

# C/C 刹车材料的摩擦磨损性能与机理

## Friction and Wear Properties and Mechanism of Carbon-Carbon Composites

谈竞霜, 张保法, 姜海, 李东生

(北京百慕航材科技股份有限公司, 北京 100095)

TAN Jing-shuang, ZHANG Bao-fa, JIANG Hai, LI Dong-sheng

(Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100095, China)

**摘要:** 简要介绍了 C/C 复合材料在刹车领域的应用, 综述了几十年来人们对 C/C 刹车材料摩擦磨损性能与机理的研究结果, 对 C/C 复合材料的摩擦磨损特征和影响摩擦磨损性能的一些因素作了介绍。

**关键词:** C/C 复合材料; 摩擦磨损; 性能; 机理

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2001) 10-0021-04

**Abstract:** The paper introduced briefly the applications of carbon-carbon composites in the field of braking and overviewed the research results over the past several decades on friction and wear properties and mechanism of carbon-carbon composites. The factors influenced the friction and wear characteristics were also discussed.

**Key words:** carbon-carbon composite; friction and wear; property; mechanism

### 1 C/C 复合材料在刹车领域的应用

1973 年 C/C 复合材料第一次用于飞机刹车。目前, 60% 以上的 C/C 复合材料用作飞机刹车材料。生产 C/C 刹车盘比较大的公司有 Hitco 公司, 法国的 SEP 公司, 美国的 Bendix 和 ABS 公司, 英国的 Dunlop 公司。C/C 复合材料还用于赛车、高速火车、主战坦克等的刹车装置<sup>[1]</sup>。

飞机起飞和降落时动能很大, 波音 767 飞机起飞时的动能约为 670MJ<sup>[2]</sup>。刹车盘的功能是使地面上快速运动的飞机减速、静止。刹车盘通过相对滑动摩擦吸收飞机的巨大动能。脆性材料中摩擦能量不能通过塑性变形转换, 只能转化为热。飞机在刹车过程中静盘和动盘的表面温度高达 2000<sup>[3]</sup>。这要求高性能刹车材料应有高比热、高熔点、高温下有足够的强度。

C/C 复合材料用于飞机刹车有明显的优势: 比热比钢高出 2.5 倍, 在高温下仍然有高强度。此外, 同金属刹车相比可节省 40% 的重量, 使用寿命 (按飞机起落次数计算) 是钢刹车的 2 倍<sup>[1]</sup>。C/C 复合材料也有明显的缺点: 价格高, 高温下易于氧化。

碳纤维沿长度方向磨损小、摩擦性能好, 因而早期的 C/C 刹车盘由平行于刹车盘摩擦面方向炭布叠层或短纤维模压而成<sup>[4]</sup>。C/C 刹车盘有 3 种典型的设计方案: (1) 炭布叠层 (2) 短纤维模压 (3) 炭毡叠层, 垂直方向有增强纤维 (通常通过针刺方法)。对于

方案 (1), (3), 基体炭可由浸树脂、沥青、CVD 或这些方法的综合使用获得。对于方案 (2), 初始的基体炭由树脂炭化获得, 然后再经化学气相沉积 (CVD) 或进一步浸树脂致密化处理。炭盘在径向和垂直方向应有良好的导热性, 在键槽部位应有较好的强度, 因而炭盘中的碳纤维有一些择优取向 (见图 1)<sup>[5]</sup>, 1, 2 方向的碳纤维利于导热, 3, 4 方向的碳纤维为了增强键槽处的强度。

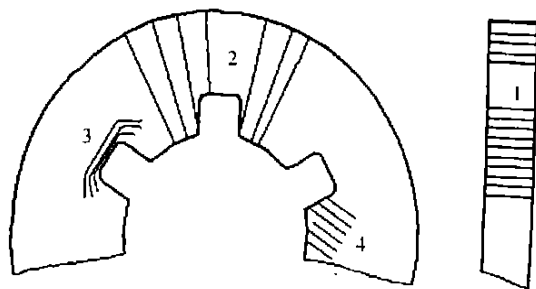


图 1 碳纤维在刹车盘中的择优取向

1. 垂直盘面排列 (导热); 2. 盘面内径向排列 (导热);
3. 绕槽口排列 (强度); 4. 与槽口成角度排列 (强度)

