

Fe 及 SiO_2 对铜基刹车材料摩擦磨损性能的影响机制

姚萍屏, 熊 翔, 李世鹏, 陈 洁, 黄伯云
(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要: 通过加压烧结法制备出铜基粉末冶金航空刹车材料, 采用模拟刹车制动试验方法考察了不同转速条件下 Fe 含量和添加 SiO_2 对材料摩擦磨损性能的影响, 利用光学显微镜和扫描电子显微镜观察材料的显微组织结构及其磨损表面形貌, 分析了 Fe 和 SiO_2 对材料磨损性能的影响机制. 结果表明: 由于高硬度及耐磨的 Fe 弥散分布于铜基体中, 使得刹车材料的摩擦系数和耐磨性能有所提高; SiO_2 虽然能够更有效地增加材料的摩擦系数和提高高速条件下的耐磨性, 但对低速下材料磨损性能的提高不利. 这是由于在低速下, SiO_2 易凸出摩擦表面而增加材料的磨损, 而在高速下由于硬质 SiO_2 颗粒对摩擦膜起到很好的钉扎作用而使其摩擦系数增加, 磨损率降低.

关键词: 铜基粉末冶金摩擦材料; Fe; SiO_2 ; 摩擦磨损性能

中图分类号: TB332; TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595 (2006) 05-0478-06

航空刹车材料是保证飞行器安全着陆的关键材料之一. 在飞机着陆的过程中, 刹车材料通过摩擦运动将飞机自身的动能转化为热能, 并经外部环境传热、制动系统升温及磨损产物的排出等方式将热量传到外部环境而发挥制动作用.

近 20 年来, 随着飞行器飞行速度与载荷的迅速增加, 对航空刹车材料制动性能的要求也越来越苛刻, 曾广泛用于航空刹车材料的树脂基石棉材料、致密金属材料逐渐被性能更为优良的金属基粉末冶金材料所替代^[1~3].

金属基粉末冶金航空刹车材料通常含有多种组元, 每种组元在摩擦过程中的作用各不相同. 若能在较大范围内了解各组元在摩擦过程中的作用及机理, 通过调整材料的化学成分可制备一系列综合性能优异的刹车材料^[4~10]. Fe 和 SiO_2 是铜基粉末冶金刹车材料中广泛使用的 2 种组元, 但在材料设计过程中主要依靠经验来选择其含量, 对其作用机理的研究则较少涉及. 因此, 有必要开展 Fe 和 SiO_2 在摩擦过程中的摩擦磨损机制的系统研究. 本文作者对比研究了在不同转速条件下, Fe 和 SiO_2 组元在铜基粉末冶金航空刹车材料中的摩擦磨损作用及机制.

1 实验部分

1.1 材料制备

试验所用原料粉末包括电解铜粉 ($<75\ \mu\text{m}$)、锡粉 ($<90\ \mu\text{m}$)、鳞片状天然石墨粉 ($180\ \mu\text{m}$)、还原铁粉 ($<74\ \mu\text{m}$) 和天然 SiO_2 粉 ($74\sim590\ \mu\text{m}$). 按照质量分数称取各种粉末 (见表 1), 经手工混合后

表 1 铜基粉末冶金刹车材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of Cu-based
PM brake materials

EM brake materials					%
Na	Cu	Sn	C	Fe	SiO ₂
1 [#]	91	4	5	-	-
2 [#]	87	4	5	4	-
3 [#]	83	4	5	8	-
4 [#]	79	4	5	12	-
5 [#]	87	4	5	-	4

置于 V 型混料器中混合 6~8 h, 再将混合料在压力 400~600 MPa 下冷压成型. 压坯在钟罩式加压烧结炉中, 以氢气保护下烧结, 烧结温度为 920~950 °C, 烧结压力为 2.5~3.5 MPa, 保温时间为 3~4 h, 水冷至温度低于 100 °C 后出炉. 将烧结材料制成外径

基金项目: 教育部博士点基金资助项目 (20050533039).

收稿日期: 2005-12-29; 修稿日期: 2006-05-20 联系人熊翔, e-mail: Xiong228@sina.com

作者简介: 姚萍屏, 男, 1969 年生, 副教授, 目前主要从事粉末冶金摩擦材料研究.

