

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.023

芳纶浆粕对酚醛树脂基摩擦材料性能影响

叶长松,付雪松,黄鹏,陈国清,周文龙

(大连理工大学材料科学与工程学院,凝固控制与数字化重点实验室,辽宁大连 116023)

摘要:以酚醛树脂为基体,使用高模量、高强度、吸附性好、热稳定性优异的芳纶浆粕作为增强纤维,石墨、萤石、重晶石等作为填料,通过干法热压成型工艺制备酚醛树脂基摩擦材料。研究了芳纶浆粕含量对材料力学性能和摩擦磨损性能的影响。利用扫描电子显微镜观察磨损表面形貌,初步分析芳纶浆粕在摩擦材料中的作用机理。结果表明,芳纶浆粕可以使材料的冲击强度和硬度明显提高;当配方中芳纶浆粕含量较低时,材料的摩擦系数变化不大,随着含量进一步增加,材料的摩擦系数明显升高;适量的芳纶浆粕有助于形成致密均匀的摩擦层,进而提高材料的摩擦稳定性,同时降低磨损率。当配方中芳纶浆粕的质量分数为2%时,材料达到最佳的摩擦磨损性能。

关键词:芳纶浆粕;摩擦材料;冲击强度;硬度;摩擦磨损性能

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0130-04

Effect of Aramid Pulp on Properties of Phenolic Resin-based Friction Materials

Ye Changsong, Fu Xuesong, Huang Peng, Chen Guoqing, Zhou Wenlong

(Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology, School of Materials Science and Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract : Using phenolic resin as the matrix, aramid pulp with high modulus, high strength, good adsorptivity, and excellent thermal stability as the reinforcing fiber, and graphite, fluorite, barite, etc as fillers, the phenolic resin-based friction materials were prepared by dry hot pressing process. The effects of aramid pulp content on the mechanical properties and friction and wear properties of the materials were studied. Scanning electron microscopy was used to observe the surface morphology of the wear surface, and the mechanism of the aramid pulp in the friction materials was analyzed preliminarily. The testing results show that the aramid pulp has a significant increase in the impact strength and hardness of the specimens. There was a little change of the friction coefficient in these lower content of aramid pulp testing samples. As the aramid pulp content increases further, the friction coefficient of the materials increases significantly. The proper amount of aramid pulp in the material is helpful to form a dense and uniform friction layer, which is propitious to improve the friction stability and wear resistant. The specimens contenting 2% aramid pulp can achieve the best friction and wear properties.

Keywords : aramid pulp ; friction materials ; impact strength ; hardness ; friction and wear properties

在摩擦材料的各类组分中,增强纤维对于摩擦材料的力学性能有重要影响。传统的摩擦材料以石棉作为主要增强纤维,随着人们对环境和健康的要求不断提高,石棉逐步被各个国家禁止使用。20世纪70年代以来,以芳纶纤维为代表的多种纤维被开发成为石棉的替代品,逐渐在摩擦材料产业中获得应用^[1-3]。美国杜邦公司将芳纶短纤维进行高度原

纤化制成了 Kevlar 芳纶浆粕,保留了芳纶纤维高模量、高强度和良好的热稳定性及吸附性能,从而能与树脂等粘结剂更好地结合^[4-5]。如今,芳纶浆粕已经成为国外摩擦材料设计中的首选增强纤维^[6-7]。近年来,国内外研究者们对于芳纶浆粕的作用开展了很多研究, S. J. Kim 等^[8]研究发现芳纶浆粕有效提高了摩擦材料的摩擦稳定性,同时可以降低磨损

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目

通讯作者: 叶长松, 硕士, 主要研究方向为树脂基摩擦材料 E-mail: jerryycs@outlook.com

收稿日期: 2019-12-16

引用格式: 叶长松,付雪松,黄鹏,等. 芳纶浆粕对酚醛树脂基摩擦材料性能影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3):130-133, 138.

Ye Changsong, Fu Xuesong, Huang Peng, et al. Effect of aramid pulp on properties of phenolic resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):130-133, 138.

