

石墨粒度对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响

张翔, 李克智, 李贺军, 付业伟, 费杰, 李海亮

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘要: 采用湿法工艺制备了 4 种不同石墨粒度的纸基摩擦材料, 利用惯量摩擦试验机研究了石墨粒度对摩擦力矩曲线和动、静摩擦系数及磨损率的影响; 并对不同压力和转速条件下动摩擦系数的变化趋势进行了研究. 利用扫描电子显微镜观察了磨损后纸基摩擦材料的表面形貌. 研究表明: 随着石墨粒度的减小, 制动时间增加, 摩擦力矩曲线中间部分趋于平直; 动、静摩擦系数减小, 磨损率降低. 同时, 动摩擦系数随着制动压力和转速的增加而减小. 循环制动过程中, 石墨粒度较小的试样制动稳定性较好. 随着石墨粒度的减小, 摩擦表面形成了润滑性能良好的固体润滑膜, 有利于提高材料的耐磨性能.

关键词: 纸基摩擦材料; 石墨粒度; 摩擦磨损性能
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Effect of Graphite Particle Size on Friction and Wear Performance of Paper-based Friction Material

ZHANG Xiang, LI Ke-Zhi, LI He-Jun, FU Ye-Wei, FEI Jie, LI Hai-Liang

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Paper-based friction materials containing four different graphite particle sizes were prepared using the wet paper-making process. The effects of graphite particle size on friction performance such as friction torque curves, dynamic friction coefficient, static friction coefficient and wear rate were studied by using an inertia friction tester. Meanwhile, the sensitivity of friction coefficient to braking pressure and rotating speed was also investigated. Worn surfaces of samples were analyzed by using scanning electron microscope. The results show that with graphite particle size decreasing, braking time increases and torque curves become more stable, while friction coefficient and wear rate decrease. The dynamic friction coefficient declines as braking pressure and rotating speed increase. Samples with proper particle size exhibit more stable friction coefficient in the continuous braking process. Lubricating film is formed to lower wear rate in the worn surface as the graphite particles size decreases.

Key words: paper-based friction material; graphite particle size; friction and wear performance

纸基摩擦材料是应用于湿式离合器和制动器中的一种关键功能材料^[1], 其性能优劣直接影响着传动装置传扭的稳定性及行车的安全性^[2-4]. 纸基摩擦材料是一种多组分复合材料, 通常由十多种原料组成. 从功能上可将原料分为增强体、粘结剂、摩擦性能调节剂和填料四种. 其中摩擦性能调节剂作为纸基摩擦材料的重要组成部分, 对纸基摩擦材料

的摩擦磨损性能、物理力学性能都有重要影响.

石墨作为一种常用的摩擦性能调节剂, 因其具有良好的润滑性能, 广泛应用在各种摩擦材料中^[5-7]. 石墨的种类、含量、形状及粒度等因素影响着摩擦材料的性能^[8], 而粒度是决定其性能的关键因素^[9]. Zhang 等^[10]研究了石墨粒度对一种金属基复合材料磨损性能的影响规律, 结果表明随着石墨粒度的增

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-11-05

基金项目: 凝固技术国家重点实验室(西北工业大学)博士后基金(08-BZ-2010); 陕西省重大科技创新项目(2008ZKC04-07) Research Fund of the State Key Laboratory of Solidification Processing (NWPU)(08-BZ-2010); Shaanxi Grand Technology Innovation Foundation (2008ZKC04-07)

作者简介: 张翔(1982-), 男, 博士研究生. E-mail: zx521com@126.com

通讯作者: 李克智, 教授. E-mail: likezhi@nwpu.edu.cn

大, 复合材料的耐磨性提高; Kolluri 等^[11]研究了天然石墨的粒度对无石棉树脂基摩擦材料摩擦和热性能的影响, 发现石墨粒度较大时, 摩擦系数更加稳定; 而石墨粒度较小时, 材料的热性能较好. 而关于石墨粒度对纸基摩擦材料性能影响的报道较少.

本工作选用不同粒度等级的合成石墨, 采用惯量摩擦试验方法, 研究了石墨粒度对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响规律, 以为纸基摩擦材料的设计提供理论支持.

