

# 离心铸造高铅锡青铜合金摩擦磨损性能研究

刘越<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 吕文玲<sup>2</sup>

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 鞍钢重型机械有限责任公司, 辽宁鞍山 114021)

**摘 要:** 采用离心铸造方法制备了高铅锡青铜(ZCuPb22Sn1.5)合金,研究了载荷和摩擦速度对其摩擦磨损性能的影响及摩擦磨损机理.研究发现:在0.05 m/s摩擦速度下,随着载荷的增加,高铅锡青铜合金摩擦系数减小,磨损率增加,当载荷增加到120 N后,摩擦系数趋于稳定;在100 N载荷下,随着摩擦速度的增加,摩擦系数逐渐减小,磨损率增加,摩擦速度增加到0.10 m/s以后,摩擦系数迅速减小,到0.20 m/s以后摩擦系数趋于稳定;当继续增加载荷和摩擦速度时,由于铅润滑膜的破坏而增加了磨损率.在摩擦磨损过程中容易在摩擦表面形成软质铅润滑膜从而起到耐磨作用.

**关 键 词:** 高铅锡青铜;离心铸造;摩擦磨损;载荷;黏着磨损

**中图分类号:** TH 142.3, TH 117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)03-0338-05

## Study on Friction and Wear Properties of High Lead Tin-Bronze Alloy by Centrifugal Casting

LIU Yue<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>, LYU Wen-ling<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Angang Heavy Machinery Co., Ltd., Anshan 114021, China. Corresponding author: LIU Yue, E-mail: liuyue@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** High lead tin-bronze (ZCuPb22Sn1.5) was produced by centrifugal casting method. The friction and wear properties of the materials were investigated at fixed loads and friction speed, and the wear mechanisms were also analyzed. The results showed that the wear rate increases and the friction coefficient decreases with the increasing the load, the friction coefficient decreases rapidly and then trends to be stable as the loads increases to 120 N when the friction speed is below 0.05 m/s. Similarly, at the loads of 100 N the wear rate increases and the friction coefficient decreases with the increase of the friction speed when the friction speed increases to 0.10 m/s, the friction coefficient decrease rapidly, and then trends to be stable as the friction speed increases to 0.20 m/s. Then, with the increase of the fixed loads and friction speed, the solid lubrication film is damaged, the wear of the materials is severe and the wear rate unstably increases. In the process of friction and wear the Pb solid lubrication film on the worn surface is stable, and the materials have good antifricion and lower wear.

**Key words:** high lead tin-bronze; centrifugal casting; friction and wear resistance; load; adhesion wear

低速重载滚动轴承是冶金、矿山、电力等大型设备上的重要耐磨零件,在工作运行中既要承受较大的压力、冲击载荷和交变应力,又要经受摩擦、磨损、较高温度的作用和多种介质的腐蚀作用<sup>[1-2]</sup>.其质量的优劣直接影响到这些机械的工况和使用寿命,一旦发生故障会严重影响生产,相应的维修费用贵,零件更换周期长,会导致较大经

济损失.为保证对偶轴及整机的可靠性和使用寿命,要求轴瓦材料要具有良好的耐磨性和稳定性.高铅锡青铜合金由于具有耐磨性能好、热传递性好、承载能力强、耐热性优等优良性能而被用作滑动轴承轴瓦材料<sup>[3]</sup>.人们关于铅含量分数低于10%的锡青铜合金在不同载荷、滑动速度<sup>[4-6]</sup>、温度<sup>[7-8]</sup>,以及摩擦副材料<sup>[9]</sup>等条件下的摩擦磨损

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 辽宁省科技创新重大专项(201404001); 沈阳市科技计划项目(F13-316-18).

作者简介: 刘越(1960-),男,辽宁沈阳人,东北大学教授.

性能探讨已进行了大量的研究工作,而关于铅含量分数高于20%的离心铸造高铅锡青铜合金在不同载荷和摩擦速度下的摩擦磨损性能及磨损机理研究方面还需做深入的研究.本文研究了离心铸造高铅锡青铜(ZCuPb22Sn1.5)合金摩擦磨损行为,探索其在60~140 N不同载荷以及0.05~0.25 m/s不同摩擦速度下的耐磨机理,这对于优化合金成分设计具有指导作用,并对指导生产具有现实意义.

