

半金属盘式刹车材料的试验研究

章少阳¹, 陈维平¹, 王福平²

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院金属新材料中心, 广东 广州 510640;

2. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘要: 通过正交试验设计和蔡氏试验机测试, 得到了摩擦系数受温度、载荷和速度影响较小, 磨损也较小的半金属盘式刹车材料配方, 其平均摩擦系数是 0.444. 结果表明, 在 4 种被研究的成分中温和的研磨剂氧化铁黑对与温度有关的摩擦系数的标准偏差影响最大, 原因在于其只对冷制动起增摩作用而对热制动没有增摩作用; 过多使用强的研磨剂氧化铝会导致摩擦系数和比磨损率增大, 出现过恢复, 并且摩擦系数随载荷增加; 而过多使用混合润滑剂(石墨和三硫化二锑)会减小摩擦系数和比磨损率.

关键词: 刹车材料; 摩擦系数; 比磨损率; 研磨剂; 润滑剂

中图分类号: TB333

文献标识码: A

文章编号: 1004 - 0595 (2009) 02 - 0186 - 07

现代汽车已经从一百多年前单纯的交通工具被赋予了更多的功能. 每个驾驶员都希望自己的汽车有最佳的制动性能. 从一次完整的制动过程看, 速度是不断减小的. 如果摩擦系数随速度大幅度地提高, 刹车片容易抱死制动盘; 反之, 会缺少足够的摩擦力矩在规定的制动距离内使汽车停下来. 从能量观点看, 制动实质上是把汽车的大部分动能通过刹车片和制动盘(或鼓)之间的摩擦转化为热能, 大部分的热能恰又被制动器吸收引起温度升高的过程^[1]. 温度升高摩擦水平不衰退也是很危险的, 因为驾驶员不能够及时注意到制动器在变热, 会失去调整制动方式改善制动器变热的机会, 结果越来越热直到附近的轮胎爆裂, 或者刹车片磨损加快, 严重时引起刹车片着火. 刚踩制动踏板是刹车压力迅速增大的时候, 如果摩擦系数随压力快速增加, 摩擦力矩在瞬间变得很大, 就会遇到平常乘车向前不舒服的猛烈一倾的现象. 制动可靠性、安全性和舒适性降低是与摩擦材料密不可分的, 一块好的摩擦材料必须具备的主要条件为: 摩擦系数不随速度、温度和压力变化, 即使有变化也在可接受范围内. 温度升高摩擦系数减小的现象称为热衰退; 受热后再冷却到室温摩擦系数最好能恢复到原来的水平. 而冷却后摩擦系数比原来还高的现象称为过恢复. 无论是热衰退

还是过恢复都是不希望发生的. 摩擦材料要有一定的磨损, 摩擦表面若没有磨损就会出现釉化, 导致摩擦系数减小; 但磨损也不能太快, 否则会降低它的使用寿命.

单一材料很难满足制动性能如摩擦力、摩阻、噪音习性和制动产生震动的要求. 因此, 刹车片配方都由多种材料复合而成. 要考察每种原材料对配方的影响而进行全面试验, 是费时耗力的工作. 解决这类问题最简单的方法是正交试验设计. 本文以过往研究结果为基础, 利用正交表设计出试验配方, 用 Chase(蔡氏)机测出摩擦系数和磨损随温度、压力和速度变化关系. 由于 Chase 机使用温度与实际汽车制动的温度更为接近, 所以选择摩擦系数温度特性值的标准偏差为主要衡量指标, 参考压力和速度对摩擦系数影响及所有磨损的大小, 用综合平衡法筛选出性价比好的半金属盘式刹车片配方.

1 实验部分

1.1 原材料准备

摩擦材料按照其组分在摩擦过程所起的作用可分为四类: 黏结树脂: 使其他成分保持在一起, 构成一个稳定基体. 结构材料: 提供机械强度. 常用的有金属纤维、碳纤维、玻璃纤维和芳纶纤维.

收稿日期: 2008 - 04 - 01; 修回日期: 2008 - 10 - 10; 联系人: 章少阳, e-mail: zhshy@scut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575076); 广东省自然科学基金资助项目[粤科基(2003)07号(36547)].

