

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.07.021

芳纶浆粕含量对低树脂基刹车片摩擦磨损性能的影响

刘力¹, 李季菁¹, 钟厉²

(1. 重庆文理学院机电工程学院, 重庆 402160; 2. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 通过模压法制备混杂纤维增强低含量改性酚醛树脂基刹车片试样, 探究不同芳纶浆粕含量对低树脂基刹车片摩擦磨损性能和主要磨损机制的影响。结果表明, 芳纶浆粕能显著提升低树脂基刹车片的抗热衰退性能, 提高热衰退发生温度; 在高温区间 ($\geq 200^{\circ}\text{C}$), 芳纶浆粕能增强摩擦层强度, 吸附磨屑, 有效降低磨损率; 芳纶浆粕含量不同会改变低树脂基刹车片的主要磨损机制, 芳纶浆粕质量分数为 0% 和 1% 的试样主要磨损机制为扩展性的表面疲劳磨损, 芳纶浆粕质量分数为 2% 的试样主要磨损机制为非扩展性的表面疲劳磨损, 芳纶浆粕质量分数为 3% 的试样主要磨损机制为黏着磨损。

关键词: 芳纶浆粕; 改性酚醛树脂; 低树脂基刹车片; 摩擦磨损; 热衰退

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)07-0114-05

Influences of Aramid Pulp Content on Friction-Wear Performances of Low Resin-based Brake Pads

Liu Li¹, Li Jijing¹, Zhong Li²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China;

2. College of Mechatronic and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Hybrid fibers reinforced low content modified phenolic resin-based brake pads were prepared by compression molding method. The influences of different aramid pulp content on friction-wear performances and main wear mechanism of the low resin-based brake pads were studied. The results show that the thermal fade resistance of the low resin-based brake pad is improved significantly by aramid pulp and the temperature at which thermal fade occurs is also improved. At high temperature range ($\geq 200^{\circ}\text{C}$), the strength of friction layer is enhanced by aramid pulp, the wear rate is effectively reduced by adsorbing abrasive debris. The main wear mechanism of the low resin-based brake pads varies with aramid pulp content. The main wear mechanism of the brake pads with 0% and 1% aramid pulp is expandable surface fatigue wear, that of the brake pad with 2% aramid pulp is non-expandable surface fatigue wear, and that of the brake pad with 3% aramid pulp is adhesive wear.

Keywords: aramid pulp; modified phenolic resin; low resin-based brake pad; friction and wear; thermal fade

刹车片是汽车制动系统中最为关键的组成部分之一, 依靠与刹车盘间的摩擦作用实现汽车的减速、制动等功能, 因此刹车片的摩擦磨损性能对制动效率及可靠性具有决定性作用^[1-2]。随着汽车制造业和交通道路工程的高速发展, 以及新国标 GB 5763-2018《汽车用制动器衬片》即将实施, 对刹车片提出了更为严苛的标准, 要求其在较为恶劣的工作下依然能提供稳定高效的制动效果, 同时兼具耐磨性优异、低噪音甚至无噪音等一系列优点^[3-4]。

树脂基刹车片的主要成分包括有机树脂粘结剂、增强纤维和填料(增摩填料、减磨填料和空间填料)。若组分搭配合理且制备工艺合适, 树脂基刹车片的主要优势在于具有较好的摩擦系数和耐磨性, 兼具一定的耐热性和强度, 其缺点主要是在高荷载使用条件下运行易出现热衰退^[5]。究其原因, 主要在于摩擦热导致刹车片中有机组分(主要是有机树脂粘结剂)分解, 基体粘结强度下降, 结构松散不能有效提供摩擦力^[6]。

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究重点项目(cstc2015jcyjBX0140), 重庆市大学生创新创业训练计划项目(201810642018)

通讯作者: 刘力, 硕士, 实验师, 主要从事表面强化技术及摩擦材料的研究 E-mail: 330349770@qq.com

收稿日期: 2019-05-07

引用格式: 刘力, 李季菁, 钟厉. 芳纶浆粕含量对低树脂基刹车片摩擦磨损性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7): 114-118.