为 75 mm、内径为 53 mm 的试环。

1.2 性能评价

材料的微观组织结构分析及磨损表面形貌观察在 MeF3A 型金相显微镜和 KYKY-2800 型扫描电子显微镜上进行。

摩擦磨损性能评价在 MM-1000 型摩擦磨损试验机上进行,偶件材料采用 30CrSMoVA 合金结构钢,硬度为 41HRC。偶件和刹车材料试样均采用外径为 75 mm、内径 53 mm 的环;试验压力为 0.5 MPa,转动惯量为 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$,转速分别为 1 000 r/min、3 000 r/min、5 000 r/min、7 000 r/min;每个样品进行 10 次制动测试,用 25 mm 螺旋测微计测量 10 次摩擦前后试环上 3 个不同位置的厚度,根据前后厚度差值,取其平均值得到试环的磨损量;通过动态跟踪刹车过程中的刹车力矩 M ,由公式 $\mu = M / pR$ (其中 μ 为摩擦系数, p 为载荷, R 为试样半径)计算试样的摩擦系数 μ 值,取后 5 次试验结果的平均值来评价其摩擦系数。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 示出了 2[#]试样的显微组织形貌 SEM 照片。

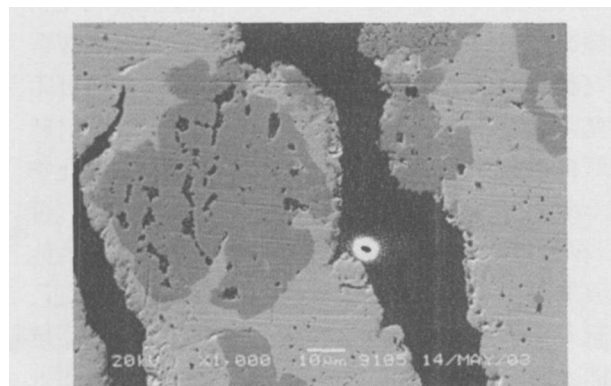


Fig 1 Microstructure of sample 2[#] (1 000 ×)

图 1 2[#]试样的显微组织形貌照片 (1 000 ×)

可见,其中黑色长条状组织为石墨,灰色底为铜锡合金基体,深灰黑色小斑点为 Fe 颗粒。由于所用 Fe 粉为多孔海绵铁,因此 Fe 颗粒中存在一定孔隙。Fe 在 Cu 中的固溶度较小 (一般不超过 0.4% ~ 0.5%), Fe 颗粒呈游离态均匀分布于基体中。另外 Fe 和 Cu 之间的润湿性较好,且两者存在少量互溶,因此 Fe 颗粒与基体结合良好。均匀分布的 Fe 颗粒与基体紧密结合,起到了一定的颗粒强化作用。

