

不同相对湿度下 C/C 复合材料的摩擦磨损性能

岳葆林, 徐惠娟, 易茂中

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 在 MM-1000 型摩擦试验机上, 对 C/C 复合材料在不同相对湿度下进行摩擦磨损性能实验, 用扫描电子显微镜对其磨损表面形貌和磨屑进行观察分析。结果表明: 随着相对湿度的增加, C/C 复合材料的摩擦因数降低, 质量磨损下降, 且在高相对湿度下, 由于水分的润滑, 摩擦因数要比在低相对湿度下的更稳定, 两者刹车时间相近, 可见在飞机着落实际环境下, 短时间内相对湿度高低对刹车性能影响不大。但长时间在高相对湿度下放置后, 材料的摩擦磨损性能受到很大影响, 表现为刹车时间比较长, 摩擦因数和质量磨损偏低。通过分析摩擦后的材料表面及磨屑形貌, 发现随着相对湿度的增加, 主要磨损机理发生转变, 从低相对湿度下的氧化磨损转变为高相对湿度下的剥层磨损。

关键词: 炭/炭复合材料; 相对湿度; 摩擦; 磨损性能

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

Friction and wear properties of C/C composite materials under different relative humidities

YUE Bao-lin, XU Hui-juan, YI Mao-zhong

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The friction and wear properties of C/C composites were investigated under different relative humidities on the MM-1000 friction tester. The worn surface morphologies and the dust were observed with a scanning electron microscope. The results show that the friction coefficient and mass loss decrease with increasing relative humidity. Beside, under high relative humidity, because of the lubricating effect of water, the friction coefficient is stabler than that under low relative humidity, and the braking time is very close between them. So, in the actual environment, the level of relative humidity within a short time has little influence on the brakes. However, when the sample is placed in the high relative humidity environment for a long time, the friction and wear properties of materials are greatly affected, it shows long braking time, low friction coefficient and wear mass. By analyzing the worn surface morphologies of material and the debris, the main wear mechanism will be changed with increasing the relative humidity, transforming from oxidation wear under low relative humidity to delamination wear under high relative humidity.

Key words: C/C composites; relative humidity; friction; wear properties

炭/炭复合材料是以碳纤维增强炭基体的复合材料, 可作增强相的碳纤维有聚丙烯腈碳纤维、沥青基碳纤维以及中间相碳纤维, 而基体炭可能是热解炭、树脂炭或沥青炭。炭/炭复合材料具有高比强度、高比热容、耐高温、低密度, 导热性能优良、热膨胀系数小^[1]等优点, 这些特征决定了其在航空航天工业上的

广泛应用。

炭/炭复合材料摩擦磨损性能是作为航空刹车材料的关键性能之一。影响其摩擦性能的因素除了炭基体结构^[2]和摩擦因素^[3-4](如负载、滑行速度、所吸收的能量等)以外, 还受环境因素(如温度、相对湿度和气氛)的影响。在湿态条件下, 刹车试验不仅能测试刹

车副对复杂外界环境的适应性, 而且由于水的润湿能降低刹车力矩, 而飞机又要求在规定的距离内刹停, 因此对刹车副的性能是一个严峻的考验。国内外学者对炭/炭复合材料干态下的摩擦磨损性能研究得比较多, 但对湿态下摩擦磨损性能的研究较少。CHEN 等^[5]、罗瑞盈等^[6]和曲建伟等^[7]以及于澍等^[8]曾在这方面有所研究。但 CHEN 的研究主要是在低速滑跑条件下进行的。罗瑞盈的研究中对样件的热解炭结构没有报道。在于澍的研究中, 并未模拟湿态气氛, 只是在样件上洒水, 不能系统说明湿态摩擦性能。综上所述, 国内外目前对 C/C 复合材料在实际使用情况下的气氛条件模拟研究还比较欠缺, 因此系统研究不同湿度环境下 C/C 复合材料的摩擦性能有着必要性, 以及研究结果能对飞机刹车安全提供有效的数据。

本文作者通过在 MM-1000 摩擦试验机上安装气氛密封箱, 研究不同相对湿度下 C/C 复合材料的摩擦磨损性能, 通过扫描电子显微镜系统地分析不同相对湿度下 C/C 复合材料的摩擦磨损机制。

