

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.05.002

插层改性膨润土对聚合物基摩擦材料摩擦性能的影响

马原野¹,王占红¹,侯贵华²,蒋穹¹,杨子润¹,黎水平¹

(1. 盐城工学院材料工程学院,江苏盐城 224051; 2. 盐城工学院,江苏省新型环保重点实验室,江苏盐城 224051)

摘要:采用热压成型工艺制备了插层改性膨润土掺杂的聚合物基摩擦材料,通过对比改性前后的膨润土掺杂的数据结果,进而探索插层改性膨润土的摩擦材料磨损表面的形态、物理力学性能、摩擦磨损性能的变化规律。结果表明:插层改性之后,膨润土的形貌由不规则的颗粒状变成片层状结构,晶面间距比原来增大了 0.089 22 nm,表明季铵盐十六烷基三甲基溴化铵已经成功地插层进入膨润土层间。与未改性的膨润土相比,季铵盐改性膨润土增强的摩擦材料磨损表面更为平整,这与表面生成的摩擦膜密切相关,其硬度从未改性膨润土掺杂摩擦材料的 85~95 降低到了 80~90,冲击强度明显提高,摩擦系数较高,磨损率较低,尤其是当温度为 350℃ 时,季铵盐改性膨润土掺杂的摩擦材料其摩擦系数从原来的 0.15 增加至 0.23,而磨损率从原来的 $2.25 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 降低至 $0.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,综合性能变好。

关键词:插层改性;膨润土;聚合物基摩擦材料;摩擦;磨损

中图分类号: TB 332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)05-0006-06

Effect of Intercalated Modified Bentonite on Tribology Properties of Polymer Matrix Friction Materials

Ma Yuanye¹, Wang Zhanhong¹, Hou Guihua², Jiang Qiong¹, Yang Zirun¹, Li Shuiping¹

(1. School of Materials Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. Key Laboratory of New Environmental Protection of Jiangsu Province, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: Polymer matrix friction materials filled with the intercalated modified bentonite were prepared by heat-press molding method. Change rules of the morphology of worn surface, physical and mechanical properties, and friction and wear properties of the samples were investigated respectively by contrasting the data results of friction materials including the original and modified bentonite. The results show that the morphology of bentonite has changed from irregular granular to lamellar structure, and the interplanar spacing increases by 0.089 22 nm after intercalation, which indicate that the etyltrimethylammonium bromide has been successfully intercalated into the interlamination of bentonite. The friction material including modified bentonite shows smoother wear surface than that of the friction material including the original bentonite, which is closely related with the friction films formed on the surface. The friction material doped by the modified bentonite shows higher hardness (85-95) than that of friction material doped by the original bentonite (80-90). Moreover, the impact strength and friction coefficient increase obviously. The wear rate is low. Especially, the friction coefficient increases from 0.15 to 0.23 at 350℃, while the wear rate decreases from $2.25 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ to $0.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ after doping the modified bentonite. Therefore, the comprehensive performance of the friction material is better.

Keywords: intercalated modification; bentonite; polymer matrix friction material; friction; wear

无机矿物颗粒增强的聚合物基复合材料具有耐高温、耐磨、强度高、热膨胀系数低、加工制造工艺简单、成本低廉等特点。其与有机及金属改性剂增

强的摩擦材料相比,具有无可比拟的价格优势,因而在摩擦材料领域具有广阔的应用前景^[1-6]。目前,人们已经开展了多种无机矿物颗粒增强的聚合物基复

基金项目:国家自然科学基金项目(51603179),江苏高校品牌专业建设工程项目(PPZY2015A025),2017 校企合作项目(10424)

通讯作者:王占红,高级实验师,主要从事聚合物基摩擦材料研究 E-mail: zhanhong1983@163.com

收稿日期: 2018-03-08

引用格式:马原野,王占红,侯贵华,等.插层改性膨润土对聚合物基摩擦材料摩擦性能的影响[J].工程塑料应用,2018,46(5): 6-11.

Ma Yuanye, Wang Zhanhong, Hou Guihua, et al. Effect of intercalated modified bentonite on tribology properties of polymer matrix friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5): 6-11.

