填料粒度对汽车制动摩擦材料性能的影响

罗玲[1,2]，姚冠新[2]，陶飞[2]

（1. 盐城工学院，盐城 224002；2. 江苏大学 材料科学与工程学院，镇江 212013）

摘　要：目的　研究填料粒度对树脂基汽车制动摩擦材料性能的影响。**方法**　选取硅酸锆、氧化铝、石墨和蛭石作为填料，树脂基摩擦材料采用热压成型法制成，在 X-DM 摩擦试验机上进行摩擦磨损试验。采用正交试验法，对填料粒度不同的树脂基摩擦材料的摩擦因数标准差和高温磨损率进行极差分析，以获得填料粒度组合最佳的摩擦材料配方。采用扫描电子显微镜对该材料和未经过粒度优化材料在不同温度下的磨损表面形貌进行对比分析。**结果**　随着硅酸锆和氧化铝颗粒尺寸的增大，摩擦因数和高温磨损率均增大，但硅酸锆和氧化铝颗粒尺寸过大或过小都会造成摩擦因数的稳定性变差；石墨粒度变化对摩擦因数的稳定性影响不大，随着石墨颗粒尺寸的增大，高温磨损率减小；随着蛭石颗粒尺寸的增大，摩擦因数的稳定性变差，且高温磨损率增大。**结论**　硅酸锆和氧化铝粒度在 320 ~ 400 目之间，石墨粒度在 100 ~ 200 目之间，蛭石颗粒尺寸小于 80 目为最佳的粒度组合，制成的摩擦材料的摩擦磨损性能最佳，试样的摩擦因数稳定，高温磨损率较低，抗热衰退性能好。

关键词：摩擦材料；填料；粒度；摩擦因数；磨损率；正交试验法

中图分类号：U463.51；TH117　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1001-3660(2016)02-0097-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.015

Effect of Filler Size on Performance of Automotive Brake Friction Materials

LUO Ling[1,2], *YAO Guan-xin*[2], *TAO Fei*[2]

(1. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224002, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of filler size on friction and wear properties of phenolic resin matrix friction materials. **Methods** Zirconium silicate, alumina, graphite and vermiculite were selected as fillers of friction materials. The friction materials were prepared by hot pressing method, tribological properties were tested on X-DM friction testing machine. The design method used in this paper was orthogonal test, and range analysis method was used to analyze the standard deviation of friction coefficient (COF) and the wear rate at high temperatures to find a best formula of the friction material. The morphologies of this material and normal friction material at different temperatures were studied by SEM. **Results** The results showed that with the increases of zirco-

收稿日期：2015-10-20；**修订日期：**2015-12-16

Received：2015-10-20；**Revised**：2015-12-16

基金项目：博士点联合基金(20123227110016)

Fund：Supported by Doctoral Scientific Fund Project(20123227110016)

作者简介：罗玲(1992—)，女，硕士，主要从事制动摩擦材料的研究。

Biography：LUO Ling(1992—)，Female，Master，Research focus：brake lining friction materials.

通讯作者：姚冠新(1961—)，男，硕士，教授、博士生导师，主要从事制动摩擦材料的研究。

Corresponding author：YAO Guan-xin (1961—)，Male，Master，Professor，Doctoral supervisor，Research focus：brake lining friction materials.

nium silicate and alumina particle sizes, both the COF and the wear rate at high temperatures were increased, but too large or too small zirconium silicate and alumina particles would result in instable COF; the size of graphite had little effect on friction stability. With the increase of graphite size, the wear rate at high temperatures decreased; with vermiculite size increased, the friction stability deteriorated and the wear rate at high temperatures increased. **Conclusion** When zirconium silicate and alumina particle sizes were between 320 ~ 400 mesh, graphite particle size was between 100 ~ 200 mesh, vermiculite particle size was smaller than 80 mesh, the friction material had the best friction and wear properties, with high and stable COF and relatively low wear rate, and the performance of thermal fading resistance at elevated temperature was excellent.

