

三维四向编织复合材料基本性能的有限元模拟

宛琼, 李付国, 梁宏, 张李骊

(西北工业大学材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘要: 依据三维四向编织复合材料的结构特点,建立了能真实反映其空间构型的“双纽线”单元体胞模型,并以此为基础,采用有限元方法对 C/SiC 三维四向编织复合材料的基本性能参数进行了数值模拟,获得了该材料在制备冷却阶段的热变形行为以及残余应力和残余应变的分布状况,同时获得了制备后室温条件下该材料的等效弹性模量与等效热膨胀系数值。

关键词: 三维四向编织; 复合材料; “双纽线”体胞; 有限元模拟; 基本性能

中图分类号: V258; TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-5053(2005)01-0030-06

三维编织复合材料结构上所具有的优点,使其强度和刚度得到了显著提高,同时,由于增强纤维织物具有良好的导热性能,能够通过改变编织参数调整结构内部热应力,来满足航空、航天工业中抗瞬间高温热蚀的要求。因此,具有广阔的应用前景。但复合材料有相当部分是在升温条件下成型的,当温度降低时,由于基体和纤维的体积收缩率不同,会在基体、纤维和界面上产生热残余应力。基体中的应力会使基体的性质发生变化,降低了材料的耐冲击性、疲劳强度、压缩强度等。纤维中的应力可能引起纤维曲折。这些应力的存在,降低了基体和纤维间的应力传递,不利于复合材料整体性能的提高。

三维编织复合材料的几何构型是分析其力学模型的基础,在该类复合材料的实际构型中,纱线(纤维束)在编织物中的走向为曲线,而现有文献却将其处理成直线构型,最常见的是“米”字型结构^[4]。因此,计算模型的精度和模型的适应性都受到了限制,不能满足该类复合材料性能参数表征与分析计算的要求。本研究提出了一种与该复合材料结构更为吻合的几何构型,通过有限元模拟,分析了热残余应力的分布、热膨胀系数随温度的变化情况以及等效弹性模量等基本材料性能,为该类复合材料的设计、制备与使用提供了参考。

1 “双纽线”单元体胞几何模型

对于复合材料而言,由于其内部结构的复杂性以及受到计算机容量的限制,通常不可能以整体结构为对象进行分析,而只能以其具有代表性的体积元——体胞单元为具体研究对象。对于三维四向编织复合材料,体胞为具有周期性分布的最小结构单元。借助细观力学分析方法,只需取其典型的代表性体胞单元,通过对代表性体胞单元的分析便可得到材料整体的宏观性能。

图1所示为实际三维四向编织的纱线结构^[1]。可以看出,纤维束在空间的形状近似为双纽线。为此,本研究采用一种新的更能接近实际的单元体胞模型——“双纽线”模型。

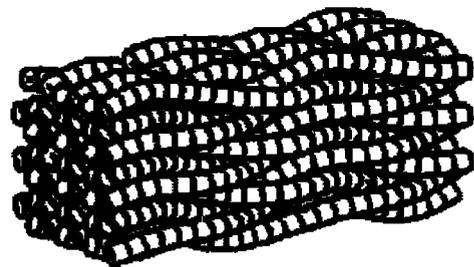


图1 三维编织的纱线结构

Fig. 1 The yarn structure of three-dimensional and four-step fabric

利用UG软件画出的单元体胞对角面内的双纽线见图2。在复合材料的实际构型中各纤维束之间相互交织,但不重叠,所以需在图2所示的双纽线的基础上进行改进。如图3所示,四个小圆分别代表纤维束的横截面,其半径 $R = 200\mu\text{m}$ 。要使纤维束

收稿日期:2003-11-11;修订日期:2004-04-13

基金项目:航空基础科学基金(03H53048)

作者简介:宛琼(1980-),女,硕士研究生,(E-mail)

wanqiong_student@sina.1...

