

影响 SiC 陶瓷纤维力学性能的因素评价

王浩 李效东 彭平 冯春祥 王应德

(国防科技大学 长沙 410073)

文 摘 在 SiC 陶瓷纤维整个制备工艺过程中,影响因素繁多而且交叉作用,每个因素的变化都对 SiC 纤维的力学性能产生很大影响。本文以先驱体转化法为例,针对 SiC 陶瓷纤维整个制备工艺过程中的四个阶段,综述了各个因素对 SiC 陶瓷纤维最终力学性能的影响。

关键词 SiC,陶瓷纤维,力学性能,制备工艺

Evaluation on Factors of Influencing SiC Fiber Mechanical Properties

Wang Hao Li Xiaodong Peng Ping Feng Chunxiang Wang Yingde

(National University of Defense Technology Changsha 410073)

Abstract In the process of SiC ceramic fiber preparation, there are many important factors that affect the final fiber properties. Little variation of each factor may greatly affect the SiC ceramic fiber mechanical properties. As a typical example of precursor conversion method, the effects of each factor on SiC ceramic fiber mechanical properties are summarized in four stages of whole preparation of the fibers.

Key words SiC, Ceramic fiber, Mechanical property, Preparation technology

近年来,纤维增强陶瓷基复合材料有了迅猛发展。作为一种新型结构材料,SiC 陶瓷纤维以其耐高温、抗氧化、耐腐蚀、防老化和力学性能优良等特性而广泛应用于宇航、船舶、导弹、原子能等高新技术领域,但随着科学技术的进一步发展,对材料性能的要求越来越高,SiC 陶瓷纤维也就面临严峻的挑战,因此进一步提高 SiC 陶瓷纤维的性能便成为目前乃至今后所面临的重要研究课题。关于 SiC 陶瓷纤维的研制,从制备方法到具体的制备工艺,每一个环节中的具体因素都可能对 SiC 陶瓷纤维的最终性能产生影响。本文针对先驱体转化法,对 SiC 陶瓷纤维整个制备工艺过程的影响因素分别加以阐述。

1 先驱体转化法制备 SiC 陶瓷纤维概述

有关 SiC 陶瓷纤维的制备方法已有相当多的报道,如 CVD 法^[1~3]、超微粉掺混纺丝法^[4,5]、碳纤维转化法^[6,7]、先驱体转化法^[8]等,其中先驱体转化法已成为 SiC 陶瓷纤维的主要制备方法,由日本东北大学的矢岛圣使教授于 1975 年首次提出并由日本碳公司首先实现连续化生产,之后美、德、法国也竞相开展这方面的研究工作。作为国内唯一生产 SiC 陶瓷纤维的单位,国防科技大学陶瓷纤维研究室在 1980 年便沿用此法开展了这方面的研究,其工艺流程如图 1。为了能更清楚地表述,本文逆 SiC 陶瓷纤维的制备工艺,从后到前逐一进行阐述。