作者简介: 章少阳(1964 -), 男, 博士, 目前主要从事汽车刹车片和离合器面片摩擦材料研究.

填料:降低成本,改善加工性能.如重晶石、硅灰石和长石粉. 摩擦材料改性剂:能稳定摩擦系数,控制制动盘和刹车片的磨损.石墨和三硫化二锑有减小摩擦系数作用被称为减摩材料.氧化铝和硅酸锆能提高摩擦系数,去除制动盘上出现的摩擦薄膜同时对制动盘也有磨蚀作用被称为增摩材料.本文半金属盘式刹车片配方由以下成分组成:酚醛树脂、钢纤维、氧化铝、氧化铁黑、石墨、三硫化二锑、重晶石和六钛酸钾晶须.

1.2 刹车材料制备方法

配方中各种成分按质量比称量后放入 JF820SJ 混料机(本文所用试验和测试设备都由吉林大学机电设备研究所生产)里混合,得到均匀的混合料.再倒入模具里在热压机上压制成型,成型压力是 25 MPa,温度是 165 ,时间是 10 min 取出后在 200 的烘箱中热处理 8 h,经磨片,切取一定尺寸样品用于 Chase 机上测试.

1.3 试验方法

Chase 测试机是由美国 Link Engineering Co (林肯工程公司)设计为测试汽车刹车片和离合器面片的专业设备.使用 Ni - Cr - Mo 的低合金铸铁制动鼓(硬度是 HB235,内径的有效范围 277 ~ 280 mm),目的是模拟汽车的实际制动过程.图 1 是 JF 160 Chase 测试机示意图.其载荷、速度和温度可调节范围分别是 0 ~ 2 700 N, 0 ~ 1 000 r/min 和 0 ~ 540 .

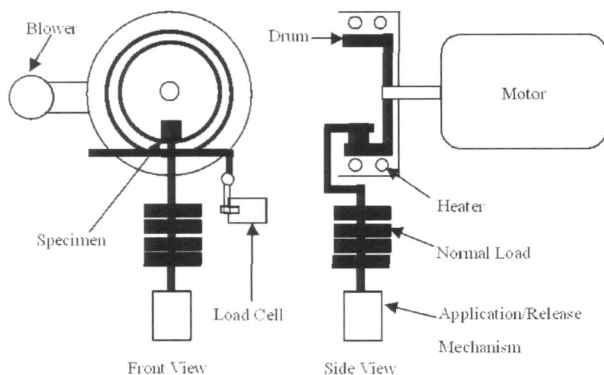


Fig 1 Schematic diagram of Chase tester
图 1 蔡氏测试机示意图

Chase 测试机执行 SAE (Society of Automotive Engineers) J661a 测试标准.试样尺寸为 25.4 mm × 25.4 mm,厚度大约为 6 mm.试验前先在转速为 5.8 m/s,载荷为 446 N,最高温度为 93 的条件下对试样磨合,时间不少于 20 min 试验按照以下步骤

进行:

(1)基线试验:转速为 6.1 m/s 时,对试样加载 10 s,载荷为 669 N,然后卸载 20 s,共进行 20 次.每次加载鼓温都应保持在 82 ~ 93 之间;

(2)第一次衰退试验:鼓温降至 82 ,转速为 6.1 m/s,载荷为 669 N 的条件下,对试样连续拖磨.当温度达到 288 试验即告完成.从 93 开始,每隔 28 记录一次摩擦力;

(3)第一次恢复试验:打开冷却风,转速 6.1 m/s,当鼓温降至 260、204、149 和 93 时,对试样加载 10 s,载荷为 669 N.记录各次加载时的摩擦力;

(4)第二次衰退试验:类似第一次衰退试验,但最后温度升高到 343 ;

(5)第二次恢复试验:类似第一次恢复试验,但鼓温从 316 开始下降.

