

DOI: [10.16078/j.tribology.2017.05.002](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2017.05.002)

树脂基复合材料摩擦片摩擦学性能研究

杜嘉俊, 朱永梅*, 谭雪龙, 周元凯, 唐文献
(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 摩擦片的摩擦磨损性能严重影响盘式制动器的使用寿命和客车行驶的安全性. 以灰铸铁HT250圆盘为对偶件, 利用销盘式摩擦磨损试验机, 在不同温度下对树脂基复合材料摩擦片的摩擦系数和磨损率进行研究, 同时应用JSM-651010LA型扫描电子显微镜、HGP-7500型光电直读光谱仪和HXD-1000TMSC型显微硬度测试仪对摩擦磨损表面进行观察和测量, 表征其摩擦表面的微观形貌和测定微观硬度, 进而推断其磨损机理. 结果表明: 在不同温度下, 平均摩擦系数和磨损率均随着温度的升高先增加后降低; 随着温度升高, 摩擦层的面积和其微观硬度的变化和平均摩擦系数、磨损率的变化规律基本相同; 在高温摩擦磨损过程中, 黏着磨损占主导作用, 同时伴随着切削磨损.

关键词: 摩擦片; 高温磨损; 摩擦系数; 磨损率

中图分类号: TH117.1 文献标志码: A 文章编号: 1004-0595(2017)05-0574-07

Tribological Properties of Resin Matrix Composites

DU Jiajun, ZHU Yongmei*, TAN Xuelong, ZHOU Yuankai, TANG Wenxian

(Jiangsu University of Science and Technology School of Mechanical Engineering, Jiangsu Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The tribological properties of the pad seriously affect the service lifetime of the disc brake and the safety of the vehicles. By using a high speed tribo-tester, tribological behaviors of resin matrix composite sliding against gray cast iron HT250 were investigated under high speed dry sliding conditions. Friction and wear tests were performed at elevated temperatures to obtain the friction coefficient and wear rate of resin matrix composite pad. Morphology and hardness of the unworn and worn surfaces were analyzed by scanning electron microscope, photoelectric direct reading spectrometer and microhardness tester, and the wear mechanism at elevated temperature was presented. The mean friction coefficient and wear rate were observed to increase firstly and then decrease with the increasing temperature. The variation of the micro hardness and area of the friction layer increase firstly and then decrease with the increasing temperature. Adhesive wear mechanism dominated at higher temperature.

Key words: brake pad; high temperature wear; friction coefficient; wear rate

盘式制动器是客车运行过程中重要的安全部件之一, 其性能在很大程度上取决于摩擦片的摩擦磨损性能. 通常情况下, 摩擦片应具有较低的密度、高稳定的摩擦系数以及良好的耐磨性和耐热性^[1-4]. 近年来, 树脂基复合摩擦材料由于其摩擦性能稳定、耐热性和耐磨性较好而得到了广泛应用, 但是其摩擦学性能的

研究尚未形成体系^[5-8]. Kukutschová等^[9]研究了半金属制动摩擦材料的磨损机理, 他的研究表明, 磨料磨损和黏着磨损在干摩擦过程中占主导地位. 据Poh等的验证, 制动盘和摩擦片表面摩擦层的摩擦是产生磨损的主要因素, 其磨损率取决于摩擦片表面摩擦层的硬度、结构和化

Received 30 March 2017, revised 15 May 2017, accepted 1 June 2017, available online 28 September 2017.
*Corresponding author. E-mail: zymtt@163.com, Tel: +86-511-84401198.
The project was supported by the Project of Natural Science Research Area of Jiangsu Province (15KJB460008) and Development of Disc Brake for Large Size and High Pressure Vehicle and Development of Test System (BY2015065-04).
江苏省前瞻性联合研究项目(BY2015065-04)和江苏省自然科学基金项目(15KJB460008)资助.

学成分^[10]. 在过去的研究中证明, 多纤维摩擦材料表现出最佳的抗磨性能, 这种材料在低温下主要表现为磨料磨损, 随着温度的升高, 会伴随着黏着磨损和疲劳磨损^[11-14]. Stadler等^[15-16]根据ECE R90试验要求研究了烧结金属摩擦材料的温度、摩擦系数、平均硬度、磨损机理和摩擦层特性等问题.

本文作者根据GB5763规范, 通过对树脂基复合摩擦材料进行销盘式小样摩擦磨损试验, 研究了树脂基复合材料摩擦片在不同温度下的摩擦系数和磨损率, 并在试验前后, 分别对摩擦片摩擦磨损表面进行了SEM图像、EDX光谱的拍摄和显微硬度的测试, 根据试验结果, 提出了树脂基复合材料摩擦片的摩擦磨损机理随温度的变化关系.

