

文章编号 1004-924X(2013)10-2581-06

纳米颗粒增强铜基摩擦材料的摩擦学性能

杜建华^{1*}, 刘彦伟², 李园园²

(1. 装甲兵工程学院 科研部, 北京 100072; 2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于粉末冶金法分别制备了纳米氧化铝和纳米石墨增强铜基摩擦材料, 研究了纳米颗粒对铜基摩擦材料的摩擦磨损和耐热性能的影响规律。采用扫描电子显微镜(SEM)分析了材料的微观结构和磨损形貌, 并利用惯性摩擦磨损试验机考核其摩擦学性能。实验结果表明: 与未添加纳米颗粒的摩擦材料相比, 添加纳米氧化铝和纳米石墨的摩擦材料的摩擦因数高而稳定, 且随接合次数增加无明显衰退现象; 耐磨性能分别提高了 25 % 和 11 %; 耐热性能分别提高了 18 % 和 25 %。未添加纳米颗粒的摩擦材料的磨损机制主要为犁沟式磨料磨损, 纳米氧化铝和纳米石墨能减少摩擦材料的磨料磨损, 从而增强了摩擦材料的耐磨性。实验结果显示, 纳米氧化铝和纳米石墨可显著提高铜基摩擦材料的摩擦学性能。

关键词: 摩擦材料; 铜基摩擦材料; 纳米氧化铝; 纳米石墨; 摩擦磨损

中图分类号: TF125; TB383 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2581

Friction properties of Cu-based friction materials reinforced by nanometer materials

DU Jian-hua^{1*}, LIU Yan-wei², LI Yuan-yuan²

(1. *Department of Scientific Research, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China*; 2. *School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

* *Corresponding author, E-mail: djh619@sina.com*

Abstract: To enhance the friction properties of Cu-based friction materials and study the friction properties of Cu-based friction materials with nanometer particles, the Cu-based friction materials enhanced with nano-AlN (n-AlN) and nano-graphite (n-C) were prepared by powder metallurgy technology, respectively. The effects of nanometer particles on the frictional wear and heat-resistant characteristics of Cu-based friction materials were researched. Then, the microstructures and friction performance were analyzed through a Scanning Electron Microscope (SEM) and a friction tester, respectively. The results indicate that the friction coefficients of friction materials with n-AlN and n-C are higher and stable as compared with that of the friction materials without any nanometer materials, the wear resistances have been improved by 25 % and 11 %, respectively. The heat resistances of the materials with n-AlN and n-C have been improved by 18 % and 25 %, respectively. The n-AlN and n-

收稿日期: 2013-05-15; 修订日期: 2013-07-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51001117)

C particles can reduce the abrasive wear and enhance the wear resistances of the Cu-based friction materials. The results demonstrate that the n-AlN and n-C particles can enhance the properties of Cu-based friction materials remarkably.

Key words: friction material; Cu-based friction material; nano-AlN; nano-graphite; friction and wear

1 引言

铜基摩擦材料因具有较高的摩擦因数、高导热性、高耐磨性等性能而被广泛应用于船舶、工程车辆、特种军用车辆和机械的离合器和制动器中^[1-3]。随着车辆与设备向高速、重载方向发展,对摩擦材料提出了更高要求,如低磨损率和更高的耐热性能等。因而,迫切需要研究摩擦性能更高的摩擦材料。当前,铜基粉末冶金摩擦材料性能的提高主要通过调整传统微米尺度上基体组元、润滑组元和摩擦组元的含量来实现^[3]。例如:铜基摩擦材料的耐磨性和耐热性随着铁粉和石墨含量增加而提高^[4-6]。但当石墨等非金属成分含量过高时,会导致摩擦材料的强度和摩擦性能下降^[5]。

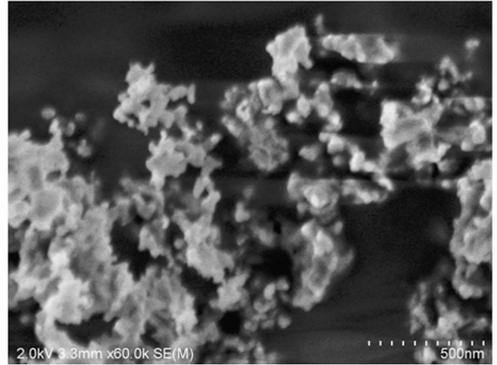
与微米颗粒材料相比,纳米颗粒具有表面效应、小尺寸效应、量子效应等^[7]。在复合材料中添加纳米颗粒能够使材料获得更高的力学性能、良好的耐磨性和耐热性^[7-10]。目前,纳米氮化铝(n-AlN)和纳米石墨(n-C)在铜基摩擦材料中的应用鲜有报道。n-AlN的膨胀系数小,热导率高,被广泛应用于金属基纳米复合材料中。n-C由于具有良好的耐磨和润滑性能,多用于摩擦和润滑领域。本文采用粉末冶金法分别制备 n-AlN 和 n-C 增强铜基摩擦材料,研究了摩擦材料的微观组织和摩擦磨损性能。实验表明,n-AlN 和 n-C 能够显著提高铜基摩擦材料的摩擦学性能。

