复 合 材 料 学 报　　第24 卷　第4 期　8 月　2007 年
Acta Materiae Compositae Sinica　　Vol. 24　No. 4　August　2007

文章编号: 1000-3851(2007)04-0118-05

固化压力对一种纸基摩擦材料摩擦性能的影响

任远春, 李贺军*, 李克智

(西北工业大学 材料学院 C/C 复合材料工程研究中心, 西安 710072)

摘　要: 基于本实验室制备的一种炭纤维增强纸基摩擦材料, 研究了固化压力对材料孔隙率, 动摩擦系数, 静动摩擦系数之比, 摩擦力矩曲线的影响。研究结果表明: 孔隙率随固化压力增加而下降; 动摩擦系数随制动压力的增加均呈下降趋势; 静动摩擦系数比值随制动压力的增加分布趋势较为复杂: 较低的固化压力条件下, 静动摩擦系数之比略有上升, 而较高的固化压力条件下静动摩擦系数之比则略有下降趋势; 摩擦力矩曲线随固化压力升高有轻微翘曲出现。综合考虑固化压力对动摩擦系数、静动摩擦系数比值以及摩擦力矩曲线的影响, 在这种纸基摩擦材料成分不变的条件下, 其对应较为合适的固化压力约为3.4 MPa。

关键词: 炭纤维; 纸基摩擦材料; 固化压力; 动摩擦系数; 静动摩擦系数之比

中图分类号: TB332　　**文献标识码:** A

Influence of curing pressure on the friction performance of a kind of paper based friction material

REN Yuanchun, LI Hejun*, LI Kezhi

(Research Center of C/C Composites, School of Materials Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the carbon fiber reinforced paper type friction material prepared by our laboratory, the influences of curing pressure on the friction materials, including porosity, dynamic friction coefficient, static/dynamic friction coefficient ratio and friction torque, were studied. The results show that the porosities of samples decrease with the increasing curing pressure; dynamic friction coefficients of samples decrease at different curing pressures with increasing the braking pressure, while the influence on the static/dynamic coefficient ratios is somewhat complex: with increasing the braking pressure, the static/dynamic coefficient ratios of the samples cured at relatively lower pressures tend to rise slightly, as the static/dynamic coefficient ratios of the samples cured at higher pressures tend to decline; there arises a slight cock at the end of the friction torques gradually. 3.4 MPa is the proper curing pressure for the carbon fiber reinforced paper based friction material with fixed component, taking all of the influences shown above into account.

Keywords: carbon fiber; paper based friction materials; curing pressure; dynamic friction coefficient; static/dynamic friction coefficient ratio

纸基摩擦材料是一种新型摩擦材料, 是汽车液力传扭自动变速器中湿式离合器的关键材料。它具有摩擦系数高, 接合平稳柔和, 低噪声, 对偶盘损伤小, 成本低等优点, 现已广泛应用于各种车辆。目前国内使用的汽车离合器摩擦材料多为进口, 为此, 国内学者也为纸基摩擦材料的突破进行了大量的研究工作[1], 发展出以Kevlar 纤维、炭纤维、纤维素纤维, 以及混合纤维增强的多种纸基摩擦材料。

纸基摩擦材料的摩擦性能受许多因素影响, 如使用中施加的压力、速度、温度、润滑液体的性质。材料本身的性质, 如增强纤维、树脂、填料的种类以及其含量、制备工艺参数等都会影响材料最终摩擦性能[2-5]。

摩擦材料制备工艺的关键是热压固化, 固化压力会影响到制备材料的各种性能: 固化压力过低会

收稿日期: 2006-10-08; 收修改稿日期: 2006-12-06
基金项目: 国家杰出青年科学基金(50225210)
通讯作者: 李贺军, 教授, 主要从事炭/炭复合材料和摩擦材料研究　E-mail: lihejun@nwpu.edu.cn