收稿日期:2000-02-08;修回日期:2001-01-08

王浩,1974 年出生,博士研究生,主要从事陶瓷纤维的研究工作

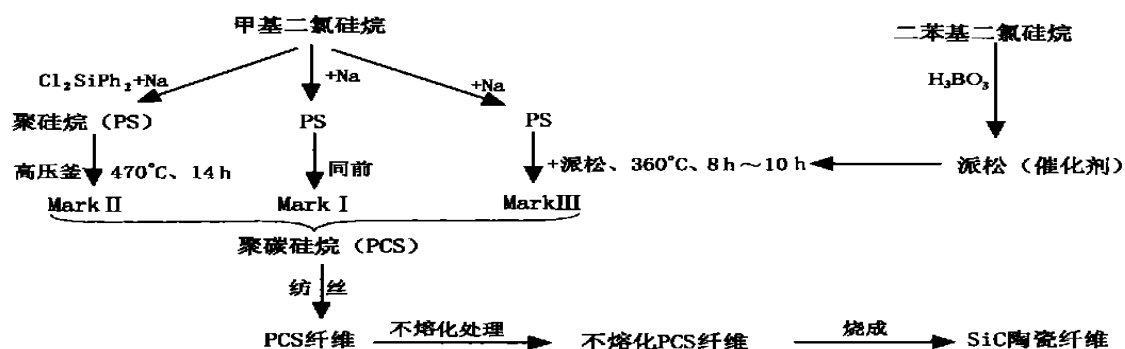


图 1 先驱体转化法制备 SiC 陶瓷纤维的工艺流程

Fig. 1 Flow chart of making SiC ceramic fibers by precursor conversion

2 影响 SiC 陶瓷纤维强度的因素分析

从本质上说,材料的强度取决于材料内部原子及分子间的结合力,根据这种结合力的不同,结晶固体可分为四种类型:分子晶体、原子晶体、离子晶体和金属晶体。就 SiC 纤维而言,Si 原子主要以共价键与 C 原子结合而形成原子晶体,共价键的饱和性和方向性在晶体结构中表现出十分明显的决定性作用:首先,在这类晶体中原子的配位数由具有饱和性键的数量(4 个)所决定;其次原子间的键合都采取一定的方向^[9]。SiC 的共价性很强,Si—C 键的离子性仅为 14%,其中 Si 与 C 原子均以 sp^3 杂化轨道互相重叠形成呈四面体型的金刚石结构^[10]。由于此结合键具有很高的结合能,Si 与 C 原子又形成了类似于金刚石的晶体结构,理论上 SiC 陶瓷纤维应具有很高的强度,但因为整个制备工艺中各种因素的相互影响,使得材料中存在许多宏观缺陷(如裂纹、气孔、杂质)和微观缺陷(如位错),导致 SiC 陶瓷纤维强度的实测值远低于它的理论值。除此以外,SiC 陶瓷纤维的组成也是影响其性能的重要因素(如表 1)。SiC 陶瓷纤维中,除主要组成—SiC 外还存在氧和过剩的游离碳,有报道指出^[11],氧主要以 SiO_2 的形式存在,至于其它存在形式,还有待于进一步研究,而氧和过多的游离碳的存在都会导致 SiC 陶瓷纤维性能的降低。综上所述,SiC 陶瓷纤维的成分组成、结构、缺陷是影响其性能的关键因素,而这些因素受整个制备工艺各个阶段的影响,只有各个阶段都严格控制才能生产出性能优越的 SiC 陶瓷纤维。

表 1 SiC 陶瓷纤维的成分含量与性能的关系^[12]

Tab. 1 Fraction of SiC ceramic fiber compositions and its properties

SiC 陶瓷纤维	氧含量 / %	SiC 含量 / %	过剩碳含量 / %	纤维强度 / GPa
Mark 型	11.0	50.0	39.0	3.50
Mark 型	13.9	43.2	42.6	2.00

3 整个制备工艺过程中影响 SiC 陶瓷纤维强度的因素

3.1 烧成阶段的影响

烧成是 SiC 陶瓷纤维制备工艺的最后一道工序,也是影响 SiC 陶瓷纤维性能的关键,此工序分以下五个阶段完成(如图 2):

- (1) 低于 550 ,微量低分子 PC 逸出,Si—H 键进一步脱氢交联,分子量增大;
- (2) 550 ~ 750 ,侧基裂解放出 H_2 、 CH_4 ,开始从有机向无机化转变;
- (3) 750 ~ 1 200 ,形成无定型态, - SiC 晶体开始形成;
- (4) 1 200 ~ 1 400 ,有 CO 气体放出, - SiC 晶粒成长;
- (5) 高于 1 400 ,继续放出 CO 气体, - SiC 晶粒长大。

PC 的结构、组成、分子量分布、纤维的不熔化程度、纤维直径及其分布、施加张力的大小、保护气的种类及流量、烧成时间等都对 SiC 陶瓷纤维的最终性能产生不同程度的影响。

