

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.004

洗衣机制动材料的摩擦学特性及磨损机理研究

陈雪豹¹, 吴昊^{2,3}, 濮玲华⁴, 杨志权¹, 胡献国¹

(1. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230009; 3. 合肥美的洗衣机有限公司, 安徽合肥 230088; 4. 无锡小天鹅电器有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要: 洗衣机制动带的摩擦磨损性能对洗衣机的平稳制动具有重要影响, 因此有必要研究不同摩擦条件下洗衣机制动带的摩擦磨损性能。文章通过开展洗衣机制动带在面接触条件下的端面摩擦磨损试验研究, 分析不同滑动速度和制动压力等摩擦条件对洗衣机制动带材料摩擦磨损性能的影响, 探讨洗衣机制动带的摩擦磨损机理。试验结果表明: 较高或较低的速度和载荷会造成制动材料的摩擦摩擦性能下降, 不利于制动摩擦; 速度和载荷的增加会导致制动材料磨损量的增加, 且载荷和速度越高磨损量增加得越剧烈; 在 160 N、400 r/min 下制动材料的摩擦稳定性和抗磨损性能最佳。磨损机理表明, 接触表面的微凸体在摩擦力的作用下受压变形填充到基体表面之间, 形成光滑平整的表面, 从而有助于稳定摩擦系数并提高耐磨性能。

关键词: 洗衣机; 制动带; 摩擦条件; 摩擦学; 磨损

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)11-1459-07

On tribological properties and wear mechanism of brake materials for washing machines

CHEN Xuebao¹, WU Hao^{2,3}, PU Linghua⁴, YANG Zhiquan¹, HU Xianguo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Hefei Midea Washing Machine Co., Ltd., Hefei 230088, China; 4. Wuxi Little Swan Electric Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: The friction and wear performance of the brake belt of washing machine has an important impact on the smooth braking of washing machine, so it is necessary to study the friction and wear performance of the brake belt of washing machine under different friction conditions. In this paper, through the friction and wear test of the end face of the brake belt of washing machine under the condition of surface contact, the influence of different friction conditions such as sliding speed and brake pressure on the friction and wear performance of the brake belt material of washing machine is analyzed, and the friction and wear mechanism of the brake belt of washing machine is discussed. The results show that higher or lower speed and load will cause a decline in the friction performance of brake materials, which is not conducive to brake friction. The increase in speed and load will lead to an increase in wear of brake materials, and the higher the speed and load, the more intense the increase in wear. The friction stability and wear resistance of brake materials are the best at 160 N and 400 r/min. The wear mechanism shows that the micro convex body on the contact surface is compressed and deformed under the action of friction to fill between the substrate surfaces, forming a smooth and flat surface, thereby stabilizing the friction coefficient and improving the wear resistance.

Key words: washing machine; brake belt; friction condition; tribology; wear

收稿日期: 2023-06-13; **修回日期:** 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075141); 合肥工业大学科学研究发展资助项目(2020010691)

作者简介: 陈雪豹(1997—), 男, 安徽颍上人, 合肥工业大学硕士生;

胡献国(1963—), 男, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: xghu@hfut.edu.cn.

0 引言

随着现代工业的快速发展,洗衣机工作运行时的舒适性、安全性和可靠性越来越受到人们的重视,要求洗衣机在脱水时制动系统保持稳定可靠的摩擦系数和较好的耐磨性^[1]。摩擦副的制动性能很大程度上取决于制动材料、制动环境和制动条件^[2-4],而制动条件的变化对其摩擦学性能的影响是非常重要的,具体表现为制动条件的变化会导致制动系统的摩擦稳定性和耐磨性下降,进而发生振动、噪声^[5-6]等。因此,研究不同摩擦条件下洗衣机制动带材料的摩擦磨损性能,评价和筛选洗衣机制动带的最佳试验条件,对于研究安全、可靠和延寿的洗衣机制动系统具有一定的指导意义。

