

特约专栏

碳纤维在高温下的结构、性能演变研究

冯志海¹, 李同起¹, 杨云华¹, 杨晓光¹, 李秀涛¹, 徐樑华², 吕春祥³

(1. 航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料技术重点实验室, 北京 100076)

(2. 北京化工大学, 北京 100029)

(3. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001)

摘要: 针对碳纤维在碳/碳烧蚀防热复合材料中应用的基础问题, 论述了不同碳纤维结构、成分、表面特征, 及其力学性能和热物理性能的高温演变规律, 揭示了碳纤维灰分含量对碳纤维力学性能和热氧化性能的影响。确定了在碳/碳复合材料复合成型过程中, 碳纤维结构受基体碳影响的变化规律和碳纤维表面特征对碳/碳材料宏观力学性能的影响。阐明了碳/碳复合材料中碳纤维的力学性能对纤维发生折断烧蚀的阻碍作用和通过控制碳/碳成型最高温度实现提高性能的途径。

关键词: 碳纤维; 烧蚀防热; 复合材料; 碳/碳

中图分类号: TQ342⁺. 74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2012)08-0007-08

Evolution of the Structure and Performance of Carbon Fibers at High Temperatures

FENG Zhihai¹, LI Tongqi¹, YANG Yunhua¹, YANG Xiaoguang¹, LI Xiutao¹,
XU Lianghua², LU Chunxiang³

(1. Science and Technology on Advanced Functional Composites Laboratory, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

(2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

(3. Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China)

Abstract: To resolve the basic application problems of carbon fibers in ablative heat protection composites, the high temperature evolution of the structures, elemental contents and surface features of carbon fibers were discussed and their mechanical and thermal physical properties were also given. The influence of ash content on the mechanical and anti-oxidation properties of carbon fibers was disclosed. The microstructure development of carbon fibers, influenced by carbon matrix, was determined during the formation process of C/C composites. The mechanical performance of C/C composite was influenced by the surface features of the carbon fibers used as the raw materials. The carbon fibers with high mechanical performance can prevent their fracture during ablation. By control the maximum heat-treat temperature during the manufacture of C/C composites, their mechanical performance can be increased.

Key words: carbon fiber; ablative heat protection; composite; carbon/carbon

1 前言

碳纤维是碳/碳烧蚀防热复合材料的关键原材料, 由碳纤维构成的织物预置体是此复合材料成型的骨架。在碳/碳复合材料成型过程中, 有机前躯体(包括沥青、树脂、烷烃/烯烃等)经过反复多次致密化进入到纤维预制品中形成基体碳。在这个过程中碳纤维与基体碳经历反复的高温、高压作用, 它们的结构、成分和表面特征都会不断发生变化, 最终形成可用于烧蚀防热的致密型

碳/碳复合材料。

在防热部件服役过程中, 碳/碳复合材料依靠其烧蚀时的质量损失带走热量, 从而实现热防护的目的。在烧蚀过程中, 碳/碳复合材料必须保持足够的力学性能和良好的烧蚀表面, 以保证飞行器的气动外形不受破坏。增强碳纤维的性能决定了碳/碳烧蚀防热复合材料的性能: 碳纤维的力学性能越高、热导率越大、抗氧化性能越强、体积百分数越大, 复合材料的力学性能就越高、热导率就越大、抗氧化能力就越强^[1-5]。但由于碳纤维结构、成分和表面特征在碳/碳成型过程中不断演变, 且其演变历程与工艺条件密切相关, 因此研究碳纤维特性的变化规律及与其性能的关系, 对碳纤维在烧蚀

收稿日期: 2012-06-18

第一作者及通信作者: 冯志海, 男, 1965年生, 研究员, 硕士生导师

隔热复合材料中的应用具有重要意义。

本文将针对 T300 级碳纤维(国产 GCF1 和日本东丽 T300 碳纤维)用作碳/碳烧蚀隔热复合材料增强体时所涉及的基础问题,研究碳纤维的结构、成分和表面特征等的演变规律和碳纤维性能变化规律,并阐明碳纤维的特征与碳/碳复合材料性能的关系。

2 烧蚀隔热复合材料的制备与分析测试

2.1 原材料

采用山西焦化所扬州碳纤维工程中心的 T300 级碳纤维(记作 GCF1)和日本东丽 T300 碳纤维作为增强体。以中温煤沥青作为制备碳/碳复合材料基体碳的前驱体。另外,为了说明碳纤维灰分对碳纤维性能的影响,还采用不同灰分含量的 T300 级国产碳纤维作为样品进行了研究。

2.2 碳/碳烧蚀隔热复合材料的制备

碳/碳复合材料的制备采用液相浸渍/碳化工艺对细编穿刺结构的织物进行致密化,最终形成材料密度为 1.96 g/cm^3 的碳/碳材料。

2.3 分析与测试

碳纤维高温拉伸性能在自制碳纤维单丝高温拉伸性能测试系统上进行测试。碳纤维高温热膨胀系数在自制高温碳纤维轴向线膨胀系数测试系统上进行测试。碳纤维的表面元素及官能团通过 X 射线光电子能谱和红外光谱仪进行分析。

采用电感耦合等离子体-原子发射光谱法测试碳纤维中的微成分含量;采用有机元素分析仪对碳纤维的碳、氮、氢元素含量进行分析;利用电子探针技术分析碳纤维横断面上各元素的相对含量。