1 实验

1.1 试样的制备

C/C 复合材料坯体为无纬布网胎叠层经针刺而成。CVD 预沉积采用 C₃H₆ 作炭源, N₂ 为载气。C/C 复合材料毛坯的预沉积在均温式感应气相沉积炉中进行, 石墨化处理在真空感应炉中进行。本研究采用一对摩擦试环, 配副的动环和静环的材质和尺寸相同, 试环的内径和外径的尺寸分别为 $d\ 75\ \text{mm}$ 、 $d\ 45\ \text{mm}$, 厚度为 $16\ \text{mm}$ 。

1.2 试验装置

在图 1 所示的 MM-1000 摩擦试验机上模拟飞机刹车试验。该装置为标准摩擦装置, 依据飞机刹车制动条件采用摩擦热冲击技术, 将动环通过键槽与驱动主轴相连并随驱动主轴和惯性飞轮一同加速到规定的制动速度下, 施加一定的压力使静环和旋转的动环发生摩擦而实现制动刹车, 通过测量制动力矩可以计算制动摩擦因数。摩擦因数的计算公式为

$$M = \mu(r_1 + r_2)F_n / 2 \quad (1)$$

式中: M 为力矩, N·m; μ 为摩擦因数; F_n 为载荷; r_1 为内径; r_2 为外径。

摩擦试验机中的气氛箱采用磁流体密封技术^[9], 在真空转轴动密封技术中, 磁性流体转轴动密封技术

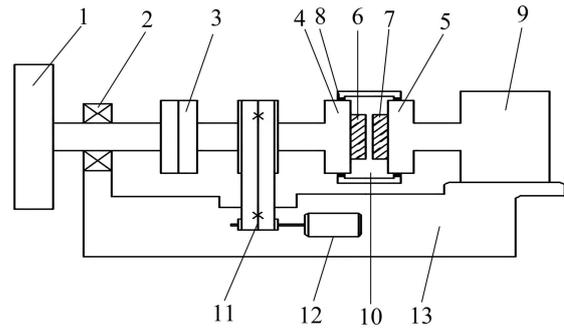


图 1 惯性摩擦实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of laboratory scale inertia type of dynamometer: 1—Inertia disk; 2—Bearing; 3—Clutch; 4—Activity wheel head; 5—Static wheel head; 6—Activity ring; 7—Static ring; 8—Magnetic fluid; 9—Cylinder; 10—Atmosphere box; 11—Transmission belt; 12—Engine; 13—Base

具有零泄漏、无固体摩擦、能耗小、无机械磨损、寿命长、适于传递高转速(最高可达 120 000 r/min)等优良性质。气氛箱有一个进气口和一个出气口, 通过加湿器对内缓慢加湿。箱体内存有温湿度传感器, 有外接显示屏, 可以及时显示内部湿度。

1.3 试验方法与参数

试验前, 摩擦试环表面预磨合平稳后, 在图 1 所示的摩擦磨损试验机上进行正常刹车模拟试验。把试样环安装在密封气氛箱内, 通过温湿度测试仪上的显示, 调节加湿器, 在不同相对湿度(RH)下试验 10 次以上。试验主要分为两部分, 一是在不同相对湿度下进行摩擦实验, 二是材料在 80%RH 下放置时间不同进行试验。表 1 所列为制动试验参数, 其中 80¹⁾为试样在 80%RH 下放置 12 h 后进行制动试验。

表 1 制动试验参数

Table 1 Brake test parameters

Inertia/ (kg·m ²)	Pressure/ MPa	Line speed/ (m·s ⁻¹)	Relative humidity/%
0.3	0.6	25	40, 80, 80 ¹⁾ , 90

1) The samples were placed under 80%RH for 12 h.

