复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第27卷 第1期 2月 2010年
Vol. 27 No. 1 February 2010

文章编号：1000-3851(2010)01-0079-07

铜基复合材料干湿条件下的摩擦学行为

符 蓉，高 飞*，牟 超，宋宝韫，韩晓明
（大连交通大学 材料科学与工程学院，大连 116028）

摘 要： 采用粉末冶金技术制备铜基复合材料，在制动压力0.5～1.2 MPa范围内，通过定速摩擦试验机研究了干、湿条件下，速度、压力与材料摩擦磨损性能的关系，结果表明：影响摩擦磨损性能的重要因素在于载荷性质和第三体状态。在干摩擦条件下，处于低摩擦速度范围时，摩擦力的静载荷性质使第三体呈疏松状态，这增加了微凸体间的啮合程度而使摩擦系数处于较高值。随第三体致密性增加，其润滑作用增强，微凸体间的机械啮合程度减弱，使材料的摩擦系数和磨损量降低。在高速摩擦时，微凸体间的冲击作用使处于摩擦表层的硬质颗粒容易发生粉碎性破损而弥散分布，这强化了表面强度而使摩擦系数有所增加。摩擦压力对高速摩擦性能影响明显，原因在于高负荷加剧了摩擦面的变形和损伤程度。湿摩擦条件下，水膜的润滑和流动具有降低摩擦系数和增加磨损率的作用主要体现在低速低压条件下。在高摩擦速度和高压力条件下，水分的高温蒸发与离心作用明显，破坏了水膜的存在条件，从而使材料的摩擦磨损性能与干摩擦状态相近。

关键词： 铜基复合材料；第三体；摩擦；磨损
中图分类号： TF125 **文献标志码：** A

Tribological performance of copper matrix composites under dry and wet conditions

FU Rong, GAO Fei*, MU Chao, SONG Baoyun, HAN Xiaoming
(College of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Copper matrix composites were prepared through powder metallurgic technique. The relationships between speed and pressure of friction and the friction and wear properties of the materials were studied on a pin-on-disk tester in the pressure range of 0.5～1.2 MPa under dry and wet conditions. The results demonstrate that the major factors affecting the performance are the nature of loading and the state of third bodies. For dry friction, when the speed is low, the friction force is close to static. Such loading allows the third bodies to stay in a porous state, increases the level of engagement of asperity, and results in a higher friction coefficient. As the third bodies compact, they provide more lubricating effect, which attenuates the mechanical clenching of asperity, and lowers the friction coefficient as well as wear of the materials. At high speed, hard particulates on the friction surfaces are more likely to be smashed due to impacts among the micro-rises. The broken hard particulates disperse and harden the friction surfaces, causing an increase in the friction coefficient. The friction pressure affects the high speed friction properties significantly because the heavy loading intensifies the deformation and damage of the friction surfaces. Under wet conditions, the effects of flow and lubrication of the water film in lowering the friction coefficient and reducing the wear rate are apparent only at low speed and low pressure. At high speed and high pressure, evaporation at elevated temperature and centrifugal action break the water film and consequently the friction and wear properties of the friction materials are similar to those of dry friction.

Keywords: copper matrix composites; third body; friction; wear

随着列车速度的增加，对列车的制动性能提出了越来越高的要求，高品质的制动性能一方面要求摩擦副材料适用于高速高温的工作环境，另一方面要求材料在各种条件下表现出相对稳定的摩擦系数。在多种金属基摩擦材料中，铜基陶瓷强化材料由于使用温度高、摩擦系数稳定、磨损率小而成为

收稿日期： 2009-06-18；**收修改稿日期：** 2009-09-28
基金项目： 国家863计划项目(2006AA03Z515)；辽宁省计划项目(2007402039)
通讯作者： 高 飞，教授，从事制动材料摩擦磨损性能的研究 E-mail：gaofei@djtu.edu.cn