摩擦条件涉及很多方面,但是摩擦副的滑动速度^[7]和制动压力^[8]是影响制动材料性能的 2 个主要影响因素。国内外学者对众多制动系统开展了广泛研究^[9]。文献^[10]利用销盘式摩擦磨损试验机研究了低温环境下列车的制动行为,发现低温环境下制动压力和制动速度对制动材料摩擦磨损与损伤行为有显著的影响;文献^[11]制备了一种铜基粉末冶金摩擦材料,并研究了其在不同制动条件下的摩擦学性能,发现制动压力相同时,高速的平均摩擦系数和磨损率小于低速时的平均摩擦系数和磨损率;文献^[12]研究了飞机刹车材料 C/C-SiC 复合材料的摩擦学性能,发现摩擦系数随速度的增加而降低,当速度增加到 49 m/s 时,复合材料表现出低且稳定的摩擦系数;近年来,高速列车粉末冶金金属基和碳纤维增强非金属基摩擦材料的制动性能研究^[13-14]得到不断丰富发展。可见,不同制动材料的摩擦学性能在不同的制动系统中表现迥异,但对于洗衣机制动系统却鲜有研究成果报道。

由于洗衣机制动系统的摩擦学特性影响洗衣机的安全可靠运行,且目前环保低碳的产品标准对洗衣机的低噪声和长寿命设计均提出了新的要求,洗衣机制动材料的摩擦学性能研究越来越迫切,但目前国内外关于洗衣机制动材料的研究鲜有报道,因此有必要对洗衣机制动材料的摩擦磨损性能开展试验研究。本文以洗衣机制动带为研究对象,采用端面摩擦磨损试验机进行面接触的摩擦学试验,考察不同制动条件下制动材料的摩擦磨损性能,研究摩擦试验后的表面形貌与微观特征,力求阐明制动带的磨损机理,为洗衣机制动

系统的研究发展提供一定的理论指导。

1 试验部分

1.1 试验材料制备

本文使用的制动材料为美的洗衣机产品使用的树脂基制动带,制动带的主要组成原料有酚醛树脂、涤纶丝纤维、滑石粉、石灰石、硫化剂、软木粉、硅酸铝以及重晶石等。制动带的长度为 192.0 mm,宽度为 14.0 mm,厚度为 1.5 mm。为便于将洗衣机制动带固定于摩擦磨损试验机上进行试验,对洗衣机制动带进行机加工,加工方法为沿长度方向将洗衣机制动带切割成 63 mm 的长方体试样。

制动带的宏观照片和微观冷场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(SU8020,日立)图片如图 1 所示,其中制动带表面的主要成分有光滑平整的基体和混杂的纤维。利用 X 射线能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)分析制动带材料的元素组成,材料的主要化学元素及其组成见表 1 所列。

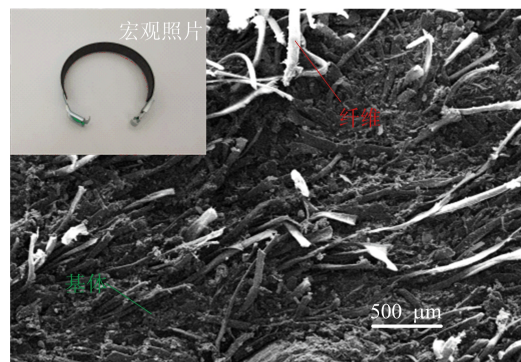


图 1 洗衣机制动带表面 SEM 照片

表 1 洗衣机制动带表面元素组成

材料	w/%						
	C	O	Ca	S	Si	Fe	Al
纤维	69.3	29.4	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1
基体	93.2	1.3	0.1	5.3	0.1	0.1	—

1.2 摩擦性能测试

为模拟洗衣机制动带在实际制动时的运转方式,采用自制的端面摩擦磨损试验机(HDM-20)考察摩擦学性能。该试验机的结构示意图如图 2 所示。

制动带固定于下夹具表面,上夹具固定有环形对偶件,其尺寸为内径 $\phi 22$ mm,外径 $\phi 30$ mm,

材质为 Cr12 模具钢,硬度为 HRC 55 ± 2 。摩擦试验前,用丙酮清洗圆环对偶件,以去除表面污染物;然后,加载至设定载荷并保持 2 min,以使制动带通过变形与对偶件充分接触;接着,在预设定的速度下进行 30 min 的摩擦测试。摩擦系数由测试系统记录保存和显示;磨损量通过激光共聚焦显微镜测量样品的磨痕轮廓曲线,然后计算样品磨痕的平均磨损面积;制动带的相对湿度为 80%,试验环境气氛为空气,环境温度为 $22 \sim 26$ °C。

