

磁场下 W-20Cu 复合材料的干摩擦学性能^{*}

王凤梅, 谢敬佩, 李 炎, 王爱琴, 马窦琴, 刘 舒

(河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 采用水热合成法制得纳米 W-Cu 复合粉末, 并在 1 050 °C 经热压烧结制备出 W-20Cu 复合材料。利用扫描电子显微镜(SEM)分析了 W-20Cu 的组织形貌、磨损形貌及磨屑, 并在室温下与 7075 铝合金配副进行磁场干摩擦磨损试验。结果表明: 水热合成-热压烧结法制得的 W-20Cu 复合材料的硬度达 215 HB, 电导率为 45% IACS。不加磁场时, W-20Cu 复合材料销磨损面黏附较厚的高含 Al 层, 磨屑呈螺旋状, 磨损机制主要为粘着磨损; 随着磁场强度的增加, 黏附层变薄, 销的磨损程度略微减弱而环的磨损加剧, 摩擦副的摩擦因数有减小趋势, 磨屑逐渐呈细小的碎片状及粒状, 磨损机制主要为粘着磨损和轻微的氧化磨损。

关键词: W-20Cu 复合材料; 磁场; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG115.58; TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)03-0076-05

Dry-sliding Tribological Characteristics of W-20Cu Composite Under of Magnetic Field

WANG Feng-mei, XIE Jing-pei, LI Yan, WANG Ai-qin, MA Dou-qin, LIU Shu

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan)

Abstract: W-20Cu compacts made from powders by hydrothermal synthesis method were prepared at 1 050 °C by hot press sintering. Wear tests between W-20Cu compacts and 7075Al in the magnetic field were carried out at room temperature. The microstructure of compacts, wear morphologies and wear debris were analyzed by scanning electron microscopy(SEM). Test results show that the hardness and conductivity of W-20Cu composite are 215HB and 45% IACS, respectively. Under non-magnetic field conditions, the worn surface of W-20Cu composite is adhered by thick Al layers, wear debris are spiral, and the main wear mechanism is adhesive wear. With increasing magnetic field intensity, the adhesion layer getting thinner, the magnetic field can slightly reduce the wear loss of W-20Cu compacts, however, aggravate the wear loss of 7075Al, and the friction coefficient of the friction pairs is reduced gradually. Wear debris are fragmented and get smaller gradually, and the main wear mechanism is adhesive wear and slightly oxidation wear.

Key words: W-20Cu composite; magnetic field; friction; wear

0 引 言

钨具有高熔点、高强度和低膨胀系数, 铜具有良好的导热导电性。由钨和铜组成的 W-Cu 复合材料兼有 W 和 Cu 的优点, 如耐高温、耐电弧烧蚀、强度高、导电导热性好等。因此, 它可广泛应用于机械和电子、军事和航空航天等领域^[1-4]。目前, 钨铜复合材料通常采用溶渗法和混

粉液相烧结法制备, 但是, 由于钨在液相铜中低的溶解度和钨铜界面高的润湿角, 材料难以烧结致密^[5]。而水热合成法可制备出均匀超细尺寸的复合粉末来促进液相烧结中的颗粒重排进而提高其致密度。赵晶晶等人^[6]采用水热合成法

收稿日期: 2014-02-28; 修回日期: 2014-03-26; 基金项目: * 国家自然科学基金(51371077)

作者简介: 王凤梅(1986—), 女(汉), 河南项城人, 硕士生; 研究方向: 钨铜复合材料摩擦磨损

网络出版日期: 2014-05-12 15:37; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140513.1048.002.html>

引文格式: 王凤梅, 谢敬佩, 李炎, 等. 磁场下 W-20Cu 复合材料的干摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(3): 76-80.