由于刹车材料只有多次制动才能更好地显示它的热稳定性,这里只给出第二次衰退和恢复试验的结果^[2]. Chase 测试机还可以根据用户实际需要,编排出多种测试规范.以下是本文其他测试内容:

(1)载荷敏感性试验:在恒定速度 6.1 m/s 和温度 204 下,载荷每隔 200 N 从 1 269 N 减少到 669 N,依次测定不同载荷的摩擦系数;

(2)速度敏感性试验:在恒定载荷 669 N 和温度 204 下,速度每隔 2.9 m/s 从 6.1 m/s 增加到 14.9 m/s,依次测定不同速度的摩擦系数;

(3)磨损试验:温度、载荷和速度分别从 177 到 343 , 669 N 到 1269 N 和 6.1 m/s 到 14.9 m/s 发生改变.每次试验对试样加载 20 s,然后卸载 10 s,共进行 100 次.试样在测试前后被称重,按下列公式计算出比磨损率^[3]:

$$k = \frac{m}{utPd}$$

其中 k 是比磨损率 [$\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$]; m 是试样质量磨损 (kg); d 是试样的密度 (kg/m^3); P 是应用载荷 (N); u 是鼓的速度 (m/s); t 是总的制动时间 (s).

2 配方设计

2.1 黏结树脂和结构材料的确定

酚醛树脂(简称为 R)和钢纤维(简称为 S)是整个配方中最重要的 2 种成分,为了减少组成物之间的相互影响,采用简单二元组分来研究它们的性能. R 和 S 以不同的质量比混合,质量比分别为 1 : 4、3 : 7、2 : 3 和 1 : 1.经热压成型和热处理后用 Chase 试验机测试样品.结果如图 2 所示.

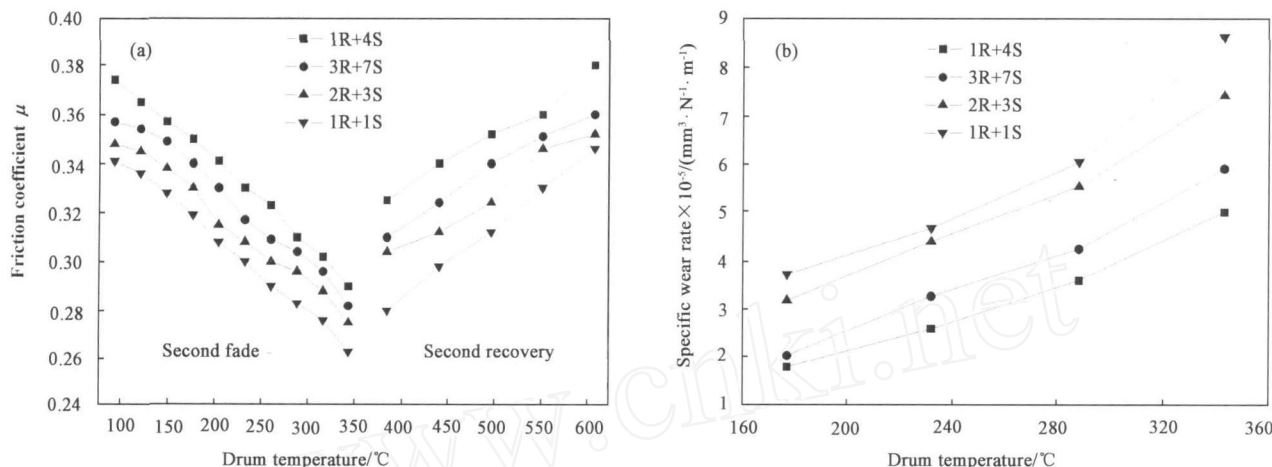


Fig 2 Friction coefficient and specific wear rate as functions of temperature for four composites containing different weight ratios of resin and steel wool fiber

图 2 4种不同树脂和钢纤维质量比的复合材料的摩擦系数和比磨损率随温度的变化曲线

从图 2 (a) 第二次衰退试验表明:随着钢纤维含量的增加,摩擦系数逐渐增大.原因是硬质成分的增加,与对偶盘摩擦时剪切力也增加.但随着温度的升高,摩擦系数出现了严重的热衰退,这与树脂在高温条件下分解加剧是有关系的.第二次恢复试验表明:摩擦系数恢复很快并出现了过恢复现象.这种过恢复主要是材料经过 343 高温后,摩擦表面树脂成分减少和硬质成分相应增多的缘故.如果钢纤维含量再增加,如树脂和钢纤维的质量比达到 1:9,混合时纤维容易结团,均匀分散纤维和成型加工变得困难.相反,钢纤维含量太少,材料结构强度下降,会过早地出现摩擦衰退,此结果另外撰文给出.图 2 (b)显示比磨损率随着钢纤维含量的增加而逐渐减少.这是由于硬质成分的增加阻止了复合材料的磨损.此外,随着温度的升高,树脂分解加剧,比磨损率快速增加.由此可见,在保证材料加工成型和材料强度的前提下树脂含量应尽可能少,这样可以减少摩擦衰退.