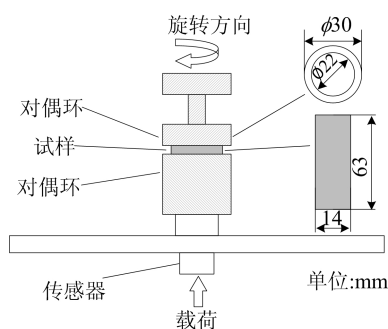


图 2 摩擦磨损试验测试结构示意图

制动材料的摩擦系数会受制动压力和相对滑动速度等因素的影响。参考洗衣机制动带脱水制动时的滑动速度(与洗衣机旋转速度变化一致)和制动压力,设计不同速度试验,载荷保持 160 N 不变,依次选取旋转速度为 200、400、600、800 r/min;对于制动带在不同载荷下的摩擦试验,旋转速度保持 400 r/min 不变,依次选取载荷为 120、160、200、240 N,每组试验参数至少重复试验 3 次,并最终取其平均值。摩擦试验结束后,使用 3D 激光显微镜(VK-X250,基恩士)测量制动带磨痕表面的磨损体积,同时观察磨痕表面的形貌。

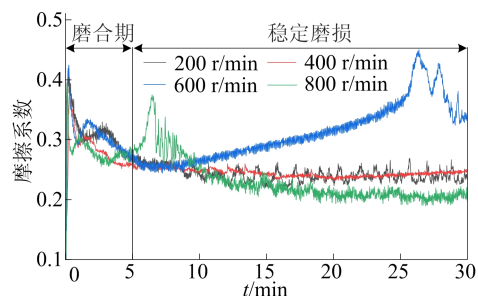
通过 X 射线光电子能谱仪(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)(ESCALAB250Xi,美国 Thermo)分析磨痕表面化学组成。在氮气气氛下以 10 °C/min 的升温速率对洗衣机制动带进行热重分析(thermogravimetric analysis, TGA)(热重分析仪 TGA8000, PE),加热温度为 $25 \sim 800$ °C,并对热重曲线进行微分处理,以得到微商热重曲线,即 DTG 曲线。

2 结果与讨论

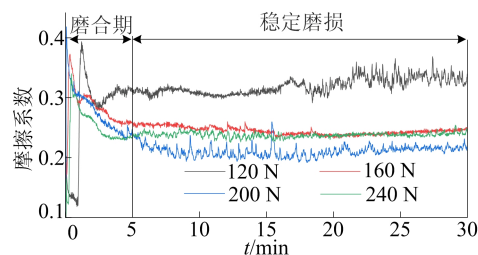
2.1 摩擦系数的变化

不同制动条件下摩擦系数随时间变化的曲线

如图 3 所示。



(a) 不同速度下的实时摩擦系数



(b) 不同载荷下的实时摩擦系数

图 3 制动条件对摩擦系数的影响

从图 3a 可以看出,不同速度下的摩擦系数在前 5 min 时都会出现先急剧增加、后快速下降、再逐渐上升、而后缓慢下降的趋势,摩擦系数在 5 min 后最终稳定在 $0.2 \sim 0.4$ 之间。其中:旋转速度为 200 r/min 时的摩擦系数值稳定在 $0.22 \sim 0.27$ 之间,平均摩擦系数为 0.24;当旋转速度为 400 r/min 时,摩擦系数变得更为稳定,其波动区间为 $0.23 \sim 0.26$,而平均摩擦系数则与旋转速度 200 r/min 时的值相同。这表明旋转速度的增加即滑动速度的增加,改变了摩擦面的接触状态,使得接触面有利于滑动摩擦,进而提高了摩擦系数稳定性。

从图 3a 还可以看出,当旋转速度增加至 200 r/min 时,摩擦系数在稳定磨损阶段随着时间的延长呈现出缓慢增长的趋势,在 25 min 左右时,摩擦系数出现了阶段性的骤增,且速度越大,骤增现象出现得越快,这一现象可以在旋转速度为 800 r/min 下的摩擦系数得到有效证明。600 r/min 旋转速度下的平均摩擦系数为 0.31,800 r/min 旋转速度下的平均摩擦系数却有所降低,其值为 0.23。

