

混杂纤维增强低树脂基摩擦材料磨损 机理及性能研究

钟厉¹, 陈梦青¹, 罗明宝¹, 刘力²

(1.重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2.重庆文理学院 机电工程学院, 重庆 402160)

摘要: **目的** 改善刹车片摩擦材料的耐磨性和降低制动噪声。**方法** 通过正交试验设计摩擦材料配方, 利用极差分析法探究混杂纤维对低树脂基摩擦材料性能的影响, 并采用扫描电子显微镜观察摩擦材料磨损表面和磨屑的微观形貌, 使用能谱仪分析磨屑的元素组成, 以研究其磨损机理。**结果** 混杂纤维增强低树脂基摩擦材料具有良好的耐磨性, 其洛氏硬度维持在 50~80HRM 之间, 剪切强度均处于 11~16 MPa 的适宜范围。随着树脂的质量分数从 8% 逐渐增加到 10%, 混杂纤维增强树脂基摩擦材料磨屑中 O 元素的质量分数降低了 33.7%, Cu 元素的质量分数降低了 20.1%。**结论** 丁腈胶粉对摩擦材料磨损率的影响最大, 铜纤维对摩擦系数的影响最大, 且铜纤维在摩擦过程中会在摩擦表面形成一层“转移膜”, 可以导出摩擦产生的高热量, 从而缓解热衰退。酚醛树脂含量的变化影响摩擦材料的磨损机制, 随着树脂含量的增加, 摩擦材料由疲劳磨损转变为磨粒磨损。

关键词: 混杂纤维; 低树脂基; 摩擦材料; 磨损机理; 耐磨性

中图分类号: TH117; TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0165-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.027

Wear Mechanism and Properties of Low-resin-based Friction Materials Reinforced by Hybrid Fiber

ZHONG Li¹, CHEN Meng-qing¹, LUO Ming-bao¹, LIU Li²

(1.School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.School of Mechanical-Electrical Engineering, Chongqing University of Art and Sciences, Chongqing 402160, China)

ABSTRACT: The work aims to study properties and wear mechanism of low-resin-based friction materials reinforced by hybrid fiber by applying hot-forming process to prepare resin-based friction materials reinforced by copper fiber, aramid fiber and composite mineral fiber, so as to improve wear resistance of friction materials and reduce brake noise. Formulas of friction materials were designed by performing orthogonal experiment, effects of hybrid fiber on properties of low-resin-based friction materials were investigated in the method of range analysis. Microstructures of worn surface and wear debris on the friction materials were observed with scanning electron microscopy (SEM), and elemental composition of the debris was analyzed with energy dispersive spectrometer (EDS) in order to investigate the wear mechanism. The hybrid fiber reinforced low-resin-based friction material exhibited excellent wear resistance, its Rockwell hardness was ranged from 50 to 80HRM, and shear strength was in appropriate range of 11-16MPa. As resin content increased from 8% to 10%, O content of the wear debris on the hybrid

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2017-11-27

Received: 2017-10-20; **Revised:** 2017-11-27

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 (cstc2015jcyjBX0140)

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。

Biography: ZHONG Li (1965—), Female, Doctor, Professor, Research focus: materials surface engineering and friction materials.

fiber reinforced low-resin-based friction material decreased by 33.7% and Cu content decreased by 20.1%. Butadiene-acrylonitrile rubber powder has the maximum impact on wear rate of friction material; copper fiber has the greatest influence on friction coefficient, and copper fiber would form a layer of “transfer film” on the friction surface in friction process, which generates high heat and alleviates heat fade. The change in phenolic resin content affects wear mechanism of friction materials. Wear mechanism transforms from fatigue wear into abrasive wear as resin content increases.