试验机自动记录制动力矩与时间的关系, 并根据式(1)计算摩擦因数。用精度为 10 μm 的螺旋测微器测量试环上 6 点处摩擦前后的尺寸变化, 取平均值得到线性磨损量; 用精度为 0.1 mg 的分析天平测量试环摩

擦前后的质量损失, 得到质量磨损量。采用 FEI-Nova Nano sem 230 型场发射扫描电子显微镜对试样制动后的摩擦表面和磨屑的形貌进行观察。

2 结果与分析

2.1 相对湿度对 C/C 复合材料摩擦磨损性能的影响

图 2 所示为不同相对湿度下 C/C 复合材料的摩擦曲线, 其中图 2(a)和(b)所示为材料在高相对湿度下放置 5 min 后进行摩擦试验的曲线, 而图 2(c)所示为材料在高相对湿度下放置 12 h 后进行摩擦试验的曲线。由图 2(a)、(b)和(c)可知, 速度曲线开始阶段斜率偏小, 速度下降缓慢, 经过一段时间后, 速度再持续快速下降, 原因是在高相对湿度下, 材料表面吸附了水分, 对摩擦表面有润滑效果, 降低了材料摩擦因数, 随着刹车时间的增长, 材料表面温度逐渐上升, 当摩擦表面达到一定温度时, 发生水的解吸附转变^[10], 摩擦表面水分消失, 摩擦因数变大; 另一个原因, 当材料表

面水分消失后, 在有水分存在的情况下的摩擦膜会有个破碎到重新形成的过程, 此时形成在没有水分环境下的摩擦膜, 两个原因的综合效果使得摩擦因数激增。比较图 2(a)和(b)所示为力矩曲线开始阶段, 图 2(a)的摩擦因数比图 2(b)的低且摩擦因数持续时间稍长, 原因是高相对湿度下, 材料的摩擦表面吸附更多的水分, 润滑效果更明显, 导致一开始摩擦因数更低, 而材料表面吸附的更多水分需要更长的时间蒸发解吸。图 2(c)所示为材料在 80%RH 条件下放置 12 h 再进行摩擦试验的摩擦曲线。由图 2(c)可知, 摩擦曲线很不稳定, 有刹不住车的现象, 速度曲线开始下降缓慢, 低摩擦因数阶段过长, 出现此摩擦曲线的原因是材料不仅表面吸附了大量水分, 材料内部也已经吸潮, 所以摩擦过程中, 当材料表面水分消失后, 内部的水会向表面渗出, 使得材料表面能够长时间维持润滑膜的存在。图 2(d)所示为低相对湿度(40%RH)下摩擦曲线。由图 2(d)可以看出, 摩擦因数曲线并没有出现如图 2(a)、(b)和(c)所示的前期低摩擦因数现象, 速度持续快速下降, 力矩曲线稳定且呈标准马蹄形, 为正常刹车摩擦