高速列车普遍采用的闸片材料。因此，认识和掌握铜基陶瓷强化材料的摩擦磨损性能越来越受到重视[1-2]，诸如关注材料的成分对摩擦磨损性能的影响[3-6]、摩擦速度和压力与摩擦磨损性能的关系等[7-8]，这些工作为认识材料的摩擦学行为奠定了良好的基础。然而，从列车制动情况看，制动过程存在着压力波动、速度变化、温度变化、雨雪环境等系列问题[8-9]。从材料摩擦学行为看，摩擦性能不是材料的固有属性，摩擦磨损性能很大程度上依赖于摩擦条件，当上述条件变化时，势必影响到材料的摩擦学行为而造成摩擦系数的变化，从而影响列车制动的安全性和舒适性。显然，从列车制动的环境条件研究材料的摩擦学行为的工作是有意义的。制动条件下的摩擦特性属于存在较大程度磨损的非润滑条件的摩擦，摩擦面上存在一层被称为第三体的特定组织[10]，这层组织实际上是由摩擦面损伤产生的磨屑构成的，它覆盖在摩擦面上，形成一层厚度为几个微米到几十微米的粉末层，这层组织的形态、运动特征与摩擦条件密切相关，因此，它成为影响摩擦学行为的一个重要因素[11-15]。当诸如压力、速度、水气等条件变化时，都会改变摩擦面的组织形态而引起摩擦学行为的变化，同时，其变化规律很大程度上与材料的成分有关。然而，人们目前对这方面的认识仍是有限的。因此，研究上述因素与摩擦学行为的关系成为制备高性能摩擦材料的基础性工作。

本文中针对铜基陶瓷强化复合材料，利用定速摩擦试验机研究摩擦压力、速度、干湿条件等对摩擦磨损性能的影响，并考虑了摩擦条件与摩擦第三体的关系。

1　试验材料及方法

试验材料由电解铜粉 50 wt%、雾化铁粉 20 wt%、石墨 10 wt%、SiO_2 11 wt%、其它粉末材料 9 wt%构成。

材料混合后，在 400～600 MPa 的压力下压制成型，经烧结炉加压烧结，烧结压力为 2～3 MPa，烧结温度为 850～900℃，保温 1 h，采用氢气保护，制成试样尺寸为 Φ18 mm×15 mm。

摩擦磨损实验在 GF150D 型定速摩擦机上进行，摩擦压力为 0.5～1.2 MPa，摩擦盘材料为 4Cr5MoV1Si 钢，摩擦半径为 150 mm，转动速度为 200～3000 r/min(线速度为 3.14～47.1 m/s)，摩擦时间为 30～60 s。磨损量的测定通过在精度为万分之一的电子天平上称量磨损前后的质量损失获得。采用 OLYMPUS 型数码成像显微镜和 JSM－6360LV 型扫描电子显微镜进行材料表面形貌的观察。

采用干摩擦和湿摩擦 2 种摩擦方式，湿摩擦根据国际铁路联盟标准(UIC)换算的水量为 5.3 mL/min，通过转子流量计控制水量。

2　结果与讨论

2.1　干摩擦条件下的摩擦特点

图 1 为干摩擦方式下，摩擦压力和摩擦速度对摩擦系数的影响。由图 1 可见，随摩擦速度的增加，摩擦系数呈现出 2 个阶段的变化特点。在摩擦转速低于 1500 r/min 时，摩擦速度增加，摩擦系数降低；在摩擦速度高于 1500 r/min 的情况下，摩擦速度增加，摩擦系数不再降低。