2.2 刹车材料配方设计

根据上述实验结果,并结合以前的摩擦材料的研究工作^[4],选择树脂和钢纤维的质量比是 1:4,并在配方中占 50%;由于石墨和三硫化二锑质量比大约是 4:3的混合减摩材料(简称为 CS)比单组分石墨有更好的抗衰退性能^[5],配方中采用了这种 CS;另外,当其他成分数量发生改变,可以调整六钛酸钾晶须的用量使总质量保持 100%,而不考虑其对摩擦性能的影响^[6].因此,只有四个因素影响着配方的性能:CS、氧化铝、氧化铁黑和重晶石.每个

因素都考虑 3 个水平,具体情况如表 1 所示.如果不考虑各种材料之间的相互作用,这是四因子三水平试验.选用正交表 $L_9(3^4)$ 见表 2.

表 1 正交试验因素和水平

Table 1 Factors and levels for orthogonal testing %

Level	A CS	B Alumina	C Magnetite	D Barites
1	20	2	3	6
2	22	3	5	8
3	24	4	7	10

表 2 四因素三水平正交试验设计和部分测试结果

Table 2 Four-factor and three-level orthogonal experimental design and partial testing results

No.	1 A	2 B	3 C	4 D	Partial testing results	
					Average friction coefficient	Standard deviation
1	1	1	1	1	0.449	9.3
2	1	2	2	2	0.475	12.6
3	1	3	3	3	0.509	19.7
4	2	1	2	3	0.444	8.5
5	2	2	3	1	0.466	12.8
6	2	3	1	2	0.491	15.3
7	3	1	3	2	0.407	17.0
8	3	2	1	3	0.425	14.5
9	3	3	2	1	0.452	11.6

3 试验结果

图 3、图 4 和图 5 分别给出了温度、载荷和速度对 9 种摩擦材料的摩擦系数和比磨损率的影响情况.

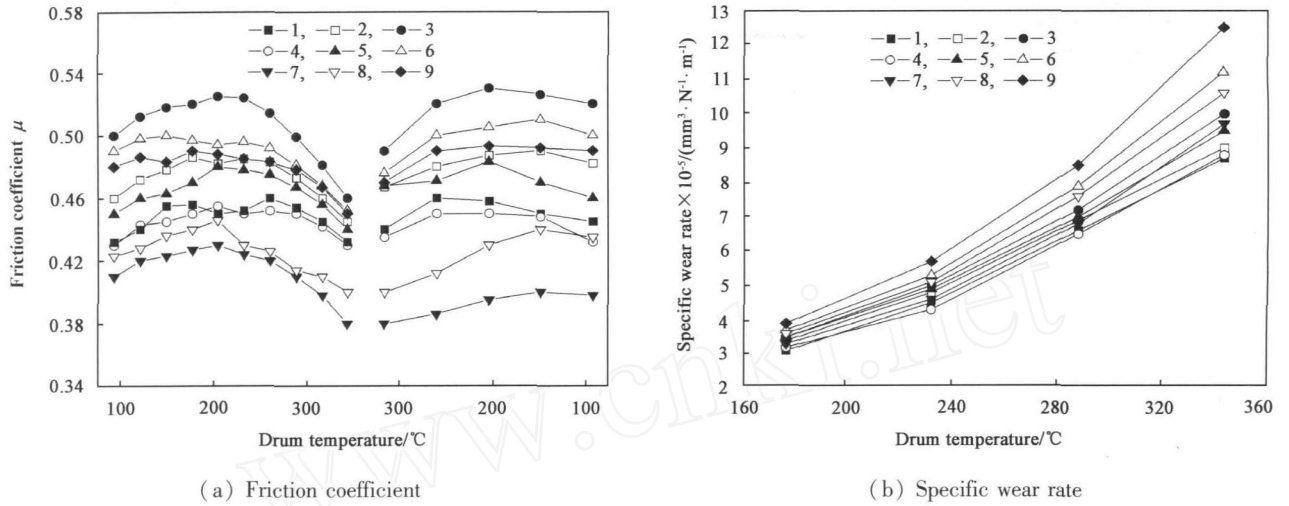


Fig. 3 Friction coefficient and specific wear rate as functions of temperature for nine friction materials