KEY WORDS: friction materials; filler; particle size; friction coefficient; wear rate; orthogonal test

树脂基汽车制动摩擦材料是目前汽车工业中应用最广泛的一种摩擦材料,具有许多其他类型的摩擦材料所无法替代的优点,如摩擦因数稳定、低磨损、低噪音等[1]。树脂基摩擦材料主要由作为基体的高分子化合物、作为增强组分的纤维和起摩擦性能调节作用的填料组成。填料分为增摩填料和减摩填料,其中增摩填料的作用是增加摩擦因数,减摩填料的作用是降低摩擦因数和减小磨损率。填料作为树脂基摩擦材料中的摩擦调节剂,其硬度、粒度、密度、热导率等性质的变化都能对材料的摩擦磨损性能产生重要影响。目前国内关于填料粒度对材料性能影响的研究较多[2—5],国外一些学者的研究也表明,填料的粒度对摩擦材料的摩擦因数和磨损率都有很大影响[6—9]。然而,目前对于填料粒度的研究主要针对摩擦材料中的某一种或一类填料,缺乏对摩擦材料中所用增摩填料和减摩填料粒度的整体研究[10—12]。因此,研究摩擦材料中不同作用的填料粒度变化对摩擦材料性能的影响对于优化摩擦材料配方具有积极意义。本文选取不同粒度的硅酸锆、氧化铝、石墨和蛭石作为摩擦材料的填料,采用正交试验法,研究其粒度变化对摩擦材料的摩擦因数稳定性和高温磨损率的影响。

1 试验

1.1 材料准备

摩擦材料的组成成分(以质量分数计)为:酚醛树脂 10%,芳纶纤维 3%,玻璃纤维 8%,钛酸钾 10%,硫化锑 4%,硅酸锆 1.5%,氧化铝 1%,石墨 6%,蛭石 6%,其他 38.5%。

试验开始前,将所研究的四种填料在干燥箱中充分干燥。取出后,采用过筛分级的方法在标准检验筛上将四种填料的粒度进行分级。粒度分级情况如表 1 所示。本试验中考察的因素有 4 种,每种因素取 3 个水平,分析得知采用 $L_9(3^4)$ 的正交表比较合适。正交试验的表头设计如表 2 所示。

表 1 填料粒度分级(目)

Tab.1 Grading of filler size (mesh)

Level	Zirconium silicate	Alumina	Graphite	Vermiculite
1	−400	−400	−200	−80
2	+400−320	+400−320	+200−100	+80−40
3	+320	+320	+100	+40

Note: −320 indicates particles pass the 320 mesh griddle, +320 indicates particles cannot pass the 320 mesh griddle, +400−320 indicates particles can pass the 320 mesh griddle while cannot pass the 400 mesh griddle.

表 2 正交表表头设计

Tab.2 Design of orthogonal test

List	1	2	3	4
Factor	Zirconium silicate	Alumina	Graphite	Vermiculite
Code	A	B	C	D

1.2 仪器

仪器:标准检验筛(参照 GB/T 6003.1—1997),浙江上虞市华丰五金仪器有限公司;电热真空干燥箱(ZK-3 BS),天津市中环实验电炉有限公司;四柱液压成型机(HLY 71-63),温州鹤立液压机械有限公司;摩擦磨损试验机(X-DM),变速式咸阳新益摩擦密封设备有限公司;扫描电镜(JEOL-JXA-840A)。

1.3 材料制备工艺

酚醛树脂基摩擦材料的制备工艺流程[13]如下所述。

1) 将材料的组成成分称取好物料,投入混料机中进行充分搅拌混合,待混合均匀后取出放于试样带中,编号待用。

2) 将混好的料置于热压模具中,模具预热后的

温度应在 150 ~ 160 ℃之间,压力为 30 MPa,保压 30 s 后,放气一次,再保压 60 s,脱模取出。

3) 将压制好的试样放到烘箱中,温度升至 140 ℃,保温 1 h;升温到 160 ℃,保温 3 h;升温到 180 ℃,保温 6 h。冷却至室温,获得所需试样。

1.4　摩擦磨损性能测试

将试样尺寸加工为 25 mm×25 mm,厚度为 5 ~ 6 mm。同一配方取两个试样安装在摩擦磨损试验机上,试验机转速为 450 r/min,压力为 0.98 MPa。试验前,用游标卡尺在试样表面选取五个位置测量试样的厚度,输入程序中。实验开始后,温度升至 100 ℃,转盘转 5000 转后,将试样取出,用游标卡尺测量试样表面五个位置的厚度,输入程序,记录摩擦因数和磨损率。重复实验,分别记录温度为 150,200,250,300,350 ℃时的摩擦因数和磨损率。