1 试验部分

1.1 试验材料

试验所用的树脂基复合摩擦材料由杭州优纳摩擦材料有限公司制造, 其组成列于表1. 由表1中可知, 树脂基复合摩擦材料主要由四部分组成: 粘结材料、增强纤维、矿物填料和摩擦性能调节剂. 其中, 粘结材料在摩擦磨损性能中占据重要地位, 主要用来粘结各种成分, 使其构成一个稳定基体, 而酚醛树脂和丁腈橡胶作为优良的粘结材料而被广泛使用^[17-20].

表 1 摩擦片材料组成

Table 1 Composition of the pad friction material		
Component	Mass fraction,w/%	Function
Phenolic resin	24	Binder
Nitrile rubber	5	Binder
Steel fiber	10	Reinforcement
Twaron	2	Reinforcement
BaSO ₄	9	Friction modifier
Synthetic graphite	5	Friction modifier
Resilient graphitic carbon	5	Friction modifier
MgO	3	Friction modifier
ZrSiO ₄	2	Friction modifier
Al ₂ O ₃	2	Friction modifier
Coke	15	filler
Vermiculite	5	filler
Copper	4	filler
Iron powder	3	filler
Sb ₂ S ₃	3	filler
Tin	3	filler

1.2 试验方法

采用咸阳新益摩擦密封设备有限公司产的XD-MSM型定速摩擦磨损试验机对树脂基复合材料进行摩擦磨损试验, 试验所用摩擦材料截面尺寸为25 mm×

25 mm, 厚度为7 mm, 摩擦面采用金相砂纸研磨; 对偶件圆盘尺寸为22.5英寸, 直径为571.5 mm, 根据GB/T9493的规定, 圆盘材料为珠光体灰铸铁HT250, 其布氏硬度为HB200, 圆盘试样用JB/T7498中粒度为P240的砂纸处理, 以保证表面无明显划痕、锈蚀和凹坑等缺陷. 试验时, 为了使摩擦材料的受力和磨损均匀, 将两个摩擦材料试样同时对称装夹, 试验结果取两个试样的平均值, 将圆盘速度设置为490±10 r/min, 在室温下进行磨合, 待接触面达95%以上后进行磨损试验, 分别测量温度在100、150、200、250、300和350 ℃时树脂基复合材料的摩擦系数和磨损率, 整个试验过程和分析方法均遵循GB5763-2008规定.

通过型号为JSM-651010LA的扫描电子显微镜(SEM), 分别观察摩擦片磨损前后的表面形貌, 对试样磨痕表面形貌进行观察分析; 通过HGP-7500型光电直读光谱仪(EDX), 测定试样磨损前和磨损后表面的EDX光谱; 通过显微硬度测试仪(HXD-1000TMSC)测定试样磨损前后表面的微观硬度.

2 试验结果分析

2.1 摩擦系数

图1为树脂基复合材料的摩擦系数与温度随圆盘转数变化规律图, 由图1中可以看出, 初始阶段, 摩擦系数的波动随着温度的升高而增大, 但随着温度的持续上升, 摩擦系数又开始减小, 这是由于摩擦片试样的热膨胀和表面膜转移及磨损机制引起的. 由图1中还可以看出, 温度在 $n=2\ 500$ r后趋于稳定, 因此取不同温度下转速在2 500~5 000 r之间的摩擦系数平均值作为评价指标, 具体数值列于表2中.

由表2中可知, 平均摩擦系数随着温度的升高先增加后减小, 满足GB/T5763-2008汽车用制动器衬片的要求, 出现这种变化趋势的原因为粘结材料中的酚醛树脂是一种高分子聚合物, 对温度非常敏感, 随着温度的升高, 其组织由玻璃相转变为橡胶相, 摩擦表面间的粘附力增强, 因此摩擦系数升高; 但当温度超过200 ℃时, 酚醛树脂开始热分解, 分解出的水、油和其他化合物会在摩擦表面形成一层氧化膜, 将干摩擦变成混合摩擦或流体摩擦, 因此, 摩擦系数显著降低^[21-23]. 由表2中还可以看出, 150和200 ℃时的平均摩擦系数较高且近似相等, 100、250和300 ℃时的平均摩擦系数也近似相等且略低于前者, 而350 ℃时的平均摩擦系数最小, 相比最高值降低了28.47%. 这表明在

