复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第3期 6月 2013年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0070-06

炭布/树脂复合摩擦材料的湿式摩擦学性能

费 杰，黄剑锋*，曹丽云，李翠艳
（陕西科技大学 材料科学与工程学院，西安 710021）

摘 要： 基于炭布优异的摩擦磨损性能、自润滑性能以及低密度等特点，将其应用于湿式摩擦材料中，以适应高转速、大压力或润滑不充分等极端工况。分别以1 K、3 K和6 K碳布为增强体，制备出三种炭布/树脂复合摩擦材料，研究了其湿式摩擦学性能。结果表明：随着纤维束内单丝数量的增加，摩擦材料的瞬时制动稳定性降低，动摩擦系数减小，但是耐磨性能提高。所有摩擦材料的磨损率小于1.10×10^{-5} mm^3/J，表现出较好的耐磨性能，并且对偶材料的磨损率很小，仅为0.40×10^{-5} mm^3/J。磨损主要表现为纤维断裂、拔出及树脂脱粘等形式，但是在磨损表面没有形成大尺寸磨屑和明显的“第三体”磨粒，导致摩擦材料和对偶材料的磨损率较小。

关键词： 湿式摩擦材料；炭布；摩擦系数；摩擦稳定性；磨损率

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Wet tribology performance of carbon fabric/resin composites

FEI Jie, HUANG Jianfeng*, CAO Liyun, LI Cuiyan
(School of Materials Science and Engineering, Shanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to adapt the unusual operating conditions such as high rotating speed, excessive load and insufficient lubrication and so on, the carbon fabric was applied to wet friction composites for its excellent tribology performance, self-lubricating and low density. Three kinds of carbon fabric/resin composites were developed with 1 K, 3 K and 6 K carbon fabric as reinforcement, respectively, and the wet tribology performance of the carbon fabric/resin composites were investigated. The experimental results show that the instantaneous braking stability and the dynamic friction coefficient decreases, but the wear resistance enhances with the increase of monofilaments in fiber bundle. The wear rates of all composites are less than 1.10×10^{-5} mm^3/J, indicating excellent wear resistance of the composites. The wear rates of couple plates are small too, which is only about 0.40×10^{-5} mm^3/J. The breakage and removal of carbon fibers along with resin peeling off from the surface appear to be the dominant wear mechanism, but no large size of wear debris and "third body" abrasive particles embedded into the matrix were formed which effectively avoids severe abrasion of the friction materials and the couple plates.

Keywords: wet friction composites; carbon fabric; friction coefficient; friction stability; wear rate

湿式摩擦材料是指工作于润滑介质（主要是润滑油）中的摩擦材料，主要应用于自动变速器、差速器、扭矩管理器和同步器等湿式传动系统中[1-2]。该类材料需要承受高转速剪切和压缩、摩擦高温冲击以及高温润滑油浸蚀等苛刻工作条件。由于使用条件不同，传动系统的速度、压力和载荷差别很大，发展出多种湿式摩擦材料，目前应用较为广泛的是粉末冶金摩擦材料和纸基摩擦材料。粉末冶金摩擦材料具有力学强度高，导热性好及承载能力强等优点[3-4]，但存在摩擦系数低，传动不平稳以及长时间工作易与对偶材料粘连等缺陷[5]。纸基摩擦材料具有摩擦系数高和传动平稳的特点[6-8]，但是在高转速、大压力以及润滑不充分等非正常条件下易失效，仅应用于中低能载工况。随着车辆向高速重载方向发展，对湿式传动系统的安全性和稳定性提出了更高的要求，如何克服粉末冶金摩擦材料和纸基摩擦材料的上述缺陷成为解决问题的关键。

炭质材料包括石墨、短纤维和炭布等，具有优

收到初稿日期： 2012-04-15；**收到修改稿日期：** 2012-09-28；**网络出版时间：** 2013-01-09 11:19:00
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130109.1119.006.html
基金项目： 国家自然科学基金(51102196)；陕西省自然科学基金(2012JQ6010)；陕西省教育厅科研项目(12JK0460)；陕西科技大学学术骨干培育计划(XS11-01)；陕西科技大学科研启动基金(BJ11-15)；深圳大学深圳市特种功能材料重点实验室开放基金(T201111)
通讯作者： 黄剑锋，教授，博士生导师，主要从事复合材料和功能材料研究 E-mail：huangjf@sust.edu.cn