Liu Li, Li Jijing, Zhong Li. Influences of aramid pulp content on friction-wear performances of low resin-based brake pads[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7): 114-118.

树脂以粘结薄膜形式包覆其它组分,使得原材料形成致密具有相当强度的整体。实际生产中,往往使用各类改性酚醛树脂,为提高其耐热性,很多学者做了大量工作。比如冯利邦等^[7]利用磷酸对酚醛树脂改性,提高其热稳定性以降低材料在高温阶段热分解量。冯竞伟等^[8]利用溶液接枝法辅以增韧剂制备改性酚醛树脂,降低了材料高温体积磨损率。江威等^[9]利用氧化铜对酚醛树脂基摩擦材料进行改性,氧化铜能够提高酚醛树脂的耐热性,还能降低磨损率,减少热衰退的产生,摩擦材料的主要磨损形式也由磨粒磨损转变为黏着磨损。虽然耐热性都有一定程度的提升,但都没有规避掉高温热分解较为严重的现象。

芳纶浆粕经研磨高度微原纤化,呈松散羽毛状,微原纤沿纤维轴向排列,形成较大的表面积,吸附性优异,能与粘结剂和填料等有效结合^[10]。此外,芳纶浆粕具有的刚直性大分子链结构使得其强度、模量和耐热性都非常出众。有研究表明芳纶浆粕的热分解温度达 500℃ 以上,甚至熔融状态也不分解,其耐热性对树脂基刹车片的重要性不言而喻^[11]。

笔者主要针对树脂基刹车片的热衰退问题,采用低含量改性酚醛树脂辅以丁腈胶粉作为有机粘结剂,另补充金属硫化物充当高温无机粘结剂,制备混杂纤维增强低树脂基刹车片(以芳纶浆粕为变量)。通过摩擦磨损性能测试,观察磨损表面微观形貌,以研究芳纶浆粕含量对低树脂基刹车片摩擦磨损性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

改性酚醛树脂: 流动度 30~45 mm, 聚合速度 70~110 s, 游离酚含量 ≤ 1.5%, 济宁华凯树脂有限公司;

丁腈胶粉: 150~180 μm, 大冶市锦鹏摩擦材料有限公司;

芳纶浆粕: 密度 1.45 g/cm³, 长度 0.7~1.6 mm, 比表面积 7~11 m²/g, 美国杜邦公司, 其微观形貌如图 1 所示;

六钛酸钾晶须: 直径 0.3~0.6 μm, 长度 10~20 μm, 上海凯射丰实业有限公司;

钢棉纤维: 直径 0.04~0.05 mm, 长度 2.8~3.2 mm, 河南龙鑫金属纤维有限公司;

氧化铝, 鳞片石墨, 重晶石, 硫化铜, 硫化锑, 蛭石: 市售。

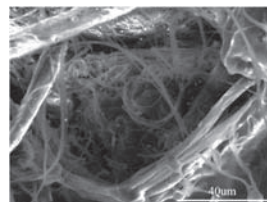


图 1 芳纶浆粕的微观形貌

1.2 主要仪器及设备

犁耙式混料机: XL633 型, 5 L, 武汉市祥龙摩擦材料有限责任公司;

实验室压机: XL100-63T 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限责任公司;

台式干燥箱: XL702C 型, 0~300℃, 武汉市祥龙摩擦材料有限责任公司;

定速式摩擦材料试验机: XL112 型, 武汉市祥龙摩擦材料有限责任公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Quanta-250 型, FEI 公司。

1.3 试样制备

低树脂基刹车片材料配方如表 1 所示, 其中的填料各组分分配比如表 2 所示。从 A1 至 A4 配方, 逐渐增加芳纶浆粕含量, 相应逐渐减少空间填料蛭石含量。

表 1 低树脂基刹车片材料各组分质量分数 %

配方编号	酚醛树脂	丁腈胶粉	芳纶浆粕	六钛酸钾晶须	钢棉纤维	硫化铜	硫化锑	填料
A1	8	2	0	3	23	5	5	54
A2	8	2	1	3	23	5	5	53
A3	8	2	2	3	23	5	5	52
A4	8	2	3	3	23	5	5	51