2 实验方法

2.1 试样制备

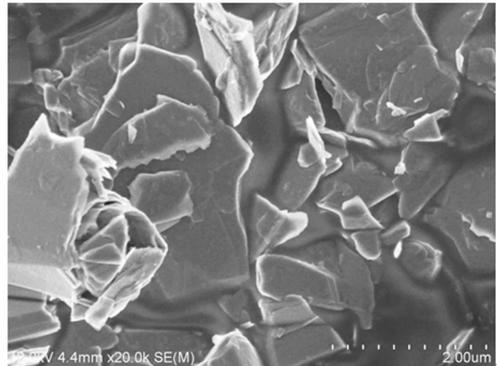
试验用原料:电解铜粉,平均粒径约为 74 μm ;鳞片状天然石墨,平均粒径约为 60 μm ; SiO_2 ,平均粒度约为 43 μm ; n-AlN 颗粒,粒径约为 40 nm; n-C,平均粒径为 200 μm ,厚度为 20 nm。图 1 所示为纳米颗粒的显微形貌。

摩擦材料的配方与试样编号如表 1 所示。根据表 1 的配方称粉,在 V 型混料机中混合 2.5 h。在



(a) n-AlN 颗粒 SEM 形貌

(a) SEM micrographs of n-AlN particles



(b) n-C 的 SEM 形貌

(b) SEM micrographs of n-C particles

图 1 显微形貌

Fig. 1 SEM micrographs

300~500 MPa 压力下压制成型。然后在钟罩炉中烧结,烧结温度为 850 $^{\circ}\text{C}$,烧结压力为 1.0~4.0 MPa。

表 1 摩擦材料配方

Tab. 1 Composition of friction materials in weight (%)

试样	Cu+Sn	石墨	SiO_2	n-AlN	n-C
S_0	75~85	16~18	3~5	-	-
S_1	75~85	16~18	3~5	0.75	-
S_2	75~85	10~12	3~5	-	2

2.2 组织观察与性能测试

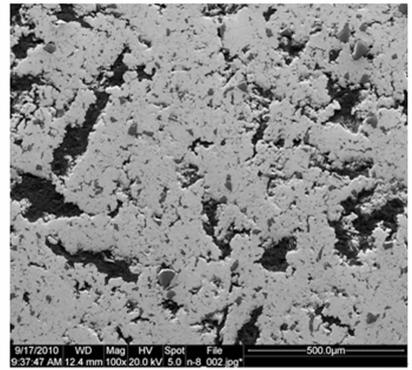
采用 Quanta-200 型扫描电子显微镜(SEM)

观察摩擦材料的显微结构和磨损形貌。依据 JB/T7909-1999《湿式烧结金属摩擦材料摩擦性能试验台试验方法》，通过杭州粉末冶金研究所的“HF-85WT”惯性摩擦磨损试验机测试摩擦材料的摩擦因数、磨损率和耐热系数。摩擦盘的外径和内径分别为 230 和 190 mm。对偶材料为 65Mn，洛氏硬度 HRC 为 38~45，表面粗糙度 R_a 为 1.6，接合频率为 2 times/min，转动惯量为 $2.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，转速为 1 418 r/min。

3 结果与讨论

3.1 显微结构

图 2 所示为摩擦材料的显微结构。图中的灰白色为铜基体，黑色为石墨，铜基体上的深灰色颗粒为 SiO_2 颗粒。基体连续分布，使摩擦材料具有良好的结合强度； SiO_2 颗粒和石墨与基体不发生反应，以夹杂物的形式存在，呈均匀分布。与 S_0 相比， S_1 的铜基体颗粒尺寸较小，这是由于弥散分布的 n-AlN 在烧结过程中可抑制铜晶粒的长

