

芳纶浆粕增强制动摩擦材料摩擦性能的可拓评价

员荣平 吕亚非*

(北京化工大学 新型高分子材料制备和加工北京市重点实验室, 北京 100029)

摘要:研究了芳纶浆粕含量和摩擦温度对制动摩擦材料摩擦性能的影响,并应用可拓评价方法对芳纶浆粕增强制动摩擦材料的摩擦系数和磨损率进行了可拓评价。结果表明,5 种制动摩擦材料都具有较好耐磨性,且芳纶的加入进一步改善了摩擦材料的耐磨性;5 个试样按照计算所得综合关联度的优劣排序为:T-3.4, T-0, T-14.6, T-5.6, 和 T-9.0(数字代表芳纶浆粕在配方中的体积分数),且芳纶浆粕体积分数为 3.4% 时该摩擦材料的摩擦系数和磨损率的综合效果最好。

关键词:芳纶浆粕;可拓评价法;制动摩擦材料

中图分类号:TH117.1

引言

制动摩擦材料是多组分的酚醛树脂基复合材料,主要由增强体、填料和基体等组成。制动摩擦材料的发展趋势是高性能、低成本、轻量化、舒适性和环保性。尽管芳纶浆粕成本较高,但由于其具有良好的机械性能、热稳定性、耐化学腐蚀和轻量等特性,已广泛应用于制动摩擦材料。Kato 等^[1]和 Gopal 等^[2-3]研究了芳纶浆粕在制动摩擦材料中的作用,认为芳纶浆粕可以降低制动摩擦材料的摩擦系数,提高耐磨性(磨损率的倒数)。Lu 等^[4-7]研究了各种原材料对摩擦性能影响的静态摩擦性能谱,建立了原材料选择判据,认为芳纶浆粕具有弱固体润滑剂特性,在摩擦性能谱中位于润滑区和过渡区的边界,耐磨性优异,是可以优先选择的原材料之一。

摩擦系数(μ)和磨损率(ω)评价是制动摩擦材料研究的关键环节,本课题组已经建立了模糊综合评价^[8-9]、灰色相关度分析^[10-12]等评价方法。模糊综合评价法是对制动摩擦材料配方与摩擦性能关系的评价,摩擦系数与配方的关联函数采用最优点在

区间($\mu = 0.40 \sim 0.50$)且不同区间权重不同的模型,磨损率与配方的关联函数采用最优点在左端点(ω 越小越好)模型,通过计算可比较不同配方的摩擦性能而得到最佳配方。灰色相关度分析是对配方中的每个组分及其含量对摩擦性能影响的评价,可定量得到各个组分对摩擦性能影响的程度,进而通过调整组分的含量优化配方。

本文制备了以芳纶浆粕体积分数为变量的一组制动摩擦材料试样,按照国标 GB5763—2008 规定方法进行摩擦磨损性能测试,讨论了芳纶含量和摩擦温度对摩擦性能的影响。基于可拓学理论^[13],建立了制动摩擦材料在不同摩擦温度下测定的摩擦系数和磨损率的可拓评价模型^[14-15],对 5 种不同含量芳纶浆粕增强的制动摩擦材料的摩擦系数进行了评判。本文建立的可拓评价模型也是对制动摩擦材料配方与摩擦性能关系的评价,但与模糊综合评价法不同的是摩擦系数与配方的关联函数采用了最优点在中点($\mu = 0.45$)且温度影响权重相同的模型,相同的是磨损率的关联函数也采用了最优点在左端点模型。

1 实验部分

1.1 原材料

芳纶浆粕,牌号 1099,帝人芳纶贸易(上海)有限公司;氧化聚丙烯腈纤维,长度约 5 mm,北京化工大学;硅灰石,针状,营口阿斯创化工有限公司;重晶石,质量分数 80%,枣阳市五联实业有限公司;人造石墨,牌号 Mg-20,武进华东特种纤维制造公司;丁

收稿日期:2010-01-05

基金项目:国家自然科学基金(50673012);国家公派专项研究生奖学金(留金出[2008]3019);帝人芳纶(德国)研究基金(2008)

第一作者:男,1980 年生,博士生

* 通讯联系人

E-mail: ylu623@gmail.com

腈胶粉, 牌号 P650, 广州亚洲摩擦材料公司; 酚醛树脂, 牌号 6818, 济南圣泉海沃斯化工公司; 氧化铝, 质量分数 98%, 营口阿斯创化工有限公司。

