

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.07.019

钼酸铵 / 丁腈橡胶改性酚醛树脂对摩擦材料性能的影响 *

甘贵江, 姚冠新, 王玉玲

(江苏大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 制备了以未改性 PF、市售改性 PF、钼酸铵 / 丁腈橡胶复合改性 PF 作为基体的摩擦材料, 研究了钼酸铵 / 丁腈橡胶改性酚醛树脂 (PF) 对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响, 并对不同树脂基摩擦材料的冲击强度、硬度和摩擦磨损性能进行了测试。结果表明, 复合改性 PF 基摩擦材料的冲击强度为 $3.51 \sim 3.72 \text{ kJ/m}^2$, 硬度为 $73 \sim 82$, 高于未改性 PF 基摩擦材料的冲击强度 (3.22 kJ/m^2) 和硬度 (52), 有效提高了摩擦材料的韧性和硬度。以复合改性 PF 为基体的摩擦材料, 其摩擦系数的稳定性得以提高, 其中以含量为 10% 的摩擦材料最为稳定, 磨损率最小。当树脂添加量相同时, 复合改性 PF 基摩擦材料的摩擦系数的稳定性最好, 且摩擦系数值保持在 $0.37 \sim 0.40$ 之间, 比未改性 PF 基摩擦材料的摩擦系数和市售改性 PF 基摩擦材料摩擦系数稳定; 复合改性 PF 基摩擦材料的高温 (350°C) 磨损为 $0.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$, 远低于未改性 PF 基摩擦材料的 $1.50 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$ 和市售改性 PF 基摩擦材料的 $0.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$, 抗高温热衰退性最好。

关键词: 酚醛树脂; 钼酸铵; 丁腈橡胶; 耐热性; 摩擦磨损机理

中图分类号: U463.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)07-0098-06

Effects of Phenolic Resin Modified Ammonium Molybdate and Rubber Nitrile on Performances of Friction Materials

Gan Guijiang, Yao Guanxin, Wang Yuling

(School of Material Science and Engineering of Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract : To study the effects of ammonium molybdate / rubber nitrile composite modified phenolic resin (PF) on the performances of friction materials, the friction materials with unmodified PF, commercially available modified PF and ammonium molybdate / nitrile rubber-modified PF as matrix were prepared respectively. The impact strength, hardness, friction coefficient and wear rate of different resin-based friction materials were tested. The results show that the impact strength of friction materials with composite modified PF are $3.51 \sim 3.72 \text{ kJ/m}^2$, which are higher than that of unmodified PF (3.22 kJ/m^2), and hardness are $73 \sim 82$, which are harder than that of unmodified PF (52). Composite modified PF effectively improves the toughness and hardness of friction materials. Stabilities of the friction coefficient of friction materials with composite modified PF changed better, the friction coefficient of the friction material is most stable when the content of composite modified PF is 10%, and wear rate is lowest. When the content of matrix is the same, the friction coefficients of friction materials with composite modified PF are most stable, the friction coefficient are among 0.37 to 0.40 , which is more stable than that of friction material with original PF and friction material with commercially available modified PF. The wear rate of friction material with composite modified PF at high temperature (350°C) is $0.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$, less than that of friction material with original PF [$1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$] and friction material with commercially available modified PF [$0.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$]. Friction materials with composite modified PF have the best thermal debilitating resistance at high temperature.

Keywords : phenolic resin ; ammonium molybdate ; nitrile rubber ; heat resistance ; mechanism of friction and wear

酚醛树脂 (PF) 是普遍使用的树脂基制动摩擦材料的粘结剂^[1-2], 但是传统的 PF 由于其自身性能的限制导致其耐热性差、高温磨损严重, 已经不能满足当代摩擦材料的使用要求^[3-5]。为了提高 PF 基摩擦材料的综合性能, 国内外已有不少学者通过对其改性来提高综合性能, 并取得一定的进展^[6-9]。但是这些改性行为大多为单一改性, 采用复合改性的