制备的钨铜氧化物复合粉体颗粒为 $2\sim 10\ \mu\text{m}$,且工艺简单、易操作等优点。

关于对钨铜复合材料磨损性能的研究国外开展的较早较多。C. Wenge, K 等人^[7-8]研究了 W-Cu 电接触材料的电弧侵蚀性能。Y. C. Lin^[9]等人研究了高耐磨的 W-Cu 电镀到灰铸铁上的可行性,应用于机床导轨材料来提高其耐磨性。如今随着电磁技术应用范围的扩大,越来越多的材料在电磁工况条件下服役,如电力机车、电磁炮等^[10]。所以探究钨铜复合材料的磁场干摩擦学性能的影响因素及其规律性就成为亟待解决的课题。因此,采用水热合成-热压烧结法制备 W-20Cu 复合材料,并与 7075 铝合金组成摩擦副进行磁场干涉下的摩擦磨损试验,研究其摩擦磨损特性。

1 材料与方法

1.1 W-20Cu 复合材料的制备

以钨酸铵和硝酸铜为原料,将其按 W-20Cu 质量分数配制,钨酸铵溶液以一定的速度缓慢地滴到硝酸铜溶液中,用转子搅拌,使溶液充分混合;将混合溶液装入反应釜并使之放进电热恒温鼓风干燥箱中进行干燥,设置温度为 $180\ ^\circ\text{C}$,时间 28 h;最后得到钨铜氧化物复合粉末前驱体。在氢气保护气氛下对制得粉末进行热压烧结,其具体工艺过程如下:以 $5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 $350\ ^\circ\text{C}$,保温 0.5 h;再以 $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度加热到 $850\ ^\circ\text{C}$,保温 0.5 h;然后以 $5\ ^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 $1\ 050\ ^\circ\text{C}$,保温 1.5 h 后随炉冷却至室温。

1.2 性能测试

采用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)观察钨铜还原后粉末形貌特征和烧结后 W-20Cu 组织结构特征。采用 D60K 数字金属电导率测量仪和 HB-3000B 型布氏硬度机对试样进行测试。

采用改进的 MPV-1500 型摩擦试验机对试样的磁场干摩擦磨损性能进行测试。采用通电绕组产生磁场,通过调整电压值获得不同的磁场强度。试验方式为销-环接触,销试样采用制备出的 W-20Cu 复合材料;根据电磁炮工况条件环试样选用 7075Al 合金,硬度为 150 HB。销、环试样尺寸和销-环接触方式示意图如图 1 所示。试验时,摩擦副在滑动速度 $1.0\ \text{m/s}$ 、载荷 $160\ \text{N}$ 、磁场强度 $0\sim 30\ \text{kA/m}$ 的范围内进行,磨损时间为 12 min。每次试验前,分别对试样销和环进行

超声波清洗(采用无水乙醇)和退磁处理。用精确度为 $0.1\ \text{mg}$ 的 BS210S 电子分析天平测量试样试验前后的磨损质量,算得磨损量,并通过公式(1)计算其磨损率 $\Delta W'$ 。为尽量减小误差,每组试验参数作两次平行试验,并计算其平均值。磨损率 $\Delta W'$ 和摩擦因数计算公式如下:

$$\Delta W' = \frac{W_{\text{前}} - W_{\text{后}}}{2\pi R \cdot n \cdot t} \quad (1)$$

式中, $\Delta W'$ 为磨损率, g/m ; W 为磨损量, g ; R 为试样外环摩擦半径, m ; t 为摩擦时间, min ; n 为盘试样的转速, r/min 。

$$\mu = \frac{M}{NR} \quad (2)$$

式中, M 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; R 为环试样半径, m ; N 为施加在销试样上的法向压力, N 。

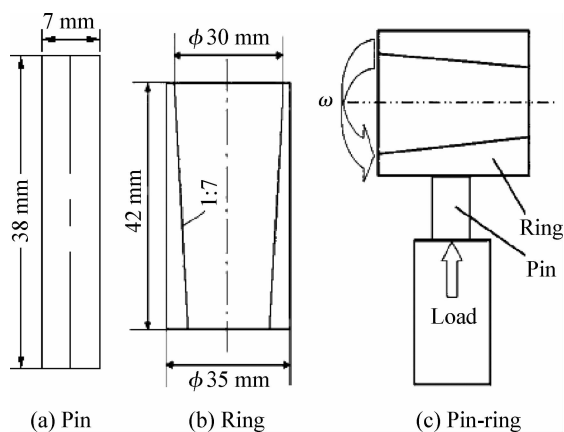


图1 销试样,环试样和销环接触方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of pin, ring and contact mode of pin-ring

2 结果与分析

2.1 显微组织

图 2(a) 为氢气还原后钨铜复合粉的组织形貌。由图可知,复合粉的粒子呈多边形,颗粒细小,有团聚现象。热压烧结 W-20Cu 复合材料试样的微观组织见图 2(b),合金组织中由钨和铜两相组成,白色为钨,黑色为铜,钨颗粒尺寸细小并均匀分布,致密化效果较好。测试表明,水热合成-热压烧结制得的 W-20Cu 硬度为 215 HB,电导率为 45% IACS。