表 2 填料各组分质量分数 %

配方编号	氧化铝	鳞片石墨	重晶石	蛭石
A1	3	15	25	11
A2	3	15	25	10
A3	3	15	25	9
A4	3	15	25	8

利用机械混合法借助混料机对芳纶浆粕进行开散处理, 以缓解其团聚效应。将芳纶浆粕和配方中的少量鳞片石墨单独混料 15 min, 得到质地相对均匀、蓬松的芳纶浆粕。随后, 所有原材料共同混料 25 min, 获得模压料。在实验室压机上进行热压工序, 参数如表 3 所示。

表 3 热压工序参数

项 目	温度 /℃	压力 /MPa	保压时间 /s	释压时间 /s
工序 1	165	14	20	15
工序 2	165	14	20	15
工序 3	165	14	20	15
工序 4	165	14	240	

采用台式干燥箱对压制成型刹车片进行固化热处理,过程如图2所示。最后,利用切样机从同一摩擦表面上加工出 25 mm × 25 mm × 7 mm 试样。

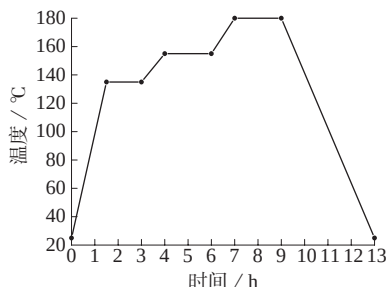


图2 固化热处理过程

1.4 摩擦磨损性能测试

试样的摩擦磨损性能测试参照 GB/T 5763-2008 第四类衬片标准,在定速式摩擦材料试验机上进行,测试原理如图3所示。测试前先用砂纸将摩擦盘打磨光滑,测试转速 480 r/min,加载 98 N。升温阶段升温范围为 100~350℃,恢复阶段由 300℃降至 100℃,每 50℃为一个试验温度节点。利用千分尺测量每个温度节点试样四角及中心位置磨损厚度,并录入测试系统,计算机根据测试数据自动生成摩擦系数和磨损率。

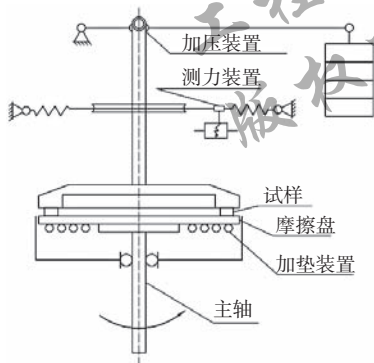


图3 摩擦试验机原理图

1.5 微观形貌表征

制备的刹车片导电性能非常弱,需先进行镀金处理,随后借助 SEM 对刹车片磨损表面微观形貌进行观察分析。

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能

图4为不同芳纶浆粕含量的试样摩擦系数。观察图4中试样摩擦系数走势发现,总体来说,随着芳纶浆粕含量的提高,试样摩擦系数也有所上升。在低温阶段 ($\leq 200^\circ\text{C}$), A1 和 A2 试样摩擦系数总体低于 A3 和 A4 试样,说明适当提高芳纶浆粕含量对

低树脂基刹车片有一定的增摩效果。在 200~250℃ 区间, A1 试样率先出现热衰退,其余试样未出现热衰退;在 250~300℃ 区间,继 A1 试样后, A2 试样也开始出现热衰退, A3 和 A4 试样还相对稳定;在 300~350℃ 区间, A3 和 A4 试样也出现热衰退现象。依据热衰退率计算公式可得, A1, A2, A3 和 A4 试样的热衰退率分别为 15.8%, 10.3%, 7.5% 和 5%。可见,芳纶浆粕能显著提升刹车片的抗热衰退性能即提升高温阶段的摩擦系数稳定性,提高热衰退发生温度。