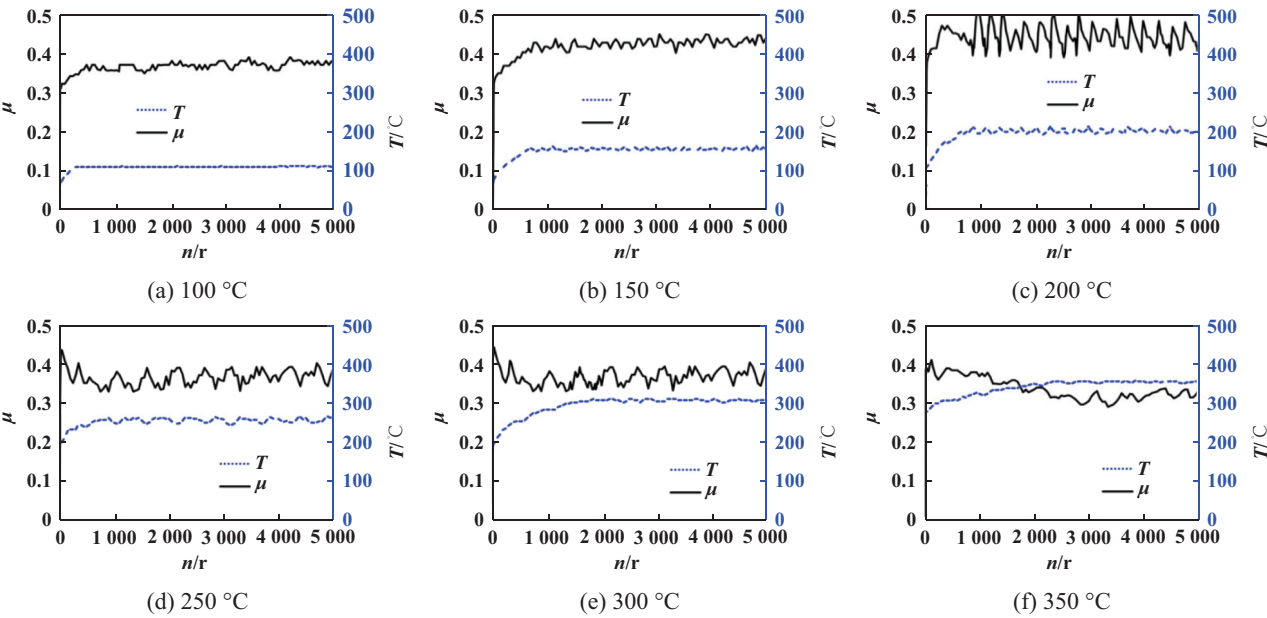


Fig. 1 Friction coefficient and disk temperature vs revolution
图 1 摩擦系数与温度随圆盘转数变化曲线

表 2 平均摩擦系数与磨损率

Table 2 Mean friction coefficient and wear rate

<i>T</i> /°C	Mean friction coefficient		Wear rate/[$\times 10^{-4}$ mm ³ ·(N·m) ⁻¹]	
	Measured	Acceptable limit	Measured	Acceptable limit
100	0.373	0.25~0.65	0.186	0~0.50
150	0.433	0.25~0.70	0.298	0~0.70
200	0.439	0.25~0.70	0.304	0~1.00
250	0.368	0.25~0.70	0.203	0~1.50
300	0.367	0.25~0.70	0.176	0~2.00
350	0.314	0.25~0.70	0.136	0~2.50

150~200 °C时, 盘式制动器的制动安全性能最好, 在 350 °C时的制动性能最差.

2.2 磨损率

树脂基复合摩擦材料试样的磨损率 ν 可由式(1)^[24]得出.

$$\nu = 1.06 \times \frac{A(d_1 - d_2)}{n \cdot f_m} \tag{1}$$

其中: A 为摩擦片试样磨损总面积(mm²); d_1, d_2 为试样摩擦前后的厚度(mm); n 为试验时圆盘的转数(r); f_m 为摩擦力(N).

由表2中磨损率数据可知, 磨损率也随着温度的升高先增大后减小, 其数值处于0.13~0.31之间, 满足GB/T5763-2008汽车用制动器衬片的要求, 出现这种变化趋势的原因与摩擦系数变化原因相同. 然而, 由表2中还可以看出, 当摩擦系数较大时, 相应的磨损率也较高, 因此, 好的制动性能必然对应高磨损率, 二者是相互矛盾的存在, 如何在二者之间进行平衡是解决盘式制动器摩擦磨损的关键问题.