KEY WORDS: hybrid fiber; low resin-based; friction materials; wear mechanism; wear resistance

现代交通运输业的高速发展,要求刹车片摩擦材料反应速度快,且制动衰减低、热稳定性高、耐磨性好、噪音小等^[1-3]。致力于此,国内外学者做了大量研究^[4-6]。李辉等^[7]对比分析了 2.5D 浅交弯联碳纤维织物在干式与油润滑条件下对树脂基摩擦材料摩擦磨损性能的影响。李磊^[8]以 SiC 陶瓷为基体,短切碳纤维为增强材料,制备了 C_{sf}/SiC 陶瓷基复合材料,研究了纤维在基体中的分散性,纤维体积分数、烧结温度对复合材料本征特性及服役性能改性的影响。Tej Singh 等^[9]研究了矿物纤维和硅灰石纤维对制动摩擦材料机械物理性能和摩擦磨损性能的影响。N. Aranganathan 等^[10]探讨了不同含量的芳纶纤维对非石棉有机摩擦材料摩擦磨损性能的影响。

摩擦材料是由粘结剂、增强纤维、填料和摩擦性能调节剂混合压制成形的多元复合材料,其中增强纤维是摩擦材料的支撑骨架,目前应用较多的增强纤维有碳纤维、芳纶纤维、陶瓷纤维、金属纤维等^[11]。然而,单一增强纤维在性能方面存在着严重的缺陷与不足,无法满足高性能摩擦材料的需求。如碳纤维具有良好的自润滑性能和优异的机械力学性能,但碳纤维摩擦材料制品制作工艺复杂,成本高。陶瓷纤维质轻,耐高温,热稳定好,但导热率低,易引起材料断裂。芳纶纤维强度高,模量高,比表面积大,吸附性强,但开散性差,成本高^[12]。因此如何利用纤维的复合效应,在摩擦材料中同时采用两种或两种以上的纤维,通过混杂纤维的协同耦合作用,充分发挥每种纤维的优势,制备出耐磨性高、噪声低的摩擦材料已成为研究的热点。

本文选用铜纤维、芳纶纤维和复合矿物纤维为增强体,制备低树脂基摩擦材料,探究混杂纤维对其摩擦磨损性能的影响。利用 SEM 观察磨损表面及磨屑的微观形貌,使用 EDS 分析其元素组成,以研究其磨损机制,为开发新型高性能的摩擦材料提供理论参考。

1 试样的制备

1.1 原材料和配方设计

选用短切铜纤维和 Twaron 芳纶纤维,复合矿物

纤维型号为 RB250,纤维直径 5.5 μm,长度 100~150 μm。型号为 PF6530A 的酚醛树脂,聚速 60~90 s,流动度 33~53 mm。此外,填料和摩擦性能调节剂选用摩擦粉、泡沫铁粉、硫化铜、硫化锑、氧化镁等。为了研究多因素多水平的混杂纤维对低树脂基复合材料摩擦磨损性能的影响,同时减少试验次数,采用正交试验法设计配方,见表 1。

表 1 摩擦材料组分的正交试验表
Tab.1 Orthogonal test table of friction material composition

配 方 号	各因素质量分数/%						
	铜纤 维	芳纶 纤维	矿物 纤维	酚醛 树脂	焦 炭	丁腈 胶粉	鳞片 石墨
F1	9	3	10	8	8	1	12
F2	9	4	12	9	10	2	14
F3	9	5	14	10	12	3	16
F4	12	3	10	9	10	3	16
F5	12	4	12	10	12	1	12
F6	12	5	14	8	8	2	14
F7	15	3	12	8	12	2	16
F8	15	4	14	9	8	3	12
F9	15	5	10	10	10	1	14
F10	9	3	14	10	10	2	12
F11	9	4	10	8	12	3	14
F12	9	5	12	9	8	1	16
F13	12	3	12	10	8	3	14
F14	12	4	14	8	10	1	16
F15	12	5	10	9	12	2	12
F16	15	3	14	9	12	1	14
F17	15	4	12	10	8	2	16
F18	15	5	10	8	10	3	12

1.2 试样的制备

采用热压成型工艺制备盘式制动片,具体流程如下:

- 1) 配料。用精确电子天平按各组分比例称取总质量为 1 kg 的原材料,芳纶纤维与复合矿物纤维单独盛放。
- 2) 混料。先将芳纶纤维与复合矿物纤维放入 XL633 犁耙式混料机中开散 15 min,得到松散均匀的

纤维, 再将其余原料全部投入, 共同混料 25 min, 混料 2 次得到混合均匀的模压料。

3) 热压成型。将 XL100-63T 一次热压成型机模具加热到 160 ℃, 模腔内涂刷微量脱模剂, 精确称量 4×106 g 的模压料倒入模腔内, 盖上喷丸处理过的钢背进行热压, 压制压力为 12 MPa, 每隔 15 s 排气一次, 连续排气 3 次以释放挥发性气体, 保压时间 5 min。

