

# 碳纤维增强树脂基摩擦材料摩擦磨损性能

殷艳飞 刘莹 丁郭 毕勇强

(南昌大学机电工程学院,南昌 330031)

**文 摘** 为提高树脂基摩擦材料摩擦因数稳定性,改善其抗热衰退性能。以碳纤维作为增强纤维,采用热压成型工艺制备碳纤维增强树脂基摩擦材料;用 XD-MSM 型定速摩擦试验机测定摩擦磨损性能,研究了不同含量碳纤维增强对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响;利用 VK-X200 三维激光扫描显微镜观察了摩擦材料磨损后表面的微观形貌并探讨其磨损机理。结果表明,碳纤维增强树脂基摩擦材料的硬度、压缩强度和剪切强度均得到提高,并随碳纤维含量的增加而逐渐增大;碳纤维增强作用提高了树脂基摩擦材料的耐磨性和摩擦因数的稳定性,改变了树脂基摩擦材料的摩擦磨损形式;碳纤维含量为 4wt% 的增强树脂基摩擦材料摩擦因数稳定性较高,抗热衰退性能较好,磨损机制主要为疲劳磨损。

**关键词** 碳纤维,树脂基摩擦材料,摩擦磨损

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.02.007

## Friction and Wear Properties of Carbon Fiber Reinforced Resin-Based Friction Material

YIN Yanfei LIU Ying DING Guo BI Yongqiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

**Abstract** To improve the friction coefficient stability of resin-based friction material, and improve the property of inhibit thermal degradation. Carbon fibers as reinforcing fibers, carbon fibers reinforced resin-based friction materials were prepared by thermoforming process. Friction and wear properties were measured through XD-MSM type constant-speed friction tester, the effects of different carbon fiber content on friction and wear properties of resin-based friction material were studied. Worn surface morphology was observed by using VK-X200 three-dimensional laser scanning microscope, and wear mechanism was discussed. The results show that the hardness, compressive strength and shear strength of carbon fibers reinforced resin-based friction materials were improved, and increased gradually with the increase of carbon fiber content. Carbon fiber improved the friction coefficient stability of resin-based friction material, enhanced the wear resistance and changed the form of friction and wear. The properties of friction coefficient stability and inhibit thermal degradation was great, and the wear mechanism was fatigue wear when the mass percentage of carbon fiber was 4wt% in the resin-based friction material.

**Key words** Carbon fiber, Resin-based friction material, Friction and wear

### 0 引言

随着我国交通运输的不断发展,对制动摩擦材料性能的要求也越来越高。其中,树脂基摩擦材料具有摩擦磨损性能优良、制备工艺简单、性能可设计性强和成本低等优点,其应用越来越广<sup>[1]</sup>。但树脂基摩

擦材料在制动过程中,摩擦因数稳定性较差,易发生高温热衰退,较大地限制了其应用前景<sup>[2]</sup>。为达到摩擦材料应用工况的要求,多种增强纤维可用于树脂基摩擦材料的填充改性,如玻璃纤维,金属纤维,碳纤维,陶瓷纤维等,其中,碳纤维具有稳定的摩擦因数,

收稿日期:2015-08-24

基金项目:江西省研究生创新专项资金立项项目(YC2014-S017);南昌大学校级训练计划项目(2014133)

作者简介:殷艳飞,1992年出生,硕士研究生,主要从事摩擦材料性能研究。E-mail:yfyin\_ncu@126.com

通讯作者:刘莹,E-mail:lyingncu@163.com

耐磨性好,是一种性能可靠,使用寿命长,污染小的复合摩擦材料<sup>[3]</sup>。

据文献[4]报道,碳纤维增强后摩擦材料的抗热衰退性能得到明显改善,在低速低温和宽的载荷区间具有更低的磨损率,且碳纤维具有较高的热稳定性,在高制动压力下表现出较好的耐磨性。研究认为,碳纤维增强纸基摩擦材料具有更低的孔隙率,碳纤维含量为55wt%的纸基摩擦材料具有稳定的摩擦因数,碳纤维含量为40wt%的纸基摩擦材料具有较好的耐磨性<sup>[5]</sup>。此外,碳纤维与钢纤维混杂增强摩擦材料具有较低的磨损率,在常温高速和重载条件下,材料具有稳定的摩擦因数,不易发生热衰退现象<sup>[6]</sup>。目前,关于碳纤维增强树脂基摩擦材料的相关报道较少。基于此,本文采用碳纤维作为增强纤维,制备出4种不同含量碳纤维增强树脂基摩擦材料试样,测试其摩擦磨损性能,探讨其摩擦磨损机理,对比分析了碳纤维含量对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响,以期对树脂基摩擦材料的实际应用提供理论依据和指导。