图 3 9 种摩擦材料的摩擦系数和比磨损率随温度的变化曲线

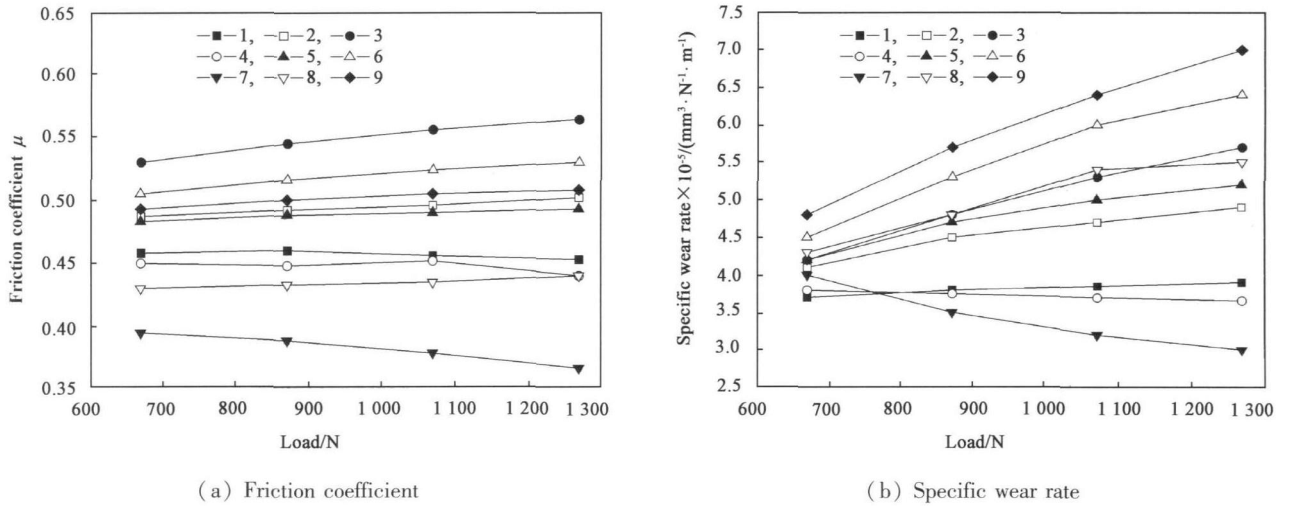


Fig. 4 Friction coefficient and specific wear rate as functions of load for nine friction materials