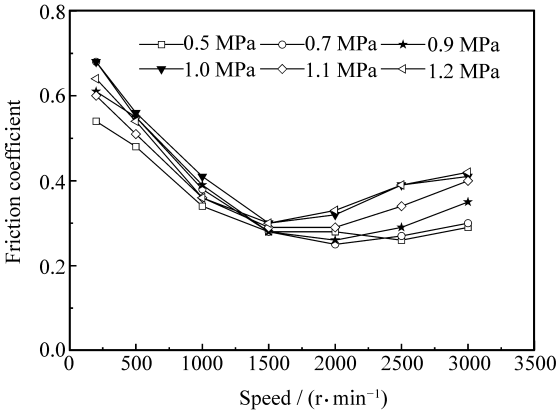
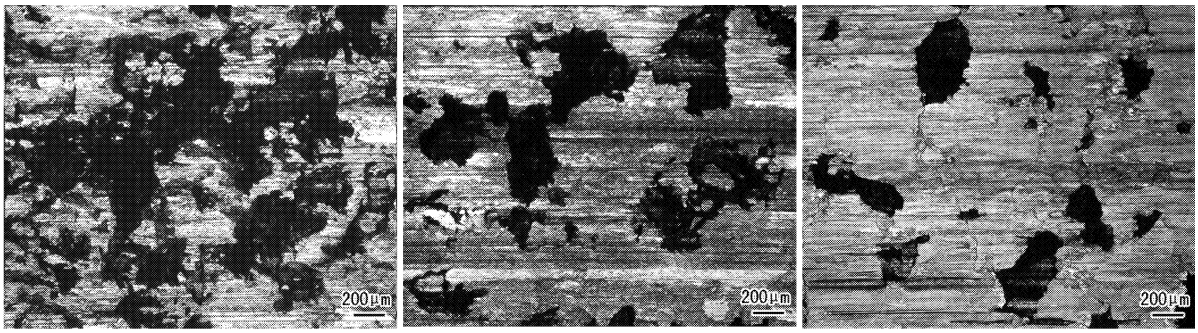


图 1　摩擦系数与速度、压力的关系(干摩擦)

Fig. 1　Relationship of speed, pressure and friction coefficient(dry friction)

从摩擦压力对摩擦系数的影响情况看，随摩擦压力的增加，摩擦系数没有降低，在摩擦速度大于 2000 r/min 的情况下，摩擦系数表现出增加的趋势。这表明，所研制的材料具有良好的高温强度，在高速高压条件下仍表现出稳定的摩擦磨损性能。

图 2 为随摩擦速度增加，表面形貌的变化情况。由图 2 可见，摩擦表面特征为在颜色较浅的组织上分布着黑色的斑点，浅颜色部分为磨屑被反复摩擦挤压形成的致密第三体[2]，黑色斑点为致密第三体与基体脱离而形成的凹坑。从这两部分的分布情况看，随摩擦速度提高，黑色斑点的数量和面积减少，浅颜色的组织增加。这说明，摩擦速度的提



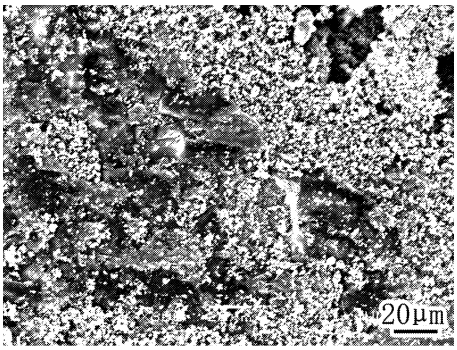
(a) 500 r·min^{-1}　(b) 1000 r·min^{-1}　(c) 3000 r·min^{-1}

图 2　不同摩擦速度下的表面形貌(0.5 MPa)

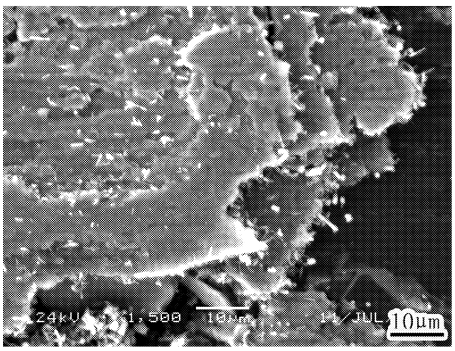
Fig. 2　Morphologies of third bodies on material surface under different friction speeds(0.5 MPa)