当旋转速度过快即滑动速度过快时,摩擦系数出现了不同程度的骤增现象,表明滑动速度的增加不利于摩擦材料平稳制动。

从图 3b 可以看出:在摩擦过程的前 5 min 内,不同载荷与不同速度下的摩擦系数变化趋势

相似,不过 120 N 下的摩擦系数没有缓慢下降阶段,而是由 0.29 逐渐上升到 0.31;在 5 min 之后,摩擦系数随时间的延长稳定在 0.29~0.37 之间,平均摩擦系数为 0.32;当载荷为 160 N 时,摩擦系数出现了明显的下降,并最终稳定在 0.23~0.26 之间,相比 120 N 的摩擦系数下降了 25%。载荷增加使得摩擦系数下降,表明载荷的增加改变了接触面的摩擦状态,使得接触面利于摩擦,进而提高接触面的承载能力。

当载荷增大至 200 N 时,平均摩擦系数进一步减小至 0.21,但是摩擦系数的稳定性却下降了,其摩擦系数的波动范围为 0.19~0.26。当载荷增加至 240 N 时,摩擦系数出现小幅度上升,平均摩擦系数为 0.24。

当载荷较大时,制动带的摩擦系数较小,同时摩擦系数的波动范围较大,不利于摩擦材料的平稳制动。

2.2 磨损量的变化

制动带在不同速度和制动压力下的磨损量如图 4 所示。

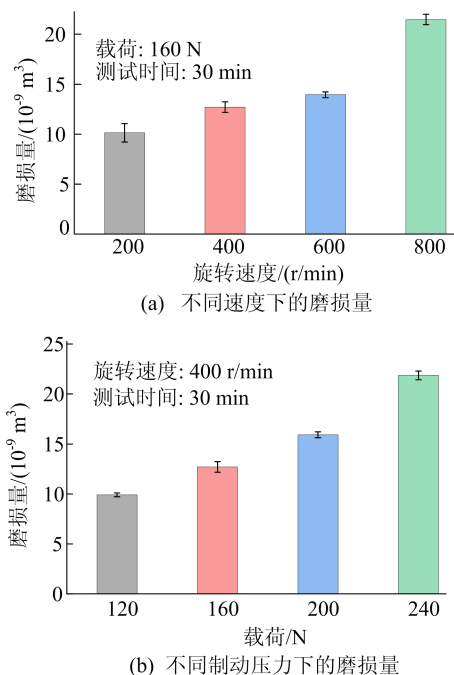


图 4 制动条件对制动带磨损量的影响

由图 4a 可知:制动带磨损量随着速度的增加而增加;当旋转速度低于 600 r/min 时,磨损量在 $10 \times 10^{-9} \sim 15 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 之间缓慢增加;当旋转速度超过 600 r/min 后,磨损量急剧增加,超过 $20 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 。这说明 600 r/min 是制动材料稳定磨损的边界速度,当速度处于边界速度范围以

内时,制动材料耐磨损性能较好,能有效地延长使用寿命。

由图 4b 可知:随着载荷的增加,制动带磨损量以稳定的趋势缓慢增加;当载荷增加到 200 N 后,磨损量以 33% 的趋势急剧增加。这可能是由于不同的载荷会改变接触表面的接触状态,载荷的增加会促进凸起结构的磨损,加快了接触平面磨损的进程,使得接触平面直接接触,从而保证了接触面的完整性,这也证明了图 3b 中 240 N 时的摩擦系数低且稳定的结论。

2.3 表面微观形貌的变化

摩擦试验结束后,使用 3D 激光显微镜测量分析制动带磨损表面的微观形貌。

不同速度下的制动带磨损表面形貌如图 5a 所示。

当旋转速度为 200 r/min 时,磨损表面主要有 2 种不同的磨损区域,分别是接触表面凸起结构受压变形后形成的凸起区域和原始表面没有磨损到的凹陷区域;与旋转速度为 400 r/min 的磨损表面相比,凹陷区域较多且大。这可归因于原始表面具有的凹陷结构在速度较低时,凸起结构没有完全被挤压变形,从而无法覆盖磨损表面,进而使得凹陷结构在磨损后依然较多,表面的不平整度增加了磨损的不稳定性,这也与图 3a 中摩擦系数的波动性结果相对应。