## 1 试样制备与试验方法

### 1.1 试样制备

树脂基摩擦材料由酚醛树脂、硫酸钡、氧化铝和其他组元组成,其他组元包括丁腈橡胶、硫化锑、重晶石、碳酸钙、石墨等。增强纤维采用PAN基短切碳纤维,直径为7~10 μm,长度为2 mm。试验树脂基摩擦材料配方见表1,其中,RM为未增强树脂基摩擦材料;以RM为基底,改变碳纤维质量分数,获得碳纤维增强树脂基摩擦材料配方RM-1、RM-2和RM-3。

为增加碳纤维与基体的结合性能,采用酒精对碳纤维进行去胶清洗,并在50%的浓硝酸溶液中浸泡48 h对碳纤维进行粗化处理。利用QM-3SP04型高速行星式球磨机进行混料,在球磨机转速400 r/min下混料2 h,在转速500 r/min下混料1 h。通过YX32-500型热压机将混料压制成型,压制压力为40 MPa,温度为170℃,时间为1 h。保温1 h后随炉冷却。

表1 树脂基摩擦材料配方

Tab.1 Formula of resin-based friction materials

wt%					
试样	碳纤维	酚醛树脂	BaSO <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其余
RM	0	23	20	8	49
RM-1	2	23	20	8	47
RM-2	4	23	20	8	45
RM-3	6	23	20	8	43

## 1.2 试验方法

采用XHR-150型洛氏硬度计测定试样硬度;将试样分别切割成尺寸为20 mm×20 mm×10 mm和10 mm×10 mm×10 mm的板材,用WAW型液压万能试验机分别测定压缩强度和剪切强度。利用XD-MSM定速式摩擦磨损试验机测定摩擦磨损性能,其对偶件摩擦盘为45#钢,厚度为30 mm,表面粗糙度为1.6 μm,转速为480 r/min,载荷为1 225 N,总转数为5 000 r。将摩擦材料加工成尺寸为25 mm×25 mm×6 mm的试样,依照GB5763—2008分别测定温度为100、150、200、250、300和350℃时的摩擦因数和磨损率;对各试样分别进行4次试验。采用日本KEYENCE公司提供的VK-X200三维激光扫描显微镜观察磨损后试样表面形貌。

为了定量分析树脂基摩擦材料在升温过程中的抗热衰退性能和降温过程中的恢复性能,引入衰退率 $F$ 和恢复率 $R$ 来评价摩擦材料的抗热衰退性能和恢复性能<sup>[7]</sup>。当 $F$ 值较小, $R$ 值较大,则表明摩擦材料抗热衰退性能和恢复性能较优。 $F$ 和 $R$ 定义为:

$$F = \frac{\mu_{F100^\circ\text{C}} - \mu_{F350^\circ\text{C}}}{\mu_{F100^\circ\text{C}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{\mu_{R100^\circ\text{C}}}{\mu_{F100^\circ\text{C}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $\mu_{F100^\circ\text{C}}$ 和 $\mu_{F350^\circ\text{C}}$ 分别为升温过程中100和350℃时的摩擦因数, $\mu_{R100^\circ\text{C}}$ 为降温过程中100℃时的摩擦因数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物理和力学性能

表2为树脂基摩擦材料的硬度和力学性能(压缩强度和剪切强度)。可知,碳纤维增强树脂基摩擦材料的硬度、压缩强度和剪切强度均比未增强树脂基摩擦材料大,并随碳纤维含量的增加而逐渐增大。由此表明了碳纤维具有较好的混杂效应,提高了树脂基底材料的物理和力学性能。