率。员荣平等^[9]通过建立摩擦性能的评价模型,发现芳纶浆粕体积分数为3.4%时综合性能最佳。尤秀兰等^[10]用芳纶浆粕取代石棉制备摩擦材料,改善了石棉摩擦材料高温磨损严重的缺点。

虽然人们对于芳纶浆粕在摩擦材料中对材料性能的作用有较多研究,但是对于芳纶浆粕含量对树脂基摩擦材料性能的影响规律和机制的研究尚不够充分,笔者通过干法热压成型制备了试验用摩擦材料,研究芳纶浆粕含量对树脂基摩擦材料力学性能和摩擦磨损性能的影响规律,并对芳纶浆粕在摩擦材料中的作用机制进行了分析探讨。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂: PF6130, 济南圣泉有限公司;

鳞片石墨: 80~90 nm, 青岛富润达有限公司;

重质氧化镁: 44 μm , 石家庄硕茂摩擦材料科技有限公司;

重晶石: 44 μm , 石家庄硕茂摩擦材料科技有限公司;

萤石: 15 μm , 石家庄硕茂摩擦材料科技有限公司;

Kevlar 芳纶浆粕: 8F1857, 0.95 mm, 杜邦公司;

碳纤维: 0.5 mm, 上海力硕复合材料科技有限公司。

1.2 仪器及设备

定速式摩擦磨损试验机: JF151 型, 吉林大学机电设备研究所;

简支梁冲击试验机: XJJ-5 型, 承德建德检测仪器有限公司;

塑料洛氏硬度计: XHR-150 型, 莱州华银实验仪器有限公司;

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

1.3 试样制备

试验以芳纶浆粕含量作为研究变量, 通过改变作为填料的重晶石含量, 保持总量恒定, 其余组分的含量保持不变, 设计 5 组试验配方, 见表 1。

表 1 试验原材料配方

试样编号	芳纶浆粕	树脂	石墨	萤石	重晶石	其它
P0	0	13	26	4	29	28
P1	1	13	26	4	28	28
P2	2	13	26	4	27	28
P3	3	13	26	4	26	28
P4	4	13	26	4	25	28

按表 1 配方称取各原料, 投入高速混料机中搅拌 30 s, 使各原料分布均匀, 无团聚现象。将搅拌后的原料放入模具中, 进行热压成型。热压温度保持 $(170 \pm 5)^\circ\text{C}$, 压力为 (12 ± 0.5) MPa, 保压 3 min。之后放入保温箱中, 温度为 $(170 \pm 5)^\circ\text{C}$, 时间为 6 h。

1.4 性能测试

根据 GB 5763-2008, 使用定速式摩擦试验机进行摩擦磨损试验, 试样尺寸为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 6\text{ mm}$; 使用 SEM 对磨损表面形貌进行观察。

根据 GB/T 1043-2008, 使用简支梁冲击试验机进行冲击试验, 测试材料的冲击强度, 试样尺寸为 $55\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

使用塑料洛氏硬度计测量试样的硬度, 加载载荷为 588 N, 选用 HRL 标尺。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

不同试样的冲击强度和硬度测试结果见表 2。从表 1 可以看出, 试验材料的冲击强度和硬度均随着芳纶浆粕含量增加而增大。芳纶浆粕对于提高材料的冲击强度具有显著的作用, 主要是因为芳纶浆粕表面具有丰富的类似羽毛形成了粗糙的表面, 并存在沿轴向排列的许多微原纤, 容易分散于基体之中^[11]。这些特殊的表观形态可以有效承担冲击载荷, 并有利于吸收断裂时的能量, 因此, 芳纶浆粕有效改善了材料的韧性。

表 2 试样冲击强度和硬度

项目	P0	P1	P2	P3	P4
冲击强度 ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.244	0.291	0.328	0.335	0.370
硬度 (HRL)	36	43.6	44	45	46.4

芳纶浆粕也提高了材料的硬度, 主要源于其自身很高的强度和模量, 对基体起到了支撑强化作用。在含量较低时, 提升材料硬度的效果比较明显, 当含量较高时, 芳纶浆粕在基体内部的有效支撑点逐渐趋于饱和, 材料硬度的提升效果变小。