异的自润滑性能、耐热性能和摩擦磨损性能，已经广泛应用于各类复合材料中[9-10]，其中炭布具有更加整齐规则的编织结构，其承载能力和摩擦学性能更加优异。Kim 等[11-12]研究了用于轴承内衬的炭布增强树脂基材料摩擦学性能，认为炭布优异的自润滑性有效改善了轴承系统的摩擦稳定性。Bijwe 等[13-15]研究了炭布增强聚醚基复合材料的性能，获得了适合于该类复合材料的炭布类型、含量以及预处理方法等工艺参数。

基于此，本文作者提出将炭布/树脂复合摩擦材料应用于湿式离合系统中，以适应高转速、大压力或润滑不充分等极端工况条件。从纤维编织体每束碳纤维单丝根数的角度分类，炭布可以分为 1 K、3 K、6 K 等几种规格。本文中系统研究了炭布规格对其湿式摩擦学性能的影响规律，结果将有助于该类材料的设计和实际应用。

1　实验部分

1.1　实验材料及制备方法

纤维：PAN 基平纹炭布，规格分别为1 K、3 K 和 6 K，面密度分别为 140、240、320 g/m^2。粘结剂：腰果壳油改性酚醛树脂，粒径为 74 μm。溶剂：分析纯无水乙醇。

炭布/树脂基摩擦材料的制备：首先将炭布在丙酮中浸泡 12 h，去离子水清洗后烘干备用。采用浓度为 15%(质量分数)的树脂乙醇溶液浸渍炭布，使树脂含量达到 25%(质量分数)。室温晾干后，在压力为 5.0 MPa，温度为 175 ℃ 的条件下热压 30 min，获得并采用限位法保证其厚度在 0.35～0.38 mm 之间。不同炭布类型的炭布/树脂摩擦材料如表 1 所示。

表 1　不同炭布类型增强树脂的摩擦材料

Table 1　Friction carbon fabric/resin composites with different carbon fabric types

	CR1	CR3	CR6
Type of carbon fabric	1 K	3 K	6 K
Areal density of carbon fabric/(g·m^{-2})	140	240	320
Mass fraction of carbon fabric/%	75	75	75
Mass fraction of resin/%	25	25	25

1.2　性能测试

采用 QM1000-Ⅱ B 型湿式摩擦材料试验机测试摩擦材料的摩擦磨损性能。摩擦材料测试样品为外径 113.0 mm、内径 72.6 mm 的圆环，粘接于钢片上。试验机主要性能指标：转速为 1000～3000 r/min，压力为 0～2.0 MPa；摩擦方式为环-环接触；对偶盘为 45# 钢，硬度为 HRC 35，表面粗糙度为 0.32 μm；润滑油为 N32 号机械油，润滑油温度为 70～80 ℃，流量为 90 mL/min。通过改变压力和转速获得样品的摩擦系数，结果为 3 次测量值的平均值，在摩擦系数测试过程中获得样品的摩擦力矩曲线。通过测量样品重复制动 1000 次后厚度变化值，按照下式计算出磨损率：

$$V = A \cdot \Delta h \Big/ \left[n \cdot \left(\frac{1}{2} I_0 \omega^2 \right) \right] \tag{1}$$

式中：V 为磨损率(mm^3/J)；A 为试样表观接触面积(mm^2)；Δh 为磨损试验前后样品的厚度差(mm)；n 为制动次数；I_0 为试验机惯量(kg·m^2)；ω 为试验机主轴的角速度(rad/s)。