4) 热处理。为消除树脂固化应力及残余应力, 并除去残留挥发物, 将热压后的试样放入 SMO-3 精密电热鼓风干燥箱中热处理。热处理工艺如图 1 所示。

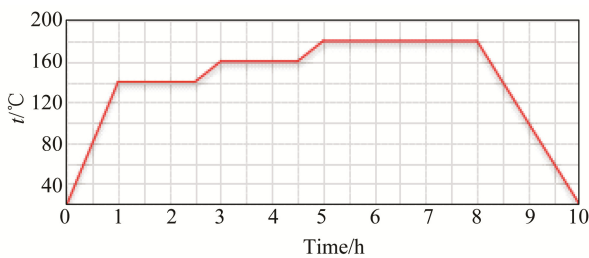


图 1 热处理工艺

Fig.1 Technology for heating processing

2 性能测试

2.1 机械物理性能

摩擦材料的剪切变形造成各种形式的位错, 位错产生的塑性变形也反映为摩擦材料的硬度。因此可以从基体被填充增强后的剪切模量变化规律来探究填料及增强纤维对摩擦材料硬度的影响。剪切模量的计算公式为: $G_M = G_P V_P + A G_F V_F$, 式中 G 为剪切模量, V 为体积分数, A 为反映填料与基体树脂黏合程度的经验常数, M 、 P 、 F 分别代表摩擦材料、树脂与填料。

按照 GB/T 5766—2007《摩擦材料洛氏硬度试验方法》, 利用 HR-45A 型洛氏硬度计测试硬度。试验选用 M 标尺, 初始力为 98.07 N (10 kg), 总试验力为 980.7 N (100 kg)。选取均匀分布于试样摩擦表面的 5 个点进行硬度测试并取其平均值, 其中需要注意的是, 各点压痕中心到试样边缘的距离应不小于 10 mm。

依据 GB/T 26739—2011 摩擦材料剪切强度试验方法, 采用 XL101 型剪切强度试验机测试剪切强度。

剪切强度的计算公式为 $\tau = \frac{F}{A}$, 式中 τ 为剪切强度, F 为最大摩擦力 (N), A 为摩擦表面面积 (cm^2)。

2.2 摩擦磨损性能

按照 GB 5763—2008 摩擦磨损性能测定方法, 利用 XL112 型定速式摩擦试验机测定试样的摩擦学性能。摩擦盘材质为 HT250, 摩擦盘转速为 480 r/min, 加载压力为 0.98 MPa。

从同一摩擦材料上磨削出 2 块试样, 将试样加工

成 25 mm×25 mm×6 mm 的试块并进行编号。试块在 100 ℃下磨合至与摩擦盘接触面积超过 95%, 然后在摩擦盘温度范围为 100~350 ℃下进行升温摩擦系数测试, 设定温度间隔为 50 ℃。再从 300 ℃降温至 100 ℃, 摩擦盘以 50 ℃温度间隔转动, 测定制动摩擦材料的降温摩擦系数。待试块冷却至室温后, 用千分尺按一定顺序测量 5 个点的厚度, 输入计算机计算磨损率。

2.3 磨损面和磨屑的微观形貌及能谱分析

采用日立 S-3700N 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样高温磨损表面和磨屑的微观组织形貌。首先将试样放入 E-1010 型真空镀膜仪中镀金 2 min, 然后通过控制试样面积扫描微观形貌, 并利用能谱仪 (EDS) 分析磨屑的元素组成。

3 试验结果与分析

3.1 混杂纤维对机械物理性能的影响

树脂基摩擦材料及其制品的硬度存在一个合理的实用范围, 一般处于 50~100HRM 之间。硬度过大, 易产生制动噪音, 且造成对偶损伤; 硬度过小, 真实接触面积在法向载荷的作用下较大, 粘着作用增强, 粘着磨损增大。混杂纤维增强低树脂基摩擦材料洛氏硬度和剪切强度的测试结果如图 2 所示。