图 2 分别示出了不含 SiO_2 的 1[#]试样和含 SiO_2 的 5[#]试样的金相组织形貌照片。由图 2(a)可以看

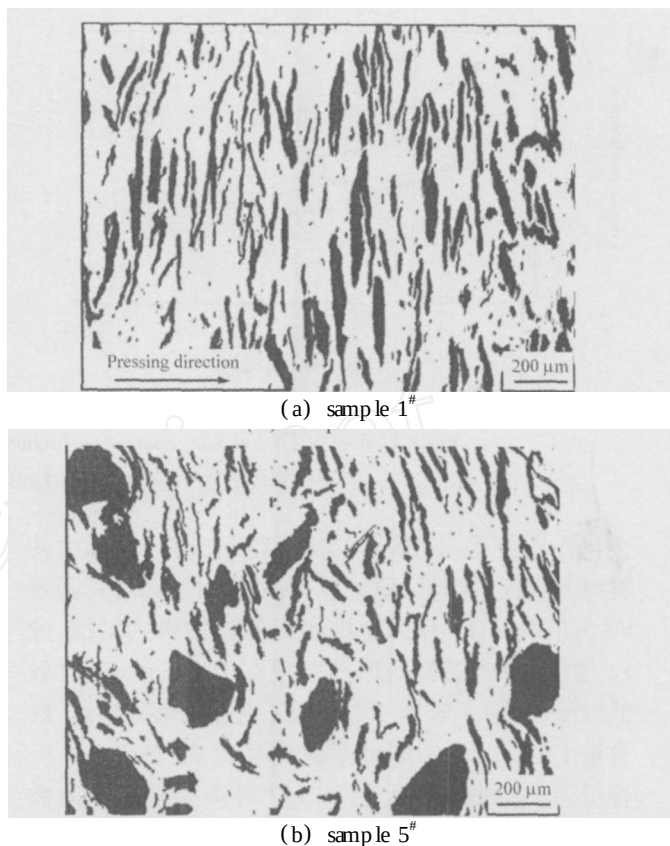


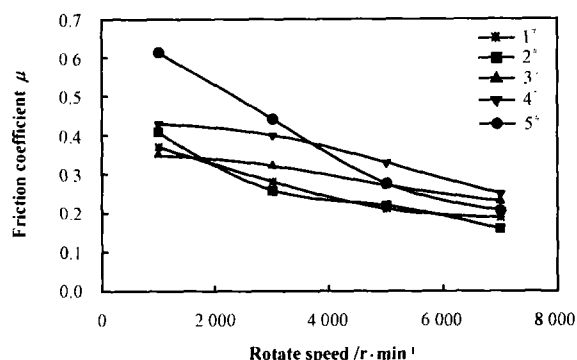
Fig 2 Microstructures of sample 1[#] and sample 5[#]

图 2 1[#]和 5[#]试样的显微组织形貌照片

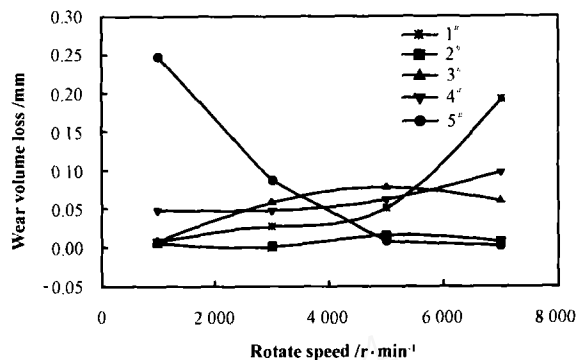
出,在不含 SiO_2 的 1[#]试样中,条状石墨在垂直于压制压力方向呈平行分布,而在含 SiO_2 的 5[#]试样中,石墨排列则相相对紊乱 [图 2(b)]。显然,添加 SiO_2 影响石墨在基体中的排列状态。这是由于 SiO_2 改变了压制压力在坯体中的传播方向以及粉末颗粒的压缩位移。在施压过程中,当不添加 SiO_2 时塑性较好的基体金属容易在压制压力方向产生相应的压缩位移,不会改变压力的传播方向,因此易滑移的片状石墨在垂直压制压力方向呈条状平行排列。当基体中添加硬质非金属颗粒 SiO_2 时,由于其变形能力较差,在压力作用下不易发生变形或压缩位移,使压力的传播方向发生偏离,从而使基体中石墨的排列紊乱。

2.2 摩擦磨损性能

图 3 比较了在不同转速条件下 Fe 含量和添加 SiO_2 对材料摩擦磨损性能的影响。由图 3(a)可见,各试样的摩擦系数随转速增加而降低,且在较低转速下,摩擦系数下降较为明显,在高速 (7 000 r/min) 条件下各种材料的摩擦系数相近。当 Fe 含量为 4% 时,由于 Fe 含量低,作为摩擦组元而言,其对摩擦系数没有产生明显影响。但 Fe 元素对 Cu 基体的微合



(a) Friction coefficient



(b) Wear volume loss

Fig 3 Effect of Fe and SiO₂ content on friction and wear properties under different rotating rates图 3 不同转速下铁含量和添加 SiO₂ 对刹车材料摩擦磨损性能的影响

金化作用使得 Cu 基体的强度得到改善,因而也使材料的磨损量降低,耐磨性提高 [见图 3(b)]. 随着 Fe 含量增加, Fe 作为摩擦组元的作用得到发挥,除 Fe 含量为 8% 试样的摩擦系数在 1 000 r/min 时较低以外,在同一转速下, 3[#] (Fe 含量 8%) 和 4[#] (Fe 含量 12%) 试样的摩擦系数明显提高. 此外,与 Fe 含量为 4% 的试样相比,其它 2 种含铁试样在摩擦系数增大的同时磨损量明显增加,耐磨性降低,在中低速下,磨损量甚至高于未添加 Fe 元素的试样. 但是,在高速 (7 000 r/min) 条件下, Fe 元素对提高材料的耐磨性十分有利. 从图 3(b) 可见,未添加 Fe 元素的 1[#] 试样在高速下的磨损量约为低速时的 4 倍,但添加 Fe 元素试样的磨损量均无异常增大现象.