研究少有报道。为进一步提高材料的耐热性, 姚冠新等^[9]采用钼酸铵和丁腈橡胶对 PF 进行复合改性, 结果发现, 经复合改性的 PF 的初始分解温度比未改性树脂提高了 120°C , 且降低了树脂的分解速度。

* 江苏大学博士点基金项目 (20123227110016)

联系人: 姚冠新, 教授, 主要从事汽车制动摩擦材料的研究

收稿日期: 2016-04-08

但是有关钼酸铵/丁腈橡胶复合改性 PF 对摩擦材料性能的影响未见报道。

笔者采用已有方法制备钼酸铵/丁腈橡胶复合改性酚醛树脂^[9],然后分别以未改性 PF、市售改性 PF、钼酸铵/丁腈橡胶复合改性 PF 为基体制备摩擦材料,比较不同树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能,并研究复合改性 PF 添加量对材料摩擦性能的影响,对影响材料性能的机理进行分析,以期为进一步制备性能优良的树脂基摩擦材料提供实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

苯酚:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

甲醛:分析纯,浓度为 37%,江苏彤晟化学试剂有限公司;

无水乙醇:分析纯,江苏彤晟化学试剂有限公司;

钼酸铵:分析纯,天津市化学试剂四厂;

丁腈橡胶:分析纯,兰州石化公司;

氢氧化钠:分析纯,天津化学试剂厂;

芳纶浆粕:1414,深圳市纤谷科技有限公司;

玻璃纤维:3 mm,长径比为 30,任丘市永兴兴玻璃纤维厂;

硅灰石:37 μm ,江西广源化工有限责任公司;

钛酸钾:长径比 50,上海峰竺贸易有限公司;

氧化铝:44 μm ,山东奥鹏新材料科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

集热式恒温磁力搅拌器:DF-1015 型,郑州长城科工贸有限公司;

循环水式多用真空泵:SHB-B95 型,郑州长城科工贸有限公司;

真空干燥箱:ZK-3 BS 型,天津市中环实验电炉有限公司;

液压成型机:HLY71-63 型,瑞安市超祥液压机械厂;

组合式冲击试验机:XJ-50Z 型,河北承德建德检测仪器有限公司;

洛氏硬度计:XHR-150 型,山东莱州华仪试验仪器有限公司;

变速摩擦试验机:X-DM 型,广东清远爱尔高分子材料有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):QUANTA200 型,美

国 FEI 公司。

1.3 试样制备

采用文献[9]方法制备钼酸铵/丁腈橡胶改性 PF,然后在已有配方^[10]中分别以未改性 PF、市售改性 PF 和自制复合改性 PF 三种树脂为基体制备摩擦材料试样。试样配方见表 1。

表 1 摩擦材料配方

编号	未改性 PF	市售改性 PF	复合改性 PF	芳纶浆粕	玻璃纤维	硅灰石	钛酸钾	减摩填料	氧化铝	摩擦粉	填料
1 [#]	10			3	12	12	10	14	1.5	6	31.5
2 [#]		10		3	12	12	10	14	1.5	6	31.5
3 [#]			7.5	3	12	12	10	14	1.5	6	34
4 [#]			10.0	3	12	12	10	14	1.5	6	31.5
5 [#]			12.5	3	12	12	10	14	1.5	6	29
6 [#]			15.0	3	12	12	10	14	1.5	6	26.5

摩擦材料试样的制备工艺如下:

(1) 物料混合:依据配方称取物料,将物料投入混料机中充分混合,对混合的物料进行编号。

(2) 压模预热:压制前,将压模预热到 150 ~ 160℃。

(3) 模压:采用液压成型机模压成型,压制温度为 160℃,压制压力为 30 MPa,保压时间为 6 min,30 s 后放气一次,脱模。

(4) 热处理:将压制成型的试样放入真空干燥箱进行热处理:先升温到 130℃,保温 1 h;再升温到 165℃,保温 1 h;继续升温至 180℃,保温 5 h。随后随炉冷却,并按测试要求对冷却后的试样进行加工。