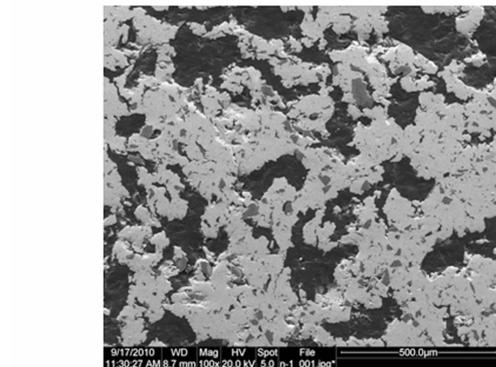


(c) 添加 n-C 后摩擦材料 S_2 的微观结构

(c) Microstructures of friction materials S_2 with n-C

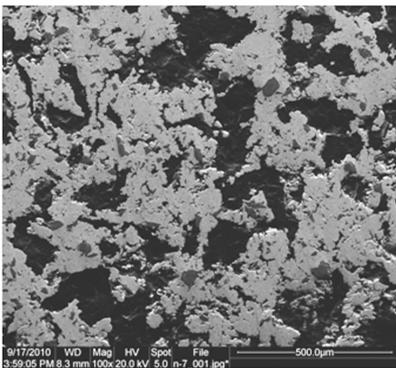
图 2 摩擦材料的微观形貌

Fig. 2 Microstructures of friction materials



(a) 未添加纳米颗粒摩擦材料 S_0 微观结构

(a) Microstructures of friction materials S_0 without n-C



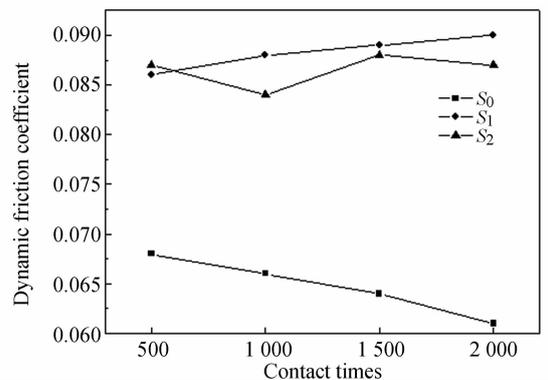
(b) 添加 n-AlN 后摩擦材料 S_1 的微观结构

(b) Microstructures of friction materials S_1 with n-AlN

大，细化了晶粒和铜颗粒；细小的晶粒有助于改善摩擦材料的力学性能和摩擦性能。 S_2 试样中含有少量石墨，因此 S_2 试样中铜基体面积较 S_0 和 S_1 大。

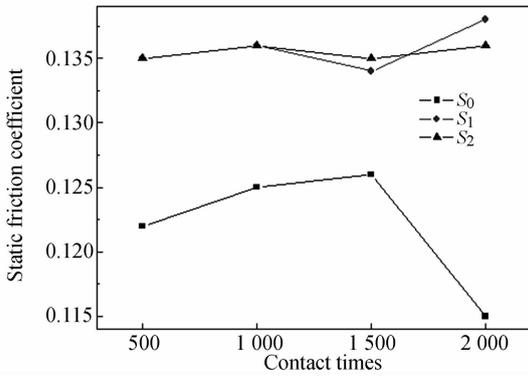
3.2 摩擦因数

图 3 所示为摩擦材料的摩擦因数与接合次数之间的关系曲线。在图 3(a)中，随着转数的增加，试样 S_1 和 S_2 的动摩擦因数变化平稳，试样 S_0 的摩擦因数随接合次数增加而下降。其中，添加纳米颗粒的摩擦材料 S_1 、 S_2 的动摩擦因数比较稳定，变化为 0.085~0.090。对于车辆用湿式铜基摩擦材料，名义动摩擦因数一般为 0.05~0.10，因而 S_1 、 S_2 具有更高的动摩擦因数，并且比未添加纳米颗粒的摩擦材料 S_0 的摩擦因数更高和平稳。在图 3(b)中，试样 S_0 的静摩擦因数先升高后急剧下降；试样 S_2 的摩擦因数较试样 S_1 平