造成材料分层、脱落等不良后果；而固化压力过高，材料会板结，不宜于材料储油散热。但国内外对该方面的研究还未见报道。本文中基于本研究组研制成功的一种炭纤维增强纸基摩擦材料，通过改变固化压力，探讨了孔隙率的变化情况，各制动压力条件下动摩擦系数，静动摩擦系数之比随此参数的变化情况，获得了固化压力对炭纤维增强纸基摩擦材料的影响规律。

1 实 验

1.1 材料制备

纸基摩擦材料制备工艺流程为[1,5,7]：将短切炭纤维、纸浆、填料、摩擦性能调节剂与水混合制浆均匀分散，抄造成型、浸渍树脂并干燥处理后得到纸坯，然后按所需要尺寸机械冲裁制成合适大小，在不同压力条件下热压固化。在大量前期试验的基础上，此材料在固化压力低于1.5 MPa 时，易出现分层等现象；而高于14 MPa 时材料已经板结，材料变脆，不适应于应用需要。因此固化压力范围定于1.5～14 MPa 之间。按固化压力为1.7、3.4、6.8、8.4、10.1、11.8 MPa 所制试样依次记为1#～6#。

1.2 性能测试

本文作者参照GB 13826-92(湿式(非金属)摩擦材料)有关摩擦材料孔隙率的液体渗透测量法进行试样的孔隙率测定。采用QM-1000Ⅱ摩擦实验机(西安顺通机电应用技术研究所生产)进行摩擦性能实验。以施加的压力为主要变化因素，研究相同组分、不同固化压力条件下，摩擦材料的摩擦系数、力矩曲线的变化。试验前先在主轴转速950 r/min，压力约0.3 MPa 条件下反复磨合，使摩擦面与对偶盘贴合程度达到80%以上。在制动压力分别0.25、0.5、0.75、1.0、1.25、1.5、1.75、2.0 MPa 条件下，对各试样进行测试。测试条件：32# 机油润滑，供油量为100 mL/min。油箱温度30～40 ℃。摩擦方式为环-环惯量摩擦；试样尺寸为 Φ = 128 mm，Φ= 113 mm，油槽数52，宽1.5 mm，深0.1 mm。试验前放入N32# 机油中浸泡24 h 以上；对偶盘为45# 钢，硬度HRC 35；主轴惯量0.1 kg·m^2，动摩擦测试转速2000 r/min，静摩擦测试转速150 r/min。一个制动循环的制动时间为0.6～0.8 s，延时间隔30 s。

2 结果与讨论

2.1 试样孔隙率

试样的孔隙率测定结果如下：1# 试样为58.1%，2# 试样为45.3%，3# 试样为38.5%，4# 试样为30.3%，5# 试样为26.7%，6# 试样为24.4%。图1 为孔隙率和固化压力关系的柱状图。由图1 可见，随固化压力增加，材料的孔隙率逐渐下降，而且在固化压力较低时，孔隙率下降较多。1# 试样孔隙率为58%左右，而2# 则下降为45%左右，此时固化压力增加1.7 MPa；而固化压力达到较高水平时，在相同的固化压力增值条件下，孔隙率由5# 试样的27%左右降为6# 试样的24%左右，孔隙率变化远小于固化压力较低时。可见固化压力对此种材料孔隙率的影响随固化压力增加逐渐变小。图2 为6# 和1# 试样表面形貌的扫描电镜照片。由图2 可以看出，具有最高固化压力的6# 试样更为致密，而固化压力最低的1# 试样具有更多的孔隙，因而较为疏松。