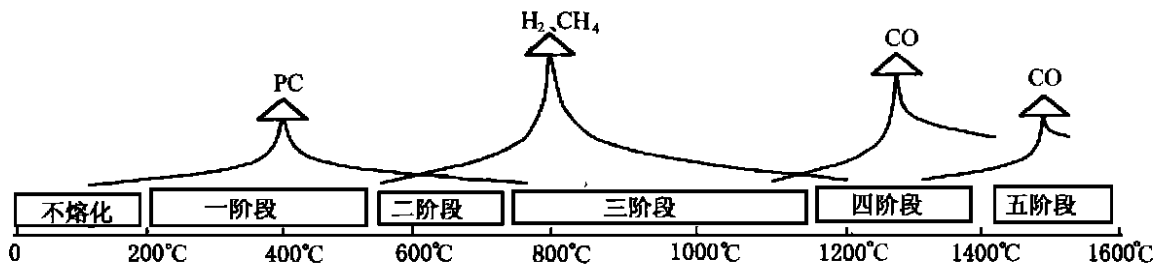


图2 不熔化 PCS 裂解无机化转变过程^[13]

Fig. 2 Conversion process of cured polycarbosilane fibers into inorganic fiber by pyrolysis

3.1.1 不熔化纤维组成结构及其分子量分布对 SiC 陶瓷纤维性能的影响

不熔化纤维是 PCS 原丝经过合适的方法发生交联而制得的。不熔化纤维的组成、结构是影响烧成阶段的本质因素,据文献[14]报道, SiC 陶瓷纤维的最佳化学计量为 Si C 1 1.1。因为当纤维中含氧和氢时,高温下会发生分解;过剩碳含量过高时,在空气或氧化性气氛中易于氧化,分解和氧化反应都会使陶瓷纤维产生缺陷,导致强度的降低;而纤维中含少量过剩碳时,由于处于晶界上的碳能够阻碍晶界的移动,从而有利于抑制晶粒的长大,提高纤维的性能^[15]。调节先驱体中的 Si、C 比例,控制 SiC 纤维中 Si、C 含量接近于化学计量比是必要的(表 2)。

表 2 部分先驱体、纤维组成与陶瓷纤维的性能^[9]

Tab. 2 Part of precursors, fiber compositions and fiber properties

单体	先驱体	纤维组成 / % (质量分数)	抗张强度 / GPa	弹性模量 / GPa
Me ₂ SiCl ₂	PCS	Si _{56.4} C _{31.3} O _{12.3}	2.5 ~ 3.3	182 ~ 210
MeHSiCl ₂	PCS	Si ₆₉ C ₃₀ O ₁	1.1	210
Me ₂ Si ₂ Cl ₄	PCS	Si ₅₂₋₇₅ C ₂₄₋₄₇ O _{0.5-6}	1.7	210

*不同结构的聚碳硅烷系列。

另外,在烧成的第一阶段,虽然 PCS 原丝经过不熔化交联处理,但低分子量 PCS 的挥发是不可避免的。如果先驱体中低分子量成分过多,则挥发加剧,导致缺陷增加、性能和产率下降;若高分子量 PCS 含量过高,影响进一步交联,对裂解不利。另外

分子量分布对纺丝工艺存在较大程度的影响,因此分子量分布要在合适的范围之内。图 3 给出日本 Nicalon 纤维先驱体的分子量分布曲线以供参考。

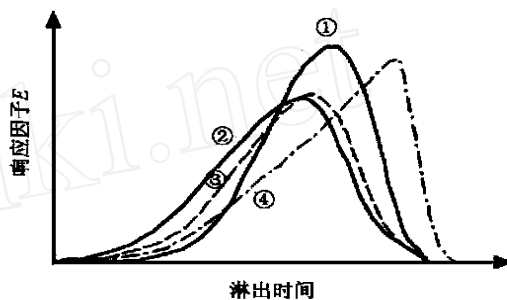


图 3 PCS 淋出曲线^[16]

Fig. 3 Elution curves of polycarbosilane

PCS-450; PCS-470; PCS-460; PCS-IMS。

3.1.2 不熔化程度对 SiC 陶瓷纤维性能的影响

不熔化程度是先驱丝经过一定的方法发生交联的程度,可以用不熔化增重表示。由于不熔化程度直接影响到 PC 的交联及氧的含量,因此对 SiC 陶瓷纤维的性能及产率都存在影响。不熔化程度越高, PCS 交联越大,低分子量 PC 挥发越少,陶瓷产率也就相应提高。然而,产率提高的同时,由于氧含量增大,从而导致 SiC 陶瓷纤维性能的降低,具体情况见表 3^[17]。此表中还列举了处理时间、处理温度对不熔化程度的影响,如果处理时间相同,温度越高,不熔化程度越大;若处理温度相同,处理时间越长,不熔化程度越好。有报道指出^[18]:当温度相同时 PC 增重达到 9% ~ 10% 时不熔化完全,烧成的 SiC 陶瓷纤维具有最高的抗拉强度(图 4)。

