

# 树脂基摩擦材料耦合机理研究

钟厉, 吴林群, 陈梦青

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** **目的** 提高树脂基摩擦材料的机械性能和摩擦磨损性能。**方法** 利用纤维的协同耦合效应制备混杂纤维增强材料, 通过正交实验法设计配方, 探究混杂纤维对摩擦材料性能的影响。借助扫描电镜对磨损表面和磨屑的微观形貌进行分析, 使用能谱分析其元素组成, 以探究摩擦材料的耦合机理。**结果** 混杂纤维含量从 8% 增加到 10.5%, 摩擦材料的洛氏硬度和剪切强度分别维持在 50~75 HRB、11.5~16.5 MPa 适宜范围内, 其中 S3 试样的洛氏硬度最大, 为 71 HRB, S4 试样的剪切强度最大, 为 16.1 MPa。混杂纤维的交叉耦合效应决定了摩擦材料的机械性能。碳纤维在接触表面形成一层转移膜, 发挥着润滑降温的作用, 对摩擦材料的摩擦系数及磨损率均影响最大。**结论** 转移膜的形成可有效缓解热衰退现象。适宜含量的混杂纤维可使摩擦表面形成连续的转移膜, 且粒径细小的磨屑可提高转移膜的自洁性, 从而降低摩擦材料的磨损率。磨损机理也由磨粒磨损和粘着磨损转变为多种机理综合的磨损形式。

**关键词:** 混杂纤维; 摩擦材料; 耦合机理; 热衰退; 耐磨性; 磨损机理

**中图分类号:** TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)02-0159-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.02.023

## Research on Coupling Mechanism of Resin-based Friction Materials

ZHONG Li, WU Lin-qun, CHEN Meng-qing

(School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the mechanical properties and friction and wear properties of resin-based friction materials. The composite fiber reinforced material was prepared by the synergistic effect of fiber. The influence of the hybrid fiber on the properties of the friction material was investigated by orthogonal experimental method. The microstructure of the wear surface and debris was analyzed by scanning electron microscope, and the element formation was analyzed by the energy spectrum to explore the coupling mechanism of the friction material. With the increase of the mixed fiber content from 8% to 10.5%, the Rockwell hardness and shear strength of the friction materials were maintained in the suitable range of 50~75 HRB and 11.5~16.5 MPa. The S3 specimens had the highest hardness (71HRB) and the S4 specimens had the best shear strength (16.1 MPa). The cross coupling effect of the hybrid fibers determined the mechanical properties of the friction materials. Carbon fiber formed a transfer film on the contact surface, which played a role of lubricating and cooling. The friction coefficient and wear rate of the friction material were affected significantly. The formation of transfer membrane can effectively alleviate the phenomenon of heat recession. The suitable content of the hybrid fiber can make the friction surface form a continuous transfer film and the fine particle size can improve the self cleaning of the transfer film, thus reducing the wear rate of the friction mate-

收稿日期: 2018-05-11; 修订日期: 2018-08-27

Received: 2018-05-11; Revised: 2018-08-27

基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究(重点)项目(cstc2015jcyjBX0140)

Fund: Basic Science and Frontier Technology Research (Key) Project in Chongqing (cstc2015jcyj BX0140)

作者简介: 钟厉(1965—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面工程及摩擦材料。邮箱: 2441985314@qq.com

Biography: ZHONG Li (1965—), Female, Doctor, Professor, Research focus: materials surface engineering and friction materials. E-mail: 2441985314@qq.com

rial. The wear mechanism also changes from abrasive wear and adhesive wear to various mechanisms of wear.

**KEY WORDS:** hybrid fiber; friction materials; coupling mechanism; heat decline; wear resistance; wear mechanism

随着汽车行业的快速发展和节能环保意识的不断提高,单一纤维增强的摩擦材料制品越来越不能满足当今社会需求,这对摩擦材料的性能提出了更高的挑战,要求其具有良好的抗制动衰减性、热稳定性和高耐磨性<sup>[1-3]</sup>。国内外学者为改善摩擦材料的性能<sup>[4-5]</sup>进行了深入研究。邹军等<sup>[6]</sup>分析了钢纤维和氧化铁粉含量对摩擦材料性能的影响,发现氧化铁粉可改善材料的抗高温热衰退性。覃群等<sup>[7]</sup>测试 B<sub>4</sub>C 含量对摩擦材料性能的影响,得出 B<sub>4</sub>C 颗粒在摩擦过程中具有抵抗对磨偶件的表面犁削作用,可提高耐磨性,且其质量分数为 6%时,材料具有最佳耐磨性能。Federicia 等<sup>[8]</sup>提出采用涂覆超音速喷涂碳化钨 (HVOF) 涂层的制动盘,不仅降低摩擦材料的磨损率,而且减少环境中颗粒物的释放。这些大都是针对摩擦磨损性能进行研究,而在混杂纤维耦合机理方面研究较少。