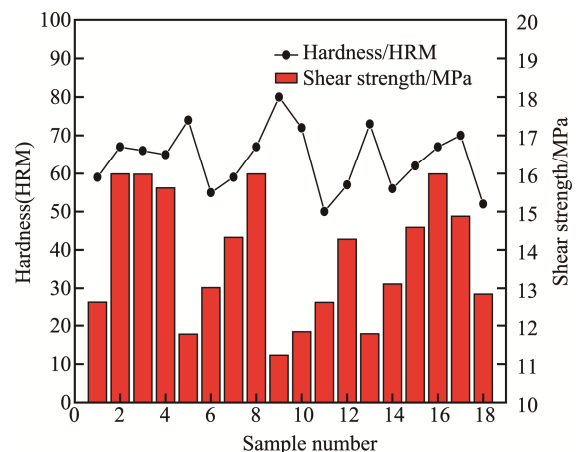


图 2 试样剪切强度和洛氏硬度测试结果

Fig.2 Shear strength and Rockwell hardness test results of samples

由图 2 可知, 树脂基摩擦材料硬度适中, 维持在 50~80HRM 之间, 其中试样 F9 硬度最大。这是因为 F9 试样中芳纶纤维含量达到最大值, 质量分数为 5%, 复合矿物纤维的质量分数为 10%, 二者均具有的很高的剪切模量, 减少了因剪切变形而造成的各种形式的位错, 从而导致了硬度偏高, 这表明混杂纤维的硬度及比例影响着树脂基摩擦材料的硬度。

从图 2 还可以看出, 试样剪切强度均处在 11~16

MPa，其中试样 F2、F3、F8 及 F16 的剪切强度值较大，这是因为在这些试样中酚醛树脂的含量较高，树脂与芳纶纤维、复合矿物纤维具有良好的结合，产生较强的附着力。可见树脂与增强纤维的界面粘结越好，复合材料的层间剪切强度越高，同时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。

3.2 混杂纤维对摩擦磨损性能的影响

正交实验中，极差值的变化能够直观地反映各因素对指标的影响程度，极差越大，表明该因素对指标的影响越大。表 2 为摩擦材料组分对摩擦系数的极差分析值。由表 2 可见，铜纤维的极差值最大，为 0.039，对摩擦系数的影响最大。其原因在于铜纤维难以被粘结剂完全包覆在摩擦材料内部，部分铜纤维直接裸露在材料表面，制动过程中直接与制动盘相接触，因此会对摩擦系数产生较显著的影响。并且在摩擦过程

中，铜纤维会在摩擦表面形成一层“转移膜”，减轻脱落的增强纤维和填料对基体的犁削作用，同时高导热性的铜纤维能将摩擦产生的高热量导出，从而缓解热衰退。

表 3 为摩擦材料组分对磨损率的极差分析值。从表 3 可见，丁腈胶粉的极差值最大，为 0.309，对摩擦材料的磨损率影响最大；焦炭的极差值为 0.273，对磨损率的影响次之。这是由于丁腈胶粉能以粒子的形式均匀分布在树脂中，当材料受到冲击应力时，应力产生的银纹发展到橡胶粒子后被吸收，从而防止了树脂基摩擦材料裂缝的扩展，达到增韧和提高冲击强度的目的。并且丁腈胶粉良好的柔韧性和弹性可以降低树脂基摩擦材的硬度和模量，从而有效地降低磨损率。另一方面，焦炭结构疏松且粒径大的特点可能使其在摩擦制动过程中易被摩擦对偶上凸起的部分拔出，在制动衬片的表面出现沟槽状磨损，加剧摩擦材料的磨损。

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

均值和极差值	铜纤维	芳纶纤维	矿物纤维	酚醛树脂	焦炭	丁腈胶粉	鳞片石墨
k_{f1}	0.326	0.343	0.344	0.346	0.346	0.334	0.348
k_{f2}	0.348	0.338	0.347	0.357	0.335	0.356	0.342
k_{f3}	0.365	0.358	0.349	0.336	0.359	0.350	0.350
R_f	0.039	0.02	0.005	0.021	0.024	0.022	0.008

