

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.03.025

不同工况参数对酚醛树脂基无石棉闸瓦材料摩擦性能影响^{*}

罗迎^{1,2}, 杨兆建^{1,2}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: 针对 WSM-3 型酚醛树脂基无石棉摩擦材料, 搭建实验装置研究 WSM-3 型闸瓦材料与 16Mn 钢摩擦副摩擦性能。根据实验数据, 研究了瞬态 / 平均摩擦系数随不同接触压力、不同滑动速度及不同接触表面温度的变化规律, 在考察多种曲线的基础上, 分析瞬态 / 平均摩擦系数在不同工况参数下的变化特性, 并探讨了闸瓦材料摩擦性能的变化机制。实验证实, 闸瓦材料的摩擦性能不仅具有强烈的系统依赖性, 而且与系统的工况因素具有强耦合性, 在闸瓦材料摩擦学设计中将瞬态 / 平均摩擦系数视作变量是必要的。

关键词: 摩擦材料; 闸瓦; 瞬态摩擦系数; 平均摩擦系数

中图分类号: TB321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)03-0111-05

Effect of Different Conditions Parameter on Tribological Properties of Non-Asbestos Brake Shoe Material

Luo Ying^{1,2}, Yang Zhaojian^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Coal Mine Fully Mechanized Equipment Key Laboratory of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In allusion to WSM-3 non-asbestos phenolic resin-based friction material, the experiment devices were set up for studying tribological properties of the WSM-3 resin-based non-asbestos brake shoe braking on 16Mn steel. According to collected experiential data of physical test, the change rules of the transient / mean friction coefficient were studied with contact pressure, sliding velocity and contact surface temperature, on the base of drawing the curves, and the changing law of the friction coefficient were explored with the different condition parameters, and the variation mechanism of friction performance of WSM-3 brake shoe material were discussed. The experiment results show that the frictional properties of the materials not only have strong system dependency, but also have strong coupling with the working conditions of the system, it is needed for considering the transient friction coefficient or the average coefficient of friction as a variable in the material tribological design.

Keywords: friction material; brake shoe; transient friction coefficient; mean friction coefficient

制动摩擦副的摩擦材料是制动器安全性、可靠性的保障^[1-2]。WSM-3 型摩擦材料是树脂基无石棉摩擦材料^[3-10], 其制成的闸瓦具有环保无尘无石棉的优点^[11]。表征摩擦性能最重要的参数之一就是瞬态 / 平均摩擦系数^[12-13], 摩擦材料的瞬态 / 平均摩擦系数受诸多因素的影响^[14], 性能表现具有强烈的系统依赖性^[15], 摩擦学行为与工况条件和环境介质具有强耦合性^[16], 摩擦材料制动实验大部分涉及重型装备制动。

以研究 WSM-3 型酚醛树脂基摩擦材料的摩擦学性能及其变化机制为目的, 利用实验装置, 模拟制动过程中的工况参数, 研究在不同接触压力、不同滑动速度、不同接触表面温度条件下 WSM-3 型摩擦材料的摩擦性能, 并探讨其摩擦行为与机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

闸瓦原材料: WSM-3 环保型无石棉酚醛树脂

基闸瓦, 规格为 320 mm × 238 mm × 27 mm, 中实洛阳重型机械有限公司;

对偶摩擦材料: 16Mn 摩擦盘, 咸阳新益摩擦密封设备有限公司。

1.2 实验设备

非金属材料制样机: XD-B 型, 咸阳新益摩擦密封设备有限公司;

摩擦磨损实验装置: X-DMZ 型, 咸阳新益摩擦密封设备有限公司。

1.3 环保型无石棉酚醛树脂基闸瓦物理力学性能

WSM-3 型摩擦材料是一种采用树脂为基体并用混杂纤维代替石棉的摩擦材料, 特点是平均摩擦系数高, 强度好, 热衰退小, 不含钢棉及高

^{*} 山西省科技重大专项项目 (20111101040)

联系人: 杨兆建, 教授, 博导, 主要从事材料摩擦学设计工作

收稿日期: 2016-12-17

硬度摩擦剂,硬度低,不易损伤闸盘,不含石棉,绿色环保,磨耗低,使用周期长,具有广泛的使用前景,由WSM-3闸瓦材料加工的试样尺寸为25 mm×25 mm×25 mm,边长及厚度误差控制在0~0.2 mm。