合材料的相关研究,并取得了良好的效果。王振波等^[7]采用粉末冶金法制备了不同含量膨胀蛭石的铜基摩擦材料,并指出含 1% 膨胀蛭石的铜基摩擦材料的摩擦系数较高,但含量超过 1% 时其摩擦系数会逐渐降低。低转速时,加入膨胀蛭石的材料磨损率显著降低;在中高转速下,随蛭石含量从 1% 增加到 4%,材料的磨损率逐渐增大。同时他们利用粉末冶金方法制备了含三种不同类型莫来石的铜基摩擦材料,结果表明:采用蓝晶石煅烧莫来石的摩擦材料具有较好的综合性能^[8]。卢尚健等^[9]以不同含量的改性矾土来制备树脂基复合摩擦材料。结果表明:添加质量分数为 8% 的改性矾土时,摩擦材料的摩擦系数相对较高,高温抗热衰退系数也比未添加改性矾土的样品增加了约 12%,表现出良好的抗热衰退性能。N. Dadkar^[10]制备了粉煤灰和芳纶纤维协同增强的聚合物基摩擦材料,结果表明:聚合物基摩擦材料的摩擦性能衰退主要取决于树脂含量。且随着粉煤灰含量降低,性能衰退减少。

目前,企业生产摩擦材料用的无机颗粒大多数是以微米级形式掺杂,这些大颗粒与聚合物基体之间存在严重的有机无机界面不相容问题。与纳米尺寸的颗粒相比,微米级颗粒的比表面积小,与基体材料接触面有限,因此限制了摩擦材料性能的提高。若是把微米级的无机矿物颗粒加工成纳米级,其将具有纳米颗粒的奇异特性,如尺寸小、比表面积大、表面能高等等^[11-13],有望能够利用高活性的纳米材料表面来提高其与聚合物之间的结合性。

膨润土是一种以蒙脱石为主要矿物成分的非金属矿物,本课题组之前的研究已证明^[14],在摩擦材料中掺杂质量分数为 40% 的膨润土(微米级颗粒),摩擦材料综合性能最好。而膨润土是一种无机材料,它与有机材料(树脂橡胶等)的界面结合性问题仍需要解决。因此,笔者选用有机改性剂改性膨润土,通过改性后的膨润土增强聚合物基摩擦材料,考察了改性后的膨润土粒子对聚合物基摩擦材料性能的影响,具体研究了摩擦材料的密度、硬度、磨损表面形态、摩擦磨损性能的变化规律,揭示改性膨润土掺杂的聚合物基摩擦材料的改性机理,为制备低成本高性能聚合物基摩擦材料提供一定的理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

酚醛树脂: 2123, 60 μm , 游离酚含量 < 2%, 淮

安市宏泰酚醛塑料有限公司;

丁腈橡胶粉: 40 目 (350 μm), GS33, 山东高氏科工贸有限公司;

铜纤维: 长度为 3 mm, 长径比为 30, 四川达县铜丝厂;

纤维素纤维(长度 2~3 mm, 直径 15~20 μm)、芳纶纤维(长度 3~50 mm): 盐城爱丽维纤维制品有限公司;

焦炭、石墨: 200 目 (75 μm), 南京功磊矿产品有限公司;

碳酸钙粉: 200 目, 江西利源粉体科技有限公司;

硫化铅: 1~10 μm , 上海先芯新材料科技有限公司;

长石粉: 200 目, 平江县兴泰长石粉厂;

钢纤维、精铁矿粉、铬铁矿粉: 工业品, 市售;

氧化铝: 分析纯, 天津市鼎盛鑫化工有限公司;

膨润土: 粒度 < 200 目, 浙江丰虹粘土化工有限公司。

表 1 列出了摩擦材料的配方组成。

原料	用量
树脂	10
橡胶粉	2
铜纤维	3
钢纤维	15
纤维素纤维	2
芳纶纤维	1
石墨	10
硫化铅	5
焦炭	9
碳酸钙	10.5
长石粉	7
精铁矿	7
铬铁矿	3.5
氧化铝	2
膨润土	13
总计	100

1.2 主要设备及仪器

高速混合机: SHR-10A 型, 江苏张家港市博瑞克机械制造有限公司;

调压变速式摩擦试验机: X-DM 型, 咸阳新益摩擦密封设备有限公司;

