

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.07.004

竹炭 / 碳纤维增强树脂基摩擦材料摩擦磨损性能^{*}

刘建发, 孙胃涛, 付雪松, 周文龙

(辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 大连理工大学材料学院, 辽宁大连 116085)

摘要: 采用腰果壳油改性酚醛树脂和丁腈橡胶为粘结剂, 具有高弹性模量和高强度的碳纤维为增强纤维, 竹炭、重晶石和蛭石等为填料, 采用热压成型工艺制备树脂基摩擦材料, 研究了竹炭含量对摩擦材料的剪切强度、密度和摩擦磨损性能的影响, 借助扫描电镜观察磨损表面形貌并分析磨损机理。结果表明: 随着竹炭含量的增加, 材料的剪切强度和密度相应减少; 添加竹炭能明显提升在 250℃ 和 350℃ 下的摩擦系数, 对于 100℃ 下的摩擦系数影响较小; 增加竹炭含量, 材料的磨损率逐渐变大, 磨损机制由单一磨粒磨损向黏着磨损和磨粒磨损的复合磨损机制转变。

关键词: 摩擦材料; 竹炭; 剪切强度; 密度; 摩擦磨损性能; 磨损机制

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)07-0017-04

Tribological Properties of Bamboo Charcoal / Carbon Fiber Reinforced Resin Based Composite Friction Materials

Liu Jianfa, Sun Weitao, Fu Xuesong, Zhou Wenlong

(Liaoning Province Key Laboratory of Solidification Control And Digital Preparation Technology,

Dalian University of Technology Materials Institute of Materials, Dalian 116085, China)

Abstract : Using cashew nut shell oil modified phenolic resin and crylonitrile-butadiene rubber as binder, carbon fiber with high modulus of elasticity and high strength as strengthening fiber, bamboo charcoal, barite and vermiculite as filler, the friction materials based on phenolic resin matrix were prepared by hot-pressing molding process. The effects of the content of bamboo charcoal on the shear strength, density and friction and wear properties were studied. The wear morphology was observed by using scanning electron microscopy, and the wear mechanism was analyzed. The results show that with the addition of the content of bamboo charcoal, the shear strength and density of the material decrease accordingly. Friction coefficient of the sample with the bamboo charcoal compare with the no bamboo charcoal material there is a significantly improve at 250℃ and 350℃, but has a slight effect at 100℃. The wear rate also show the growing trend with the increase of the content of bamboo charcoal. With the addition of bamboo charcoal content, the friction mechanism is changed from a single abrasive wear to a combination of abrasive wear and adhesive wear.

Keywords : friction material ; bamboo charcoal ; shear strength ; density ; friction and wear property ; friction mechanism

碳素材料作为摩擦性能调节剂对摩擦材料具有十分重要的作用, 对于调节摩擦性能、降低噪音、减小热衰退、调节孔隙率和硬度等方面都起着重要作用, 使摩擦材料制品能够更好地满足多种工况的要求^[1]。竹炭作为一种碳素材料是以三年以上的高山毛竹为原料, 经高温烧结而成, 在我国属于丰富且可再生资源。其机械强度较高, 孔隙率较大, 导电性能良好, 可应用于多种材料^[2-4]。

葛志德等^[5]研究了含竹炭摩擦材料在高速高压下的摩擦磨损性能, 发现竹炭在高速的摩擦情况下会出现低温摩擦系数偏高而高温摩擦系数偏低的现象, 当其与人造石墨混杂使用时可以改善人造石墨摩擦材料摩擦系数不稳定的缺点。武亚波等^[6]鉴于竹炭的结构特点决定将竹炭应用于摩擦材料的