表2 树脂基摩擦材料的硬度和力学性能

Tab.2 Hardness and mechanical properties of resin-based friction materials

摩擦材料	硬度/HRS	压缩强度/MPa	剪切强度/MPa
RM	37.1	50	17.2
RM-1	59.3	54.8	22.6
RM-2	68	62	27.8
RM-3	82.7	93.2	34.4

### 2.2 摩擦磨损性能

图1为不同含量碳纤维增强树脂基摩擦材料的宇航材料工艺 <http://www.yhelgy.com> 2016年 第2期

摩擦因数曲线。可知,试样 RM 摩擦温度在 100℃ 时,摩擦因数为 0.471;随着摩擦温度的升高,试样 RM 的摩擦因数逐渐下降;摩擦温度在 300 ~ 350℃,摩擦因数下降 22.07%,出现严重的热衰退现象,表明未增强树脂基摩擦材料摩擦因数稳定性较差,热衰退现象明显。对于碳纤维增强试样,摩擦温度在 100 ~ 300℃,RM-2 的摩擦因数较稳定,保持在 0.408 ~ 0.417,其摩擦因数稳定性均高于 RM-1 和 RM-3;摩擦温度在 300 ~ 350℃ 时,各试样的摩擦因数均呈下降趋势,其中,试样 RM-2 摩擦因数下降最少,降幅为 8.71%。与未增强树脂基摩擦材料相比,碳纤维增强后摩擦材料摩擦因数稳定性和抗热衰退性能均有提高。

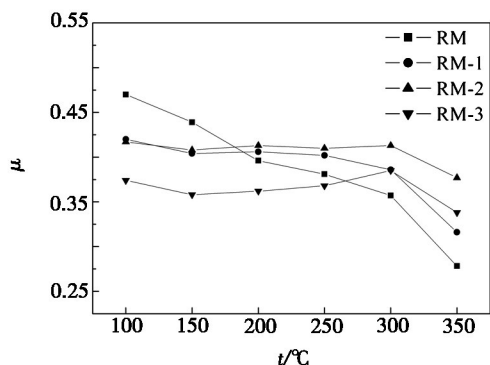


图1 碳纤维含量对摩擦因数的影响

Fig. 1 Effect of carbon fiber content on friction coefficient

表3为不同含量碳纤维增强树脂基摩擦材料的衰退率和恢复率。可知,升温过程中,相比未增强树脂基摩擦材料,碳纤维增强对摩擦材料性能的影响较大,碳纤维增强后摩擦材料摩擦因数衰退率较小,恢复率较高,表明碳纤维的增强作用能提高树脂基摩擦材料的抗热衰退性能;其原因是碳纤维具有高模量、阻尼减震性好及自润滑等优点,对摩擦材料摩擦过程影响较大<sup>[8]</sup>;其中,试样 RM-2 的摩擦因数衰退率最小,为 9.59%。在降温过程中,各试样摩擦因数恢复率均较好,试样 RM-2 的摩擦因数恢复率最高,达 108.51%。

图2为不同含量碳纤维增强树脂基摩擦材料的磨损率曲线。可知,碳纤维增强树脂基摩擦材料的磨损率均比未增强树脂基摩擦材料的小,表明碳纤维增强起到了降低摩擦材料磨损率的作用,其原因可能是碳纤维具有类石墨结构,使增强后摩擦材料具有较好的自润滑和减摩作用<sup>[9]</sup>。当摩擦温度高于 300℃ 时,各试样磨损率均出现明显增大,其主要原因为高温条件下,树脂基摩擦材料发生热分解,出现热衰退现象,

摩擦因数减小,相应磨损率增大<sup>[10]</sup>。

表3 树脂基摩擦材料的衰退率和恢复率

Tab.3 Fade ratio and recovery ratio of resin-based

摩擦材料	F	R	%
RM	37.87	95.75	
RM-1	24.76	100.94	
RM-2	9.59	108.51	
RM-3	9.63	106.27	

对比所有试样可知,试样 RM-2 的摩擦因数较高,稳定性较好,摩擦因数具有较小的衰退率和较高的恢复率,且试样耐磨性较好,摩擦磨损性能最优;其主要原因为碳纤维含量为 4wt% 时,树脂基摩擦材料与碳纤维结合较好,在摩擦过程中具有较大的摩擦阻力,且碳纤维的均匀分布起到较好的减摩效果。而试样 RM-3 的摩擦因数较小,表明碳纤维增强摩擦材料时含量不易过高。