1.2 摩擦材料的制备

无石棉有机型制动摩擦材料配方见表 1, 以芳纶浆粕体积分数为变量, 保持酚醛树脂体积分数不变(18.03%), 其他组分随芳纶质量增加而按比例减少。所有原材料用伊莱克斯 EBR100 型高速搅拌机搅拌 2 min, 然后用热压机(吉林省旺达机械有限公司 JFY60 型)压制成型, 压制温度 165 °C, 压力 25 MPa, 时间 5 min。成型后的制动摩擦材料试样用烘箱在 170 °C 热处理 3 h。

表 1 摩擦材料配方

Table 1 Formulations of investigated samples

编号	材料组成 $\varphi/\%$						
	芳纶 浆粕	氧化 PAN 纤维	硅灰 石	重晶 石	人造 石墨	丁腈 胶粉	氧化 铝
T-0	0	21.14	6.54	33.58	12.77	4.95	2.99
T-3.4	3.40	20.26	6.27	32.19	12.24	4.74	2.87
T-5.6	5.60	19.70	6.09	31.29	11.90	4.60	2.79
T-9.0	9.00	19.082	5.82	29.89	11.37	4.41	2.66
T-14.6	14.60	17.73	5.38	27.60	10.50	4.06	2.46

1.3 摩擦性能测定

采用吉林省旺达机械有限公司 JF151 型定速摩擦性能试验机, 按 GB5763—2008 中第 4 类盘式制动器用衬片规定的摩擦性能测试方法测定。制动摩擦材料试样的尺寸为 25 mm × 25 mm × 6 mm, 所受压力为 0.98 MPa。摩擦圆盘材质为铸铁, 转速恒定在 7.54 m/s。测试温度分别为 100, 150, 200, 250, 300 和 350 °C, 在每个温度点摩擦圆盘转动 5000 转测定升温摩擦系数和体积磨损率, 然后从 300 °C 分别降温至 250, 200, 150 和 100 °C, 在每个温度点摩擦圆盘转动 1500 转测定制动摩擦材料的降温摩擦系数。

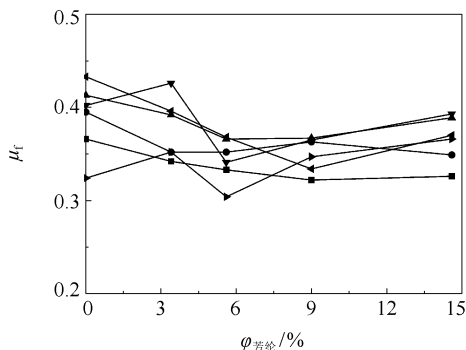
2 结果与讨论

2.1 芳纶浆粕含量和温度对摩擦性能的影响

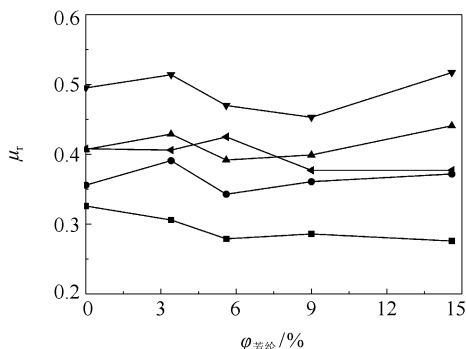
2.1.1 对摩擦系数的影响

不同含量的芳纶浆粕在不同温度下对升温摩擦系数(μ_t)和降温摩擦系数(μ_r)的影响如图 1 所示。摩擦系数、芳纶浆粕含量(φ)和摩擦温度的关系表现出非线性特征。实验结果表明, 与不含芳纶浆粕的摩擦材料(T-0)比较, 少量芳纶浆粕的加入(体积

分数 3.4%)升温摩擦系数没有降低, 但体积分数 $\geq 5.6\%$ 后升温摩擦系数有所降低。升温摩擦系数在 250 °C 之前随着温度的增加而增加, 在 250 °C 之后随着温度的增加而减小。对于降温摩擦系数, 加入(体积分数 3.4% 和 14.6%)芳纶浆粕的降温摩擦系数没有降低, 加入(体积分数 5.6% 和 9.0%)芳纶浆粕的降温摩擦系数有所降低。一般地, 升温摩擦系数反映摩擦材料的热衰退性(温度提高, 摩擦系数下降的程度), 而降温摩擦系数表征摩擦材料的恢复性能(温度降低, 摩擦系数恢复到正常值的程度)。摩擦材料的热衰退性主要是由于酚醛树脂、丁腈胶粉和芳纶浆粕等有机物在高温热氧化分解、碳化产生的润滑作用造成的。摩擦材料的热恢复性主要是由于磨料(氧化铝)的存在可以破坏有机物热氧化分解、碳化产生的润滑作用^[16]。