采用日本电子 JSM6460 型和日本日立 Hitachi S4800 型扫描电子显微镜(SEM)观察材料磨损前后的微观形貌。

2　结果与讨论

2.1　摩擦制动过程分析

摩擦材料在润滑油中的摩擦制动过程可以分为流体挤压(squeeze film phase，Ⅰ)，粗糙峰混合接触(mixed asperity contact phase，Ⅱ)和压紧接触(consolidating contact phase，Ⅲ)三个阶段[16]，摩擦力矩曲线能够直观表达摩擦过程中力矩的变化趋势，反映各个阶段的变化特征。在转速为 2000 r/min、压力为 0.5 MPa 下，摩擦材料 CR1、CR3 和 CR6 典型的摩擦力矩曲线如图 1 所示。随着纤维束内单丝数量的增加，摩擦制动时间从 1.96 s 延长到 2.37 s。摩擦材料 CR1 和 CR3 在混合接触阶段的摩擦力矩几乎没有变化，并且在向压紧接触阶段转换过程中非常平稳。而摩擦材料 CR6 在混合接触阶段表现出起始摩擦力矩较小随后呈现出逐渐增大的趋势，同时在动静转换过程中出现了明显的“公鸡尾”现象，表明 CR6 制动过程的稳定性略差，应用于实际工况条件时可能引起摩擦振颤或噪音等。

2.2　动摩擦系数及稳定性

图 2 为转速 2000 r/min 下，炭布/树脂摩擦材料的动摩擦系数随压力的变化关系曲线。可以看出，当压力从 0.5 MPa 增加 1.5 MPa 时，摩擦材料 CR1 的动摩擦系数从 0.139 降低到 0.123，降低幅

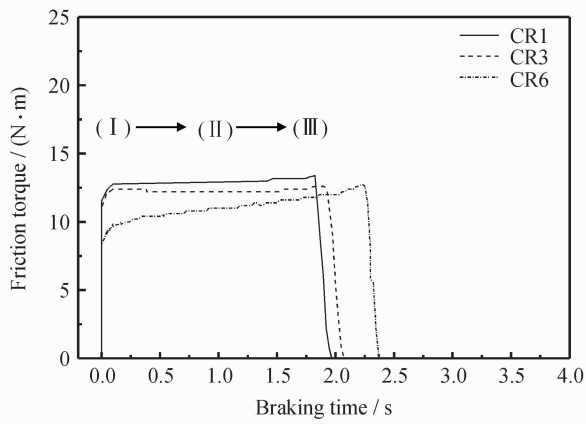


图 1　转速 2000 r/min、压力 0.5 MPa 下炭布/树脂摩擦材料典型的摩擦力矩曲线

Fig. 1　Typical friction torque curves of carbon fabric/resin friction composites with braking pressure of 0.5 MPa and rotating speed of 2000 r/min

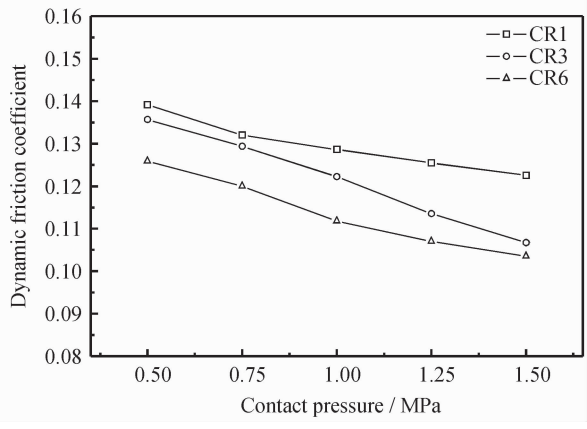


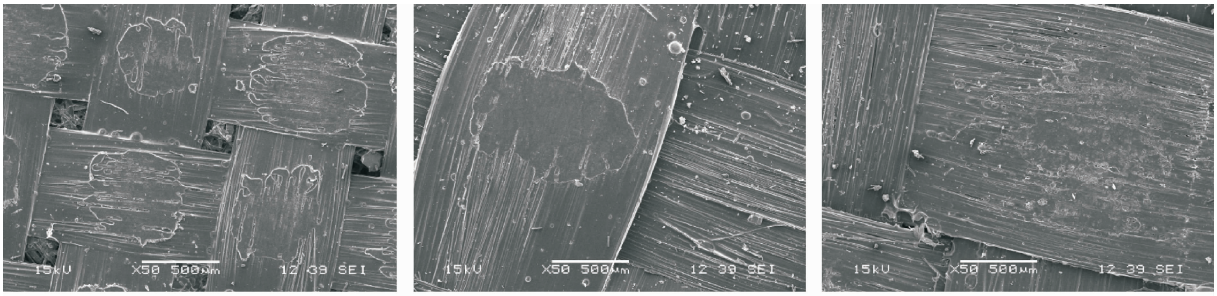
图 2　转速 2000 r/min 炭布/树脂摩擦材料的动摩擦系数与制动压力的关系曲线