分别采用 X 射线衍射仪和激光共聚焦显微拉曼光谱仪分析碳纤维的平均结构和微区定位结构,利用布拉格方程和谢尔乐公式计算碳纤维的微结构参数。

复合材料的力学性能在万能力学试验机上进行测试,烧蚀性能在电弧风洞中进行考核。碳/碳复合材料纤维束结合强度通过顶出技术测试获得。

3 碳纤维成分、结构和表面特征的高温演变规律

3.1 碳纤维成分的高温演变规律

碳/碳复合材料的成型经过逐渐升温的高温处理过程,随着热处理温度升高,碳纤维中非碳元素(H, N, Mg, Fe, Ca 等)含量逐渐减少。在热处理温度高于 1800°C 后碳纤维中的 N, H, Mg 和 Fe 元素含量都降低到较低的数值,然后基本保持不变。由于纤维中 Ca 元素含量较高,因此随温度升高仍表现出缓慢降低的趋势。国产和进口碳纤维中各元素含量变化趋势一致,但国产纤维中氢元素含量较高,而进口纤维中 Mg 和 Fe 含量较高。图 1 给出了碳纤维中非碳元素含量随热处理温度的变化。

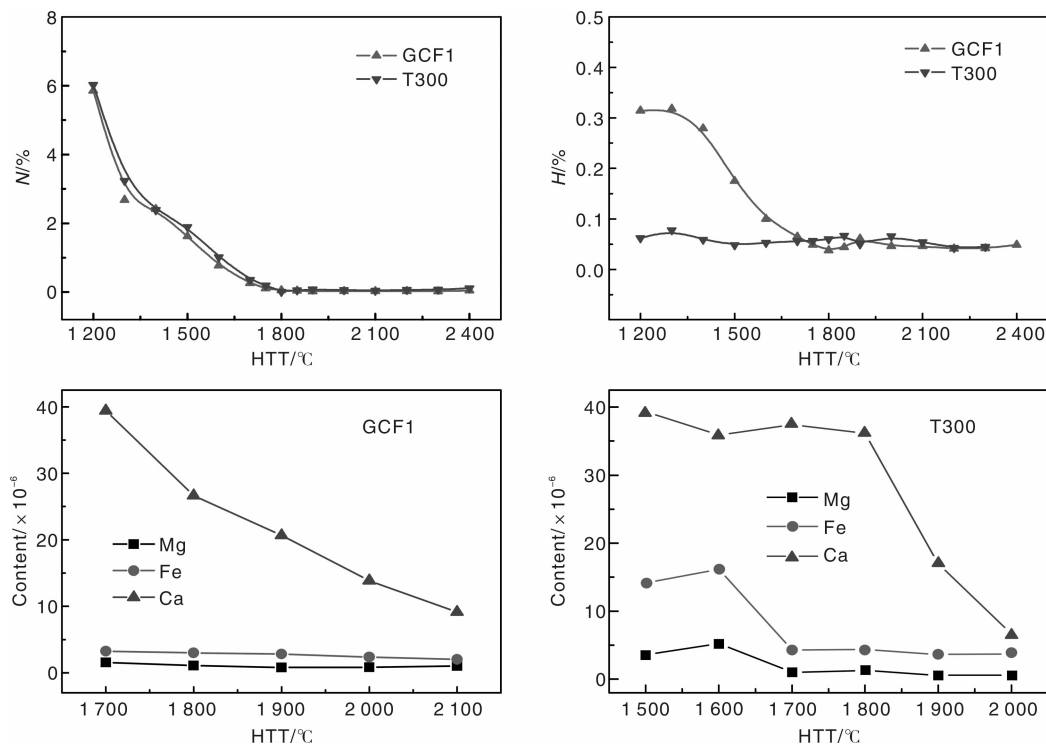


图 1 碳纤维中非碳元素随热处理温度的变化

Fig. 1 Content changes of the non-carbon elements during heat-treatment

非碳元素随温度升高而降低说明高温热处理过程中这些非碳元素向纤维外部迁移,造成了纤维表层的非碳元素含量明显高于芯部。碳纤维中硅元素主要来源于纤维制备过程中油剂的引入,其在纤维中的分布也为表层多于芯部,随着热处理温度的提高同样造成了硅元素不断向外迁移。图2给出了碳纤维中硅元素在纤维横断面上的相对含量分布。

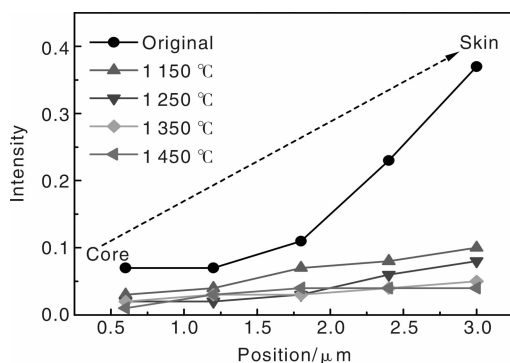


图2 不同温度处理的碳纤维断面硅元素微区分布

Fig. 2 Distribution of silicon on the cross-sections of the carbon fibers heat-treated at different temperatures

3.2 碳纤维微结构的高温演变规律

随着热处理温度升高,碳纤维的微晶长大,碳层排列更加有序,沿纤维轴向的取向度增加,这种变化会造成碳纤维的模量不断增加^[6]。国产和进口碳纤维的结构参数随温度变化的趋势基本一致。图3和图4给出了碳