表1 WSM-3型材料基本物理、力学性能参数

压缩强度 / MPa	拉伸强度 / MPa	剪切强度 / MPa	冲击强度 / (kJ·m ⁻²)	邵氏硬度 (D)	密度 / (g·cm ⁻³)
48.8	12.64	26.65	6.9	80±5	1.97

1.4 实验数据处理方法

实验过程中,正压力由空气压缩机通过气缸加载于两个闸瓦试样上,试验机测力系统实时记录不同接触压力、不同滑动速度、不同接触面温度条件下的闸瓦与摩擦盘之间的摩擦力,然后由计算机系统按照式(1)自动计算出平均摩擦系数 μ 并实时显示。

$$\mu = \frac{F}{PA} \quad (1)$$

式中: F ——闸瓦与摩擦盘间的平均摩擦力, N;

P ——试样上的接触压力, MPa;

A ——闸瓦试样摩擦面的面积, mm²。

1.5 实验步骤

(1) 在接触压力为0.98 MPa,滑动速度7.5 m/s,接触面温度100℃条件下,考察在摩擦力与驱动力获得平衡的单次制动过程中瞬态摩擦系数随时间的变化规律;

(2) 在接触压力为0.98 MPa,滑动速度7.5 m/s条件下,考察在摩擦力与驱动力获得平衡的单次制动过程中瞬态摩擦系数随温度升高的变化规律;

(3) 在接触压力0.98 MPa,接触面温度100℃时,考察在摩擦力与驱动力获得平衡的单次制动过程中瞬态摩擦系数随速度增大的变化规律;

(4) 在滑动速度7.5 m/s条件下,接触压力变化范围设定为0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 MPa,考察无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料的平均摩擦系数随接触压力的变化规律;

(5) 在滑动速度7.5 m/s条件下,接触面温度变化范围分别设定为100,150,200,250,300,350℃时,考察无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料的平均摩擦系数随接触压力的变化规律;

(6) 在接触压力0.98 MPa条件下,滑动速度变化范围设定为2.5,5,7.5,10,12.5,15,17.5,20 m/s,考察无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料平均摩擦系数随滑动速度的变化规律。

(7) 在接触压力0.98 MPa条件下,接触面温度

变化范围设定为100,150,200,250,300,350℃,考察无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料平均摩擦系数随滑动速度的变化规律。

2 结果与讨论

2.1 瞬态摩擦系数随工况参数的变化

图1是接触压力为0.98 MPa,滑动速度为7.5 m/s,接触面温度为100℃条件下WSM-S材料的瞬态摩擦系数随制动时间的变化规律。此时闸瓦材料的吸水率不大于2%,吸油率为0%。实验方式是摩擦力与驱动力相等的单次制动过程。

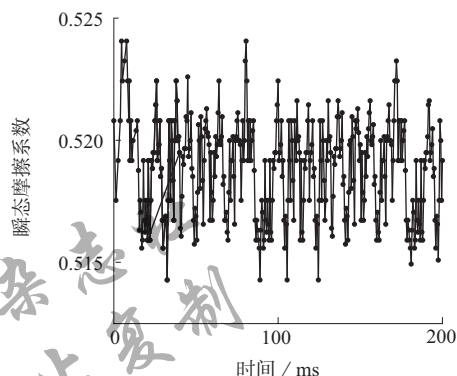


图1 WSM-3材料瞬态摩擦系数随时间的变化曲线

由图1可知,制动初期WSM-3材料的瞬态摩擦系数的峰值较大,瞬态摩擦系数的平均值也较大,当时间为8~12 ms之后,瞬态摩擦系数逐渐减小,变化的幅度也有所减小,当时间为100 ms后瞬态摩擦系数逐渐趋于稳定,瞬态摩擦系数在0.519上下浮动,曲线表现出一定的周期性特征。出现上述变化主要有两个原因,其一闸瓦的黏弹性材料特性与对偶件摩擦时的表面作用机制的影响,即黏弹性材料在受力后的变形过程是一个随时间变化的过程,卸载后的恢复过程是一个延迟过程,使得材料或结构在受力过程中发生蠕变或应力松弛,闸瓦材料的黏弹性导致了制动初期的瞬态摩擦系数在总体上大于制动后期,同时闸瓦的弹塑变形的回复性和滞后性也是导致制动初期的瞬态摩擦系数的变化幅度小于制动后期的原因;其二闸瓦材料试样的表面在磨削加工时因制样机的振动及力学应变造成试样表面波纹度发生周期性变化,这种周期性变化导致瞬态摩擦系数随时间的变化表现出周期性特征。

