复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第25卷 第4期 8月 2008年
Vol. 25 No. 4 August 2008

文章编号：1000-3851(2008)04-0101-05

C/C刹车盘快速致密化工艺及其性能

崔 鹏[1]，陈志军[2]，李树杰*[1]
(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100083；2. 西安航空制动科技有限公司，西安 710065)

摘 要： 为了缩短C/C刹车盘制备周期并提高其性能，介绍了一种制备C/C飞机刹车盘的快速致密化工艺，即采用天然气与丙烷气的混合气体为炭源气体的等温压差CVI法。与常规致密化工艺(丙烯气为炭源气体的等温压差CVI法)相比，C/C刹车盘的CVI(Chemical vapor infiltration)时间缩短了一半，其导热性能提高5%以上，拉伸、压缩、弯曲与剪切性能提高10%以上，摩擦磨损性能提高20%以上。

关键词： C/C刹车盘；致密化；化学气相渗透；摩擦磨损性能
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Rapid densification and properties of C/C brake discs

CUI Peng[1], CHEN Zhijun[2], LI Shujie*[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Xi'an Aviation Brake Technology Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to decrease the manufacturing time and improve the properties of the C/C brake discs, a new process of rapid densification to manufacture C/C brake discs was developed. This process is a method of the isothermal pressure gradient CVI whose precursors are CH_4 and C_3H_8. The CVI (chemical vapor infiltration) time of the discs manufactured by the new process is a half of the CVI time of the discs manufactured by the conventional process whose precursor is C_3H_6. In addition, the thermal conductivity of the discs produced by the new process has increased by more than 5%, the mechanical properties including tensile strength, compressing strength, bending strength and shearing strength have increased by more than 10%, and the properties of friction and wear have been raised by more than 20%.

Keywords: C/C brake discs; densification; CVI(chemical vapor infiltration); friction and wear resistance

C/C复合材料由于具有高的比热容、良好的导热性能、摩擦磨损性能以及高温下仍能保持较高的力学性能等优点被广泛用作军、民用飞机的刹车材料[1-2]。C/C复合材料飞机刹车盘(简称“C/C刹车盘”)的工程化制备工艺方法主要为等温压差CVI法，炭源气体采用丙烯气，但该方法制备周期很长、生产成本较高[3]。为了缩短C/C刹车盘的制备周期、降低其生产成本，本文中研究了一种快速致密化工艺，即采用天然气与丙烷气的混合气体为炭源气体的等温压差CVI法，并对采用该方法制备的材料的性能进行了测试。

1 实 验

1.1 实验材料

预制体：用TOHO-12K PANCF编制的全碳纤维整体针刺毡(宜兴天鸟公司生产)，密度为0.5 g/cm^3，尺寸为Φ400 mm×150 mm×24 mm(该尺寸为制取实际刹车盘的预制体尺寸)。

炭源气体：天然气与丙烷气。

1.2 实验设备

采用改进的CVI炉(型号：ZGCJ-160-14B)，该设备的结构如图1所示。老型号ZGCJ-160-14A CVI炉在使用过程中主要存在两方面问题：(1)炭源气体成束由进气口进入预热罐，到罐顶部后返

收稿日期： 2007-10-18；**收修改稿日期：** 2008-02-25
基金项目： 航空科学基金(03H51024)
通讯作者： 李树杰，教授，博士，博士生导师，主要从事复合材料、特种连接、特种陶瓷、粉末冶金领域的研究 E-mail: shujieli@buaa.edu.cn