2.2 摩擦面形貌及成分分析

图 3 为无磁场时, W-20Cu 销摩擦面的形貌

和 EDS 谱图。由图 4 可知,销摩擦面上黑色区域的物质主要为 Al 元素,原子分数达 96.44%,表明销摩擦面上黏附了较多的含 Al 元素物质;还可看出,高含 Al 黏附层很厚,呈现明显的台阶。

图 4 为磁场强度为 20 kA/m 时,W-20Cu 销摩擦面的形貌和 EDS 分析。分析可知,销摩擦面

上黑色区域的物质主要为 Al 元素,由黑色区域包围的白色物质主要含 W 元素,还含有部分 Al、Cu 元素。与图 3(a)相比,图 4(a)上的黑色区域明显减少、变薄,出现了含 W、Cu、Al 元素的白色区域,即与无磁场条件下相比,加磁场时 Al 元素逐渐脱离了 W-20Cu 销的摩擦面。

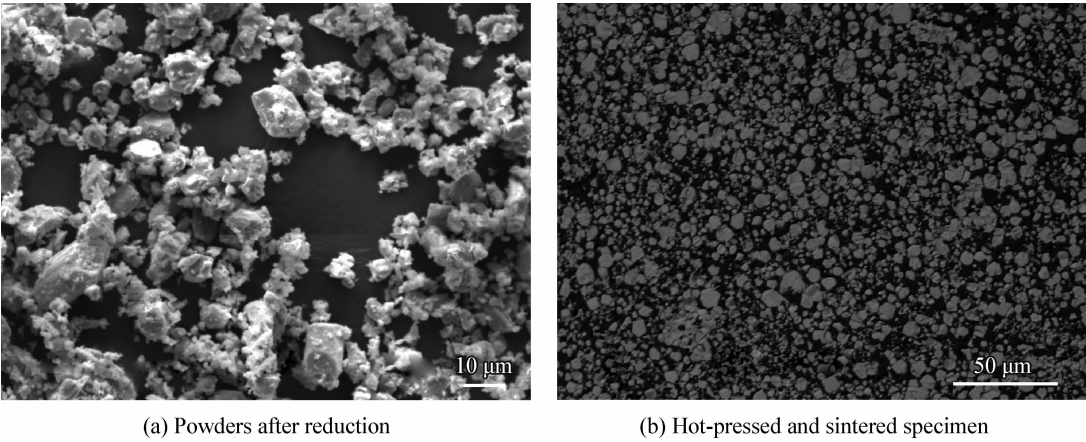


图 2 还原后钨铜粉体及热压烧结后的试样组织形貌

Fig. 2 Microstructure of W-Cu powders after reduction and the specimen after hot-pressed and sintered

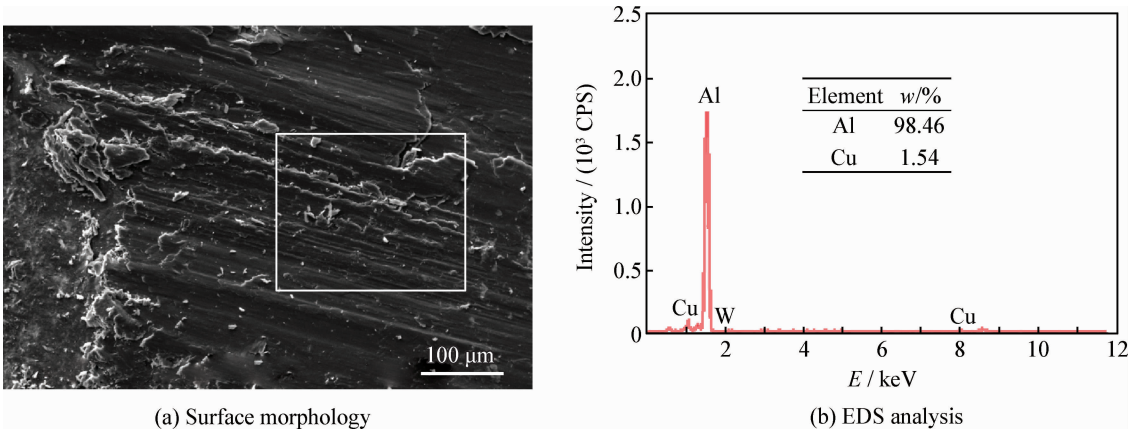


图 3 无磁场时 W-20Cu 销摩擦面的表面形貌和 EDS 分析

Fig. 3 Surface morphology and EDS analysis of frictional surface on W-20Cu pin at non-magnetic field conditions