Fig. 2　Relationship between braking pressure and friction coefficient of carbon fabric/resin friction composites with the rotating speed of 2000 r/min

度为 11.5%；而摩擦材料 CR6 的动摩擦系数相应地从 0.126 降低到 0.104，降幅为 17.5%。表明随着纤维束内单丝数量的增加，动摩擦系数降低，并且在同等压力条件下降低幅度增大。由于碳纤维编织物纤维束之间叠层交错的特点(见图 3)，浸渍树脂溶液后，在压力和温度的作用下，树脂渗透到纤维孔隙中的同时部分聚集在纤维凸起处。从微观角度而言，在摩擦表面仅仅是摩擦材料凸起区域的粗糙峰与对偶盘形成机械接触，凹陷部分则充满润滑油，以流体动压润滑为主。从图 3 可以看出，随着纤维束内单丝数量的增加，凸起区域减少，导致粗糙峰的机械接触减少，由此产生的摩擦力矩减小，因此动摩擦系数降低。同时接触过程中由于碳纤维的抗压强度和耐摩擦升温性能较好，导致在压力变化时，接触区域分布较多碳纤维的 CR1 动摩擦系数的降幅较小。

图 4 为制动压力 1.0 MPa 不同转速下炭布/树脂摩擦材料的动摩擦系数。可以看出，当转速从 1000 r/min 增加到 3000 r/min 时，摩擦材料 CR1 的动摩擦系数从 0.132 降低到 0.119，降低幅度为 9.8%；而 CR6 的动摩擦系数相应地从 0.112降低到 0.105，降幅为 6.3%。随着转速的升高，摩擦材料与对偶材料的接触时间延长，摩擦表面温度升高，润滑油黏度降低，动摩擦系数减小。相对而言，摩擦材料 CR6 内部孔隙存储的润滑油较多，在摩擦过程中能够有效润滑摩擦面，使表面温升幅度较小，因此摩擦材料 CR6 的动摩擦系数降幅较小。

图 5 为长时间往复制动过程中炭布/树脂摩擦材料动摩擦系数的变化规律。可以看出，随着制动次数的增加，所有样品的动摩擦系数起始阶段略有



(a) CR1　　(b) CR3　　(c) CR6

图 3　三种炭布/树脂摩擦材料的 SEM 照片

Fig. 3　SEM micrographs of three types of carbon fabric/resin friction composites

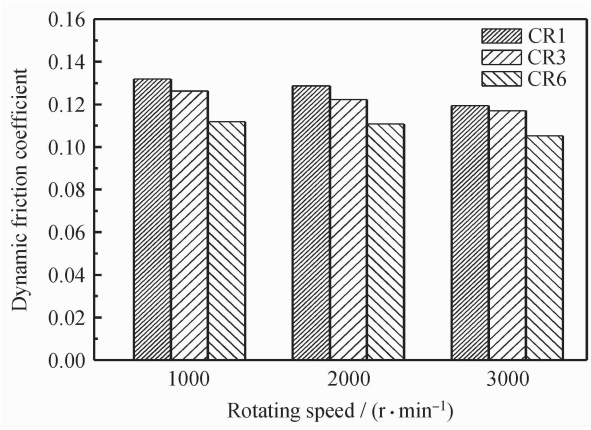


图 4　压力 1.0 MPa 不同转速下炭布/树脂摩擦材料的动摩擦系数

Fig. 4　Friction coefficient of carbon fabric/resin friction composites under different rotating speed with braking pressure of 1.0 MPa