1.4 性能测试

根据 GB/T 1843-2008,采用组合式冲击试验机对摩擦材料的冲击强度进行测定,试样尺寸为 55 mm×10 mm×6 mm。

根据 GB/T 5766-2007,采用洛氏硬度计测定摩擦材料的硬度。

采用变速摩擦试验机对摩擦材料进行摩擦性能测试。试样摩擦面积为 25 mm×25 mm,厚度为 5~7 mm(偏差为 -0.2~0 mm),设定圆盘转速为 450 r/min。根据 GB/T 13826-2008,测定摩擦材料在 100,150,200,250,300,350℃下的摩擦系数和磨损率。

采用 SEM 观察试样经摩擦试验后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 不同树脂基摩擦材料的物理、力学性能

表 2 为不同树脂基摩擦材料的物理、力学性能

测试结果。

表2 不同树脂基摩擦材料的物理、力学性能测试结果

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
冲击强度/(kJ·m ⁻²)	3.22	3.78	3.54	3.66	3.72	3.51
硬度	52	78	73	81	82	79

从表2可以看出,复合改性PF基摩擦材料的冲击强度为3.51~3.72 kJ/m²,均高于未改性PF基摩擦材料的冲击强度(3.22 kJ/m²),说明使用复合改性PF提高了摩擦材料的韧性。随着复合改性PF含量的增加,试样的冲击强度和硬度均呈现先增大后减小的趋势,当复合改性PF的含量为12.5%时,试样的冲击强度和硬度达到最大值,分别为3.72 kJ/m²和82。继续增加其含量,试样的冲击强度和硬度下降。原因在于:当复合改性PF的含量较低时,不能充分分散在摩擦组分之间,因而无法对摩擦材料起到良好的粘结作用,所以试样的冲击强度和硬度较低;随着其含量的增加,复合改性PF对各摩擦组分起到了良好的粘结作用,提高了试样的冲击强度和硬度;但当复合改性PF含量继续增加时,部分树脂发生聚集降低了对摩擦组分的粘结作用,从而降低了试样的冲击强度和硬度。

相比于市售改性PF,由于复合改性PF增大了分子链段的运动位阻,导致含量相同时复合改性PF基摩擦材料的冲击强度(3.66 kJ/m²)低于市售改性PF基摩擦材料的冲击强度(3.78 kJ/m²)。但是由于分子链段的运动位阻增大,从而提高了摩擦材料的硬度;在含量相同的情况下,复合改性PF基摩擦材料的硬度(81)高于市售改性PF基摩擦材料的硬度(78)。复合改性PF基摩擦材料的硬度为73~82,而未改性PF硬度为52,说明复合改性PF对材料硬度的影响是显著的。

2.2 不同树脂基摩擦材料的摩擦磨损性能

在不同温度下,不同树脂基摩擦材料的摩擦系数和磨损率分别见表3、表4。

图1、图2分别是含量相同的未改性PF、复合改性PF和市售改性PF为基体的摩擦材料的摩擦系数与磨损率随温度变化的曲线。

由表3和图1可知,含量相同的不同树脂基摩擦材料在100~200℃的摩擦系数相差不大,位于0.36~0.40之间;随着温度升高到250℃后,不同树脂基摩擦材料的摩擦系数的变化程度出现较大的差异。其中未改性PF基摩擦材料的摩擦系数在250℃后发生急剧下降,由250℃时的0.43下降至300℃时的0.38,特别是当温度进一步升高到350℃

表3 不同树脂基摩擦材料的摩擦系数测试结果

编号	温度/℃					
	100	150	200	250	300	350
1 [#]	0.37	0.38	0.39	0.43	0.38	0.30
2 [#]	0.36	0.38	0.40	0.43	0.41	0.36
3 [#]	0.35	0.39	0.36	0.38	0.36	0.33
4 [#]	0.37	0.39	0.38	0.40	0.38	0.37
5 [#]	0.35	0.38	0.40	0.40	0.38	0.36
6 [#]	0.36	0.37	0.39	0.40	0.38	0.35