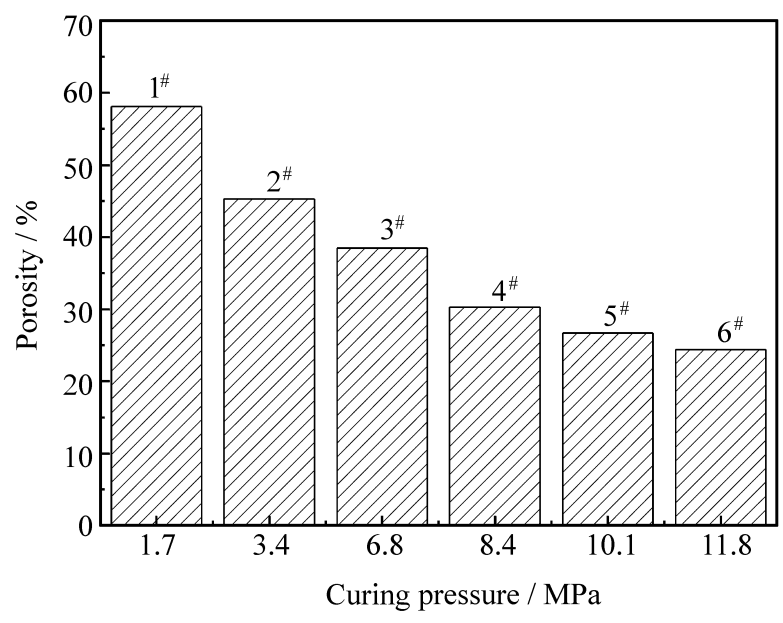
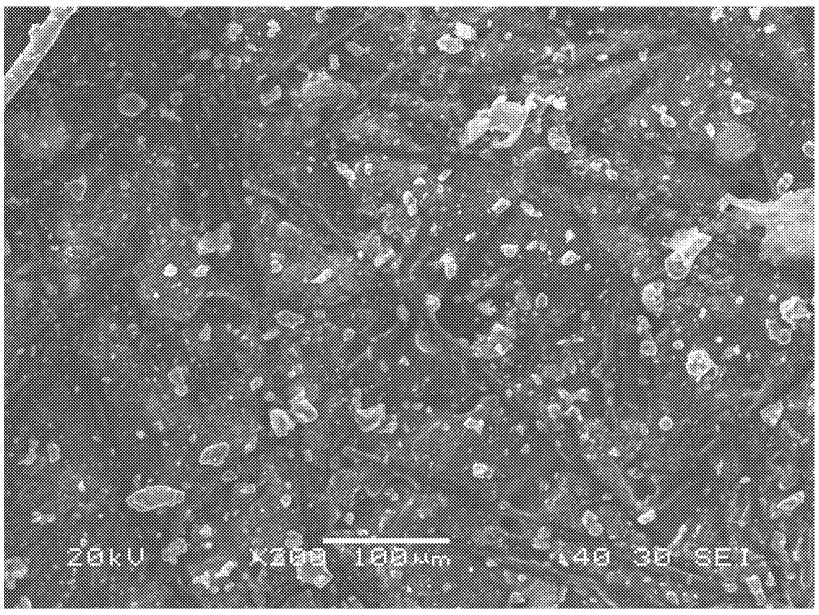