(a) 动摩擦因数与接合次数的关系

(a) Relationship between dynamic friction coefficient and contact times



(b) 静摩擦因数与接合次数的关系

(b) Relationship between static friction coefficient and contact times

图 3 摩擦因数与结合次数的关系

Fig. 3 Relationship between friction coefficients and contact times

稳。因而 n-AlN 和 n-C 颗粒能提高铜基摩擦材料摩擦因数的稳定性,改善摩擦学性能。

3.3 磨损率

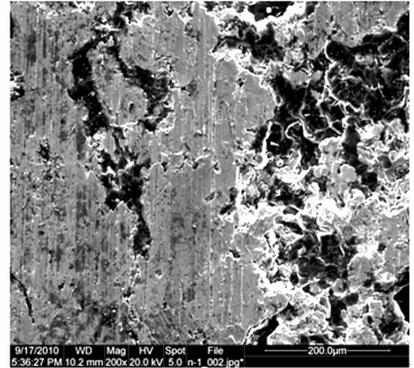
试样 S₀、S₁ 和 S₂ 的体积磨损率分别为 1.0×10^{-9} 、 0.8×10^{-9} 和 $0.9 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \cdot \text{J}^{-1}$ 。与 S₀ 相比,S₁ 和 S₂ 的耐磨性分别提高了 25% 和 11%。由此可见,n-AlN 和 n-C 颗粒能够提高摩擦材料的耐磨性。由于 n-AlN 和 n-C 颗粒可对铜基体起到弥散强化,使铜基体的硬度提高,磨料磨损下降。与此同时,作为润滑组元的 n-C 在摩擦过程中,均匀分布于摩擦对偶之间而降低摩擦材料的磨损。n-AlN 颗粒分布于摩擦表面能够防止金属表面的直接接触,减少摩擦材料的磨料磨损和粘着磨损。

3.4 耐热性

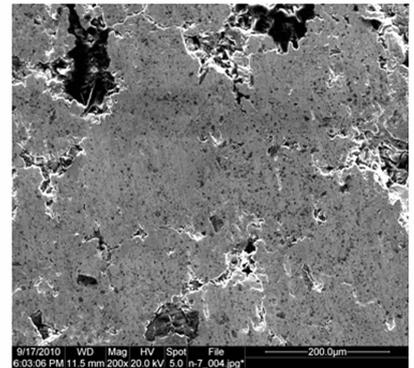
目前,国内性能较高的工程车辆用湿式铜基摩擦材料的耐热系数值约为 $32\ 000 \text{ J}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{s})$ 。试样 S₀、S₁ 和 S₂ 的能量负荷许用值分别为 28 800、34 000 和 36 000 $\text{J}^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{s})$ 。与 S₀ 相比,S₁ 和 S₂ 的耐热性分别提高了 18% 和 25%。因而 n-AlN 和 n-C 颗粒可提高铜基摩擦材料的耐高温性能。这是由于 n-AlN 具有良好的导热性,n-C 具有良好的耐热性能,因而 n-AlN 和 n-C 颗粒体积含量的增加有助于摩擦材料的耐热性能提高。此外,对铜基摩擦材料耐热性能的改善,n-C 优于 n-AlN。

3.5 磨损机制

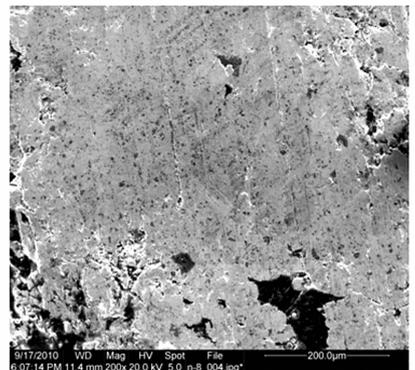
图 4 所示为摩擦材料的磨损形貌。可知试样 S₀ 的表面有大量平行的宽而深的犁沟,磨损机

(a) 未添加纳米颗粒 S₀ 的磨损形貌

(a) Morphology of worn surface of sample S₀ without nanometer materials

(b) 添加 n-AlN S₁ 的磨损形貌

(b) Morphology of worn surface of sample S₁ with n-AlN

(c) 添加 n-C S₂ 的磨损形貌

(c) Morphology of worn surface of sample S₂ with n-C

图 4 摩擦材料磨损形貌

Fig. 4 Morphologies of worn surfaces

制为犁沟式磨料磨损。试样 S_1 和 S_2 的表面较为光滑,无明显的犁沟与划痕,表面存在点状的凹坑,由硬质颗粒剥落或断裂而形成。因而添加 n-AlN 和 n-C 颗粒的摩擦材料的耐磨性能强于试样 S_0 。这是由于 n-AlN 和 n-C 颗粒弥散分布在铜基体中能够增强基体强度;同时,石墨在摩擦过程中剥落而均匀分布在摩擦表面,作为润滑组元可降低材料的磨损。因此在试样 S_1 和 S_2 的表面有较少的犁沟。