1 实验方法

1.1 试样制备

试验选用的合成石墨的粒度等级如表 1 所示, 依次标记为 C'1, C'2, C'3, C'4. 图 1 为四种不同粒度石墨的微观形貌图. 试验所用原材料组分及含量如表 2 所示.

采用湿法工艺^[12], 制备出 4 种含有上述石墨的纸基摩擦材料预制体. 然后烘干, 浸渍酚醛树脂溶液, 并在 170℃, 1MPa 的压力下热压固化 10min, 得到试验用摩擦材料试样, 依次标记为 C1, C2, C3, C4. 摩擦材料试样结构示意图如图 2 所示.

1.2 试验方法

采用日本 JSM6460 型扫描电子显微镜观察石墨和试样磨损后的表面形貌.

采用 QM1000-II 型湿式惯量摩擦性能试验机进

表 2 原材料组分及含量
Table 2 Ingredients and content of raw material

Classification	Ingredient	Content/wt%
Reinforced fibers	PAN short carbon fiber	20
	Kevlar fiber	
	Cellulose fiber	
Binder	Cashew-modified phenolic resin	40
Friction modifier	Synthetic graphite	9
Fillers	Alumina	31
	Barium sulphate	
	Calcium carbonate Kaolin	

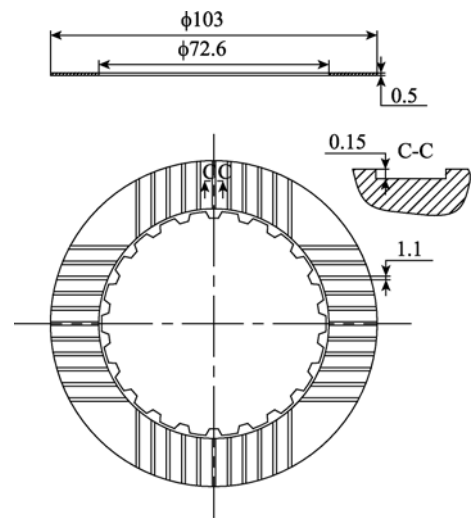


图 2 摩擦材料试样结构示意图
Fig. 2 Diagram of the friction material sample

表 1 石墨粒度等级
Table 1 Characterization of graphite particle size

No.	C'1	C'2	C'3	C'4
Particle size / μm	200 \pm 50	100 \pm 25	65 \pm 5	50 \pm 5

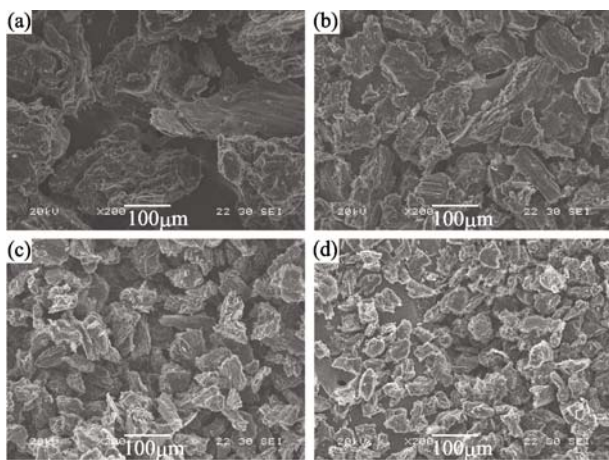


图 1 四种粒度石墨的表面 SEM 照片
Fig. 1 SEM micrographs of graphite with different particle sizes
(a) C'1; (b) C'2; (c) C'3; (d) C'4

行试样的摩擦磨损性能测试. 试验机主要指标和结构示意图如文献[13]所述. 试验前先将试样在 N32# 机油中浸泡 24h, 并在主轴转速为 950r/min, 在 0.5MPa 压力下进行磨合, 以使摩擦面和对偶盘接合程度达到 80%以上. 然后在不同压力和转速条件下对试样进行测试, 主要的测试条件为: 转速为 1000、2000r/min; 压力为 0.5、1.0MPa; 润滑油温度为 80℃; 润滑油流速 100mL/min; 主轴惯量 0.1 kg·m²; 对偶盘材质为 45#钢, 表面粗糙度为 0.8 μm (R_a).