平板硫化机: XLB-D 型, 上海轻工机械股份有限公司;

数显电热鼓风干燥箱: XMTA-6000 型, 吴江华东标准烘箱有限公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器: DF-101S 型, 郑

州常成贸易有限公司;

塑料冲击试验仪: XJJ-5 型, 承德试验机有限责任公司;

塑料洛氏硬度计: XHR-150 型, 上海材料试验机厂;

扫描电子显微镜 (SEM): QUANTA 200 型, 美国 FEI 公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: X' Pert3 Powder 型, 荷兰 PANalytical 公司。

1.3 试样制备

(1) 纳米膨润土的制备。

称量纳基膨润土 17 g, 倒入 200 mL 的蒸馏水中, 制成均匀的膨润土悬浮液。然后称取 0.85 g 季铵盐十六烷基三甲基溴化铵倒入膨润土悬浮液中, 将配好的膨润土悬浮液置于 80℃ 恒温水浴中搅拌 6 h。将上述制得的悬浮液放于 90℃ 的鼓风干燥箱中, 直至干燥结块, 将制得的块状膨润土粉碎、研磨、过筛, 装袋备用。

(2) 摩擦试样的制备。

按照表 1 中的配方组成, 称取各原料, 将其放入高速混合机中搅拌 40 min, 得到均匀的混合料。称取 55 g 混合料放入模具中, 铺平。将模具置于层压试验机中 (设置压制温度为 160℃, 压力为 40 MPa), 先把模具中的混合料预热 2 min, 再热压 1 min, 打开模具上盖放气 5 s; 再热压 1 min, 再放气 5 s; 最后再压 5 min, 取出模具, 脱模, 样片冷却至室温。重复上述步骤, 制得至少 5 组试样。接着, 对制得的样片进行热处理, 热处理温度为 180℃, 保温 8 h 后随炉冷却, 装袋备用。

1.4 性能测试

(1) 摩擦试样冲击强度与硬度测试。

根据 GB/T 5765-1986, 将热处理后样片 (55 mm × 6 mm × 10 mm) 置于冲击试验机上, 试验机选取的量程为 1 J/cm²。放置好试样后, 将试验机的摆锤自由摆下, 打断试样, 此时记下冲击试验机表盘上的读数, 每组试样重复 5 次, 求平均值。

根据 GB/T 5766-2007, 将摩擦试样置于塑料洛氏硬度仪上, 将样片与硬度测量表头贴紧, 按下测试按钮, 记下仪器仪表盘上读数, 每组样测试 5 次数, 求平均值。

(2) 摩擦磨损性能测试。

按照 GB/T 5763-2008 来评价摩擦材料同灰铸铁圆盘 (材质为 GB/T 9439 中灰铸铁牌号

HT250, 硬度牌号 HB200, 圆盘金相组织为珠光体) 作为对偶件在干摩擦条件下的摩擦磨损性能。25 mm × 25 mm × 6 mm 样片热处理后, 选取表面完好的摩擦样片两片, 先将其置于砂纸上打磨 (正反两面都要进行打磨, 保证摩擦试样两面较平整), 将打磨好的两片试样装在调压变速摩擦试验机上测试摩擦磨损性能, 并记录实验数据。

2 结果与讨论

2.1 膨润土的形貌分析

将膨润土粉末试样置于扫描电镜下观察, 未处理膨润土和改性后的膨润土的 SEM 图如图 1 所示。

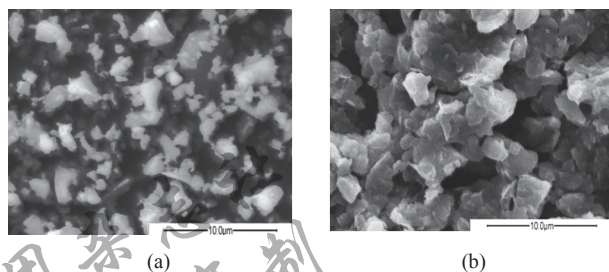


图 1 膨润土的 SEM 图
a—未处理; b—改性后

图 1a 是未处理的膨润土颗粒, 其为大小不一、不规则的颗粒状, 尺寸 < 5 μm, 部分颗粒发生团聚。图 1b 为纳米化后的膨润土, 明显看到膨润土为片层状结构, 这表明插层剂已成功进入膨润土层间, 使得膨润土发生片层剥离, 剥离效果明显。