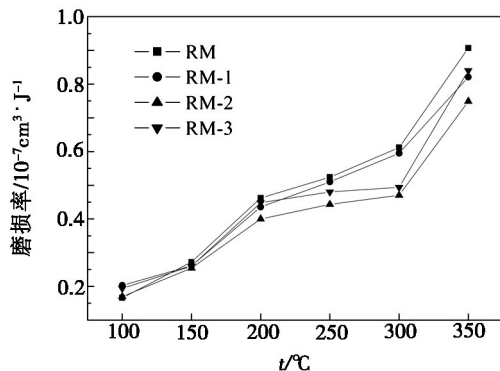


图2 碳纤维含量对磨损率的影响

Fig. 2 Effect of carbon fiber content on wear rate

### 2.3 磨损表面形貌

图3、图4分别为试样 350℃ 摩擦试验后的摩擦表面轮廓形貌和微观形貌图。可以看出,试样 RM 表面存在少量的剥落坑[图3(a)],从微观形貌图中可以看出,试样表面沿摩擦方向出现明显划痕[图4(a)]。在摩擦过程中,试样表面上的微凸峰与摩擦对偶面产生的接触应力超过试样屈服强度,发生塑性变形并脱离基体向对偶面转移,形成剥落坑,磨损率较大<sup>[11]</sup>;在相对滑动速度较高时,摩擦层之间的剪切作用频率增大,摩擦层的形成与破坏频率增加而加剧材料的磨损,同时也导致制动过程的不稳定,试样摩擦因数逐渐下降<sup>[12]</sup>,其磨损机制主要表现为黏着磨损。

试样 RM-1 表面较为平整,边缘处出现少量剥落坑[图3(b)],试样表面在沿摩擦方向上出现大量

划痕[图 4(b)],其原因可能是增加碳纤维增强后,摩擦材料结合强度下降,表面硬度增加,在高温和循环应力作用下,脱黏的硬质颗粒在对偶件与基体的界面等薄弱位置反复辗压易形成微裂纹,随着摩擦过程不断扩张并形成片状剥落,其摩擦形式主要为磨粒磨损和疲劳磨损<sup>[13]</sup>。试样 RM-2 表面出现少量的剥落坑[图 3(c)],在摩擦方向上出现轻微的划痕[图 4(c)],主要原因在于试样在与对偶件摩擦过程中,应力作用较大,同时,材料中碳纤维与对偶件摩擦表面产生的转移膜能显著提高摩擦材料的耐磨性能,有效减小摩擦材料的磨粒磨损,故摩擦因数较大<sup>[14]</sup>。当表面应力较大时,摩擦表面形成连续性的摩擦层,使表面材料疲劳断裂形成点蚀或剥落,表面形成剥落坑,相对磨损率较小,摩擦形式主要为疲劳磨损。随着摩擦材料中碳纤维含量继续增加,试样 RM-3 的

表面出现的大量剥落坑[图 3(d)],由于碳纤维含量较多,在摩擦温度较低时,碳纤维逐渐暴露于摩擦表面[图 4(d)],承载了较大摩擦阻力,试样表现为摩擦因数上升趋势<sup>[15]</sup>;在高温条件下,摩擦表面形成的润滑转移膜较厚,降低了摩擦材料的摩擦因数,且在摩擦剪切力作用下,材料表面不断出现疲劳点蚀与剥落,形成较多的凹坑,摩擦形式主要为脆性脱落和疲劳磨损<sup>[16]</sup>。

与未增强树脂基摩擦材料相比,碳纤增强改变了摩擦材料的磨损形式,随着碳纤维含量增加,树脂基摩擦材料的磨损形式不断发生转变;各试样摩擦表面平均高度分别为 40.12、48.66、80.89 和 71.72  $\mu\text{m}$ ,其中,试样 RM-2 的摩擦表面高度最高,磨损率最小,磨损机制为疲劳磨损。