试验研究。结果表明, 竹炭具有稳定摩擦系数的作用, 并能很好地降低噪音和震动, 但是磨损率较大。将竹炭与陶瓷纤维和石油焦、煤焦油焦配合使用, 可以使摩擦材料拥有较良好的摩擦磨损性能。目前关于竹炭对摩擦材料摩擦磨损机理的研究很不充分, 笔者采用腰果壳油改性酚醛树脂和丁腈橡胶为摩擦材料的粘结剂, 选择具有高的弹性模量和高强度的碳纤维为增强纤维^[7], 竹炭、重晶石和蛭石等为填料, 并采用热压成型的方法制备摩擦材料, 研究竹炭含量对摩擦材料摩擦磨损性能和力学性能的影响规律, 分析摩擦材料的摩擦表面特征, 揭示材料的摩

^{*} 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (SS2015AA042502)

联系人: 刘建发, 硕士, 主要从事碳纤维增强树脂基摩擦材料研究

收稿日期: 2017-05-01

擦磨损机理,以期对竹炭改性摩擦材料的配方设计提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂: 58 μm , 桓台县永汇化工有限公司;
丁腈橡胶: GM50, 靖江广盛橡塑塑料厂;
竹炭: 1 μm , 上海巷田纳米材料有限公司;
碳纤维: T700, 盐城爱丽维纤维制品有限公司;
重晶石: 44 μm , 咸阳非金属矿研究所;
紫铜粉: 80 nm, 上海巷田纳米材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

定速式摩擦磨损试验机: JF151 型, 吉林大学机电设备研究所;

电脑式材料拉力试验机: HD-B609 型, 东莞市海达仪器有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): SUPRA 55 SAPPHIRE 型, 德国卡尔蔡司公司;

分析天平: ME204E 型, METTLER TOLEDO 集团。

1.3 试样制备

试样制备采用模压成型工艺。原料在高速混料机中混合 3 min, 进行模压成型获得预成型体, 具体工艺参数为: 热压温度 170 $^{\circ}\text{C}$ 、成型压力为 25 MPa、保压时间为 60 min。将预成型体置于 170 $^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中进行保温 6 h。试样配方见表 1。

表 1 试样的原材料配方

试样编号	酚醛树脂	丁腈橡胶	碳纤维	竹炭	重晶石	其它
CZ0	15	5	6	0	42	32
CZ6	15	5	6	6	36	32
CZ11	15	5	6	11	31	32
CZ16	15	5	6	16	26	32
CZ21	15	5	6	21	21	32
CZ26	15	5	6	26	16	32

1.4 性能测试

采用定速式摩擦磨损试验机根据 GB 5763-2008 进行摩擦磨损性能测试 (制动压力为 0.98 MPa), 摩擦对偶的材质为 HT250 灰口铸铁, 试样尺寸为 25 mm $\times$ 25 mm $\times$ 6 mm。

采用 SEM 分析试样表面形貌特征。

采用电脑式材料拉力试验机进行试样的剪切强度测试, 试样尺寸为 14 mm $\times$ 12 mm $\times$ 3 mm, 实验速度为 100 mm/min。