表4 不同树脂基摩擦材料的磨损率测试结果 $\times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$

编号	温度/℃					
	100	150	200	250	300	350
1 [#]	0.26	0.38	0.27	0.45	0.76	1.50
2 [#]	0.23	0.35	0.26	0.31	0.52	0.67
3 [#]	0.32	0.39	0.37	0.41	0.58	0.92
4 [#]	0.21	0.25	0.23	0.27	0.32	0.45
5 [#]	0.22	0.28	0.32	0.34	0.45	0.56
6 [#]	0.23	0.29	0.35	0.40	0.55	0.77

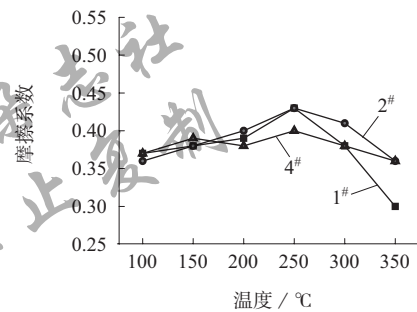


图1 不同树脂基摩擦材料的摩擦系数随温度变化的曲线

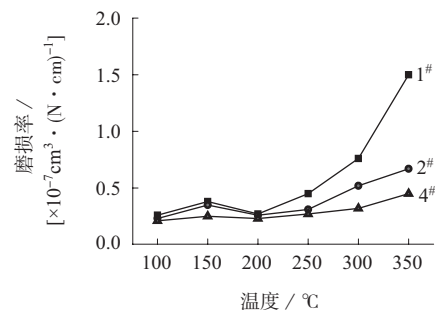


图2 不同树脂基摩擦材料的磨损率随温度变化的曲线

时,摩擦系数降低为0.30,高温衰退最为严重。当温度升高到250℃后,市售改性PF基和复合改性PF基摩擦材料的摩擦系数都比未改性PF基摩擦材料稳定,且复合改性PF基摩擦材料的摩擦系数最为稳定,抗高温热衰退性最好。例如,市售改性PF基摩擦材料的摩擦系数由250℃时的0.43降为350℃时的0.36,复合改性PF基摩擦材料的摩擦系数由250℃时的0.40降为350℃时的0.37。这是由于复合改性后PF的初始分解温度大大提高,在高温阶段依然能够对摩擦组分起到良好的粘结作用,降低摩擦面的磨损程度,使得摩擦界面的接触状态没有

发生巨大变化,从而明显提高了摩擦材料摩擦系数的稳定性。

由表 4 和图 2 可知,含量相同的不同树脂基摩擦材料在 100~200℃ 时磨损率较小,并且差异不大。但是随着温度升高,不同基体试样的磨损率出现较大差异。未改性 PF 基摩擦材料的磨损率由 250℃ 时的 $0.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$ 增加到 350℃ 时的 $1.50 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$,磨损急剧增大;市售改性 PF 基摩擦材料的磨损率由 250℃ 时的 $0.31 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$ 增加到 350℃ 时的 $0.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$;复合改性 PF 基摩擦材料的磨损率由 250℃ 时的 $0.27 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$ 增加到 350℃ 时的 $0.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 / (\text{N} \cdot \text{cm})$,其磨损率最小。造成这种现象的原因在于:复合改性后 PF 的初始分解温度大大提高,高于未改性 PF 和市售改性 PF,且分解速度低于未改性 PF 和市售改性 PF,使得复合改性 PF 在高温阶段能够保持对摩擦组分良好的粘结作用,减少了摩擦组分的脱落并降低了由于树脂分解所引起的磨损,最终显著提高了材料的高温耐磨性。