## 1 试验材料及方法

离心铸造高铅锡青铜(ZCuPb22Sn1.5)合金材料成分(质量分数)中Sn为1%~3%,Pb为21%~23%,S为0.01%,余量为Cu.加入2.5%的PbS防止离心铸造过程中铅偏析现象,铸型预热温度为200~300℃,浇注温度为1080~1120℃,离心机转速为810 r/min.浇注后快速冷却到200℃,脱模获得铸件.

销盘摩擦磨损试验在MMU-10G摩擦磨损试验机上进行.摩擦副选择淬火45号钢环,粗糙

度小于0.2 μm,硬度为45HRC,试样尺寸为 $\phi 4.8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 的圆柱形销,硬度为48.5 HV,3个销试样为一组进行试验.测试摩擦速度0.05 m/s下,不同载荷60,80,100,120,140,160 N销试样的摩擦系数和磨损量,以及相同载荷100 N不同摩擦速度0.05,0.10,0.15,0.20,0.25 m/s条件下销试样的摩擦系数和磨损量,试验时间均为30 min.试验机的智能检测系统自动记录试验摩擦系数,磨损率用质量磨损率来表示,摩擦系数和磨损率均为三次试验后取平均值.用SSX-500扫描电镜表征试样磨损后的磨痕形貌,用EDS能谱确定磨屑成分.

## 2 结果与讨论

### 2.1 载荷对离心铸造高铅锡青铜摩擦磨损性能的影响

离心铸造高铅锡青铜合金试样在摩擦速度0.05 m/s,不同载荷下的平均摩擦系数和磨损率分别如图1a,1b所示.观察载荷对摩擦系数和磨损率的影响.

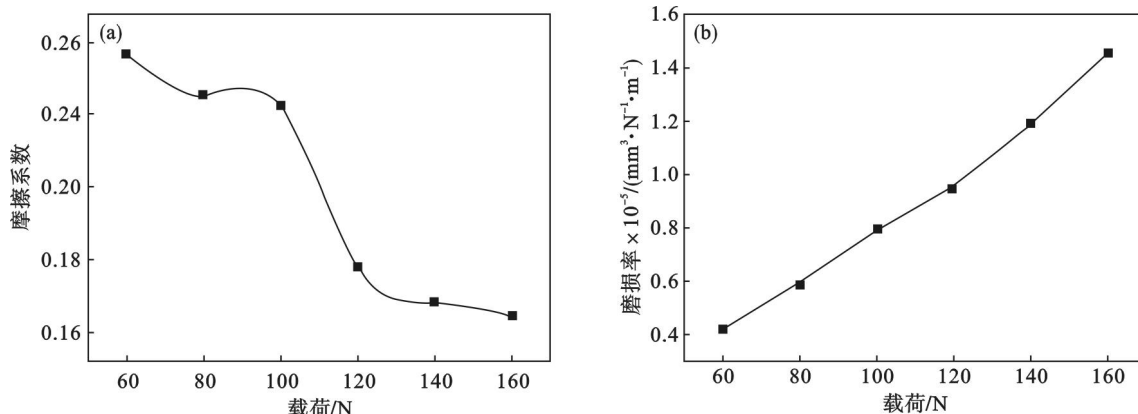


图1 0.05 m/s摩擦速度下载荷对摩擦系数和磨损率的影响

Fig. 1 Effects of load on friction coefficient and wear rate at 0.05 m/s

(a)—摩擦系数; (b)—磨损率.

从图1可以看出,在试验载荷范围内,高铅锡青铜合金的整体摩擦系数较小,均低于0.26,随着载荷的增加,合金摩擦系数减小,磨损率增加.根据图1a的摩擦系数曲线走势,将摩擦系数曲线分为60~100 N,100~120 N,120~160 N三个部分,100,120和140 N三个典型载荷下的磨损表面形貌如图2所示.

载荷小于100 N时(100 N,见图2a),销试样的磨损表面较平滑,有很少量的凹槽及磨屑,是因为随着摩擦磨损的进行,高铅锡青铜材料在与摩擦副相互作用时,由于摩擦升温及变形挤压的共

同作用,游离态的铅会逐渐被挤出铜合金材料表面,并在摩擦副表面展开形成连续的第三体——软质铅润滑膜<sup>[10]</sup>,使得磨损表面光滑,减小了铜合金基体与摩擦副的接触面积<sup>[11]</sup>,并且此载荷不至于使润滑膜破坏而形成磨屑,此时磨损机制以轻微黏着磨损为主.