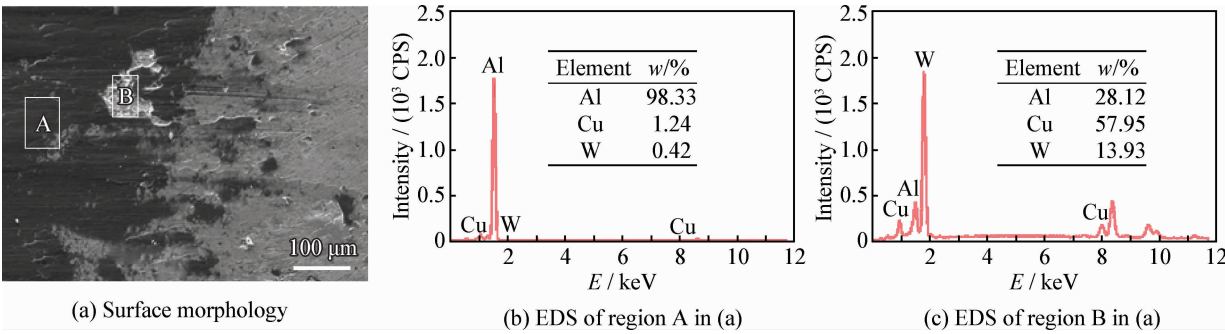


图 4 磁场强度为 20 kA/m 时 W-20Cu 销摩擦面形貌和能谱分析

Fig. 4 Surface morphology and EDS analysis of frictional surface on W-20Cu pin at the magnetic field of 20 kA/m

2.3 磨屑分析

磨屑是摩擦过程中摩擦副相互作用的必然产物,磨屑脱离摩擦面时带走大量热量,从冷却后的磨屑形态、大小、成分和组织结构可以大致推断摩擦过程的摩擦磨损机理^[11-12]。

图 5 不同磁场强度下磨屑的微观形貌及成分。由图 5(a)可知,不加磁场时,磨屑呈螺旋状,

主要成分为 Al,这可能是由于摩擦副相互接触的微凸体不断地形成粘着接点的延性好,被撕开并缩成螺旋形。随着磁场强度的增大,磨屑逐渐变为稍小的片状、细小的粒状(图 5(b)(c)),表明磁场能细化磨屑;除了富含 Al,还含有少量的氧等其他元素,说明发生了粘着磨损及轻微的氧化磨损。