由于树脂基摩擦材料的硬度高,会导致对偶贴合性差,易造成对偶损伤产生噪声<sup>[9-10]</sup>,且基体树脂本身热稳定性差、耐热性不足,易产生热衰退现象<sup>[11]</sup>。针对这一系列弊端,混杂纤维发挥了其绝对优势,利用材料的复合效应,通过纤维的交叉耦合作用,构建新型摩擦材料整体<sup>[12-13]</sup>,是当前树脂基摩擦材料的重要研究方向。混杂纤维增强亦成为高性能摩擦材料的首选。

当前对摩擦材料的研究以宏观摩擦学性能为主,本文拟采用碳纤维、芳纶纤维、复合矿物纤维和六钛酸钾晶须进行混杂,探讨混杂纤维对摩擦材料性能的影响,借助 SEM 观察高温磨损后表面及磨削的微观形貌,使用 EDS 分析其元素组成,以探索树脂基摩擦材料的耦合机理,提出摩擦材料的微观磨损机制,并对增强纤维之间的耦合机理进行深入探究。使摩擦带来的结果朝着有利的方向发展,对节能、降耗具有积极的指导意义。

## 1 试样的制备和性能测试

### 1.1 原材料和配方设计

分别选用型号为 T800S、Twaron、RB250、UM-T-950 的碳纤维、芳纶纤维、复合矿物纤维以及六钛酸钾晶须四个影响因素进行混杂,填料及摩擦性能调节剂选择硫酸钡、铬铁矿粉、锆英石、鳞片石墨、蛭石、硫化锑、焦炭、人造石墨、摩擦粉等。本文利用正交试验法,选择三个水平(1%、1.5%、2%)混杂纤维用量研究其对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响,致力于寻找最优配方的最优解,见表 1。

表 1 正交试验安排表  
Tab.1 Orthogonal test schedule

Formula number	Carbon fiber (A)	Aramid fiber (B)	Composite mineral fiber (C)	Potassium titanate whiskers (D)
S1	1	1	5	1
S2	1	1.5	6	1.5
S3	1	2	7	3
S4	1.5	1	6	3
S5	1.5	1.5	7	1
S6	1.5	2	5	1.5
S7	2	1	7	1.5
S8	2	1.5	5	3
S9	2	2	6	1

碳纤维具有耐高温、耐磨损、密度及热膨胀系数小等优点。以碳纤维增强的制动片比强度是钢和铝等金属的 3 倍,不仅摩擦系数稳定、耐磨性高,而且抗热衰退能力极强,是一种绿色环保型制动复合材料。以芳纶纤维增强的摩擦制品具有较高的抗冲击强度、低的制动噪音,且不会对制动对偶产生损伤。复合矿物纤维可显著改善摩擦系数,其增强的摩擦制品具有较合理的技术经济综合性能,在机械强度、摩擦性能及工艺可操作性等多方面,可满足实际生产和使用要求。六钛酸钾晶须较强的红外线反射能力,可快速释放摩擦过程中产生的部分能量,提高摩擦材料的使用温度,较低的导热系数可减缓摩擦过程中能量的传递速率,降低摩擦材料的升温速率,高温吸音性能可减小摩擦过程中的制动噪声<sup>[14]</sup>。

### 1.2 试样制备流程

试样制备流程如图 1 所示。具体步骤为:

(1) 用 SF-400A 电子天平(深圳雅量衡器公司)称取原材料。

(2) 将芳纶纤维与复合矿物纤维分别投入 XL633 犁耙式混料机(武汉市祥龙摩擦材料有限公司)中开散 10~15 min,再将剩余原材料一起倒入混料机中混料 25 min,混料 2 次获得均匀的压塑料。

(3) 将材质 Q235、厚度 5 mm 的钢背放入 Q326C 型履带式抛丸机(武汉市祥龙摩擦材料有限公司)中抛光 15 min,除去表面锈斑。在钢背粘接面上刷两次 J-04B 胶液,晾放至不粘手。

(4) 将 XL100-63T 四柱压力机(武汉市祥龙摩擦材料有限公司)模具预热至设定温度,上模 140 ℃,中模 130 ℃,下模 170 ℃,倒入 4×95 g 塑料,盖上

钢背, 设定压制压力为 13 MPa, 15 s 排气 1 次, 共排 3 次, 保压时间为 5 min, 即可完成热压成型。

(5) 将热压成型后的盘式制动器衬片放入 SMO-3 精密电热鼓风干燥箱 (武汉市祥龙摩擦材料有限公司) 中, 加热至 140 °C 保温 0.5 h, 再加热至 160 °C 保温 0.5 h, 继续加热至 180 °C 保温 1.5 h, 期间通过鼓风调节温度使之均匀, 并排出期间产生的气体, 热处理结束后冷却至室温, 取出制动衬片。