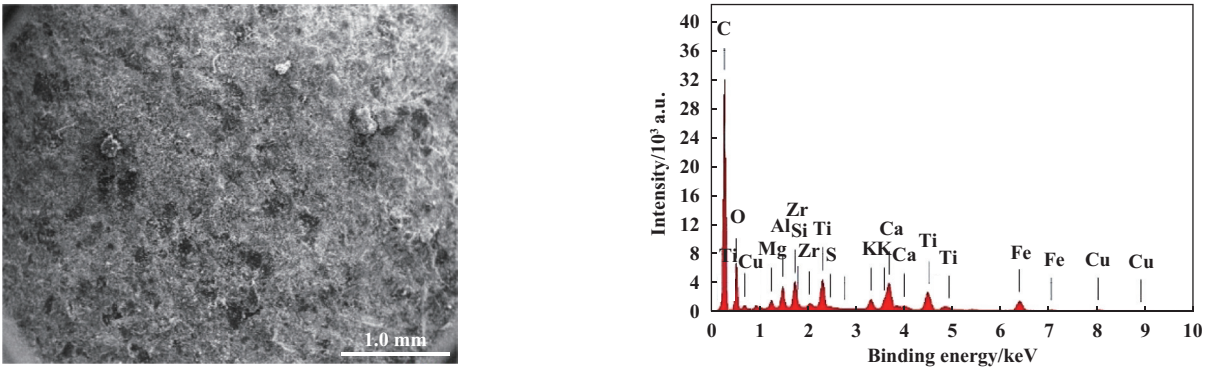
2.3 摩擦前后的表面SEM图像和EDX光谱

图2显示了树脂基复合材料试样磨损前后的SEM图像和表面EDX光谱. 图2(a)中未磨损表面在放大后的微观形貌显得较为粗糙; 图2(b~c)所示为试样磨损表面形貌的SEM照片和EDX光谱, 图2(b)中黑色区域的主要化学元素是C, 类似于未磨损表面; 图2(c)中白色区域是摩擦层, 在摩擦磨损试验中起到摩擦作用, 其主要化学成分为Fe和FeO.

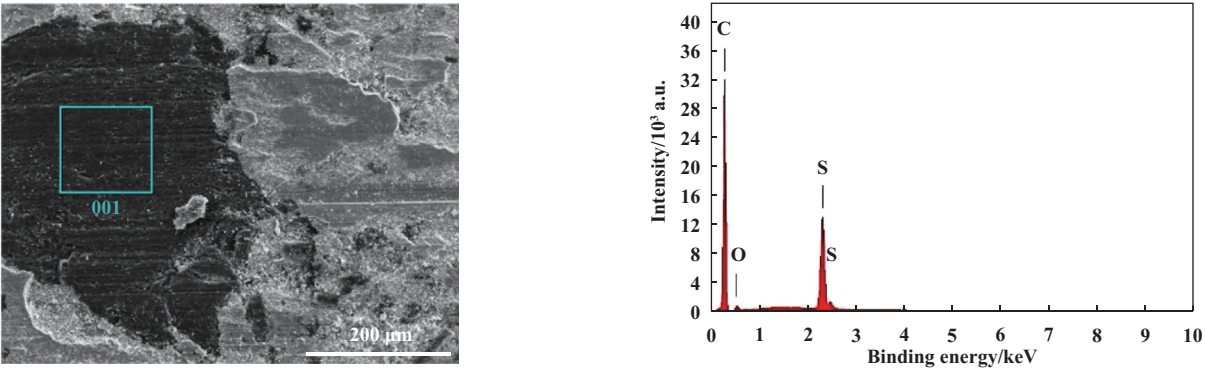
图3显示了不同温度下摩擦片试样在SEM扫描电镜下放大30倍的表面微观形貌图像, 各图像中磨损方向均为水平方向, 其中大部分区域是白色的, 小部分是黑色的. 如图3所示, 在150和200 °C时的摩擦层面积较大且基本相等, 在100、250和300 °C时的摩擦层面积也近似相等且略低于前者, 而350 °C时的摩擦层面积最小. 摩擦层面积和平均摩擦系数在不同温度中的变化情况一致.