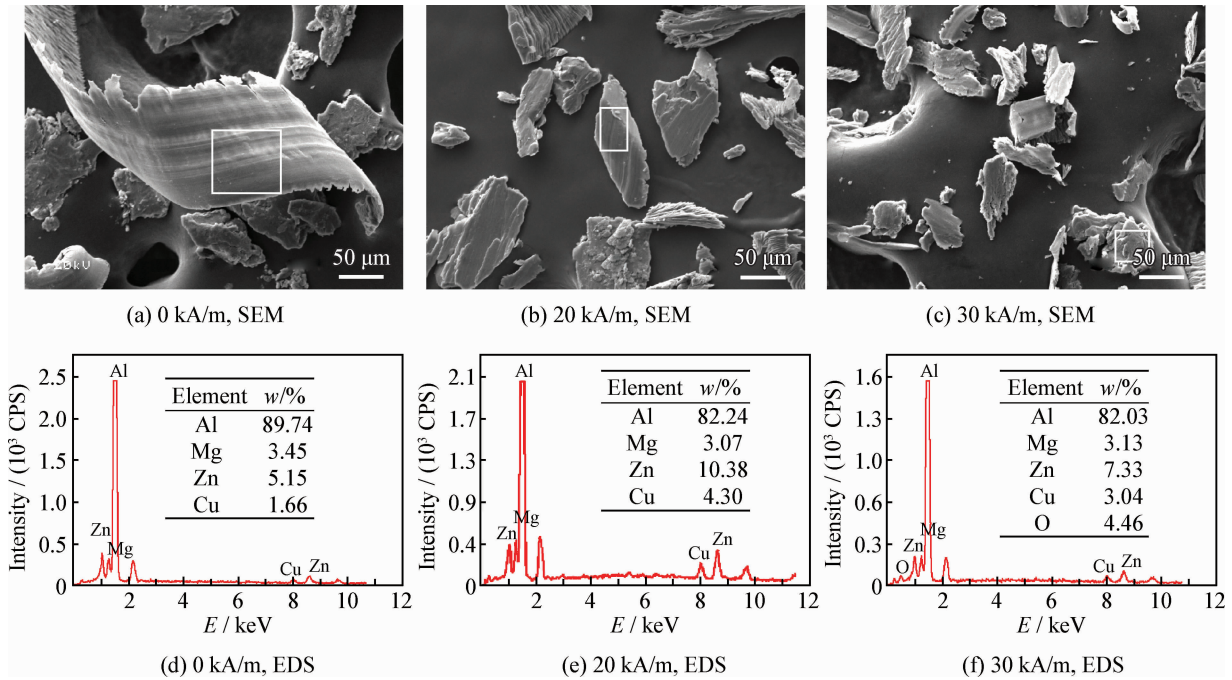


图 5 不同磁场强度下磨屑的 SEM 形貌和 EDS 分析

Fig. 5 SEM morphologies and EDS analysis of the wear debris under different magnetic field

2.3 摩擦因数及磨损率分析

图 6 为磁场对 W-20Cu/铝合金摩擦副磨损率的影响。由图 6 可知,与 W-20Cu 销相比,铝合金环的磨损率相对较大,且随着磁场强度的施加和增大,铝合金环的磨损率呈增大趋势,即加剧了铝合金环的磨损,而 W-20Cu 复合材料销的磨损率基本不变,细节上看,销的磨损率有略微减小趋势并为负值。分析认为,由于 W-20Cu 和 7075Al 均为顺磁性材料,磨损过程中产生较小的磁吸力可吸附少量的磨屑起到保护摩擦面的作用;又由于具有硬度大(215 HB),高耐磨性,而铝合金硬度较小,另外铝合金环试样尺寸较大,其摩擦面作圆周运动,而销试样固定不动,且摩擦接触面尺寸较小,这样摩擦过程中 W-20Cu 销试样可类似于车刀的作用对铝合金环进行车削磨损,同时由于重力和分子力的作用,产生的磨屑滞留于

销摩擦面上,致使铝合金磨屑粘附后 W-20Cu 销总体质量稍有增大,磨损率出现负值,即增重现象。而铝合金环基体失去磨屑保护直接参与磨损,

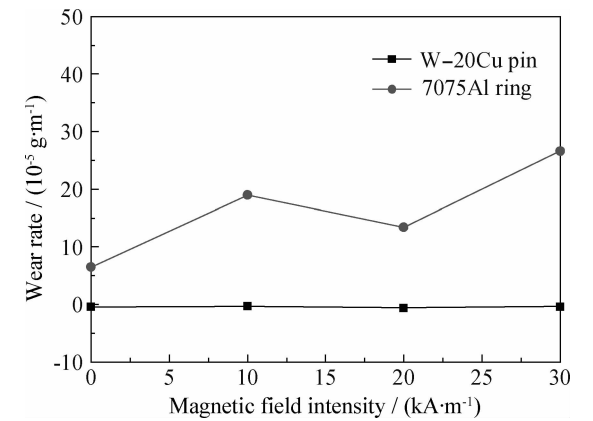


图 6 磁场对摩擦副磨损率的影响

Fig. 6 Influence of magnetic field on wear rate of the friction pairs

所以铝合金环的磨损率逐渐升高,摩擦面干净,并有犁沟出现。

图 7 为磁场对 W-20Cu/铝合金摩擦副摩擦因数的影响趋势。由图 7 可知,与无磁场相比,加磁场时摩擦副的摩擦因数总体呈减小趋势,当磁场强度小于 20 kA/m 时,摩擦副的摩擦因数随着磁场强度的增大而减小,当磁场强度大于 20 kA/m 时,摩擦副的摩擦因数随着磁场强度的增大而增大,但仍小于无磁场时摩擦副的摩擦因数。即当磁场强度为 20 kA/m 时,摩擦副的摩擦因数最小,表明磁场的施加和增大有利于提高 W-20Cu/铝合金摩擦副的减磨降磨性能。分析可知,不加磁场时, W-20Cu 销黏附较厚的高含 Al 层,磨屑呈螺旋状,摩擦副的摩擦因数较大,磨损机制主要为粘着磨损;随着磁场的施加和增大,黏附层变薄,铝元素逐渐脱离了 W-20Cu 销的摩擦面,改善了摩擦表面的接触状态,导致摩擦副的摩擦因数减小,磨屑中含少量的氧元素,并逐渐呈细小的碎片状及粒状,表明磁场减弱了粘着磨损并出现氧化磨损。