(6) 将热处理后的盘式制动器衬片利用 XL421 多刀切样机 (武汉市祥龙摩擦材料有限公司) 制成所需试样。

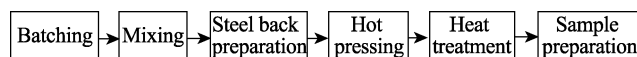


图 1 流程图  
Fig.1 Flow chart

### 1.3 试样性能测试

#### 1.3.1 机械性能

试验选用压头为 B 标尺钢球、总试验力加载至 980.7 N (100 kg) 的 HR-150A 型洛氏硬度计 (厦门群隆仪器有限公司) 对摩擦材料进行硬度测定<sup>[15]</sup>。设定 XL101 型剪切强度试验机 (武汉市祥龙摩擦材料有限公司) 正压力为 3 kN, 剪切速率为 (3000±500) N/s, 对摩擦材料进行剪切强度测定。

#### 1.3.2 摩擦磨损性能

选用摩擦盘材质为 HT250 灰铸铁、设定恒定压力为 0.98 MPa 的 XL112 型定速式摩擦试验机 (武汉市祥龙摩擦材料有限公司), 测定摩擦材料的摩擦磨损性能。首先测定摩擦材料的摩擦系数, 再按公式 (1) 计算磨损率  $V$ 。

$$V = \frac{1}{2\pi R} \times \frac{A}{n} \times \frac{d_1 - d_2}{f_m} \quad (1)$$

式中:  $R$  为试样中心与摩擦盘旋转中心的距离 (15 cm);  $A$  为摩擦面总面积 ( $\text{cm}^2$ );  $n$  为总转数;  $d_1$  和  $d_2$  分别为试验前后试样的平均厚度 (cm);  $f_m$  为试验时总平均摩擦力 (N)。

按照公式 (2) 计算衰退率  $F$ :

$$F = \frac{\mu_{\theta_1} - \mu_{\theta_2}}{\mu_{\theta_1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\mu_{\theta}$  为试验温度至  $\theta=100$  °C 时的摩擦系数;  $\mu_{\theta_1}$  为试验温度至  $\theta_1=250$  °C 时的摩擦系数;  $\mu_{\theta_2}$  为试验温度至  $\theta_2=350$  °C 时的摩擦系数。

### 1.4 磨损面和磨屑的微观形貌及能谱分析

试验采用 S-3700N 型 SEM (日本株式会社日立高新技术公司) 观察摩擦材料的微观组织形貌<sup>[16]</sup>, 先将未试验试样、试验后试样及摩擦断裂后的试样放入

E-1010 型真空镀金仪 (日本株式会社日立高新技术公司) 中进行镀金处理, 再通过控制试样面积扫描磨损前后摩擦表面和相应磨屑及断面的微观形貌, 利用 EDS 分析磨损后的摩擦表面。

## 2 结果与分析

### 2.1 混杂纤维对硬度和强度的影响

根据正交实验表, 得出混杂纤维增强树脂基摩擦材料的洛氏硬度和剪切强度测试结果, 如图 2 所示。

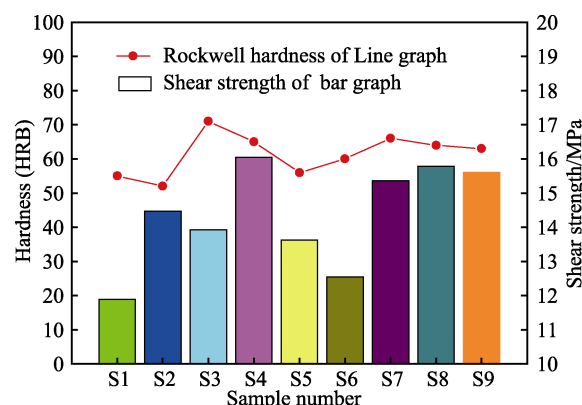


图 2 摩擦材料的洛氏硬度和剪切强度  
Fig.2 Rockwell hardness and shear strength of friction materials

结合正交试验安排表 (表 1) 中各增强纤维的含量配比, 由图 2 可以看出, 随着混杂纤维含量的增加, 树脂基摩擦材料的洛氏硬度呈上升趋势, 其中 S1、S2、S5 硬度较低, S3 最高, 其余试样的洛氏硬度波动范围较小, 维持在 50~60HRB 之间。摩擦材料的剪切强度随着混杂纤维含量的增加而增大, S1、S5、S6 试样的剪切强度较小, S1 的剪切强度最小, S4 的剪切强度最大, 其余试样的剪切强度均处于 12~16 MPa 范围内。

树脂基摩擦材料及其制品的硬度存在一个合理范围 (50~100 HRB), 硬度过大易造成对偶损伤; 硬度过小, 则接触面积较大且粘着作用增强, 易导致粘着磨损。由图 2 可知, 树脂基摩擦材料硬度适中, 其中 S3 的硬度最大, 且 S3 的芳纶纤维含量达最大值 2%, 复合矿物纤维含量达最大值 7%, 均有很高的剪切强度, 减少了因剪切变形而造成各种形式的位错, 从而易使硬度偏高, 这表明混杂纤维的硬度及比例影响着摩擦材料的硬度。剪切强度降低会引起制动系统失效, 而 S1 剪切强度最小。因为 S1 中碳纤维、芳纶纤维及六钛酸钾晶须的含量均最低, 增强纤维与基体间呈低附着状态, 可见树脂粘结剂与增强纤维的界面粘结作用越强, 复合材料的层间剪切强度就越高, 也验证了树脂基摩擦材料剪切强度的高低取决于基体粘结强度的大小。