表3 不同不熔化条件下 PCS 纤维的部分性质变化

Tab.3 PCS fiber properties under different curing conditions

PCS 纤维	处理温度 /	处理时间 / h	增重 / %	抗拉强度 / GPa
PCS	25	-	0	-
PCS1508	150	8	1.21	-
PCS1608	160	8	2.02	-
PCS1803	180	3	3.8	-
PCS1805	180	5	4.5	-
PCS1808	180	8	5.8	0.80
PCS1901	190	1	5.4	0.84
PCS1905	190	5	8.2	1.46
PCS1908	190	8	9.9	1.63
PCS2005	200	5	9.6	2.04
PCS2008	200	8	11.4	2.25

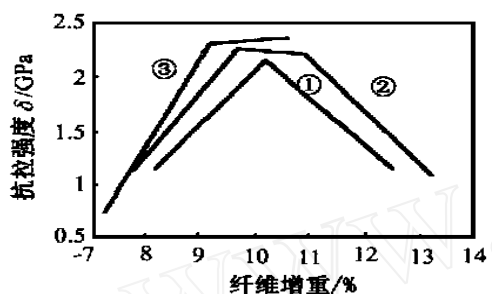


图4 PCS 纤维的增重对 SiC 纤维抗拉强度的影响

Fig.4 SiC fibers tensile strength vs PCS fibers weight gain 190 ; 200 ; 220 。

3.1.3 SiC 纤维直径对性能的影响

SiC 纤维直径与其性能的关系可用下式表示:

$$\text{拉伸强度} = \text{载荷 } F / \text{纤维初始横截面积} = 12.7 \times \text{载荷显示值} / \text{直径测试值}$$

可以看出,纤维直径越大,拉伸强度越小,这与实际测定值完全吻合(如图5)。

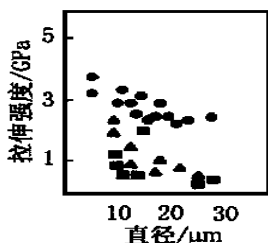


图5 热处理后 SiC 纤维直径与拉伸强度的关系^[9]

Fig.5 Tensile strength vs diameter of heat treated SiC fibers 800 ; 1 100 ; 1 130 。

目前,关于这种现象的微观解释还没有公开报道,笔者认为:随着纤维直径的增大,纤维截面上引宇航材料工艺 2001 年 第3期

入的缺陷增多,从而导致 SiC 陶瓷纤维性能的下降。

3.1.4 保护气体的种类及气封流量的影响

关于气封流量的影响有报道指出^[20]:进口流量大于出口流量对纤维的性能好、强度高、C/Si 比减小,颜色也随之变浅。烧成中因裂解产生了悬浮碳,它的排除受气封条件的影响,当进口流量大于出口流量是易于碳的排出。如果悬浮碳未能及时排出,就很容易存在于纤维内部或表面,导致 C/Si 比增大、纤维性能降低,而对于保护气体的种类,曾有过真空烧结和 N₂ 条件烧结的报道,主要是氧含量的控制问题。

3.1.5 施加张力的影响

烧结过程中由于裂解和结晶并放出 H₂、CH₄、CO 气体,造成纤维轴向收缩,导致纤维弯曲后应力集中而易于断裂。烧成过程中施加张力可以抑制纤维的收缩,又可以促进纤维中晶体的形成取向,这对提高 SiC 纤维的性能是非常有意义的,为此,在原丝能够承受的范围内施加的张力越大越好,但由于原丝强度低且属于脆性材料,在实际工作中实现加张是比较困难的,因此到目前为止还没有这方面的公开报道。