当旋转速度为 400 r/min 时,磨损表面的凸起结构被压实磨损,覆盖在磨损表面,使得凹陷区域的数量被减少。结合图 3a 不同速度下的摩擦系数曲线也可以发现,摩擦系数的稳定性得到了提高。

当旋转速度为 600 r/min 时,接触表面可以发现大量裸露的纤维,其表面的凸起结构不再是纤维与基体共同组成的微凸体,而是由裸露的纤维为主的微凸体,同时还发现,在裸露的纤维附近有不同面积的塌陷区域。这可能是速度较高时,接触表面的物质在摩擦热^[15]的作用下发生热降解,而纤维的熔点在摩擦热的温度以上,因此磨损表面形成了纤维为主的微凸体。

当旋转速度为 800 r/min 时,可以发现磨损表面的塌陷区域增多,同时在纤维表面形成了光滑平整的摩擦层。这可能是由于速度的增加进一步促进了摩擦热的累积,导致纤维材料发生了软化,形成了不同程度的摩擦层。材料的软化解释了图 4a 制动材料在 800 r/min 旋转速度时磨损量的急剧增加现象,而摩擦层的形成也证明了图 3a

中随着摩擦试验的进行摩擦系数不断降低的结论。

不同制动压力下制动带磨损表面的形貌如图 5b 所示。

当载荷为 120 N 时,制动带磨损表面有大量的凹陷区域,部分区域为凸起区域。

当载荷由 120 N 增加至 160 N 时,磨损表面的凹陷区域变少且面积变小,取而代之的是光滑平整的磨损表面。上述分析结果表明,随着载荷的增加,磨损表面的凸起结构会受压变形,然后覆盖在磨损表面,凹陷区域也会由于载荷的增加发生挤压变形,从而被挤压的凸起结构填充到凹陷的基体之间。

当载荷为 200 N 时,可以发现磨损表面的纤

维部分裸露在接触表面之外,这可能是由于载荷的增加促进了摩擦热的累积,导致微凸体组成的其他成分因受热而发生热降解。但磨损表面的纤维主要以嵌入基体的方式存在^[16],形成相对平整的磨损表面。

当载荷增加到 240 N 时,可以发现磨损表面有嵌入基体的纤维,压实磨损的纤维与基体形成了摩擦层,与图 5a 不同的是,制动压力作用下磨损表面没有大量的塌陷区域。塌陷区域的存在说明了磨损表面有成分发生热降解,而 240 N 下的磨损表面只有光滑平整的摩擦层,并没有出现塌陷区域。这说明该载荷下磨损表面主要以受压变形为主,受压变形的纤维与基体共同形成了摩擦层。