图2是接触压力为0.98 MPa、滑动速度7.5 m/s,温度从100℃增加到350℃,WSM-S材料瞬态摩擦系数随接触表面温度的变化曲线。实验方式为摩擦力与驱动力相等的单次制动过程。

由图2可知,当滑动速度与接触压力不变的

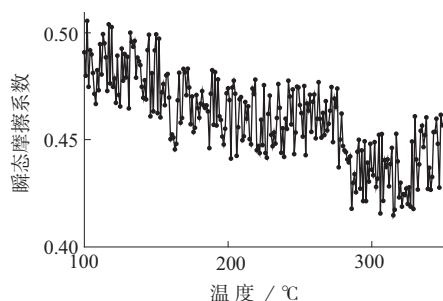


图2 WSM-3 材料瞬态摩擦系数随接触表面温度的变化曲线

情况下,WSM-3 材料瞬态摩擦系数随接触表面温度的上升而减小,曲线明显分3个阶段,在160℃之前,瞬态摩擦系数较大,变化幅度较小;在160~260℃之间,这一阶段的瞬态摩擦系数的中值明显小于160℃之前阶段,且变化幅度也有所减小;在260~280℃之间,材料瞬态摩擦系数的平均值大幅度下降,且变化幅度大于160~260℃;在280~350℃,材料瞬态摩擦系数数较260~280℃增大,但变化幅度小于260~280℃。出现与图1不同的性能曲线有3个原因,其一相对滑动速度的提高,破坏了闸瓦材料的热平衡,发热量大于散热量导致接触面温度升高,较高的表面温度导致闸瓦粘合剂组分之一酚醛树脂在180~220℃分解,导致增强填料、性能调节剂等组分失去原有性能,闸瓦材料的制动效果变差;其二闸瓦材料吸水率影响摩擦过程的变化,在制动中期间瓦表层的水分析出导致水膜短时间存在,客观上起到润滑作用,降低了瞬态摩擦系数;其三闸瓦材料中起增强瞬态摩擦系数稳定性、降低制动噪声的石墨成分的析出也降低了瞬态摩擦系数。

图3是接触压力0.98 MPa,接触表面温度100℃条件下,材料瞬态摩擦系数随滑动速度变化的曲线。瞬态摩擦系数总体上随滑动速度的增加呈减小趋势;在滑动速度为2.5~6 m/s阶段,瞬态摩擦系数的中值较为恒定,且变化幅度也较小;在6~16 m/s瞬态摩擦系数中值减小,变化幅度较2.5~6 m/s阶段有所增大;在17.5~18.5 m/s瞬态摩擦系数出现突变现象,数值大幅度减小,原因是随着滑动速度的增加,发热量远大于散热量,接触面附近的树脂粘结特性退化导致瞬态摩擦系数的大幅度下降;在速度大于18.5 m/s时,瞬态摩擦系数趋于恒定,且变化幅度很小,系统又进入稳定的摩擦状态。

2.2 平均摩擦系数随工况参数的变化

图4是滑动速度为7.5 m/s条件下,接触压力变化范围分别设定为0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 MPa时,无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料的平均摩擦系数随接触面温度的变化曲线。

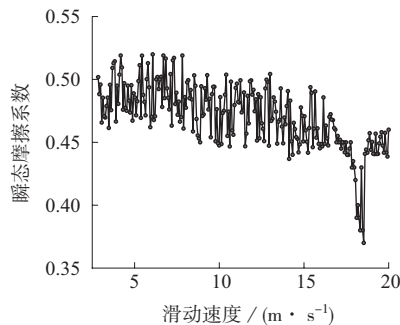


图3 WSM-3 材料瞬态摩擦系数随滑动速度的变化曲线

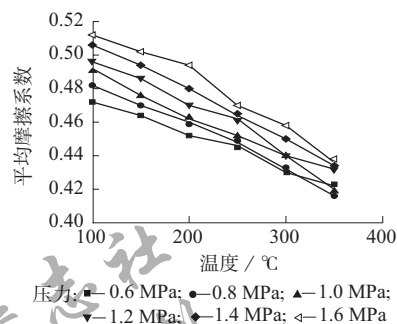


图4 滑动速度一定,接触压力不同时,WSM-3 材料平均摩擦系数随接触表面温度变化曲线

由图4可知,滑动速度为7.5 m/s时,不同接触压力下的平均摩擦系数随接触表面温度的上升均下降,其中1.4 MPa时的平均摩擦系数曲线线性度最好;从区间性上分析,温度为100~350℃时,在0.6~1.0 MPa区间内,较高的接触压力导致平均摩擦系数大幅度降低。