高，有利于致密第三体的形成，同时对表面的覆盖程度增加。

图 3 为摩擦速度分别为 200 r/min 和 2000 r/min 速度时扫描电镜下观察到的第三体微观形貌。由图 3可见，低摩擦速度条件下，形成的第三体致密程度有限，仍一定程度保留颗粒化的组织形态(图 3(a))；而在高摩擦速度条件下，第三体呈完全致密化形态，在反复的摩擦剪切作用下，第三体表现出一定程度的层状结构(图 3(b))。



(a) 200 r·min^{-1}



(b) 2000 r·min^{-1}

图 3　扫描电镜下观察到的 2 种摩擦速度下的表面形貌

Fig. 3　Morphologies of third bodies on surface under different friction speeds(SEM)

由图 2 和图 3 表面组织状态随摩擦速度变化而表现出的形态变化不难理解，在低速摩擦条件下，由于速度低、摩擦温升小，磨损形成的微粒在摩擦面上的挤压和粘着程度低，因此，形成的第三体组织致密程度低，对表面的覆盖程度低，表面粗糙度大，使摩擦面上微凸体间的啮合作用强，因此表现出较高的摩擦系数(图 1)。随摩擦速度提高，摩擦载荷的冲击作用增强，磨损微粒在表面流动的不均匀性增加，迫使磨损微粒容易挤压粘着在一起，形成致密程度高的第三体组织。致密第三体的连续性好，对表面的覆盖程度随速度的增加而增加(图 2)，由于这层具有一定密度的第三体组织对表面的良好覆盖，降低了表面的粗糙度，使真实接触面积增加，表面摩擦力分布的均匀性增加。同时，一定程度的摩擦温升增加了第三体的流动性，起到了一定的润滑作用，这些都有利于降低表面摩擦副间的作用力，从而使摩擦系数随摩擦速度的提高而降低(图 1)。当摩擦速度进一步增加(摩擦速度大于 2000 r/min)，摩擦力的冲击作用进一步增强，表层硬质颗粒(SiO_2)受冲击载荷作用而发生粉碎性破碎，破碎的硬质颗粒嵌入到基体中，形成弥散分布状态(图 4)，起到增加表面硬质颗粒含量的作用，从而有助于提高摩擦系数[2]。另一方面，在摩擦速度高于 2000 r/min 情况下，进一步提高摩擦速度，摩擦温升加剧，更高的温度进一步降低了基体金属的强度，低强度的金属基体对硬质颗粒的支撑作用降低，从而使摩擦力的作用深度增加而使摩擦变形体积增加，结果表现出在高速时摩擦系数略有增加(图 1)。

图 5 为摩擦速度为 3000 r/min 条件下，随摩擦压力增加，摩擦表面第三体形态变化情况。由图 5

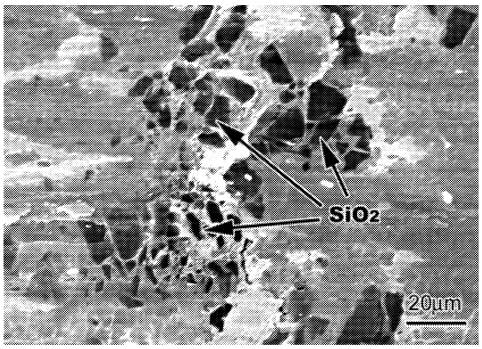


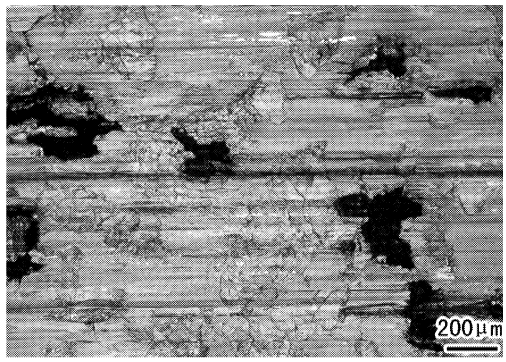
图 4　高速摩擦造成 SiO_2 颗粒的粉碎(3000 r·min^{-1})

