差为 3.9 %.

由于考虑孔洞体积分量的混合准则计算的弹性模量高于真实值, 实验研究也证实了这一点^[6], 所以理论计算的固有频率值高于有限元计算值.

4 小结

依据三维编织复合材料的编织工艺, 采用一种“米”字型单胞模型, 从单胞入手建立有限元分析模型, 较真实的反映了三维编织复合材料的细观结构, 并由此计算了复合材料结构的固有特性. 为了验证模型的合理性及分析结果的准确性, 本文还对该问题进行了理论计算. 在理论计算过程中, 鉴于结构的复杂性, 又对结构参数进行了合理的简化近似处理. 理论结果与有限元数值计算值基本吻合. 由此表明, 用“米”字型单胞模型来分析三维编织复合材料的动力学特性是合理的、可靠的.

参 考 文 献

1 Ma CL, Yang LM, Chou TW. Elastic stiffness of three di-

mensional braided textile structural composites. *Composite Materials: Testing and Design, Seventh Conference*, 1984: 404~421

2 Yang JM, Ma CL, Chou TW. Fiber inclination model of three-dimensional textile structural composites. *J Compos-Mater*, 1986, 20: 472~483

3 Wu DL. Three-cell model and 3D braided structural composites. *Composites Science and Technology*, 1996, 56: 225~233

4 Chen L, Tao XM, Choy CL. Mechanical analysis of 3-D braided composites by finite multiphase element method. *Composites Science and Technology*, 1999, 59(11): 2383~2391

5 修英姝, 陈利, 李嘉禄. 三维编织复合材料制件的细观单胞元分析. *复合材料学报*, 2003, 20(4): 63~66 (Xiu Yingshu, Chen Li, Li Jialu. Analyzing the mechanical properties of 3-D braided composite structures by cell-element. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(4): 63~66 (in Chinese))

6 陶亮, 矫桂琼, 王波, 潘文革. 影响三维编织 CMC 断裂性能的孔洞问题. *应用力学学报*, 2003, 20(4): 37~40 (Tao Liang, Jiao Guiqiong, Wang Bo, Pan Wenge. The problem of holes effecting on 3D braided CMC fracture toughness. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2003, 20(4): 37~40 (in Chinese))

STUDY ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF C/SiC COMPOSITE STRUCTURE*

Wen Pantao Lv Shengli Gao Hangshan Deng Zichen

(Defense Science and Technology Academy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract This paper regarded the three-dimensionally carbon/silicon carbide braided composite as a spatial structure, which is made up of cell-elements and contains matrix and fiber. The structure model of a cell-element for the three-dimensionally multi-directionally braided composite was constituted geometrically and used for meshing the composite structure. Based on the cell model, we studied the dynamic behavior of the C/SiC composite cantilevered plate using finite element method. The theoretical dynamic behavior of the composite plate was also obtained and compared with the numerical result, which verified the correctness of the calculation model.

Key words composite material, three-dimensionally braided, cell model, dynamic behavior