图1 不同固化压力炭纤维增强纸基摩擦材料的孔隙率

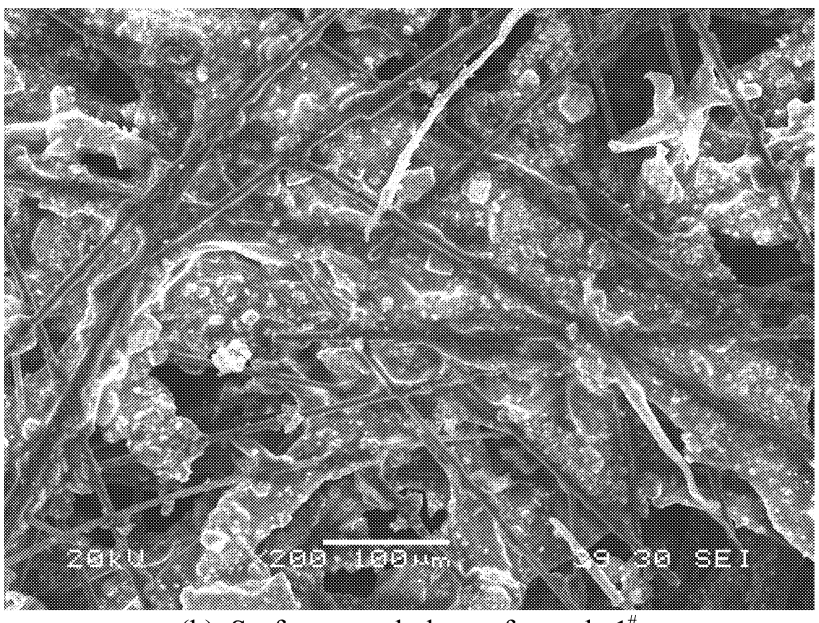
Fig.1 Porosities of carbon fiber reinforced paper based friction material at different curing pressures

2.2 动摩擦系数及摩擦力矩曲线

对不同固化压力制备的纸基摩擦材料试样进行定速2000 r/min 的测试，所得各制动压力条件下的动摩擦系数分布如图3 所示。可见，制动压力较小时，随着固化压力的增加，动摩擦系数呈减小的趋势：在制动压力为0.25 MPa 到1.0 MPa 之间时，由于施加于摩擦副的正压力相对较小，因而动摩擦系数变化较大，但仍然具有一般的趋势。其中6# 试样的动摩擦系数最低，而1# 试样最高。制动压力继续增加，试样动摩擦系数高低的排列次序有所



(a) Surface morphology of sample 6#



(b) Surface morphology of sample 1#

图2　6# 和1# 试样表面形貌扫描电镜照片

Fig.2　SEM of surface morphology of the samples 6# and 1#

变动：固化压力最低的1# 试样不再具有最高的动摩擦系数分布，次序逐渐降低；制动压力达到2 0 MPa 时，1# 试样动摩擦系数变为最低。由该曲线图看出，所制备的摩擦材料在各制备压力下，具有接近粉末冶金湿式摩擦材料以及某天然纤维增强纸基摩擦材料的一般规律[6,7]，即随着制动压力增大，摩擦系数降低，并且降低速度在制动压力增加到某一水平后减缓。

在一般情况下，随着固化压力的增加，纸基摩擦材料的密度增加。由于纸基摩擦材料是多孔结构，其中的孔隙是纤维和树脂以及填料复合组成的孔壁分隔而成[8]。摩擦材料受压时，也主要是这些孔壁受力弯曲变形的过程。密度较低的摩擦材料孔隙率高，如1# 试样孔隙率为58 %，其形成的孔壁结构相对较薄，承载力较低，相同压力水平下，压缩变形量相对较高。随着固化压力增加，孔隙率减少，6# 试样孔隙率降为约24 %，孔壁结构变厚，承载力增加，压缩率则相对减小。而高孔隙率、高压缩率与相对较高的摩擦系数对应[2,9]。载荷水平较小时，固化压力较低的纸基摩擦材料由于较为疏松，孔隙率相对较高，接触面上的油膜更易于渗入摩擦材料内部，可以相对更有效地增加边界摩擦，从而使摩擦系数相对较高[9,10]；固化压力较高的试样则相反，由于孔隙率较低，压缩模量较大，摩擦系数相对较低[11]。

