

文章编号: 1000-324X(2007)06-1159-06

孔隙率对碳纤维增强纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响

李贺军, 费 杰, 齐乐华, 付业伟, 李新涛, 王鹏云

(西北工业大学 超高温复合材料国防重点实验室 碳 / 碳复合材料工程技术研究中心, 西安 710072)

摘 要: 碳纤维增强纸基摩擦材料是应用于汽车自动变速器中的一种新型湿式摩擦材料。在固定原材料配比和含量的基础上, 通过改变摩擦材料厚度, 制备出几种孔隙率不同的碳纤维增强纸基摩擦材料。采用液体渗透法测试摩擦材料的孔隙率。利用扫描电镜观察试样形貌。通过惯量试验机研究孔隙率对碳纤维增强纸基摩擦材料湿态摩擦磨损性能的影响。试验结果表明: 短切碳纤维在树脂基体中均匀分散, 相互桥接, 形成了大小不一的贯穿性孔隙; 随着孔隙率的增大, 摩擦力矩曲线趋于平稳; 动摩擦系数升高, 静摩擦系数降低, 磨损率增大。

关 键 词: 纸基摩擦材料; 碳纤维增强; 孔隙率; 摩擦磨损性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Effect of Porosity Percentage on the Friction and Wear Performance of Carbon Fiber Reinforced Paper-based Friction Materials

LI He-Jun, FEI Jie, QI Le-Hua, FU Ye-Wei, LI Xin-Tao, WANG Peng-Yun

(C/C Composite Research Center, The Key Laboratory of Ultrahigh Temperature Composites, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Paper-based friction material reinforced by carbon fiber is a new type wet friction material for automobile transmission. Based on the same percentage of components, paper-based friction materials reinforced by carbon fiber with different porosity percentage were prepared by changing the thickness of friction materials. The porosity percentage of materials was obtained by a liquid permeation method. The surfaces of samples were analyzed by using scanning electronic microscope (SEM). The effects of porosity percentage on wet friction performance were investigated by using an inertia friction tester machine. Experiment results show that short carbon fiber is dispersed in resin matrix uniformly, as a result, pores with different sizes are formed in this way. With the increase of porosity percentage, the shape of friction torque curves becomes flat, and the dynamic friction coefficient tends to increase in the procession, but the trend of static friction coefficient is reversed, the wear rate is trending up.

Key words: paper-based friction material; carbon fiber reinforced; porosity percentage; friction and wear performance

1 引言

纸基摩擦材料是一种在润滑油中工作的多孔性材料^[1]。孔隙率和孔隙结构一方面影响摩擦材料的导热效率, 对摩擦材料的热疲劳和热磨损产生影响。另一方面影响着摩擦副的瞬时结合过程和摩擦

面的润滑状态, 进而影响摩擦力矩曲线的变化趋势和摩擦系数大小及其稳定性^[2]。因此孔隙率是纸基摩擦材料的一项重要性能指标。

从应用角度看, 随着机动车辆向高速、重载方向发展, 对自动变速器离合器用纸基摩擦材料的性能要求越来越高。而增强纤维对纸基摩擦材料的综

收稿日期: 2006-11-19, 收到修改稿日期: 2006-12-26

作者简介: 李贺军 (1957-), 男, 博士, 教授。 E-mail: lihejun@nwpu.edu.cn

合性能有着重要影响^[3,4],在经历了纤维素纤维、石棉纤维增强的初级发展阶段后,于90年代后期逐渐向碳纤维、Kevlar纤维等高性能纤维增强过渡.与其他增强纤维相比,碳纤维具有摩擦系数稳定,自润滑性能优良,耐磨性高,机械强度高,化学稳定性良好等突出优点^[5,6],是新一代纸基摩擦材料的理想增强纤维.碳纤维增强纸基摩擦材料是能够满足苛刻工况条件的新型湿式摩擦材料,具有较强的实际应用价值.