Fig. 4　Broken SiO_2 particulates caused by high speed friction(3000 r·min^{-1})

可见，随压力增加，致密第三体剥落坑的面积和数量变化不明显，基本保持对表面的良好覆盖程度。可见，摩擦压力的增加，对致密第三体在表面覆盖程度的影响是有限的。致密第三体对表面的良好覆盖起到了保护基体组织的作用，这可能是摩擦系数没有随压力增加而降低的原因之一。一般认为，材料的摩擦系数随制动压力的增加而降低，这被归因于制动压力增加，表面摩擦功率增加，表面温度升高，造成基体材料软化而使摩擦系数具有降低的趋势[7-8]。所研究的材料没有表现出相同的现象可认为是材料中的硬质粒子(SiO_2)对材料的强化作用及形成的第三体对表面的保护作用[2, 7]。

图 6 为随摩擦速度和摩擦压力的变化，磨损率的变化情况。由图 6 可见，随摩擦速度增加，磨损率表现出增加的趋势。压力的变化对磨损率的影响与摩擦速度有关，在摩擦速度低于 1000 r/min 的情况下，压力变化对磨损率的影响不明显，在更高的摩擦速度情况下，磨损率与摩擦压力密切相关，压力对磨损率的影响程度随摩擦速度的增加而加剧。

图 2～图 5 给出了不同摩擦速度和摩擦压力情况下表面摩擦组织的变化情况。可见，表面组织状态与摩擦条件密切相关，这必然影响磨损率的变化。在干摩擦条件下，影响磨损率变化的因素主要体现在 4 个方面：(1) 摩擦速度，摩擦速度高使第三体的移动速度快，造成第三体容易脱离摩擦面而表现出高的磨损率；(2) 摩擦力的性质，具有较强冲击载荷性质的作用力，容易使材料表面的硬质颗粒发生粉碎性破坏而表现出大的磨损率(图 4)；(3) 摩擦温度，高摩擦速度形成的表面温升显著降低基体金属的强度，加剧了表面变形程度而使磨损率增加；(4) 所形成的摩擦第三体的性质，当形成的第三体组织与基体的粘着性好、覆盖程度大时，则起到对基体的保护作用，从而使磨损率降低，反之，则加剧磨损。



(a) 0.5 MPa

(b) 0.7 MPa

(c) 1.2 MPa

图 5　不同制动压力下材料表面第三体形貌(3000 r·min^{-1}，干摩擦)

Fig. 5　Morphologies of third bodies on material surface under different brake pressures(3000 r·min^{-1}, dry friction)

由上述分析容易理解，在低摩擦速度条件下，摩擦面上的磨损颗粒移动速度低，降低了磨损颗粒脱离摩擦表面的几率。摩擦对偶间的作用力近似静载荷性质，对表面组织的冲击损伤程度小，这都有利于使磨损率处于较低值。摩擦压力(压力在0.5～1.2 MPa 范围内)增加，提高了表面法向载荷，这增加了对磨损粒子的破碎和细化程度，但对第三体的

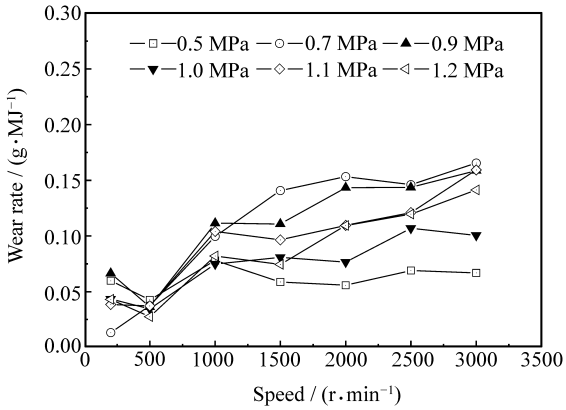


图 6　磨损率与速度、压力的关系(干摩擦)

Fig. 6　Relationship of speed, pressure and wear rate(dry friction)