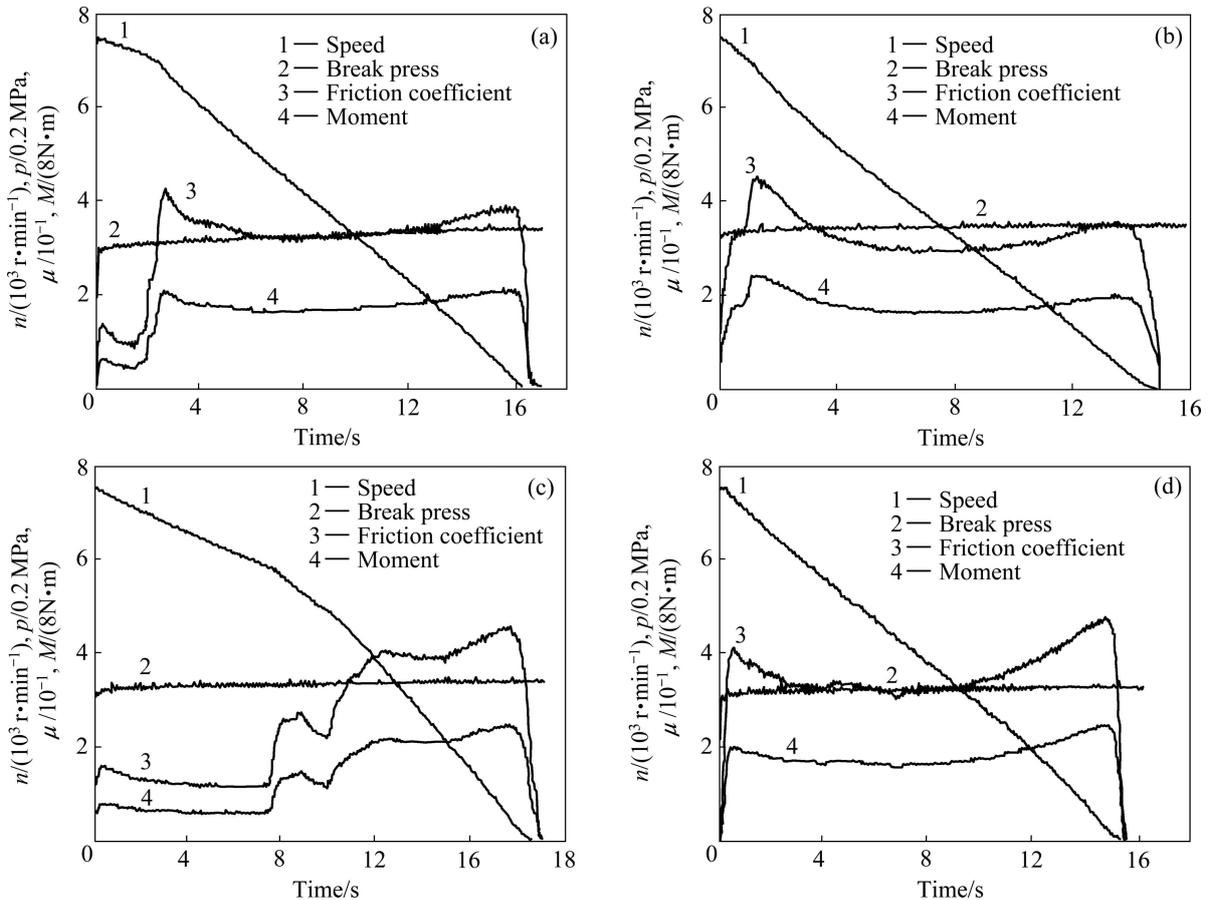


图 2 不同相对湿度下 C/C 复合材料的摩擦曲线

Fig.2 Friction curves of C/C composite material under different relative humidities: (a) 90%RH; (b) 80%RH; (c) 80%RH; (d) 40%RH

曲线, 说明该相对湿度下, 空气中的水蒸气已经对刹车性能基本没有影响。图 2(a)、(b)和(d)刹车时间在 15~17 s, 图 2(c)刹车的时间为 19 s。可见在实际环境下, 短时间内相对湿度高低对刹车性能影响不大, 只有长时间在高相对湿度的环境下, 刹车性能才会有大的影响。

图 3(a)所示为材料在不同湿度下经过 10 次摩擦实验摩擦因数的比较。由图 3(a)可见, 在 80%RH 和 90%RH 下, 摩擦因数很接近, 而在 40%RH 下, 摩擦因数最高, 且波动最大。说明高相对湿度下水分的润滑效果不仅降低材料的摩擦因数, 且能够保持摩擦因数基本稳定。在高相对湿度下刹车时, 刹车力矩较低相对湿度下刹车时的刹车力矩要低, 尤其以制动开始时力矩最低。这是由于湿态下水分子与乱层石墨晶格中的不饱和 π 键结合后, 使石墨表面及棱边力饱和, 降低晶体间的引力, 从而使摩擦因数变小。随着刹车盘表面温度的进一步升高, 力矩很快有所上升, 水分不断蒸发, 使得水分带来的润滑作用降低。图 3(b)所

示为材料在高相对湿度下放置不同时间后的摩擦因数。由图 3(b)可知, 当材料在高相对湿度下时间越长, 材料就会吸收更多的水分, 摩擦因数越低。图 3(b)中材料长时间放置在 80%RH 气氛中, 摩擦因数低且不稳定。此时, 水分从材料表面扩散到材料内部, 这时候材料刹车会有打滑现象, 摩擦因数偏低, 摩擦性能不稳定。飞机的“晨病”就是因为刹车盘长时间吸收了大气中的水分造成的, 所以起飞前先要滑行刹车除掉过多的水分。

由表 2 可知, 相对湿度越低材料磨损越严重, 高相对湿度下, 材料放置时间越长, 磨损越小。

表 2 不同相对湿度下材料的磨损性能

Table 2 Wear performance of materials under different relative humidities

Relative humidity/ %	Mass loss rate/ (mg·plate ⁻¹ ·time ⁻¹)	Linear wear rate/ ($\mu\text{m}\cdot\text{plate}^{-1}\cdot\text{time}^{-1}$)
40	8.75	1.6
80	7.50	1.2
80 ¹⁾	4.86	0.846
90	6.17	1.0

1) The samples were placed under 80%RH for 12 h.