目前有关碳纤维增强纸基摩擦材料的摩擦学设计和性能研究已经见诸于文献报道^[3,4,7],而有关孔隙率对碳纤维增强纸基摩擦材料影响规律的研究较少.基于以上分析,本工作以某自动变速箱离合器片为应用背景,采用碳纤维作为增强纤维,在固定材料配比和含量的基础上,通过改变摩擦材料厚度制备出几种孔隙率不同的碳纤维增强纸基摩擦材料,研究了孔隙率对其湿态摩擦磨损性能的影响规律.试验结果将有助于碳纤维增强纸基摩擦材料的设计.

2 实验

2.1 原材料和样品制备

增强纤维: PAN基短切碳纤维,长度3~8mm,直径5~8 μm ;摩擦性能调节剂: 石墨, 200目; 三氧化二铝, 325目; 填料: 高岭土, 1250目; 硫酸钡, 1250目; 粘接剂: 改性酚醛树脂, 200目; 溶剂: 分析纯无水乙醇等.

将短切碳纤维、摩擦性能调节剂、填料和水等按一定比例混合制备出分散均匀的摩擦材料浆液,采用摩擦材料预制体成型器得到摩擦材料预制体,然后烘干,浸渍改性酚醛树脂乙醇溶液.在保证热压温度和时间相同的条件下,在硫化机上成型出厚度不同的摩擦材料样品,参数如表1所示.

表1 纸基摩擦材料的性能

Table 1 Properties of the paper-based friction material

	Thickness/mm	Density/g·cm ⁻³	Porosity/%
a	0.8	1.14	31.5
b	1.1	0.84	46.4
c	1.4	0.65	61.9
d	2.0	0.46	70.9

2.2 试验方法

根据GB/T13826-92[湿式(非金属)摩擦材料]的

要求,采用液体渗透法测量样品的孔隙率.试验结果为3次测量的平均值.

采用日本电子JSM6460型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面形貌.

将摩擦材料冲裁成外径为125.0mm,内径为100.0mm的圆环,固定于试验机摩擦盘上,机加工出宽度为1.0mm的径向式油槽20个,以利于供油和散热.试验前,在N32#机械油中浸泡24h,使摩擦材料充满油液.

摩擦试验机为QM1000-II B型湿式摩擦磨损试验机.试验机主要性能指标:最高转速4000r/min,最大加载压力2.0MPa,摩擦方式为环-环接触,可模拟实际工况条件;对偶盘为45#钢,表面粗糙度0.8 μm ,硬度35HRC;润滑油为N32#机油,温度为75~85 $^{\circ}\text{C}$,油量为90mL/min.根据GB/T13826-92要求,试验前,先在压力<0.5MPa条件下磨合30min左右,使摩擦面与对偶盘贴合程度达到80%以上,以使摩擦系数达到稳定值.通过计算机软件设置摩擦条件(转速、压力),得到力矩曲线、摩擦系数和磨损率等参数.

在压力为0.25MPa、主轴转速为950r/min的条件下,获得样品的滑磨温升曲线.

动摩擦系数: 在主轴惯量0.10kg·m²、制动初速度2000r/min和一定制动比压下测量.

静摩擦系数: 启动电机使主轴转速达到150r/min后关闭电动机,同时施加压力使主轴转速降低至0并延时30s后,拖动主轴使其打滑测量.

摩擦系数由公式(1)计算得到,试验结果为3次测量平均值.

$$\mu = \frac{M}{P \cdot R_{cp}} \quad (1)$$

式中: μ 为摩擦系数, M 为摩擦力矩(N·cm), P 为法向载荷(N), R_{cp} 为试样摩擦面有效半径(cm).