2.2 摩擦磨损性能

(1) 摩擦系数

不同试样的摩擦系数随温度变化曲线见图 1。摩擦材料中的增强纤维自身的性质及与粘结基体间的界面强度影响着材料摩擦性能^[12]。图 1 显示, 不同芳纶浆粕含量时材料摩擦系数在 $100 \sim 350^\circ\text{C}$ 区间的变化趋势相似, 随着芳纶浆粕含量增加, 摩擦系

数整体呈上升趋势。由此表明,芳纶浆粕对于调节摩擦材料的总体摩擦系数是不错的组分。但是配方中芳纶浆粕含量较低时(P1, P2),摩擦系数与未加芳纶浆粕(P0)相比变化并不大。这主要是由于在纤维含量较低时,树脂的粘结作用对于芳纶浆粕的束缚较强,很少出现纤维剥落、拔出等情况,芳纶浆粕还不能对材料的摩擦过程产生明显作用。当配方中芳纶浆粕的含量较高时(P3, P4),摩擦系数出现了明显的上升,这是因为芳纶浆粕在材料中具有了较大的体积比,粘结树脂对纤维已不能形成充分的束缚,较多的芳纶纤维容易裸露在摩擦表面,芳纶浆粕自身的高强度和模量,在摩擦滑动过程中形成了较大的犁削抗力^[13],提高了界面摩擦力。

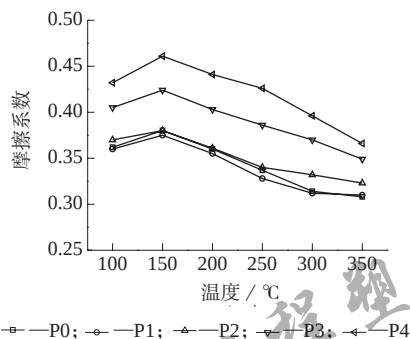


图1 不同芳纶浆粕含量试样的摩擦系数

(2) 摩擦稳定性。

材料的摩擦稳定性决定了制动过程的平稳程度。定量分析摩擦稳定性常采用摩擦稳定系数 α 和摩擦变化系数 γ 来描述,具体计算见式(1)、式(2)。

$$\alpha = \frac{\mu_{\text{avg}}}{\mu_{\text{max}}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{S}{\mu_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: μ_{avg} 为各试验温度下摩擦系数的平均值; μ_{max} 为摩擦系数的最大值; S 为摩擦系数的标准差。

利用图1的试验结果计算出摩擦稳定系数和变化系数,结果见图2。

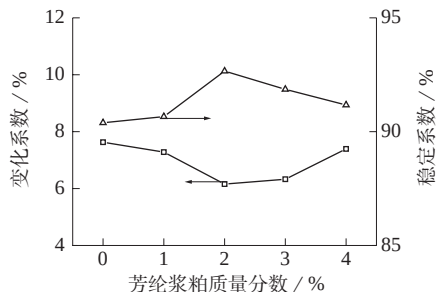


图2 不同芳纶浆粕含量试样的摩擦稳定系数和变化系数

从图2可以看出,随着芳纶浆粕含量的增加,摩擦稳定系数呈现先升高后降低的趋势,而摩擦变化系数则先降低后升高。在芳纶浆粕含量达到2%时,摩擦稳定系数最大,摩擦变化系数最小,表现出较好的摩擦稳定性。由此表明,适量的芳纶浆粕可以有效地改善材料的摩擦稳定性,而过量的芳纶浆粕反而会导致摩擦稳定性下降。