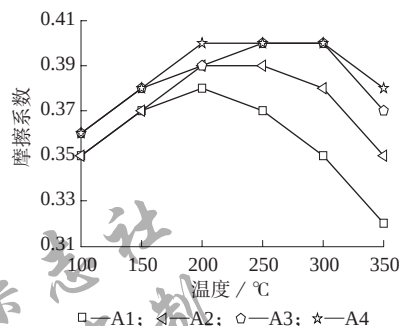


图4 不同配方的试样摩擦系数

图5为不同芳纶浆粕含量的试样磨损率。观察图5试样磨损率走势可知,磨损率随温度的升高而升高。A1 试样的磨损率在 200℃ 以后明显高于其它试样, A3 和 A4 试样在所有温度区间磨损率基本持平, A2 试样介于前两者之间。这说明,在高温区间 ($\geq 200^\circ\text{C}$) 试样的磨损率随着芳纶浆粕含量的增加有所降低,即芳纶浆粕能有效降低刹车片的高温磨损率。从 A3 和 A4 试样磨损率走势可看出,当芳纶浆粕质量分数达 2% 以上时,对磨损率的影响较小。

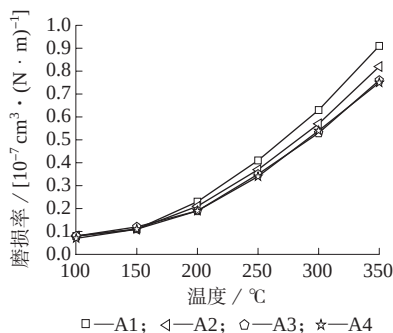


图5 不同配方的试样磨损率

图6为芳纶浆粕在 A3 试样磨损表面的形貌分布情况。从图6可明显观察到芳纶浆粕呈松散羽毛状,被树脂很好地浸润,与填料等组分结合较好,嵌入在摩擦层中,形成基体增强骨架结构。加之其本

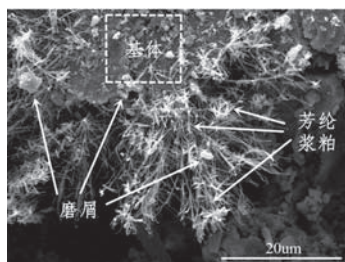
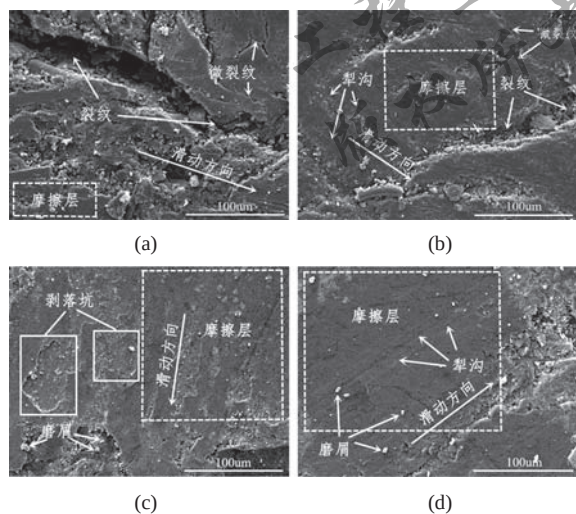


图6 A3 试样磨损表面芳纶浆粕形貌图

身优异性能,即摩擦系数稳定、磨损率小、强度高及耐高温性好,能有效增强摩擦层及基体强度,使其不被轻易撕裂、剥落,同时吸附住磨屑和断裂的摩擦层,进而有效降低刹车片的高温磨损率。

2.2 磨损机制分析

对刹车片磨损机制的分析不能一概而论,摩擦表面磨损类型多样,需要区分主要磨损类型和次要磨损类型。此外,不同类型的磨损形式,可以单独发生、相继发生或者同时发生,在刹车片磨损机制研究中,磨损通常是多种磨损机制共同作用的结果体现,以其中1种或2种为主要磨损机制^[12]。在试验中,观察经350℃定速试验的刹车片磨损表面,可根据微观形貌推测分析高温磨损形式,明确磨损机制。图7为各试样磨损表面SEM照片。



a—A1 试样; b—A2 试样; c—A3 试样; d—A4 试样

图7 不同配方的试样磨损表面SEM照片(放大1000倍)