2.2 膨润土的 XRD 分析

图 2 为膨润土试样的 X 射线衍射图谱。

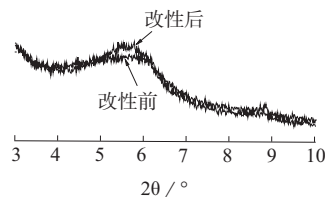


图 2 膨润土改性前后的 X 射线衍射图

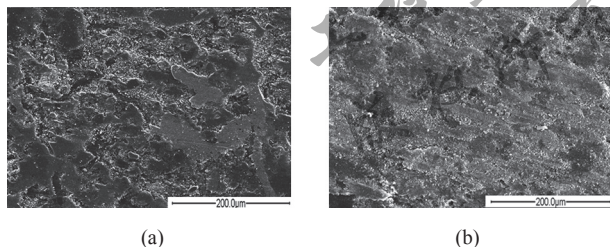
由图 2 可知, 未改性膨润土的 d_{001} 特征峰对应衍射角 2θ 值为 5.88°, 根据布拉格方程 $2d\sin\theta=n\lambda$, 可得对应的晶面间距为 $d_{001}=1.50185$ nm, 而改性膨润土的 d_{001} 的特征峰对应衍射角 2θ 为 5.55°, 对应 $d_{001}=1.59107$ nm, 层间距增大 0.08922 nm, 改性后膨润土的衍射角向低角度方向偏移, 说明季铵盐十六烷基三甲基溴化铵已经插层进入膨润土层间, 它能够置换出膨润土层间的钠离子, 利用其有机大分子结构使得膨润土的层间距增大, 从而将膨润土剥离成片状, 这与扫描电镜得到的结果一致。另外, 有机物进入膨润土结构中, 使得膨润土表面由原来

的亲水性变为疏水性,不仅强化了膨润土与有机基体材料之间的相容性,也将有效地提高膨润土在有机基体中分散的均匀性,更有利于有机单体或聚合物对其进一步插层复合。

2.3 膨润土改性前后对摩擦材料磨损表面形貌影响

图3为膨润土增强的摩擦材料磨损表面形貌。图3a为未改性的膨润土增强的摩擦材料试样磨损表面的形貌,其表面凹凸不平,较为粗糙,表面分布着磨粒、划痕和凹坑。因为摩擦材料在与对偶摩擦时,摩擦试样中的硬质微凸体所受的剪切应力大于其自身与基体的粘结力,此时这些物质会沿着滑动方向脱落。脱落后的一部分磨屑仍存在于两界面间,在制动压力下,脱落的硬质颗粒受到压应力,此时会反作用于摩擦表面,在摩擦表面形成划痕,甚至产生凹坑,还有很多颗粒在剪切应力作用下,移动到凹坑里,填满了凹坑。

图3b为改性膨润土增强的摩擦材料试样的磨损表面形貌。磨损表面平整度较好,摩擦材料的表面上覆盖了一层摩擦膜,这层膜会起到一定润滑作用,降低摩擦材料和摩擦盘之间的磨损。因此,改性后膨润土增强的摩擦材料其磨损表面相对较平整。



a—未处理膨润土增强; b—改性后膨润土增强

图3 改性前后膨润土增强摩擦材料的磨损表面 SEM 图

2.4 膨润土增强摩擦材料的硬度和冲击性能分析

摩擦材料试样的硬度较大,对对偶盘的损伤也较大,还会产生严重噪音污染,因此摩擦材料应保证合适的硬度。图4为膨润土处理前后增强的两组摩擦材料试样的硬度测试结果。硬度和冲击强度每组试样测试5次,每次分别编号为1[#],2[#],3[#],4[#],5[#]。