(a) 升温过程



(b) 降温过程

■ 100 °C; ● 150 °C; ▲ 200 °C; ▼ 250 °C; ◀ 300 °C; ▶ 350 °C

图 1 芳纶浆粕含量在不同温度下对摩擦系数的影响

Fig. 1 Effect of the aramid pulp content on the friction coefficient at different temperatures

2.1.2 对磨损率的影响

芳纶浆粕含量和摩擦温度对制动摩擦材料磨损率(ω)的影响见图 2。磨损率、芳纶浆粕含量和摩擦温度的关系也表现出非线性特征。虽然 5 种制动

摩擦材料的磨损率都远低于国标规定值,具有良好的耐磨性,但芳纶浆粕的加入可以改善摩擦材料试样的耐磨性。摩擦温度对磨损率的影响趋势是随温度增加磨损率增大,但在 350 ℃ 磨损率增加的程度有所降低。

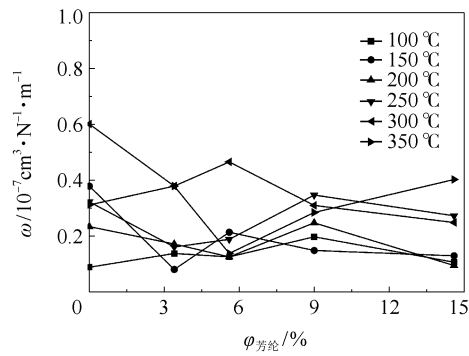


图 2 芳纶浆粕含量在不同温度下对磨损率的影响
Fig.2 Effects of the aramid pulp content on wear rate at different temperatures

2.2 制动摩擦材料摩擦性能的可拓评价

2.2.1 可拓评价模型的构建

可拓评价法是可拓学中评价一个对象(包括事物、策略、方法等)优劣的基本方法。用于制动摩擦材料摩擦性能的可拓评价方法是根据国标 GB5763—2008(表 2),以摩擦材料试样为评价对象,对其在不同温度下的 μ 和 ω 进行定量评价,所得综合关联度较高的试样为性能优异的摩擦材料^[14-15]。

表 2 汽车用制动器衬片摩擦性能检验的国家标准

Table 2 The Chinese national standard for brake linings of automobiles

温度/℃	摩擦系数 μ	磨损率 $\omega/10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
100	0.25 ~ 0.65	0 ~ 0.5
150	0.25 ~ 0.70	0 ~ 0.7
200	0.25 ~ 0.70	0 ~ 1.0
250	0.25 ~ 0.70	0 ~ 1.5
300	0.25 ~ 0.70	0 ~ 2.0
350	0.25 ~ 0.70	0 ~ 2.5

摩擦材料的升、降温摩擦系数($\mu_i, i = 1, 2, \dots, 11$)越靠近国标规定的量值域 $\langle a_i, b_i \rangle$ 中点越稳定,其关联度也越大。一汽集团公司轻型车盘式摩擦衬片标准 JF04-20 规定优等品摩擦系数为 0.45,与国标中量值域的中点接近^[17]。关于摩擦系数的关联函数定义为式(1)。

$$K(\mu_i) = \begin{cases} \frac{2(\mu_i - a_i)}{b_i - a_i}, & \mu_i \leq \frac{a_i + b_i}{2} \\ \frac{2(b_i - \mu_i)}{b_i - a_i}, & \mu_i \geq \frac{a_i + b_i}{2} \end{cases} \quad (1)$$

假定各温度下摩擦系数具有同等重要性,即权重相等,综合关联度可由各温度下摩擦系数的关联度及其对应的权重系数加权平均而得到,见式(2)。

$$\overline{K(\mu)} = \sum_{i=1}^{11} \alpha_i K(\mu_i), \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_{11} = \frac{1}{11} \quad (2)$$