2.3 不同含量复合改性 PF 基摩擦材料的摩擦磨损性能

不同含量复合改性 PF 基摩擦材料的摩擦系数和磨损率随温度变化的曲线分别如图 3 和图 4 所示。

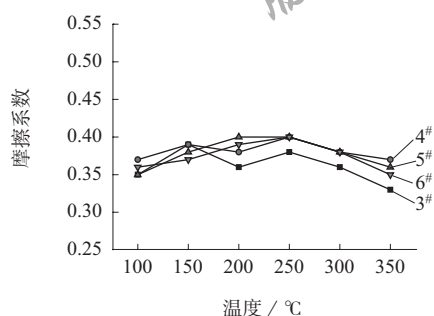


图3 不同含量复合改性 PF 基摩擦材料的摩擦系数随温度变化的曲线

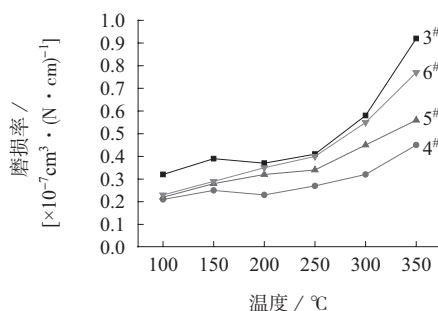


图4 不同含量复合改性 PF 基摩擦材料的磨损率随温度变化的曲线

不同,试样的摩擦系数的波动程度也不同。但是总体没有太大的波动。其中含量为 7.5% 的摩擦材料 (3#) 的摩擦系数波动幅度最大(为 0.33~0.39);含量为 10.0% 的摩擦材料的摩擦系数波动幅度最小(为 0.37~0.40)。原因在于:当复合改性 PF 加入量为 7.5% 时,由于粘结剂含量较少,不能将材料中的各组分充分地结合在一起。含量高于 7.5% 的摩擦材料,树脂能够充分地分布在各组分之间,经热压固化后能够形成细密且均匀的网络结构,很好地将各组分粘结起来,在 100~250℃ 期间能够有效降低摩擦组分的脱落,维持摩擦界面的稳定,保证摩擦系数的稳定。温度升高到 300~350℃ 时,树脂分解,含量为 7.5% 的摩擦材料的摩擦组分脱落程度进一步加剧,降低了摩擦系数。含量较高 (12.5%~15.0%) 的摩擦材料的树脂容易聚集产生热应力集中,加剧了树脂的分解,热衰退严重。含量为 10.0% 的摩擦材料既避免了低温阶段含量过低造成的组分脱落,也降低了高温时期热衰退的程度,因而稳定性最好。

从表 4 和图 4 可以看出,不同含量复合改性 PF 基摩擦材料的磨损率都随着温度的升高总体呈现增大的趋势,同时磨损率随着含量的增加呈现先减小后增大的趋势。在整个摩擦实验过程中,以含量为 7.5% 的摩擦材料的磨损率最高,含量为 10% 的试样的磨损率最低。主要是由于在低温条件下,摩擦材料和摩擦副发生相对运动时,在外力作用下,摩擦材料的摩擦组分发生脱落,造成磨损。随着温度的升高,树脂发生软化和分解,树脂的软化和分解降低了对摩擦组分的粘结作用,会加剧摩擦组分的脱落,使得摩擦材料的磨损率随温度的升高而增大。当树脂基体加入量为 7.5% 时,由于粘结剂含量较少,不能充分分布在各个组分之间,无法将材料中的各组分牢固地结合在一起,在外力作用下,摩擦组分脱落较为严重,摩擦材料的磨损率最大。当树脂粘结剂的含量增加到 12.5% 时,摩擦材料的磨损率相比于含量为 10.0% 时有所增大。造成这种现象的原因在于:树脂含量的增加改善了对摩擦组分的粘结作用,相比于含量为 7.5% 的摩擦材料,降低了摩擦组分的脱落程度,但是较高的含量却导致树脂发生团聚,在摩擦过程中由于树脂自身导热性能较差而在树脂团聚的地方形成局部热应力集中,致使树脂分解;树脂的分解加剧了摩擦材料的磨损,增大了摩擦材料的磨损率。随着树脂含量的继续增加,由于热应力集中所导致的树脂分解的程度越大,则磨