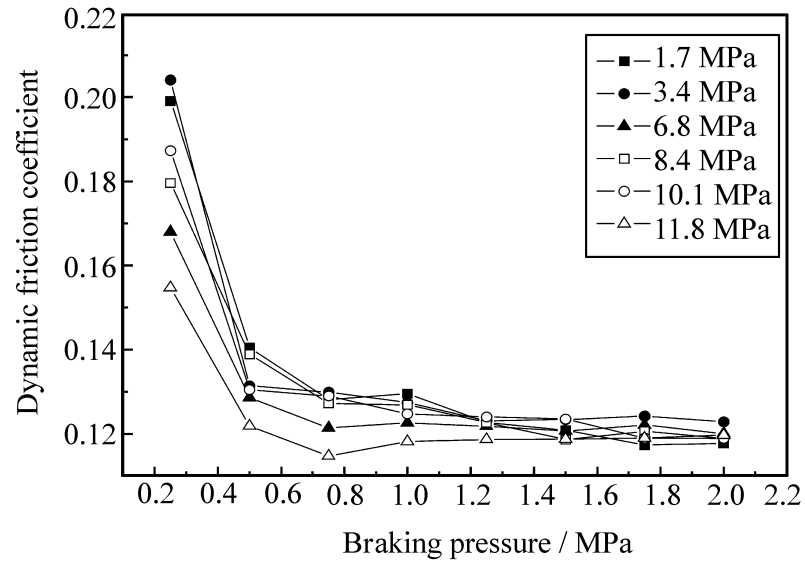


图3　不同固化压力炭纤维增强纸基摩擦材料动摩擦系数与制动压力关系图

Fig.3　Relationships of dynamic friction coefficient and braking pressure of carbon fiber reinforced paper based friction material at different curing pressures

随着载荷增加，高固化压力所得摩擦材料较为密实，压缩模量较高，当载荷在较大范围内变化时，摩擦系数较为稳定；而较低固化压力情况下，压缩模量相对较低，承载能力较低，当载荷达到一定水平时，造成材料孔壁结构塌陷，从而材料的实际孔隙率变为最低，摩擦系数变化也就较大，从较高的水平降为最低，从而出现了上述实验结果。低载荷加载时纸基摩擦材料主要是孔壁弯曲变形，相当于孔隙在受压时发生屈曲，此阶段材料在较小的载荷下就能发生较大变形，所以材料摩擦系数变化对应为随制动压力增加有较大幅度下降；当载荷继续增加到材料中相对的孔壁开始相互接触时，材料变形阻力增大，同等载荷增幅所造成的变形量减小[8]，这时材料摩擦系数变化幅度也相应减小，如图3 所示，各试样动摩擦系数随制动压力变化趋势为开始较为急剧，随后平缓。

图4 给出各试样制动压力为0. 25 MPa 时的摩擦力矩曲线，其中，1# 和2# 试样，力矩曲线较为平缓，无明显尾部翘曲，是较为理想的摩擦力矩。3# 及其余试样，逐渐有轻微尾部翘曲出现。由曲线还

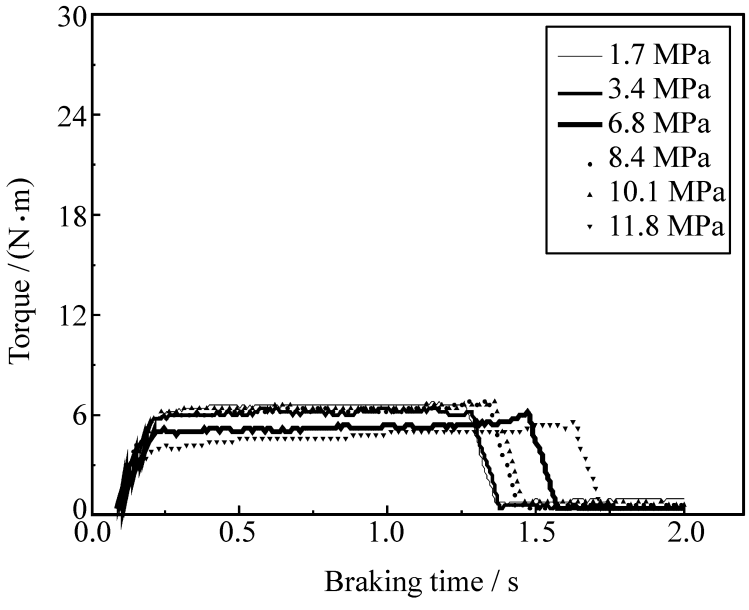


图4 不同固化压力下炭纤维增强纸基摩擦材料在制动压力为0.25 MPa 时的摩擦力矩

Fig.4 Friction torque at braking pressure 0.25 MPa of carbon fiber reinforced paper based friction material at different curing pressures