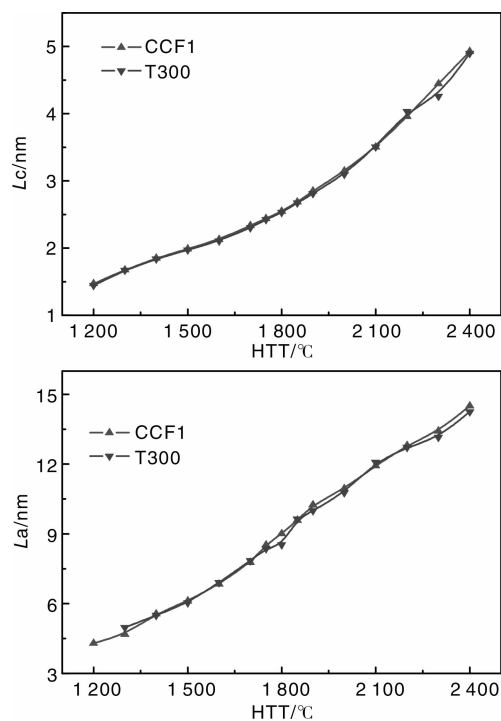


图3 碳纤维微晶尺寸 L_a , L_c 随热处理温度的变化曲线

Fig. 3 Change curves of the microcrystal size, L_a and L_c , of carbon fibers

纤维微晶尺寸(L_c 堆砌厚度, L_a 平面尺寸)、碳层间距(d_{002})和取向度(π)随温度的变化曲线。碳纤维微结构呈现不均匀特征,随着温度升高,纤维中的高定向结构增多,图5给出了碳纤维的TEM显微照片。

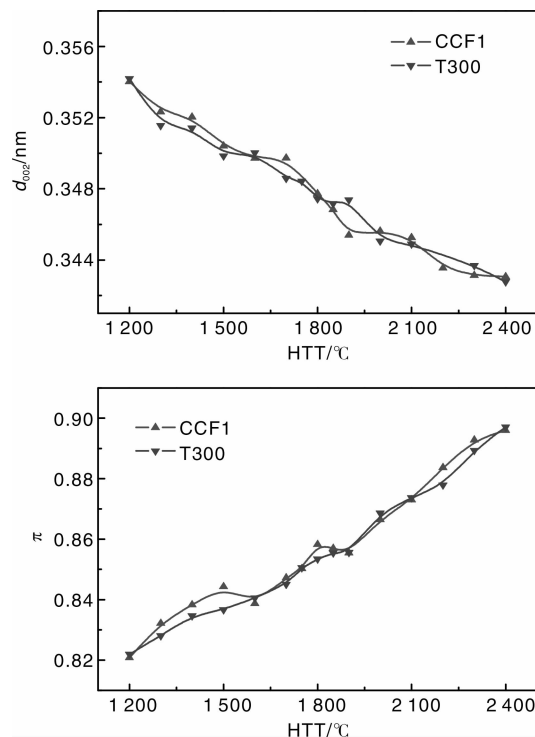


图4 碳纤维中碳层间距和微晶取向度随热处理温度的变化曲线

Fig. 4 Change curves of interlayer distance and microcrystal orientation of carbon fibers during heat-treatment

应当指出,1800 °C 以前碳纤维中非碳元素基本排出,高于该温度,碳纤维结构参数变化主要源于碳纤维内部结构的自调整。

3.3 碳纤维表面特征的高温变化

碳纤维织物与沥青基体复合前需要在惰性环境中进行必要的高温处理,以去除编织过程中引入碳纤维束表面的胶。经过高温处理后,碳纤维表面的氧含量急剧减少,碳含量快速增加,致使氧/碳比急剧减小。碳纤维的不同表面特征将导致碳纤维与基体复合时表现出不同的结合特性。表1给出了经过高温钝化处理和氧化处理(360 °C 处理)的表面元素含量。

表1 不同状态碳纤维表面各原子浓度
Table 1 Atomic content of the carbon fibers

No.	Fiber types	C/%	O/%	N/%	O/C
1	T300	77.44	18.81	3.75	0.24
2	High temperature treated T300	97.96	2.04	0	0.02
3	GCF1	82.54	17.46	/	0.21
4	High temperature treated GCF1	92.51	4.60	2.80	0.05

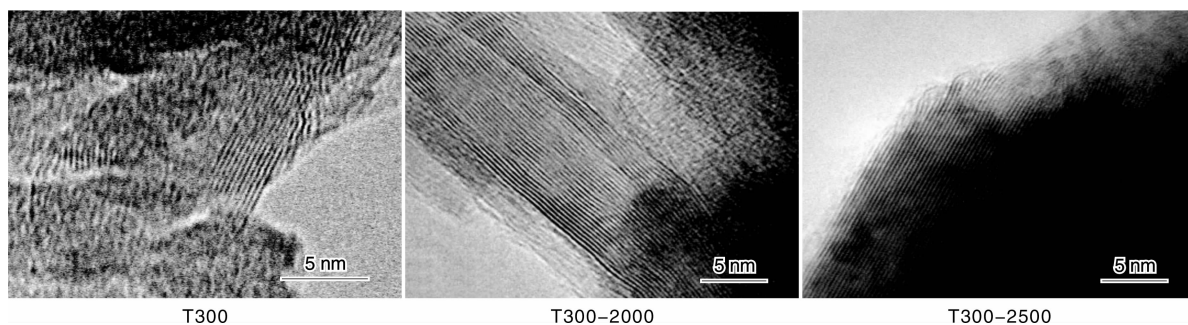


图 5 T300 碳纤维及经过 2 000 °C 和 2 500 °C 高温处理的碳纤维的 TEM 照片

Fig. 5 TEM micrographs of the T300 carbon fiber and the ones heat-treated at 2 000 °C and 2 500 °C