注： k_f 为平均摩擦系数均值， R_f 为摩擦系数的极差值

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

均值和极差值	铜纤维	芳纶纤维	矿物纤维	酚醛树脂	焦炭	丁腈胶粉	鳞片石墨
k_{v1}	0.835	0.789	0.838	0.807	0.861	0.887	0.821
k_{v2}	0.588	0.656	0.632	0.643	0.611	0.578	0.615
k_{v3}	0.637	0.616	0.590	0.610	0.588	0.595	0.624
R_v	0.247	0.173	0.248	0.197	0.273	0.309	0.206

注： k_v 为总磨损率均值， R_v 为总磨损率的极差值

3.3 磨损机制分析

基于混杂纤维对低树脂基摩擦材料机械物理性能和摩擦磨损性能的影响，分别选取综合摩擦性能最低（F7）和综合摩擦性能最高（F10）的试样高温磨损后的表面形貌和磨屑进行了分析，以进一步研究混杂纤维增强低树脂基摩擦材料的磨损机理。

图 3a 和 3b 为试样 F7 表面磨损前后的形貌图。可以看出，磨损前，材料表面粗糙且疏松；磨损后，

光滑平整的摩擦面比例极少，存在大片因摩擦层被撕裂而裸露的基体。该情况导致纤维与基体的粘结作用下降，材料在外加载荷的作用下产生塑性变形。由于交变接触应力的存在，摩擦表面发生疲劳磨损剥落，在摩擦材料中迅速扩展的疲劳裂纹将穿透界面，引起填料颗粒的松动，从而造成增强纤维从基体中被拔出。与此同时，脱落的硬质颗粒填料和剥离、断裂的增强纤维充当磨粒的作用，加剧了树脂基摩擦材料的磨粒磨损。如图 3c 所示，磨损后磨屑的微观形貌中

