

文章编号: 1004 - 0609(2004) 06 - 0917 - 05

新型铸造铝青铜的润滑摩擦性能^①

徐建林¹, 陈 超², 喇培清³, 王智平¹, 李海兰¹, 刘明朗¹, 朱小武¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050;

3. 中国科学院 兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 对新型高强度、高耐磨铝青铜合金(代号 HSWAB)在润滑条件下的摩擦性能进行了分析。结果表明, HSWAB 合金的高耐磨性主要取决于其显微组织, 在润滑条件下磨损失效形式主要为磨粒磨损与粘着磨损。由于 HSWAB 合金基体强度高, 强化相呈弥散分布, 在润滑摩擦过程中形成高强度的骨架和光滑的支撑面, 磨粒细小、圆整、数量少; 在润滑及骨架与光滑面的支撑作用下, 粘着磨损不能进一步发展, 并且合金在摩擦过程中无氧化与裂纹现象产生。

关键词: 铝青铜; 摩擦性能; 润滑条件

中图分类号: TG 111.5

文献标识码: A

Lubrication friction performance of new as-cast aluminum bronze

XU Jian-lin¹, CHEN Chao², LA Pei-qing³, WANG Zhi-ping¹,

LI Hai-lan¹, LIU Ming-lang¹, ZHU Xiao-wu¹

(1. State Key Lab of Gansu New Non-ferrous Metal Materials,
Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Mechanic-Electronic Engineering,
Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou 730050, China;

3. State Key Lab of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academic of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The friction properties and friction mechanism of a new high strength and wear-resistant aluminum bronze named HSWAB alloy were analyzed in detail under lubrication condition. The results show that the high wearability of HSWAB alloy primarily depends on its microstructure. The major wear mechanisms are attrition wear and adhesive wear when HSWAB alloy against 45[#] steel under lubrication condition. Because HSWAB alloy has high hardness metal matrix and small dispersion strengthening phases, in lubrication friction, the matrix and some strengthening phases become a high strength skeleton body and smooth bearing plate, another strengthening phase becomes abrasive particles that are small, near-spherical and their number is small. Because of lubrication oil, supporting effect of skeleton body and smooth bearing plate, the adhesive wear can't further develop. The oxidation phenomenon and crack initiation on wear surface of HSWAB alloy were not found.

Key words: aluminum bronze; friction performance; lubrication condition

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(ZS032 - B25 - 029); 教育部“春晖计划”资助项目

收稿日期: 2003 - 10 - 10; 修订日期: 2003 - 12 - 10

作者简介: 徐建林(1970 -), 男, 副教授, 博士研究生。

通讯作者: 徐建林, 副教授; 电话: 0931 - 2741998; E-mail: ggdlxu@sina.com

铝青铜是机器制造中最值得注意的结构材料,主要是以铜-铝系为基的合金。仅由铜、铝元素构成的是二元铝青铜,为了改善某些性能,常在二元铝青铜中添加铁、锰、镍等元素形成多元铝青铜。早在20世纪初,人们就已经对铝青铜进行了初步的研究。在20世纪50年代,随着大规模的工业化生产和研究的进一步深入,铝青铜已成为现代工业应用极其广泛的一种新型铜合金^[1-3]。铝青铜具有许多优良的性能,如高的强度、硬度、耐磨性和抗蚀性,被广泛用来制造螺旋桨、阀门、齿轮坯料、螺纹等零件^[4-6]。

随着现代工业技术的飞速发展,进一步提高铝青铜材料的使用性能一直是研究人员追求的目标,其中提高耐磨性就是一项重要目标。仅太原钢铁公司每年由于轧机所用的铝青铜丝母的磨损失效就造成了上千万元的损失^[7]。许多学者对不同组织、状态的铝青铜的摩擦性能进行了研究,如硬度对铝青铜耐磨性的影响、残余应力对层错能及粘着磨损的影响、钢/铜摩擦副的选择性转移现象等^[8-12]。这些研究对铝青铜的进一步应用提供了理论依据。本文作者主要研究了自主开发的一种高强度、高耐磨铝青铜合金(代号 HSWAB)^[13]在润滑条件下的摩擦性能。