2.4 摩擦前后的微观硬度

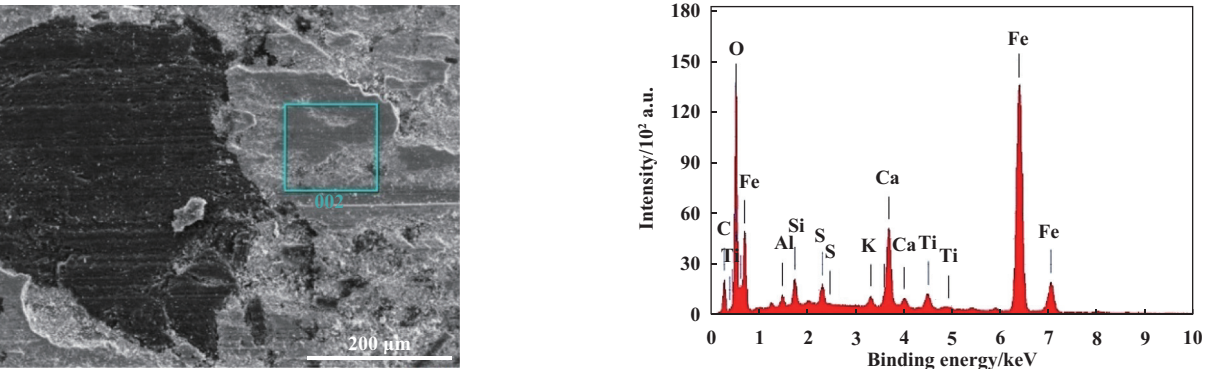
因为硬度对摩擦片磨损性能有相当大的影响, 所以摩擦片磨损前后表面的显微硬度和磨损表面的形貌值得研究. 对摩擦片未磨损表面上的6个随机点进行显微硬度测定, 结果发现硬度变化不大, 分别为9.6、9.2、11.5、11.3、11.1和9.7 MPa. 由图4中未磨损硬度曲线可以看出, 随温度的变化, 表面材料的硬度略有变化, 平均硬度为10.9 MPa, 可以近似看作未磨损表面的平均值(10.4 MPa). 图4中磨损后的硬度曲线在不同温度下的硬度分别为58.7、92.7、113.9、62.0、



(a) SEM micrograph and EDX spectrum of the unworn surface



(b) SEM micrograph and main chemical element of a typical surface after test



(c) SEM micrograph and EDX spectrum of a typical worn surface

Fig. 2 SEM micrographs and EDX spectrum before and after the experiment

图 2 试验前后表面SEM照片和表面EDX光谱

59.4和33.7 MPa, 可以看出, 摩擦层的硬度随着温度的升高先增加后下降. 在150和200 °C时摩擦层的硬度较高, 在100、250和300 °C时的硬度近似相等且略低于前者, 而350 °C时硬度值最小. 这是由于前期摩擦片的摩擦层在摩擦过程中硬度增加, 施加在摩擦层上的接触压力也随之增加, 这使得摩擦片磨损加剧; 随着温度的升高, 酚醛树脂开始热分解, 硬度降低, 使得摩擦层面积相对增大, 摩擦片磨损量减小. 摩擦层硬度的变化同摩擦层在不同温度下的磨损率变化趋势一致 (参见图4和表2).

2.5 摩擦磨损机理

图5为摩擦片在不同温度时SEM扫描电镜下放大200倍的表面微观形貌图像, 由图5(a)可以看出, 在制动初期, 摩擦片表面温度较低, 磨损形式主要为磨粒磨损, 黑色部分为硬质粒子脱落后留下的凹坑, 摩擦表面较为粗糙, 因此摩擦面间存在微凸体, 所以图5(a)中还存在一条由于微凸体剪切引起的划痕, 说明伴随着切削磨损; 随着制动的进行, 温度逐渐升高, 磨粒磨损逐渐减少, 取而代之的是点接触的黏着磨损和疲劳磨损, 如图5(b~d)所示, 这个过程中也伴随着切削磨损; 制动后期, 如图5(e~f)所示, 图中黏着磨损表现为