载荷在100~120 N范围时(120 N,见图2b),销试样摩擦表面出现了大量的片状第三体润滑膜,这是由于摩擦升温及变形挤压的共同作用,使铜合金摩擦表面变软,与被挤出铜合金材料表面的游离态的铅形成一层第三体的润滑膜.当

载荷超过 100 N 后,随着摩擦试验的进行,第三体润滑膜在摩擦表面逐渐增多,到 120 N 时,广泛地

覆盖在摩擦表面,润滑膜的 SEM 形貌及 EDS 能谱见图 3. 图中白色部分为铅。

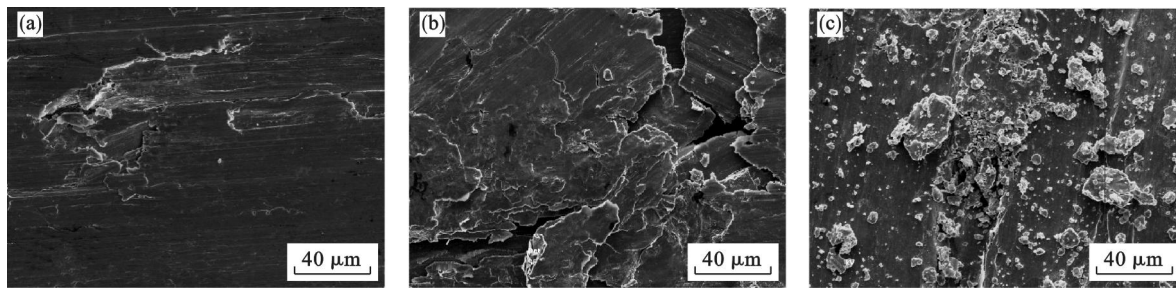


图 2 0.05 m/s 条件下不同载荷销试样磨损表面微观形貌

Fig. 2 The SEM morphology of the worn surface at different loads under the speed of 0.05 m/s

(a)—100 N; (b)—120 N; (c)—140 N.

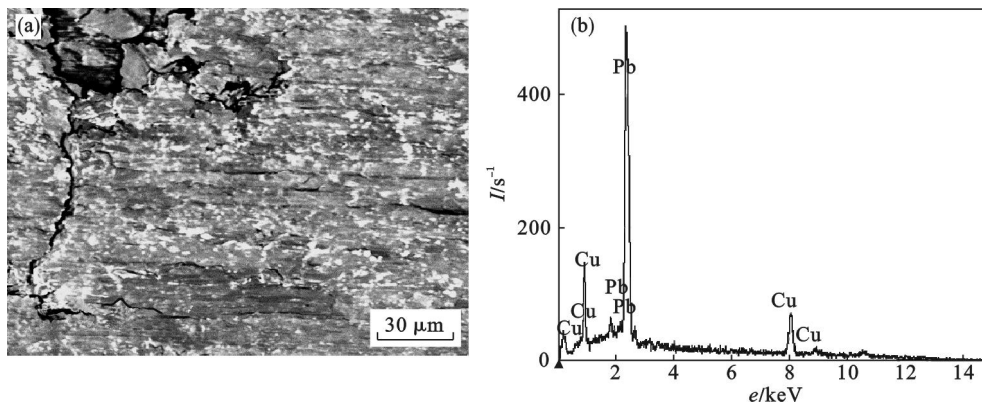


图 3 0.05 m/s, 120 N 载荷条件下与 ZCuPb22Sn1.5 对磨的摩擦副表面铅润滑膜 SEM 及 EDS

Fig. 3 The SEM and EDS morphologies of the Pb solid lubrication film on the worn surface at 0.05 m/s, 120 N

(a)—SEM; (b)—EDS.

载荷超过 120 N (140 N, 见图 2c) 以后,对于磨损率,轻载时摩擦表面上的微凸体下的塑性区相互独立,而随着载荷的增大摩擦副的真实接触面积和接触的微凸体数量增加并且塑性区连成一片,相互作用,使轻微磨损转变为严重磨损,造成磨损率的增大. 销试样的磨损表面开始出现沿滑动方向的犁沟和润滑膜破碎形成的磨屑. 这是因为在较大载荷下,一方面,磨损表面局部区域产生裂纹,裂纹扩展导致润滑膜脆性断裂剥落,断裂剥

落的磨屑作为磨粒加剧磨损,造成磨粒磨损<sup>[11-12]</sup>;另一方面,销试样中的铅不断被挤压出来,从而形成润滑膜,润滑膜形成后又被破坏,因此摩擦系数没有较大的变化而磨损率会不断增加. 此时磨损机制以黏着磨损和磨粒磨损为主.