4 碳纤维特征及其演变对纤维性能的影响规律

4.1 碳纤维的高温膨胀系数和高温拉伸性能

碳纤维的膨胀系数随着温度的提高而逐渐增加,但由于碳纤维制备的最高温度通常为 1 300 °C 左右,当测试温度超这个值时,碳纤维将发生如前所述的非碳元素继续逸出和结构的不断调整,造成纤维收缩,宏观表现为热膨胀系数迅速减小,并降低到负数。但碳纤维经过高温处理后,其热膨胀系数从室温到高温均不断增加。图 6 给出了碳纤维的高温热膨胀量变化曲线。国产纤维的膨胀量降低早于进口纤维,并且前者的收缩总量明显大于后者,说明国产纤维的制备温度低于进口纤维,因此在利用国产碳纤维制备碳/碳复合材料时需要考虑这些影响。

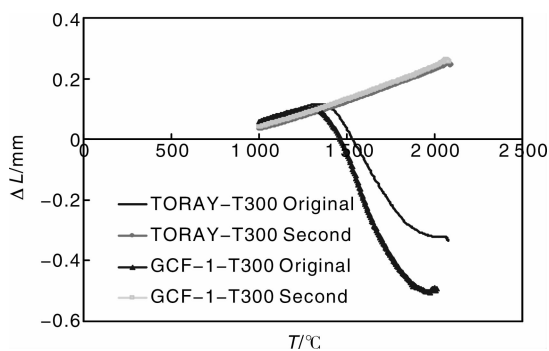


图 6 国产与进口碳纤维高温热膨胀量变化曲线

Fig. 6 Change curves of the thermal expansion of different carbon fibers

碳纤维的高温拉伸强度在低于 1 800 °C 时随温度增加略有增加,而当温度高于 1 800 °C 后,拉伸强度逐渐降低;而碳纤维的断裂延伸率随温度增加呈现先增后减再增的趋势,但其高温断裂延伸率均大于低温下的断裂延伸率。图 7 分别给出了碳纤维在高温下的拉伸强度和断裂延伸率变化曲线。因此,为提高碳/碳材料的强度

性能应当控制其成型的最高温度。

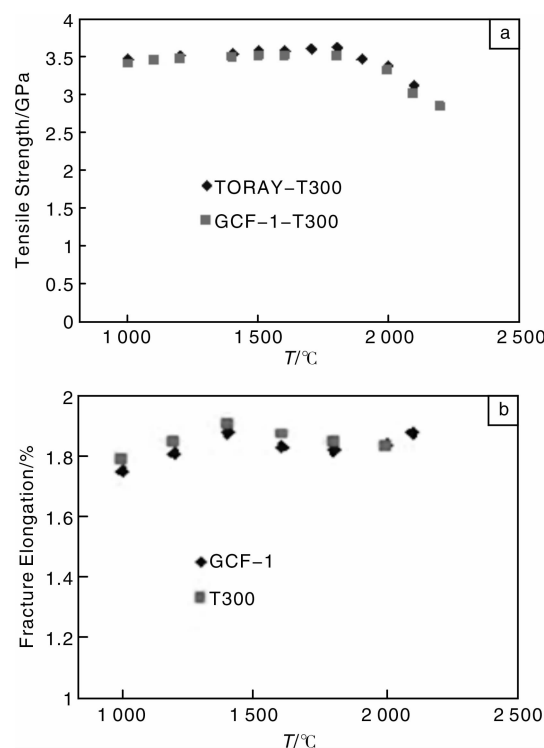


图 7 国产与进口碳纤维高温拉伸强度(a)和断裂延伸率(b)

Fig. 7 Tensile strength (a) and fracture elongation (b) of the carbon fibers

4.2 灰分对碳纤维性能的影响

碳纤维中灰分(主要为 Si, Ca, Fe 等元素的氧化产物)含量对其抗氧化性能影响较大,灰分含量越高碳纤维的抗氧化性能越差,氧化失重率就越高。同时,随着碳纤维中灰分含量的增加,其高温拉伸强度迅速降低,并且灰分含量越高,碳纤维高温力学性能下降越大。这说明碳纤维中的灰分极大地影响了碳纤维的抗氧化性能和高温力学性能,应严格控制。表 2 给出了不同碳纤维的氧化失重率数据,图 8 给了不同灰分含量碳纤维的力学性能。

表 2 不同灰分含量碳纤维的热氧化失重率测试结果

Table 2 Results of the mass loss ratio of different carbon fibers

Carbon fibers	Oxidizing conditions	Mass loss ratio/%	Ash content/%
1#	375 ± 1 °C, 24h	0.5	<0.1
2#		0.4	<0.1
3#		1.75	0.42
4#		2.40	0.66
5#		1.9	0.47