磨损率: 在主轴惯量0.15kg·m²、制动速度2000r/min、制动压力为1.0MPa下,经过500次制动,测量试样制动前后厚度变化,由公式(2)计算而得.

$$\nu = \frac{A \cdot \Delta h \cdot I_0 \cdot \omega}{2n} \quad (2)$$

式中 ν 为磨损率(cm³/J), A 为试样表观接触面积(cm²), Δh 为磨损试验前后的摩擦盘或对偶盘厚度差(cm), n 为制动次数, I_0 为试验机总惯量,为试验机主轴惯量和试验机配置惯量之和(kg·m²), ω

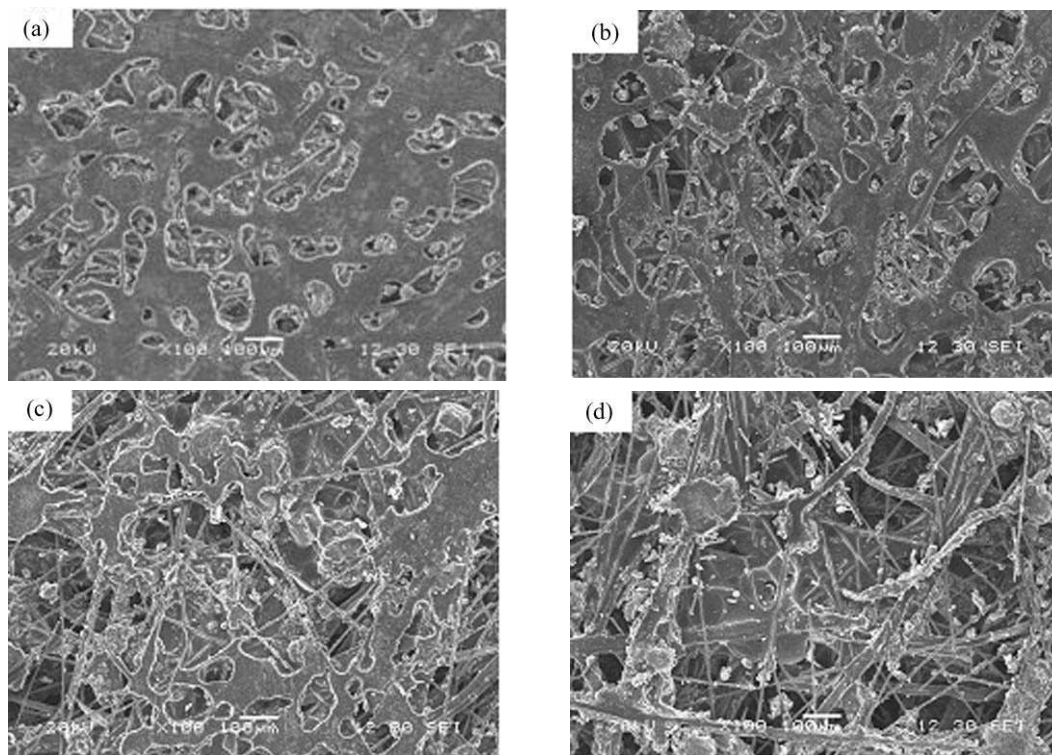


图 1 不同孔隙率试样的表面形貌 SEM 照片

Fig. 1 SEM micrographs of samples with different porosity percentage

(a) 31.5%; (b) 46.4%; (c) 61.9%; (d) 70.9%

为试验机主轴的角速度 (rad/s).

3 结果和讨论

3.1 不同孔隙率试样的表面形貌

图 1 为不同孔隙率试样的表面形貌的 SEM 照片. 可以看出: 摩擦性能调节剂和填料颗粒均匀分散于树脂中, 没有结团、偏聚等不良现象, 树脂黏附于增强纤维表面. 增强纤维分散均匀, 相互桥接, 形成了大小不一的贯通性孔隙. 这种多孔性结构可以使摩擦过程中产生的热量及时被润滑油带走, 减少摩擦表面的热量累积, 有效抑制可能出现的热磨损.