损也越大。相比于复合改性 PF 含量较高的试样,含量为 10.0% 试样的磨损率最低。原因在于此时配方中复合改性 PF 不仅能够充分地分散在整个摩擦材料中,从而对不同的摩擦组分起到良好的粘结作用,使得摩擦组分在摩擦过程中不易从表面脱落;同时也避免了由于含量过高所造成的热应力集中,最终降低了摩擦材料的磨损率,提高了摩擦材料的高温耐磨性。

2.4 不同树脂基摩擦材料的磨损形貌

为了进一步分析复合改性 PF 对摩擦材料性能的影响,选择以未改性 PF (1[#])、市售改性 PF (2[#]) 和含量相同的复合改性 PF (4[#]) 为基体的摩擦材料,对比摩擦材料经摩擦后的磨损形貌,分析不同温度下不同树脂基摩擦材料的影响机理。

图 5 为在 150℃ 下含量相同的不同树脂基体摩擦材料经摩擦后的磨损形貌。

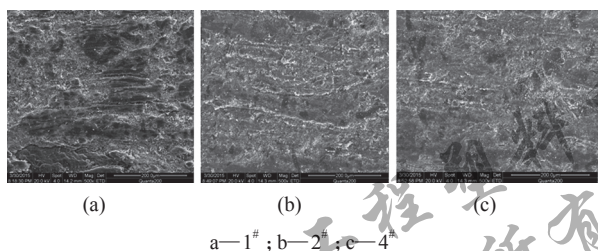


图 5 在 150℃ 下含量相同的不同树脂基摩擦材料经摩擦后的磨损形貌

从图 5 可以看出,在 150℃ 下,三种摩擦材料表面均有明显的划痕,其中以未改性 PF 基摩擦材料 (图 5a) 的划痕最为明显,市售改性 PF 基摩擦材料 (图 5b) 的划痕次之,复合改性 PF 基摩擦材料 (图 5c) 的划痕最浅,且表面比前两种材料更为平整。原因在于低温下,摩擦温度低于树脂分解温度时,摩擦界面为干滑动状态。试样各组分之间结合紧密。制动时摩擦材料和摩擦副发生相对运动,摩擦副表面硬的凸起或大硬度的颗粒对摩擦材料表面产生犁沟作用,形成划痕。由于复合改性 PF 的硬度高于未改性 PF 和市售 PF,因而提高了摩擦材料的抗形变能力,划痕较浅,磨损程度最小。相比于较软的未改性 PF,硬质颗粒在摩擦力作用下对摩擦材料进行切削;而复合改性 PF 的硬度较大,硬质颗粒在摩擦力作用下逐渐变为小颗粒甚至粉状磨屑,填充到摩擦材料表面的凹处和空隙中,在一定程度上保护了摩擦层,使得复合改性 PF 摩擦材料表面更为平整。摩擦材料表面的划痕和脱落的细小颗粒表明在低温阶段主要为磨粒磨损。