4 结 论

本文通过添加 n-AlN 和 n-C 来提高铜基粉

末冶金摩擦材料的摩擦磨损和耐热性能。研究表明,n-AlN 和 n-C 颗粒能够显著提高铜基摩擦材料的摩擦学性能。分别添加质量分数为 0.75% 的 n-AlN 和 2% 的 n-C 的摩擦材料的微观组织均匀且连续;二者的摩擦因数得到提高并且更加稳定。与未添加纳米颗粒的摩擦材料相比,添加 n-AlN 和 n-C 颗粒的耐磨性分别提高 25% 和 11%,同时耐热性分别提高 18% 和 25%。结果表明,添加 n-AlN 和 n-C 颗粒能够降低铜基摩擦材料的磨料磨损。

参考文献:

- [1] 李兵,杨圣崇,曲波,等. 汽车摩擦材料现状与发展趋势[J]. 材料导报,2012(S1):348-350.
- LI B, YANG SH D, QU B, *et al.*. Research and development of automobile friction material [J]. *Materials Review*, 2012(S1): 348-350. (in Chinese)
- [2] 王秀飞,黄启忠,尹彩流,等. 铜基粉末冶金摩擦材料的湿式摩擦性能[J]. 中南大学学报,2008,39(3): 517-521.
- WANG X F, HUANG Q ZH, YIN C L, *et al.*. Wet friction properties of copper-based material via powder metallurgy [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2008, 39(3): 517-521. (in Chinese)
- [3] MUSTAFA B, ADEM K. The effect of Al_2O_3 on the friction performance of automotive brake friction materials [J]. *Tribology International*, 2007, 40(7):1161 - 1169.
- [4] 于川江,姚萍屏. 现代制动用刹车材料的应用研究和展望[J]. 润滑与密封,2010,35(2):103-106.
- YU CH J, YAO P P. Progress and prospect of brake materials for modern brake parts [J]. *Lubrication Engineering*, 2010,35(2):103-106. (in Chinese)
- [5] XIONG X, JIE C, YAO P P, *et al.*. Friction and wear behaviors and mechanisms of Fe and SiO_2 in Cu-based P/M friction materials [J]. *Wear*, 2007, 262(9-10):1182 - 1186.
- [6] 刘莹,王发辉. 增强纤维对陶瓷基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报,2012,32(1):27-33.
- LIU Y, WANG F H. Effects of reinforced fibers on friction and wear properties of ceramic-based friction material [J]. *Tribology*, 2012, 32(1):27-33. (in Chinese)
- [7] 杜建华,刘贵民,谢凤宽,等. 纳米 SiC 晶须增强铜基纳米复合材料摩擦学性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2009,23(1):7-11.
- DU J H, LIU G M, XIE F K, *et al.*. Study on the tribological performance of nano-SiCw reinforced Cu-based composites [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2009, 23(1): 7-11. (in Chinese)
- [8] 郭振山,王世斌,李林安,等. 纳米尺度金属薄膜在拉伸状态下的稳定性[J]. 光学精密工程,2011,18(9):2293-2299.
- GUO ZH SH, WANG SH B, LI L A, *et al.*. Effects of raw materials on wear performance of brake friction composites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,18(9):2293-2299. (in Chinese)
- [9] 荣皓,赵钢,褚家如. 用于热机械微纳加工的掺 Al 多晶硅加热器[J]. 光学精密工程,2011,18(1): 124-131.
- RONG H, ZHAO G, CHU J R. Al doped poly-Si micro-heater for thermomechanical fabrication of micro/nano structure [J]. *Opt. Precision Eng.*,

2011,18(1):124-131. (in Chinese)

- [10] 陈健,周柯,穆立文,等. 纳米铜粉粒径对 NAO 型摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 非金属矿, 2012,3(4):76-78.

CHEN J, ZHOU K, MU L W, *et al.*. Effect of copper particle size on friction and wear performance of NAO friction material [J]. *Non-Metallic Mines*, 2012,3(4):76-78. (in Chinese)

作者简介:



杜建华(1977—),男,山东嘉祥人,博士,助理研究员,1999 年于吉林工业大学获得学士学位,2003 年、2008 年于装甲兵工程学院分别获得硕士和博士学位,主要从事军用材料、粉末冶金摩擦材料和摩擦学方面的研究。E-mail: djh619@sian.com



李园园(1986—),女,安徽安庆人,硕士,2009 年于安徽工业大学获得学士学位,2013 年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事铜基摩擦材料方面的研究。E-mail:lify46@163.com



刘彦伟(1989—),女,山东菏泽人,硕士研究生,2011 年于山东理工大学获得学士学位,主要从事铜基粉末冶金摩擦材料修复及再制造研究。E-mail: ust-blyw@yahoo.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)