由图 3(a) 还可见,在低速条件下 SiO₂ 明显提高了材料的摩擦系数. 但随着转速增加,含 SiO₂ 的 5[#] 试样的摩擦系数同样呈下降趋势,而不含 SiO₂ 的 1[#] 材料的摩擦系数降低较为缓慢. 当达到最大转速 7 000 r/min 时 2 种材料的摩擦系数相当. 通过对比可知, SiO₂ 的增摩效果明显优于 Fe. 在高速条件下, SiO₂ 能够有效提高材料的耐磨性,但在低速条件下则对提高材料的耐磨性不利 [见图 3(b)].

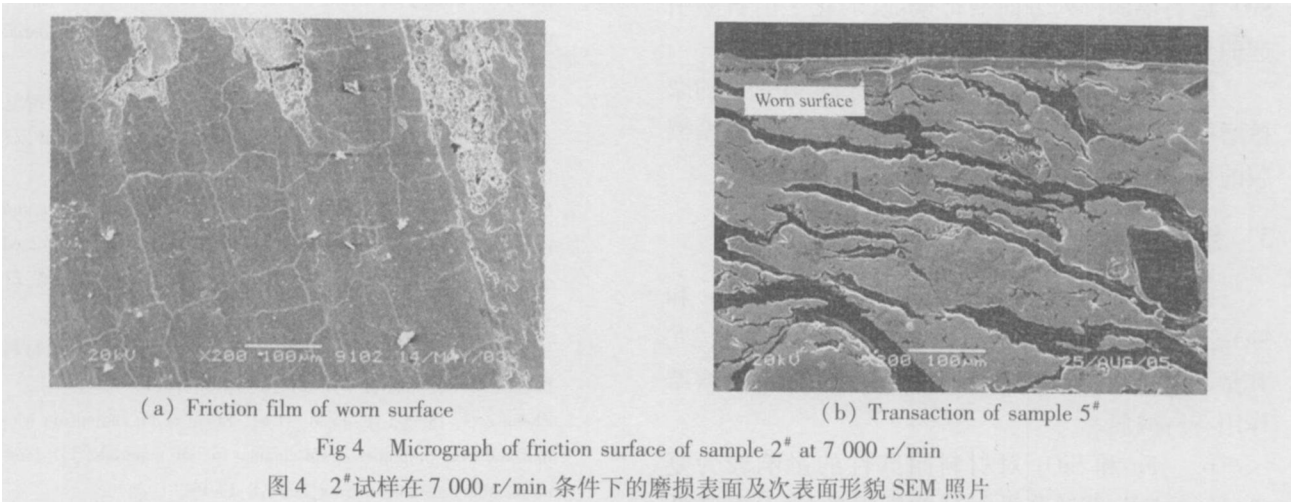
2.3 讨论

根据分子机械啮合理论^[11],当两摩擦面微突体相互接触时,接触点材料由于分子间作用力相互粘合,摩擦运动时接触点间产生相对运动而发生剪切,这种剪切力将成为摩擦阻力. Fe 对材料的增摩作用在于:一方面, Fe 颗粒弥散分布于材料基体中起到颗粒强化作用,提高了材料的强度和硬度,有效改善了材料的摩擦磨损性能;另一方面, Fe 颗粒自身强度和硬度均比 Cu 基体高,在摩擦过程中,当 Cu 基体磨损后材料表面的 Fe 颗粒凸出于摩擦面,直接

与偶件接触,且 Fe 颗粒与基体结合紧密,在摩擦过程中能够承受较大的冲击力而不被拔出基体,从而提高了材料表面微突体与偶件表面微突体间的相互作用力,即提高了摩擦过程中摩擦副间的运动阻力,因此起到了增摩作用,使其摩擦系数增加. Fe 含量越高,在摩擦过程中的增摩颗粒越多,材料的摩擦系数越大.