3.2 孔隙率对滑磨过程的影响

自动变速器在工作过程中, 当离合器接合时, 主、副摩擦片要经历从转速不等到转速一致的滑磨过程. 离合器频繁的接合和滑磨, 导致摩擦片表面温度升高, 如果热量不能及时被润滑油带走, 将引起摩擦表面的温度过高, 加剧摩擦片磨损. 因此要求摩擦材料具有良好的耐热性和导热性, 这样才能提高离合器的使用寿命, 减少检修和更换次数. 试验考察了制动压力在 0.25MPa 下, 滑磨过程中不同试样的温升曲线, 如图 2 所示. 可以看出,

当孔隙率较小时, 摩擦面温升较小; 随着孔隙率的增大, 温升增大, 引起热磨损的可能性增大, 加剧摩擦片的磨损. 其原因与摩擦副表面润滑状态有关. 滑磨过程中, 当孔隙率较大时, 润滑油膜容易减薄, 粗糙峰的机械接触较多, 导致摩擦副表面温度升高较快.

3.3 孔隙率对摩擦力矩曲线的影响

摩擦力矩曲线是摩擦副瞬时制动过程力矩变化趋势的表征, 是瞬时制动稳定性的重要标志. 在主轴惯量 $0.10\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、主轴转速 2000r/min 和制动

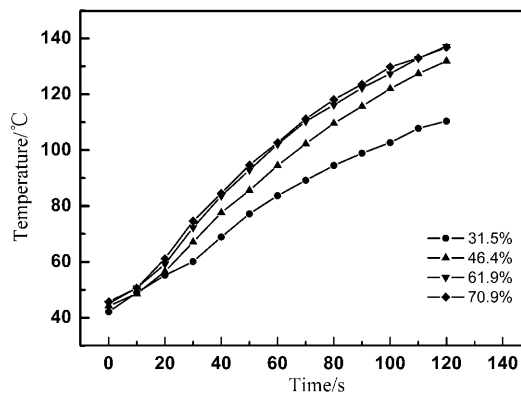


图 2 摩擦副温度随滑磨时间的变化曲线

Fig. 2 Curves of surface temperature as a function of slipping stage time

压力 0.5MPa 条件下,研究了试样孔隙率对摩擦力矩曲线的影响,结果如图 3 所示.可以看出:随着纸基摩擦材料孔隙率的增大,制动时间从图 3(a) 的 0.75s 减少为图 3(d) 的 0.65s,降低了 15% 左右.摩擦力矩曲线波动程度变小,曲线中间部分趋于平直,曲线尾部翘起幅度减小.表明随着孔隙率的增大,摩擦制动过程更加平稳,引起摩擦振颤或摩擦噪音的可能性减小.这是由于随着孔隙率的增大,润滑油更容易渗透到摩擦材料中.摩擦制动过程中处于混合润滑状态的区域增大,处于油膜润滑状态的区域减小^[8].

3.4 孔隙率对摩擦系数的影响

3.4.1 动摩擦系数

动摩擦系数是表征湿式摩擦材料传扭能力或制动效率的重要指标之一,它受主轴转速和制动压力的影响.在主轴转速为 2000r/min,不同制动压力下,研究了动摩擦系数与孔隙率之间的关系,结果如图 4 所示.可以看出:制动压力为 0.5MPa 时,当孔隙率从 31.5% 增至 70.9% 时,动摩擦系数从 0.1258 增至 0.1448,增幅为 15.1%;而制动压力为 1.0MPa 时,动摩擦系数从 0.1222 增至 0.1345,增幅为 10.1%;表明在不同制动压力下,动摩擦系数随

着孔隙率的增大都逐渐升高,而在较高制动压力下,动摩擦系数的增幅明显减小,即随着制动压力的增大,孔隙率对动摩擦系数的影响减弱.