## 2.2 速度对离心铸造高铅锡青铜摩擦磨损性能的影响

100 N 载荷条件下,不同摩擦速度的平均摩擦系数和磨损率如图 4 所示,在摩擦速度 0.05 ~

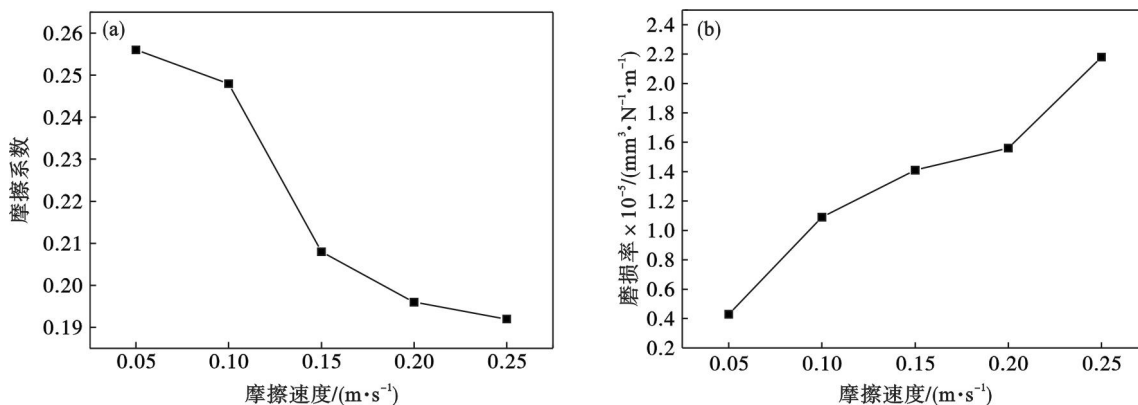


图 4 100 N 载荷条件下摩擦速度对摩擦系数和磨损率的影响

Fig. 4 Effects of friction speed on friction coefficient and wear rate at the load of 100 N

(a)—摩擦系数; (b)—磨损率.



0.25 m/s 范围内离心铸造 ZCuPb22Sn1.5 合金的摩擦系数整体较小,且随着摩擦速度的增加,摩擦系数逐渐减小,磨损率增加。摩擦速度增加到 0.10 m/s 以后,合金摩擦系数减小幅度加快,到 0.20 m/s 以后摩擦系数减小幅度很小。

在摩擦磨损试验过程中,高铅锡青铜材料在与摩擦副相互作用时,由于摩擦热及变形挤压的共同作用,游离态的铅会逐渐被挤出铜合金材料表面,并在摩擦副表面展开形成连续的软质铅润滑膜,软质铅润滑膜减小了铜合金基体与摩擦副的接触面积,从而降低摩擦副的摩擦系数。摩擦速度增加到 0.10 m/s 以后,随着摩擦速度提高,摩擦能耗增加,摩擦热增加,低熔点的铅更容易变软,有利于铅润滑膜的形成。

### 2.3 不同速度下磨损表面形貌及磨损机理讨论

图 5 给出了 ZCuPb22Sn1.5 在载荷 100 N、不同摩擦速度下销试样磨损表面微观形貌。图 5a 为摩擦速度 0.10 m/s 时的磨损表面,可以看出销试样磨损表面比较平滑,有少量的片状润滑膜和磨屑开始出现,这个速度下的磨损为轻微的黏着和磨粒磨损。当摩擦速度增大时(0.20 m/s,见图 5b),销试样的磨损表面润滑膜增多,磨屑减小。这是由于随着摩擦速度提高,摩擦能耗增加,摩擦热增加,低熔点的铅更容易变软,有利于铅润滑膜

的形成。这个速度下的磨损以黏着磨损为主。摩擦速度进一步增大(0.25 m/s,见图 5c),销试样的磨损表面出现沿滑动方向的犁沟和磨屑,磨屑较多。这是由于达到 0.25 m/s 后,润滑膜继续增加的量很少,摩擦系数降低的趋势减小,并且随着试验的进行,形成的铅润滑膜也会由于疲劳而出现裂纹,进而破坏形成磨屑,造成磨粒磨损。