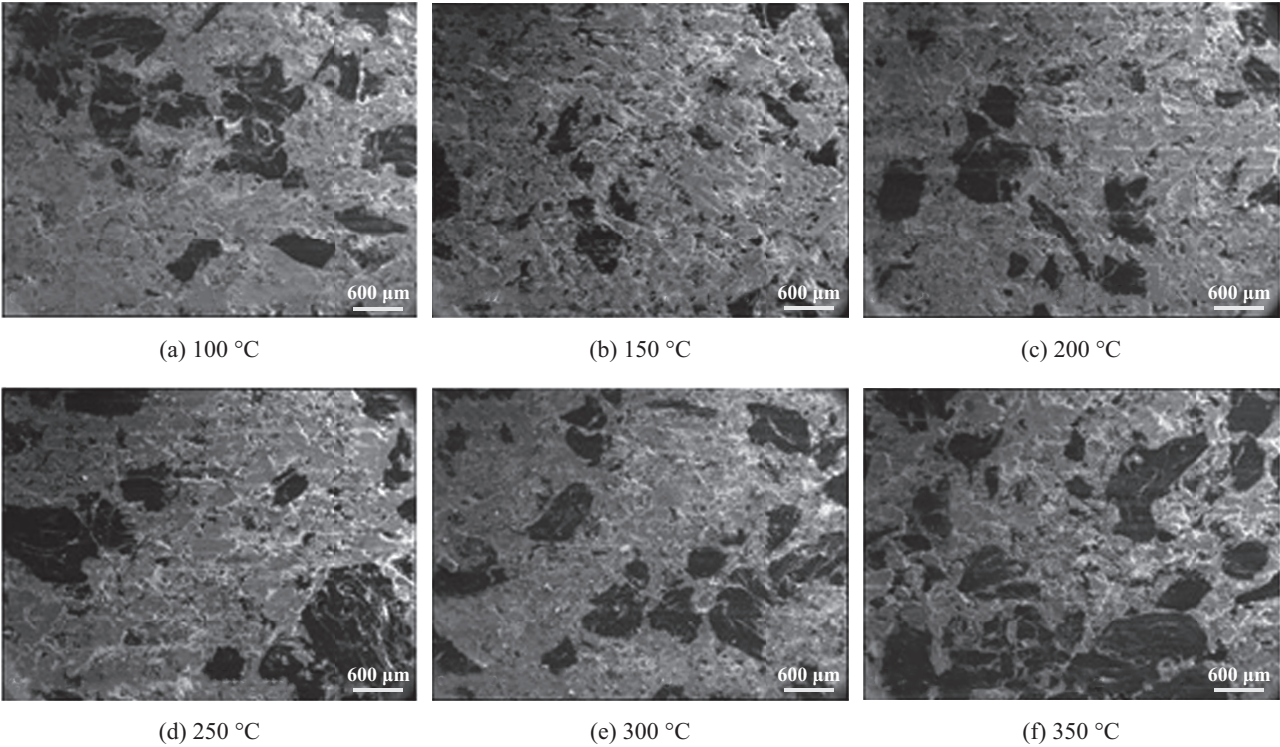


Fig. 3 SEM micrographs of the pad surface at different temperature
图 3 摩擦表面在不同温度下的SEM照片

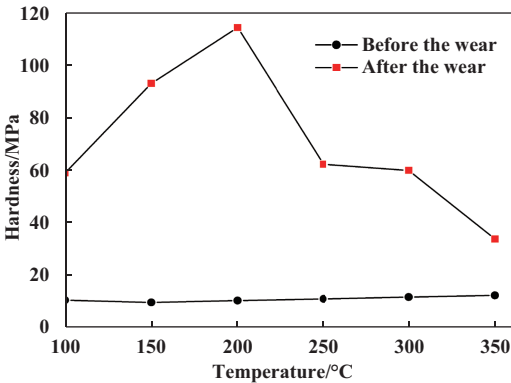


Fig. 4 The micro hardness of surface materials and friction layer
图 4 表面材料和摩擦层的微观硬度

材料大面积的剥落,同时还伴随着明显的划痕.其原因是制动盘的转动导致摩擦片表面材料上小颗粒黏着到制动盘上,有时被黏着的颗粒又回到摩擦片上,造成反黏着,摩擦片表面材料通过不断地黏着、反黏着和挤压,发生硬化、疲劳和氧化,从而形成游离态的磨屑并脱落下来,形成了摩擦片材料的黏着磨损(面撕裂),同时,制动盘表面比较硬的微凸体会被压入摩擦片材料中,并随着制动盘的转动,这些微凸体在摩擦片表面形成划痕和犁沟.因此,由以上分析可知,摩擦片磨损过程中,黏着磨损占主导作用,同时伴随着切削磨损.

3 结论

- a. 温度在转速达到2 500 r后趋于稳定,因此在不同温度下取转速2 500~5 000 r之间的摩擦系数平均值作为参考指标.初始阶段,平均摩擦系数和磨损率随着温度的升高而增大,但随着温度的持续上升,又开始减小,两者的变化趋势一致,符合GB5763-2008汽车用制动器衬片的要求.
- b. 150和200 °C时的平均摩擦系数较高且近似相等,100、250和300 °C时的平均摩擦系数也近似相等且略低于前者,而350 °C时的平均摩擦系数最小,相比最高值降低了28.47%.这表明在150~200 °C时,盘式制动器的制动安全性能最好,在350 °C时的制动性能最差.
- c. 铁或氧化铁是摩擦层的主要化学成分,在150和200 °C时的摩擦层面积较大且基本相等,在100、250和300 °C时的摩擦层面积也近似相等且略低于前者,而350 °C时的摩擦层面积最小.这些变化和在不同温度下平均摩擦系数、磨损率的变化趋势一致.
- d. 试样未磨损表面的平均硬度为10.9 MPa,试样磨损时在150和200 °C时摩擦层的硬度较高,在100、250和300 °C时的硬度也近似相等且略低于前者,而350 °C时硬度值最小.摩擦层硬度的变化同摩擦层在不同温度下的磨损率的变化趋势一致.