(3) 磨损性能。

摩擦材料的磨损率可以用于描述材料的磨损寿命,也是衡量摩擦材料性能的重要指标之一。图3给出了试验材料的磨损率随温度的变化情况。

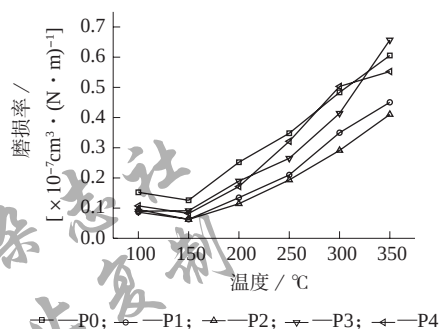


图3 不同芳纶浆粕含量试样的磨损率

从图3可以看出,芳纶浆粕使得材料的磨损率普遍降低,各试样的磨损率变化趋势都类似,随温度升高呈现先下降后上升的趋势,在150℃时磨损率比较低。其中,芳纶浆粕含量较低的P1和P2试样的磨损率,在各温度下都保持较低的水平;而芳纶浆粕含量较高的P3和P4试样,在较高温度区(200~350℃)的磨损明显加剧。可见在中低温区(100~200℃),芳纶浆粕对于降低材料磨损率的效果更加显著。

图4给出了不同芳纶浆粕含量试样,经过100~350℃摩擦试验后的总磨损率。由图4可知,随着芳纶浆粕含量的增加,材料的总磨损率先降低后上升,在芳纶浆粕含量为2%时最低。表明适量的芳纶浆粕可以提高摩擦材料的耐磨性,而当含量过多

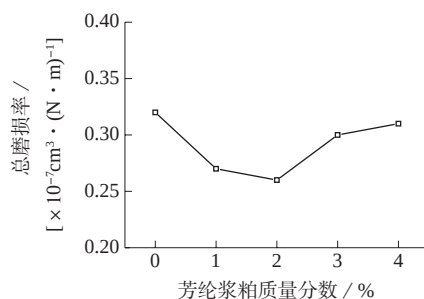
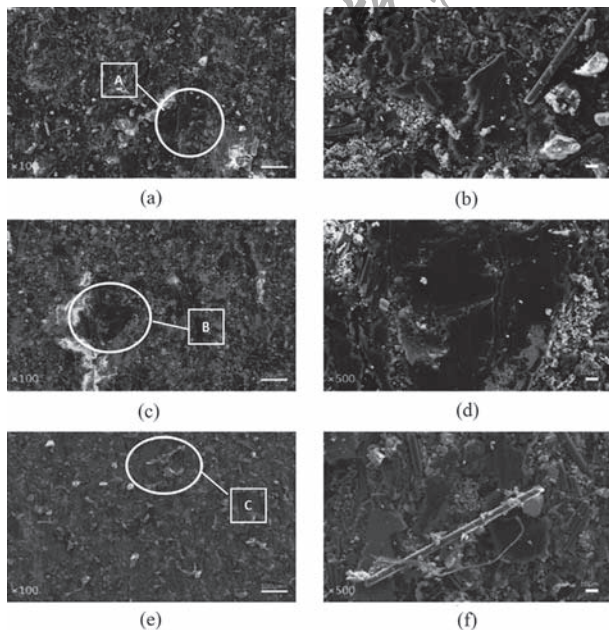


图4 不同芳纶浆粕含量试样的总磨损率

时,耐磨性反而下降。这是由于被粘结树脂很好束缚的芳纶浆粕,可以在摩擦表面建立较好的摩擦层,有效减少表面磨损^[14]。而当芳纶浆粕含量过高时,粘结树脂不能对芳纶浆粕形成很好的束缚,并且影响了树脂对其它组分材料的粘结,在摩擦过程中,材料的脱落加剧而磨损严重。

2.3 磨损表面形貌

图5为不同试样在350℃进行摩擦试验后的磨损表面形貌。未加入芳纶浆粕的P0试样表面磨损较为严重(图5a),表面仅有小块的摩擦层出现,但都存在严重的破损(图5d)。P2试样的磨损表面形貌如图5b显示,摩擦表面整体较为平整光滑,有较大块的摩擦层。在摩擦过程中摩擦材料主要承受剪切应力作用,材料脱落形成磨屑,在压力作用下形成摩擦层。大块稳定的摩擦层有利于稳定材料的摩擦系数,降低磨损率。在干摩擦磨损过程中,摩擦界面的摩擦层破坏是不可避免的^[15],摩擦层是处于破坏又再生的动态变化过程。由图5e可以看到摩擦层均匀且致密,同时周围有磨屑在继续形成摩擦层,这种摩擦层状态,使得P2试样具备良好的摩擦稳定性和耐磨性。在加入过量芳纶浆粕的P4试样的摩擦表面,几乎没有发现摩擦层(图5c),可以观察到的是一些碳纤维和芳纶纤维从基体中拔出(图5f)。