图7a为A1试样磨损表面,磨损表面存在较大的裂纹及大量微裂纹,在滑动摩擦时,由于周期性荷载及热应力,使得接触区域产生较大的交变应力,一旦应力超过基体材料强度极限时,该处摩擦层易出现塑性变形,进而出现微裂纹,而后缓慢扩展为较大疲劳裂纹^[13]。还可以看到图7a中的摩擦层不连续,在裂纹中的磨屑呈块状或粒径较大。此外,在高温阶段,热量会导致刹车片中有机物分解和碳化,产

生硬质碳化层,其本身强度不高易呈块状脱落。基体强度的不足,使得摩擦层变得不稳定继而在摩擦过程中能提供的摩擦力有限,直接反应为摩擦系数不高,而疲劳裂纹和大量磨屑都会使得磨损率升高^[14]。因此,A1试样高温摩擦系数低且磨损率较高,此时的磨损机制主要为扩展性的表面疲劳磨损。

图7b为A2试样磨损表面,磨损表面依旧存在裂纹及微裂纹,磨屑总体尺寸相对于A1试样偏小,同时“犁沟”也较为明显,摩擦层连续性相对A1试样较好。可以看出加入质量分数1%的芳纶浆粕后,磨损表面的裂纹情况已得到明显改善,这说明基体材料的抗剪强度和冲击强度有所提高。基体强度的提高,使得摩擦层能提供较为稳定的摩擦力,直接体现为A2试样的抗热衰退性能相较于A1试样提升明显,且磨损率下降。但由于刹车片的各基体组分材料热膨胀系数不同,基体内部也容易积聚热应力,加上循环荷载,两者共同作用还是导致了裂纹的产生,但裂纹扩展深度和裂纹数量不及A1试样。此外,同A1试样一样,硬质填料和脱落磨屑对摩擦表面产生犁削作用,形成犁沟。因此,A2试样的磨损机制主要为扩展性的表面疲劳磨损,并伴有一定的磨粒磨损。

图7c为A3试样磨损表面,磨损表面存在很多片状和麻点状剥落坑和一些磨屑,摩擦层连续性较好。A3与A1和A2试样最大的区别在于没有明显的大裂纹,根据脱层理论,初始裂纹位于亚表层平行于表层,每次裂纹受一次循环荷载,就在同一深度扩展一段距离,直至扩展到临界长度,导致摩擦层以薄片形式剥落下来,形成磨屑^[15]。剥落坑的出现导致摩擦层面积萎缩,摩擦力下降。因此,A3试样在300~350℃出现热衰退现象,主要磨损形式是非扩展性的表面疲劳磨损。

图7d为A4试样磨损表面,磨损表面存在一些磨屑和大量犁沟,少量剥落坑,摩擦层连续性很好。A4试样的热衰退较小,是得益于以下几点因素:一是质量分数3%芳纶浆粕进一步提升摩擦层的稳定性,提供了较大的摩擦力,有利于稳定摩擦系数;二是有机物分解产生的润滑膜会降低摩擦系数,而摩擦层上的磨粒能有效破坏它们,避免摩擦系数进一步下降;三是硬质填料和黏着脱落的基体材料充当磨料附着在摩擦界面的滚动和摩擦犁削作用虽然造成磨损率增大,但能提供较大摩擦力。因此,A4试样的主要磨损形式是黏着磨损,同时伴有一定的磨

粒磨损。

3 结论

(1) 芳纶浆粕能显著提升刹车片的抗热衰退性能,提高热衰退发生温度。

(2) 在高温区间 ($\geq 200^{\circ}\text{C}$), 芳纶浆粕能增强摩擦层强度, 吸附磨屑, 有效降低磨损率。

(3) 低树脂基刹车片中芳纶浆粕含量会改变主要磨损机制, A1 和 A2 试样为扩展性的表面疲劳磨损, A3 试样为非扩展性的表面疲劳磨损, A4 试样为黏着磨损。