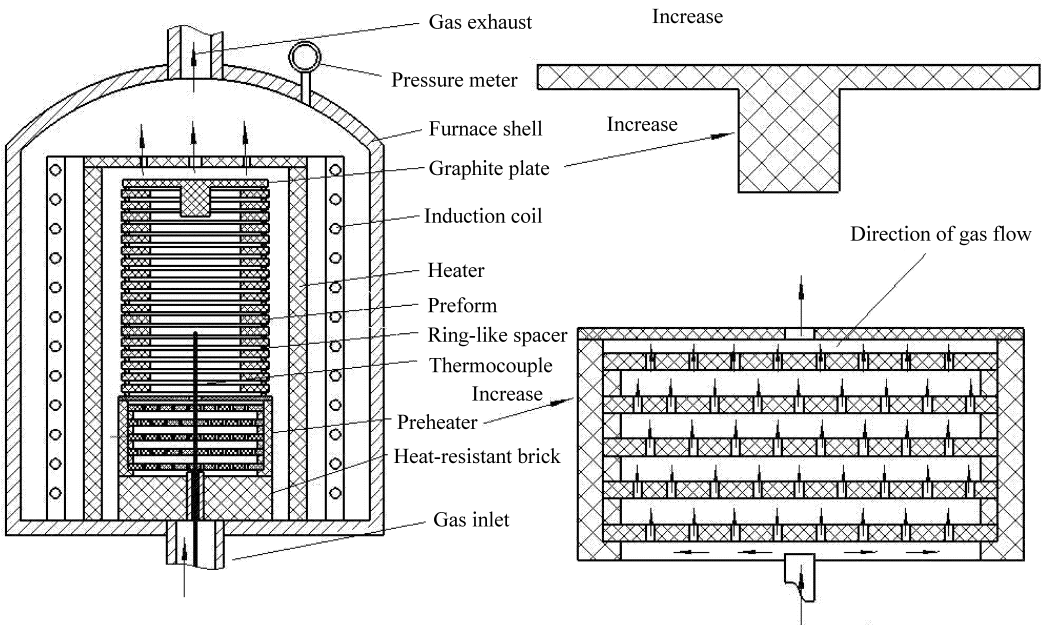

图 1　ZGCJ-160-14B CVI 炉的结构示意图

Fig. 1　Configuration sketch drawing of ZGCJ-160-14B CVI furnace

回，最终成束由罐底部出气口流出后进入预制体料柱内。炭源气体在预热罐内不能很好地被分散，预热效果较差。(2) 当料柱内压力上升时，由于料柱顶部盖有很重的石墨盖板，料柱内的气体无法从料柱顶部排出，料柱内的压力无法调节，容易在预制体表面产生炭黑，严重影响预制体的后续增密速率及 C/C 刹车盘性能。ZGCJ-160-14B 型 CVI 炉在炭源气体预热结构与料柱顶部出气结构两方面进行了改进。预热结构采用多层蜂窝状结构，炭源气体在预热结构内分散均匀，预热效果很好；料柱顶部出气结构采用蘑菇状的料柱帽，料柱帽的重量、料柱内的压力与料柱的内径三者之间的关系式为 $G=(\pi d^2 P)/4$ (其中：G 为料柱帽的重量，P 为料柱内的压力，d 为料柱或预制体的内径)，当料柱内的压力大于预定的压力时，料柱内的气体将料柱帽顶起，部分气体从顶部排出，压力下降，料柱帽回位，这样料柱内的压力变化幅度不会很大，预制体表面也不会产生炭黑。

1.3　C/C 刹车盘试样的制备

首先采用快速致密化工艺在 ZGCJ-160-14B CVI 炉内对预制体进行渗透，工艺参数为渗透温度 1050℃，压力 5 kPa，天然气流量 60 L/min，丙烷气流量 1.2 L/min，再在 ZGSJ-350-28G 石墨化炉内进行石墨化制备 C/C 刹车盘试样(试样编号为 1#)，石墨化温度为 2300℃。

1.4　C/C 刹车盘的性能测试

根据 GB228－87，在 CSS-44100 电子万能材料试验机上测试 C/C 刹车盘的拉伸、压缩、弯曲、剪切强度[4]。

在 JR-3 激光导热仪上测量热扩散率[5]。

CVD 热解炭属于乱层堆积的六方晶炭型，其结构和石墨相同，但缺乏晶体结构的三维有序排列。热解炭经适当的处理，其内部可产生一种石墨晶体结构。描述热解炭从乱层结构到单晶结构的结晶度标尺所处位置的一个参数就是石墨化度 (g)[6]。

石墨化度是在 Franklin[7] 模型的基础上，由 Mering 和 Maire[8] 公式计算，其简化形式为

$$g = (0.3440 - d_{002}) \times 100\% / (0.3440 - 0.3354) \quad (1)$$

d_{002} 的计算由 Bragg 公式算出：$2d_{002}\sin\theta=\lambda$，式中 θ 在日本理学 3014X 射线衍射仪上测出。X 射线衍射仪采用铜靶，工作电压为 40 kV，工作电流为 200 mA，波长 $\lambda_{Cu}=1.542\times10^{-10}$ m。