制动初期主轴转速很高,润滑油的物理化学吸附膜是主要载体;接触表面主要处于油膜润滑状态.随着制动过程的进行,润滑油膜减薄,出现润滑油膜和微凸体共存的混合润滑状态,载荷由两者共同承担;到了制动过程的最后阶段,主轴转速很低,润滑油膜较薄,主要有摩擦面的微凸体接触来承受载荷.动摩擦系数表征摩擦材料处于混合润滑状态时的摩擦特性.当孔隙率较大时,材料孔隙较多,制动过程中,润滑油膜较容易减薄,微凸体之间接触的几率增大,啮合程度增大,因此克服这种机械作用的摩擦力矩增大,导致动摩擦系数增大.而在制动压力较大的条件下,制动时间从 0.75s(0.5MPa) 减小到 0.5s(1.0MPa),整个制动过程中摩擦接触面润滑油较多,以油膜润滑为主,故动摩擦系数变化较小.

3.4.2 静摩擦系数

图 5 为静摩擦系数与孔隙率之间的关系曲线.可见,随着孔隙率的增大,静摩擦系数降低.纸基摩擦材料是工作在润滑油中的多孔性材料,材料

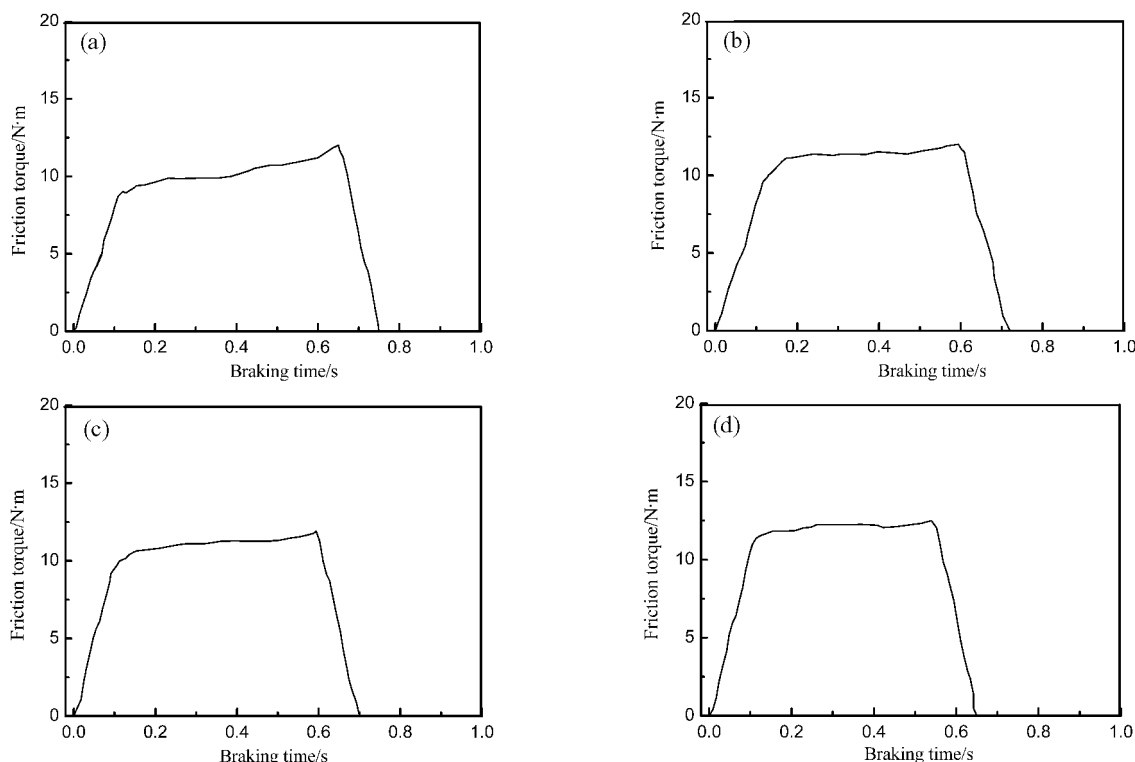


图 3 不同孔隙率试样的摩擦力矩曲线

Fig. 3 Friction torque curves of samples with different porosity percentage

(a) 31.5%; (b) 46.4%; (c) 61.9%; (d) 70.9%

孔隙可以吸收润滑油, 使摩擦材料保持一种浸油状态. 当纸基摩擦材料与对偶盘接合时因受压变形, 材料内部的润滑油被挤至表面形成润滑油膜. 静摩擦系数是由摩擦副从静止到转动过程中所施加的力矩来决定的. 孔隙率的提高导致制动静止后从材料内部挤出的润滑油较多, 摩擦副更容易打滑, 因此所需施加的力矩较小, 相应地使静摩擦系数降低.

3.5 孔隙率对磨损率的影响