采用分析天平对摩擦试样进行密度测试。

2 结果与讨论

2.1 密度和剪切强度

对不同竹炭含量的摩擦试样进行密度和剪切

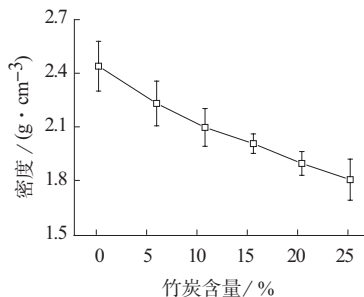


图 1 不同竹炭含量摩擦材料的平均密度

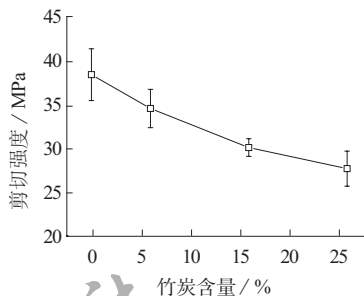


图 2 不同竹炭含量试样的剪切强度

强度测试, 结果分别见图 1、图 2 所示。

由图 1 和图 2 可知, 随着竹炭含量的增加, 摩擦材料的密度和剪切强度呈单调下降趋势。当竹炭为 26% 时, 摩擦材料的密度和剪切强度分别减小为 1.81 g/cm³ 和 27.7 MPa, 相比于无竹炭的摩擦材料, 分别降低了 24.6% 和 27.9%。竹炭减小材料密度的主要原因是低密度的竹炭 (1 g/cm³) 替代的是较高密度的重晶石 (4.35 g/cm³), 基本遵循组分密度加和规律^[8]。不含竹炭试样 (CZ0) 的剪切断裂断面呈凹凸不平, 剪切面上可见与基体相连接的未脱落的碎屑, 表明断裂过程所吸收的能量较多, 这是由于在剪切力作用下基体间结合力较强的原因所产生的^[9], 如图 3 所示。而含较多竹炭试样 (CZ26) 的剪切断裂断面则比较平整, 由于材料的结合能力较弱, 在剪切力作用下基体分离较容易, 因此断面较平坦。综上可知, 竹炭含量的增加, 使得基体间的结合力减弱, 从而抗剪断能力减弱, 材料的剪切强度降低。

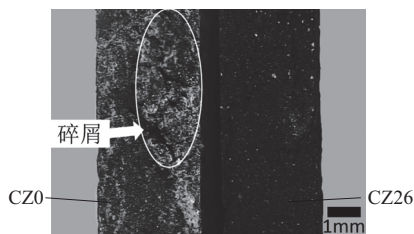
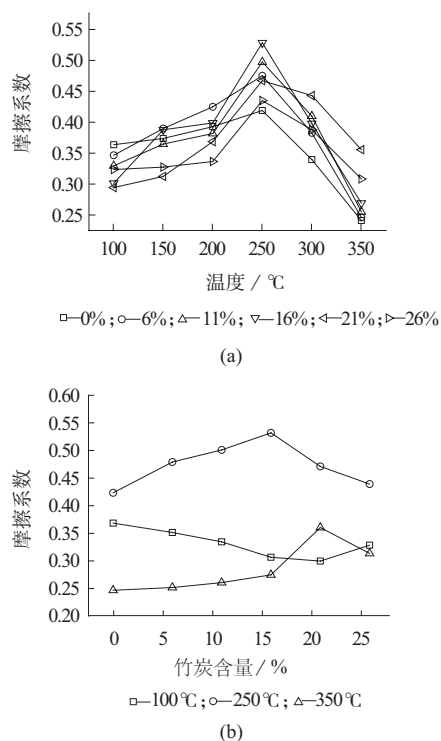


图 3 CZ0 和 CZ26 的剪切断面形貌

2.2 摩擦磨损性能

图 4 给出了不同竹炭含量试样在不同温度区域的摩擦系数。



a—随温度的变化曲线; b—随竹炭含量的变化曲线

图4 摩擦材料的摩擦性能曲线

在材料中加入竹炭,基本没有改变材料摩擦系数的变化趋势,依然表现为在中低温区升高,当温度超过 250℃ 后,摩擦系数持续下降,摩擦材料出现明显的热衰退现象(图 4a),与不含竹炭的试样(CZ0)类似。显然,配方中酚醛树脂在较高温时的软化与分解,导致摩擦系数快速下降仍占主导作用。由此说明,竹炭对于摩擦材料的抗热衰退性能作用不显著,葛志德等的研究也获得类似的结果^[4]。从图 4b 中发现,竹炭含量对于材料在较低温度区(如 100℃)摩擦系数的影响较小,竹炭含量增加使材料摩擦系数大致呈现逐渐减小的趋势,表明竹炭有利于减小在低温区的摩擦系数。而在中温区(250℃)含有竹炭试样的摩擦系数都明显高于不含竹炭的摩擦试样,并且在竹炭含量为 16% 时达到最大值,表明竹炭可以提高摩擦材料在中温区(250℃)的摩擦系数,在竹炭含量为 16% 时增加最显著。这主要是由于随着竹炭的加入使基体变软,对偶盘的微凸体或者硬质颗粒可以更深度地嵌入到摩擦表面,从而机械啮合力得到提高,摩擦系数增大^[10]。而当竹炭含量过多(如大于 16%)时,材料的摩擦系数反而又下降,这是由于太多的竹炭使材料的组分结合力大幅下降导致摩擦系数降低^[11]。对比 350℃ 下试样的摩擦系数发现,在高温区含有竹炭试样的摩擦系数都