交叉相切,但又不重叠,此时四个小圆圆心应均匀分布在某个大圆的圆周上。经计算求出该大圆的半径为 $283\mu\text{m}$ 。

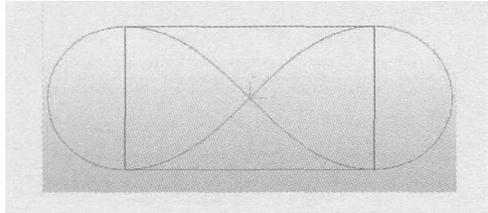


图 2 单胞对角面上的双纽线

Fig. 2 Lemniscates in the diagonal plane of unit cell

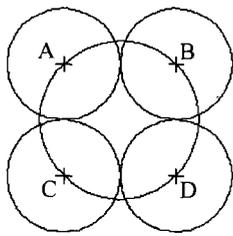


图 3 纤维束横截面形状示意图

Fig. 3 The schematic plan of the fibers' cross-section

由此,给出双纽线的参数方程为:

$$\begin{cases} x = 3182\sqrt{\cos 2\theta} \cdot \cos\theta \\ y = 3182\sqrt{\cos 2\theta} \cdot \sin\theta \end{cases}$$

$$\theta \in \left[-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{4}\right] \cup \left[\frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}\right] \quad (1)$$

采用曲线积分方法,求出双纽线在体胞单元内的长度为 $4623\mu\text{m}$,则纤维体积分数 V_f 约为 14.4%。最后给出的体胞中纤维束的空间构型见图 4。

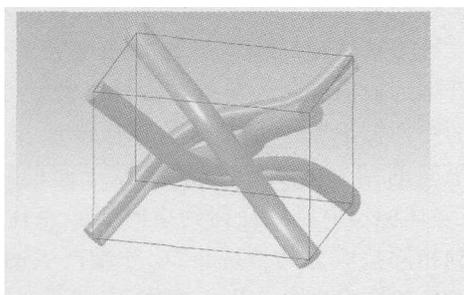


图 4 体胞中纤维束的几何模型

Fig. 4 The geometric model of the fibers in unit cell

2 “双纽线”单元体胞有限元模型

2.1 材料特性

三维四向编织 C/SiC 复合材料的两个组成部分 SiC 基体和 T300 C 纤维的材料特性见表 1。

2.2 网格模型

本研究涉及到的分析类型有热和结构耦合的情

况(分析热应力)以及单独的结构分析(计算等效弹性模量)与单独热分析(计算等效热膨胀系数)。所以使用能够同时计算温度和变形的三维耦合单元对建立的“双纽线”单元体胞模型进行有限元网格划分,在 ANSYS 软件中,选用单元类型为四面体耦合单元 SOLID98,共划分成 8535 个单元。纤维束和基体分别选取相应的材料属性,二者间有过渡层存在(热解碳)。对纤维和基体组成的六面体单元体胞进行网格划分所得有限元模型见图 5。

表 1 SiC 基体和 T300 C 纤维的材料特性

Table1 Basic properties of T300 and SiC

Material property	SiC matrix	T300 fibers
Density/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	3000	1760
Young's modulus/Pa	4×10^{11}	2.3×10^{11}
Poisson's ratio	0.15	0.2
Heat conductivity/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	42	17.4
Coefficient of thermal expansion $/10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$	4	-1
Specific heat/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	598	711

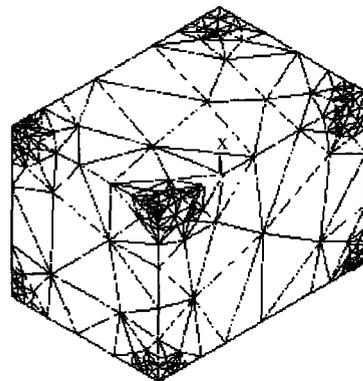


图 5 “双纽线”单元体胞有限元模型

Fig. 5 Finite element model of “lemniscates” unit cell

2.3 施加载荷和边界条件

在复合材料的制备过程中,只能精确测量获得其外表温度随时间的变化规律,对具体的换热条件和换热过程无法精确测定,所以采用第一类边界条件,即有限元分析时在体胞模型表面施加温度载荷。对于化学气相沉积制备的 C/SiC 复合材料,其曲线见图 6。