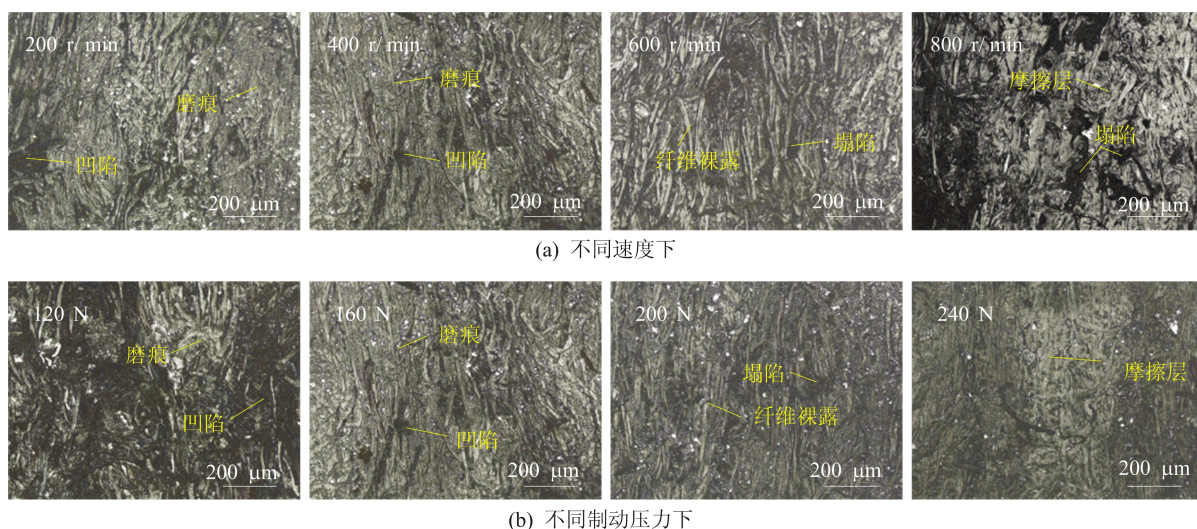


图 5 不同摩擦条件下制动带表面磨损形貌

2.4 磨损机理分析

2.4.1 磨损表面 XPS 分析

为了研究磨损表面的组成成分,对 240 N、400 r/min 下的制动带磨损表面进行 XPS 分析,结果如图 6 所示。

图 6a 显示的是磨损表面的全能谱,可以看出制动带磨损后的表面主要元素是 C、O、Ca、S、Si 等元素。

采集 XPS 谱图进行分峰拟合,C 1s 的拟合谱图如图 6b 所示,C 1s 峰位主要出现在结合能 284.5、284.9、286.4、288.8 eV 处,分别对应的是酚醛树脂中的 C=C、C—C/C—H、C—OH、O—C=O^[17-18]。

图 6c 所示为 O 1s 谱图,结合能 531.9、533.1、531.9、533.1 eV 分别可以归属为酚醛树脂的

C—OH 和 O—C=O^[17-18]。

由图 6d 所示为 Ca 2p 谱图,结合能 347.5 eV 和 351.1 eV 分别对应的是 Ca²⁺ 和 Ca—O^[19],这对应于原料组成石灰石。

图 6e 所示为 S 2p 谱图,可以发现 S 2p 的结合能为 163.6 eV 和 168.9 eV 的峰位,归属于 R₂—SH 和 H/R—SO₄^[20],这可能来自于硫化剂和重晶石。

图 6f 所示为 Si 2p 谱图,结合能 101.8 eV 和 102.6 eV 处的峰分别对应于 Si—Si 和 Si—OH^[21-22],这可能对应于原料组成滑石粉和硅酸铝。