大于不含竹炭的试样,且大体呈现逐渐上升之势。这是因为高温区树脂软化较严重,竹炭对试样的摩擦磨损机制有较大影响。

摩擦材料磨损率是衡量其综合性能的重要参数,图 5 给出了试样(CZ0~CZ26)的体积总磨损率。含有竹炭试样的体积总磨损率呈线性增加,含量 26% 竹炭试样的体积总磨损率高达 $2.73 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,相比于不含竹炭摩擦材料的磨损率 $1.68 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,磨损率增加 62.5%,耐磨损性能下降。说明竹炭加入损害了基体组分间的相容与结合,摩擦材料耐磨损性能减弱,磨损率增加。

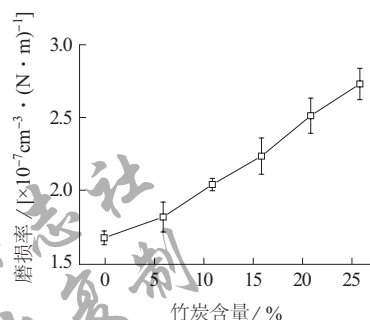
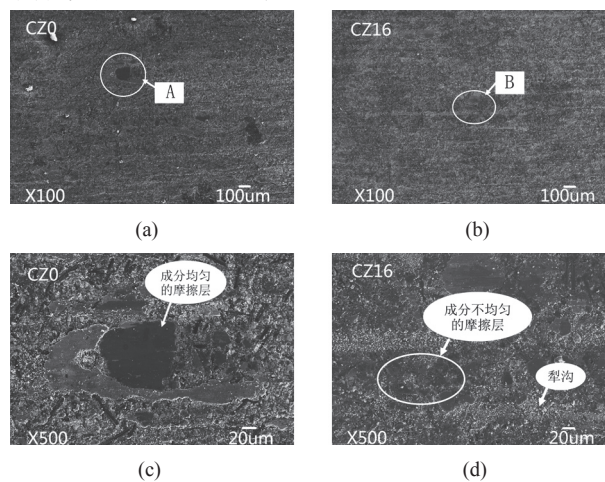


图5 不同竹炭含量下的摩擦材料的总磨损率

2.3 摩擦表面形貌分析

图 6 分别给出了试样(CZ0 和 CZ16)在 250℃ 摩擦磨损后的表面形貌。



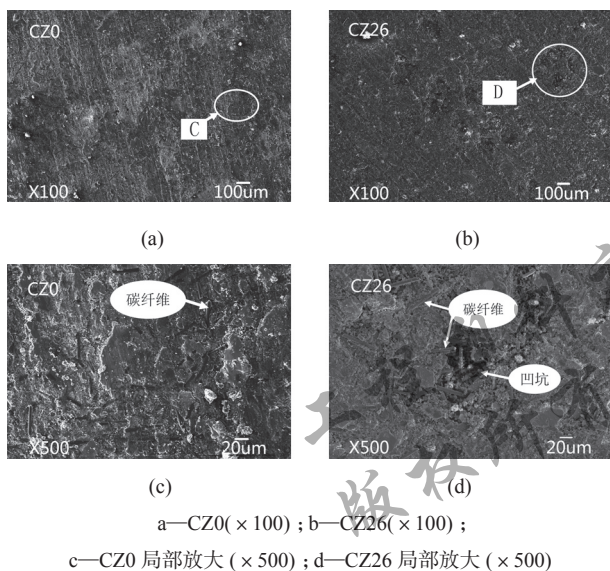
a—CZ0(×100); b—CZ16(×100);

c—CZ0 局部放大(×500); d—CZ16 局部放大(×500)