3 有限元模拟结果

3.1 热应力分布与变化规律

在三维编织复合材料的制备过程中,当保温阶

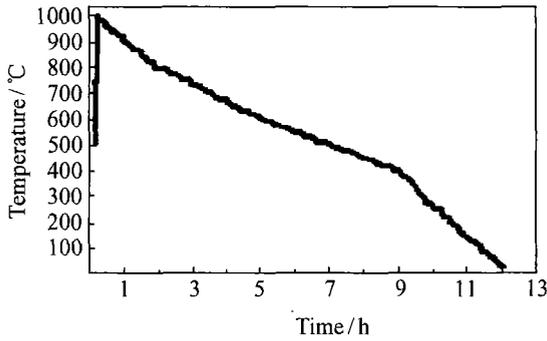


图 6 制备冷却阶段边界面温度曲线

Fig.6 Temperature curve on boundary surface in cooling stage

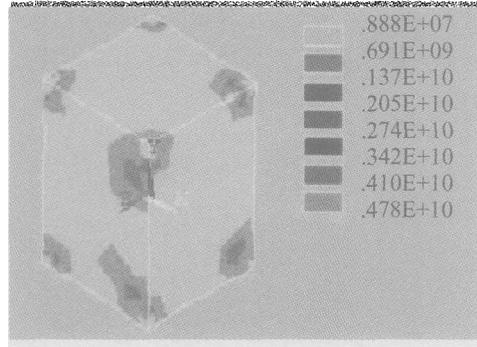


图 8 制备冷却至室温时的热应力分布 (单位:Pa)

Fig.8 The distribution of thermal stress(in Pa) after cooling down to room temperature

段结束后,基体和纤维束之间的界面接触良好,这种情况视同作为一种无应力状态,有限元计算时以此时的温度为参考温度计算冷却阶段的热应力分布。当开始冷却以后纤维和基体各自变形并通过界面相互协调。从图 7 中可以看出,由于两种材料热膨胀系数的差异,冷却下来以后,在基体相 SiC 和纤维束中就形成了不同程度的残余应力,其峰值最高达 4780MPa。峰值应力仅出现在界面尖角处的某一点,没有形成一个局部区域,因此,它对基体和纤维束的整体变形行为影响不大。若考虑基体和纤维束间的界面结合强度,出现峰值应力点处会发生界面的脱离,这种行为能迅速降低基体和纤维束所承受的热应力,使得应力释放,这与实际三维编织复合材料冷却过程中出现的局部界面脱离现象是相吻合的。此外,在模拟过程中对界面层的热解碳处理较为粗糙,没有按梯度变化规律处理,这对峰值应力的大小也有一定的影响。

性,纤维和基体的应变相互制约相互协调。由热弹塑性理论分析,随着基体塑性变形程度的增加,热残余应力的影响将逐渐下降。纤维和基体的塑性变形也会造成界面结合程度的下降,影响材料的整体性能。

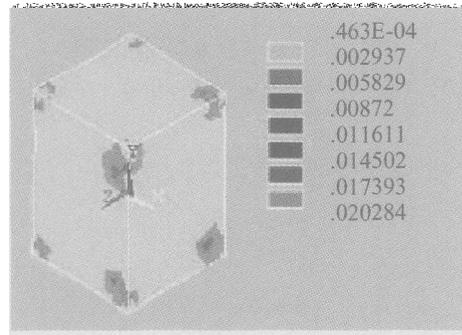


图 9 制备冷却至室温时的热应变分布

Fig.9 The distribution of thermal strain after unit cell

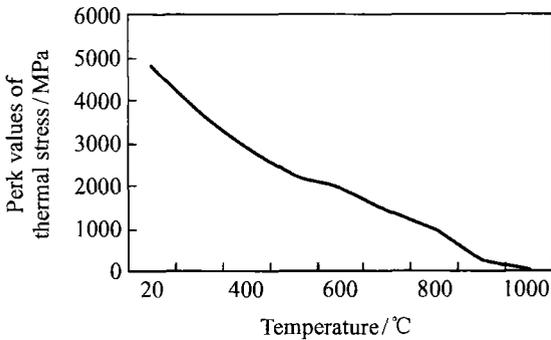


图 7 制备冷却阶段的热应力峰值变化曲线

Fig.7 The peak values of thermal stress in cooling stage of preparation (cooling from right to left)

由图 8 可以看出,热应变的不匹配,导致基体受拉,纤维受压。因此,在体胞对角处纤维与基体间界面处产生较大的热应力。

从图 9 可以看出,由于要保持材料内部的连续

3.2 等效弹性模量

弹性模量是复合材料的重要力学性能之一,它主要取决于基体和纤维本身的力学性能、纤维含量以及纤维的取向变化等参量。由材料模型可知,SiC 基体的弹性模量大于 C 纤维的弹性模量,即 SiC 基体原子间的结合力大于 C 纤维原子间的结合力。所以,当体胞没有受到任何约束时,SiC 基体和 C 纤维受到相同拉应力的情况下,C 纤维产生的变形要大于 SiC 基体产生的变形。如图 10 所示,在 $y = C_v$ (C_v 为体胞沿编织方向 y 的长度,其值为 $3.18 \times 10^{-3}m$) 的体胞表面作用了应力 σ_y 以后,体胞对角处的 C 纤维部分的变形明显大于基体部分的变形,就是由于 SiC 基体和 C 纤维的原子间结合力大小不一样而造成的。