Fig. 1 Preferred orientation of carbon fibers in a brake pad for different performance requirement

1. normal to discs surface (for heat flow),
2. radially at surface (for heat flow),
3. around notches (for strength),
4. angled at slot (for strength)

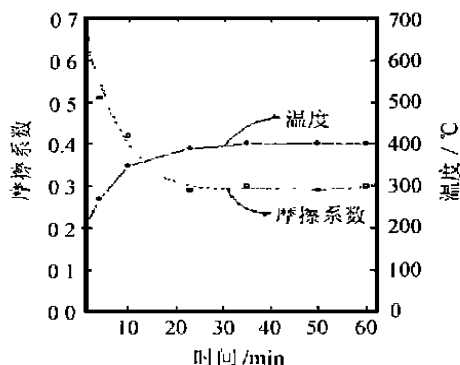
C/C 飞机刹车盘在以下几个方面还需要进一步的改进<sup>[1]</sup>: 提高垂直刹车盘摩擦面方向的导热; 提高静摩擦系数; 提高断裂应变; 提高比强度; 降低价格。

## 2 C/C 复合材料的摩擦磨损机理

### 2.1 气体的吸附

在干燥的  $\text{CO}_2$  气氛中 (含  $5 \sim 50 \times 10^{-6}$  水) 和相对湿度为 50% 的情况下, C/C 复合材料的摩擦系数很低 ( $0.05 \sim 0.1$ )<sup>[6]</sup>。通常认为: C/C 复合材料的低摩擦系数与摩擦表面吸附的气体有关, 与石墨层间的低剪切强度关系不大。

磨屑尤其是滑行过程中产生的乱层结构的磨屑



边缘有较高的化学活性。C/C 刹车材料在低速尤其是滑行情况下氧和水的吸附特别高。氧在炭盘表面的吸附是通过化学键, 需要高温才可去除。水在炭盘表面的吸附是物理吸附, 100 以上则可去除<sup>[7]</sup>。

实验中发现: 对没有用过的 C/C 刹车盘, 水不能润湿, 对于用过的 C/C 刹车盘, 水可以润湿摩擦表面。使用过的 C/C 刹车盘的亲水特性来源于具有强烈极性的水分子和表面氧的混合物的交互作用。这对于刹车盘的使用性能有重要的影响<sup>[7]</sup>。

在潮湿的环境中, 开始阶段由于 C/C 刹车盘表面吸附了水, 摩擦表面温度低, 摩擦系数也低, 10min 后, 水分蒸发, 摩擦表面温度升高, 摩擦系数的变化

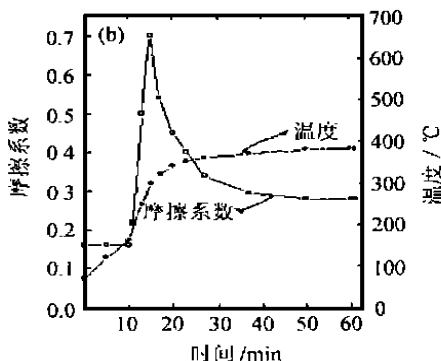


图2 C/C 复合材料在干燥及潮湿环境中刹车时摩擦系数和温度的变化 (a) 干燥环境; (b) 潮湿环境

Fig. 2 Effect of environment on coefficient of friction and surface temperature

as a function of time in a turbotester (a) dry environment; (b) wet environment

趋势与干燥环境类似, 见图 2<sup>[4]</sup>。

### 2.2 氧化

C/C 刹车盘表面磨损或炭的流失主要有两种机制: 刹车过程中在 C/C 刹车盘的表面产生高温, 炭与空气中的氧结合生成  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ , 因而 C/C 复合材料在刹车过程中炭原子的气化是一个重要原因; 磨料磨损, 磨损过程中的磨屑起磨料的作用。

实验发现, C/C 复合材料在空气中磨损速率比在惰性气氛中高出 4.5 倍。至少 60% 以上的重量损失由氧化造成<sup>[8]</sup>。氧化不仅使炭转化成  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ , 而且氧化减弱摩擦面表层和亚表层的强度。在通常的刹车条件下, 按重量损失计算的磨损速度高于按厚度减少计算的结果。这是由于炭的氧化不仅在摩擦面的表层而且经过孔隙扩散到摩擦面下的材料<sup>[9]</sup>。