图 4 9 种摩擦材料的摩擦系数和比磨损率随载荷的变化曲线

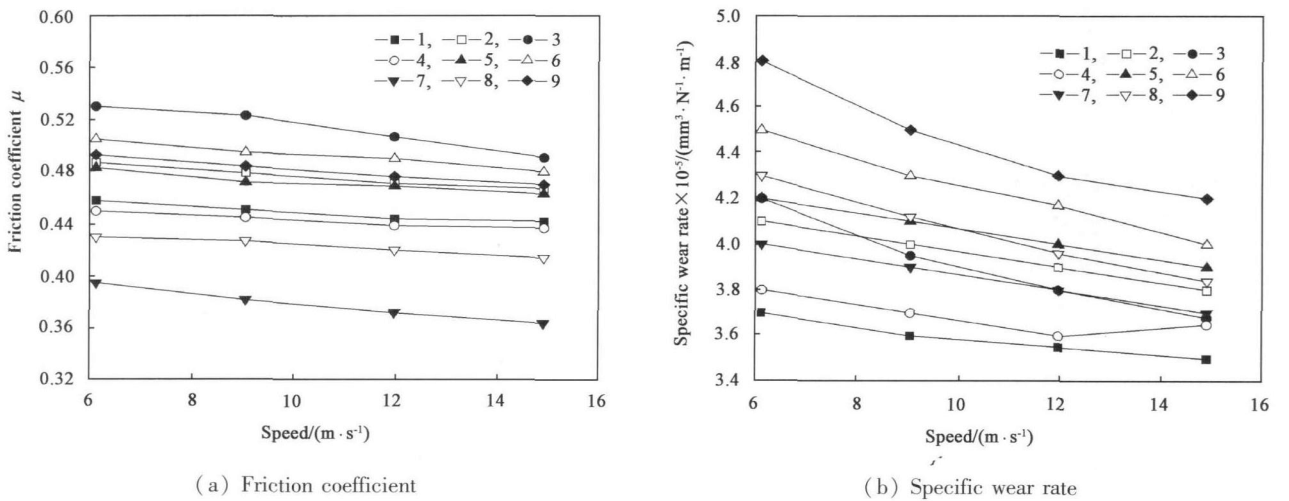


Fig. 5 Friction coefficient and specific wear rate as functions of speed for nine friction materials

图 5 9 种摩擦材料的摩擦系数和比磨损率随速度的变化曲线

表 2 中平均摩擦系数和对应的标准偏差是从图 3(a) 的试验结果中计算出来的. 表 3 中 K_1 这一行的 4 个数分别是因素 A, B, C, D 的第 1 水平所在的试验中对应的标准偏差 (见表 2) 之和. 如对因素 A, 它的第 1 水平安排在第 1, 2, 3 号试验中, 对应的标准偏差分别是 9.3, 12.6, 19.7, 其和为 41.6, 记在 K_1 这一行的第 1 列中; 因素 B, C, D 依次类推. 同样地, K_2 (或 K_3) 这一行的 4 个数, 分别为因素 A, B, C 和 D 的第 2 (或 3) 水平所在的试验中对应的标准偏差之和. k_1, k_2, k_3 这 3 行的 3 个数分别是 K_1, K_2, K_3 这三行的 3 个数除以 3 所得的结果, 即各水平对应的平均值. 同一列中, k_1, k_2, k_3 这 3 个数中的最大者减去最小者所得的差叫做极差. 极差越大, 说明这个因素的水平改变时对标准偏差的影响越大.

表 3 得到的极差和优方案

Table 3 The obtained extreme difference and optimal project

Items	1 A	2 B	3 C	4 D
K_1	41.6	34.8	39.1	33.7
K_2	36.6	39.9	32.7	44.9
K_3	43.1	46.6	49.5	42.7
k_1	13.9	11.6	13.0	11.2
k_2	12.2	13.3	10.9	15.0
k_3	14.4	15.5	16.5	14.2
Extreme difference	2.2	3.9	5.6	3.8
Optimal project	A ₂	B ₁	C ₂	D ₁

这里算出 4 列的极差分别为 2.2, 3.9, 5.6, 3.8, 显然第三列即因素 C 的极差为 5.6 最大, 这说明因素 C 改变时对标准偏差的影响最大, 因此因素 C 是要考虑的主要因素. 其 3 个水平所对应平均值分别为 13.0, 10.9, 16.5, 第 2 水平所对应数值 10.9 最小, 如果要求获得最小标准偏差, 取其第 2 水平最好. 类似地, 因素 B 排第 2 位, 取其第 1 水平最好. 因素 D 排第 3 位, 取其第 1 水平最好. 因素 A 的极差最小, 说明因素 A 改变时对标准偏差的影响最小, 取其第 2 水平最好. 因此, 各因素对标准偏差的影响按大小次序是 C (氧化铁黑) B (氧化铝) D (重晶石) A (CS); 优方案应当是 C2B1D1A2 但优方案在已做过的 9 次试验中没有出现, 与其比较接近的是第 4 号试验, 只有重晶石 D 不是处在最好水平, 而重晶石对标准偏差的影响在 4 个因素中只排第 3 位. 第 4 号试验的标准偏差是 8.5, 是 9 次试验中最小的, 说明找出的优方案是符合实际的.

为了最终确定上面找出的方案 C2B1D1A2 是否为优方案, 按这个方案再试验一次, 试验结果与第 4 号试验结果类似. 可见配方中减少 4% 重晶石并相应地增加 4% 六钛酸钾晶须对试验影响不大.