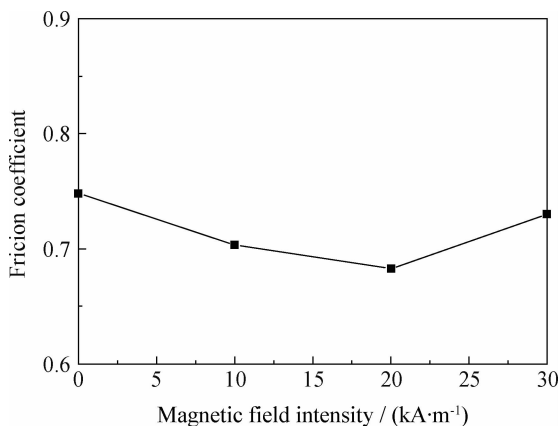


图 7 磁场对摩擦副摩擦因数的影响

Fig. 7 Influence of magnetic field on friction coefficient of the friction pairs

3 结 论

(1) 采用水热合成-热压烧结法制得的 W-20Cu 复合材料的硬度达 215 HB, 电导率为 45% IACS。

(2) 在载荷 160 N、线滑动速度 1.0 m/s 下,磁场的施加和增大, W-20Cu 销的磨损略微减弱,铝合金环的磨损加剧,摩擦副的摩擦因数有减小趋势。

(3) 与无磁场相比,磁场减弱了粘着磨损,磨屑有螺旋状变为细小片状及粒状。

参考文献

- [1] Hashempour M, Razavizadeh H, Rezaie H. Investigation on wear mechanism of thermochemically fabricated W-Cu composites [J]. Wear, 2010; 405-415.
- [2] 范景莲, 刘涛, 朱松, 等. W-Cu 复合材料制备新技术与发展前景 [J]. 硬质合金, 2011, 28(1): 56-72.
- [3] 黄伯云, 李成功, 石力开, 等. 中国材料工程大典第 5 卷有色金属材料工程(下) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 823.
- [4] 波斯特尼柯夫 S N. 摩擦和切削及润滑中的电物理及电化学现象 [M]. 章慈定, 译. 北京: 国防工业出版社, 1983: 236-251.
- [5] 杨华. 高比重钨-铜复合材料制备及性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [6] 赵晶晶, 李继文, 张盘龙, 等. 水热合成法制备细颗粒钨铜氧化物复合粉体 [J]. 粉末冶金工业, 2013, 23(4): 52-54.
- [7] Wen G C, Zhan Y K, Hong F S, et al. Arc erosion behavior of a nanocomposite W-Cu electrical contact materials [J]. Rare Metals, 2006, 25(1): 37-42.
- [8] Wen G C, Zhan Y K, Bing J D. Preparation and arc breakdown behavior of anocrystalline W-Cu electrical contact materials [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2005, 21(6): 875-878.
- [9] Lin Y C, Wang S W, Wu K E. The wear behaviour of machine tool guideways clad with W-Ni, W-Co and W-Cu using gas tungsten arc welding [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 172: 158-165.
- [10] 魏永辉, 张永振, 陈跃. 磁场干涉对不同磁性材料干摩擦学特性的影响 [J]. 中国机械工程, 2012, 48(23): 102-110.
- [11] 袁建辉, 祝迎春, 雷强, 等. 等离子喷涂制备 WC-Co-Cu-BaF₂/CaF₂ 自润滑耐磨涂层及其高温摩擦性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 31-36.
- [12] 张永振. 材料的干摩擦学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 52-54.

作者地址: 河南洛阳洛龙区开元大道 263 号 471023
河南科技大学开元校区材料学院 315 信箱
Tel: (0379) 6427 7369 (谢敬佩)
E-mail: xiejp@mail.haust.edu.cn

(责任编辑: 陈茜)