磨损率按公式(1)计算:

$$V=\frac{1}{2\pi R}\frac{A}{n}\cdot\frac{d_1-d_2}{f_m} \tag{1}$$

式中:V 为磨损率($cm^3/(N\cdot m)$);n 为一次实验转盘的总转数(此处取 5000);A 为试片的摩擦总面积(cm^3);d_1 为试验前试片的平均厚度(cm);d_2 为试验后试片的平均厚度(cm);f_m 为试验时总的平均摩擦力(N)。

2　结果及分析

正交试验的分析方法有两种,即直接对比法和极差分析法。极差分析法是指通过计算每个因素指标值的最大值和最小值之差(即极差),并对极差的大小进行比较,从而确定各因素对试验指标的影响大小。某一因素的极差越大,表明该因素的水平改变对试验指标值的影响越大,应该优先考虑。通过极差分析法,不仅可以确定影响试验指标的主次要因素,还可获得各因素的最优水平,进而获得最佳成分组合。表 3 列出了 9 个试样在不同温度下摩擦因数(COF)的平均值和标准差及高温下(250 ~ 350 ℃)的磨损率值总和。

为了评价四种填料粒度对材料摩擦磨损性能的影响,并找到主要影响因素和最佳配方,分别对摩擦因数标准差和高温时磨损率的正交实验的结果进行极差分析。表 4 和表 5 分别为对摩擦因数标准差和高温时磨损率极差分析的结果。

表 3　摩擦磨损性能测试结果

Tab.3 Testing results of friction and wear performance

No.	Average COF	Standard deviation of COF	Wear rate at high temperatures /($\times10^{-7}$ $cm^3\cdot N^{-1}\cdot m^{-1}$)
1	0.360	0.0302	1.81
2	0.362	0.0285	1.23
3	0.362	0.0317	1.64
4	0.352	0.0293	1.95
5	0.366	0.0263	1.03
6	0.367	0.0267	1.50
7	0.360	0.0323	1.90
8	0.365	0.0328	1.75
9	0.363	0.0307	1.63

表 4　摩擦因数标准差的极差分析

Tab.4 Range analysis of standard deviation of friction coefficient

	A	B	C	D
K_{j1}	0.0903	0.091	0.0897	0.0872
K_{j2}	0.0823	0.0876	0.0885	0.0875
K_{j3}	0.0959	0.0891	0.0903	0.0938
$\overline{K}_{1j}$	0.0301	0.0303	0.0299	0.0291
$\overline{K}_{2j}$	0.0274	0.0292	0.0295	0.0292
$\overline{K}_{3j}$	0.032	0.0297	0.0301	0.0313
R_j	0.0046	0.0011	0.0006	0.0022
Optimization scheme	A_2	B_2	C_2	D_1

表 5　高温磨损率的极差分析

Tab.5 Range analysis of wear rate at high temperature

	A	B	C	D
K_{j1}	4.68	5.66	5.06	5.5
K_{j2}	4.48	4.01	4.81	4.63
K_{j3}	5.28	4.77	4.57	5.34
$\overline{K}_{1j}$	1.56	1.89	1.69	1.83
$\overline{K}_{2j}$	1.49	1.34	1.6	1.54
$\overline{K}_{3j}$	1.76	1.59	1.52	1.78
R_j	0.27	0.55	0.17	0.29
Optimization scheme	A_2	B_2	C_3	D_2

表 4 为对各温度下摩擦因数标准偏差值的极差分析结果。可以观察到,4 个因素中因素 A 的极差最大,说明硅酸锆的粒度改变对材料摩擦因数标准偏差的影响最大,其次是因素 D,B,C。从极差分析可以确定优化方案为 $A_2B_2C_2D_1$,硬质颗粒硅酸锆和氧化铝粒度为 320 ~ 400 目时,摩擦因数最稳定。这是因为

当硬质颗粒尺寸过小时,造成摩擦面光滑,摩擦因数减小,高温时,这些小颗粒及时填充划痕部分,使摩擦因数降低,造成摩擦因数波动大,引起热衰退;当颗粒尺寸过大时,易使摩擦表面产生较深划痕,增加了摩擦面的粗糙度,从而使试样的摩擦因数变大,当温度较高时,这些大颗粒硬质填料又会使表面的氧化层脱落,使摩擦面变得光滑,这也是造成该水平下摩擦因数产生波动的原因。石墨粒度对摩擦因数稳定性的影响最不明显。蛭石对摩擦因数的影响规律与石墨不同,随着蛭石尺寸的增大,摩擦因数的稳定性越差。