## 2.2 混杂纤维对摩擦磨损性能的影响

### 2.2.1 混杂纤维对摩擦系数的影响

利用极差分析法研究混杂纤维各组分对摩擦磨损性能的影响,极差值的大小表明因素水平的改变对性能指标影响的大小。

图 3 为摩擦系数测试结果,结合正交实验安排表(表 1)可以看出, S1、S7、S8 试样的摩擦系数较低, S3、S4、S9 试样的摩擦系数较高, S2 试样具有良好的摩擦系数。

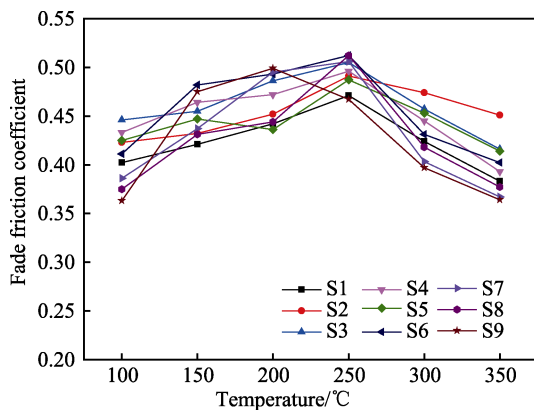


图 3 摩擦材料的摩擦系数  
Fig.3 Friction coefficient of friction materials

由表 2 可以看出,混杂纤维的四个影响因素中,碳纤维的极差值最大,对摩擦材料的摩擦系数影响亦最大。这是由于碳纤维具有良好的自润滑性,可降低摩擦表面的温度,且在摩擦过程中会在摩擦界面形成一层“转移膜”,减轻脱落的硬质颗粒对基体的犁削作用,同时高导热性的碳纤维能将摩擦产生的高热量导出,从而缓解热衰退。复合矿物纤维和芳纶纤维对材料的摩擦系数影响次之,因为芳纶纤维较高的热分解温度(初始热分解温度达 500℃)和优异的热稳定性(加热分解不熔融),也有利于减少树脂基摩擦材料热衰退现象的发生。六钛酸钾晶须的极差值最小,对摩擦系数的影响亦最小。

表 2 摩擦系数的极差分析  
Tab.2 Range analysis of friction coefficient

Sum, mean value and extreme value	A	B	C	D
$K_{f1}$	1.356	1.270	1.295	1.282
$K_{f2}$	1.246	1.287	1.340	1.310
$K_{f3}$	1.287	1.332	1.254	1.297
$k_{f1}=K_{f1}/3$	0.452	0.423	0.432	0.427
$k_{f2}=K_{f2}/3$	0.415	0.429	0.447	0.437
$k_{f3}=K_{f3}/3$	0.429	0.444	0.418	0.432
$R_f=k_{fmax}-k_{fmin}$	0.037	0.021	0.029	0.010

Note:  $K_f$  is sum of friction coefficient,  $k_f$  is mean value of friction coefficient,  $R_f$  is extreme value of friction coefficient

### 2.2.2 混杂纤维对磨损率的影响

磨损率的高低直接反应制动片使用寿命的长短。磨损率越低,即耐磨性越高,表明摩擦材料的使用寿命越长。由图 4 可知, S1、S2、S3 试样的磨损率较低, S4、S5、S6 试样的磨损率较高,其中 S2 试样的磨损率最低,为  $0.11 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,且 S2 试样混杂纤维含量适宜,可减小与对偶盘相对运动过程中的剪切力,有利于降低摩擦接触表面温度。

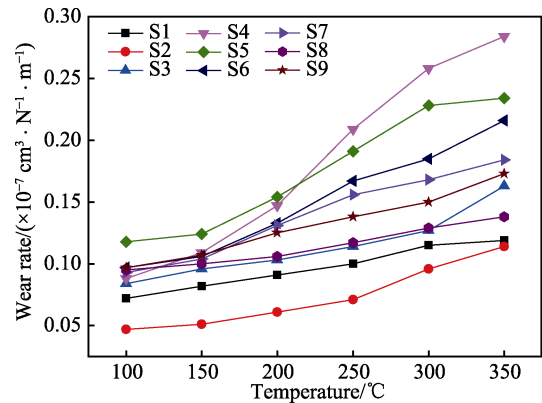


图 4 摩擦材料磨损率  
Fig.4 Wear rate of friction materials

由表 3 可以看出,混杂纤维的四个影响因素中,碳纤维的极差值最大,对摩擦材料的磨损率影响亦最大,复合矿物纤维对材料的磨损率影响次之,芳纶纤维和六钛酸钾晶须对磨损率的影响相对较小。碳纤维具有类似石墨晶体结构,平行层面间的各碳原子依靠范德华力连接,当受到与层面平行的切向力时,碳原子层间极易发生相互滑动,发挥优异的润滑效果,且分布在纤维束间和层间界面处的孔隙有利于摩擦过程中热量的散发,同时碳纤维在磨损过程中,转移的碳原子膜涂覆在摩擦表面,从而有效地降低磨损率。而复合矿物纤维中高硬度成分(如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  等)脱落后会剥离其余组分,加剧摩擦材料的磨损。