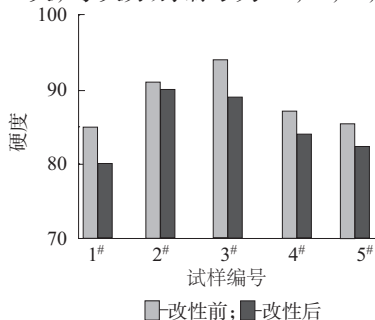


图4 膨润土改性前后增强摩擦材料的硬度

由图4可知,未处理的膨润土增强摩擦材料的硬度约为85~95,而季铵盐改性膨润土增强的摩擦材料试样硬度稍有降低,约80~90,因为经季铵盐改性后,膨润土的层间距增大,结构更加疏松。用其掺杂改性摩擦材料时,将膨润土的微小疏松结构带入摩擦材料,从而使得整个摩擦材料的硬度降低。改性前后两组试样冲击强度测试结果如图5所示。

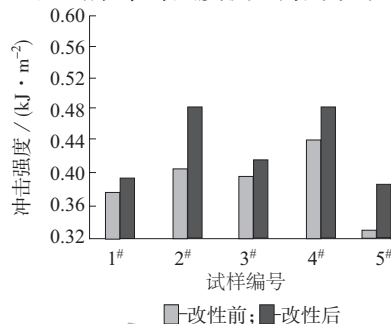


图5 膨润土改性前后增强摩擦材料的冲击强度

由图5可知,季铵盐改性膨润土增强的摩擦材料的冲击强度高于未改性的膨润土掺杂的摩擦材料,这是由于改性后的膨润土由亲水性变成疏水性,其更容易与树脂橡胶等粘结剂结合,促进了冲击强度的提高。另外,膨润土的比表面变大,表面能高,经季铵盐改性后,根据能量最低原理,降低其高表面能,膨润土易于与其他原料结合,聚合物进入层间与其结合程度增强,摩擦材料韧性提高,其制成的试样的冲击强度大。

2.5 摩擦系数和磨损率分析

未改性膨润土增强的摩擦材料与改性膨润土增强的摩擦材料的摩擦系数变化情况,如图6所示。

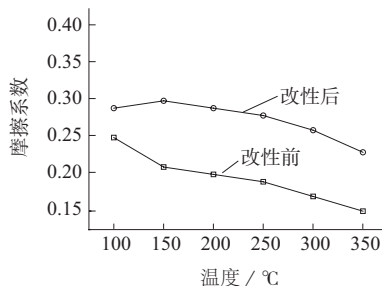


图6 膨润土改性前后增强摩擦材料的摩擦系数

由图6可知,未处理膨润土增强的摩擦材料的摩擦系数随着摩擦温度升高而降低。当摩擦温度为100℃时,摩擦系数为0.25;当摩擦温度升高到350℃,摩擦系数降为0.15,出现了严重热衰退现象。

季铵盐改性后的摩擦材料样片,其摩擦系数在整个摩擦温度范围内均高于未处理的膨润土增强的摩擦材料,且呈先升高接着略有降低的趋势,摩擦系数在0.23~0.3之间。摩擦温度在350℃时,虽然也

有略微的热衰退,但是摩擦系数为 0.23,相对于未处理膨润土增强的试样较稳定。因此,膨润土处理后,能够在一定程度上改善摩擦材料在高温下的抗热衰退性。同样地,比较上述两种摩擦材料试样的磨损率,如图 7 所示。由图 7 可以看出,在 250℃之前,未改性膨润土增强摩擦材料和改性膨润土增强的摩擦材料磨损率曲线基本一致,但是超过 250℃之后,未改性膨润土增强摩擦材料的磨损率急剧增加,350℃时,磨损率达到 $2.25 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。同样地,改性膨润土增强的摩擦材料的磨损也略有增加,但是增加幅度不大,350℃时,磨损率仅为 $0.97 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。改性膨润土增强的摩擦材料磨损率低的原因可能是改性膨润土经改性后,面间距变大,膨润土的这种疏松结构进入摩擦材料能够在摩擦材料中形成一些疏松区,这些疏松区能够利用其疏松的结构有效储热,从而使得样品表面不至于过热,从而减轻了摩擦材料的热衰退和磨损。另外,膨润土经过改性后,与有机物结合性变好,强度较高,这也是促进磨损率降低的另外一个原因。