表 5 为高温下磨损率的极差分析,可以观察到因素 B 和因素 D 的极差最大,这说明因素 B 和因素 D 的粒度改变对高温磨损率的影响最大,其次是因素 A 和因素 C,优化方案为 $A_2B_2C_3D_2$。可以发现,氧化铝粒度的影响作用最大,其次是蛭石和硅酸锆,而石墨粒度对高温磨损率的影响最小。随着硅酸锆和氧化铝颗粒尺寸的增大,磨损率增大。这是因为大尺寸的硅酸锆和氧化铝颗粒在摩擦过程中会不断使摩擦表面层脱落,造成磨损率增大。由于硅酸锆和氧化铝的硬度较大,小尺寸具有填充作用,可以有效地增加试样的硬度,减少磨损,所以它们对磨损率的影响较软质填料的更加明显。蛭石尺寸过大或过小时,都会使磨损率增大。而随着石墨尺寸的增大,试样磨损率减小。

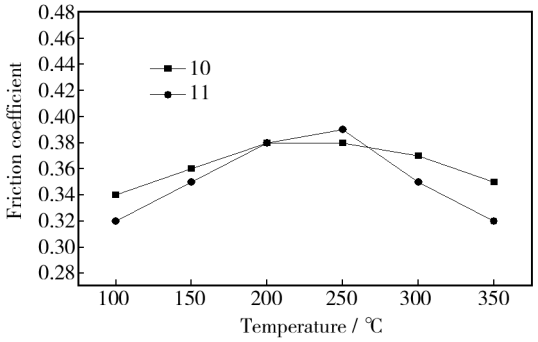
从摩擦因数和磨损率的极差分析结果,可以确定两个最佳配方分别为 $A_2B_2C_2D_1$ 和 $A_2B_2C_3D_2$。分别以这两个配方制成摩擦材料,并编号 10 和 11。对这两个试样进行摩擦磨损实验,所得摩擦因数和磨损率的结果如图 1 所示。

从两个试样的摩擦因数和磨损率曲线图可以看出,10 号试样摩擦因数更稳定,且摩擦因数平均值保持在 0.36 左右,而 11 号试样高温磨损率更低,但总的来说两试样的磨损率都较低。由于试样的高温热衰退性能主要受摩擦因数稳定性的影响,综合考虑,选择 10 号试样为树脂基摩擦材料填料的最佳粒度组合,即硅酸锆和氧化铝粒度在 320 ~ 400 目之间,石墨粒度在 100 ~ 200 目之间,蛭石粒度小于 80 目。

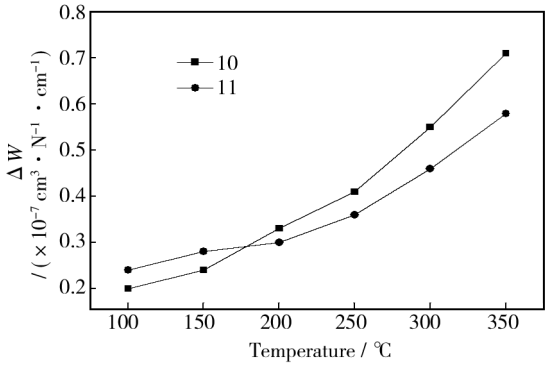
为验证 10 号试样的热衰退性能,采用摩擦因数稳定系数 α_{CT} 和摩擦因数的变化系数 γ 表征,其计算方法如公式(2)和(3)所示 。

$$\alpha_{CT}=\frac{\mu_{CP}}{\mu_{max}} \tag{2}$$

$$\gamma=\frac{\mu_{min}}{\mu_{max}} \tag{3}$$



a 摩擦因数



b 磨损率

图 1 试样的摩擦因数和磨损率

Fig. 1 Fiction coefficient and wear rate of the two samples

式中:μ_{CP},μ_{min} 和 μ_{max} 分别指摩擦实验过程中摩擦因数的平均值、最小值和最大值。α_{CT} 值和 γ 值越接近 1,则试样的摩擦因数稳定性和抗热衰退性能越好。经计算,10 号试样的 α_{CT} 为 0.94,γ 为 0.89,都大于重型载货汽车用摩擦材料 0.8 的标准。由此说明,该试样的摩擦因数稳定性和抗热衰退性都良好。