图 6 是在主轴惯量为 $0.15\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、主轴转速 $2000\text{r}/\text{min}$ 和制动压力 1.0MPa 条件下, 连续 500 次模拟制动的体积磨损率试验结果. 可以看出, 随着孔隙率的增大, 摩擦材料的磨损率增大. 纸基摩擦材料是由增强纤维、摩擦性能调节剂、填料和树脂组成的复合材料, 它主要依靠树脂、金属颗粒等黏附在增强纤维上抵抗对偶盘的压缩、剪切等应力. 孔隙率较大的摩擦材料, 内部较为疏松, 各个相的结合不够紧密, 导致材料的硬度和机械强

度降低. 在对偶盘反复磨削下, 孔隙附近易产生裂纹, 进而破坏树脂、金属颗粒与纤维的结合, 导致树脂、金属颗粒脱落, 在表面形成磨粒, 磨削摩擦表面, 使磨损程度进一步加剧. 因此随着孔隙率的增大, 材料的磨损率增大. 图 7 为摩擦材料主轴惯量 $0.10\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 、制动速度 $2000\text{r}/\text{min}$ 、制动压力为 1MPa 下连续 500 次模拟制动循环过程的动摩擦系数变化情况. 可见: 整个制动过程中, 孔隙率较高的摩擦材料动摩擦系数较大, 这与前面的讨论是一致的. 摩擦系数随着制动次数的增加出现先略微减小而后增大的趋势. 其原因与摩擦循环过程中温度的变化有关. 在 $0\sim 60$ 次左右, 摩擦表面温度从 45°C 升高到 70°C , 导致动摩擦系数降低^[9,10]. 而随着制动过程的进行, 表面温度趋于稳定 (80°C 左右). 经过若干次制动, 摩擦表面的磨屑 (填料、对偶盘磨粒) 逐渐累积, 同时实际接触面积增大, 因此动摩擦系数略有增大.