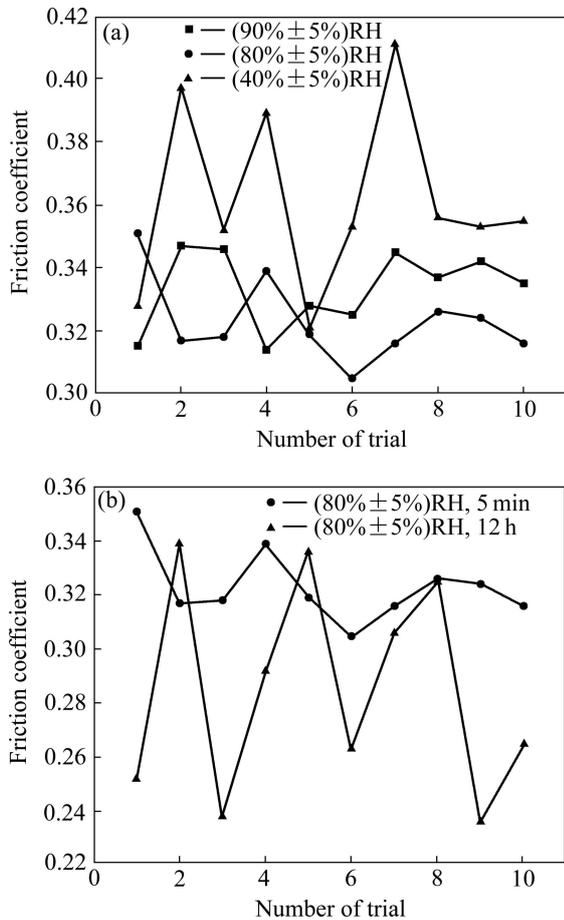


图 3 不同相对湿度下材料的摩擦因数
Fig.3 Friction coefficient of materials under different relative humidities: (a) Different humidities; (b) Different storage times

2.2 不同相对湿度下材料摩擦表面及磨屑形貌分析

图 4 所示为材料在不同湿度下磨损形貌。C/C 复合材料的磨损机理包括磨粒磨损、氧化磨损、粘着磨损和剥层磨损等^[11-14]。由图 4(a)和(b)可见, 低相对湿度下磨损严重, 材料表面很粗糙, 图 4(a)中摩擦表面大量出现表层剥落痕迹, 摩擦表面显示出波浪状的磨屑堆积、碾磨的形貌, 那是因为当摩擦膜形成到一定大小后, 会被摩擦剪应力破坏成磨屑, 再由磨屑挤压成摩擦膜, 沿着摩擦方向滑移, 如此循环形成波浪状摩擦形貌。在黑色、较致密的摩擦膜之间有灰色的和碾磨的形貌。由图 4(b)中可以看到, 两种基体炭磨损形式有很大差别, 热解碳表面有大量波纹状摩擦形貌, 而树脂炭表面很光滑, 没有波纹状摩擦膜, 出现界面裂纹。HUTTON 等^[15]研究认为, 石墨化度高的 CVI 炭的剪切强度远低于石墨化度低的 PAN 基炭纤维的。所以, 在图 4(b)中, 热解碳易变形, 摩擦表面的磨屑在摩擦力的作用下易压制成有自修复能力的摩擦润滑膜, 而树脂炭难变形, 硬度高, 产生磨屑易飞离, 摩擦表面难以形成连续的润滑膜, 在剪切应力下更容易发生裂纹现象。图 4(c)的摩擦磨损表面比图 4(a)的平整, 同样大量存在波浪状润滑膜, 部分纤维端头被