随着转速提高,摩擦表面温度不断上升. 在摩擦热和摩擦应力作用下,材料表面物质极易与空气中的氧和水蒸气等发生反应,形成一层致密的氧化物摩擦膜^[12] (见图 4) 并覆盖于摩擦表面,一方面缓解了材料表面微突体的凹凸不平程度,另一方面可阻碍基体和 Fe 颗粒与偶件的直接接触,从而降低材料的摩擦系数. 随着转速提高,材料表面形成的氧化物膜不断增厚,因而摩擦系数降低的趋势更加明显. 可见,在某种意义上,较高速下材料的摩擦磨损性能主要取决于表面摩擦膜的性质. 基体材料组元相近、含量差别不大的材料在高速条件下具有相近的摩擦性能,即在高速 (7 000 r/min) 下各种材料具有相近摩擦系数.

与金属摩擦组元 Fe 相比, SiO₂ 为惰性非金属摩擦组元,与基体不发生相互作用,且与基体之间的润湿性较小,结合力较弱. 在低速条件下摩擦表面温度较低,未形成摩擦膜. 而基体铜的耐磨性较差且易磨损,使得 SiO₂ 颗粒凸出于摩擦表面,而 SiO₂ 的强度和硬度较高,在摩擦过程中易嵌入偶件表面并与偶件发生磨削作用,阻碍了摩擦副之间的相对运动,从而提高了材料的摩擦系数. 但 SiO₂ 脆性较大,在摩擦冲击力作用下,凸出于基体表面的 SiO₂ 颗粒容易破碎、脱落 (图 5),脱落的颗粒滞留于摩擦副之间,加剧了材料的磨粒磨损,增大了低速条件下材料



的磨损量^[13,14]。在高速条件下,材料表面温度迅速升高,高温下偶件材料表面发生一定软化,降低了 SiO_2 与偶件的材料的磨损性能。在不含 SiO_2 的材料中,垂直于

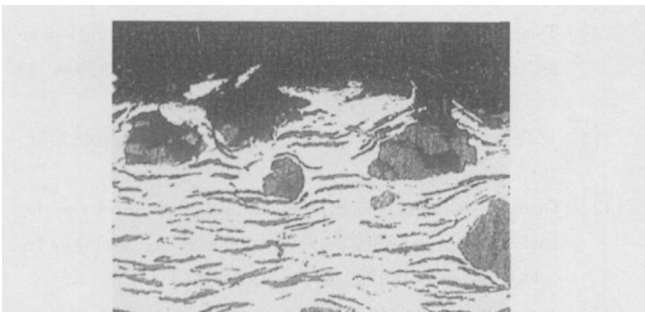


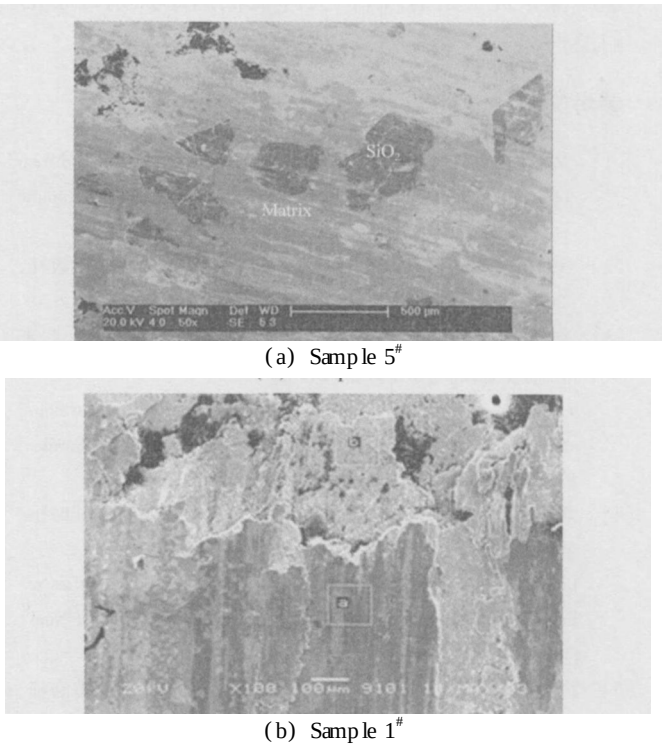
Fig 5 Wear mechanism of SiO_2 under low rotating rate