在氧化气氛条件下, 复合材料的基体优先氧化导致性能的降低。但复合材料内加入抗氧化剂对刹车性能的影响不利<sup>[10]</sup>。

### 2.3 磨料磨损

C/C 复合材料刹车盘在刹车过程中形成两种典型形态的磨屑: 颗粒状磨屑和薄膜状磨屑。颗粒状的

磨屑不降低摩擦系数, 薄膜状的磨屑则产生类似的固体润滑剂的作用, 降低摩擦系数和磨损速率<sup>[11, 12]</sup>。

Kimura<sup>[13]</sup>研究了树脂炭为基体的 C/C 复合材料在惯性刹车系统上的摩擦系数, 结果发现: 随热处理温度和杨氏模量的升高, 摩擦系数在 0.3 ~ 0.5 之间变化。热处理温度高于 2000, 磨损表面覆盖一层石墨薄膜。摩擦系数高于 0.4 时, 材料的磨损受磨料磨损机理控制, 当材料的摩擦系数低于 0.4 时, 材料的磨损受氧化机理控制。

C/C 复合材料在飞机滑行时摩擦系数低、磨损程度高。这种情况下会形成碾碎的磨屑, 具有鳞片状的乱层结构比未磨损的基体复合材料的石墨化度低。这种情况下形成的摩擦表面没有光泽。在飞机降落的情况下, 首先形成鳞片状的乱层结构的磨屑, 然后挤压成摩擦薄膜, 保护磨损表面。这时的磨屑比飞机滑行时产生的磨屑结构更加有序, 磨屑的结构更接近于基体的复合材料。X 射线分析飞机中止起飞时的磨屑的 (002) 衍射峰比较窄, 这被认为是应力石墨化的结果<sup>[14]</sup>。

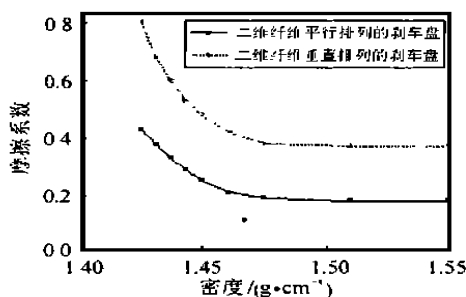
磨屑的种类和数量在很大的程度上取决于纤维

的种类、基体的组织结构和复合材料的宏观构造。对于加热到同样高温的树脂炭、CVD 炭和沥青炭具有不同的晶体有序性, 石墨化程度不同, 导致导热系数不同, 纤维/基体间结合界面组织不同, 因而在刹车过程中这些复合材料被加热到不同的温度, 导热系数低的树脂炭的温度高, 而 CVD 炭和有序化高的沥青炭则温度低。因而, 树脂炭为基体的复合材料的氧化失重比 CVD 炭基体和沥青炭基体的复合材料高。CVD 炭和沥青炭基体复合材料的磨屑大。

### 3 影响 C/C 刹车材料摩擦磨损性能的因素

#### 3.1 环境因素及操作条件

人们对高性能飞机刹车盘在低扭矩条件下内部结构碳纤维的种类、取向、数量和组合、热处理温度、加工条件、微观组织进行了系统的研究<sup>[15-18]</sup>。测试 C/C 复合材料的刹车性能, 需模拟飞机实际的刹车条件, 进行模拟刹车试验, 在实验室条件下根据惯性制动原理和模拟试验方法对摩擦副进行刹车性能试验。正确选择与控制试验条件能得到与外场实际使用条件较为一致的结果。主要参数包括: 摩擦面的相对滑动速度, 摩擦面上的压力, 单位质量或单位摩擦面积炭盘吸收的动能等。



C/C 刹车材料在静态或低速滑动情况下的摩擦系数( )低。当刹车盘的温度高时, 摩擦系数高达 0.6。在潮湿环境下, 由于吸附的水的润滑作用, 值很低(约 0.1)<sup>[19]</sup>。

研究发现: 加大压缩载荷, 提高摩擦面之间的相对滑动速度, 可增加摩擦膜的厚度<sup>[20]</sup>。随温度升高, 摩擦磨损性能降低。这是由于摩擦面上化学吸附的杂质形成了润滑膜和高温下的氧化作用<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 组织结构和材料因素