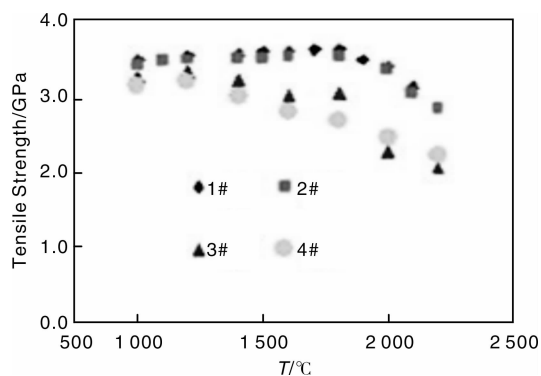


图 8 灰分对碳纤维高温拉伸性能的影响

Fig. 8 Tensile strength at high temperatures of the carbon fibers with different ash contents

5 碳/碳成型过程中碳纤维结构的演变规律

碳/碳成型过程中，受到基体碳的应力石墨化作用，碳纤维结构演变历程与自由态碳纤维有所不同。基体碳与碳纤维结合越紧密，碳纤维的结构发育受基体碳的影响就越大，其向石墨结构发育的速度就越快。图 9 给出了自由态和复合态碳纤维的微结构参数 $1/R$ 随热处理温度的变化曲线。国产和进口碳纤维的结构发育过程基本相当，如图 10 所示。

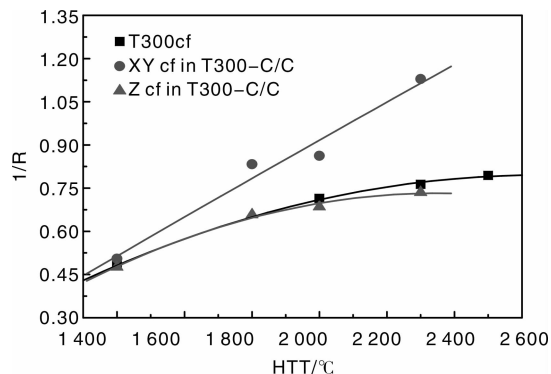


图 9 自由态和复合态碳纤维随工艺温度升高时的结构演变规律

Fig. 9 Structure evolution of the free and composite carbon fibers during the manufacture of the C/C composite

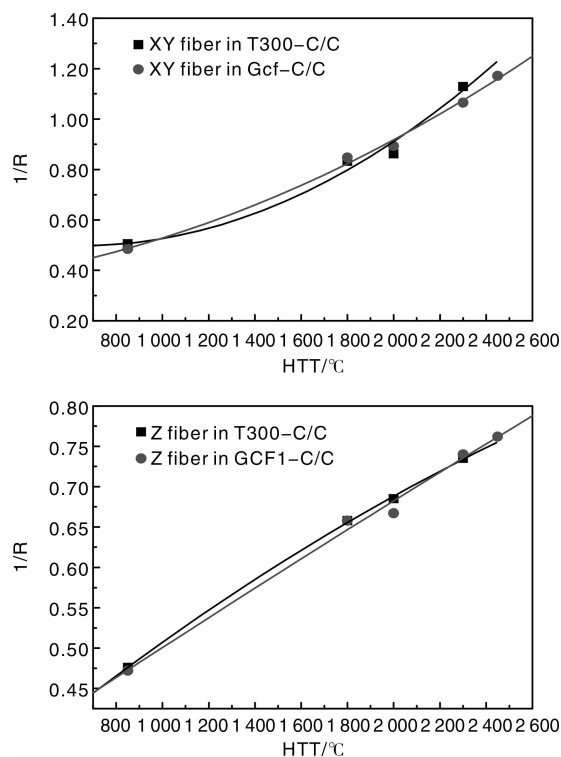


图 10 碳/碳成型过程中碳纤维结构受基体碳的影响变化规律

Fig. 10 Influence of carbon matrix on the structure evolution of the carbon fibers during the preparation of the C/C composite

由于碳纤维表面的官能团数量决定了碳纤维与基体碳的结合性能，因此，碳纤维表面的非碳元素含量也会在一定程度上影响碳/碳中纤维结构的演变历程。

6 碳纤维表面特征对碳/碳材料界面和宏观性能的影响

碳/碳成型过程中，沥青前躯体与纤维表面的官能团发生反应，形成了化学结合结构，随着成碳的深入，碳纤维表面与基体碳的连接结构形成桥接碳，如图 11

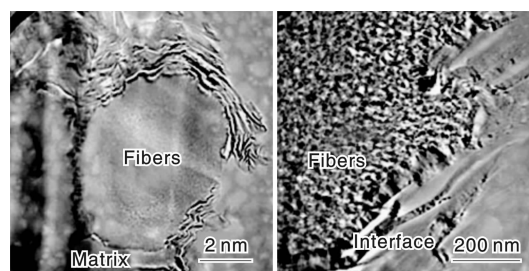


图 11 碳/碳复合材料中碳纤维/基体碳界面附近的 TEM 显微照片

Fig. 11 TEM micrographs of the interface region of carbon fiber/matrix in C/C composite

所示。随着碳/碳成型致密化次数的增加,碳纤维束界面的强度不断增加,但随着热处理温度的升高,纤维束界面强度下降。国产碳纤维的纤维束界面强度明显高于进口碳纤维,这是由于国产纤维表面钝化处理后含氧官能团较多的缘故。图 12 给出了碳/碳成型过程中,纤维束界面强度的变化情况。