图5是在滑动速度为7.5 m/s条件下,接触面温度变化范围分别设定为100,150,200,250,300,350℃,无驱动力时多次重复制动过程中闸瓦材料的平均摩擦系数随接触压力的变化曲线。

由图5可知,滑动速度为7.5 m/s时,不同接触面温度下WSM-3材料的平均摩擦系数随接触压力的上升总体变化趋势一致,均随着接触压力的上升而增大;其中接触面温度为100,150,200℃的WSM-3材料平均摩擦系数曲线的形状相近,当接触面温度为250℃时,接触压力小于1.3 MPa时,WSM-3材料的平均摩擦系数增加较快,随着接触压力的增加,WSM-3材料的平均摩擦系数增加缓慢。当接触面温度为300℃时,当接触压力小于1.0 MPa时,WSM-3材料的平均摩擦系数增加较快,当接触压力为1.3 MPa时,平均摩擦系数略有降低,随后再增加。当接触面温度为350℃时,接触压力小于1.0 MPa时,WSM-3材料的平均摩擦系数略有降低,当接触压力大于1.0 MPa后,WSM-3材料平均摩擦系数的增幅较大。

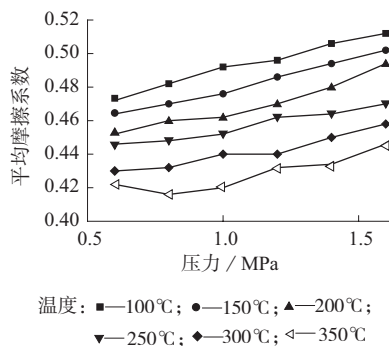


图5 滑动速度一定、接触表面温度不同时，WSM-3材料平均摩擦系数随接触压力变化曲线

综合分析图4、图5的摩擦过程，当滑动速度保持恒定，接触表面温度误差控制在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围之内：

(1) 由图4可见，滑动速度一定接触压力不同时，较高接触压力的平均摩擦系数曲线在较低接触压力时的平均摩擦系数曲线的上方，即当接触压力较大时WSM-3材料的平均摩擦系数较大。总之，随接触面温度的增加，无论是接触压力是多少，WSM-3材料的平均摩擦系数总体是下降的。

(2) 由图5可见，在滑动速度保持恒定，观察在不同接触面温度条件下的平均摩擦系数随接触压力的变化曲线：从增幅看，在200、350 $^\circ\text{C}$ 接触面温度时WSM-3材料的平均摩擦系数随接触压力的增幅最大，100、150、300 $^\circ\text{C}$ 次之，350 $^\circ\text{C}$ 最低；从总体变化趋势看，在不同接触面温度条件下WSM-3材料的平均摩擦系数随接触压力的变化曲线近似成直线上升趋势，特别是温度较低时的100、150 $^\circ\text{C}$ 曲线，曲线形状接近直线，线性特征表现得更为明显。

(3) 设闸瓦与制动盘间的实际接触面积为 A_0 ，闸瓦表面单位面积上的剪切应力为 τ ，则 μ 可由(2)式描述。

$$\mu = \frac{A_0 \tau}{PA} \quad (2)$$

式中： A_0 ——闸瓦的实际接触面积， mm^2 ；

τ ——闸瓦材料的剪切应力， N/mm 。

根据公式(2)可知，如果接触压力的增加率导致更大的实际接触面积增长率，则平均摩擦系数就会增大，相反，若实际接触面积增加的比率小于接触压力的增加比率，则平均摩擦系数反而会减小。原因是接触压力较低时，闸瓦表面尚有较多的微凸体存在，随接触压力的增大，摩擦过程中实际接触的微凸体数量增多，实际接触面积增大，在此过程，由于接触压力较小，实际接触面积的增加比率大于接触压力的增加比率，因此平均摩擦系数呈上升的趋势。