ZCuPb22Sn1.5 合金在载荷 100 N、不同摩擦速度下磨屑的 SEM 微观形貌如图 6 所示。其中图 6a,图 6b,图 6c 分别为摩擦速度 0.10, 0.20, 0.25 m/s 时的磨屑形貌。在摩擦磨损过程中,由于力和热分布不均匀,以及材料组元热膨胀系数的差异,磨损表面产生了一系列微裂纹,表面裂纹一旦形成,在反复摩擦过程中将扩张、传播,形成磨屑,磨屑又作用在磨损表面,加剧材料的磨损程度<sup>[13]</sup>。在 0.10 m/s 较小摩擦速度下,铅润滑膜分布不均匀,磨屑由较大的片状组成,磨屑中的成分主要是 Cu, Pb, Fe, O, 成分中含有微量的氧,说明磨损表面已经开始有微量的氧化,成分中含有少量的 Fe,说明摩擦副材料已经转移到试样销的材料上,说明此过程发生了轻微的黏着磨损。随着摩擦速度增大到 0.20 m/s,铅润滑膜均匀分布在摩擦副表面,此时的磨屑主要为片状,摩擦系数降低幅度较大,磨损率的增加有所减缓;当速度继续增

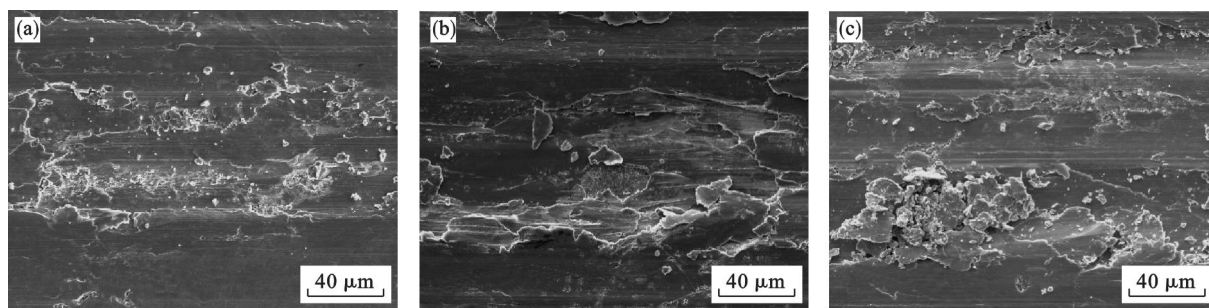


图 5 60 N 载荷不同摩擦速度下销试样磨损表面微观形貌

Fig. 5 The SEM morphology of the worn surface at different friction speeds under the load of 60 N

(a)—0.10 m/s; (b)—0.20 m/s; (c)—0.25 m/s.

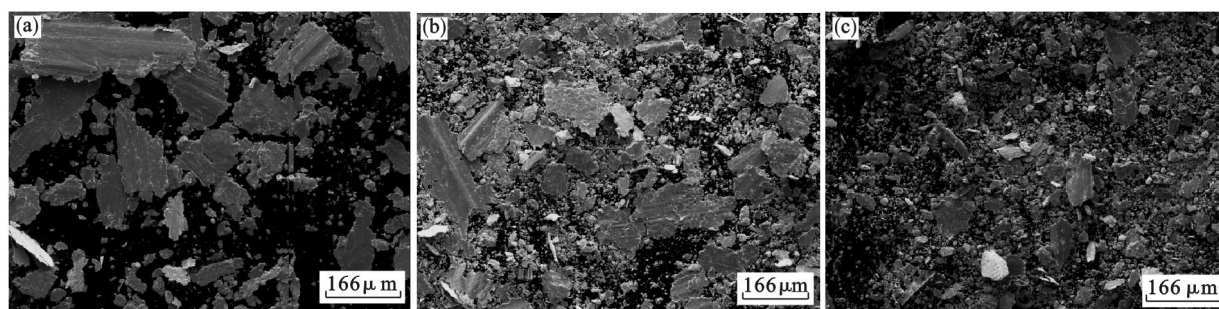


图 6 不同摩擦速度下的磨屑形貌

Fig. 6 The SEM morphology of the wear debris at different speeds

(a)—0.10 m/s; (b)—0.20 m/s; (c)—0.25 m/s.