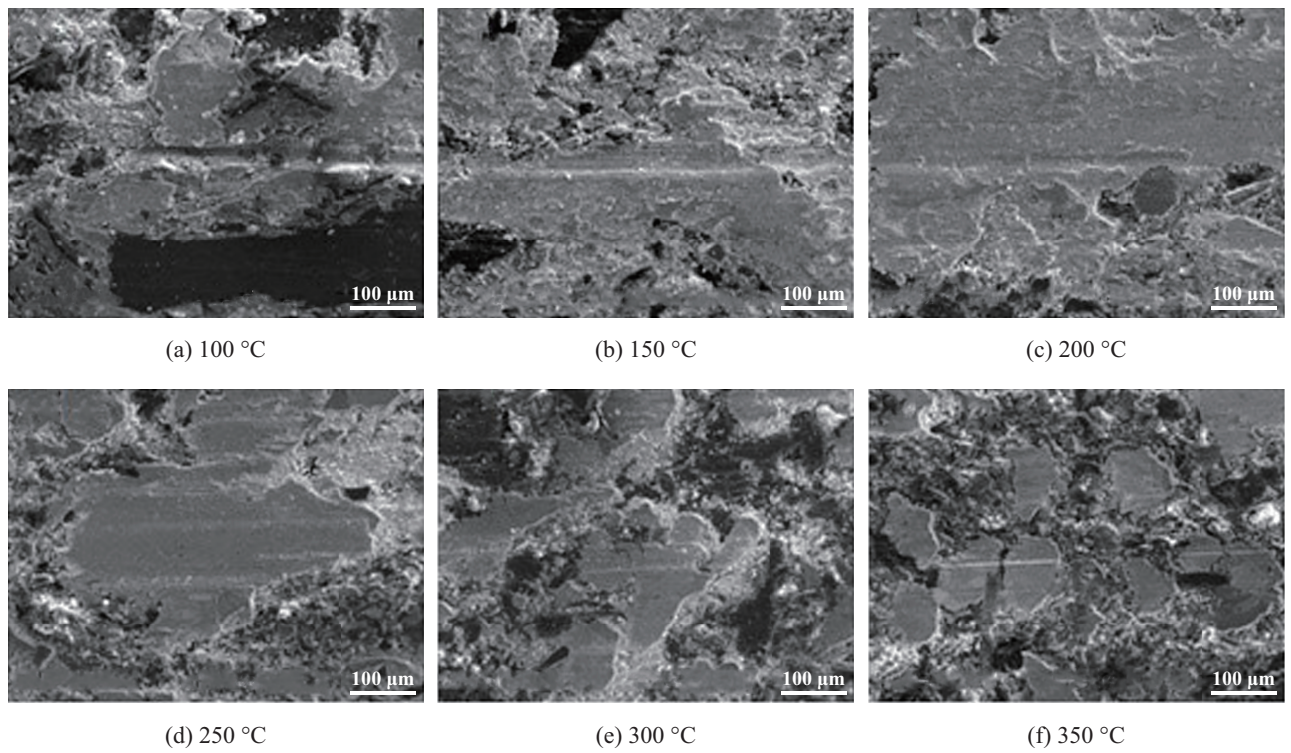


Fig. 5 SEM morphology of the worn pad surface at elevated temperature

图 5 摩擦片表面在不同温度下形貌的SEM照片

参考文献

[1]

Wang Guijin, Liu Wenhui, Sun Kiliang. Analysis of uneven wear of front and rear disc brake discs[J]. Bus & Coach Technology and Research, 2015, 37(4): 53–55 (in Chinese) [汪桂金, 刘文虎, 孙克亮. 客车盘式制动器摩擦片前后磨损不均的分析[J]. 客车技术与研究, 2015, 37(4): 53–55].

[2]

R Thornton, T Slatter, A H Jones. The effects of cryogenic processing on the wear resistance of grey cast iron brake discs[J]. Wear, 2011, 271(9–10): 2386–2395.

[3]

Wang Guanmin, Zhang Yongzhen, Du Sanmin. High speed dry sliding friction and wear characteristics of steel/copper friction pairs in different atmospheres[J]. Tribology, 2007, 27(4): 346–351 (in Chinese) [王观民, 张永振, 杜三明. 不同气氛环境中钢/铜摩擦副的高速干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(4): 346–351].