表 3 磨损率的极差分析  
Tab.3 Range analysis of wear rate

Sum, mean value and extreme value	A	B	C	D
$K_{V1}$	0.272	0.379	0.382	0.340
$K_{V2}$	0.460	0.417	0.305	0.358
$K_{V3}$	0.380	0.316	0.425	0.414
$k_{V1}=K_{V1}/3$	0.091	0.126	0.127	0.113
$k_{V2}=K_{V2}/3$	0.153	0.139	0.102	0.119
$k_{V3}=K_{V3}/3$	0.127	0.105	0.142	0.138
$R_V=k_{Vmax}-k_{Vmin}$	0.062	0.034	0.040	0.025

Note:  $K_V$  is sum of wear rate,  $k_V$  is mean value of wear rate,  $R_V$  is extreme value of wear rate



## 2.3 混杂纤维的耦合机制分析

### 2.3.1 机械性能耦合机理

摩擦材料作为一种多组分多相体系复合材料, 其成分及结构的交叉耦合效应决定了制品硬度和剪切强度等机械性能。材料的剪切变形会造成各种形式的位错, 位错产生的塑性变形也反映为材料的硬度。丁腈橡胶改性酚醛树脂自身剪切强度较小, 而六钛酸钾晶须将减少晶体的位错、空隙等缺陷, 在一定程度上弥补基体树脂塑性变形的不足, 剪切强度较高, 从而对硬度产生极大的影响, 因此为控制摩擦材料的硬度, 减少制动噪音及对偶损伤, 六钛酸钾晶须含量须在 1.5%~3%之内。随着混杂纤维含量从 8%增加至 10.5%, 各成分之间的耦合作用增强, 剪切强度和硬度也分别升高 31.2%和 14.5%。树脂基摩擦材料剪切强度的高低取决于基体粘结强度的大小, 芳纶纤维较大的比表面积可改善组分与树脂的浸润和结合状态, 从而对剪切强度的影响极大。混杂纤维含量的增加, 使得摩擦材料基体的粘结强度增大, 导致剪切强度升高。

### 2.3.2 摩擦磨损性能耦合机理

基于混杂纤维对摩擦材料性能的影响, 分别选取

S2、S8 试样对磨损前后的表面形貌与磨屑及磨损后的能谱进行对比分析, 进一步研究混杂纤维增强摩擦材料的耦合机理。

图 5a、图 5b 分别为 S8 试样表面磨损前后的形貌, 可以看出: 磨损前, 试样表面参差不齐、结构疏松, 出现大量纤维团聚现象; 磨损后, 摩擦面存在较多裸露脆断的纤维, 呈现深浅不同的凹坑和表面积层剥落的现象。这是由于摩擦材料表面微凸体在单位压力和局部热量的作用下易粘着, 粘着点因高温软化被剪切脱落。摩擦过程中树脂耗损严重, 而混杂纤维含量较多, 基体与纤维的粘结作用减弱, 在外加载荷作用下产生应力集中, 微裂纹扩展以释放残余应力, 使摩擦表面发生疲劳剥落。摩擦温度升高使有机物分解, 从而引起材料损失, 并形成微孔。微孔附近处迅速扩展的疲劳裂纹将穿透界面, 引起填料颗粒松动而造成增强纤维从基体拔出, 纤维相与基体相的硬度差异, 使大量剥落的硬质填料和纤维参与磨粒磨损。如图 5c 所示, 磨损后产生大块状磨屑, 结构松散、破碎, 分布不均, 表明树脂基摩擦材料磨损剧烈, 发生严重的剥落。由表 4 可知, S8 试样的衰退率最大, 为 26.4%, 与其高热衰退率结论相一致。由图 5d 可见, 磨损后, 摩擦表面主要