1 实验

HSWAB 合金的名义化学成分(质量分数)为: 78.87% Cu, 13.37% Al, 3.67% Fe, 1.09% Mn, 0.29% Ni 和其它微量合金元素。炉料采用工业纯铜、纯铝、纯铁、纯锰和其它添加剂,在100 kW 中频感应电炉中熔炼,采用双铂铑热电偶测温。熔化中严格控制各组元的加入温度、加入顺序、加入量、加入方法和熔化速度,经除气精炼后铸成合格锭坯。

试样性能测试全部按照中国国家标准进行。采用40 t 液压万能试验机进行拉力试验;采用 HD1-187.5 型洛布维三用硬度计测定硬度;采用 Digaku D/max-2400 型 X 射线衍射仪对试样作物性分析。采用备有 X 射线能谱仪的 HITACH TS-502 型扫描电子显微镜对试样的显微组织、微区成分、磨损形貌进行分析。

摩擦实验在 RFT-II 型往复摩擦磨损试验机上进行。圆柱试样为 $d\ 8\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 铝青铜合金,块状试样为 $10\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 长方形的 45[#] 钢(淬火态,硬度为 HRC 48)。润滑油采用 20[#] 机油。用万分之一天平测量磨损率。

2 结果与分析

2.1 铸态显微组织

铝青铜的平衡组织可按照 Cu-Al 相图确定,含铝 13% 左右的铝青铜平衡组织应为 $(\alpha + \gamma_2) + \gamma_2$ 。在铸造条件下 HSWAB 合金由于添加了其它合金元素,该合金的显微组织发生了变化。图 1 所示为在实验条件下 HSWAB 合金的显微组织。经 X 射线衍射分析(如图 2 所示)可知该合金由 α 、 β' 、 γ_2 、 κ 相构成。其中 β' 相是高温 β 相在实际铸造的冷却条件下由于共析转变抑制而形成的过冷 β 相,它们是同素异构体。 β' 相是一种介稳定组织,类似于钢中的马氏体。在图 1 中可看到晶界处存在 γ_2 相,它是以 Cu_9Al_4 化合物为基的固溶体,属于硬脆相。 γ_2 相的存在虽然可提高合金的硬度,但很容易造成合金塑性的降低,尤其要避免其形成网状结构。显微组