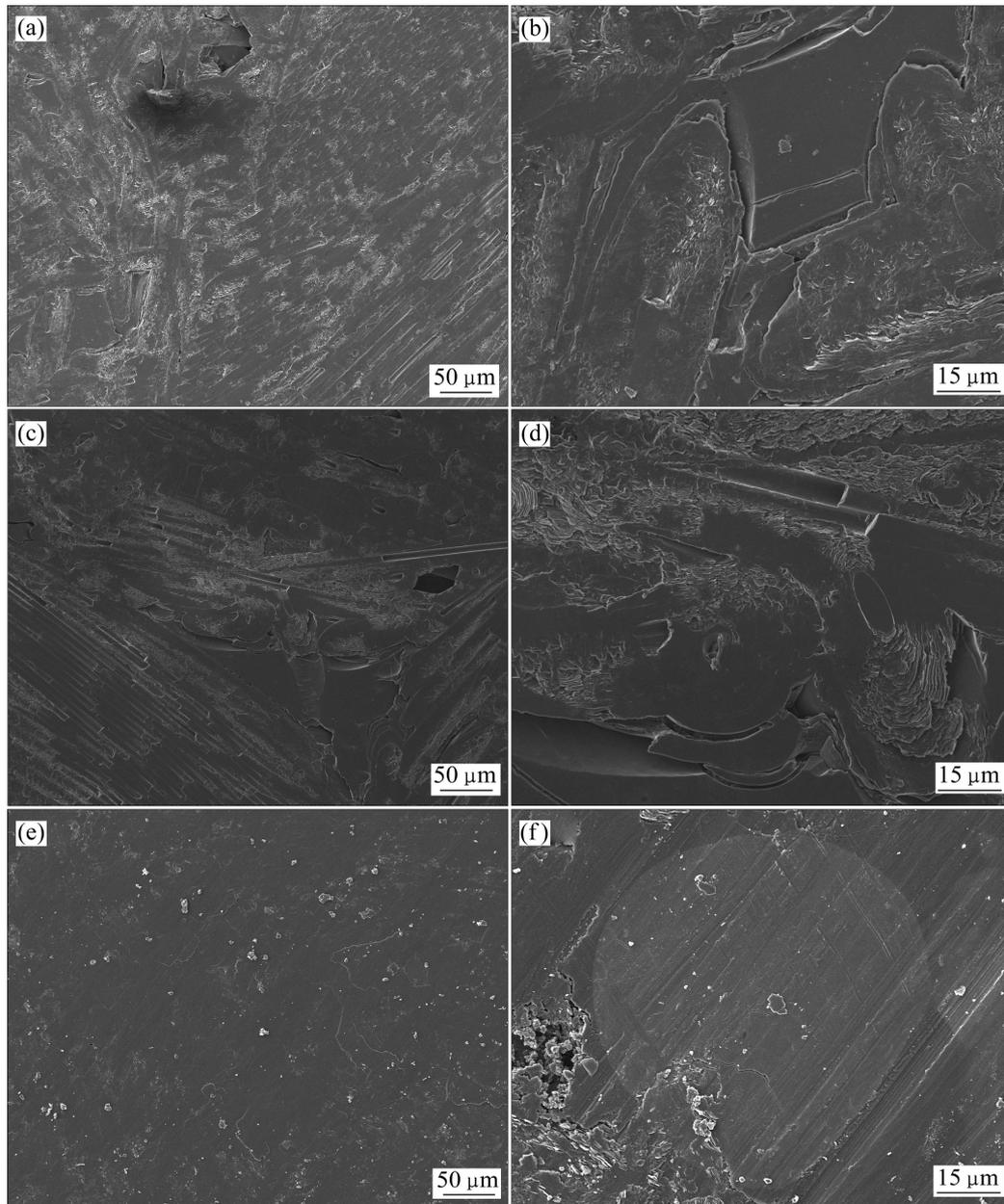


图4 材料在不同相对湿度下的磨损表面形貌

Fig.4 Worn surface morphologies of material under different relative humidities: (a), (b) 40%RH; (c), (d) 80%RH; (e), (f) 90%RH

磨损，表面有裂纹孔洞现象，纤维出现断裂，表层剥落。由上分析可知，图4(a)和(c)的氧化磨损严重，摩擦表面有大范围表层剥落现象。图4(e)中的表面最平滑，摩擦膜平整致密且呈大片状，未发现显著的纤维束磨损形貌。图4(f)中的材料表面出现大量划痕，但整体表面平滑，未出现图4(b)和(d)中基体炭产生裂纹的现象，局部出现表层剥落和孔洞，所以，在该相对湿度下，由于水分的润滑，氧化磨损较小，主要是表层磨损和磨粒磨损，且局部有表层剥落现象。