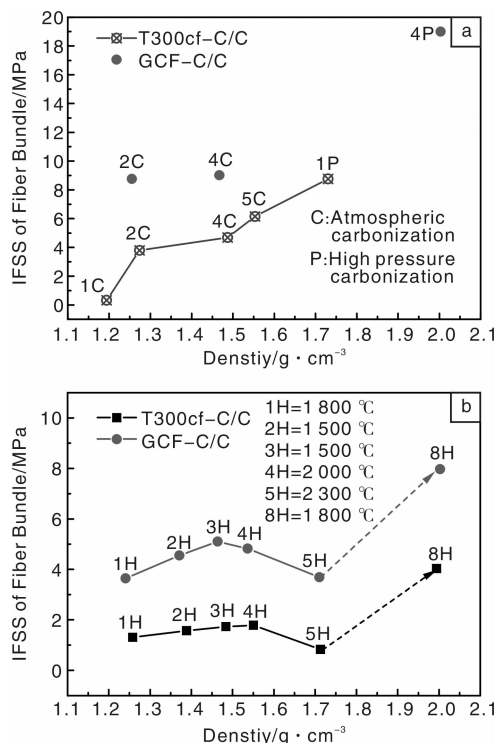


图 12 不同浸渍炭化(a)和高温处理(b)过程中碳/碳材料中纤维束的界面强度

Fig. 12 Interface strength of the carbon bundles during the impregnating/carbonation (a) and the high temperature heat-treatment (b)

利用具有原始表面特征和经过高温处理的碳纤维为增强体制备了碳/碳复合材料。研究发现,碳纤维的表面特征对碳/碳的宏观力学性能有重要影响,原始表面碳纤维形成的碳/碳材料的强度明显低于惰性处理碳纤维形成的碳/碳材料。相同表面状态国产和进口碳纤维形成的碳/碳材料的力学性能相当。碳纤维表面状态对应的样品编号如表 3 所示。图 13 给出了不同状态碳纤维形成的碳/碳的力学性能。

表 3 碳纤维的表面状态对应的编号

Table 3 The numbers of the carbon fibers with different surface status

No.	Carbon fiber sources	Fiber surface state
1#	GCF1	Original surface
2#	GCF1	Hig Temperature treated surface
3#	T300	Original surface
4#	T300	Hig Temperature treated surface

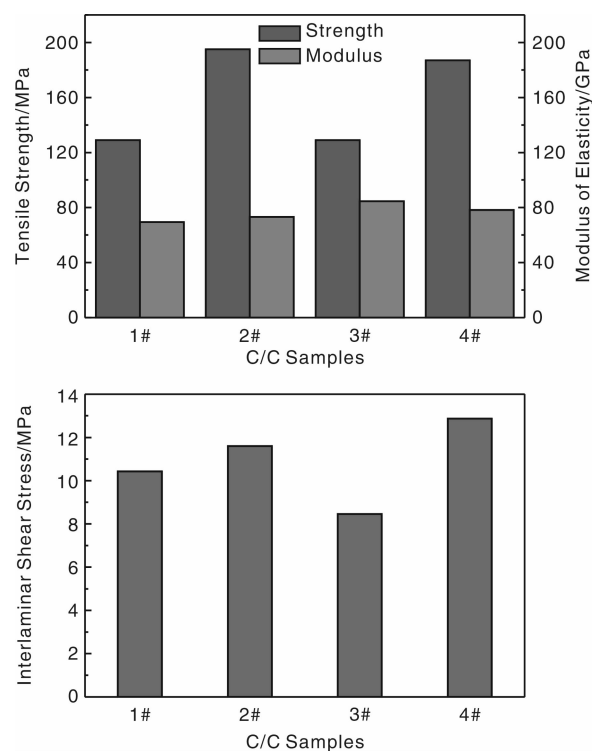


图 13 碳/碳复合材料的拉伸强度和层剪强度

Fig. 13 Tensile strength and interlaminar shear stress of the C/C composites

对高温处理纤维形成的碳/碳材料的烧蚀性能进行研究发现,国产和进口碳纤维形成的碳/碳材料的质量烧蚀率和线烧蚀率接近。但在低压高焓和高压低焓 2 种烧蚀状态下,碳纤维的烧蚀形貌存在很大差异。低压高焓状态下碳纤维具有笋尖状特征,纤维基本被氧化烧蚀消耗;但在高压低焓状态下,由于压力较高,造成了碳纤维“笋尖”的折断,从而产生了大量纤维断裂消耗。正是由于碳纤维发生了折断消耗,使得碳/碳复合材料在该状态的烧蚀消耗大幅提高,如图 14 所示。由图 14 还可以看出,国产碳纤维的“笋尖”折断后呈现出明显的皮芯结构,而进口纤维的皮芯比较均匀,结合碳/碳复合材料的烧蚀性能数据,可以推断碳纤维的这种皮芯结构对阻止纤维“笋尖”折断有利。

7 讨论

由上述研究结果可以看出,随着热处理温度升高碳纤维中的非碳杂元素逐渐逸出碳纤维,此过程中碳纤维的结构不断调整,向类石墨结构转变。但当热处理温度超过 1800 °C 时,非碳元素的含量已经非常少,碳纤维的结构演变主要源于自身的碳层调整和长大。非碳杂元素(主要是 Si, Fe, Ca 等元素)的存在影响碳层的完整性,并且容易造成结构缺陷,造成了高杂元素