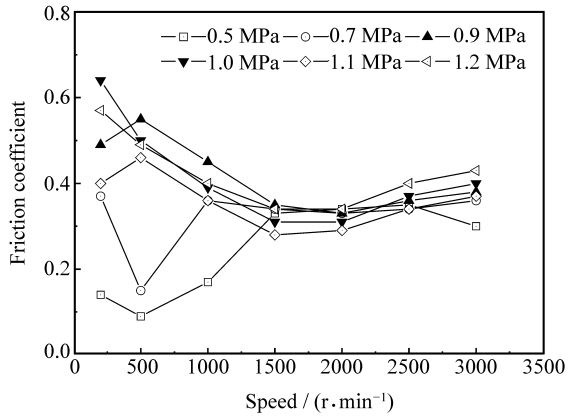


图 7　摩擦系数与速度、压力的关系(湿摩擦)

Fig. 7　Relationship of speed, pressure and wear rate(wet friction)

切向移动程度影响不大，因此，对磨损率的影响不明显。

在高摩擦速度条件下，摩擦压力改变，对上述 4 种因素的影响程度不同，从而表现出磨损率有所变化。在摩擦压力为 0.5 MPa 时，摩擦负荷对材料的损伤程度有限，因此，随摩擦速度的增加，磨损率变化不明显；当摩擦压力处于 0.7～0.9 MPa 范围内时，磨损率处于较高值，其原因可能在于高速摩擦造成的高温弱化了基体强度，使表面的破损程度增加，同时，形成的第三体的致密程度和与基体的粘着程度有限，速度的增加加剧了第三体脱离基体的程度而表现出高的磨损率；当压力进一步增加(1.0～1.2 MPa)，摩擦面的法向压力有助于提高致密第三体与基体的结合程度，同时，压力增加导致摩擦温度的提高增加了第三体的致密程度(图 5)，这些均有利于形成对基体的保护和减少第三体的脱落概率，因此，磨损率并没有表现出增加的现象。

2.2　湿摩擦条件下的摩擦特点

图 7 为湿摩擦条件下，摩擦速度和摩擦压力对材料摩擦系数的影响。由图 7 可见，在摩擦压力小于0.7 MPa情况下，当摩擦速度低于 1000 r/min 时，摩擦系数处于较低值。在更高的摩擦速度条件下，摩擦速度增加，摩擦系数变化不明显。在摩擦压力高于 0.9 MPa 的情况下，当摩擦速度低于 1500 r/min 时，随摩擦速度增加，摩擦系数降低；在摩擦速度大于 1500 r/min 情况下，随摩擦速度增加，摩擦系数略有增加。

影响湿摩擦情况下摩擦特征的关键因素在于摩擦面上水膜的作用，水膜对摩擦系数的影响取决于两方面因素：(1) 水膜的润滑作用；(2) 水分的冷却作用。当摩擦速度和压力影响到水膜的状态时，则影响到摩擦系数的变化。图 7 表明，在低速低压力情况下，摩擦系数明显降低，其原因在于低速条件下，水分的离心作用小，摩擦面上存留的水分多，同时，低的摩擦压力使接触面上法向载荷小，这均有利于水膜保持一定的厚度，从而增加了水膜的润滑作用而使摩擦系数处于较低值。随着摩擦速度和压力的提高，高摩擦速度产生的离心力容易使水分脱离摩擦面，而高的摩擦压力降低了水膜厚度，这些均降低了水膜的润滑作用，从而对摩擦系数的影响程度降低。

2.3　干、湿摩擦条件下的摩擦特点的比较

比较图 1 和图 7 中 2 种摩擦状态摩擦系数的变化情况可知，水分对摩擦系数的影响主要体现在低速和低压力的情况下。当摩擦速度低于 1500 r/min 时，湿摩擦系数普遍低于干摩擦系数，其原因在于水膜的润滑作用随压力的降低而增加。当摩擦速度高于 1500 r/min 时，湿摩擦的摩擦系数几乎与干摩擦的摩擦系数相同，水分对摩擦系数的影响可以忽略不计。