同时该试验还发现,制动带材料相同元素的结合能相同,即制动材料接触表面磨损前、后的官能团相同,这也证明了摩擦试验过程中磨损表面的结构成分保持不变。

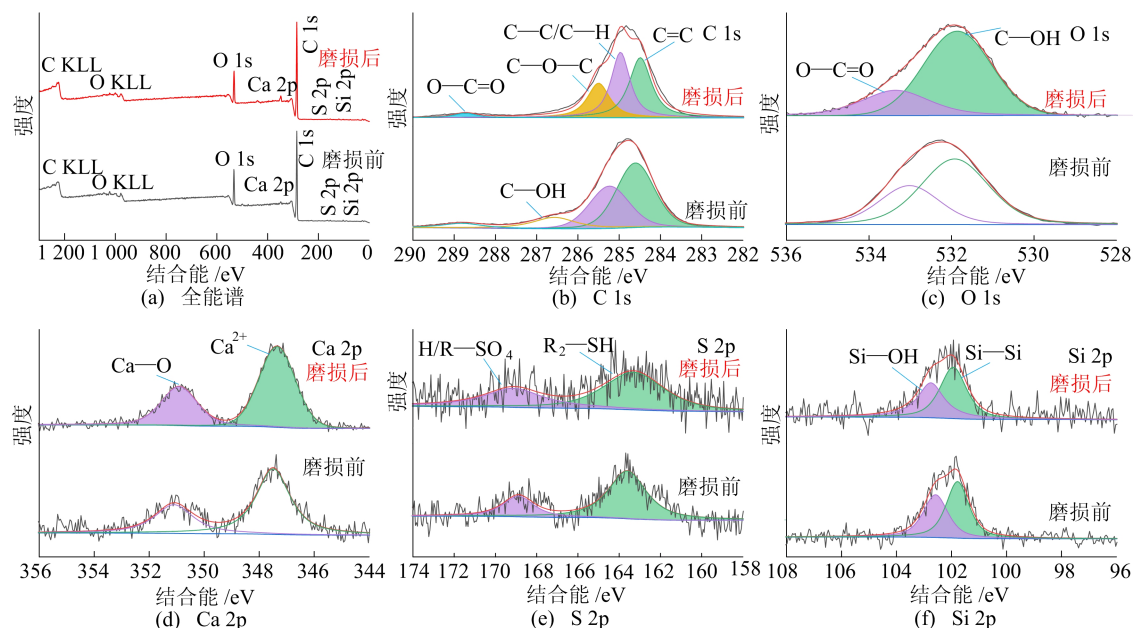


图 6 洗衣机制动带磨损表面的 XPS 分析

2.4.2 热稳定性分析

为了研究制动材料在不同摩擦热的累积下发生的物理变化,有必要对洗衣机制动带进行热稳定性分析。

洗衣机制动带的 TGA 曲线如图 7 所示,可以看出,质量损失开始于 250~330 °C 之间,这与软木粉的热分解温度^[23]相关。

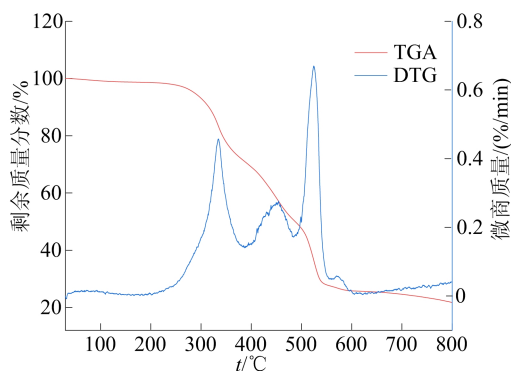


图 7 洗衣机制动带的 TGA 和 DTG 曲线

由图 7 可知:随着温度的继续升高,在 400~460 °C 之间出现质量损失,这可能是酚醛树脂的热分解温度^[24];在 490~600 °C 出现比较显著的质量损失,这对应于涤纶丝纤维的热分解温度^[25]。而其他成分如滑石粉、石灰石和硅酸铝等不会在工作温度下发生热分解。

以上试验结果表明,不同的温度区间内会有不同的成分损失,而图 6 得出的磨损表面结构成分没有发生改变也证明了图 5 中磨损表面形成的

摩擦层是物理摩擦层。

3 结 论

本文以酚醛树脂基洗衣机制动带为研究对象,考察了不同制动条件下制动带的摩擦学性能,分析了制动带的摩擦磨损机理,主要结论如下:

1) 滑动速度(与旋转速度变化一致)和制动压力对洗衣机制动带的摩擦磨损性能作用显著。制动带的摩擦系数稳定性随滑动速度的增加呈现先增大后减小的变化趋势;随着制动压力的增加,摩擦系数稳定性也呈现先增大后减小的变化趋势。当旋转速度为 400 r/min、制动压力为 120 N 时,摩擦系数稳定性和摩擦摩阻性能达到本文试验最佳。

2) 制动压力保持不变时,制动带的磨损量随着滑动速度(即旋转速度)的增加而增加,当旋转速度达到 600 r/min 时,磨损量显著增加。当速度保持不变时,制动带的磨损量随着制动压力的增加而增加,当制动压力为 240 N 时,磨损量显著增加。

3) 滑动速度和制动压力的增大有利于接触表面的微凸体受压变形填充到基体表面之间,形成压实平整的表面,进而稳定摩擦系数和提高耐磨性。

4) 磨损表面在较高的速度或载荷下因摩擦热的积累会发生不同程度的热降解,热降解后的磨损表面会形成不同程度的物理摩擦层,摩擦层可以稳定摩擦系数,但耐磨性能较低。

[参 考 文 献]