可以看出, 低固化压力对应的曲线制动时间较短, 而固化压力较高的情况下, 制动时间变长, 见图1。这是由于较低的固化压力所对应的孔隙体积分数较高, 更能有效增加边界摩擦[9,10]。随着固化压力的升高, 各试样的孔隙体积分数相对降低, 从而制动时间相对延长, 力矩曲线出现较明显的翘曲。

2.3 固化压力对静动摩擦系数之比的影响

静动摩擦系数之比是衡量纸基摩擦材料性能的重要指标之一。不同固化压力条件下, 静动摩擦系数之比的趋势与分布如图5 所示。1#、2#、4#、5# 试样对应的静动摩擦系数之比值随制动压力增加呈上升趋势; 3#、6# 试样静动摩擦系数之比值总体呈平稳态趋势, 3# 试样略有下降。在制动压力为0.75 MPa 时各试样均有较大转折。参照上述关于动摩擦系数分布情况的解释, 低固化压力所制得试样的孔隙率变化较大, 动摩擦系数变化也较大, 所以其静动摩擦系数之比值上升幅度较大, 见图5 中对应1# 试样的曲线。而固化压力较高情况下所制得试样的动摩擦系数变化范围都较为有限, 从而总体趋势较为平缓。制动压力约为0.75 MPa 时静动摩擦系数之比发生的转折, 可能是由于摩擦材料压缩变形量发生转折。在达到此压力水平之前, 材料变形对应为孔壁的变形, 之后则是孔壁接触变形阶段, 各试样摩擦系数变化趋势发生相应变化, 形成图中转折。由图中曲线对比可以看出, 2# 试样静动摩擦系数之比值与其它试样相比, 在各压力条件下均较小, 并且变化较为平缓, 因此可以选定其固化压力作为合适的工艺参数。

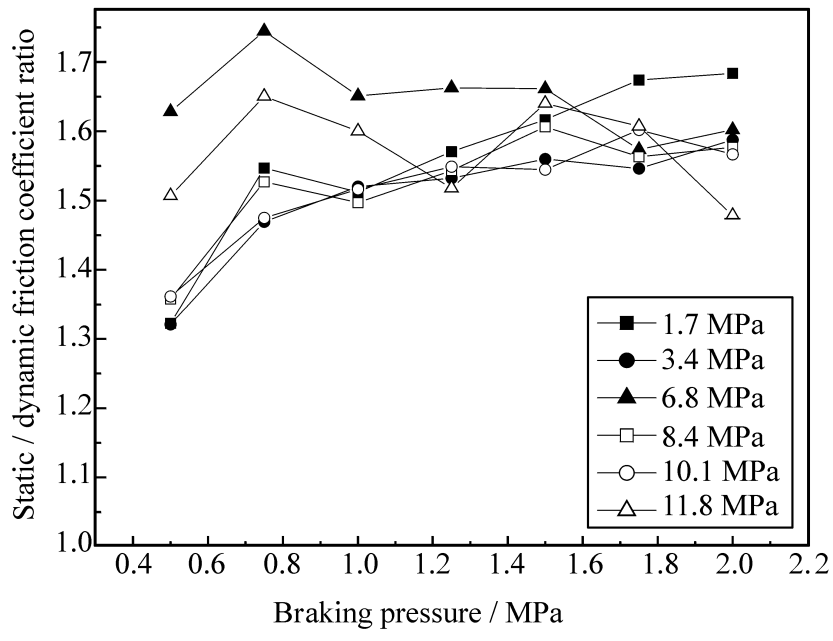


图5 不同固化压力炭纤维增强纸基摩擦材料静动摩擦系数之比- 制动压力曲线

Fig.5 Curves of static/ dynamic friction coefficient ratio and braking pressure of carbon fiber reinforced paper based friction material at different curing pressures