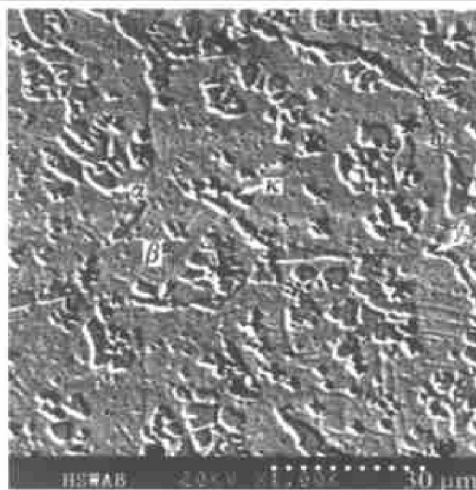


图 1 HSWAB 合金显微组织

Fig. 1 Microstructure of HSWAB alloy

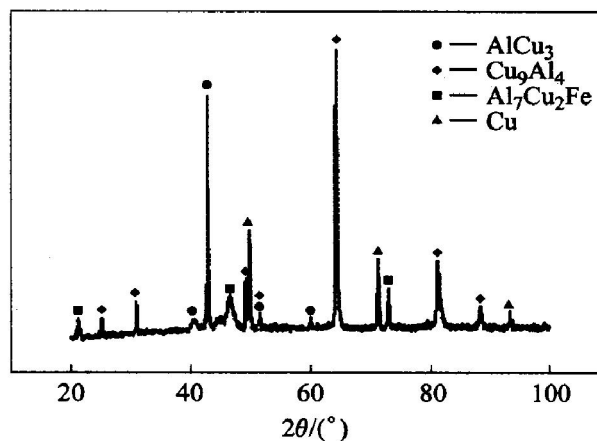


图 2 HSWAB 合金铸态下的 X 射线衍射谱

Fig. 2 XRD pattern of as-cast HSWAB alloy

织中的 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 也就是俗称的 κ 相,它具有很高的

硬度(≥ 700 HV), 在合金中呈点状的弥散分布, 可提高合金的性能。在 κ 相周围还存在以铜为基的 α 固溶体, 这是由于 κ 相的析出使周围区域富 Cu 而贫 Fe、Al 等元素而形成的。 α 相为面心立方晶格, 有较高的强度和塑性。因此, HSWAB 合金的显微组织特征为在强度、硬度较高的 β 基体中弥散分布着硬度很高的 κ 相、 γ_2 相和具有一定塑性的 α 相。

2.2 润滑条件下的耐磨性

图 3(a) 所示是 HSWAB 合金在载荷为 300 N、摩擦速度为 0.6 m/s 情况下摩擦因数随时间的变化曲线。该曲线表明, 摩擦在初始跑合阶段, 摩擦因数随摩擦时间的增加急剧上升, 达到最高点后迅速下降, 然后摩擦因数趋于稳定, 即此时为稳定磨损阶段。图 3(b) 和 (c) 所示为摩擦因数与磨损率随载荷与滑动速度的变化曲线。在低载荷情况下, 合金试样基体中的软相不足以发生弹性微变形或变形量极小, 合金组织中的软相和硬相基本上保持较平整的状态, 几乎全面积接触, 故轻载时摩擦因数比较大。随着载荷的增大, 合金组织中的软相发生弹性微变形, 出现一些因硬相脱落而产生的小凹坑。这些凹坑可以贮存润滑油, 因而摩擦因数减小。但随着载荷的进一步增大, 油膜遭受破坏而导致摩擦因数进一步上升; 在低速摩擦时, 温升缓慢, 润滑油可充分充满摩擦面; 但在高速摩擦时, 油膜破坏快, 润滑油不能及时补充, 从而导致摩擦因数在一定速度下达到最小值。磨损率则随载荷和滑动速度的增加而逐渐增大。

2.3 磨损表面分析

图 4 所示是 HSWAB 合金在载荷 300 N、滑动速度 0.6 m/s 的摩擦条件下的表面磨损形貌。从图 4 可看出, 磨损后的表面特征主要有 4 点: 1) 沿滑动方向上存在着明显的犁沟; 2) 在犁沟旁边存在着光滑的承载面, 该面边缘形状为舌状形貌, 说明该区域在摩擦力的作用下发生了塑性变形, 边缘部位在往复的摩擦中形成不同方向的变形, 但在该区域没有发现裂纹的存在, 说明无脆性断裂现象; 3) 存在着大小不等的凹坑, 这些凹坑是合金中硬质点相脱落与存在粘着磨损而形成的, 这些凹坑在润滑摩擦中可起到储存润滑油的作用; 4) 表面上存在着片状磨屑和粒状磨粒。此外, 在摩擦表面上未发现明显的氧化现象。