磨损率越小越好,即其关联度在国标规定量值域的左端点达最大。与摩擦系数类似,相应的各温度下的关联度和综合关联度据式(3)和(4)计算。

$$K(\omega_j) = \begin{cases} \frac{\omega_j - a_j}{b_j - a_j}, & \omega_j < a_j \\ 1, & \omega_j = a_j \\ \frac{b_j - \omega_j}{b_j - a_j}, & \omega_j > a_j \end{cases} \quad (3)$$

$$\overline{K(\omega)} = \sum_{j=1}^6 \beta_j K(\omega_j), \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_6 = \frac{1}{6} \quad (4)$$

综合考虑摩擦系数和磨损率($x = \mu$ 或 ω),用来反映摩擦材料整体性能的综合关联度可按式(5)计算。

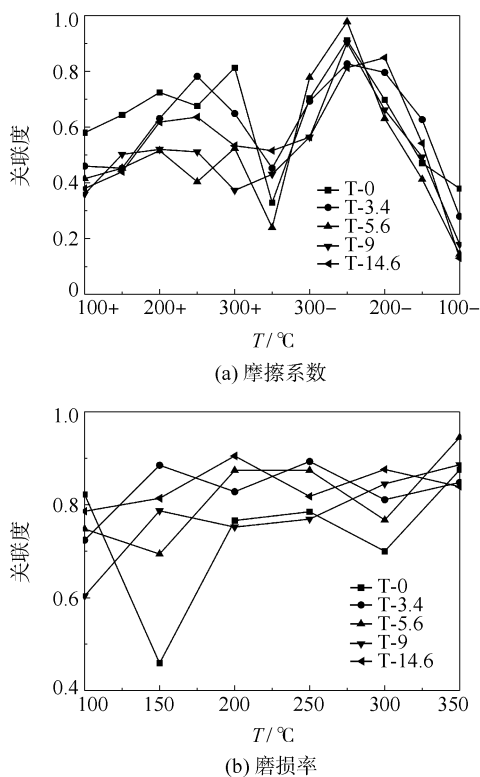
$$\overline{K(x)} = \sum_{i=1}^{17} w_i K(x_i), w_1 = w_2 = \dots = w_{17} = \frac{1}{17} \quad (5)$$

2.2.2 可拓评价结果分析

不同温度下摩擦系数和磨损率的关联度见图 3。芳纶浆粕增强的摩擦材料摩擦系数随温度的变化呈现出“M”型趋势,说明摩擦材料的 μ_t 和 μ_r 均在 250 ℃ 出现峰值。加入芳纶浆粕的摩擦材料具有较比较稳定的磨损率相关度,说明芳纶浆粕可以有效地改善摩擦材料的磨损性能的稳定性。关于摩擦系数的综合关联度、磨损率的综合关联度及整体性能的综合关联度的计算结果和优劣排序见表 3,说明制动摩擦材料中芳纶浆粕体积分数为 3.4% 时摩擦性能最好。

3 结论

(1)与不含芳纶浆粕的摩擦材料(T-0)比较,少量芳纶浆粕的加入(体积分数 3.4%)升温摩擦系数没有降低,但体积分数 $\geq 5.6\%$ 后升温摩擦系数有所



“+”和“-”分别代表升、降温过程

图3 不同温度下各摩擦材料的摩擦系数和磨损率对应的关联度

Fig.3 The weighted average dependent degrees of friction coefficient and wear rate at different temperatures
表3 摩擦材料的综合关联度及排序

Table 3 The weighted average dependent degree and ranking of the riction materials

编号	$\overline{K(\mu)}$	排序 (μ)	$\overline{K(\omega)}$	排序 (ω)	$\overline{K(x)}$	排序 (μ 和 ω)
T-0	0.630	1	0.734	5	0.667	2
T-3.4	0.605	2	0.831	2	0.685	1
T-5.6	0.500	4	0.817	3	0.612	4
T-9.0	0.500	4	0.774	4	0.597	5
T-14.6	0.547	3	0.840	1	0.651	3

降低。加入体积分数 3.4% 和 14.6% 芳纶浆粕的降温摩擦系数没有降低,加入体积分数 5.6% 和 9.0% 芳纶浆粕的降温摩擦系数有所降低。

(2)5 种制动摩擦材料都具有较好耐磨性。芳纶的加入进一步改善了摩擦材料的耐磨性。

(3)建立了制动摩擦材料摩擦性能的可拓评价模型。计算的整体性能的综合关联度与芳纶含量的关系和试样优劣顺序为:T-3.4,T-0,T-14.6,T-5.6 和 T-9.0。因此,制动摩擦材料中芳纶浆粕体积分

数为 3.4% 时摩擦性能最好。

参考文献:

[1] Kato T, Magario A. The wear of aramid fiber reinforced brake pads; The role of aramid fiber [J]. Tribology Transactions, 1994, 37(3): 559-565.