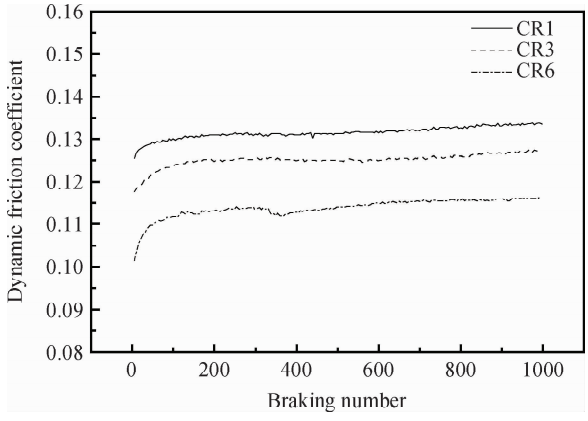


图 5　重复制动过程中炭布/树脂摩擦材料动摩擦系数的变化趋势

Fig. 5　Variation of friction coefficient of carbon fabric/resin friction composites under repeated braking process

上升，随后保持稳定，相对而言，摩擦材料 CR1 的动摩擦系数变化幅度较小，长时间重复制动的稳定性最好。在 0～200 次之间起始磨损阶段，粘结剂树脂容易从摩擦材料表面脱落，碳纤维逐渐暴露在摩擦表面成为主要的承载单元，摩擦接触区域增加，导致动摩擦系数略有上升。在 200～1000 次之间，随着制动次数的增加，摩擦面状态逐渐稳定，随后的动摩擦系数基本保持不变。

2.3　磨损率

炭布/树脂摩擦材料和对偶盘的磨损率如图 6 所示。可以看出，所有摩擦材料的磨损率都低于 $1.10\times10^{-5}\ mm^3/J$，远远小于碳纤维增强纸基摩擦材料的磨损率[8]，对偶盘的磨损率基本一致，仅为 $0.40\times10^{-5}\ mm^3/J$，表明炭布/树脂摩擦材料具有优异的耐磨性能，同时几乎不磨损对偶材料，这在摩擦副中也是一个非常重要的性能指标。随着纤维束内单丝数量的增加，样品的磨损率降低，这与其表面磨损形貌有关(见图 7)。从图 7 中可以发现，

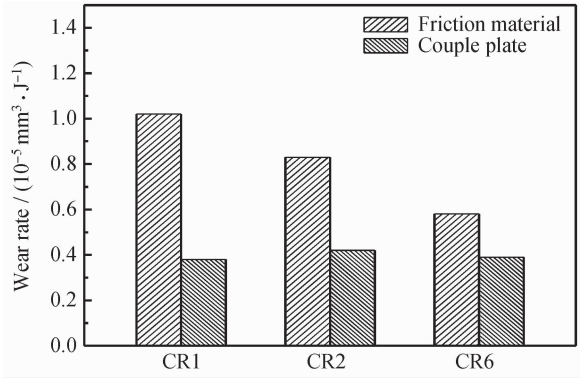
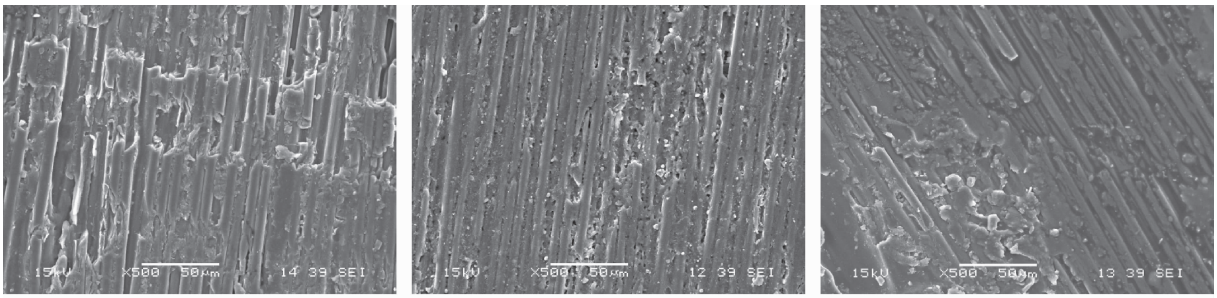


图 6　炭布/树脂摩擦材料和对偶盘的磨损率

Fig. 6　Wear rates of the carbon fabric/resin friction composites and the couple plates



(a) CR1　　(b) CR3　　(c) CR6

图 7　炭布/树脂摩擦材料磨损表面扫描电镜照片

Fig. 7　SEM micrographs of the worn surfaces of carbon fabric/resin friction composites