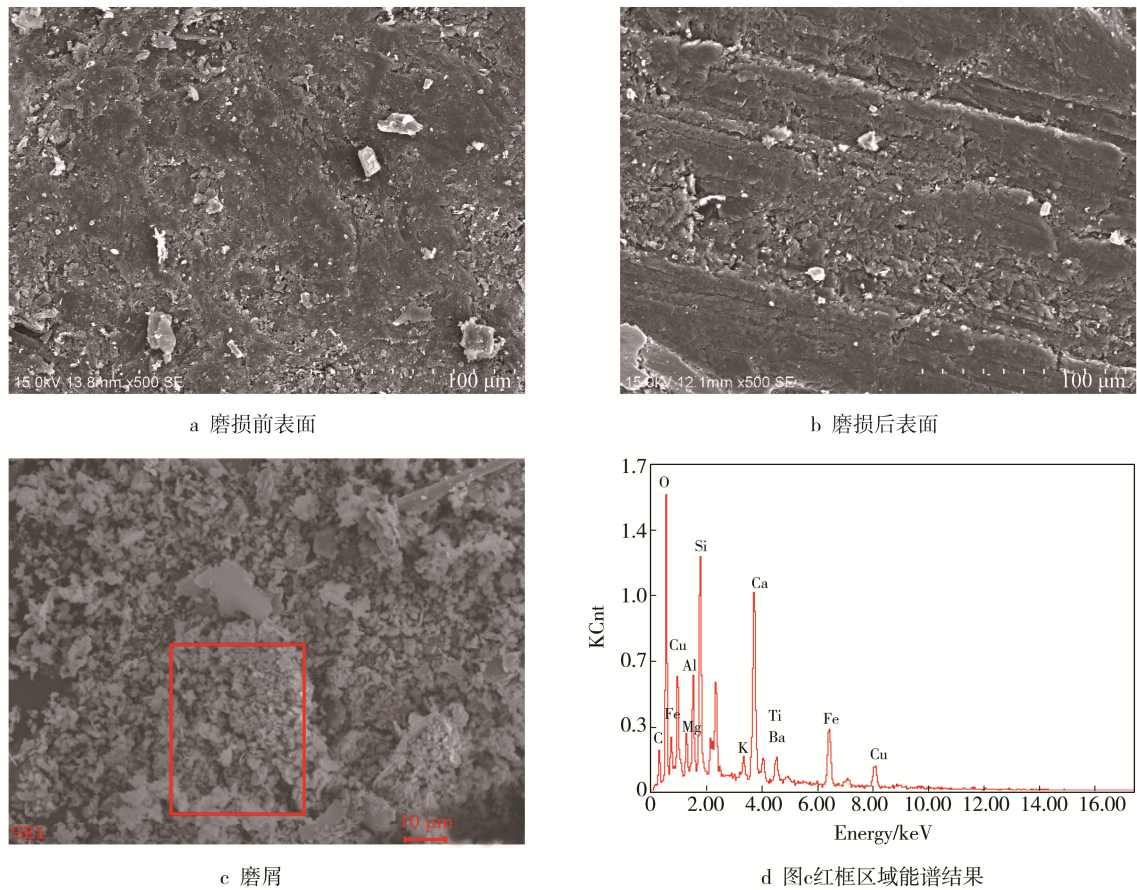


图 3 试样 F7 的磨损表面和磨屑 SEM 图以及能谱结果

Fig.3 SEM&EDS results of worn surface and wear debris on sample F7: a) front surface of worn surface, b) rear surface of worn surface, c) wear debris, d) energy spectrum results of red box in Fig.c

呈现大量的片状磨屑，脱落的颗粒物质较多，同时磨屑中散落有部分的纤维状物质，表明摩擦材料的硬度较低，与图 2 所得试样 F7 低硬度结论相一致。由图 3d 和表 4 可知，磨屑中 O 元素含量极高，达 19.38%，这表明树脂基摩擦材料发生了严重的有机物分解，同时 Cu 元素含量最高为 24.11%，验证了铜纤维被严重拔出现象。此时，低树脂基摩擦材料的磨损机制主要是热疲劳磨损，同时伴随着磨粒磨损。

图 4a 和 4b 为试样 F10 表面磨损前后的形貌图。可以看出，未进行摩擦试验的材料表面光滑平整，基体结合紧密；磨损后的表面疏松，没有出现连续的密集碳化层。较高的气孔率吸收了酚醛树脂分解所产生的气体，减少了摩擦表面“气垫膜”的形成，同时铜纤维形成的光亮转移膜在一定程度上延缓了热衰退现

象。但摩擦表面存在断裂、脆性剥落现象，主要原因是在摩擦力的作用下，基体材料发生变形，粘接性差的材料从基体上脱离，剥落的颗粒物质附着在摩擦表面，不断地对摩擦面造成划伤，加剧磨粒磨损。如图 4c 所示，磨损后磨屑的微观形貌中存在大量的粒状物质以及少量的片状或块状物质，这表明树脂基摩擦材料硬度较高，与图 2 所得的 F10 试样高硬度相匹配。由表 4 和图 4d 可知，与试样 F7 相比，试样 F10 磨屑中 O 元素的含量降低了 33.7%，这表明摩擦过程中气体被吸附，摩擦表面自洁性能得到提高，表面层不断得到更新，从而达到减少热衰退的目的。同时，Cu 元素含量降低了 20.1%，表明铜纤维以转移膜的形式存在于摩擦表面，被拔出现象有所缓解。此时，低树脂基摩擦材料的磨损机制主要是磨粒磨损。

表 4 磨屑的元素组成及比例
Tab.4 Elemental composition and proportion of wear debris

配方号	元素组成/wt.%						
	O	C	Cu	Fe	Ca	Si	Mg
F7	19.38	8.96	24.11	17.16	11.01	8.41	1.96
F10	12.85	4.43	19.27	21.56	8.85	9.13	2.17