3.1.6 烧成时间的影响

关于烧成时间对 SiC 陶瓷纤维力学性能的影响,目前已有一些公开报道^[20]。报道中主要通过改变收丝速度来控制烧成时间并且制备出抗拉强度在 2.2 GPa 左右的 SiC 陶瓷纤维。关于收丝速度的影响报道中指出:增大收丝速度有利于纤维抗拉强度的提高,当 v = 19.6 m/h 时纤维的抗拉强度达到最大值,但收丝速度过大纤维强度反而下降(如图6)。

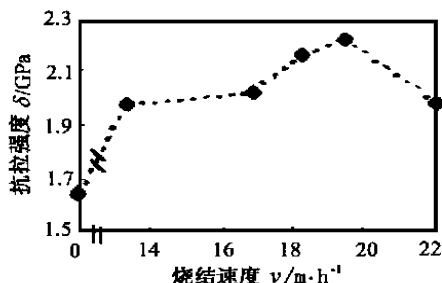


图6 SiC 纤维的强度与烧结速度的关系^[20]

Fig.6 SiC fiber strength vs sintering rate v = 0 是纤维在 v = 13.8 m/h 条件下突然静止在炉中约 10 min。

在导丝速度一定的情况下,收丝速度加快会使纤维上的张力增大,有利于微晶的轴向排列。但如果收丝速度太快,纤维在炉中停留时间太短而不利于实现无机化及无机化结构的进一步完善而且可能使张力过大造成丝束中断头增多;如果收丝速度太慢,虽然在炉中停留时间长有利于无机化过程,但C/Si比增大、游离碳增多而难于抑制微晶的形成。

3.2 不熔化过程的影响因素

不熔化处理是SiC陶瓷纤维制备工艺的重要工序,不熔化程度的优劣直接影响不熔化丝的强度和含氧量。不熔化丝的强度决定着SiC陶瓷纤维能否实现连续化生产。影响不熔化程度的因素主要有不熔化方式(见表4)、温度和时间;而对于不熔化方式,目前报道过的方法有空气不熔化、高能粒子辐射交联(射线辐射、紫外光照射、激光辐照、微波辐射等)、化学气相交联(不饱和烃交联、NO₂交联、硫蒸气交联、催化交联等),其中利用高能粒子辐照交联是制得低含氧量SiC的有效方法。化学气相交联是近年来刚刚兴起的,用此法制得的不熔化PC制备的SiC陶瓷纤维不仅强度高,而且在氩气保护下经1500℃恒温8h后,强度仍可维持1.4GPa以上。此外,催化交联也是制备低含氧量SiC陶瓷纤维的一个发展方向。此法中所用的催化剂常温下多为固态,如何将催化剂均匀地分散在PCS先驱体中是能否有效交联的关键^[15]。

表4 部分纤维的性能^[21~23]

Tab. 4 Properties of some kinds of fibers

纤维名称	交联方式	拉伸强度/ GPa	弹性模量/ GPa	组成/ % (质量分数)
Nicalon	空气预氧化	3.0	220	Si ₅₈ C ₃₀ O ₁₂
Hi - Nicalon	电子束照射	2.8	270	Si _{63.7} C _{35.8} O _{0.5}
	射线辐射	2.1	220	-
Dowcoring 纤维	不饱和烃交联 (1-己炔)	4.5	230	-
	NO ₂ /BCl ₃	2.6	450	Si _{68.0} C _{31.5} O _{0.10} B _{0.40}
Co - PSS* - PHPS** 纤维	不经交联固化 (干法纺丝)	1.0	190	Si _{57.1} C _{18.1} O _{6.9} N _{14.2}
UF-80	干法纺丝	3.0	270	Si ₅₅ C ₄₂ O _{2.0} N _{1.0}