3 结 论

(1) 随固化压力增加, 材料的孔隙率逐渐降低。

(2) 不同固化压力条件下, 动摩擦系数随制动压力增加均呈下降趋势。

(3) 静动摩擦系数之比值随制动压力分布趋势较为复杂, 其中较低的固化压力对应静动摩擦系数之比略有上升, 而较高的固化压力对应的静动摩擦系数之比则略有下降趋势。

(4) 摩擦力矩曲线随固化压力升高, 逐渐出现轻微尾部翘曲。

(5) 综合考虑较为合适的动摩擦系数, 较为平缓的力矩曲线, 合适的静动摩擦系数之比值, 此组分条件下较为理想的固化压力约为3.4 MPa。

参考文献:

[1] 付业伟, 李贺军, 李克智, 等. 一种新型短切炭纤维增强纸基摩擦材料研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(6): 802-805.
Fu Yewei, Li Hejun, Li Kezhi, et al. Study on the preparation and properties of paper-based friction material reinforced by carbon fiber [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(6): 802-805.

[2] Matsumoto Takayki, Ohuma Majime, Kuse T. 纸基摩擦材料和摩擦盘的应用研究[J]. 传动技术, 1998(2): 16-23.
Matsumoto Takayki, Ohuma Majime, Kuse T. Research of a

paper-based friction material and paper friction plate for application [J]. Drive System Technique, 1998(2): 16-23.

[3] Scott W, Suntiwattana P. Effect of oil additives on the performance of a wet friction clutch material [J]. Wear, 1995, 181/183(2): 850-855.

[4] Ost W, de Baets P, Degrieck J. The tribological behaviour of paper friction plates for wet clutch application investigated on SAE#II and pin-on-disk test rigs [J]. Wear, 2001, 249(5/6): 361-371.

[5] 付业伟, 李贺军, 李克智, 等. 炭纤维对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2004, 24(6): 555-558.
Fu Yewei, Li Hejun, Li Kezhi, et al. Effect of carbon fiber on the friction and wear behavior of paper-based friction material [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 24(6): 555-558.

[6] 曲在纲, 黄月初. 粉末冶金摩擦材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 9-23.

[7] 付业伟, 李贺军, 李爱军, 等. 一种纸基摩擦材料的摩擦特性[J]. 复合材料学报, 2005, 22(2): 78-82.
Fu Yewei, Li Hejun, Li Aijun, et al. Friction performance of paper-based friction material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(2): 78-82.

[8] 邓海金, 李雪芹, 任 钢, 李 明. 纸基摩擦材料纤维、树脂含量和孔隙率对压缩回弹性能的影响[J]. 理化检验——物理分册, 2005, 41(2): 55-60.
Deng Haijin, Li Xueqin, Ren Gang, Li Ming. Influence of contents of fiber and resin, and porosity of paper-based friction materials on the compressive and resilient properties [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2005, 41(2): 55-60.

[9] Matsumoto Takayuki. The influence of paper-based friction material porosity on the performance of a wet clutch [J]. SAE Transactions: Journal of Passengers Cars, 1994, 103: 1445-1456.

[10] atsumoto Takayuki. Influence of paper-based friction material visco-elasticity on the performance of a wet clutch [J]. SAE Transactions: Journal of Passengers Cars, 1997, 106: 1819-1827.

[11] ivazaki Tomovuki, Matsumoto Takayuki. Effect of visco-elastic property on friction characteristics of paper-based friction materials for oil immersed clutches [J]. Journal of Tribology, 1998, 120: 393-398.