图 8 为低速湿摩擦条件摩擦表面状态的形貌。干摩擦条件下表面基本被第三体覆盖(图 3)，而在湿摩擦情况下，摩擦表面容易看到基体组织(图 8)，这表明水膜的流动带走相当一部分第三体组织，起到对表面的清理作用，这是影响湿摩擦条件摩擦性能的一个重要因素。

在高速摩擦条件下，干、湿摩擦的摩擦系数差别不明显，其原因在于高速离心作用和水分的高温蒸发均起到减少表面水量的作用，从而降低了表面

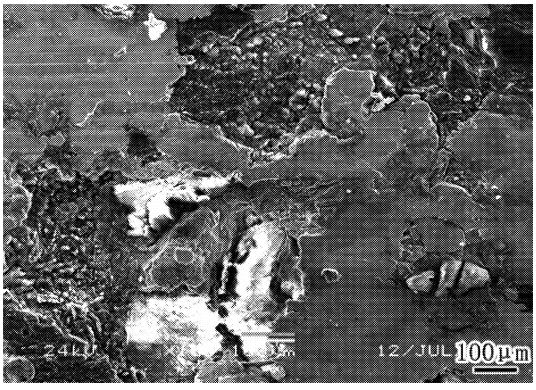


图 8　湿摩擦时摩擦表面形貌(200 r·min^{-1},SEM)

Fig. 8　Morphology of wet friction(200 r·min^{-1},SEM)

水膜的润滑效果。水分气化可能起到气垫作用而容易降低摩擦系数，但水分对表面的冷却避免了基体金属强度的降低而有利于提高摩擦系数，两者相抵而使湿摩擦系数与干摩擦系数相差不大。

图 9 为干、湿摩擦条件下累计磨损率与摩擦压力的关系。由图 9 可见，随压力增加，磨损率增加，干、湿摩擦条件下的磨损率相比，后者略高于前者。其原因在于湿摩擦中的水膜运动容易带走第三体而增加了磨损率。

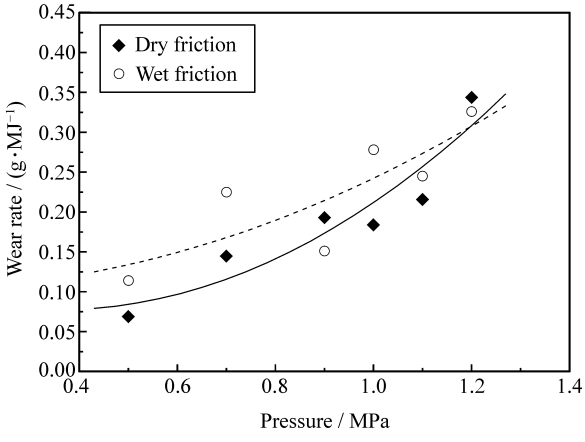


图 9　磨损率与摩擦压力的关系

Fig. 9　Relationship of wear rate and pressure

3　结　论

(1) 干摩擦条件下，摩擦磨损性能与摩擦压力和摩擦速度密切相关。在低摩擦速度范围内(摩擦速度<2000 r/min)，形成的第三体致密程度差，表面粗糙度大，表现出摩擦系数高、磨损率低，摩擦压力对摩擦磨损性能影响不明显。随摩擦速度增加，当促进了第三体的流动性而起到润滑作用时，则使摩擦系数降低。在高摩擦速度条件下(摩擦速度>2000 r/min)，具有冲击载荷性质的摩擦力使材料表面的硬质颗粒发生粉碎性破碎，破碎的硬质颗粒弥散分布起到强化表面强度的作用而使摩擦系数略有增加。同时，高的摩擦压力使表面变形层体积增加同样是引起摩擦系数和磨损率增加的原因之一。

(2) 湿摩擦时，低速低压力条件下，水膜起到润滑作用而明显降低摩擦系数，高速高压摩擦条件下的离心作用和高温蒸发作用使摩擦面上的水分难于存留而使摩擦系数与干摩擦相比变化不明显。

(3) 湿摩擦条件下的磨损率略高，其原因在于水分的流动性增加了第三体脱离基体的几率。

参考文献：

[1] Guerin J D, Bricout J P, Laden K, et al. High thermal diffusivity materials for railway brake discs [J]. Tribology Letters, 1997, 3(3): 257-267.