4 分析和讨论

氧化铝中 Al-O 键能特别大, 化学结构即使在较高温度下也非常稳定, 其莫氏硬度为 9, 是一种强的增摩材料. 氧化铁黑中 Fe-O 键能比 Al-O 键能小的多, 高温会减弱其化学结构稳定性, 其莫氏硬度大约为 5.5, 属于温和的增摩材料. 与氧化铝最大不同在于它只能在低温下起增摩作用, 高温下失去增摩作用^[7]. 而标准偏差是一种量度数据分布的分散程度的标准. 这种只在低温下起增摩作用而高温下并没有增摩作用的材料对标准偏差影响应当更大. 分析结果与上述氧化铁黑和氧化铝对摩擦系数标准偏差的影响次序是一致的.

酚醛树脂刹车材料与铸铁盘发生干摩擦时, 对偶面温度升高很快, 尤其是局部区域会出现闪点高温^[8]. 由于酚醛树脂是所有成分中最易分解的, 其结果必然导致刹车材料强度的大幅度下降, 磨损加快. 因此, 试验过程中产生的磨损主要来自刹车材料而不是铸铁盘^[9]. 产生的磨损碎片部分离开了摩擦表面, 部分留在对偶面之间. 摩擦学上把这些连续或间断地分布在对偶面的磨损碎片称作摩擦膜. 当较多的硬质颗粒进入摩擦膜可能导致三体磨粒磨损使摩擦系数和磨损明显增大; 而当较多的软质材料进入摩擦膜则会减小摩擦. 因此, 摩擦膜对材料的摩擦磨损起重要作用^[10].

从图 3(a) 得到的平均摩擦系数按大小排列: 3-6-9-2-5-1-4-8-7 号试验. 这是因为第 3 号试验配方中 CS 含量最少, 氧化铝和氧化铁黑含量最高, 较多的氧化铝和氧化铁黑进入摩擦膜后易发生三体磨粒磨损, 平均摩擦系数最大. 相反, 第 7 号试验配方中氧化铝含量少, CS 含量最高, 较多的 CS 进入摩擦膜后减小摩擦, 平均摩擦系数最小. 第 3, 6, 9 号试验出现较严重的过恢复, 其原因是经过前面 343 较高温度摩擦试验后, 摩擦膜中树脂成分减少, 氧化铝成分相对较高. 其他试验不出现过恢复应该与配方中含有较少的氧化铝成分有关. 图 3(b) 显示所有试验的比磨损率随温度增加, 也与树脂热分解加剧有关. 第 9 号试验比磨损率最大, 除了与高含量的氧化铝促进了磨损外, 还与 CS 中存在较多的与树脂黏接性差的石墨有关, 它会降低刹车

材料的整体强度。

由图 4 可以看出,第 3、6、9 号试验的摩擦系数和比磨损率随载荷增加。原因是当载荷增加时,微观接触的总面积是增加的^[11],更多的氧化铝颗粒参与摩擦导致摩擦系数和比磨损率增大。另外,3-6-9 号试验的摩擦系数依次减小,比磨损率依次增加。这种现象与图 3 结果一致。第 7 号试验摩擦系数和比磨损率随载荷增加而减小,与第 3、6、9 号试验结果呈相反趋势。可能的原因是载荷增加,更多的 CS 参与了摩擦导致摩擦系数和比磨损率减小。其他试验结果介于第 3-6-9 和 7 号试验结果之间,在这里不再讨论。

图 5 表明摩擦系数和比磨损率都随速度增加而减小。原因是当切向速度增加的时候,微观接触的总面积也是增加的^[11]。由于还没有办法完全知道瞬间的摩擦表面形貌,要证明这种接触面积的增加主要来自硬质材料还是软质材料是很困难的。然而高速引起的高温必然会使摩擦系数下降。另外,速度增加,更多的摩擦膜通过滑动接触得到了压缩的可能,压实的摩擦膜保护着刹车材料免受更多的磨损。最后,综合图 3、图 4 和图 5 可以发现第 4 号试验摩擦系数随温度、载荷和速度变化较小,磨损也较小。