图 6 为在 250℃ 下含量相同的不同树脂基体摩

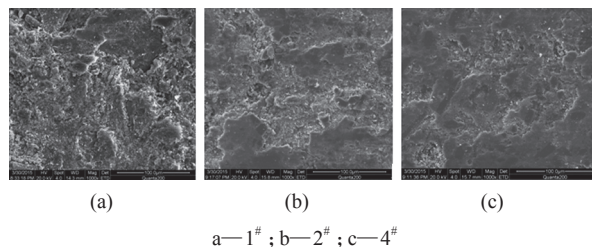


图 6 在 250℃ 下含量相同的不同树脂基摩擦材料经摩擦后的磨损形貌

擦材料经摩擦后的磨损形貌。由图 6 可以看出,在 250℃ 时,三种摩擦材料表面都形成了明显的转移膜并伴随有凹坑。相比于未改性和市售改性 PF 基摩擦材料 (图 6a、图 6b),复合改性 PF 基摩擦材料的表面最为平整,凹坑最少,转移膜较为连续且均匀。原因在于随着温度的升高,树脂开始软化但尚未分解,发生软化的树脂降低了对摩擦材料各组分的粘结作用。在此温度下,摩擦材料与摩擦副发生粘着作用,致使摩擦材料表面的部分材料向摩擦盘转移,在摩擦层表面形成转移膜。摩擦材料的脱落致使其表面产生凹坑。转移膜在摩擦力的作用下不断地形成、脱落、再形成,加剧了材料的磨损^[11]。经复合改性后的 PF 开始软化的温度得以提高,高于未改性 PF 和市售改性 PF,在相同温度下降低了 PF 的软化程度,使得材料间的结合力高于未改性和市售改性 PF 基摩擦材料。在相同条件下,降低了粘着磨损和疲劳磨损,使得材料磨损总体上小于未改性和市售改性 PF 基摩擦材料。摩擦材料表面大量转移膜的存在表明,在此中温阶段主要为粘着磨损,同时表面上脱落的细小颗粒说明还伴随着磨粒磨损。

图 7 为在 350℃ 下含量相同的不同树脂基体摩擦材料经摩擦后的磨损形貌。

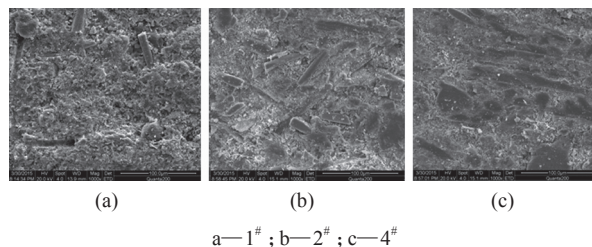


图 7 在 350℃ 下含量相同的不同树脂基摩擦材料经摩擦后的磨损形貌

从图 7 可以看出,在 350℃ 下,三种摩擦材料表面磨损严重,坑洼不平,伴有片状脱落。其中未改性和市售改性 PF 基摩擦材料表面有纤维露出;从未改性 PF 基摩擦材料表面 (见图 7a) 还可以看到由于纤维被拔出所留下的凹坑。与复合改性 PF 基摩擦材料 (见图 7c) 相比,未改性 PF 和市售改性 PF

基摩擦材料(见图7a、图7b)表面有断裂的纤维和大量凹坑。原因在于:此时的温度高于树脂的分解温度,树脂发生热分解,树脂分解大大降低了对摩擦材料各组分的粘着作用,同时树脂分解产生的液态物挥发加剧了热磨损,并形成凹坑,加剧了填料的松动和脱落,使得增强纤维直接与摩擦副接触,在制动过程中发生断裂。相比于未改性和市售改性PF,经复合改性的PF的分解温度得以提高,在同样的高温条件下其分解速率小于未改性和市售改性PF,降低了材料的热磨损。同时由于分解温度的提高使得树脂在高温条件下依然能够对摩擦组分起到良好的粘合作用,减小了摩擦材料的脱落,最终降低了摩擦材料的磨损。从图7可以看到摩擦材料表面有划痕,并存在“转移膜”,表明在高温下还发生了磨粒磨损和粘着磨损。

3 结论

(1) 复合改性PF有效提高了摩擦材料的硬度,由原来未改性时的52提高到73以上,随着复合改性PF含量的增加,摩擦材料的硬度先增加后减小。复合改性PF在一定程度上提高了摩擦材料的冲击强度,由未改性PF的 3.22 kJ/m^2 提高到 3.52 kJ/m^2 以上,提高了摩擦材料的韧性。