* PSS 指聚硅杂苯乙炔; ** PHPS 指全氯化聚硅杂苯乙炔。

3.3 纺丝工艺中的影响因素

在纺丝工艺研究中,国防科技大学王应德副教

授做了比较细致的工作。他在公开报道中指出^[24]:控制聚碳硅烷纤维直径的大小及其分散性是纺丝工艺中最重要的一环,它是影响SiC陶瓷纤维最终性能的重要因素。聚碳硅烷的可纺性(以纤维连续长度与其直径比作为评价标准)、分子量分布及其分散系数、纺丝温度、气流速度、导轮速度等都对其产生不同程度的影响,其中可纺性的好坏直接影响到成丝的可能性,而可纺性的好坏关键取决于聚碳硅烷的熔点及分散系数(图7),可以看出:当PC的分散系数大于2时可纺性变差;当分散系数小于2时具有较好的可纺性。当PCS熔点低时其可纺性良好,随着熔点的升高其可纺性变差。而对于纺丝温度,聚碳硅烷的粘度对温度有强烈的依赖性,其可纺温区非常窄,在可纺温区以外2~3℃的温度变化都有可能使其粘度发生巨大变化。因此,选择合适的纺丝温度及其精确控制对聚碳硅烷纤维的直径及其均匀性是非常重要的,这也是制备出性能优越的SiC陶瓷纤维最起码的条件。

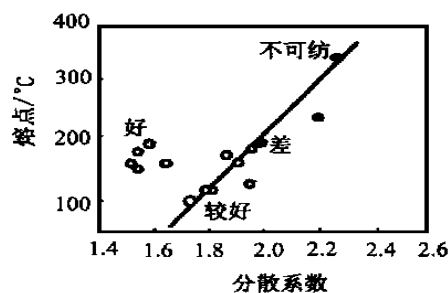


图7 聚碳硅烷的熔点、分散系数与可纺性的关系^[25]

Fig. 7 Spinnability vs melt point and molecular weight distribution of PCS

3.4 聚碳硅烷合成阶段的影响

此阶段的影响因素可归结为原料的选择及其纯化、蒸馏、有机合成条件等(如表5),这些都是以制得纯净、不同粘度、不同组成结构、不同平均分子量及高产率的聚碳硅烷为目的。目前关于先驱体法制备聚碳硅烷的途径已有很多报道,如失岛法^[25,26]、开环聚合法^[27,28]、聚合物金属化法^[29]、缩聚法^[30,31]、共聚合法^[32]、共混法^[33]、硅氢化法^[34]、热裂解法^[35]、光化学法^[36]等,这些方法虽然各有特色^[37],但只有失岛法实现连续化生产,因此也格外受到人们的青睐。

表 5 聚碳硅烷 PCS 的合成^[16]

Tab. 5 Synthesis of polycarbosilane

PCS	反应时 间/h	反应温 度/度	蒸馏温 度/度	压力 / Pa	产率 / %	数均 分子量
PCS—450	14	450	150	133.3	66.3	730
	14	450	280	133.3	50.8	1 250
PCS—460	14	460	280	133.3	56.0	1 450
	14	470	105	133.3	66.4	860
PCS—470	14	470	200	133.3	59.7	1 210
	14	470	280	133.3	58.8	1 680

4 结束语

在 SiC 陶瓷纤维整个制备过程中,从原料的纯化、聚碳硅烷的合成、纺丝、不熔化到烧成,影响其最终性能的因素繁多而且交叉作用,任何一个环节因素的改变都会对 SiC 陶瓷纤维的性能产生很大的影响。因此,摸索出制备性能更为优越的 SiC 陶瓷纤维的最佳工艺将是目前乃至今后研究的方向。

参考文献

- Lewinsoh C A et al, In: 7th Proc. Am. Soc. Compos. Tech. Conf., 1992: 779
- Morell J I, Economou D J, Amundson N R. Chemical vapor infiltration of SiC with microwave heating. Mater. Res., 1993; 8(5): 1 057 ~ 1 067
- Lackey W J, Hanigofsky J A, Freeman GB, Hardin R D, Prasad A. Continuous fabrication of SiC fiber tows by CVD. J. Am. Ceram. Soc., 1985; 68(4): 185 ~ 190
- Nunn S D, Ropovic D, Baskaran S, Halloran J W, Subramanian G, Bike S G. Suspension dry spinning and rheological behavior of ceramic-powder-loaded polymer solutions. J. Am. Ceram. Soc., 1993; 76(10): 2 460 ~ 2 464
- Halloran J W, Hodge J D, Chandler D et al. Fabrication and properties of high-temperature superconducting wire by the green-fiber method. J. Am. Ceram. Soc., 1992; 75(4): 903 ~ 906
- Krishnarao R V, Mahajan Y R. Preparation of silicon carbide fibers from cotton fiber and silicon nitride. J. Mater. Sci. Lett., 1996; 15(3): 232 ~ 235
- Okada K, Kato H, Nakajima K. Preparation of silicon carbide fiber from activated carbon fiber and gaseous silicon monoxide. J. Am. Ceram. Soc., 1994; 77(6): 1 691c1 694
- Meyer M K, Aking M. Silylene-acetylene polymers as precursors to SiC fibers. Ceram. Eng. Sci. Proc., 1991; 12(7): 1 019 ~ 1 031