[4]

Wu Yaoqing. Study on friction and wear mechanism of resin matrix composite friction material and finite element analysis[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013(in Chinese) [吴耀庆. 树脂基复合摩擦材料摩擦磨损机理研究及有限元分析[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.].

[5]

T E J Quinn, J L Sullivan, D M Rowson. Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures[J]. Wear, 1984, 94(2): 175–191.

[6]

Xue Jinjin, Sun Kun, Fang Liang, et al. Study on dry sliding friction and wear behavior of 30CrMnSiNi2A steel[J]. Tribology, 2016, 36(5): 614–621 (in Chinese) [薛进进, 孙琨, 方亮, 等. 30CrMnSiNi2A 钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 614–621].

[7]

H So. The mechanism of oxidational wear[J]. Wear, 1995, 184(2): 161–167.

[8]

Wang Hongxia, Yao Guanxin. Development of multi fiber reinforced friction material for automobile brake[J]. Lubrication and Seal, 2008, 33(10): 88–90 (in Chinese) [王红侠, 姚冠新. 多纤维增强汽车制动器摩擦材料的研制[J]. 润滑与密封, 2008, 33(10): 88–90].

[9]

J Kukutschová, V Roubíček, K Malachová, et al. Wear mechanism in automotive brake materials, wear debris and its potential environmental impact[J]. Wear, 2009, 267(5): 807–817.

[10]

PohWah Lee, Peter Filip. Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials[J]. Wear, 2013, 302(1–2): 1404–1413.

[11]

Yao Guanxin, Xia Yuan, Wei Longqing. Study on friction and wear characteristics of multi fiber reinforced friction material for automobile brake[J]. Lubrication and Seal, 2010, 35(5): 63–66 (in Chinese) [姚冠新, 夏园, 魏龙庆. 多纤维增强汽车制动器摩擦材料的摩擦磨损特性研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(5): 63–66].

[12]

Zhang Yongzhen, Zhu Jun, Liu Weimin, et al. Investigation of topographical characteristics and tribological behavior of compacted graphite iron in sliding against 40Cr steel under different dry sliding conditions[J]. Tribology, 2001, 21(1): 37–41 (in Chinese) [张永振, 朱均, 刘维民, 等. 不同滑动干摩擦条件下钢/铁摩擦副的摩擦磨损性能与表面形貌特征研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(1): 37–41].

[13] Hong U S, Jung S L, Cho K H, et al. Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices[J]. Wear, 2009, 266(7): 739–744.

[14] Liu Zuomin. Friction and wear properties of M50 high speed steel at high temperature[J]. Tribology, 1997, 17(1): 38–44 (in Chinese) [刘佐民. M50高速钢高温摩擦磨损特性的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(1): 38–44].

[15] Zmago Stadler, Kristoffer Krnel, Tomaz Kosma. Friction and wear of sintered metallic brake linings on a C/C-SiC composite brake disc[J]. Wear, 2008, 265(3–4): 278–285.

[16] Rajesh J J, Bijwe J, Tewari U S. Abrasive wear performance of various polyamides[J]. Wear, 2002, 252(9–10): 769–776.

[17] H So. Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds[J]. Tribology International, 1996, 29(5): 415–423.

[18] Hyun-Soo Hong. The role of atmospheres and lubricants in the oxidative wear of metals[J]. Tribology International, 2002, 35(11): 725–729.

[19] Sopok S, Rickard C, Dunn S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part two: modeling and predictions[J]. Wear, 2005, 258(1–4): 659–670.

[20] S C Lim. The unlubricated wear of sintered steels[J]. Tribology International, 1987, 20(3): 144–149.

[21] Wang Yunfei, Song Yanpei, Wang Weichao, et al. Study on high speed friction and wear resistance properties of a new guide pulley material[J]. Material & Heat Treatment, 2009, 38(2): 21–23, 27 (in Chinese) [王云飞, 宋延沛, 王卫超, 等. 一种新型导轮材料高速摩擦磨损性能的研究[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(2): 21–23, 27].

[22] Xing Liying, Jiang Shicai, Zhou Zhenggang. Development of advanced resin matrix composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 1–9 (in Chinese) [邢丽英, 蒋诗才, 周正刚. 先进树脂基复合材料制造技术进展[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 1–9].

[23] Okonkwo P C, Kelly G, Rolfe B F, et al. The effect of sliding speed on the wear of steel-tool steel pairs[J]. Tribology International, 2016, 97(4): 218–227.

[24] Editorial office of China Standard Publishing House. GB 5763–2008 Brake linings for automobiles[S]. China Standard Press, 1991 (in Chinese) [中国标准出版社总编室. GB 5763–2008 汽车用制动器衬片[S]. 中国标准出版社, 1991].