给体胞模型施加的载荷和边界条件为:

$$\begin{cases} \text{载荷 } \sigma |_{y=C_v} = 10 \text{ Pa} \\ \text{位移边界 } \nu |_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

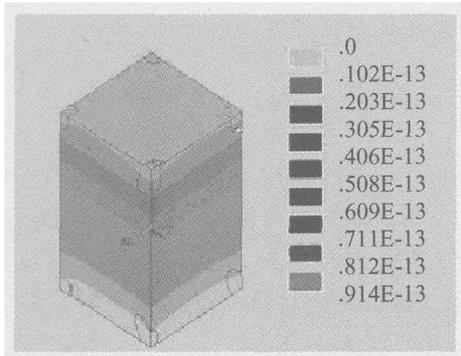


图 10 体胞 y 向位移等值线图(单位:m)

Fig. 10 The displacement y (in m) contour chart of cooling down to room temperature

经过有限元分析求解后,可以得到体胞 $y = C_v$ 面相对于底面的位移 v_0 。选取 $y = C_v$ 面上的 90 个节点,求出这些节点 y 方向的平均位移,即用平均位移 v_0 来进行等效弹性模量的计算。

则 y 方向的平均应变为:

$$\varepsilon_y = \frac{v_0}{C_v} = 2.674 \times 10^{-11} \quad (2)$$

其中, $v_0 = \frac{1}{90} \cdot \sum_{i=1}^{90} v_i$

由此,可求出编织方向(y 向)的弹性模量为:

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = \frac{10}{2.674 \times 10^{-11}} = 3.74 \times 10^{11} \text{ (Pa)} \quad (3)$$

在复合材料中,总的模量可以用混合定律来描述^[6]。假定纤维和基体应变相同即平行于编织方向时,复合材料的模量应为:

$$E_{//} = E_m V_m + E_f V_f \quad (4)$$

假定纤维和基体应力相同即垂直于编织方向时,复合材料的模量应为:

$$E_{\perp} = \frac{E_m E_f}{E_m V_m + E_f V_f} \quad (5)$$

式中, $E_{//}$, E_{\perp} 分别表示复合材料弹性模量的上限和下限值; E_m , E_f 分别代表基体和纤维的弹性模量; V_m , V_f 分别代表基体和纤维的体积分数。

已经求得在该三维四向编织 C/SiC 复合材料中 C 纤维体积分数 $V_f \approx 14.4\%$, 则:

$$V_m = 1 - 14.4\% = 85.6\%$$

将 E_m , E_f , V_m , V_f 值代入式(4)和式(5),可以得到该复合材料弹性模量的上限与下限值,即:

$$E_{//} = 4 \times 10^{11} \times 85.6\% + 2.3 \times 10^{11} \times 14.4\% = 3.76 \times 10^{11} \text{ (Pa)}$$

$$E_{\perp} = \frac{4 \times 10^{11} \times 2.3 \times 10^{11}}{4 \times 10^{11} \times 85.6\% + 2.3 \times 10^{11} \times 14.4\%} = 2.45 \times 10^{11} \text{ (Pa)}$$

通过有限元模拟得到弹性模量 $E_y = 3.74 \times 10^{11}$ Pa, 介于该复合材料弹性模量的上限和下限范围内, 并由于 E_y 为三维四向编织复合材料长轴方向的模量值, 所以其模拟更接近于 $E_{//}$, 即接近于复合材料弹性模量的上限。

3.3 等效热膨胀系数

按照有关原则,在计算某一温度 T_0 的热膨胀系数时,应选取这一温度附近的微小变化值 dT_0 , 计算出材料在 dT_0 温度变化范围内的应变值,与 dT_0 的比值即 T_0 时刻温度应变曲线的斜率即为 T_0 温度下的热膨胀系数。由于是求 T_0 时刻的斜率,所以要求 dT_0 趋近于零。在计算室温条件下 y 方向的等效热膨胀系数时给定的边界载荷就应为:

$$\begin{cases} T_0 = 20^\circ\text{C} \\ T = 20.001^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

经有限元数值模拟可得:

$$\alpha_y = \frac{\varepsilon_y}{T - T_0} = 2.08 \times 10^{-6} \quad (7)$$

复合材料等效热膨胀系数的计算有多种模型,经过多次试验验证,Turner 模型与试验数据吻合得更好。Turner 模型的表达式为:

$$\alpha = \frac{\alpha_m K_m V_m + \alpha_f K_f V_f}{K_m V_m + K_f V_f} \quad (8)$$