从以上分析可以发现:一个配方中使用过多的减摩材料如石墨能降低摩擦水平,但刹车材料的整体强度会下降,增加磨损;使用过多的增摩材料如氧化铝能提高摩擦水平,但也会增加磨损。使用增或减摩材料过少对摩擦系数作用不大。因此,使用不同摩擦材料改性剂及其用量是整个配方中除了酚醛树脂和钢纤维外第二类重要的成分。

5 结论

a 确定了半金属盘式刹车片最佳配方:10%树脂、40%钢纤维、11%钛酸钾晶须、10%重晶石、2%氧化铝、5%氧化铁黑、12.6%石墨和 9.4%硫化锑。此配方的平均摩擦系数为 0.444,摩擦系数随温度、载荷和速度变化较小,磨损也较小。

b 氧化铁黑对标准偏差有最大影响,原因在于它只能在较低温度下起增摩作用而高温没有增摩

作用;过多使用氧化铝会导致摩擦系数和比磨损率增大,出现过恢复,并且摩擦系数随载荷增加;而过多使用石墨和三硫化二锑混合物会减少摩擦系数和比磨损率。

参考文献:

- [1] Segal L. Diagnostic method for vehicle brakes[J]. NDT&E International, 1999, 32: 369 - 373.
- [2] Zhang S Y, Wang F P. Comparison of friction and wear performances of brake material dry sliding against two aluminum matrix composites reinforced with different SiC particles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 122 - 127.
- [3] Czichos H, Klaffke D, Santner E, *et al* Advances in tribology: the materials point of view[J]. Wear, 1995, 190: 155.
- [4] Oehl K H, Paul H G Brake linings for road vehicles: development and testing [M]. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie AG & Co, 1991.
- [5] Cho M H, Ju J, Kim S J, *et al* Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb_2S_3 , MoS_2) for automotive brake friction materials[J]. Wear, 2006, 260: 855 - 860.
- [6] Jang H, Kim S J. The effects of antimony trisulfide (Sb_2S_3) and zirconium silicate ($ZrSiO_4$) in automotive brake friction material on friction characteristics [J]. Wear, 2000, 239: 229 - 236.
- [7] Geoffrey Nicholson. 100 Years of Friction Material [M]. Winchester: P&W Price Enterprises, Inc., 1995.
- [8] Lee K, Brooks F W. Hot spotting and judder phenomena in aluminum drum brakes[J]. Transactions of the ASME: Journal of Tribology, 2003, 125: 44 - 51.
- [9] Staffelini G, Pellizzari M, Molinari A. Influence of load and temperature on the dry sliding behaviour of Al - based metal - matrix - composites against friction material[J]. Wear, 2004, 256: 754 - 763.
- [10] Rhee S K, Jacko M G, Tsang P H S. The role of friction film in friction, wear and noise of automotive brakes[J]. Wear, 1991, 146: 89 - 97.
- [11] Zhang S Y, Wang F P. Comparison of friction and wear performances of brake materials containing different amounts of $ZrSiO_4$ dry sliding against SiCP reinforced Al matrix composites [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 443: 242 - 247.

Experimental Investigation of Semi-metallic Disc Brake Materials

ZHANG Shao - yang, CHEN Wei - ping, WANG Fu - ping

(1. Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An orthogonal experimental design, combining with Chase friction testing was used to obtain a semi-metallic disc brake material formula with less effect of temperature, load and velocity on friction coefficient and wear. The average friction coefficient was 0.444. Experimental results show that black iron oxide, a mild abrasive, affected greatly on the standard deviation of friction coefficient relevant to temperature among the four ingredients. This is because that black iron oxide increased the friction at the low temperature at the beginning, but it decreased it when the temperature was high. Excessive aluminium oxide, a strong abrasive, was used to induce the increase of friction coefficient and specific wear rate and the occurrence of over recovery, especially friction coefficient was increased with load, while excessive mixed lubricant containing graphite and antimony trisulphide reduced friction coefficient and specific wear rate.

Key words: brake material, friction coefficient, specific wear rate, abrasive, lubricant

Author: ZHANG Shao - yang, male, born in 1964, Ph.D., e-mail: zhshy@scut.edu.cn