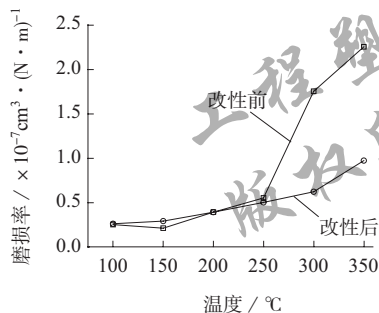


图 7 膨润土改性前后增强摩擦材料的磨损率

3 结论

通过季铵盐对膨润土进行插层改性,并用改性前后的膨润土作为摩擦材料的改性剂,研究膨润土的改性对摩擦材料的磨损表面形貌、摩擦磨损性能及冲击强度和硬度等的影响。经过实验,得到以下结论:

(1) 通过季铵盐改性,膨润土由颗粒状变成片层状结构,层间距由原来的 1.501 85 nm 扩大到 1.591 07 nm,层间距增大 0.089 22 nm,证明季铵盐已经插入膨润土的层间。

(2) 未改性膨润土增强的摩擦材料的磨损表面凹凸不平,磨损严重。而改性膨润土增强的摩擦材料表面生成了一层摩擦膜,降低了材料表面的磨损。

(3) 与未改性的膨润土相比,季铵盐改性膨润土增强的摩擦材料摩擦系数较高,磨损较低,硬度较

低,冲击强度较高,增强效果较佳。

参考文献

- [1] 鲁知音,管琪明,何林,等.无机填料对制动摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].矿产综合利用,2007(6):33-36.
Lu Zhiyin, Guan Qiming, He Lin, et al. The effects of inorganic fillers on friction and wear properties of braking friction materials[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2007(6):33-36.
- [2] Wang Qihua, Zhang Xinrui, Pei Xianqiang. Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂[J]. Materials and Design, 2010, 31:1 403-1 409.
- [3] Mat ějka V, Lu Yafei, Jiao Long, et al. Effects of silicon carbide particle sizes on friction-wear properties of friction composites designed for car brake lining applications[J]. Tribology International, 2010, 43:144-151.
- [4] Cho K H, Jang H, Hong Y S, et al. The size effect of zircon particles on the friction characteristics of brake lining materials[J]. Wear, 2008, 264:291-297.
- [5] Ma Yuning, Martynková G S, Marta Valáková M, et al. Effects of ZrSiO₄ in non-metallic brake friction materials on friction performance[J]. Tribology International, 2008, 41:166-174.
- [6] 张渝. SiO₂颗粒的表面改性及分散性能研究[D].南京:南京工业大学,2014.
Zhang Yu. Study on surface modification and dispersing properties of SiO₂ particles[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2014.
- [7] 王振波,王秀飞,尹彩流,等.膨胀蛭石对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J].粉末冶金材料科学与工程,2017,22(4):496-502.
Wang Zhen bo, Wang Xiufei, Yi Cailiu, et al. Effect of expanded vermiculite on friction and wear properties of copper based friction materials[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2017, 22(4):496-502.
- [8] 王振波,王秀飞,白同庆,等.不同类型莫来石对铜基材料摩擦磨损性能的影响[J].粉末冶金技术,2015,33(3):190-194.
Wang Zhen bo, Wang Xiufei, Bai Tongqing, et al. Effect of different types of mullite on friction and wear properties of copper based materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2015, 33(3):190-194.
- [9] 卢尚健,付雪松,孙胃涛,等.不同改性矾土添加量下树脂基复合摩擦材料的性能[J].机械工程材料,2017,41(1):85-89.
Lu Shangjian, Fu Xuesong, Sun Weitao, et al. Properties of resin based composite friction materials with different modified bauxite content[J]. Material for Mechanical Engineering, 2017, 41(1):85-89.
- [10] Dadkar N, Tomar B S, Satapathy B K. Evaluation of fly ash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications[J]. Materials and Design, 2009, 30:4 369-4 376.
- [11] 冯栋,李甘.纳米材料及其技术的应用前景[J].速读旬刊,2017(1):247.
Feng Dong, Li Gan. The application prospect of nanomaterials and