式中, α 为复合材料的等效热膨胀系数; α_m , α_f 分别为基体、纤维的热膨胀系数; K_m , K_f 分别为基体、纤维的体积模量 ($K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$, μ 为泊松比); V_m , V_f 分别为基体、纤维的体积分数。经计算可得:

$$\alpha = 1.99 \times 10^{-6} \quad (9)$$

本研究通过有限元模拟计算得到的该复合材料的等效热膨胀系数为 2.08×10^{-6} , 与解析解所得值相对比误差为:

$$\xi = \frac{2.08 \times 10^{-6} - 1.99 \times 10^{-6}}{1.99 \times 10^{-6}} \times 100\% = 4.5\%$$

对于三维编织 C/SiC 复合材料,纤维编织体以其独特的一体成型结构对复合材料的热膨胀变形起着重要作用。由于编织结构复合材料的基体是 SiC, 与碳纤维相比有着不同的膨胀系数和弹性模量,特别是碳纤维的热膨胀系数明显小于 SiC 基体的热膨胀系数,因此,在冷却过程中,纤维与基体的界面处产生较大的热应力,以制约 SiC 基体的收缩变形。由此可以看出,三维编织 C/SiC 复合材料中的 C 纤维束不但可以提高比强度和比模量,还可降低热膨胀系数、提高抵抗温度变化的尺寸稳定

性^[7]。

通过对三维编织 C/SiC 复合材料热膨胀系数的分析可知,编织结构复合材料的可设计性是调节其膨胀系数的重要因素。通过选择纤维和基体的体积比,充分发挥纤维和基体之间的界面对其变形的约束作用,有可能使三维编织 C/SiC 复合材料在某一特定方向的热膨胀系数趋于零,从而将其设计成零膨胀结构,满足航空航天、精密测量仪器的尺寸稳定性和耐久性要求。这也是碳纤维编织增强复合材料具有的一种特殊优势^[8]。

通常情况下,材料的热膨胀系数是温度的函数,图 11 为有限元方法计算出的 C/SiC 复合材料热膨胀量随温度的变化曲线。据有关定义,该复合材料的热膨胀系数与曲线的斜率成正比。

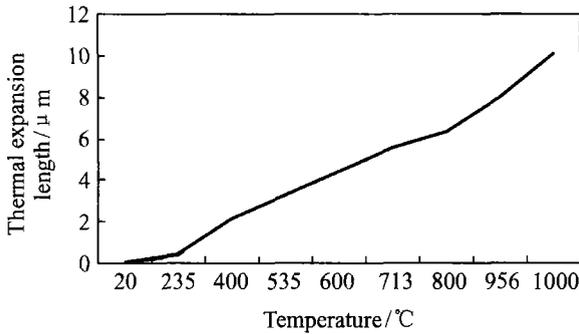


图 11 三维四向编织 C/SiC 复合材料的热膨胀曲线
Fig. 11 The thermal expansion curve of the three-dimensional and four-step braided C/SiC composite

固体材料的热膨胀本质,归结为点阵结构中的质点间平均距离随温度的升高而增大。在晶格振动中,质点的平衡位置 r_0 会随着温度而变化,测得的质点平衡位置随温度的变化规律曲线见图 12^[9]。

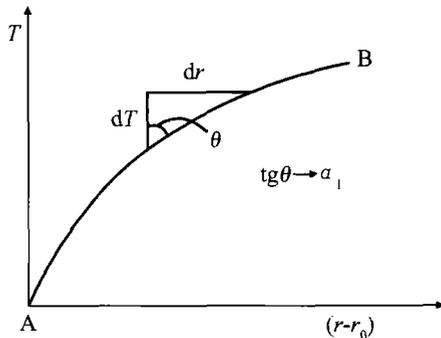


图 12 质点平衡位置随温度的变化规律
Fig. 12 The equilibrium position of particle changes along with temperature

在 AB 曲线上任一点的一阶导数 $\frac{dr}{dT} = \text{tg}\theta$, 与热

膨胀系数 α 具有相同的物理含义,即:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT} = \frac{\delta}{r_0 dT} = \frac{1}{r_0} \cdot \frac{dr}{dT} = \frac{1}{r_0} \cdot \text{tg}\theta \quad (10)$$