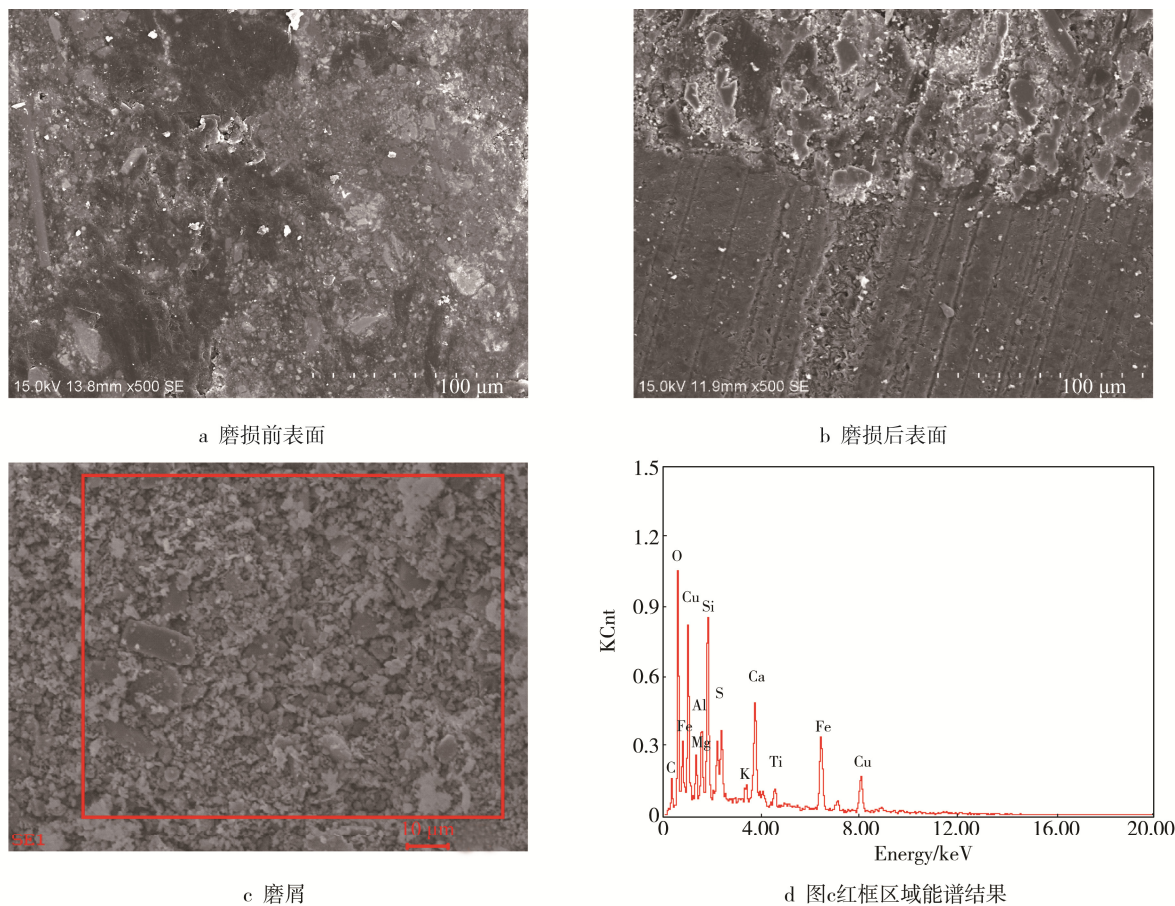


图4 试样 F10 的磨损表面和磨屑 SEM 图以及能谱结果

Fig.4 SEM&EDS results of worn surface and wear debris on sample F10: a) front surface of worn surface, b) rear surface of worn surface, c) wear debris, d) energy spectrum results of red box in Fig.c

4 结论

1) 混杂纤维的复合效应减少了剪切变形造成的各种形式的位错,其硬度及比例影响着树脂基摩擦材料的硬度和剪切强度。

2) 铜纤维在摩擦过程中会在摩擦面形成一层“转移膜”,将摩擦产生的高热量有效排出,避免摩擦材料基体在高温下分解,减缓热衰退,对摩擦材料的摩擦系数影响最大。

3) 丁腈胶粉具有良好的弹性和柔韧性,配合酚醛树脂混合使用能有效地控制摩擦材料的硬度,减少摩擦过程中的制动噪音,对摩擦材料的磨损率影响最大。焦炭的疏松多孔结构能有效地吸收有机物分解时释放的气体物质,控制制动噪音,但过量的焦炭会加剧摩擦材料的磨损。

4) 酚醛树脂含量的变化影响摩擦材料的磨损机制,树脂含量的增加使得材料的磨损机制由疲劳磨损转变为磨粒磨损。两种磨损机制相比较,磨粒磨损对摩擦材料的影响较小,且易控制。

参考文献:

[1] 刘晓斌,李呈顺,梁萍,等. 刹车片用无石棉摩擦材

料的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2013, 27(21): 265-267.

LIU Xiao-bin, LI Cheng-shun, LIANG Ping, et al. Research Situation and Development about the Non-asbestos Friction Material of Automotive Brake Pad[J]. Materials Review, 2013, 27(21): 265-267.