- their technology [J]. Speed Reading, 2017(1):247.
- [12] 王蕊,冯莉莉,张引引,等. 纳米材料的制备和应用 [J]. 化学世界, 2017, 58(7):433-441.
Wang Rui, Feng Lili, Zhang Yinyin, et al. Preparation and application of nanomaterials[J]. Chemical World, 2017, 58(7):433-441.
- [13] 郭艳艳,吴杏华,王殿元,等. 稀土发光纳米材料发光特性的研究进展 [J]. 九江学院学报: 自然科学版, 2010, 25(4):105-108.
Guo Yanyan, Wu Xinghua, Wang Dianyuan, et al. Research progress of luminescence properties of rare earth luminescent nanomaterials[J]. Journal of Jiu Jiang University (natural sciences), 2010, 25(4):105-108.
- [14] 王占红,侯贵华,何文平,等. 高比热容膨润土增强聚合物基摩擦材料性能研究 [J]. 润滑与密封, 2015(9):72-77.
Wang Zhanhong, Hou Guihua, He Wenping, et al. Effect of bentonite of high specific heat on properties of polymer matrix friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2015(9):72-77.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000~2017 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会,共编辑、出版了 18 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》,以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,现以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 2004~2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》,优惠价 400 元/套。

2. 2000~2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘,优惠价 300 元/盘。本光盘除收录 2000~2017 年 18 本《论文集》的全部内容外,还包括约 3 400 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>

(上接第 5 页)

- [8] Dadfar M R, Ghadami F. Effect of rubber modification on fracture toughness properties of glass reinforced hot cured epoxy composites[J]. Materials & Design, 2013, 47(9):16-20.
- [9] Vijayan P P, Pionteck J, Huczko A, et al. Liquid rubber and silicon carbide nanofiber modified epoxy nanocomposites: Volume shrinkage, cure kinetics and properties[J]. Composites Science & Technology, 2014, 102(4):65-73.
- [10] 赵江涛,蒋德意,周权,等. 端环氧基丁腈橡胶增韧环氧树脂的力学性能及微观形貌 [J]. 合成橡胶工业, 2015(6):447-451.
Zhao Jiangtao, Jiang Deyi, Zhou Quan, et al. Mechanical properties and morphology of epoxy resin toughened with epoxy-terminated butadiene-acrylonitrile rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2015(6):447-451.
- [11] 刘军,王振华,吴丝竹,等. 橡胶纳米补强中的逾渗机理和界面相互作用的研究 [J]. 橡胶工业, 2011, 58(3):133-140.
Liu Jun, Wnag Zhenhua, Wu Sizhu, et al. Percolation mechanism and interfacial interaction in filler-reinforced rubber[J]. China Rubber Industry, 2011, 58(3):133-140.
- [12] Zainol I, Ahmad M I, Zakaria F A, et al. Modification of epoxy resin using liquid natural rubber[J]. Materials Science Forum, 2006, 517:272-274.
- [13] 赵敏,高俊刚,李刚. 纳米 SiO₂/邻甲酚醛环氧树脂复合材料的性能与固化特性 [J]. 塑料工业, 2004, 32(9):11-13.
Zhao Min, Gao Jungang, Li Gang. Property and curing characteristics of nano-meter SiO₂/o-CFER composite[J]. China Plastics Industry, 2004, 32(9):11-13.
- [14] 吴一蔚,郑亚萍,李沛沛,等. 氢化双酚 A 型环氧树脂的固化性能研究 [J]. 中国塑料, 2014(12):60-66.
Wu Yiwei, Zheng Yaping, Li Peipei, et al. Curing properties of hydrogenated bisphenol a epoxy resin[J]. China Plastics, 2014(12):60-66.
- [15] 张思思,周茗萱,李文翔,等. 芳香胺固化环氧树脂非等温 DSC 动力学的研究 [J]. 粘接, 2017(11):17-22.
Zhang Sisi, Zhou Mingxuan, Li Wenxiang, et al. Non-isothermal DSC kinetics of curing of epoxy resin with aromatic amine[J]. Adhesion, 2017(11):17-22.
- [16] Kissinger H E, Chem A. Reaction kinetics in differential thermal analysis[J]. Analytical Chemistry, 2002, 29(11):1 702-1 706.
- [17] Crane L W, Dynes P J, Kaelble D H. Analysis of curing kinetics in polymer composites[J]. Journal of Polymer Science Polymer Letters Edition, 1973, 11(8):533-540.