为了定量表征试样在循环制动过程中动摩擦系数的变化情况, 采用稳定系数和波动系数对其进行评价^[13]:

$$\text{稳定系数 } \alpha = \frac{\bar{\mu}}{\mu_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{波动系数 } \gamma = \frac{\mu_{\min}}{\mu_{\max}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, μ_{\max} 为最大动摩擦系数, μ_{\min} 为最小动

摩擦系数, $\bar{\mu}$ 为动摩擦系数的平均值.

式(1)和(2)中, α 和 γ 值越接近 1, 摩擦材料制动过程越平稳, 产生颤动和噪音的可能性越小.

2 结果与讨论

2.1 不同试样的摩擦力矩曲线

纸基摩擦材料在制动过程中经历挤压油膜、混合表面接触和机械接触等三个阶段^[14]. 摩擦力矩曲线反映了三个阶段的转换过程和制动的平稳性. 在主轴惯量 $0.1\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 制动压力 0.5MPa , 制动初速度 $2000\text{r}/\text{min}$ 条件下, 试样的摩擦力矩曲线如图 3 所示. 随着石墨粒度的减小, 摩擦制动时间增加, 从图 3(a) 的 2.8s 左右延长至图 3(d) 的 3.4s 左右, 增加了 20% , 且摩擦力矩值变小, 曲线中间部分更加平直. 这是因为随着石墨粒度的减小, 颗粒数量增多, 表面积增大, 更容易与树脂基体粘结在一起, 分散更加均匀, 能够充分发挥石墨的润滑作用. 在混合表面接触阶段摩擦表面容易形成固体润滑膜, 从而降低摩擦力矩并使制动过程更加平稳.

2.2 不同试样的动摩擦系数

动摩擦系数反映了湿式摩擦材料的传扭能力和制动效率^[12], 其值大小受摩擦材料本身和制动条件(制动压力、转速等)的影响. 图 4 为不同制动压力下动摩擦系数与石墨粒度之间的关系(转速为 $2000\text{r}/\text{min}$), 可以看出: 在制动压力 0.5MPa 下, 当石墨粒度从 $(200\pm 50)\mu\text{m}$ 减至 $(50\pm 5)\mu\text{m}$ 时, 动摩擦系数从 0.133 降到 0.121 , 降低了 9% ; 在制动压力 1.0MPa 下, 动摩擦系数从 0.123 降到了 0.106 , 降低了 14% , 表明在不同压力下随着石墨粒度的减小,

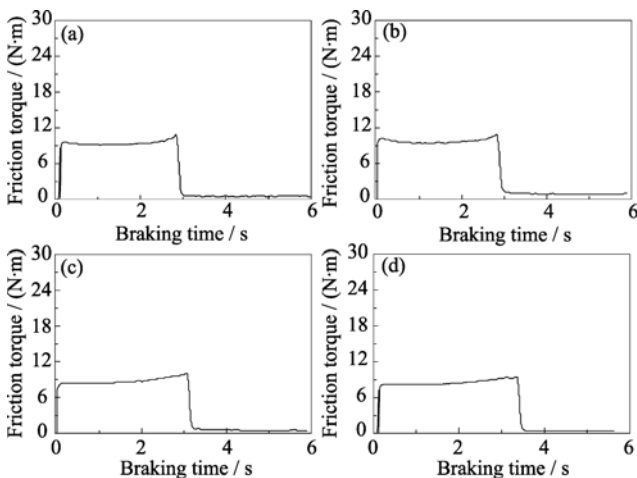


图 3 不同试样的摩擦力矩曲线

Fig. 3 Friction torque curves of different samples
(a) C1; (b) C2; (c) C3; (d) C4

试样的动摩擦系数减小. 这主要是因为同样含量的石墨, 粒度减小, 颗粒数目增多, 能够均匀分散在摩擦材料中, 当摩擦材料与对偶盘结合时, 更容易形成固体润滑膜, 在混合表面接触阶段润滑膜润滑作用增强, 微凸体之间的机械啮合力减小, 降低了动摩擦系数.

同时发现, 随着制动压力的增大, 动摩擦系数减小. 在较大制动压力下, 制动时间减少, 制动过程中摩擦表面润滑油量较多, 油膜润滑起主导作用, 因此动摩擦系数减小.