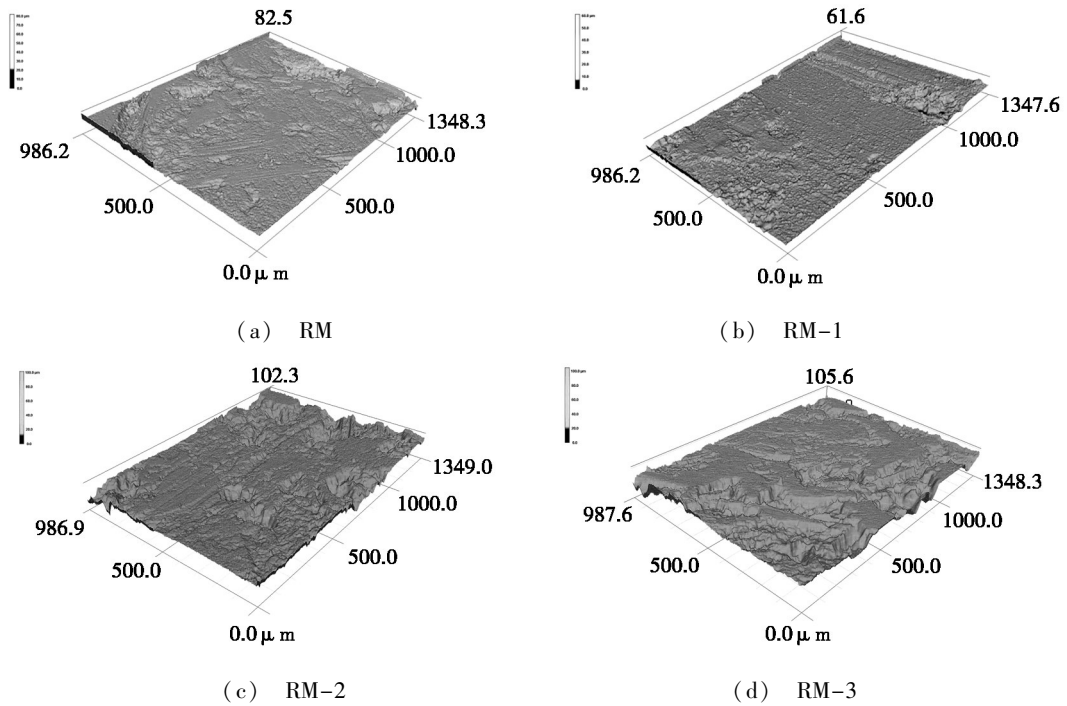
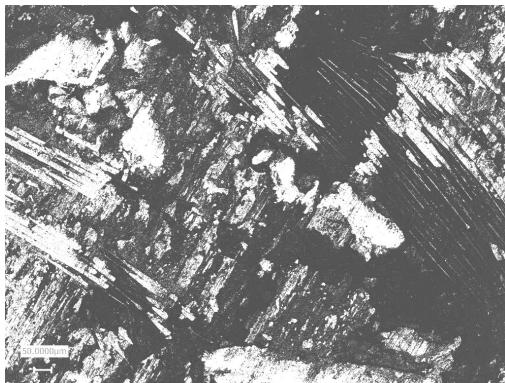


图 3 试样磨损表面轮廓形貌图

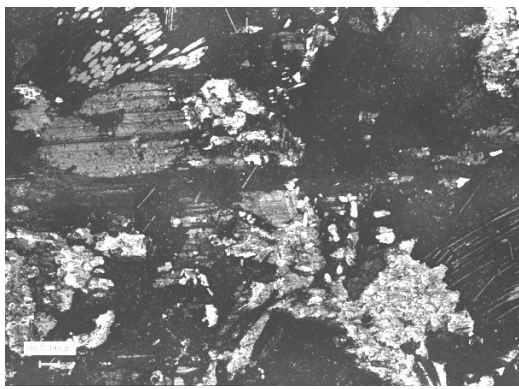
Fig. 3 Worn surface topography profile of sample