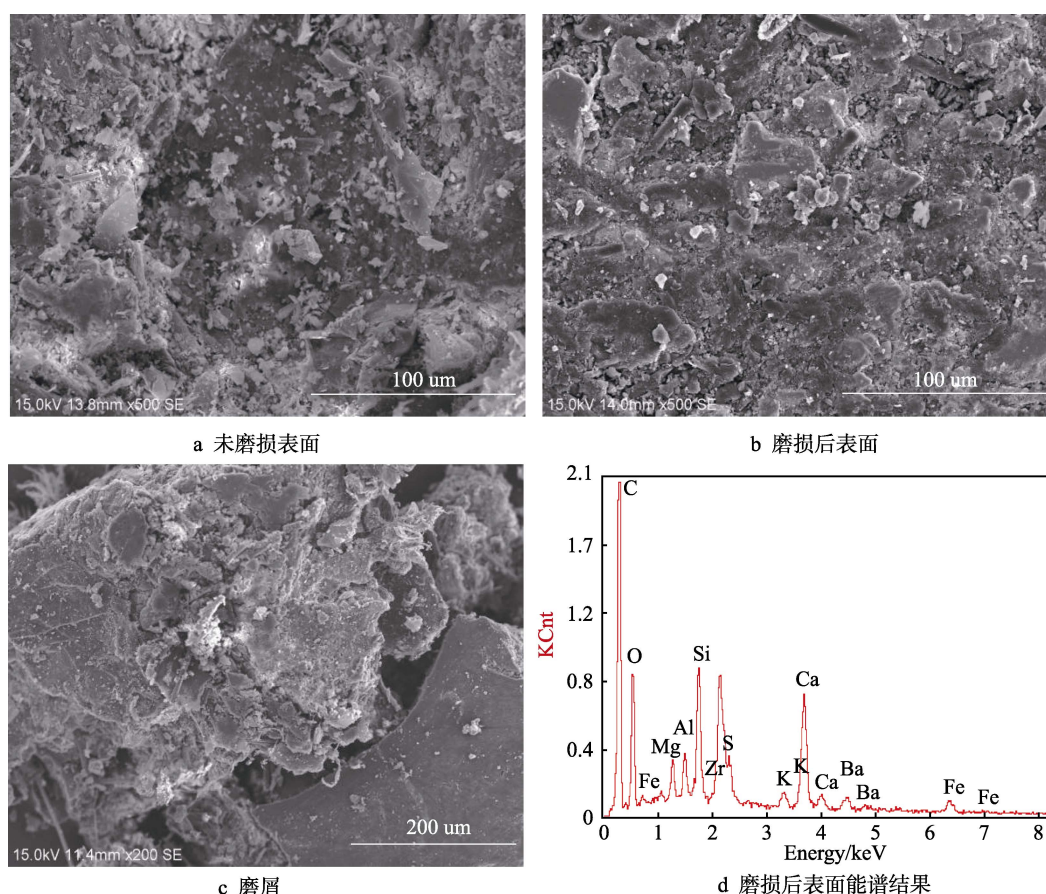


图 5 S8 试样的磨损表面和磨屑 SEM 图以及能谱分析图

Fig.5 SEM & EDS results of worn surface and wear debris on sample S8: (a) non-worn surface; (b) worn surface; (c) wear debris; (d) energy spectrum results of worn surface

表 4 试样的衰退率和磨损率  
Tab.4 Wear rate and fade rate of samples

Samples	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Wear rate $V/(\times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	0.579	0.440	0.687	0.685	1.049	0.904	0.836	1.094	0.790
Fade rate $F/\%$	18.7	8.9	17.6	20.0	15.0	21.5	27.5	26.4	22.1

含有 C、O、Si、Ca、Mg、Al 等元素, 其中 C、O 元素含量较高, 分别为 42.5%、15.77%, 主要来源于扩散或转移的碳纤维和有机物高温分解产生的气体或水分子。

综上所述, 混杂纤维含量过高, 即碳纤维 2%、芳纶纤维 1.5%、复合矿物纤维 7%, 摩擦材料的磨损机理主要表现为粘着磨损和疲劳磨损, 并伴随热分解磨损和磨粒磨损。

图 6a、b 分别为 S2 试样表面磨损前后形貌, 可以看出: 未进行摩擦试验的材料表面完整光滑连续, 在日光下呈现出黑色面; 磨损后, 平整的摩擦面所占比例仍较大, 呈现暗灰光亮色面, 但也存在犁沟特性和剥落现象。这是因为树脂基摩擦材料中, 碳纤维石墨结构规整度遭到破坏后, 在摩擦表面形成一层光亮连续致密的转移膜, 对基面起到保护作用。由于摩擦材料表面形貌的粗糙度和接触的不均匀性为微凸体

研磨提供了一定的条件, 导致微凸体直接接触产生冷焊而发生粘着。如图 6c 所示, 磨损后, 磨屑主要为粒径细小的颗粒状, 分布较均匀, 成膜组成的差别导致膜的致密性存在差异, 颗粒状磨屑具有很高的表面活性, 且膜粘接力较大, 同时粒状磨屑能及时从摩擦对偶接触面排出, 可保持界面转移膜的稳定性。因此, 由表 4 可知 S2 试样的磨损率最小, 为  $0.440 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。由图 6d 可见, 磨损后, 表面 O 元素含量降低了 13.1%, 表明转移膜的形成在一定程度上延缓了热衰退现象, 与其衰退率最低为 8.9% 的结论相吻合。C 元素含量增加了 23.8%, 进一步验证了树脂基摩擦材料表面摩擦膜具有较高的自洁性, 表面层不断得到更新, 生成更加连续致密的转移膜。