大到 0.25 m/s 时,由于表面膜的破碎,滞留的颗粒成为硬质颗粒嵌入铜基体中,发生严重的磨粒磨损,磨损量增加的幅度变大,磨屑呈碎末状,并且数量较前两种速度下更多(见图 6c)。

### 3 结 论

1) 离心铸造的高铅锡青铜(ZCuPb22Sn1.5)合金具有优良的减摩作用,摩擦磨损过程中容易在摩擦副表面形成软质铅润滑膜,优化了合金的耐磨性。

2) 在 0.05 m/s 摩擦速度下,随着载荷的增加,合金摩擦系数减小,磨损率增加,当载荷增加到 120 N 后,摩擦系数趋于稳定;60 ~ 100 N 载荷内磨损机制以轻微黏着磨损为主,100 ~ 120 N 载荷内磨损机制以黏着磨损为主,120 ~ 160 N 载荷内磨损机制以黏着磨损和磨粒磨损为主,适用载荷为 120 N 以内。

3) 在 100 N 载荷下,随着摩擦速度的增加,摩擦系数逐渐减小,磨损率增加,摩擦速度增加到 0.10 m/s 以后,摩擦系数迅速减小,到 0.20 m/s 以后摩擦系数趋于稳定。摩擦速度在 0.05 ~ 0.10 m/s 内磨损机制为轻微的黏着和磨粒磨损;摩擦速度在 0.10 ~ 0.20 m/s 内磨损机制以黏着磨损为主;摩擦速度在 0.20 ~ 0.25 m/s 内磨损机制为磨粒磨损。适用摩擦速度为小于 0.20 m/s。

#### 参考文献:

- [1] Kayaba T. A study of the wear and friction of some bearing materials [J]. *Wear*, 2008, 8(5): 173 - 181.
- [2] Nagata M, Fujita M. Evaluation of tribological properties of bearing materials for marine diesel engines utilizing acoustic emission technique [J]. *Tribology International*, 2012, 46(6): 183 - 189.
- [3] 田荣璋,王祝堂. 铜合金及其加工手册[M]. 湖南:中南大学出版社, 2002: 18 - 19.  
(Tian Rong-zhang, Wang Zhu-tang. Alloy of copper and the process handbook [M]. Hunan: Press of Central South University, 2002: 18 - 19.)
- [4] Kestursatya M, Kim J K. Wear performance of copper-graphite composite and a leaded copper alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 339 (24): 150 - 158.
- [5] 韩晓明,高飞,宋宝韞,等. 摩擦速度对铜基摩擦材料摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 1 - 8.  
(Han Xiao-ming, Gao Fei, Song Bao-yun, et al. Effect of friction speed on friction and wear performance of Cu- matrix friction materials [J]. *Tribology*, 2009, 29(1): 1 - 8.)
- [6] 王观民,张永振,杜三明. 二氧化碳气氛下钢铜摩擦副摩擦磨损特性研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32 (2): 66 - 68.  
(Wang Guan-min, Zhang Yong-zhen, Du San-ming. Study on friction and wear of steel-copper couples in carbon dioxide atmosphere [J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32 (2): 66 - 68.)
- [7] 尹延国,俞建卫,李卫荣,等. 铜铅轴承材料减摩耐磨性能及其温度的影响[J]. 金属功能材料, 2009, 12(6): 20 - 25.  
(Yin Yan-guo, Yu Jian-wei, Li Wei-rong, et al. Influence of temperature on friction and wear properties of Cu-10Sn-10Pb anti-friction composite materials [J]. *Metallic Functional Materials*, 2009, 12(6): 20 - 25.)
- [8] 王静波,吕晋军,宁莉萍,等. 锡青铜基自润滑材料的摩擦学特性研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(3): 110 - 113.  
(Wang Jing-bo, Lyu Jin-jun, Ning Li-ping, et al. Study on the tribological behavior of bronze-matrix self-lubricating composites [J]. *Tribology*, 2001, 21(3): 110 - 113.)
- [9] Pandey J P, Prasad B K. Sliding wear response of a leaded-tin bronze: influence of the counterface material characteristics [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1998, 42(7): 122 - 129.
- [10] Eriksson M, Jacobson S. Tribological surfaces of organic brake pads [J]. *Tribology International*, 2000, 33 (12): 817 - 827.
- [11] 何奖爱,王玉玮. 材料磨损与耐磨材料[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2001: 2 - 8.  
(He Jiang-ai, Wang Yu-wei. Wear of materials and wear resistant materials [M]. Shenyang: Press of Northeastern University, 2001: 2 - 8.)
- [12] 符蓉,高飞,宋宝韞,等. 铜 - 石墨材料摩擦学行为研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(5): 479 - 484.  
(Fu Rong, Gao Fei, Song Bao-yun, et al. Tribological behavior of copper-graphite friction materials [J]. *Tribology*, 2010, 30(5): 479 - 484.)
- [13] Huseyin T. Adhesive wear resistance of Cu-Sn-Zn-Pb bronze with additions of Fe, Mn and P [J]. *Materials Letters*, 2005, 59 (12): 1463 - 1469.