[2] Gopal P, Dharani L R, Blum F D. Hybrid phenolic friction composites containing kevlar pulp Part I. Enhancement of friction and wear performance[J]. Wear, 1996, 193(2): 199-206.

[3] Gopal P, Dharani L R, Blum F D. Hybrid phenolic friction composites containing kevlar pulp Part II. Wear surface characteristics [J]. Wear, 1996, 193(2): 180-185.

[4] Lu Y, Wang K, Jiao L, et al. Ceramic abrasives in brake friction composites [C] // Proceedings of 26th SAE Annual Brake Symposium and Exhibition, Oct. 12-15, 2008, San Antonio, TX, USA, P-402: 53-57. (SAE Paper 2008-01-2538)

[5] Tang C F, Lu Y. Combinatorial screening of ingredients for steel wool based semimetallic and aramid pulp based nonasbestos organic brake materials[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2004, 23(1): 51-63.

[6] Lu Y. A combinatorial approach for automotive friction materials: Effects of ingredients on friction performance [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(3/4): 591-598.

[7] Lu Y. A combinatorial approach for automotive friction materials: Combined effects of ingredients on friction performance[J]. Polymer Composites, 2002, 23(5): 814-823.

[8] Tomasek V, Kratosova G, Yun R, et al. Effects of alumina in non-metallic brake friction materials on friction performance[J]. Journal of Materials Science, 2009, 44(1): 266-273.

[9] 凡艳丽, 吕亚非. 制动摩擦材料的模糊综合评价[J]. 润滑与密封, 2008, 33(1): 73-75.

Fan Y L, Lu Y. Fuzzy comprehensive evaluation of friction performance of brake friction materials[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(1): 73-75. (in Chinese)

[10] Han L, Huang L, Zhang J, et al. Optimization of ceramic friction materials[J]. Composite Science and Technology, 2006, 66(3/4): 2895-2906.

[11] Lu Y, Tang C, Wright M. Optimization of a commercial brake pad formulation [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 84(13): 2498-2504.

[12] 吕亚非. 组合摩擦材料研究[J]. 世界科技研究与发

- 展, 2004, 26(3): 22 – 26.
- Lu Y. Combinatorial friction materials research [J]. World Sci-Tech R&D, 2004, 26(3): 22 – 26. (in Chinese)
- [13] 杨春燕, 蔡文. 可拓工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 161 – 169.
- Yang C Y, Cai W. Extension engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007: 161 – 169. (in Chinese)
- [14] Yun R P, Lu Y, Filip P, Application of extension evaluation method in development of novel eco-friendly brake materials[C] // Proceedings of 27th Annual Brake Colloquium and Exhibition, Oct. 11 – 14, 2009, Tampa, FL, USA, P – 405; 75 – 81. (SAE Paper 2009-01-3019)
- [15] 员荣平, 吕亚非. 可拓评价法在含蛭石制动摩擦材料中的应用[J]. 非金属矿, 2009, 32(6): 71 – 73.
- Yun R P, Lu Y. Application of extension evaluation method in development of vermiculite containing brake friction materials [J]. Non-Metallic Mines, 2009, 32(6): 71 – 73. (in Chinese)
- [16] 唐路林, 李乃宁, 吴培熙. 高性能酚醛树脂及其应用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 335 – 338.
- Tang L L, Li N N, Wu P X. High performance phenolic resins and their applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 335 – 338. (in Chinese)
- [17] 高惠民. 矿物复合摩擦材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 370 – 375.
- Gao H M. Mineral composite friction materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 370 – 375. (in Chinese)

Extension evaluation of the friction performance of aramid pulp-reinforced brake friction composites

YUN RongPing LU YaFei

(The Key Laboratory of Beijing City on Preparation and Processing of Novel Polymer Materials,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The effects of aramid pulp content and friction temperature on the friction performance of non-asbestos organic brake friction composites have been investigated. Based on the merit of extenics, the extension evaluation method was applied to assess the overall quality of five different friction composites. Five brake friction materials with different aramid pulp contents were evaluated and their performance, expressed as the weighted average dependent degree in the extension evaluation, placed in order from best to worst, as follows: 3.4% aramid pulp content > 0% > 14.6% > 5.6% > 9.0%.

Key words: aramid pulp; extension evaluation method; brake friction composites