式中, δ 为质点从平衡位置 r_0 振动到 r_1 的增量。

三维四向编织 C/SiC 复合材料的热膨胀系数也符合这一规律,复合材料的热膨胀系数与曲线的斜率成正比 ($\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}$)。从图 11 中可见,在大约 235℃ 以下时,所研究复合材料的热膨胀系数基本不变;高于这个温度时,热膨胀系数变大,在 235 ~ 800℃ 之间基本恒定;高于 800℃ 后,热膨胀系数又继续增加。

4 结论

根据三维四向编织复合材料的结构特点,建立了“双纽线”胞模型,比较真实的反映了三维四向编织复合材料的空间构型;三维四向编织 C/SiC 复合材料在制备冷却阶段,由于 C 纤维与 SiC 基体间膨胀和收缩的相互牵制,致使复合材料中纤维与基体界面处产生很大的热应力与热应变;三维四向编织 C/SiC 复合材料在制备过程中产生的热应力随冷却温度的变化而产生变化,对于所研究材料,950℃ 和 500℃ 是热应力产生急剧变化的特征点;通过有限元模拟,得到了三维四向编织 C/SiC 复合材料在室温环境下的等效弹性模量和等效热膨胀系数值;三维四向编织 C/SiC 复合材料在其编织方向上的等效热膨胀系数随着温度的升高而增大,其中在 235℃ 和 800℃ 时有较明显的变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] YANG M, CHOU T W. Fiber inclination model of three-dimensional textile structure composite[J]. Journal of Composite Materials,1986,20(5):472-484.
- [3] 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.
- [4] 程伟,赵寿根,刘振国,等. 三维四向复合材料等效热特性数值分析和试验研究[J]. 航空学报,2002,23(2):102-105.
- [5] 成玲. 三维编织的计算机模拟技术[J]. 天津工业大学学报,2002,21(2):26-29.
- [6] 沈关林. 复合材料力学[M]. 北京,清华大学出版社,1996,115-119.

- [7] 张帆,孙鹏飞,张国定. SiC_p-Al 复合材料热膨胀系数的研究[J]. 金属热处理,2000,8:5-7.
- [8] 姚学锋,杨桂,姚振汉,等. 编织结构复合材料热膨胀特

- 性的实验研究[J]. 复合材料学报,2000,17(4):20-25.
- [9] 关振铎,张中太,焦金生. 无机材料物理性能[M]. 北京:清华大学出版社,2001. 121-125.

Finite Element Simulation of Key Properties of Three-dimensional and Four-step Braided Composite

WAN Qiong, LI Fu-guo, LIANG Hong, ZHANG Li-li

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A "lemniscates" micro model is established according to the fabric of the three-dimensional and four-step braided composite. On the base of this model, the distribution of thermal stress and strain of the three-dimensional and four-step composite during the preparation process is analyzed by using FEM software. The effective elastic modulus and the effective thermal expansion coefficient of the three-dimensional and four-step composite at room temperature are simulated and compared with their analytic solution. These results provide an accurate simulation method and give reference to design, process and use this kind of composite.

Key words: three-dimensional and four-step braided; composite; "lemniscates" micro model; finite element simulation; key properties

(上接第 29 页)

Synthesis of Heat-resistant Silicone Resin and Studies on its Thermal and Curing Properties

SUN Ju-tao, HUANG Yu-dong, CAO Hai-lin, GONG Gui-fen

(Department of Applied Chemistry, Faculty of Polymer Science, Harbin Institute of Technology, Harbin150001, China)

Abstract: The silicone resin is synthesized using hydrolysis-polycondensation method from phenyl and methyl chlorosilane, and the factors influencing this synthesis are investigated. The results indicate that silicone resin can be synthesized when the hydrolysis temperature is 70°C and $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{Cl})$ is between 5:1 and 8:1. And the IR analysis shows that silicone resin possesses hydroxyl end group. The thermal properties are investigated using thermo-gravimetric analysis (TG), differential thermogravimetric analysis (DTG) and muffle furnace test, and the effects of curing agents, such as KH-CL and triethanolamine, on the thermal properties of silicone resin were also discussed. It is found that silicone resin possesses excellent thermal stability with onset degradation temperature at about 400°C, and its mass loss is mainly caused by the "unzipped degradation" occurred between 400~500°C, and the "rearranged degradation" occurred after 500°C. But its thermal properties decrease at air atmosphere due to the oxidative-degradation of organic groups. Silicone resin can cure at room temperature with KH-CL, and its thermal stability is improved after cured.

Key words: methylphenylsiloxane; heat-resistance; hydroxyl end group; curing at room temperature; thermal degradation