综上所述, 混杂纤维含量适宜, 即碳纤维 1%、芳纶纤维 1.5%、复合矿物纤维 6%, 摩擦材料的磨损机理主要表现为粘着磨损和磨粒磨损。

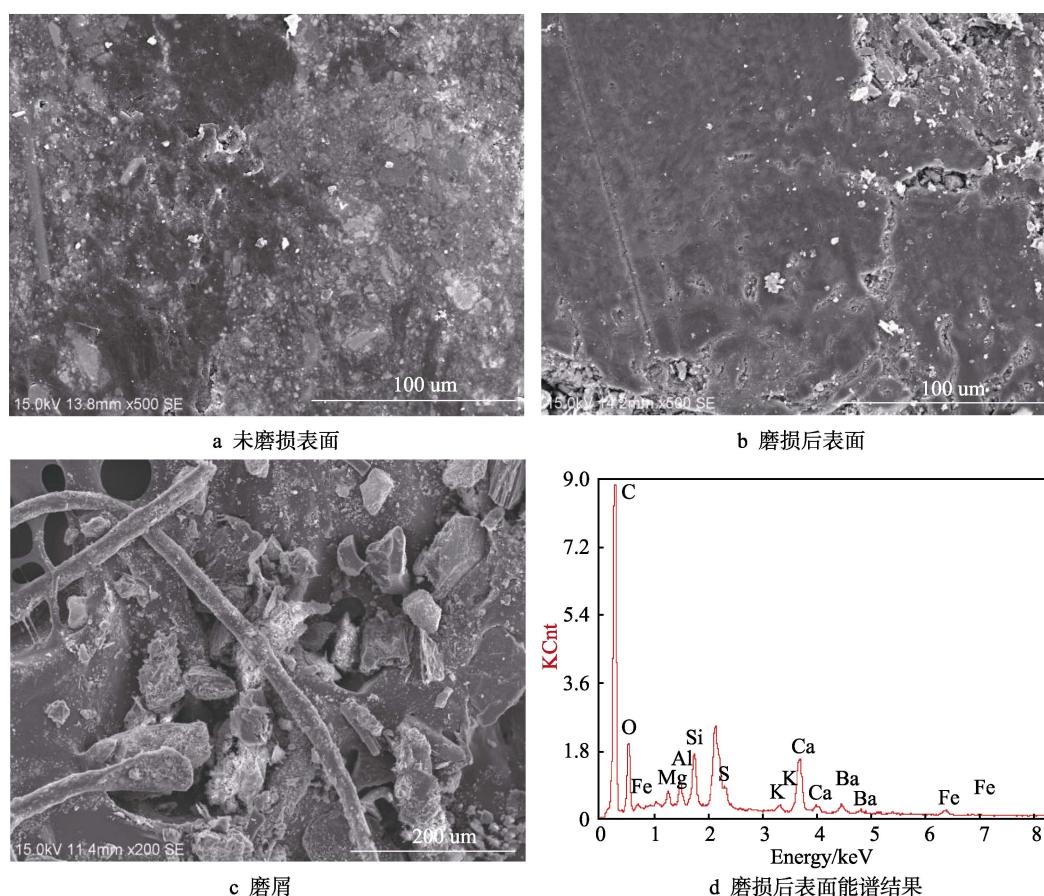


图 6 S2 试样的磨损表面和磨屑 SEM 图以及能谱分析图

Fig.6 SEM & EDS results of worn surface and wear debris on sample S2: (a) Non-worn surface; (b) Worn surface; (c) Wear debris; (d) Energy spectrum results of worn surface

### 3 结语

1) 六钛酸钾晶须对摩擦材料洛氏硬度的影响最大, 芳纶纤维对剪切强度的影响最大。

2) 碳纤维优异的自润滑性及在摩擦界面形成的转移膜, 有利于减轻脱落的增强纤维和填料对基体的犁削作用, 同时可以导出摩擦产生的高热量, 有效地缓解热衰退, 对摩擦材料的摩擦系数及磨损率均影响最大。

3) 碳纤维对摩擦材料的摩擦系数和磨损率的影响均最大。

4) 混杂纤维可以改变摩擦材料的磨损机理, 随着混杂纤维含量从 8% 增加到 10.5%, 磨损机理也由磨粒磨损和粘着磨损转变为粘着磨损和疲劳磨损, 并伴随热分解磨损和磨粒磨损多种机理综合的磨损形式。