图 5 为不同转速下动摩擦系数与石墨粒度之间的关系(制动压力 1.0MPa), 由图可知: 当转速为 $1000\text{r}/\text{min}$ 时, 动摩擦系数从 0.131 降到了 0.115 , 降低了 12% ; 当转速为 $2000\text{r}/\text{min}$ 时, 动摩擦系数从 0.123 降到了 0.106 , 降低了 14% , 即在不同转速下随着石墨粒度的减小, 动摩擦系数减小. 同时发现, 随着转速增加, 动摩擦系数减小. 当转速较大时, 制动能量增加, 摩擦表面温度升高, 润滑油粘度降低, 油膜的抗剪切能力降低; 同时温度升高导致树脂软化, 材料表面热衰退程度加剧, 强度降低, 因

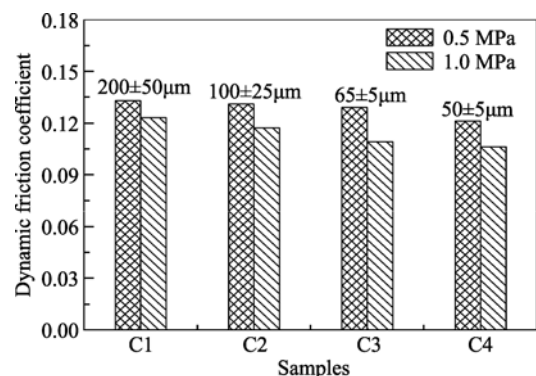


图 4 不同制动压力下动摩擦系数与石墨粒度的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic friction coefficient and graphite particle size under different braking pressures

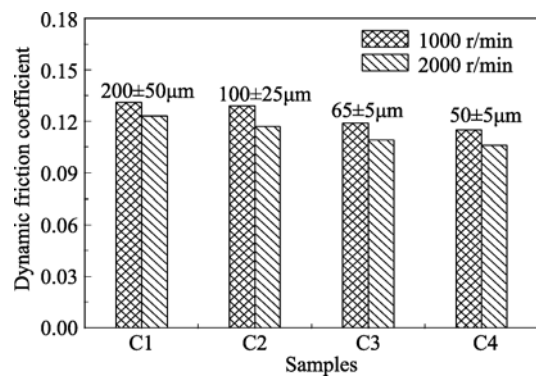


图 5 不同转速下动摩擦系数与石墨粒度的关系

Fig. 5 Relationship between dynamic friction coefficient and graphite particle size under different rotating speeds

此动摩擦系数减小。

2.3 不同试样的静摩擦系数

静摩擦系数是在试验机主轴转速达到 150r/min, 运转 30s 后停机, 同时加载载荷, 拖动主轴使其打滑的过程中测得的。在制动压力 1.0MPa 下, 静摩擦系数与石墨粒度的关系如图 6 所示。可以看出, 当石墨粒度从(200±50)μm 减至(50±5)μm 时, 静摩擦系数从 0.205 降到了 0.184, 即随着石墨粒度的减小, 静摩擦系数降低。这主要是因为随着石墨粒度的减小, 石墨颗粒表面积增大, 在啮合过程中与对偶件相接触的石墨面积增加, 增加了试样与对偶件的实际接触面积, 从而依靠石墨自身的层状结构及润滑油膜有效地降低了静摩擦系数。

2.4 循环制动过程中动摩擦系数的变化

图 7 为摩擦材料在主轴惯量 0.1kg·m², 制动压力 1.0MPa, 转速 2000r/min 条件下, 连续 500 次循环制动过程中动摩擦系数的变化情况。可以看出, 含有较大粒度石墨的摩擦材料具有较高的动摩擦系数, 这与前面所述一致。在前 300 次制动过程中, 动摩擦系数随着制动次数的增加而增加, 随后趋于平稳。这是因为随着制动次数的增加, 摩擦表面粗糙

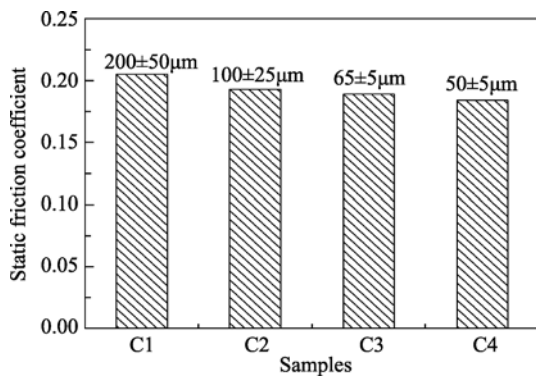


图 6 不同石墨粒度试样的静摩擦系数
Fig. 6 Static friction coefficient of samples with different graphite particle sizes