以环氧树脂为主要镶嵌料，试样镶样后在 MEF3A 金相显微镜下进行显微结构偏光观察。

用特殊工艺腐蚀刹车盘样品，在扫描电子显微镜下观察样品垂直盘面的断口形貌[9]。

将 C/C 刹车盘试样装在 QP584 航空轮胎机轮刹车装置动力试验台上进行摩擦磨损性能试验。

2　结果与分析

2.1　致密化效果

图 2 为 1# 、2# 试样密度随 CVI 时间变化的曲线图。2# 试样为在老型号 ZGCJ-160-14A CVI 炉中采用常规致密化工艺即炭源气体为丙烯气的等温压差 CVI 方法制备的样件。由图 2 可看出，在 CVI 进行到 400 h 时，1# 试样的密度为 1.75 g/cm^3，2# 试样的密度为 1.55 g/cm^3，显然在整个 CVI 过程中 1# 试样的致密化速率明显优于 2# 试样。

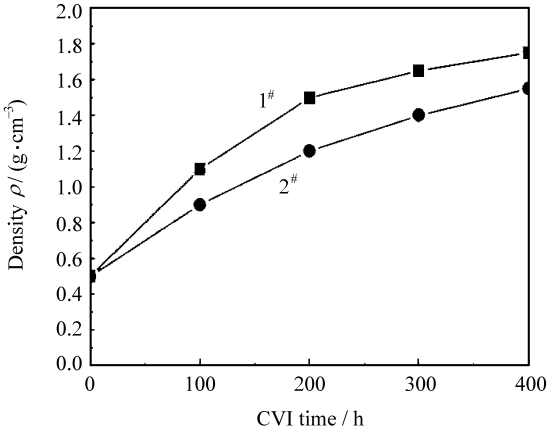

图 2　1# 、2# 试样密度与 CVI 时间的关系

Fig. 2　The dependence of 1# and 2# sample density on CVI time

2.2　微观结构

C/C 复合材料的显微结构有 3 种：粗糙体、光滑体与各向同性体。粗糙体易石墨化，摩擦磨损性能优良；光滑体不易石墨化，在石墨化过程中会产生环状裂纹，致使材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切性能下降，摩擦磨损性能次之；各向同性体最难石墨化，不适合用于摩擦材料[10]。

由图 3(a)可以看出 1# 试样显微组织具有呈放射状的不规则十字消光轮廓及粗糙的表面结构，主要为粗糙体；图 3(b)中 2# 试样显微组织断面光滑，较低的旋光性，消光十字有过渡相，有可见的同心圆结构，主要为光滑体。

2.3　断口分析

图 4 为 1# 、2# 试样的垂直盘面断口图。图 4 中炭源气体裂解形成的热解炭逐层沉积在纤维的周围，纤维不同程度地被从包缚的热解炭中拔出，断口表面呈现凹凸不平。图 4(a)中从基体拔出的纤维短，表明纤维与基体界面结合强度较好。图4(b)中断口上拔出的纤维长，表明纤维与基体界面结合