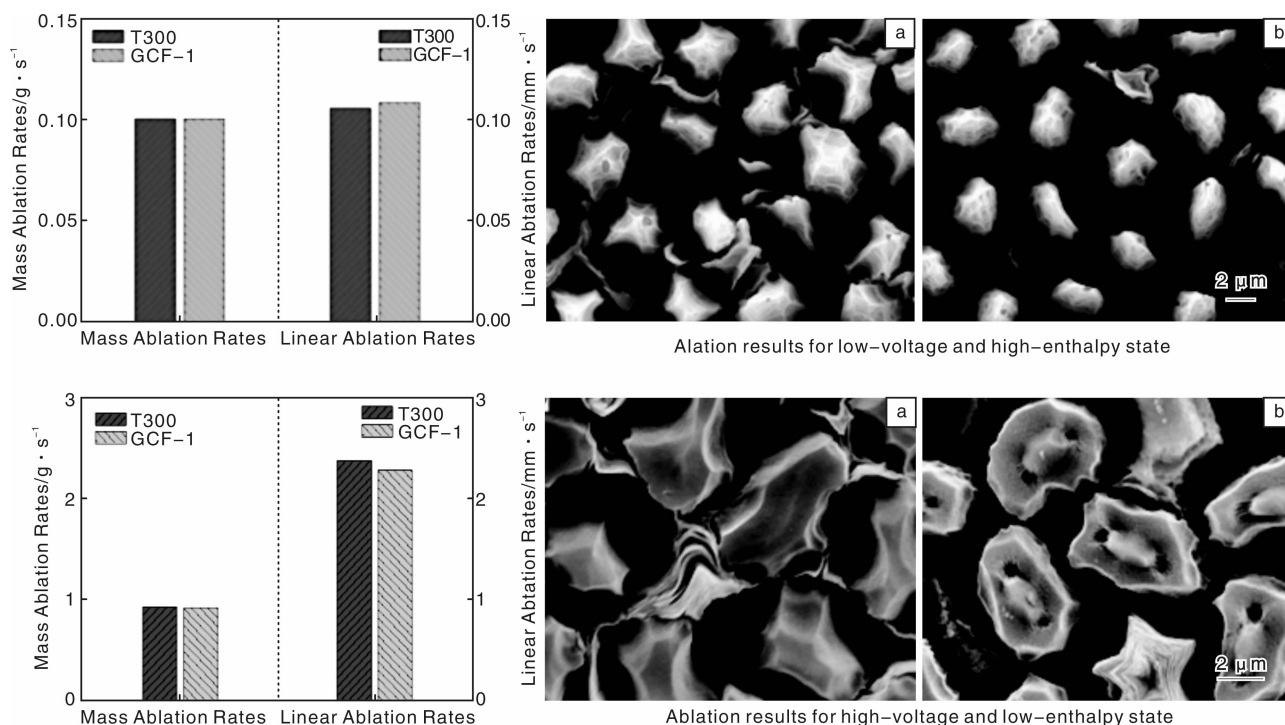


图 14 碳/碳复合材料的烧蚀性能: (a) T300, (b) GCF1

Fig. 14 Ablation performance of the C/C composites: (a) T300 and (b) GCF1

含量(同样为高灰分含量)的碳纤维的抗氧化性能和力学性能都较低。

由于 1 800 $^{\circ}\text{C}$ 以下处理的碳纤维的力学性能随温度缓慢上升,而超过该温度后性能快速下降,因此严格控制碳/碳材料的成型最高温度对于保持材料中碳纤维的强度,进而提高复合材料的强度具有重要的意义。

碳纤维的表面存在上浆剂覆层,该覆层中有大量的含氧官能团存在,由于上浆剂覆层的存在造成了碳纤维束的集束性较强,但当在惰性环境中进行高温处理后,上浆剂覆层基本分解,纤维的集束性下降。在与沥青复合过程中,集束性强的纤维织物中纤维束内存在的闭孔较多,造成材料最终体积密度较低,进而影响了材料的宏观性能。对于未高温处理的 T300 碳纤维织物来说,形成的碳/碳材料的密度为 2.19 g/cm^3 ,而高温处理的织物形成的材料的密度为 2.22 g/cm^3 。碳纤维表面的含氧官能团越多,其与基体碳形成的桥接碳结构就越多,形成的碳/碳材料的纤维界面强度就越高,在受载破坏时沿界面断裂传递能量的能力下降,造成了碳/碳材料宏观性能下降。

从碳/碳复合材料的烧蚀性能来看,碳纤维的力学性能对阻止纤维的烧蚀“笋尖”在高压下折断具有重要的作用,因此,适当降低碳/碳复合材料的成型温度,提高碳/碳材料的性能,对提高其烧蚀耐热性能具有重要的作用。

8 结 论

通过对 T300 级碳纤维制作碳/碳烧蚀耐热复合材料过程中的诸多问题进行研究,得到如下结论:

(1) 碳纤维中非碳杂元素随着热处理温度升高而逐渐逸出,1 800 $^{\circ}\text{C}$ 以下大部分非碳杂元素基本逸出,过程中伴随碳纤维结构不断向类石墨结构转变,但当热处理温度超过 1 800 $^{\circ}\text{C}$ 以后,碳纤维结构的演变主要源于内部碳层的长大和调整。

(2) 碳纤维的热膨胀系数在超过其制备温度(约 1 300 $^{\circ}\text{C}$)时变为负数,造成碳纤维的快速收缩。但经过高温处理后,碳纤维碰撞系数随温度增加呈不断增加的趋势。