参考文献

- [1] Ji Zhengjia, Luo Wanyue, Zhou Keke, et al. Effects of the shapes and dimensions of mullite whisker on the friction and wear behaviors of resin-based friction materials[J]. Wear, 2018, 406–407:118–125.
- [2] Leyu L, Nicholas E, Sebastian K, et al. Study on the impact of graphene and cellulose nanocrystal on the friction and wear properties of SBR/NR composites under dry sliding conditions[J]. Wear, 2018, 414–415:43–49.
- [3] 张翔, 甘春雷, 黎小辉, 等. 氧化铝纤维含量对陶瓷基摩擦材料性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(10):3 517–3 523.
Zhang Xiang, Gan Chunlei, Li Xiaohui, et al. Effect of alumina fiber content on the performance of ceramic-matrix friction materials[J]. Materials Reports, 2018, 32(10):3 517–3 523.
- [4] Lü Hui, Yu Dejie. Brake squeal reduction of vehicle disc brake system with interval parameters by uncertain optimization[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(26):7 313–7 325.
- [5] 谢奥林, 尹彩流, 王秀飞, 等. 改性玄武岩纤维增强树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能[J]. 润滑与密封, 2018, 43(9):131–137.
Xie Aolin, Yin Liucui, Wang Xiufei, et al. Friction and wear properties of modified basalt fibers reinforced resin-based composites[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(9):131–137.
- [6] 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):86–96.
Cong Peihong, Wu Xingyang, Bu Juan, et al. Progress in research of organic frictional materials for automobile and train braking[J]. Tribology, 2011, 31(1):86–96.
- [7] 冯利邦, 李晖, 郝相忠, 等. 磷酸改性酚醛树脂的结构与耐热性能[J]. 材料工程, 2013(9):75–78.
Feng Libang, Li Hui, Hao Xiangzhong, et al. Structure and thermal resistance of phosphoric acid-modified phenol-formaldehyde resin[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(9):75–78.
- [8] 冯竞伟, 余传柏, 覃渭添, 等. 腰果酚接枝丁腈橡胶及其改性酚醛树脂基摩擦材料的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(7):164–169.
Feng Jingwei, Yu Chuanbai, Qin Weitian, et al. Preparation and performance of phenolic resin-based friction material modified with cardanol-graft-LNBR[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(7):164–169.
- [9] 江威, 何福善, 郑开魁, 等. 氧化镧改性树脂基复合材料摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44(1):64–69.
Jiang Wei, He Fushan, Zheng Kaikui, et al. Effect of lanthanum oxide on tribological performance of brake friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(1):64–69.
- [10] 马岩, 逢见光, 朱超, 等. 芳纶短纤维对氯化丁腈橡胶复合材料性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(9):29–34.
Ma Yan, Pang Jianguang, Zhu Chao, et al. Effect of short aramid fiber on properties of HNBR composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(9):29–34.
- [11] 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.
- [12] 刘力, 钟厉. 工艺参数对低树脂基刹车片性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(2):82–86.
Liu Li, Zhong Li. Effects of technical parameters on properties of low resin-based brake pads[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(2):82–86.
- [13] Sun Weitao, Zhou Wenlong, Liu Jianfa, et al. Development of a composite friction material with excellent fade resistance by employing oversized ceramic particles[J]. Tribology Letters, 2018, 66(1).doi:10.1007/s11249-017-0974-x.
- [14] 钟厉, 陈梦青, 罗明宝, 等. 混杂纤维增强低树脂基摩擦材料磨损机理及性能研究[J]. 表面技术, 2018(3):165–171.
Zhong Li, Chen Mengqing, Luo Mingbao. Wear mechanism and properties of low-resin-based friction materials reinforced by hybrid fiber[J]. Surface Technology, 2018(3):165–171.
- [15] Kim S H, Jang H. Friction and vibration of brake friction materials reinforced with chopped glass fibers[J]. Tribology Letters, 2013, 52(2):341–349.

欢迎订阅 2019 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2019 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2019 年定价 20 元/期, 全年 240 元。《化学分析计量》为双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2019 年定价 20 元/期, 全年 120 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355