- [1] 袁振军,贺甜甜,杜三明,等. 硼铁含量对铜基粉末冶金制动材料性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(18): 3223-3229.
- [2] CHANDRA V P, MENAPACE L, BONFANTI A, et al. Braking pad-disc system; wear mechanisms and formation of wear fragments[J]. *Wear*, 2015, 322/323: 251-258.
- [3] ZHOU X, ZHU D, XIE Q, et al. Friction and wear properties of C/C-SiC braking composites[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(3): 2467-2473.
- [4] BAO J, ZHU Z, TONG M, et al. Influence of braking pressure on tribological performance of non-asbestos brake shoe for mine hoister during emergency braking[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2012, 64(4): 230-236.
- [5] XIANG Z Y, CHEN W, MO J L, et al. The effects of the friction block shape on the tribological and dynamical behaviours of high-speed train brakes[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 194: 106184.
- [6] XIANG Z Y, MO J L, OUYANG H, et al. Contact behaviour and vibrational response of a high-speed train brake friction block[J]. *Tribology International*, 2020, 152: 106540.
- [7] 张军战,徐永东,张立同,等. 刹车速度对 C/C-SiC 复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(8): 1051-1056.
- [8] 高红霞,刘建秀,朱茹敏. 铜基粉末冶金列车闸瓦材料的摩擦磨损性能研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005, 23(6): 871-874.
- [9] ALI M K A, MAKRAHY M M, HOU X J. Role of the friction layer formed on the brake lining surface in friction stabilization for automotive brakes[J]. *Surface Topography-Metrology and Properties*, 2019, 7(1): 015026.
- [10] 张超,马蕾,丁昊昊,等. 低温环境下制动参数对列车制动材料摩擦性能的影响[J]. 机械工程学报, 2021, 57(8): 230-239.
- [11] ZHANG X, ZHANG Y, DU S, et al. Influence of braking conditions on tribological performance of copper-based powder metallurgical braking material[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(9): 4473-4480.
- [12] LI G, YAN Q, JIAN R X, et al. The stability of the coefficient of friction and wear behavior of C/C-SiC[J]. *Tribology Letters*, 2015, 58: 13.
- [13] ALEMANI M, GIALANELLA S, STRAFFELINI G, et al. Dry sliding of a low steel friction material against cast iron at different loads; characterization of the friction layer and wear debris[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 1450-1459.
- [14] XIAO Y, ZHANG Z, YAO P, et al. Mechanical and tribological behaviors of copper metal matrix composites for brake pads used in high-speed trains[J]. *Tribology International*, 2018, 119: 585-592.
- [15] BASHIR M, QAYOUM A, SALEEM S S. Influence of lignocellulosic banana fiber on the thermal stability of brake pad material[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(11): 115551.
- [16] AHMADIJOKANI F, ALAEI Y, SHOJAEI A, et al. Frictional behavior of resin-based brake composites; effect of carbon fibre reinforcement[J]. *Wear*, 2019, 420: 108-115.
- [17] YONG W, CHENG B, JING X. Adhesion improvement of electroless copper plating on phenolic resin matrix composite through a tin-free sensitization process[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 271(15): 303-310.
- [18] LV Y, LI J, LEI Z X, et al. Situ preparation of SiO₂ on graphene-assisted anti-oxidation for resol phenolic resin[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 154: 222-233.
- [19] LIU D, WANG Z X. Tribological performance of lubricating greases based on calcium carbonate polymorphs under the boundary lubrication condition[J]. *Tribology Letters*, 2012, 47(2): 183-194.
- [20] SIOW K S, BRITCHER L, KUMAR S, et al. XPS study of sulfur and phosphorus compounds with different oxidation states[J]. *Sains Malaysiana*, 2018, 47(8): 1913-1922.
- [21] GUHA S, DAS S, BANDYOPADHYAY A, et al. Investigation of structural network and mechanical properties of titanium silicon nitride (TiSiN) thin films[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 731: 347-353.
- [22] WANG X, WANG J, TENG W, et al. Fabrication of highly efficient magnesium silicate and its adsorption behavior towards Cr(VI)[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 323: 111196.
- [23] POLETTI M, ZATTERA A J, FORTE M, et al. Thermal decomposition of wood; influence of wood components and cellulose crystallite size[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 109: 148-153.
- [24] ASARO L, DAMICO D A, ALVAREZ V A, et al. Impact of different nanoparticles on the thermal degradation kinetics of phenolic resin nanocomposites[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 128(3): 1463-1478.
- [25] 欧阳春,吴立群. 几种化学纤维热性能对比[J]. 中国造纸, 2012(9): 4.

(责任编辑 胡亚敏)