(3) 碳纤维中的非碳杂元素(主要为 Si, Fe, Ca 等元素)造成了碳纤维结构不完整性增加,进而造成碳纤维抗氧化性能和力学性能下降。

(4) 碳纤维的力学性能随着热处理温度的升高呈现先增后减的趋势,转变点在 1 800 $^{\circ}\text{C}$ 左右,因此控制碳/碳复合材料的成型温度对提高其宏观力学性能有重要作用。

(5) 碳/碳复合材料成型过程中碳纤维的结构演变受到基体碳的应力石墨化作用而发育变快,其影响程度受碳纤维/基体碳界面的结合紧密程度影响。

(6) 碳纤维的表面特性影响碳/碳复合材料的成型

过程和最终材料性质及力学性能,造成力学性能下降。对碳纤维织物进行惰性环境中的高温处理有利于碳/碳复合材料力学性能的提高。

(7) 低压高焓状态下碳/碳中碳纤维的烧蚀主要为氧化烧蚀,而高压低焓状态下的烧蚀包括氧化烧蚀和纤维烧蚀“笋尖”的折断 2 种模式,增加碳/碳中碳纤维的力学性能对阻止纤维烧蚀“笋尖”折断,进而提高碳/碳材料的烧蚀防热性能具有重要作用。

(8) 虽然国产碳纤维与进口碳纤维在成分、结构和表面特征等方面存在一些差异,但经过碳/碳工艺适应性调整,国产碳纤维可以在烧蚀防热复合材料中应用。

参考文献 References

- [1] Buckley J D, Edie D D. *Carbon-Carbon Materials and Composites* [M]. New Jersey: Noyes Publications, 1993: 42-43.
- [2] Kohno T, Mutoh A, Kude Y, *et al.* Potential Qualities of Pitch-

Based Carbon Fiber for High Temperature Composites [C]//*Proceedings of the 18th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials-A. Part 1*. Florida: John Wiley & Sons, Inc., 1994: 162-169.

- [3] Zaldivar R J, Rellick G S, Yang J M. Fiber Strength Utilization in Carbon/Carbon Composites: Part II. Extended Studies with Pitch- and PAN-Based Fibers [J]. *Journal of Materials Research*, 1995, 10(3): 609-624.
- [4] Zaldivar R J, Rellick G S, Yang J M. Failure Modes of a Unidirectional Ultra-High-Modulus Carbon-Fiber/Carbon-Matrix Composite [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(3): 623-632.
- [5] Mochizuki C, Kimura Y. Evaluation of Oxidation Behaviors and Mechanical Properties of C/C Composite with Two Different of Types Carbon Fiber [J]. *Journal of the Society of Materials Science*, 2000, 49(8): 892-898.
- [6] Chung D D L. *Carbon Fiber Composites* [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994: 65-75.

美开发出混合纳米纤维生物材料

据物理学家组织网 2012 年 8 月 6 日报道,最近,宾夕法尼亚大学医学院开发出一种新奇的混合纳米纤维生物材料,可在整形外科手术中作为载荷支架或受伤组织补丁,既能为细胞提供足够宽松的生长空间,又能指示它们按肌理排列成新组织,比以往的生物材料更灵活而适合于人体。相关论文在线发表于美国《国家科学院学报》上。

奥林匹克运动员、体育爱好者容易受到前十字韧带 (ACL) 损伤、膝盖半月板开裂、旋转肌边创伤、筋腱断裂等伤痛困扰。这些组织以肌肉纤维、胶原蛋白为基础,有着精细三维结构和规则的排列,非常结实而且能承受很大的机械负荷。

许多实验室也一直在研究设计更好的治疗措施,包括使用纳米纤维支架。纳米纤维支架能引导组织有规则地生长,但在目前的整形外科手术中,普遍使用的支架纤维很不灵活,而且挤压得太紧,细胞不容易在上面附着生长。

为此,宾夕法尼亚大学佩雷尔曼医学院整形外科手术与生物工程教授罗伯特·莫克和布伦登·贝克开发了这种新的混合纤维支架。混合纤维直径为纳米级,由缓慢降解纤维和水溶性纤维 2 种高分子聚合物制成。水溶性纤维可以被有选择地溶解去除,以增加或减少纤维之间的空隙。混合纤维通过电纺技术织造,纤维本身可以溶解为带电溶液,通过微喷的方式使溶液像雪一样落在一个旋转鼓上,形成精细而有弹性的微丝被收集起来。这种织物适合于医疗应用,可以在上面添加细胞,或者作为补丁直接植入体内受伤组织的部位便于附近细胞生长。

增加可溶解纤维的比例,会使宿主细胞扩展生长的能力增强,最终实现完整一致的分布,形成真正的三维组织。即使最初植入的纤维要去掉 50% 以上,余下的支架仍足以支撑细胞,并利用产生胶原蛋白的细胞,直接形成一个高度组织化的细胞外模型,反过来这会让生物材料更有伸展性。实验室生长的半月板组织,几乎能与真正的人体半月板媲美。

莫克说:“这种微纤维有着巨大的应用潜力,如作为一种过渡性空间支撑材料。”以往的生物材料支架有一个常见现象,就是细胞只在纤维支架或衬垫的表面生长,用混合纤维制作的支架克服了这一缺点,能形成功能性的三维组织。

研究人员还指出,该研究标志着载荷纤维组织工程的进步,最终在再生医学中也会获得广泛应用。目前,他们正在动物身上测试这些新材料,将它们用于半月板修复及其他整形外科手术。

(来源:科技日报)