图6是在接触压力0.98 MPa条件下，滑动速

度变化范围设定为2.5、5、7.5、10、12.5、15、17.5、20 m/s，无驱动力时多次重复制动过程中WSM-3材料平均摩擦系数随接触面温度的变化曲线。

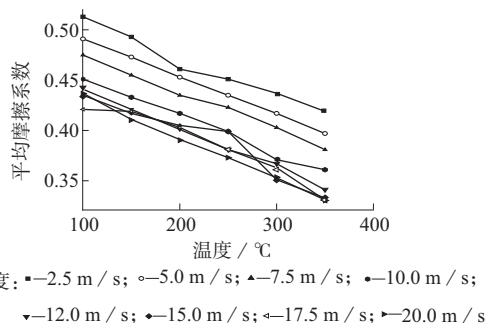


图6 接触压力一定、不同的滑动速度时，WSM-3材料平均摩擦系数随接触表面温度的变化曲线

由图6可知，接触压力0.98 MPa时，不同滑动速度下的平均摩擦系数随接触面温度上升的总体变化趋势较为一致，都是随着接触面温度的上升而减小；其中2.5、5、7.5、10.0、12.5、20 m/s的平均摩擦系数曲线特性相近，基本上是呈线性下降的，而当滑动速率为15.5 m/s时，当接触面温度从200~250 $^\circ\text{C}$ 变化时，WSM材料的平均摩擦系数的基本不变，当接触面温度从250~350 $^\circ\text{C}$ 变化时，WSM材料的平均摩擦系数呈直线下降。当滑动速率为17.5 m/s时，当接触面温度从100 $^\circ\text{C}$ 增至150 $^\circ\text{C}$ 时，WSM材料的平均摩擦系数的基本不变，当接触面温度从150 $^\circ\text{C}$ 增至350 $^\circ\text{C}$ 时，WSM材料的平均摩擦系数基本呈直线下降趋势。

图7是WSM-3材料在接触压力0.98 MPa条件下，接触面温度变化为100、150、200、250、300、350 $^\circ\text{C}$ ，无驱动力时多次重复制动过程中WSM-3材料平均摩擦系数随接触面滑动速度的变化曲线。

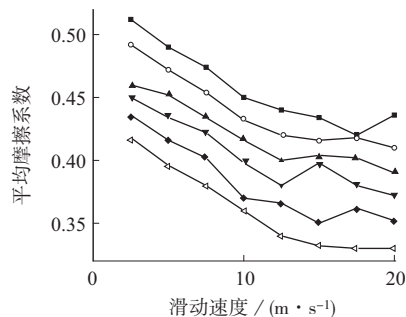


图7 接触压力一定、接触表面温度不同时，材料平均摩擦系数随接触面滑动速度的变化曲线

综合分析图6、图7，当接触压力为0.98 MPa，接触面温度误差在 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围之内时，可得结论。

(1) 闸瓦材料的平均摩擦系数随滑动速度的增

加而减少,且降幅较大,例如,当摩擦面温度设定在150℃时,当相对速度从2.5 m/s增至20 m/s时,平均摩擦系数从0.492减少到0.410,降幅16.67%。由此可以判断出,对于WSM-3型闸瓦材料而言,滑动速度的增长对平均摩擦系数的影响程度大于接触压力对平均摩擦系数的影响。

(2)在所考察的滑动速度范围(2.5~20 m/s)内,在每个接触表面温度曲线上,每条平均摩擦系数曲线受相对速度的变化影响显著,最大降幅21.05%发生在控制温度350℃时的平均摩擦系数的变化曲线上,最小降幅13.04%发生在接触表面温度200℃时的平均摩擦系数的变化曲线上;

(3)在滑动速度小于12.5 m/s时,各平均摩擦系数随滑动速度的变化曲线的降幅变化趋势较为一致,且这一阶段每条平均摩擦系数曲线的降幅的数值也较大,各条曲线近似平行;而滑动速度大于12.5 m/s时,从图形上表现为这一阶段每条平均摩擦系数曲线趋于平缓,降幅减小。

3 结论

(1)平均摩擦系数都具有过程依赖性。

(2)当WSM-3型闸瓦材料与16Mn组成的摩擦副接触表面温度保持恒定时,闸瓦材料平均摩擦系数随接触压力的增加而增加,随滑动速度的增加而减少,而且滑动速度对闸瓦材料的平均摩擦系数的影响程度较接触压力大得多。