图6 CZ0 和 CZ16 试样的磨损形貌

其中图 6c、图 6d 为图 6a、图 6b 中 A 和 B 区域放大 500 倍后的结果。从图 6a 中可以发现, CZ0 试样的摩擦表面平整,没有明显的划痕,表明各组分之间的粘结力较好,磨粒磨损程度较小。从其放大图 6c 中可以观察到,由基础平台和二次平台所组成的接触平台,并且平台周围的碳纤维轮廓清晰,且排

列无序杂乱。表明平台承载着对偶盘的主要压力,平台与对偶盘的相互作用是产生摩擦力的主要来源。而 CZ16 试样中纤维的外形发生了变化,形成了涂抹的条带状(如图 6d),表明碳纤维承载着对偶盘的压力^[12],并且碳纤维和磨屑在对偶盘的压力的作用下形成成份不均匀的接触平台,从而增大了试样与对偶盘的接触面积。从图 6d 中还可以发现,摩擦表面存在较深的犁沟痕迹,犁沟的深度越深,表明机械啮合力越大^[10]。较大的接触平台面积和较深的犁沟为摩擦系数(在 250℃时)升高提供了证据。图 7 分别给出了试样(CZ0 和 CZ26)在 350℃摩擦磨损后的表面形貌。



(a)

(b)

(c)

(d)

a—CZ0($\times 100$); b—CZ26($\times 100$);

c—CZ0 局部放大($\times 500$); d—CZ26 局部放大($\times 500$)

图 7 CZ0 和 CZ26 试样的磨损形貌

其中图 7c、图 7d 为图 7a、图 7b 中 C 和 D 区域放大 500 倍后的结果。从图 7a 中可以发现,试样的摩擦表面较平整且存在较多平行于摩擦方向的犁沟痕迹,表明材料的磨损机制以磨粒磨损为主。而图 7c 材料的摩擦表面形貌可见,除互相平行的犁沟之外,还有一些不同深度的凹坑,这种凹坑主要是在相互摩擦过程中与对偶发生黏着磨损所造成的,表明添加竹炭使得摩擦材料的磨损机制由磨粒磨损转变为磨粒磨损和黏着磨损的复合磨损机制。对比图 7c、图 7d 可以看出, CZ0 试样的磨损表面较平整,材料各组分之间结合致密,并且在摩擦表面上观察到磨损后暴露在外的纤维长度较短,说明纤维与基体之间的界面粘结强度较高^[13];而 CZ26 试样的摩擦表面可见暴露在外的纤维长度较长而突出(图 7d),说明试样中纤维与界面的粘结强度较低,在摩擦的过程中很容易被拖出。由此可见,添加竹炭削

弱了材料各组分间的结合力,从而导致材料的抗磨损和强度性能下降,这与剪切强度试验结果相符合(如图 2)。

3 结论

(1) 添加竹炭导致树脂基碳纤维增强摩擦材料的剪切强度和密度发生改变,随着竹炭含量的增加,摩擦材料的抗剪切强度和密度呈现下降的趋势。

(2) 竹炭对于树脂基碳纤维增强摩擦材料的摩擦磨损性能具有重要影响,竹炭明显提高材料在 250℃和 350℃的摩擦系数,但在 100℃时的作用较小;竹炭使得摩擦材料的耐磨性下降,随着竹炭含量增加,磨损率呈不断增大的趋势。