摩擦材料表面出现了纤维断裂、拔出以及树脂脱粘等磨损形式，在摩擦材料 CR1 中表现最为明显，出现了纤维的严重磨损行为和纤维拔出后留下的孔洞，但是并未形成尺寸较大的磨屑和较为明显的“第三体”磨粒。而摩擦材料 CR6 磨损表面仅能观察到少量的纤维断裂行为，同时可以明显发现 CR6 的纤维排布较为密集，与粘结剂树脂的结合良好，这也是其磨损率较低的一个重要原因。图 8 为 CR6 摩擦表面磨损碳纤维的微观形貌照片。由于碳纤维本身的乱层石墨结构具有良好的减磨作用，在对偶盘的作用下，碳纤维被磨平，逐步剥离出摩擦材料本体，碳纤维磨损表面光滑整齐，没有犁沟、脱落等严重磨损行为，这表明碳纤维优异的自润滑性能和耐磨性能。同时，摩擦材料表面剥离的细小磨屑被润滑油及时带走，脱离摩擦表面，因此样品的磨损率较小。

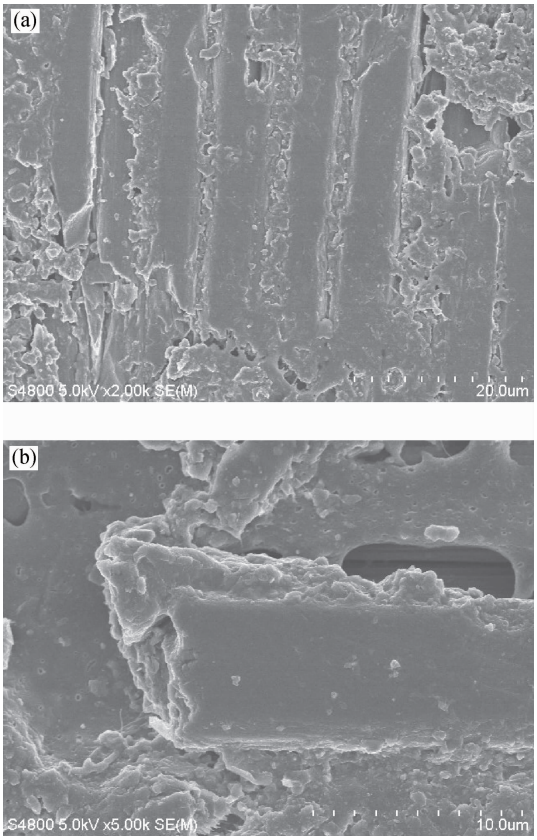


图 8　摩擦材料 CR6 磨损表面磨损碳纤维显微照片

Fig. 8　SEM micrographs of the worn carbon fibers in carbon fabric/resin friction composites CR6

3　结　论

（1）采用溶液浸渍法制备出炭布/树脂复合摩擦材料，样品的动摩擦系数在 0.10～0.14 之间，磨损率小于 1.10×10^{-5} mm^3/J，并且对偶材料的磨损很小，性能远优于纸基摩擦材料。

（2）随着纤维束内单丝数量的增加，炭布/树脂摩擦材料的瞬时制动稳定性降低，动摩擦系数降低，并且摩擦系数的压力稳定性降低，转速稳定性略有提高。

（3）随着纤维束内单丝数量的增加，炭布/树脂摩擦材料的磨损率降低，但是对偶材料的磨损率几乎保持一致，磨损表面表现出纤维断裂、拔出以及树脂脱粘等磨损形式。

参考文献：

[1]　Marklund P, Larsson R. Wet clutch friction characteristics obtained from simplified pin on disc test [J]. Tribology International, 2008, 41: 824-830.

[2]　Jen T C, Nemecek D J. Thermal analysis of a wet-disk clutch subjected to a constant energy engagement [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(7/8): 1757-1769.

[3]　Ho S C, Chern L J H, Ju C P. Effect of fiber addition on mechanical and tribological properties of a copper/phenolic-based friction material [J]. Wear, 2005, 258 (5/6): 861-869.