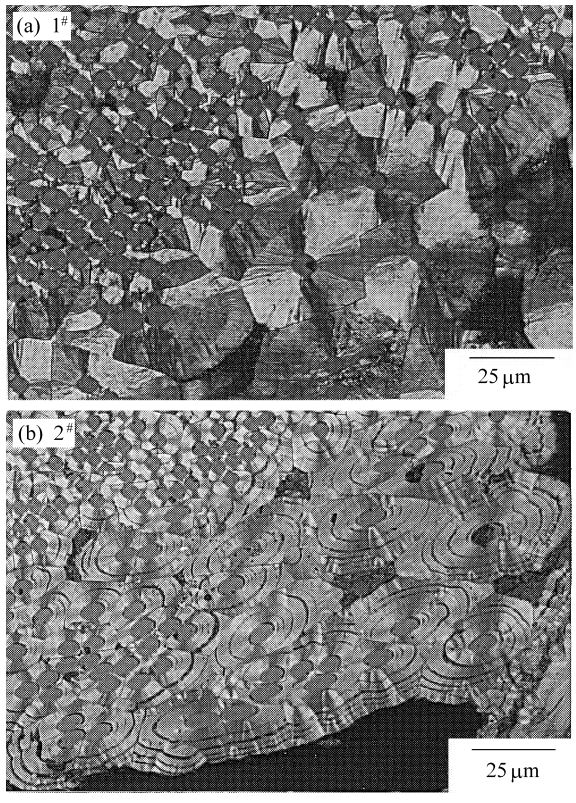

图 3　1# 、2# 试样的微观结构

Fig. 3　Microstructure of 1# and 2# samples

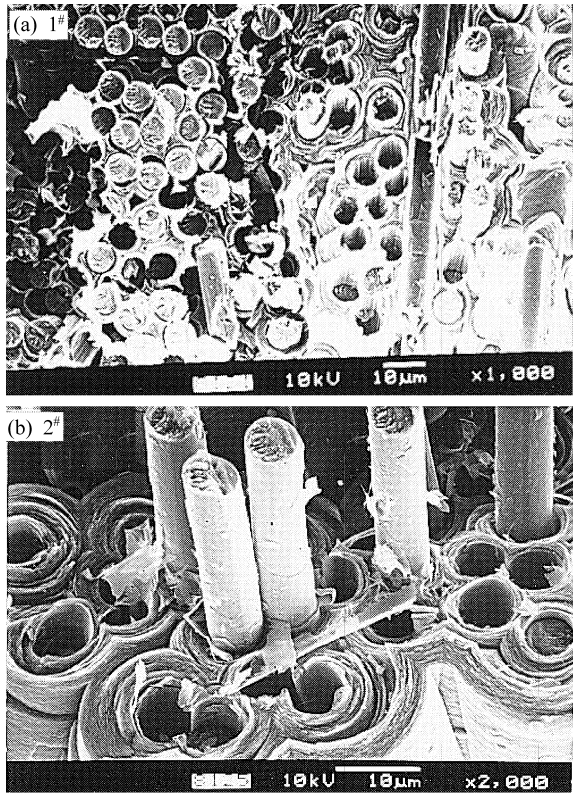

图 4　1# 、2# 试样的垂直盘面断口

Fig. 4　Fracture of perpendicular face of 1# and 2# samples

强度弱。

2.4　材料的基本性能

表 1 为 1#、2# 试样的基本性能。可以看出，采用快速致密化工艺制备的 1# 试样的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度、剪切强度、热扩散率与石墨化度均优于采用常规致密化工艺制备的 2# 试样，并且制备相同密度的 C/C 刹车盘，快速致密化工艺所需的 CVI 时间仅是常规致密化工艺所需 CVI 时间的 1/2。

表 1　1#、2# 试样的基本性能

Table 1　Basic performances of 1# and 2# samples

Index	Direction	1#	2#
Preform		Carbon fiber needled bulk felt structure	Carbon fiber needled bulk felt structure
Bulk density of the preform/(g·cm^{-3})		0.5	0.5
Tensile strength/MPa		71.7	59.8
Compressive strength /MPa	*Z*	230.1	200.4
	XY	59.6	50.7
Flexural strength/MPa	*Z*	120.8	102
	XY	86.8	76.3
Shear strength/MPa	*Z*	53.3	47.8
	XY	10.8	8.6
Thermal conductivity/(cm^2·s^{-1})	*Z*	0.112	0.106
Graphitization degree/%		52	33.4
Density of the C/C brake discs/(g·cm^{-3})		1.75	1.75
CVI time/h		400	850

1# 试样的显微结构以粗糙体为主，导热性能好，2# 试样的显微结构以光滑体为主，在石墨化过程中易产生环状裂纹，导致材料的力学性能下降，所以 1# 试样的拉伸强度、压缩强度、弯曲强度、剪切强度、热扩散率及石墨化度均优于 2# 试样。

2.5　摩擦磨损性能

C/C 刹车盘作为摩擦材料，摩擦磨损是其最重要的性能。采用不同工艺制备的两种试样分别在惯性动力试验台上进行摩擦磨损实验，实验曲线见图 5，实验结果见表 2。由图 5 和表 2 可以看出，1# 试样摩擦曲线光滑、呈马鞍型，说明飞机在刹车过程中刹车平稳，没有明显抖动现象；2# 试样除开始刹车约 0.5 s 的时间之外，摩擦因数随刹车时间的延长而减小，刹车性能降低，致使飞机刹车距离增加。1# 试样的摩擦因数优于 2# 试样，1# 试样的线性磨损率小于 2# 试样。

表 2　1#、2# 试样的摩擦磨损结果

Table 2　Friction and wear results of 1# and 2# samples

	1#	2#
Friction coefficients	0.254	0.204
Linear wear rate/(μm·(side·time)$^{-1}$)	1.2	1.5

Note: Linear wear rate /(μm · (side · time)$^{-1}$) denotes linear wear of one friction surface in the condition of one time of simulating aircraft brake.