3 摩擦表面形貌 SEM 图像分析

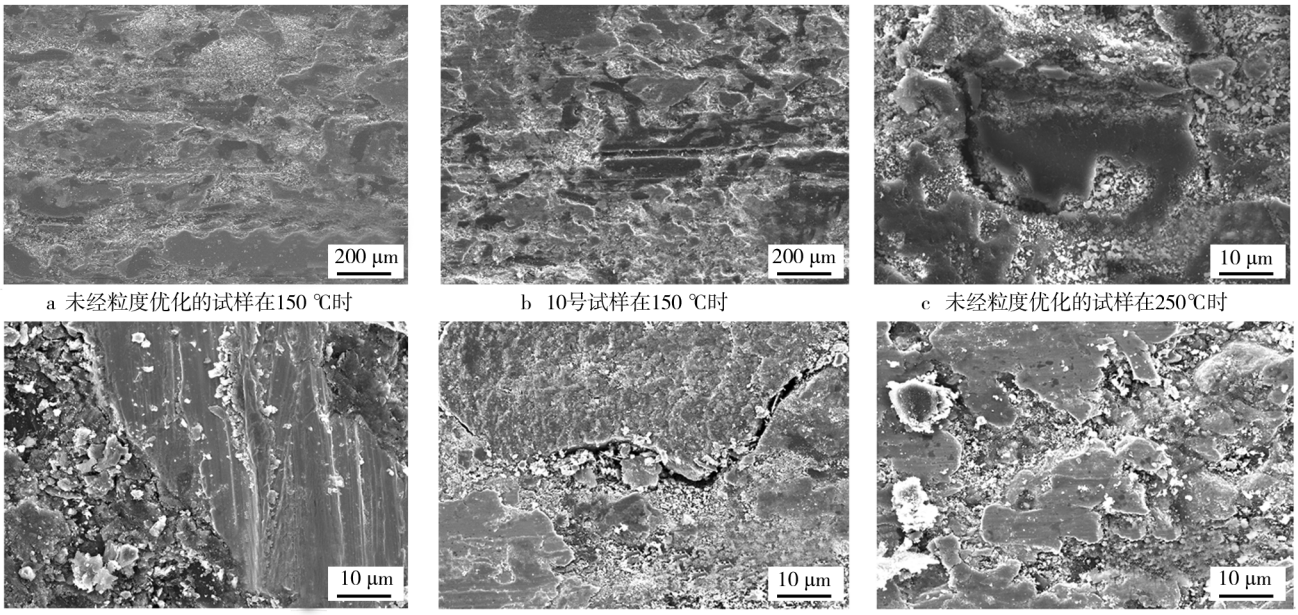
对 10 号试样磨损后的形貌进行 SEM 图像分析,研究在不同温度下摩擦材料的表面形貌和磨损机理,并与未进行粒度优化的材料的磨损表面进行比较,以探讨填料粒度对摩擦材料摩擦磨损性能的影响。本文选取试样在温度分别为 150,250 和 350 ℃时的磨损形貌作为研究对象。

图 2a 为 150 ℃时未经粒度优化的试样的磨损形貌,可以观察到,试样表面存在明显的犁沟和刮痕,有明显的切削和磨粒磨损痕迹。从摩擦磨损的机理分析,这是由于未经粒度优化的试样的填料粒度不均匀,其中大尺寸的硅酸锆和氧化铝颗粒容易与对偶表面形成不平的接触面,这些大颗粒在剪切力的作用下

被撬动,脱落于摩擦界面间产生滚动和摩擦,造成试样和对偶表面的机械损伤;而大尺寸的石墨和蛭石颗粒由于分散性差且质软,其所分布的试样表面区域硬度较小,摩擦时对偶表面上较硬的微凸体会嵌入这些区域,在反复的滑动过程中试样表面形成沟槽,由此犁出的颗粒形成磨屑。图 2b 为 150 ℃时粒度优化后试样的磨损形貌,可以看到此时试样表面整体光滑,只存在少量浅而细长的犁沟。这是因为经粒度优化后的硬质填料的颗粒尺寸在 320 ~ 400 目之间,颗粒尺寸均匀,不存在大颗粒造成的凸出,减少了由于试样表面大颗粒脱落造成的磨粒磨损,同时,小尺寸的石墨和蛭石颗粒分散性好,石墨的润滑效果较好。此阶段试样的摩擦因数高而稳定,且磨损率较低[14]。