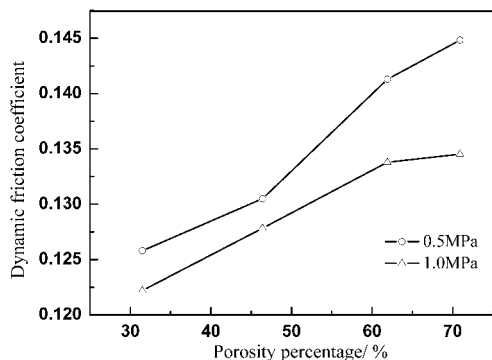


图 4 动摩擦系数与试样孔隙率的关系曲线

Fig. 4 Dynamic friction coefficient as a function of porosity percentage

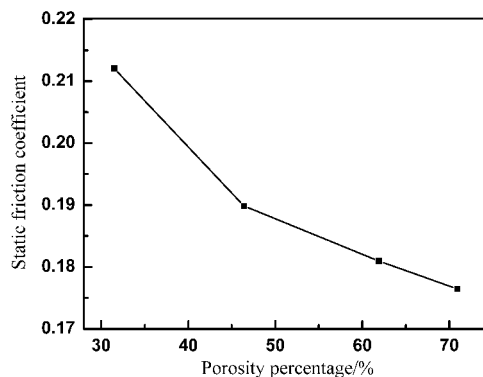


图 5 静摩擦系数与试样孔隙率的关系曲线

Fig. 5 Static friction coefficient as a function of porosity percentage

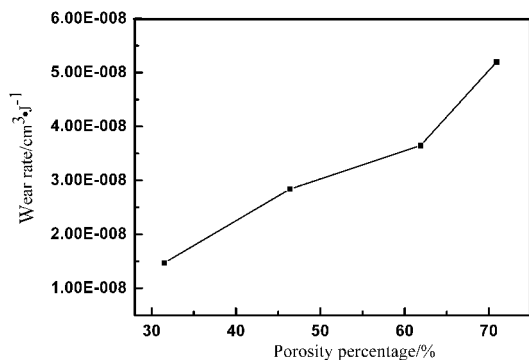


图 6 不同孔隙率试样的磨损率

Fig. 6 Wear rate of samples with different porosity percentage

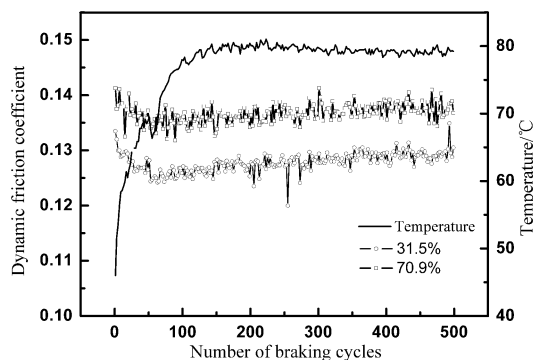


图 7 动摩擦系数随制动循环次数的变化趋势

Fig. 7 Dynamic friction coefficient as a function of braking cycles

4 结论

1. 在碳纤维增强纸基摩擦材料中, 短切碳纤维分散均匀, 相互桥接, 形成了大小不一的贯通性孔隙, 使摩擦过程中产生的摩擦热及时被润滑油带走, 减少摩擦表面的热量累积, 改善了摩擦材料的摩擦磨损性能.

2. 孔隙率的增大使摩擦力矩曲线趋于平直, 摩擦制动过程更加稳定, 产生摩擦振颤和摩擦噪音的可能性减小.

3. 随着孔隙率的增大, 动摩擦系数增大, 静摩擦系数减小, 磨损率增大. 在较高制动压力下, 孔隙率对动摩擦系数的影响减弱.

参考文献

- [1] Yang Y B, Lam R C. *SAE Technical Paper*, 1998, **981097**: 1625–1635.
- [2] Satoshi O, Takashi K, Nobuyuki K, *et al.* *SAE Technical Paper*, 1991, **911775**: 1–11.
- [3] 付业伟, 李贺军, 李克智, 等. 摩擦学学报, 2004, **24** (6): 555–559.
- [4] Gao H, Barker G. *Tribology Transaction*, 2002, **45** (4): 464–470.
- [5] Andrew K, Dagobert W. *SAE Technical Paper*, 1997, **972754**: 29–48.
- [6] 戴红莲, 李世普, 贺建华, 等 (DAI Hong-Lian, *et al.*). 无机材料学报 (*Journal of Inorganic Materials*), 2004, **19** (5): 1025–1030.
- [7] 李贺军, 付业伟, 李克智, 等. 碳纤维增强纸基摩擦材料及其制备方法, 中国发明专利, 公开号: 1446875, 2003.10
- [8] Miyazaki T, Mastumoto T. *Journal of Tribology*, 1998, **120**: 393–398.
- [9] 付业伟, 李贺军, 费杰, 等. 摩擦学学报, 2005, **25** (6): 583–587.
- [10] Davis C L, Sadeghi F, Krousgrill C M. *Journal of tribology*, 2000, **122**: 110–118.