具有光滑层组织的基体的磨损速率高于各相同性组织基体的磨损速率<sup>[22]</sup>。树脂炭为基体的复合材料, 纤维和基体之间的结合力较弱, 脆性的各相同性炭形成典型的颗粒状磨屑, 这些磨屑随后被压入摩擦表面。这种情况下形成光滑的平面, 刹车效率降低, 材料的磨损也降低了。纤维在材料中的取向也影响摩擦磨损性能, 碳纤维与摩擦面成 45° 夹角时, 摩擦系数和磨损量最大<sup>[15]</sup>。

高密度的炭/炭复合材料孔隙度低, 具有较佳的摩擦磨损行为。C/C 复合材料的摩擦系数和密度之间的关系见图 3。

C/C 复合材料所选纤维的种类不同摩擦磨损性能也不同。摩擦系数随纤维杨氏模量的升高而降

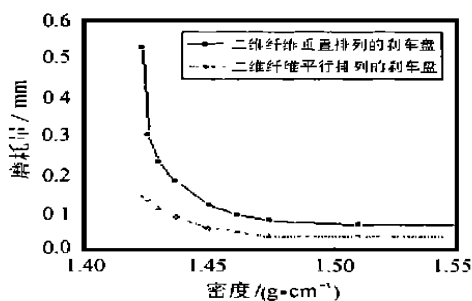


图 3 摩擦系数与密度的关系

Fig. 3 Coefficient of friction (a) and friction wear (b) of 2D carbon/carbon composites as function of bulk density, i. e., fiber volume fraction

低<sup>[23]</sup>, 如图 4 所示。

#### 3.3 工艺参数

图 5 表示了热处理温度对单向增强 C/C 复合材料摩擦系数的影响。类似地, 磨损随热处理温度的升高而减少。这是由于高温处理后的复合材料, 石墨层间易于剪切, 在摩擦表面形成石墨薄膜。C/C 复合材料的石墨化程度高, 将导致摩擦表面温度升高的速度减慢。如果复合材料摩擦表面的温度高, 其摩擦系数也高。因而石墨化度低的材料的摩擦表面温度高, 摩擦系数也高。

不仅碳纤维和复合材料的性能影响摩擦行为, 而且无机物填加剂 (TiN 或碳化物) 也产生影响。这些无机物的加入可降低摩擦系数<sup>[24]</sup>。

### 4 结论

(1) 氧化和磨料磨损是 C/C 刹车材料损失的主要方式。

(2) 气体在 C/C 刹车盘表面的吸附对刹车性能有重要的影响。C/C 复合材料的宏观结构和微观结构、材料的密度、热处理温度、摩擦条件等对 C/C 复

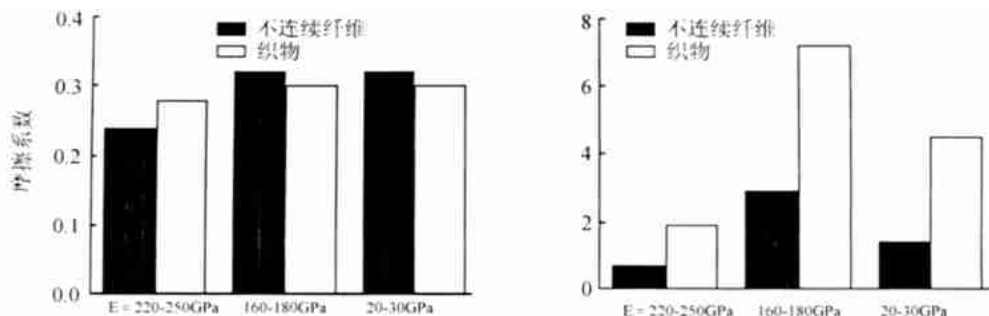


图4 增强纤维杨氏模量与摩擦系数和磨损量的关系

Fig. 4 Variation of friction and wear characteristics of materials with reinforcement type