1# 试样的显微结构主要是粗糙体，在刹车过程中摩擦表面能够形成较为连续、致密的磨屑层，摩擦制动性能优良，线性磨损率低；2# 试样的显微结构主要是光滑体，在刹车过程中摩擦表面形成较为粗糙的磨屑层，线性磨损率高。

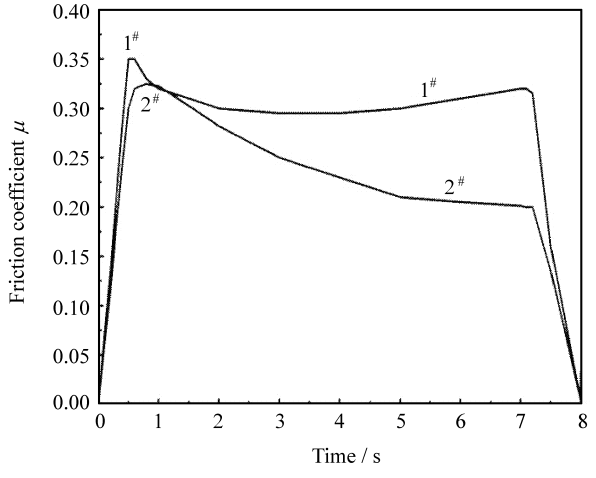

图 5　1#、2# 试样的摩擦曲线

Fig. 5　Friction curves of 1# and 2# samples

3　结　论

(1) 采用快速致密化工艺制备 C/C 刹车盘所需的 CVI 时间小于 500 h，仅为常规致密化工艺所需 CVI 时间的 1/2。

(2) 采用快速致密化工艺制备的 C/C 刹车盘的拉伸、压缩、弯曲、剪切与导热性能均优于常规致密化工艺制备的 C/C 刹车盘。

(3) 采用快速致密化工艺制备的 C/C 刹车盘的摩擦磨损性能明显优于常规致密化工艺制备的

C/C 刹车盘。

参考文献：

[1] 徐惠娟，熊　翔，黄伯云，彭剑昕. 不同热解炭结构的炭/炭复合材料的摩擦特性 [J]. 摩擦学学报，2003，23(4)：344-349.
Xu Huijuan，Xiong Xiang，Huang Baiyun，Peng Jianxin. Friction characteristics of carbon/carbon composites with different pyrolytic structure [J]. Tribology，2003，23(4)：344-349.

[2] Paulmier T，Balat - Pichelin M，Le Queau D. Structural modification of carbon - carbon composites under high temperature and ion irradiation [J]. Applied Surface Science，2005，243(1/4)：376-393.

[3] Gupte S M，Tsam - Opoulos J A. Densification of porous materials by chemical vapor infiltration [J]. J Electrochem Soc，1989，136(2)：986-995.

[4] 于　澍，刘根山，李溪滨，浦保健，熊　翔. 不同 C/C 复合材料飞机刹车盘基本性能的对比分析 [J]. 复合材料学报，2003，20(3)：35-40.
Yu Shu，Liu Genshan，Li Xibin，Pu Baojian，Xiong Xiang. Contrast analysis of basic performances of aircraft brake discs made of different carbon/carbon composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2003，20(3)：35-40.

[5] 黄伯云. 粉末冶金标准手册(下册)——检验标准 [M]. 长沙：中南大学出版社，2000：225-227.
Huang Baiyun. Standard manual of powder metallurgy(volume two)——Inspection standard [M]. Changsha：Central South University Press，2000：227.

[6] Delle W，Koizlik K，Nickel H. 热解炭 [M]. 史小罗，译. 北京：冶金工业部情报标准研究所出版社，1983：92-93.
Delle W，Koizlik K，Nickel H. Pyrolytic carbon [M]. Shi Xiaoluo，trans. Beijing：Press of Information and Standardization Institute of Metallurgy Industry Ministry，1983：93.

[7] 稻垣道夫. 刘洪波，译. 石墨化度的评价 [J]. 炭素技术，1991，51(5)：38-43.
Michio Inagaki. Liu Hongbo，trans. Estimation of the graphitization degree [J]. Carbon Techniques，1991，51(5)：38-43.

[8] 邹林华，黄启忠，邹志强，等. C/C 复合材料石墨化度的研究 [J]. 炭素，1998，93(1)：8-11.
Zou Linhua，Huang Qizhong，Zou Zhiqiang，et al. Research on graphitization degree of carbon/carbon composites [J]. Carbon，1998，93(1)：8-11.

[9] 谈竞霜，张保法，姜　海，李东生. C/C 刹车盘的结构及断口分析 [J]. 材料工程，2001(7)：43-46.
Tan Jingshuang，Zhang Baofa，Jiang Hai，Li Dongsheng. Analysis on structure and fracture of carbon/carbon brake discs [J]. Materials Engineering，2001(7)：43-46.

[10] Oh S M，Lee J Y. Structure of pyrolytic carbon materials in carbon/carbon compositions [J]. Carbon，1988，26(6)：763-768.