图5所示为不同湿度下摩擦实验后磨屑的SEM

像。图5(a)中的磨屑最多，粒度较小，且层片状摩擦膜的大小比图5(c)中的小。可能是磨屑在未被碾压就被甩出摩擦表面，且由于低湿度下没有水分润滑，摩擦表面剥落的大片状摩擦膜很容易被摩擦力破碎，所以磨屑细小且没有大片状摩擦膜。由于不断有磨屑从摩擦表面抛出，材料表面更容易出现孔洞，为氧化创造了条件，这也是材料具有较大线性磨损的原因。图5(c)中磨屑最少，除了较大块的层片状磨屑外，磨屑颗粒均匀细小，这符合图4(e)中的摩擦表面形貌，即发生了表层剥落。图5(b)中的磨屑比图5(a)中的少些，

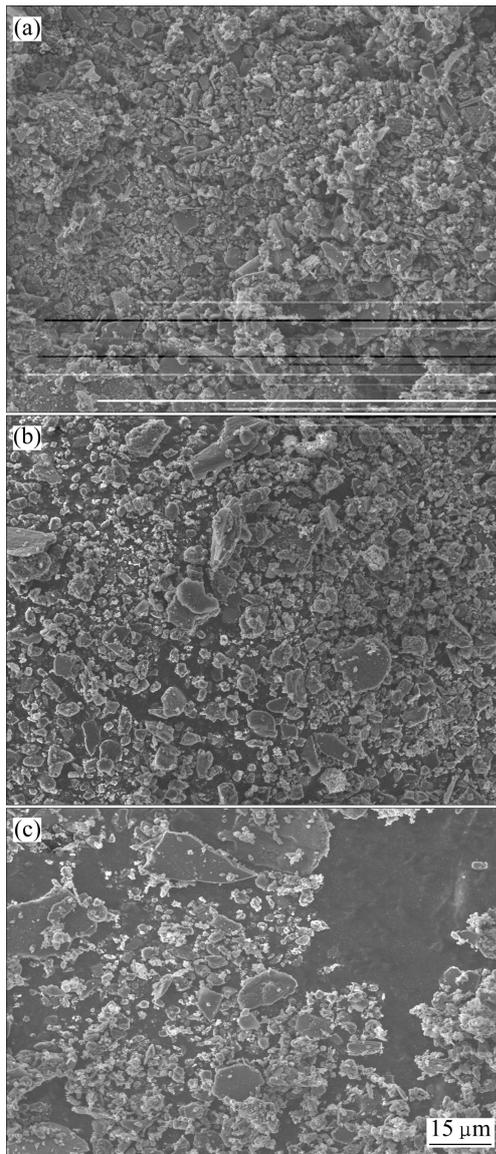


图 5 不同相对湿度下磨屑的形貌

Fig.5 Morphologies of material dust under different relative humidities: (a) 40%RH; (b) 80%RH; (c) 90%RH

但大块层片状磨屑开始出现, 说明磨损的主要机理发生变化, 从图 5(a)所示的氧化磨损转变到图 5(c)所示的剥层磨损。

3 结论

1) 随着相对湿度的增加, C/C 复合材料的摩擦因数降低, 质量磨损下降, 且在高相对湿度下, 由于水分的润滑, 摩擦因数要比低相对湿度下的稳定。可见飞机着落的实际环境下, 短时间内相对湿度高低对刹车性能影响不大。

2) 在高相对湿度下, C/C 复合材料放置时间越长, 对材料的摩擦磨损性能影响越严重, 长时间在高相对湿度下放置后, C/C 复合材料刹车时间比较长, 且摩擦曲线很不稳定。所以飞机长时间在阴雨天的环境下, 要在起飞前进行滑行刹车去除刹车盘上的水分。

3) 通过 SEM 分析摩擦后的材料表面及磨屑形貌发现, 随着相对湿度的增加, 材料的磨损机理发生转变, 低相对湿度下氧化磨损比较严重, 而高相对湿度下氧化磨损较少, 主要表现为剥层磨损。