- 潘道皓,赵成大,郑载兴等编.物质结构.高等教育出版社,第二版,1989:514 ~ 567
- 五 0 五材料实验研究室. SiC 纤维先驱丝—聚碳硅烷纤维的研制.国防科技大学学报, 1985; 1: 71 ~ 85
- Hasegawa Y, Okamura K. Synthesis of continuous silicon carbide fiber: part 3 pyrolysis process of polycarbosilane and structure of the products. J. Mater. Sci., 1983; 18(12): 3 633 ~ 3 648
- 王浩.聚碳硅烷纤维的预氧化及无机化研究.国防科技大学陶瓷纤维及其复合材料国防重点实验室硕士论文, 2000
- Hasegawa Y. Synthesis of continuous silicon carbide fiber: Part 6 Pyrolysis process of cured polycarbosilane fiber and structure of SiC fiber. J. Mater. Sci., 1989; 24(4): 1 177 ~ 1 190
- Zhang Z F, Babonneau F, Laine R M, Mu Y, Harrod J F. Polymethylsilane—a high ceramic yield precursor to silicon carbide. J. Am. Ceram. Soc., 1991; 74(3): 670 ~ 674
- 范小林,宋永才,李效东,冯春祥.耐高温 SiC 纤维的研究动态.宇航材料工艺, 1998; 28(1): 13 ~ 17
- Hasegawa Y, Okamura K. Synthesis of continuous silicon carbide fiber: Part 4 The structure of polycarbosilane as the precursor. J. Mater. Sci., 1986; 21(1): 321 ~ 328
- 李小霞,冯春祥,宋永才.聚碳硅烷纤维不熔化处理的研究——放映过程的增重及其动力学计算.宇航材料工艺, 1998; 28(3): 44 ~ 48
- 王军,冯春祥,宋永才.聚碳硅烷纤维的空气不熔化处理.化学学报, 1998; 56(1): 77 ~ 80
- 冯春祥,刘心慰,杨一明等.连续 SiC 纤维的研制.国防科技大学学报, 1993; 15(1): 66 ~ 72
- 李小霞,冯春祥,宋永才等.快速烧结法制备连续碳化硅纤维.高技术通讯, 1998; 8(1): 41 ~ 44
- Toriki W, Batich C D, Sacks M D, Sdeem M, Choi G J, Morone A A. Polymer-derived silicon carbide fibers with low oxygen content and improved thermomechanical stability. Comp. Sci. Tech., 1994; 51(2): 145 ~ 159
- Ishikawa T. In: Inter. Workshop on Adv. in Inorganic Fiber Technology. 1992
- 卢玲,冯春祥,宋永才.聚碳硅烷纤维的 BCl₃ 不熔化处理研究.宇航材料工艺, 1997; 27(3): 32 ~ 35
- 王应德,宋永才,邹治春等.聚碳硅烷可纺性与纺丝工艺探讨.合成纤维, 1997; 26(6): 11 ~ 14
- Yajima S, Okamura K, Hayashi J, Omori M. Synthesis of continuous SiC fibers with high tensile strength. J. Am. Ceram. Soc., 1976; 59(8): 324 ~ 327

(下转第 14 页)