(2) 当复合改性PF含量为10.0%时,摩擦材料的摩擦系数最为稳定,磨损最小。此时的复合改性PF可以充分分散在摩擦材料中,在摩擦过程中与摩擦材料各组分结合紧密,在整个摩擦过程中,摩擦系数保持在0.37~0.40之间,波动程度低于市售改性PF基摩擦材料(0.36~0.43)和未改性PF基摩擦材料(0.30~0.43),并有效地降低了摩擦系数的热衰退;高温(350°C)时的磨损率为 $0.45 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{cm})$,比市售改性PF基摩擦材料的磨损率 $[0.67 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{cm})]$ 和未改性PF基摩擦材料的磨损率 $[1.50 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{cm})]$ 低,显著提高了摩擦材料的耐磨性和抗热衰退性。

(3) 复合改性PF基摩擦材料在低温下主要为磨粒磨损,在中温阶段主要存在粘着磨损和疲劳磨损,并伴随着磨粒磨损,在高温下主要存在热磨损和磨粒磨损,兼有粘着磨损。复合改性PF降低了摩擦材料的磨损率,提高了摩擦系数的稳定性。

参考文献

- [1] 刘扬,夏涛,李瑞波,等. 摩擦材料用改性酚醛树脂的制备及应用[J]. 塑料科技,2013(10):63-67.
- Liu Yang, Xia Tao, Li Ruibo, et al. Preparation and application of

- modified phenolic resin used for friction materials[J]. Plastic Science and Technology,2013(10):63-67.
- [2] 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(1):88-96.
- Cong Peihong, Wu Xingyang, Bu Juan, et al. Progress in research of organic frictional materials for automobile and train braking[J]. Tribology,2011(1):88-96.
- [3] Gurunath P V, Bijwe J. Friction and wear studies on brake-pad materials based on newly developed resin[J]. Wear,2007,263:1 212-1 219.
- [4] Zhao Yong, Yan Ning, Feng M W. Thermal degradation characteristics of phenol-formaldehyde resins derived from beetle infested pine barks[J]. Thermochimica Acta,2013,555:46-52.
- [5] 王红侠. 多纤维增强汽车制动器摩擦材料的研制[D]. 镇江:江苏大学,2007.
- Wang Hongxia. Development of multifibers reinforced friction materials of automotive brake[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2007.
- [6] 赵剑,卫民,蒋剑春. 腰果壳油改性摩擦材料用酚醛树脂的研究进展[J]. 生物质化学工程,2011(3):47-52.
- Zhao Jian, Wei Min, Jiang Jianchun. The state of the resin art of friction materials from phenol formaldehyde modified with cashew nut shell liquid[J]. Biomass Chemical Engineering,2011(3):47-52.
- [7] 刘国勤,谢德龙,付强. 钼改性酚醛树脂的制备与表征[J]. 材料导报,2011(S2):398-400.
- Liu Guoqin, Xie Delong, Fu Qiang. Synthesis and characterization of molybdenum modified phenol formaldehyde resin[J]. Materials Review,2011(S2):398-400.
- [8] Vancea C, Mosoarca G, Negrea A. Molybdenum-phosphate glass with high MoO_3 content[J]. Rev Chim,2010,61:848-852.
- [9] 姚冠新,罗玲,王玉玲. 钼酸铵-丁腈橡胶复合改性酚醛树脂的制备[J]. 工程塑料应用,2015(11):17-21.
- Yao Guanxin, Luo Ling, Wang Yuling. Preparation of modified phenolic resin with ammonium molybdate and rubber nitrile[J]. Engineering Plastics Application,2015(11):17-21.
- [10] 姚冠新,侯明深,高冬,等. 纳米 Al_2O_3 改性酚醛树脂在汽车制动摩擦材料上的应用[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2012(3):333-337.
- Yao Guanxin, Hou Mingshen, Gao Dong, et al. Application of modified phenolic resin by nano- Al_2O_3 in friction materials for automotive brake[J]. Journal of Jiangsu University:Natural Science Edition,2012(3):333-337.
- [11] 王玉玲. 新型改性酚醛树脂基摩擦材料的制备及性能研究[D]. 镇江:江苏大学,2015.
- Wang Yuling. Preparation and properties of new type modified phenolic resin-based friction materials[D]. Zhenjiang:Jiangsu University,2015.