(3) 添加竹炭改变树脂基碳纤维增强摩擦材料的磨损机理,由单一的磨粒磨损机制转变为磨粒磨损和黏着磨损的混合磨损机制。

参考文献

- [1] 易汉辉. 摩擦材料中碳素材料的作用及机理的研究[J]. 摩擦密封材料, 2007(3):8-13.
Yi Hanhui. Study on the action and mechanism of carbon materials in friction materials[J]. Friction and Sealing Materials, 2007(3):8-13.
- [2] 朱江涛, 黄正宏, 康飞宇, 等. 竹炭的性能和应用的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(4):41-43.
Zhu Jiangtao, Huang Zhenghong, Kang Feiyu, et al. Research progress on properties and application of bamboo charcoal[J]. Materials Review, 2006, 20(4):41-43.
- [3] Li Xiang, Lei Bingrong, Lin Zhidan, et al. The utilization of bamboo charcoal enhances wood plastic composites with excellent mechanical and thermal properties[J]. Materials and Design, 2014, 53:419-424.
- [4] 朱义年, 张学洪, 曾鸿鹄. 在水环境污染防治中的应用研究[D]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Zhu Yinian, Zhang Xuehong, Zeng Honghu. Study on application of water environment pollution prevention[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [5] 葛志德, 胡以强. 含竹炭摩擦材料在高速高压下的摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2011, 36(2):76-80.
Ge Zhide, Hu Yiqiang. Friction and wear properties of bamboo charcoal friction material at high speed and high pressure[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(2):76-80.
- [6] 武亚波. 几种碳类材料对摩擦材料性能影响的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2008.
Wu Yabo. Study on the influence of several carbon materials on the performance of friction materials[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2008.
- [7] Bradley A, Newcomb. Processing, structure and properties

(下转第 45 页)