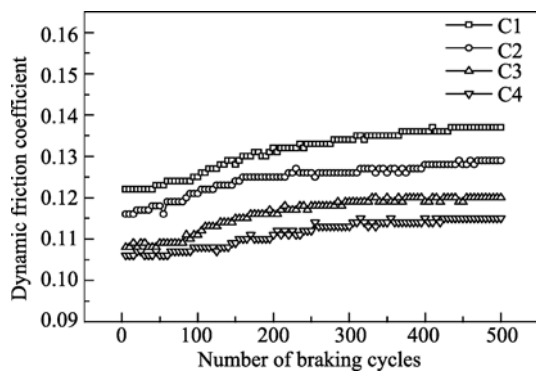


图 7 动摩擦系数随制动次数的变化趋势
Fig. 7 Dependence of dynamic friction coefficient and braking cycles

峰变形程度增加, 新的接触面不断产生, 实际接触面积增大, 因此动摩擦系数增大; 而经过多次往复制动后, 摩擦表面达到动态平衡状态, 摩擦系数趋于平稳。

表 3 为不同摩擦材料试样循环制动过程中动摩擦系数的稳定系数和波动系数。由表可知, 石墨粒度较小时, 摩擦材料的稳定系数和波动系数较大, 这说明石墨粒度的减小可以在一定程度上提高摩擦材料在循环制动过程中的平稳性。石墨粒度减小, 表面积增大, 增强了与粘结剂的粘结性, 提高了摩擦材料的力学强度; 同时, 在循环制动过程中, 摩擦表面更容易形成润滑膜, 减少了摩擦表面磨屑的产生, 摩擦表面处于更加稳定的润滑状态, 摩擦系数变化较小。

2.5 不同试样的磨损率

在主轴惯量 0.1kg·m², 制动压力 1.0MPa, 转速 2000r/min 条件下, 连续制动 500 次, 测得了试样的磨损率, 如图 8 所示。由图可知, 随着石墨粒度的减小, 磨损率从 9.5×10⁻⁶mm³/J 减少到 6.9×10⁻⁶mm³/J。这是因为粒度较小的石墨均匀分散在摩擦材料中, 在连续制动时, 摩擦表面更容易形成固体润滑膜, 有效抑制摩擦表面磨粒和微裂纹的产生, 减少了犁沟和切削效应, 从而降低了磨损率。

图 9 为试样摩擦后的表面形貌图。从图中可以看出, 试样的摩擦表面不同程度的存在着固体润滑

表 3 不同试样的稳定系数和波动系数
Table 3 Stability and variability coefficient of different samples

Samples	Stability coefficient /%	Variability coefficient /%
C1	95.91	89.05
C2	96.60	89.92
C3	96.79	90.00
C4	96.88	92.17

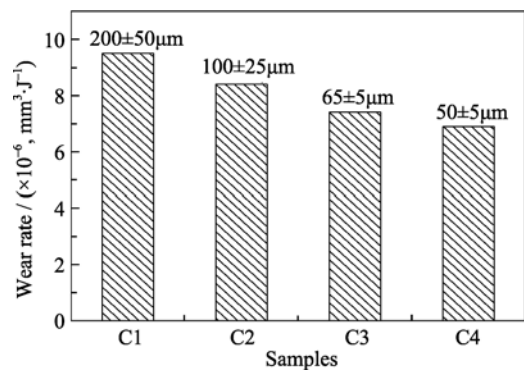


图 8 不同石墨粒度试样的磨损率
Fig. 8 Wear rate of samples with different graphite particle sizes

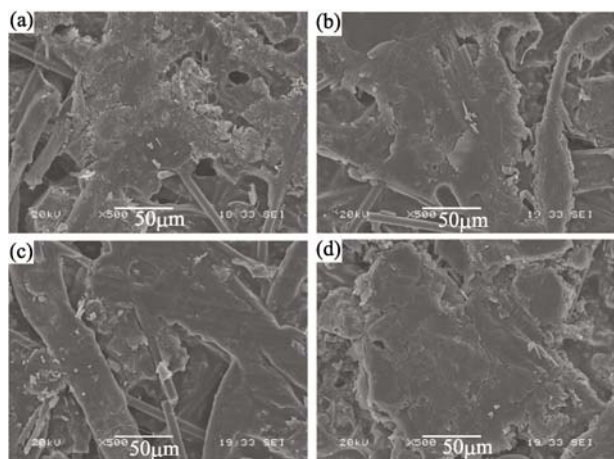


图 9 不同试样磨损形貌的 SEM 照片

Fig. 9 SEM micrographs of worn surface of different samples (a) C1; (b) C2; (c) C3; (d) C4