图 5 低速条件 (1 000 r/min)下磨损表面的 SiO_2

磨削阻力,使得摩擦系数降低^[15]。同时,在高速摩擦条件下,所形成的摩擦膜降低了摩擦表面的凹凸不平程度,在一定程度上也降低了材料的摩擦系数。

对添加 SiO_2 颗粒的 5#材料而言,提高转速对其磨损性能的影响有两方面原因:一方面是所形成的氧化物摩擦膜覆盖于表面可增强基体组织的耐磨性,从而减少 SiO_2 颗粒凸出于表面的速度和受冲击程度,延缓 SiO_2 颗粒的破碎和脱落;另一方面,摩擦膜形成后,镶嵌于摩擦表面的硬质 SiO_2 颗粒对摩擦膜起到很好的钉扎作用 [如图 6 (a)],有利于保持摩擦面的完整性。因此,摩擦膜与 SiO_2 颗粒相匹配,使得添加 SiO_2 的 5#材料在高速摩擦条件下具有较低的磨损量。未添加 SiO_2 颗粒的 1#试样的磨损表面虽也会形成摩擦膜,但由于没有 SiO_2 硬质颗粒的钉扎作用,在摩擦力作用下摩擦膜极易破裂、脱落 [见图 6 (b)],致使高速下的磨损量明显增加。

此外,石墨的排列方向也在一定程度上影响了



压制压力方向的石墨呈条状平行分布,使材料在一定程度上出现分层现象 [图 1 (a)]。根据疲劳磨损理论^[16],当硬表面 (偶件) 在软表面 (铜基材料) 滑过时,距离软表层一定深度处将产生位错塞积和形成空位,进而产生裂纹。裂纹形成后,一般沿平行于表面的方向进行扩展,材料中条状平行分布的石墨将促进裂纹扩展,从而增加材料的磨损程度。当添加

SD₂后石墨的排列方向变得紊乱,弱化了由石墨引起的分层效应,提高了材料的耐磨性能。

综上所述,对于粉末冶金摩擦材料,其优良的摩擦磨损性能应体现于基体中硬质颗粒与基体或摩擦膜的良好匹配性。

3 结论

a 在铜基摩擦材料中加入摩擦组元 Fe和SD₂,在低速摩擦条件下,其增摩作用较为明显,尤其是SD₂,但在高速摩擦条件下,Fe和SD₂的增摩作用有所减弱。

b Fe和SD₂对材料耐磨性的影响较为复杂.适量的Fe能够降低材料的磨损量,尤其是降低在高速摩擦条件下的磨损量;SD₂能够提高其在高速摩擦条件下耐磨性,但会降低低速摩擦条件下的耐磨性。

参考文献:

- [1] Moustafa S F, Ael-badry S, Sanad A M, *et al* Friction and wear of copper-graphite's make with Cu-coated and uncoated graphite powders[J]. *Wear*, 2002, 253: 699-710.
- [2] 徐润泽. 粉末冶金结构材料学 [M]. 长沙:中南大学出版社, 2002.
- [3] 姚萍屏,熊翔,黄伯云. 航空刹车材料的现状与发展 [J]. *粉末冶金工业*, 2000, 10(6): 34-37.
Yao P P, Xiong X, Huang B Y. Present situation and development of powder metallurgy airplane brake materials[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2000, 10(6): 34-37.
- [4] 刘英才,李静,尹衍生. Fe₃Al-Cu基刹车材料的制备及其摩擦学特性 [J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(2): 192-197.
Liu Y C, Li J, Yin Y S. Preparation and tribology properties of Fe₃Al-Cu base brake materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005, 15(2): 192-197.
- [5] 涂江平,孟亮,刘茂森. 粉末冶金 Cu-Fe 复合材料的摩擦磨损行为 [J]. *摩擦学学报*, 1999, 19(3): 209-213.
Tu J P, Meng L, Liu M S. Sliding friction and wear behavior of Cu-Fe composites prepared by powder metallurgy[J]. *Tribology*, 1999, 19(3): 209-213.
- [6] 韩杰胜,王静波,张树伟,等. Fe-Mo-CaF₂ 高温自润滑材料的摩擦学特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2003, 23(4): 306-310.
Han J S, Wang J B, Zhang S W, *et al* Study on the tribological properties of Fe-Mo-CaF₂ high temperature self-lubricating material [J]. *Tribology*, 2003, 23(4): 306-310.
- [7] 宁莉萍,王静波,欧阳锦林,等. 铜和石墨对铁基含油自润滑复合材料机械及摩擦学性能的影响 [J]. *摩擦学学报*, 2001, 21(5): 335-339.
Ning L P, Wang J B, Ouyang Ji L, *et al* Effect of copper and graphite on the mechanical and tribological properties of Fe-based oil-containing self-lubricating composites[J]. *Tribology*, 2001, 21(5): 335-339.
- [8] 钟志钢,邓海金,李明,等. Fe含量对 Cu基金属陶瓷摩擦材料摩擦磨损性能的影响 [J]. *材料工程*, 2002, 8: 17-19.
Zhong Z G, Deng J H, Li M, *et al* Effect of Fe content on friction and wear properties of Cu-cermet friction materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, 8: 17-19.
- [9] 刘伯威,樊毅,张金生,等. SD₂和SiC对 Cu-Fe基烧结摩擦材料性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(1): 110-113.
Liu B W, Fan Y, Zhang J S, *et al* Effect of SD₂ and SiC on properties of Cu-Fe matrix sintered friction materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(1): 110-113.
- [10] Tjong S C, Lau K C. Tribological behavior of SiC particle-reinforced copper matrix composites[J]. *Materials Letters*, 2000, 43(5): 274-280.
- [11] 邵荷生,曲敬信. 摩擦与磨损 [M]. 北京:机械工业出版社, 1988. 120-122.
- [12] Qiang Y H, Ge S R, Xue Q J. Microstructure and tribological behavior of nitrocarburizing-quenching duplex treated steel[J]. *Tribology International*, 1999, 32(3): 131-136.
- [13] Peter J B lau, Harry M Meyer III. Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials[J]. *Wear*, 2003, 255(7): 1 261-1 269.
- [14] Mimaroglu A, Taymaz I, Ozel A, *et al* Influence of the addition of Cr₂O₃ and SiO₂ on the tribological performance of alumina ceramics[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2003, 169(2): 405-407.
- [15] 刘伯威,张金生,樊毅,等. 非金属颗粒镀铜及对烧结摩擦材料强度的影响 [J]. *材料保护*, 2001, 34(2): 24-25.
Liu B W, Zhang J S, Fan Y, *et al* Nonmetal copperizing and effect on strength of sintered friction materials[J]. *Materials Protection*, 2001, 34(2): 24-25.
- [16] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002, 319-326.

Friction and Wear Behavior and Mechanism of Fe and SiO_2 in Cu-based P/M Friction Material

YAO Ping-ping, X DNG Xiang, L I Shi-peng, CHEN Jie, HUANG Bai-yun

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Cu-based aircraft brake composites were prepared by powder metallurgy process. The tribological properties of composites and the microstructure of the composites were tested with an inertial braking apparatus. The worn surfaces were investigated through optical microscope, and scanning electron microscope, and the wear behaviors and mechanisms of Fe and SiO_2 in Cu-based friction materials were discussed. Fe disseminated distributed in the copper base, it decreased wear loss of friction materials and enhanced friction coefficient, due to high hardness and resistance to wear. Although SiO_2 can remarkably increased friction coefficient and wear resistance of friction materials at high rotating speed, but it increased wear loss at low rotating speed. SiO_2 easily moved onto surface and increased wear at low speed, but it pinned tribo-film and so increased friction coefficient and decreased wear rate at high speed.

Key words: Cu-based P/M friction material, Fe, SiO_2 , friction and wear behavior

Author: YAO Ping-ping, male, born in 1969, Associate Professor, e-mail: ppyao@csu.edu.cn