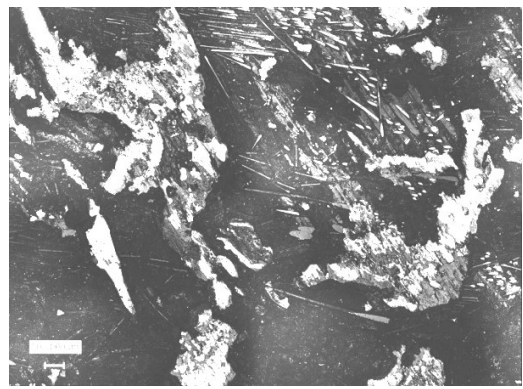
(a) RM



(b) RM-1



(c) RM-2



(d) RM-3

图4 试样磨损表面微观形貌图

Fig. 4 Worn surface morphology of sample

### 3 结论

(1) 与未增强树脂基摩擦材料相比,碳纤维增强树脂基摩擦材料的硬度、压缩强度和剪切强度均有提高,并随碳纤维含量的增加而逐渐增大。

(2) 碳纤维增强提高了树脂基摩擦材料耐磨性和摩擦因数的稳定性。与未增强树脂基摩擦材料相比,碳纤维增强树脂基摩擦材料的摩擦因数衰退率较小,恢复率较高;其中,碳纤维含量为4wt%的增强树脂基摩擦材料摩擦因数衰退率为9.59%,恢复率为108.51%,其摩擦磨损性能最优。

(3) 碳纤维含量能改变树脂基摩擦材料的磨损形式。未增强树脂基摩擦材料表现为黏着磨损,不同含量的碳纤维增强后,摩擦材料磨损机制变为磨粒磨损和疲劳磨损的混合磨损机制,再到单一的疲劳磨损机制,而碳纤维过量加入树脂基摩擦材料的主要磨损机制转变为脆性脱落和疲劳磨损。

#### 参考文献

[1] 丛培红, 吴行阳, 卜娟, 等. 制动用有机摩擦材料的研究进展[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(1): 88-96.

[2] 吴耀庆. 树脂基复合摩擦材料摩擦磨损机理研究及有限元模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.

[3] BETANCOURT S, CRUZ J, Toro A. Friction and wear in sliding contact of cast iron against phenolic resin composites reinforced with carbonaceous fibres from plantain fibre bundles[J]. Lubrication Science, 2013, 25(2): 163-172.

[4] FU H, LIAO B, QI F, et al. The application of PEEK in stainless steel fiber and carbon fiber reinforced composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39(4): 585-591.

[5] FEI J, LUO W, HUANG J F, et al. Effect of carbon fiber content on the friction and wear performance of paper-based friction materials[J]. Tribology International, 2015, 87: 91-97.

[6] 章伟. 碳纤维和钢纤维混杂增强摩擦材料研究[D].

上海: 华东理工大学, 2014.

[7] FU H, FU L, ZHANG G, et al. Abrasion mechanism of stainless steel/carbon fiber-reinforced polyether-ether-ketone (PEEK) composites[J]. Journal of materials engineering and performance, 2009, 18(7): 973-979.

[8] 陈燕, 葛恩德, 傅玉灿, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 301-316.

[9] 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): 534-540.

[10] HONG U S, JUNG S L, CHO K H, et al. Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices[J]. Wear, 2009, 266(7): 739-744.

[11] 王璐, 苏堤. 偶联剂改性硅灰棉对树脂基摩擦材料摩擦学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(1): 71-76.

[12] YI G, YAN F. Mechanical and tribological properties of phenolic resin-based friction composites filled with several inorganic fillers[J]. Wear, 2007, 262(1): 121-129.

[13] 朱文婷, 付业伟, 李贺军, 等. 硅酸钙颗粒改性树脂基摩擦材料的性能[J]. 润滑与密封, 2012, 37(11): 45-50.

[14] 马小龙, 敖玉辉, 肖凌寒, 等. 表面改性对碳纤维/酚醛树脂基复合材料摩擦性能的影响[J]. 材料研究学报, 2015, 29(2): 101-107.

[15] SHOJAEI A, ARJMAND M, SAFFAR A. Studies on the friction and wear characteristics of rubber-based friction materials containing carbon and cellulose fibers[J]. Journal of materials science, 2011, 46(6): 1890-1901.

[16] 费杰, 李贺军, 付业伟, 等. 碳纤维增强纸基摩擦材料磨损机理研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 540-545.