[2] 符　蓉，宋宝韫，高　飞，徐振越. Cu-SiO_2烧结材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报，2007，27(4)：377-381.
Fu Rong, Song Baoyun, Gao Fei, Xu Zhenyue. Study on friction and wear properties of sintered Cu-SiO_2 composites [J]. Tribology, 2007, 27(4): 377-381.

[3] 浩宏奇，丁华东，李雅文，金志浩. 石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报，1997，7(3)：120-123.
Hao Hongqi, Ding Huadong, Li Yawen, Jin Zhihao. Effect of graphite content on friction and wear properties of copper base material [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(3): 120-123.

[4] 尹延国，刘君武，郑治祥，郑玉春. 石墨对铜基自润滑材料高温摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报，2005，25(3)：216-220.
Yin Yanguo, Liu Junwu, Zheng Zhixiang, Zheng Yuchun. Effect of graphite on the friction and wear properties of Cu alloy-matrix self-lubricating composites at elevated temperature [J]. Tribology, 2005, 25(5): 216-220.

[5] 樊　毅，张金生，高　游，吴　芳，刘伯威. 石墨粒度对 Cu-Fe 基摩擦材料性能的影响[J]. 摩擦学学报，2000，20(6)：475-477.
Fan Yi, Zhang Jinsheng, Gao You, Wu Fang, Liu Bowei. The influence of graphite particle size on friction and wear properties of copper-ferrous matrix friction materials [J]. Tribology, 2000, 20(6): 475-477.

[6] 高　飞，郎剑通，符　蓉. 铝对铜基粉末冶金材料摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封，2008，33(1)：18-21.
Gao Fei, Lang Jiantong, Fu Rong. Effects of Al content on friction and wear properties of copper matrix frictional

materials [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(1): 18-21.

[7] 符　蓉，宋宝韫，高　飞，运新兵. 摩擦制动条件对列车制动闸片材料摩擦性能影响 [J]. 中国有色金属学报，2008，18(7)：1223-1230.
Fu Rong, Song Baoyun, Gao Fei, Yun Xinbing. Effect of friction conditions on tribology behaviour of the braking materials used for trains [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(7): 1223-1230.

[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.
Gao Hongxia, Liu Jianxiu, Zhu Rumin. Study on friction wear property of train brake materials by copper-based powder metallurgy [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2005, 23(6): 871-874.

[9] 宋宝韫，高　飞. 高速列车制动盘材料研究进展 [J]. 中国铁道科学，2004，25(4)：11-17.
Song Baoyun, Gao Fei. Development of materials for high-speed train brake discs [J]. China Railway Science, 2004, 25(4): 11-17.

[10] Descartes S, Berthier Y. Rheology and flows of solid third bodies: Background and application to an MoS1.6 coating[J]. Wear, 2002, 252(7/8): 546-556.

[11] Eriksson M, Bergman F, Jacobson S. On the nature of tribological contact in automotive brake [J]. Wear, 2002, 252(1/2): 26-36.

[12] Bettge D, Starcevic J. Quantitative description of wear surface of disc brakes using interference microscopy [J]. Wear, 2001, 248(1/2): 121-127.

[13] Filip P, Weiss Z, Rafaia D. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications [J]. Wear, 2002, 252(3/4): 189-198.

[14] Berthier Y. Wear, materials, mechanisms and practice [M]. Gwidon Stachowiack: Wiley Editor, 2005: 291-316.

[15] Linck V, Baillet L, Berthier Y. Dry friction: Consequence of local dynamic aspect on contact pressure, kinematics and friction tribology series 48 [M]. Leeds Lyon: Elsevier Science, 2004: 545-552.