膜, 这些固体润滑膜的形成、性能及分布与石墨粒度有关. 随着粒度的减小, 摩擦表面形成的固体润滑膜更加致密, 摩擦表面磨粒和微裂纹减少, 提高了摩擦材料的耐磨性.

3 结论

1) 随着石墨粒度的减小, 摩擦力矩减小, 制动时间增长, 摩擦力矩曲线中间部分趋于平直, 制动过程更加平稳;

2) 石墨粒度的减小使摩擦材料的动、静摩擦系数减小; 且动摩擦系数随着制动压力和转速的增加而减小; 在循环制动过程中, 石墨粒度较小的试样表现出优良的制动稳定性;

3) 随着石墨粒度的减小, 摩擦表面易形成润滑性能良好的固体润滑膜, 有效抑制了磨粒和微裂纹的产生, 有利于降低磨损率.

参考文献:

[1] Eguchi M, Yamamoto T. Shear characteristics of a boundary film for a paper-based wet friction material: friction and real contact

area measurement. *Tribol. Int.*, 2005, **38**(3): 327–335.

- [2] 李贺军, 费杰, 齐乐华, 等(LI He-Jun, *et al.*). 孔隙率对碳纤维增强纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响. *无机材料学报* (*Journal of Inorganic Materials*), 2007, **22**(6): 1159–1164.
- [3] Gao H, Barber G C, Chu H. Friction characteristics of a paper-based friction material. *Int. J. Automot. Tech.*, 2002, **3**(4): 171–176.
- [4] Hattori Y, Kato T. Theory of frictional vibration in wet clutches considering poroelastic properties of paper-based facing. *J. Tribol.*, 1996, **118**(3): 520–526.
- [5] Cho M H, Ju J, Kim S J, *et al.* Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake friction materials. *Wear*, 2006, **260**(7/8): 855–860.
- [6] Chen B M, Bi Q L, Yang J, *et al.* Tribological properties of solid lubricants (graphite, h-BN) for Cu-based P/M friction composites. *Tribol. Int.*, 2008, **41**(12): 1145–1152.
- [7] 费杰, 李贺军, 齐乐华, 等. 石墨含量对纸基摩擦材料摩擦磨损性能的影响. *摩擦学学报*, 2007, **27**(5): 451–455.
- [8] 吕亚非, 马玉宁, 韩翎, 等. 石墨在半金属摩擦材料中的作用及其对摩擦性能的影响. *北京化工大学学报*, 2006, **33**(5): 58–61.
- [9] Kolluri D, Ghosh K A, Bijwe J. Analysis of load-speed sensitivity of friction composites based on various synthetic graphites. *Wear*, 2009, **266**(1/2): 266–274.
- [10] Zhang M J, Liu Y B, Yang X H, *et al.* Effect of graphite particle size on wear property of graphite and Al_2O_3 reinforced AZ91D-0.8%Ce composites. *T. Nonferr. Metal. Soc.*, 2008, **18**(1): 273–277.
- [11] Kolluri D K, Boidin X, Desplanques Y, *et al.* Effect of natural graphite particle size in friction materials on thermal localisation phenomenon during stop-braking. *Wear*, 2010, **268**(11/12): 1472–1482.
- [12] 付业伟, 李贺军, 李克智. 纸基摩擦材料绿色制备工艺与摩擦磨损性能研究. *摩擦学学报*, 2004, **24**(2): 172–176.
- [13] Fei J, Li H J, Qi L H, *et al.* Carbon-fiber reinforced paper-based friction material: study on friction stability as a function of operating variables. *J. Tribol.*, 2008, **130**(4): 041605–1–7.
- [14] Matsumoto T. The influence of paper-based friction material porosity on the performance of a wet clutch. *SAE Technical Paper*, 1994, 941032: 1–8.