250 ℃时,摩擦试样表面形成了一层稳定的表面膜。图 2c 为此温度下未经过粒度优化的试样的磨损形貌,可以观察到试样表面存在光滑的稳定磨损区和磨屑堆积区。这是由于脱落的小尺寸填料形成磨屑,经过反复摩擦,在摩擦表面形成了一层均匀致密的表面膜,这个表面膜的存在阻隔了对偶材料与摩擦试样表面的接触,减少了粘着磨损;而大尺寸的填料脱落后,在反复的滑动过程中一部分被压碎成小颗粒形成稳定的表面膜,另一部分较大颗粒形成磨屑聚集堆积在摩擦层表面。同时有一些断裂的纤维被拔出形成坑洼和微小的裂纹,此时材料的主要磨损机理为疲劳磨损和粘着磨损。相比之下,250 ℃时粒度优化后的试样表面膜分布均匀且连续,磨屑堆积区小,如图 2d 所示。这是因为在不断的摩擦过程中,脱落的颗粒粒度均匀,在摩擦界面内被反复地剪切、碾磨,最终粘附在试样表面,形成光滑的表面膜,保证了摩擦材料稳定的摩擦因数和较小的磨损率。

当温度达到 350 ℃时,在未经粒度优化的试样的磨损表面可以观察到明显的颗粒脱落和纤维断裂拔出现象,同时裂纹不断长大,如图 2e 所示。这是由于树脂在高温下分解,粘结性变弱,填料颗粒和增强纤维松动和脱落,造成试样表面坑洼不平。随着树脂热分解的进行,因此而产生的低分子化合物(主要为苯、甲酚、醛等)的量越积越多且分布不均匀,造成材料在高温下的磨损加剧,同时树脂分解产生的气体,会在摩擦面上形成一层“气垫膜”,使得摩擦因数下降,造成热衰退现象[15]。图 2f 为粒度优化后试样在 350 ℃下的磨损形貌,此时试样表面也存在树脂分解产物形成的堆积层,但是与图 2e 相比其厚度已明显降低,且分布均匀,这是因为蛭石具有特殊的中空结构,能够吸收由树脂热分解产生的气体和低分子化合物,减少了“气垫膜”的形成。而小尺寸蛭石比表面积大,孔隙度大,且受热后体积膨胀小,与大尺寸蛭石相比具有更好的吸附作用,因而能够显著减少热衰退现象。同时,硬质填料尺寸较大时,能和基体材料牢固的结合,不易从试样表面脱落,从而对基体材料起到保护作用,降低磨损。



a 未经粒度优化的试样在150 ℃时　b 10号试样在150 ℃时　c 未经粒度优化的试样在250℃时

d 10号试样在250 ℃时　e 未经粒度优化的试样在350 ℃时　f 10号试样在350 ℃时

图 2　试样在不同温度下的磨损形貌

Fig. 2 Worn morphologies of the samples at different temperatures: a) normal friction material at 150 ℃, b) No. 10 sample at 150 ℃, c) normal friction material at 250 ℃, d) No. 10 sample at 250 ℃, e) normal friction material at 350 ℃, f) No. 10 sample at 350 ℃

4 结论

1）分别对四种填料的粒度进行了分级，采用正交试验法确定了一个最佳组合。当硅酸锆和氧化铝粒度为 320 ~ 400 目，石墨粒度为 100 ~ 200 目，蛭石粒度小于 80 目时，摩擦材料的摩擦磨损性能最佳。

2）增摩填料对材料摩擦因数稳定性的影响较减摩填料的大，随着硅酸锆和氧化铝粒度的增大，摩擦材料的摩擦因数增大且磨损率增大，而石墨粒度的变化对摩擦因数稳定性的影响不大。

3）当摩擦材料在高温工作时，材料中的树脂由于高温分解，造成摩擦因数急剧降低，产生热衰退现象，蛭石具有独特的中空结构，能够吸附由树脂热分解产生的低分子化合物和气体，减少热衰退的产生，且蛭石尺寸越小，吸附效果越好。

参考文献

[1] 王红侠，姚冠新. 汽车制动器摩擦材料的研究现状和发展[J]. 现代制造工程，2006(10)：136—139.
WANG Hong-xia，YAO Guan-xin. The State of the Arts and Development of Studies on Friction Materials of Automotive Brake[J]. Modern Manufacturing Engineering，2006(10)：136—139.