- 38(11):56-58.
- [2] 张德强, 丁雪佳, 褚文娟, 等. PP/SEBS 共混物的相形态、光学及力学性能 [J]. 化工进展, 2010, 29(7):1 281-1 285.
- Zhang Deqiang, Ding Xuejia, Chu Wenjuan, et al. Phase behavior, optical and mechanical properties of PP/SEBS binary blend[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(7):1 281-1 285.
- [3] 王芬. 不同弹性体增韧聚丙烯的性能研究 [J]. 四川文理学院学报, 2010, 20(2):53-55.
- Wang Fen. Study on performance of PP with different elastomer[J]. Sichuan University of Arts and Science Journal, 2010, 20(2):53-55.
- [4] 李跃文, 罗承友. 聚丙烯增韧改性的方法及机理 [J]. 工程塑料应用, 2007, 35(10):69-72.
- Li Yuewen, Luo Chengyou. Toughening methods and mechanisms of PP[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(10):69-72.
- [5] 冯再, 张继忠, 陈宝书. PP/SBS 复合材料共混改性及性能研究 [J]. 化工新型材料, 2014, 42(9):64-66.
- Feng Zai, Zhang Jizhong, Chen Baoshu. Study on the blending modification and the property of PP/SBS composite[J]. New Chemical Materials, 2014, 42(9):64-66.
- [6] 李玉虎, 王林, 程庆, 等. 不同化学结构的 PP 对热塑性弹性体复合材料性能的影响 [J]. 塑料工业, 2014, 42(10):72-74, 80.
- Li Yuhu, Wang Lin, Cheng Qing, et al. Effect of PP with different chemical structure on properties of thermoplastic elastomer composite materials[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(10):72-74, 80.
- [7] 王晓, 王辉, 苏启标, 等. 甚高温下热氧处理聚丙烯形态和力学性能研究 [J]. 中国塑料, 2011, 25(6):54-59.
- Wang Xiao, Wang Hui, Su Qibiao, et al. Study on morphology and mechanical properties of polypropylene treated by thermo-oxidative at very high temperature[J]. China Plastics, 2011, 25(6):54-59.
- [8] 陈键, 张桂云, 黄仕锋, 等. 聚丙烯热氧老化机理的研究 [J]. 中国塑料, 2015, 29(7):63-65.
- Chen Jian, Zhang Guiyun, Huang Shifeng, et al. Study on aging mechanism of polypropylene [J]. China Plastics, 2015, 29(7):63-65.
- [9] 钱欣, 郑荣华, 蔡鹏. 聚丙烯的热氧老化及其影响因素 [J]. 浙江工业大学学报, 2002, 30(5):475-480.
- Qian Xin, Zheng Ronghua, Cai Peng. Thermal oxidative ageing and thermal stabilization of polypropylene[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2002, 30(5):475-480.
- [10] 邹发生, 宋文波. 相对分子质量对等规聚丙烯性能的影响 [J]. 合成树脂及塑料, 2014, 31(6):31-34.
- Zou Fasheng, Song Wenbo. Effect of relative molecular mass on properties of isotactic polypropylene[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2014, 31(6):31-34.
- [11] 陈佳, 徐涛. 聚丙烯材料分子量及其分布对结晶形态的影响 [J]. 塑料, 2011, 40(1):40-42.
- Chen Jia, Xu Tao. The effect of molecular weight and its distribution of crystalline morphology of PP materials[J]. Plastics, 2011, 40(1):40-42.
- [12] 周琦, 王勇, 邱桂华, 等. POE 与 EPDM 对聚丙烯增韧改性研究 [J]. 弹性体, 2007, 17(4):44-47.
- Zhou Qi, Wang Yong, Qiu Guixue, et al. Study on POE and EPDM in the modification of PP[J]. China Elastomerics, 2007, 17(4):44-47.
- [13] 费正东, 钟明强, 杨晋涛. 无机纳米粒子改性 PP 热氧老化性能的研究 [J]. 塑料工业, 2006, 34(10):42-44.
- Fei Zhengdong, Zhong Mingqiang, Yang Jintao. Study on thermal oxidative property of PP modified by inorganic nano-meter particle[J]. China Plastics Industry, 2006, 34(10):42-44.
- =====
- (上接第 20 页)
- of carbon fibers[J]. Composites PartA: Applied Science and Manufacturing, 2016, 91(1):262-282.
- [8] 刘伯威, 匡湘铭, 刘咏, 等. 腰果壳油摩擦粉对树脂基摩擦材料性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4):891-899.
- Liu Bowei, Kuang Xiangming, Liu Yong, et al. Effect of cashew powder on the properties of resin-based friction materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4):891-899.
- [9] 王晓芳, 姜娟, 朱文婷. W(石墨)对 NAO 摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 华工科技, 2016, 24(2):29-32.
- Wang Xiaofang, Jiang Juan, Zhu Wenting. Effect of W (Graphite) on friction and wear properties of NAO friction materials[J]. Science & Technology In Chemical Industry, 2016, 24(2):29-32.
- [10] 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.
- Zhu Wenting, Fu Yewei, Li Hejun, et al. Properties of calcium silicate particles modified resin-based friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(11):45-50.
- [11] 陈霞, 梅启林, 张景洁, 等. 长石粉对酚醛树脂基摩擦材料性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(2):13-17.
- Chen Xia, Mei Qilin, Zhang Jingjie, et al. Effect of feldspar powder on properties of phenolic resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):13-17.
- [12] 王红侠, 姚冠新. 多纤维增强汽车制动器摩擦材料的研制 [J]. 润滑与密封, 2008, 33(10):88-90.
- Wang Hongxia, Yao Guanxin. Development of multi-fiber reinforced automobile brake friction material[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(10):88-90.
- [13] 张丛见, 吴其胜, 张少明. 陶瓷纤维增强摩擦材料的性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2009, 37(1):15-18.
- Zhang Congjian, Wu Qisheng, Zhang Shaoming. Study on properties of ceramic fiber reinforced friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(1):15-18.