[4]　王秀飞，黄启忠，尹彩流，等. 铜基粉末冶金摩擦材料的湿式摩擦性能 [J]. 中南大学学报：自然科学版，2008，39(3)：517-521.
Wang Xiufei, Huang Qizhong, Yin Cailiu, et al. Wet friction properties of copper-based material via powder metallurgy [J]. J Cent South Univ: Science and Technology, 2008, 39 (3): 517-521.

[5]　严深浪，张兆森，宋招权，等. 含炭纤维湿式铜基摩擦材料的性能 [J]. 粉末冶金材料科学与工程，2010，15(2)：186-190.
Yan Shenlang, Zhang Zhaosen, Song Zhaoquan, et al. Properties of wet copper-based friction materials containing carbon fiber [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2010, 15(2): 186-190.

[6]　Eguchi M, Yamamoto T. Shear characteristics of a boundary film for a paper-based wet friction material: Friction and real contact area measurement [J]. Tribology International, 2005, 38: 327-335.

[7]　任远春，李贺军，李克智. 固化压力对一种纸基摩擦材料摩擦性能的影响 [J]. 复合材料学报，2007，24(4)：118-122.
Ren Yuanchun, Li Hejun, Li Kezhi. Influence of curing pressure on the friction performance of a kind of paper based friction material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 118-122.

[8]　Fei J, Li H J, Fu Y W, et al. Effect of phenolic resin content on performance of carbon fiber reinforced paper-based friction material [J]. Wear, 2010, 269(7/8): 534-540.

[9] 韩　帅，段跃新，李　超，等. 不同针织结构经编碳纤维复合材料弯曲性能 [J]. 复合材料学报，2011，28(5)：52-57.
Han Shuai，Duan Yuexin，Li Chao，et al. Bending properties of non-crimp stitched carbon fabric reinforced composites of different knit patterns [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(5)：52-57.

[10] 冯　青，李　敏，顾轶卓，等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究 [J]. 复合材料学报，2010，27(6)：16-20.
Feng Qing，Li Min，Gu Yizhuo，et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hygrothermal conditions [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(6)：16-20.

[11] Park D C，Kim S S，Kim B C，et al. Wear characteristics of carbon - phenolic woven composites mixed with nano-particles [J]. Composite Structures，2006，74：89-98.

[12] Kim S S，Yu H N，Hwang I U，et al. The sliding friction of hybrid composite journal bearing under various test conditions [J]. Tribology Letters，2009，35：211-219.

[13] Bijwe J，Rattan R. Carbon fabric reinforced polyetherimide composites：Optimization of fabric content for best combination of strength and adhesive wear performance [J]. Wear，2007，262 (5/6)：749-758.

[14] Tiwari S，Bijwe J，Panier S. Adhesive wear performance of polyetherimide composites with plasma treated carbon fabric [J]. Tribology International，2011，44 (7/8)：782-788.

[15] Sharma M，Tiwari S，Bijwe J. Optimization of material parameters for development of polyetherimide composites [J]. Materials Science and Engineering B，2010，168 (1/2/3)：55-59.

[16] Matsumoto T. A study of the durability of paper - based friction material influenced by porosity [J]. Journal of Tribology，1995，117：272-278.

（上接第 44 页）

KEYWORDS FOR COMPOSITES

C：ANALYSIS

analytical modelling
computational modelling
damage mechanics
finite element analysis(FEA)
laminate mechanics
micro-mechanics
numerical analysis
statistical properties/methods

D：TESTING

acoustic emission
chemical analysis
electron microscopy
fractography
mechanical testing
non-destructive testingoptical microscopy
physical methods of analysis
process monitoring
radiography
surface analysis
thermal analysis
ultrasonics

E：MANUFACTURING/PROCESSING

assembly
autoclave
automation
braiding
casting
chemical vapour deposition (CVD)
compression mouldingconsolidation
cure
cutting
extrusion
fibre conversion processes
filament winding
forging
forming
heat treatment
injection moulding
isostatic processing
joints/joining
knitting
lay-up(manual/automated)
liquid metal infiltration
machining
melt-spinning
moulding compounds
powder processing
preform
prepreg
pultrusion
recycling
resin film infiltration(RFI)
resin flow
resin transfer moulding (RTM)
sintering
slip casting
stitching
surface treatments
tape
thermal analysis
thermoplastic resin
thermosetting resin
tooling
tow
weaving

(from *Composites Part A*)