[2] 李广敏，牛宗伟，董海青. 锌粉粒度对机械镀锌层耐腐蚀性能的影响[J]. 表面技术，2013，42(5)：5—7.
LI Guang-min，NIU Zong-wei，DONG Hai-qing. Effect of Zinc Powders of Different Particle Size on Corrosion Resistance of Mechanical Zinc Coatings[J]. Surface Technology，2013，42(5)：5—7.

[3] 韩志兵，朱世根，齐小犇，等. 纳米和微米 WC/12Co 涂层的电接触强化研究[J]. 表面技术，2013，42(4)：17—20.
HAN Zhi-bing，ZHU Shi-gen，QI Xiao-ben，et al. Study on Performance of Nano-WC/12Co and Micro-WC/12Co Coating by Electric Contact Strengthening[J]. Surface Technology，2013，42(4)：17—20.

[4] 鲁知音. 汽车摩擦材料中填料的优化设计[D]. 贵阳：贵州大学，2007.
LU Zhi-yin. Optimization of Filler Design of Vehicle Braking Friction Material[D]. Guiyang：Guizhou University，2007.

[5] 答建成，周细应，周涛，等. 汽车零部件表面强化技术研究现状及展望[J]. 表面技术，2015，44(7)：68—75.
DA Jian-cheng，ZHOU Xi-ying，ZHOU Tao，et al. Research Status and Prospects of Surface Strengthening Technology of Auto Parts[J]. Surface Technology，2015，44(7)：68—75.

[6] GAHLIN R，TACOBON S. The Particle Size Effect in Abrasion Studied by Controlled Abrasive Surface[J]. Wear，1999(224)：118—125.

[7] 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.

[8] KOLLURI D K，BOIDIN X，DESPLANQUES Y，et al. Effect of Natural Graphite Particle Size in Friction Materials on Thermal Localisation Phenomenon during Stop-braking[J]. Wear，2010(268)：1472—1482.

[9] THAKAREA M R，WHARTONA J A，WOODA R J K，et al. Effect of Abrasive Particle Size and the Influence of Microstructure on the Wear Mechanisms in Wear-resistant Materials[J]. Wear，2012(276)：16—28.

[10] 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(12)：33—36.
LU Zhi-yin，GUAN Qi-ming，HE Lin，et al. The Effects of Inorganic Fillers on Friction and Wear Properties of Braking Friction Material[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2007(12)：33—36.

[11] 吴训锟，王昌松，冯新. 晶须状填料对酚醛树脂摩擦材料性能的影响[J]. 润滑与密封，2007(11)：122—126.
WU Xun-kun，WANG Chang-song，FENG Xin. Effect of Whiskers-like Fillers on the Phenolic Resin-based Friction Material[J]. Lubrication Engineering，2007(11)：122—126.

[12] 刘伟，胡以强. 基于填料粒度对离合器摩擦材料性能影响的研究[J]. 纤维复合材料，2009(3)：19—23.
LIU Wei，HU Yi-qiang. Study on the Effect of Filler Particle Size on the Performance of Clutch Friction Materials[J]. Fiber Composite，2009(3)：19—23.

[13] 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，2012(3)：333—337.
YAO Guan-xin，HOU Ming-shen，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，2012(3)：333—337.

[14] 姚冠新，张宝玉. 硬质填料 $ZrSiO_4$、Al_2O_3 对制动摩擦材料性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料，2013(10)：32—36.
YAO Guan-xin，ZHANG Bao-yu. Effect of Antifriction Filler $ZrSiO_4$ and Al_2O_3 on Friction and Wear Behavior of Brake Friction Material[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2013(10)：32—36.

[15] 侯明深，姚冠新. 重型汽车树脂基制动摩擦材料热衰退问题的研究[J]. 农机使用与维修，2012(3)：21—25.
HOU Ming-shen，YAO Guan-xin. Research on Heat Fade Performance of Resin Matix Friction Materials for Heavy Duty Truck Brake[J]. Farm Machinery Using & Maintenance，2012(3)：21—25.