(3)实验证实了在材料摩擦学设计中,将平均摩擦系数视作变量是必要的,原因在于摩擦过程中接触面温度、滑动速度、接触压力的变化导致平均摩擦系数数值的非线性变化。

参考文献

- [1] 甘贵江,姚冠新,王玉玲. 钼酸铵/丁腈橡胶改性酚醛树脂对摩擦材料性能的影响[J]. 工程塑料应用,2016,44(7):98-103.
Gan Guijiang, Yao Guanxin, Wang Yuling. Effects of ammonium molybdate / nitrile rubber modified phenolic resin on the properties of friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):98-103.
- [2] 朱真才,史志远,陈国安. 提升机盘形制动器无石棉闸瓦的摩擦性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):462-465.
Zhu Zhencai, Shi Zhiyuan, Chen Guoan. Friction properties of asbestos-free brake discs with disc brake in hoist[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(3):462-465.
- [3] 张扬,张力,孟春玲. 摩擦材料用改性酚醛树脂的研究进展[J]. 工程塑料应用,2007,35(4):75-77.
Zhang Yang, Zhang Li, Meng Chunling. Research progress of modified phenolic resin for friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2007, 35(4):75-77.
- [4] 魏儒东,杜永平,裴顶峰. 粘合剂体系对高摩合成闸瓦摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封,2008,33(11):63-65.
Wei Rudong, Du Yongping, Pei Dingfeng. Effect of adhesive system on friction and wear properties of synthetic brake pad[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(11):63-65.
- [5] Efe Isik Cieközes. Determination of the mechanical properties of friction welded tube yoke and tube joint[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2016(1):1-8.
- [6] 裴顶峰,张国文,党佳,等. 海泡石纤维在新型高摩擦因数合成闸瓦中的应用[J]. 非金属矿,2011,34(5):79-81.
Pei Dingfeng, Zhang Guowen, Dang Jia, et al. Application of sepiolite fiber in the synthesis of new high friction factor brake shoe[J]. Nonmetallic Minerals, 2011, 34(5):79-81.
- [7] 刘建华,贾涛芳,刘华武. BF/黑宝石粉体增强EP基摩擦材料的摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用,2016,44(3):35-39.
Liu Jianhua, Jia Taofang, Liu Huawu. Friction and wear properties of BF / black powder reinforced EP-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3):35-39.
- [8] Osterle W, Prietzel C, Klob H, et al. On the role of copper in brake friction materials[J]. Tribology International, 2010, 43:2317.
- [9] Gomes J R, Silva O M, Silva C M. The effect of sliding speed and temperature on the tribological behavior of carbon-carbon composites[J]. Wear, 2001, 249:240.
- [10] Shorowordi K M, Haseeb M A, Celis J P. Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad[J]. Wear, 2004, 256:1176.
- [11] Cuesta A, Dhamelincourt P, Laureyns J, et al. Tascan, Raman microprobe studies on carbon materials[J]. Carbon, 1994, 32:1523.
- [12] 余大刚,林有希,高诚辉. 酚醛树脂基摩擦材料高温摩擦性能的研究进展[J]. 工程塑料应用,2009,37(5):82-84.
Yu Dagang, Lin Youxi, Gao Chenghui. Progress in high temperature friction properties of phenolic resin based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(5):82-84.
- [13] 肖鹏,熊翔,任芸芸. 制动速度对C/C-SiC复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报,2006,26(1):12-17.
Xiao Peng, Xiong Xiang, Ren Yunyun. Effects of braking speed on friction and wear properties of C / C-SiC composites[J]. Tribology, 2006, 26(1):12-17.
- [14] Osterle W, Dörfel I, Prietzel C, et al. A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test[J]. Wear, 2009, 267:781-788.
- [15] 陈霞,梅启林,张景洁,等. 长石粉对酚醛树脂基摩擦材料性能的影响[J]. 工程塑料应用,2016,44(2):13-17.
Chen Xia, Mei Qilin, Zhang Jingjie, et al. Effect of feldspar on the properties of phenolic resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(2):13-17.
- [16] 裴顶峰,张国文,党佳,等. 我国高摩擦系数合成闸瓦的性能研究[J]. 工程塑料应用,2011,39(8):48-51.
Pei Dingfeng, Zhang Guowen, Dang Jia, et al. Study on performance of composite brake shoe with high friction coefficient in China[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(8):48-51.