a—P0($\times 100$); b—P2($\times 100$); c—P4($\times 100$);
d—P0, A区局部放大($\times 500$); e—P2, B区局部放大($\times 500$); f—P4,
C区局部放大($\times 500$)

图5 不同试样的摩擦磨损表面形貌

尽管芳纶浆粕有助于形成摩擦层,但当芳纶浆粕没有被粘结树脂很好地束缚时,反而加剧了材料脱落和纤维拔出,导致难以形成比较稳定的摩擦层。

3 结论

(1) 芳纶浆粕可以有效提高摩擦材料的力学性能,随着芳纶浆粕含量增加,材料的冲击强度和硬度不断增大。

(2) 芳纶浆粕对材料的摩擦磨损性能具有影响。芳纶浆粕含量较低时,对摩擦系数影响较小,当质量分数超过2%时,使材料摩擦系数显著升高。芳纶浆粕含量对材料摩擦稳定性和耐磨性的影响呈现先提高后降低的趋势,适量的芳纶浆粕可以获得较好的摩擦系数稳定性和较低的磨损率。

(3) 芳纶浆粕有助于摩擦材料在摩擦过程中形成较稳定的摩擦层,但过量的芳纶浆粕会损害树脂对组分的粘结作用,导致纤维拔出,不利于摩擦层的形成。

参考文献

- [1] Ranganathan V, Konchady G, Krishnapillai S. Friction and wear studies on the aramid fibre based non-asbestos brake pads for wind-mill application[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 123-125:101-104.
- [2] Aranganathan N, Mahale V, Bijwe J. Effects of aramid fiber concentration on the friction and wear characteristics of non-asbestos organic friction composites using standardized braking tests[J]. *Wear*, 2016, 354:69-77.
- [3] Li J, Cai C L. The friction and wear properties of ECP surface-treated Kevlar fiber-reinforced thermoplastic polyimide composites[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2010, 49(2):178-181.
- [4] 尤秀兰,傅群,刘兆峰. 芳纶浆粕纤维的结构性能与应用[J]. *产业用纺织品*, 2001, 19(8):27-29.
You Xiulan, Fu Qun, Liu Zhaofeng. Progress of PPTA-pulp fibre[J]. *Technical Textiles*, 2001, 19(8):27-29.
- [5] Kamath G, Bhargava K. Comparison of impact strength of acrylic resin reinforced with Kevlar and polyethylene fibres[J]. *Indian J Dent Res*, 2002, 13(2):108-111.
- [6] Ibrahim S I, Abas R O, Abas F O. A comparison study of different ceramic filler on mechanical and thermal properties of glass, carbon, Kevlar / polyester composites[J]. *Engineering and Technology Journal*, 2010, 28(12):2 469-2 479.
- [7] Ghosh P, Ghosh D, Khastgir D, et al. Effect of aramid pulp and lapinas fibre on the friction and wear behaviour of NBR powder modified phenolic resin composite[J]. *Tribology Transactions*, 2016:1-29.