[2] 李专,肖鹏,熊翔,等. 碳纤维增强 C/SiC 双基体复合材料的制备及性能[J]. 新型碳材料, 2010, 25(3): 225-231.

LI Zhuan, XIAO Peng, XIONG Xiang, et al. Manufacture and Properties of Carbon Fibre-reinforced C/SiC Dual Matrix Composites[J]. New Carbon Materials, 2010, 25(3): 225-231.

[3] 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 Zhao-yin, LIU Li, et al. Research on Properties and Optimization Design of Low Content Resin Friction Material[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(1): 96-103.

[4] 姚冠新,王玉玲,魏龙庆,等. 复合改性酚醛树脂对制动摩擦材料性能的影响[J]. 润滑与密封, 2015, 40(8): 22-25.

YAO Guan-xin, WANG Yu-ling, WEI Long-qing, et al. Effects of Modification of PF Resin on the Perfor-

- mance of Brake Friction Materials[J]. *Lubrication Engineering*, 2015, 40(8): 22-25.
- [5] 冯竞伟, 余传柏, 覃渭添, 等. 腰果酚接枝丁腈橡胶及其改性酚醛树脂基摩擦材料的制备与性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(7): 164-169.
FENG Jing-wei, YU Chuan-bai, TAN Wei-tian, et al. Preparation and Performance of Phenolic Resin-based Friction Material Modified with Cardanol-graft-LNBR [J]. *Molecular Material Science and Engineering*, 2016, 32(7): 164-169.
- [6] 戴维福, 高诚辉, 何福善, 等. 稻壳粉含量对树脂基复合材料摩擦学性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2015, 35(5): 543-549.
DAI Wei-fu, GAO Cheng-hui, HE Fu-shan, et al. Tribological Performance of Resin-base Composites Filled with Rice Husk Powder[J]. *Tribology*, 2015, 35(5): 543-549.
- [7] 李辉, 杜建华, 王浩旭, 等. 碳纤维织物增强树脂基摩擦材料摩擦学性能研究[J]. *功能材料*, 2017, 48(4): 100-104.
LI Hui, DU Jian-hua, WANG Hao-xu, et al. Research of Tribological Characteristics of Resin Matrix Composites Reinforced by Woven Fabric of Carbon Fiber [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(4): 100-104.
- [8] 李磊. Csf/SiC 陶瓷基复合材料服役性改性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
LI Lei. Study on Service Performance Modification of Csf/SiC Ceramic Matrix Composites[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [9] SINGH T, PATNAIK A, CHAUHAN R, et al. Assessment of Braking Performance of Lapinus-wollastonite Fibre Reinforced Friction Composite Materials[J]. *Journal of King Saud University—Engineering Sciences*, 2017, 29(2): 183-190.
- [10] ARANGANATHAN A, MAHALE V, BIJWE J. Effects of Aramid Fiber Concentration on the Friction and Wear Characteristics of Organic Friction Composites Using Standardized Braking Tests[J]. *Wear*, 2016, 354: 69-77.
- [11] 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.
- [12] 钟厉, 刘力, 王昭银, 等. 复合矿物纤维增强低树脂基摩擦材料性能研究[J]. *润滑与密封*, 2016, 41(3): 15-20.
ZHONG Li, LIU Li, WANG Zhao-yin, et al. Research on Low Resin-based Friction Materials Reinforced by Compound Mineral Fiber[J]. *Lubrication Engineering*, 2016, 41(3): 15-20.
- [13] 文国富, 蓝奇, 王秀飞, 等. 混杂短纤维增强无石棉摩擦材料的制备及摩擦磨损性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2012, 17(5): 675-680.
WEN Guo-fu, LAN Qi, WANG Xiu-fei, et al. Fabrication and Wear Properties of Hybrid Short Fibers Reinforced Asbestos-free Friction Material[J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2012, 17(5): 675-680.
- [14] 程尧, 何林, 丁旭, 等. 钛酸钾晶须/芳纶/坡缕石复合矿物纤维摩擦材料的摩擦性能研究[J]. *润滑与密封*, 2011, 36(2): 81-86.
CHENG Yao, HE Lin, DING Xu, et al. Study on the Properties of Mineral Fiber Friction Materials Composed by PTW/Kevlar/Palygorskite[J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(2): 81-86.
- [15] 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.