- 1994 中国材料研讨会 [C],1994 :83
- 6 章文峰. A review of fiber reinforced Al alloy matrix composites. *Journal of Materials Engineering* ,1999 ;(1) :40 ~ 43
 - 7 任德亮等. Study on the stir mixing fabricating process of SiC_p/Al composites. *Foundry Technology* ,1999 ;(2) :19 ~ 24
 - 8 Cao Y H et al. New materials of foreign missiles. *Winged Missiles Journal* ,2000 ;(3) :33
 - 9 张亦良等. 考虑塑性体积变化的弹塑性应力测量理论. *机械工程学报* ,1999 ;(4) :60 ~ 62
 - 10 Wu G H et al. Acta materiae compositae sinica. *Acta Materiae Compositae Sinica* ,1998 ;(3) :11 ~ 13
 - 11 Donomoto T, Funatani K, Miura N et al. Ceramic fiber reinforced piston for high performance diesel engines , SAE Paper 8 300 252 ,1983 :49
 - 12 郑兆昌. *机械工程*. 北京 : 机械出版社 , 1995 :752 ~ 766
 - 13 冯登泰. *应用非线性振动力学*. 中国铁道出版社 , 1982 :258
 - 14 诸亦清. *非线性振动分析*. 理工大出版社 ,1996 :479 ~ 491
 - 15 丁奎元. *工程力学*. 上海科技出版社 ,1978 :322
 - 16 Wolfenden A et al. *Metal matrix composites: mechanisms and properties*. Boston : Academic Press , 1991 : 287
 - 17 Wu D H et al. Interaction of particles with solidifying front in Al₂O_{3p}/Al-Si composites. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* , 1999 ;(2) :22 ~ 25
 - 18 Lee M et al. Role of deformation twin bands in the wear process of polycrystalline diamond tools. *Wear of Materials*. ASMR. New York ,1979 :485

(上接第 9 页)

- 26 Yajima S, Okamura K, Hayashi J. Structural analysis in continuous silicon carbide fiber of high tensile strength. *Chem. Lett.* ,1975 :1 209 ~ 1 212
- 27 Smith T L. Process for the production of silicon carbide by the pyrolysis of a polycarbosilane polymer. *Chem. Abstr.* ,1987 ;106 (14) :106 920
- 28 Birot M, Pillot L-P, Dunogues J. Comprehensive chemistry of polycarbosilanes, polysilazanes, and polycarbosilazanes as precursors of ceramic. *Chem. Rev.* ,1995 ;95(5) :1 443 ~ 1 477
- 29 Robert B, Corriu J P, Leclereq D, Mutin P H, Planeix J M, Vioux A. A precursor to silicon carbide. I preparation and characterization. *Organometallics* ,1991 ;10(5) :1 457 ~ 1 461
- 30 Procopio L J, Berry D H. Dehydrogenative coupling of trialkylsilanes mediated by ruthenium phosphine complexes: catalytic synthesis of carbosilanes. *J. Am. Chem. Soc.* ,1991 ;113(10) :4 039 ~ 4 040
- 31 Seyferth D, Wood G T, Tracy H J, Robison J L. Near-stoichiometric silicon carbide from an economical polysilane precursor. *J. Am. Ceram. Soc.* ,1992 ;75(5) :1 300 ~ 1 302
- 32 Zaltsman I S, Marchenko A P, Koidam G N, Pinchuk A M. Reduction of triamido-N-(arylsulfonyl) imidophos. *Zh. Obshch. Khim.* ,1985 ;55(8) :1 882 ~ 1 883
- 33 杨一明,陆逸,谭自烈,冯春祥. 用聚碳硅烷与其它聚合物的共混物制造 SiC 纤维. *材料科学进展* ,1988 ;2(1) :40 ~ 42
- 34 Seyferth D, Lang H. Preparation of preceramic polymers via the metalation of poly(dimethylsilene). *Organometallics* ,1991 ;10(3) :551 ~ 558
- 35 Yajima S, Hayashi J, Omori M. High-molecular-weight organosilicon compounds. *Chem. Abstr.* ,1977 ;86 :30 940
- 36 Gronszky M C, Eckenfelder W. Flocc-loading biosorption criteria for the treatment of carbohydrate wastewaters. *Proc. Ind. Waste Conf.* ,1986 ;41 st :37 ~ 47 (Eng.)
- 37 王浩,李效东,冯春祥,彭平,范小林. SiC 陶瓷纤维先驱体的研究动态. *宇航材料工艺* ,2000 ;30(2) :13 ~ 16