5) 摩擦表面有完整致密连续的转移膜且磨屑粒径细小时, 有利于提高转移膜的自洁性, 从而降低摩擦材料的磨损率。

### 参考文献:

- [1] 徐祥, 杨明. 有机复合摩擦材料及其研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 81-86.  
XU Xiang, YANG Ming. Research situation of the organic brake friction materials[J]. Materials review, 2015, 29(11): 81-86.
- [2] 钟厉, 王昭银, 刘力, 等. 新型低树脂基摩擦材料的优化设计及性能研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(1): 96-103.  
ZHONG Li, WANG Zhang-yin, LIU Li, et al. Research on properties and optimization design of low content resin friction materials[J]. Lubrication engineering, 2016, 41(1): 96-103.
- [3] 鲁张祥, 崔功军, 任剑. 玻璃和碳纤维含量对树脂基摩擦材料摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(1): 76-80.  
LU Zhang-xiang, CUI Gong-jun, REN Jian. Effect of glass and carbon fiber content on tribological properties of resin based friction materials[J]. Lubrication engineering, 2018, 43(1): 76-80.
- [4] 刘建发, 孙胃涛, 付雪松, 等. 竹炭/碳纤维增强树脂基摩擦材料摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7): 17-20.  
LIU Jian-fa, SUN Wei-tao, FU Xue-song, et al. Tribological properties of bamboo charcoal/carbon fiber reinforced resin based composite friction materials[J]. Engineering plastics application, 2017, 45(7): 17-20.
- [5] 李慎飞, 付业伟, 李贺军, 等. 对偶材料对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2014, 39(7): 36-39.  
LI Shen-fei, FU Ye-wei, LI He-jun, et al. Effect of mating materials on friction and wear properties of resin-based friction materials[J]. Lubrication engineering, 2014, 39(7): 36-39.
- [6] 邹军, 周元康, 丁旭, 等. 钢纤维和氧化铁粉含量对半金属摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(1): 56-60.  
ZHOU Jun, ZHOU Yuan-kang, DING Xu, et al. Effect of steel fiber and iron oxide powder content on friction and wear performance of semi-metallic friction materials[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(1): 56-60.
- [7] 覃群, 王天国, 华建杰. B<sub>4</sub>C 含量对铜基粉末冶金摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2017, 42(8): 77-81.  
QIN Qun, WANG Tian-guo, HUA Jian-jie. Effect of B<sub>4</sub>C content on friction and wear properties of copper-based powder metallurgy friction materials[J]. Lubrication engineering, 2017, 42(8): 77-81.
- [8] FEDERICA M, MENAPACEA C, MOSCATELLI A, et al. Pin-on-disc study of a friction material dry sliding against HVOF coated discs at room temperature and 300 °C[J]. Tribology international, 2017(115): 89-99.
- [9] 王晓芳, 李小博, 张敏. 钛酸钾晶须改性酚醛树脂基摩擦材料的性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(6): 131-133.  
WANG Xiao-fang, LI Xiao-bo, ZHANG Min. Performance study on resin-based friction material reinforced by potassium titanate whisker[J]. New chemical materials, 2017, 45(6): 131-133.
- [10] 崔艳芹, 刘学庆. 汽车制动摩擦材料的性能要求及影响因素[J]. 材料导报, 2014, 28(S1): 413-416.  
CUI Yan-qin, LIU Xue-qing. Performance requirements and effect factors of automotive brake friction composites[J]. Materials review, 2014, 28(S1): 413-416.
- [11] 王宏亮, 侯贵华, 王占红. 利用高比热钾长石提高树脂基摩擦材料抗热衰退性能的研究[J]. 非金属矿, 2012, 35(1): 76-80.  
WANG Hong-liang, HOU Gui-hua, WANG Zhan-hong. The research on resisting thermal decay property of resin-based friction material filled with high specific heat potash feldspar[J]. Non-metallic mines, 2012, 35(1): 76-80.
- [12] STRAFFELINI G, VERMA P C, METINOZ I, et al. Wear behaviors of a low metallic friction material dry sliding against a cast iron disc: Role of the heat-treatment of the disc [J]. Wear, 2016(348): 10-16.
- [13] 王永红, 王旭, 陈进林, 等. 无铜多维复合增强树脂基刹车片的研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(9): 26-31.  
WANG Yong-hong, WANG Xu, CHEN Jin-lin, et al. Research on multi-reinforced copper-free resin-based brake pad materials[J]. Lubrication engineering, 2016, 41(9): 26-31.
- [14] 王晓芳, 李小博, 张敏. 钛酸钾晶须改性酚醛树脂基摩擦材料的性能研究[J]. 化工新型材料, 2017, 45(6): 131-133.  
WANG Xi-fang, LI Xiao-bo, ZHANG Min. Performances study on resin-based friction material reinforced by potassium titanate whisker[J]. New chemical materials, 2017, 45(6): 131-133.
- [15] 刘力, 钟厉, 张杰, 等. 树脂基刹车片的性能评价研究[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(2): 72-77.  
LIU Li, ZHONG Li, ZHANG Jie, et al. Performance evaluation of resin-based brake pads[J]. Power metallurgy industry, 2018, 28(2): 72-77.
- [16] 吉政甲. 树脂基摩擦材料组分形态及其对摩擦性能影响研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.  
JI Zheng-jia. Study on the component morphology and tribological properties of resin based friction materials[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.