- Lou Di, Zhong Mingqiang, Chen Feng, et al. Synergistic modification of polypropylene with attapulgite / elastomer[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2010, 28(5):735-738, 764.
- [8] Zhang M X, Mao L X. Ternary polypropylene / polyolefin elastomer / attapulgite composites[C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2006, 11:477-480.
- [9] Pan B, Yue Q, Ren J, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of PA6 / attapulgite composites prepared by melt compounding [J]. Journal of Macromolecular Science, Part B:Physics, 2006, 45(6):1 025-1 037.
- [10] 王平华, 徐国永. 原位聚合制备 LDPE / 凹凸棒土纳米复合材料 [J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(3):266-269.
- Wang Pinghua, Xu Guoyong. Preparation of LDPE / attapulgite nanocomposites by in-situ polymerization[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2005, 21(3):266-269.
- [11] Wang Z, Zhou Y, Sun Y. Preparation characterization and infrared emissivity study of attapulgite/helical polyurethane composites [J]. Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2009, 19(2):202-207.
- [12] Liu P. Hyperbranched aliphatic polyester grafted attapulgite via a melt polycondensation process[J]. Applied Clay Science, 2007, 35(1):11-16.
- [13] 祖风华, 李荣波, 王莉, 等. 乙丙抗冲共聚物的分级与性能 [J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(5):53-57.
- Zu Fenghua, Li Rongbo, Wang Li, et al. Structure-property investigation of impact ethylene-propylene copolymer[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(5):53-57.
- [14] Liu N C, Yao G P, Huang H. Influences of grafting formulations and processing conditions on properties of silane grafted moisture crosslinked polypropylenes[J]. Polymer, 2000, 41(12):4537-4542.
- [15] 刘晓辉, 范家起, 李强, 等. 聚丙烯 / 蒙脱土纳米复合材料: I 制备、表征及动态力学性能 [J]. 高分子学报, 2000(5):563-567.
- Liu Xiaohui, Fan Jiaqi, Li Qiang, et al. Polypropylene / montmorillonite nano-composites: I Preparation, characterization and dynamic mechanical properties[J]. Acta Polymerica Sinica, 2000(5):563-567.
-
- (上接第 133 页)
- [8] Kim S J, Cho M H, Lim D S, et al. Synergistic effects of aramid pulp and potassium titanate whiskers in the automotive friction material[J]. Wear, 2001, 251(1-12):1 484-1 491.
- [9] 员荣平, 吕亚非. 芳纶浆粕增强制动摩擦材料摩擦性能的可拓评价 [J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(3):87-91.
- Yuan Rongping, Lyu Yafei. Extension evaluation of the friction performance of aramid pulp-reinforced brake friction composites[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2010, 37(3):87-91.
- [10] 尤秀兰, 潘婉莲, 傅群, 等. 芳纶浆粕取代石棉摩擦材料的摩擦学性能 [J]. 化工学报, 2005, 56(11):2 219-2 222.
- You Xiulan, Pan Wanlian, Fu Qun, et al. Frictional properties of PPTA pulps replacement of asbestos reinforced friction materials[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2005, 56(11):2 219-2 222.
- [11] 王雪明, 张佐光, 李敏, 等. 铜纤维 / 芳纶浆粕混杂增强摩擦材料的冲击性能研究 [J]. 材料工程, 2009(3):27-31.
- Wang Xueming, Zhang Zuoguang, Li Min, et al. Studies on impact strength of friction materials reinforced by aramid pulp and copper fiber[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(3):27-31.
- [12] 曹献坤, 杨晓燕. Kevlar 短纤维对摩擦材料性能的影响效应 [J]. 非金属矿, 2004(3):48-50.
- Cao Xiankun, Yang Xiaoyan. Effect of short Kevlar fiber on performances of friction materials[J]. Non-Metallic Mines, 2004(3):48-50.
- [13] 郭洪涛, 张佐光, 仲伟虹, 等. 碳纤维 / 芳纶浆粕摩擦阻复合材料初步研究 [J]. 复合材料学报, 2001, 18(2):50-53.
- Guo Hongtao, Zhang Zuoguang, Zhong Weihong, et al. Study on the carbon fiber / aramid pulp friction composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2001, 18(2):50-53.
- [14] Gopal P, Dharani L R, Blum F D. Hybrid phenolic friction composites containing Kevlar®: Part 1. Enhancement of friction and wear performance[J]. Wear, 1996, 193(2):199-206.
- [15] 凡艳丽, 吕亚非. 汽车制动过程中摩擦层的作用和形成机制 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(6):125-128.
- Fan Yanli, Lyu Yafei. Role and formation mechanism of friction layer during braking[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(6):125-128.