REFERENCES

- [1] 贺福, 王茂章. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
HE Fu, WANG Mao-zhang. Carbon fibers and composites[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [2] 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): 343-349.
XU Hui-juan, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun, PENG Jian-xin. Friction properties of carbon-carbon composites with different pyrocarbon structure[J]. Tribology Transactions, 2003, 23(4): 343-349.
- [3] 徐惠娟, 熊翔, 黄伯云, 彭剑昕, 李江鸿. 不同能载水平下 C/C 复合材料的摩擦特性[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2003, 34(3): 221-224.
XU Hui-juan, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun, PENG Jian-xin, LI Jiang-hong. Friction properties of C/C composites in different energy conditions[J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science, 2003, 34(3): 221-224.
- [4] 熊翔, 黄伯云, 徐惠娟, 吉冬英, 彭剑昕. 不同制动速度下针刺毡炭/炭复合材料的摩擦磨损行为[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(3): 281-284.
XIONG Xiang, HUANG Bai-yun, XU Hui-juan, JI Dong-ying, PENG Jian-xin. Frictional and wear behaviors of C/C composites from a needled felt at different braking speeds[J]. Journal of Central South University of Technology, 2001, 32(3): 281-284.
- [5] CHEN J D, CHERN LIN J H, JU C P. Effect of humidity on the tribological behavior of carbon-carbon composites[J]. Wear, 1996, 93(1): 38-47.
- [6] 罗瑞盈, 李贺军, 杨峥, 乔生儒, 石荣, 康沫狂. 湿度对炭/炭材料摩擦性能影响[J]. 新型炭材料, 1995, 11(3): 61-64.
LUO Rui-ying, LI He-jun, YANG Zheng, QIAO Sheng-ru, SHI Rong, KANG Mo-kuang. The influence of humidity on the tribological behavior of C/C composites[J]. New Carbon Material, 1995, 11(3): 61-64.
- [7] 曲建伟, 罗瑞盈, 张宏波, 李进松, 刘涛. 高温热处理对炭/炭复合材料湿态摩擦性能的影响[J]. 炭素技术, 2003, 129(6): 17-22.

- QU Jian-wei, LUO Rui-ying, ZHANG Hong-bo, LI Jin-song, LIU Tao. The influence of high temperature heat treatment on the tribological behavior of C/C composites under wet conditions[J]. *Carbon Techniques*, 2003, 129(6): 17-22.
- [8] 于 澍, 熊 翔, 刘根山, 黄伯云, 张传福. 炭/炭复合材料航空刹车副的湿态摩擦性能[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(5): 841-846.
- YU Shu, XIONG Xiong, LIU Gen-shan, HUANG Bai-yun, ZHANG Chuang-fu. Tribological properties of carbon/carbon composites under wet condition[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(5): 841-846.
- [9] 邹继斌, 陆永平, 齐毓霖. 磁流体密封的阻力矩分析[J]. *润滑与密封*, 1995, 1(1): 6-9.
- ZOU Ji-bin, LU Yong-ping, QI Yu-lin. The dragging torque and loss in magnetic fluid seals[J]. *Lubrication and Sealing*, 1995, 1(1): 6-9.
- [10] YEN B K, ISHIHARA I. An investigation of friction and wear mechanisms of carbon-carbon composites in nitrogen and air at elevated temperatures[J]. *Carbon*, 1996, 34(4): 489-498.
- [11] PARK S J, SEO M K, LEE J R. Effect of oxidation inhibitor on the low energy tribological behavior of carbon-carbon composites[J]. *Carbon*, 2002, 40(6): 835-843.
- [12] 徐惠娟, 熊 翔, 黄伯云, 古冬英, 陈腾飞. 石墨化度对炭/炭复合材料在不同制动速度下的摩擦磨损性能的影响[J]. *矿冶工程*, 2003, 23(4): 71-74.
- XU Hui-juan, XIONG Xiang, HUANG Bai-yun, GU Dong-ying, CHEN Teng-fei. Effect of graphitization degree on friction and wear properties of carbon-carbon composites at different braking speed[J]. *Mining and Metallurgical*, 2003, 23(4): 71-74.
- [13] CHEN T F, LIAO J Q, LIU G S, ZHANG F Q, GONG Q M. Effects of needle-punched felt structure on the mechanical properties of carbon/carbon composites[J]. *Carbon*, 2003, 41(5): 993-999.
- [14] OZCAN S, FILIP P. Microstructure and wear mechanisms in C/C composites[J]. *Wear*, 2005, 259(1): 642-650.
- [15] HUTTON T J, BRIAN M, CRELLING J C. Structural studies of wear debris from carbon-carbon composite aircraft brakes[J]. *Carbon*, 1999, 37(6): 907-916.

(编辑 李艳红)