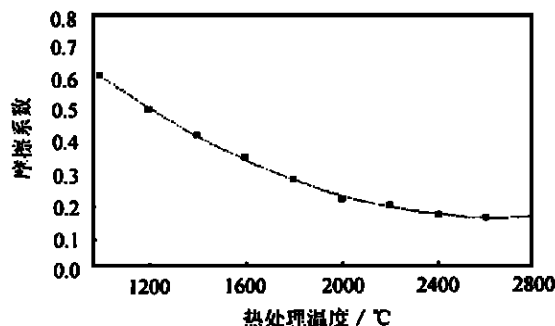


图5 摩擦系数与材料热处理温度之间的关系

Fig. 5 Effect of heat treatment temperature on friction coefficient of UD carbon/carbon composites

合材料的摩擦磨损性能有很大的影响。

#### 参考文献

- [1] G Savage. Carbon-Carbon Composites [M]. Chadman&Hall, 1993.
- [2] S Awasthi and J L Wood. C/C Composite Materials for Aircraft Brakes [J]. Advanced Ceramic Materials, 1988, (3): 449-456.
- [3] S Awasthi, J L Word. Ceram Eng Sci Proc, 1988, (9): 553.
- [4] E Fitzer and Lalit M Manocha. Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites [M], 1998, 8.
- [5] Stimson IL, Fisher R. Trans Roy Soc Lond, 1980, A294: 583.
- [6] R I Longley, J W M idgley, A Strang and D G Teer. Mechanism of the frictional behavior of high, Low and Non-Graphitic Carbon [C]. Lubrication and Wear Convention, 1963.
- [7] C Blanco, J Bermejo, H Marsh, R Menendez. Chemical and Physical Properties of Carbon As Related To Brake Performance [C], 1995.
- [8] H W Chang and R M Rusnak. Contribution of oxidation to the wear of carbon-carbon composites [J]. Carbon, 1979, 16: 309-312.
- [9] H W Chang. Correlation of wear with oxidation of carbon-carbon composites [J]. Wear, 1982, 80: 7-14.
- [10] Mayer BH, PhD Thesis. University of Karlsruhe [D]. Germany, 1991.
- [11] C Lhymn and Y Lhymn. On the wear of short carbon fiber reinforced carbon matrix composites [J]. Adv in Polymer Technology, 1989, 9: 33-39.
- [12] N Murdie, C P Ju, J Don and F A Fortunato. Microstructure of worn pitch-resin-CVI C-C composites [J]. Carbon, 1991, 29: 335-342.
- [13] S Kimura, E Yasuda and N Narrate. Friction and wear of carbon-carbon composites [J]. J. S. L. E., International Ed, 1984, 5: 11-16.
- [14] T J Hutton and B McEnaney. Proc MTC Int Conf Carbon and Carbonaceous Composite Materials Malenovice [C]. Czech Republic, 1995.
- [15] A Gkogkidis. PhD Thesis [D]. University of Karlsruhe, 1986.
- [16] E Fitzer, W Fritz, A Gkogkidis, Moergenthaler KD. Sprechsaal [J]. 1986, 119: 463.
- [17] P Stanek, N Murdie, EJ Hippo, B Howdyshell. Bien Carbon Conference [C]. 1993, 378.
- [18] Fitzer E et al, 4th Int Conf Carbon, Baden-Baden Carbon [J]. 1986, 86: 867.
- [19] E Fitzer and Lalit M Manocha. Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites [M]. 1998, 8: 276-277.
- [20] T Liu, S K Rhee and K L Lawson. A study of wear rates and transfer films of frictional materials [J]. Bendix Research Laboratories, 1980.
- [21] C C Li and J E Sheehan. Frictional and wear studies of graphite and a carbon composite in air and helium, Intern. Conference [J]. ASME, 1981, 525-533.
- [22] D G Kim, D W Kweon and J Y Lee. The wear properties of C-C composites prepared by chemical vapor deposition [J]. J Mat Sci, 1993, Letters 12: 8-10.
- [23] S Kimura, E Yasuda, N Narita. Friction and Wear of C/C Composites [J]. Japanese Society of Lubricating Engineer, 1983, 28: 185.
- [24] E Fitzer, A Gkogkidis, Heine M. Hige Temp High Pressure [J]. 1984, 16: 363.

收稿日期: 2001-04-04; 修订日期: 2001-08-01

作者简介: 谈克霜 (1965-), 工程师, 研究方向: 炭/炭复合材料, 联系地址: 北京 81 信箱 26 分箱 (100095)。