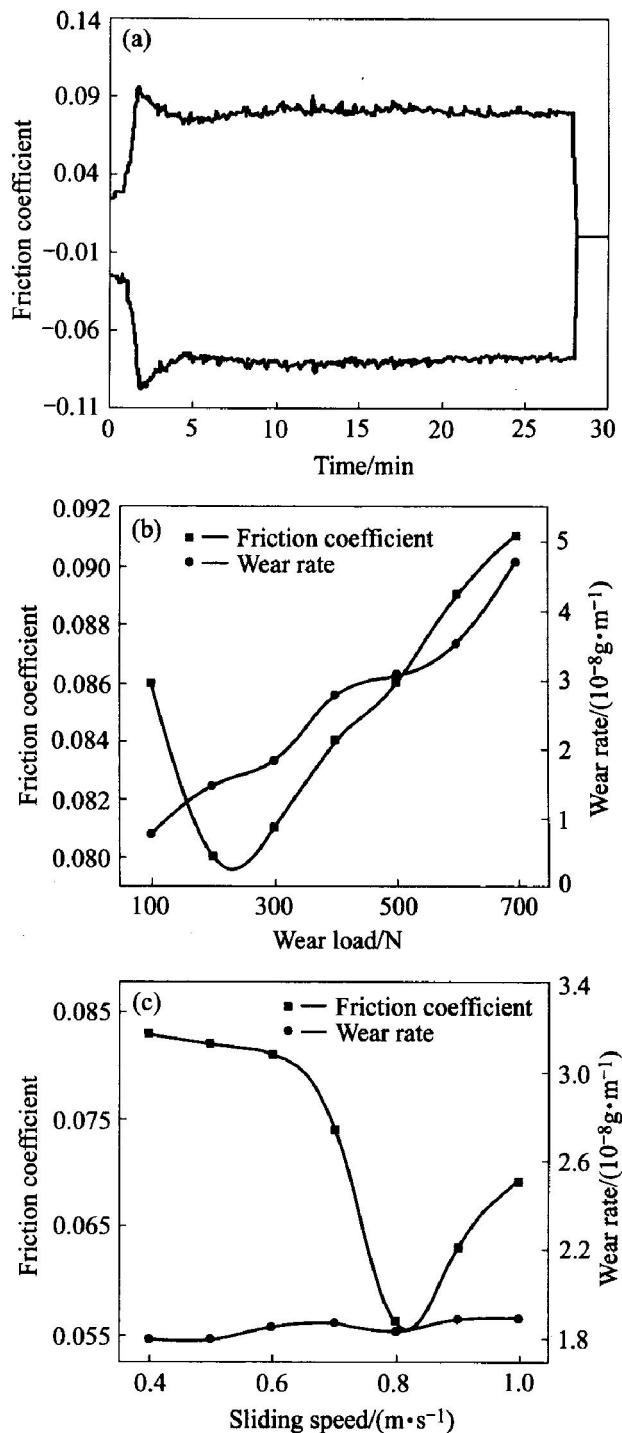


图 3 摩擦因数与磨损率随滑动速度的变化曲线

Fig. 3 Curves of friction coefficient vs time(a), friction coefficient and wear rate vs wear load(b) and vs sliding speed(c)

2.4 粘着剪切与材料的转移

摩擦偶件表面不论加工如何精密, 微观上仍是凹凸不平的。因此, HSWAB 与 45[#] 钢在滑动摩擦时其表面上的一些微凸体会穿过油膜发生接触。这种接触由于接触面积小、承载压力大导致微凸体发生塑性变形。由于短程力的作用, 两接触面上的原子会因原子键的结合作用而形成粘着结点。粘着结

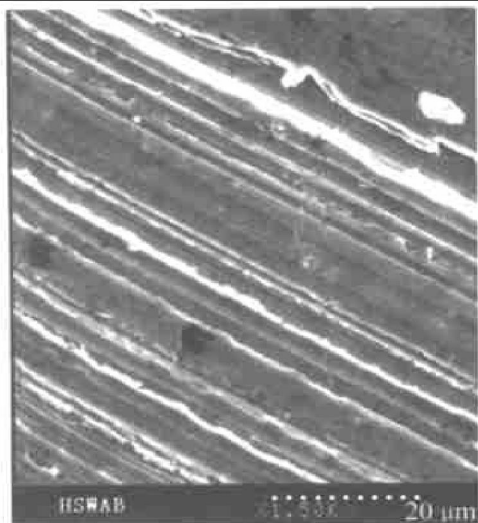


图4 HSWAB合金表面磨损形貌

Fig. 4 Morphology of worn surface of HSWAB

点的剪切强度一般大于铜的剪切强度而小于钢的剪切强度，在切向力的作用下使铜表面产生粘着脱落。脱落区域一般为 α 相，这主要表现在 α 相与钢的粘着力大于它与 β' 相、 γ_2 相和 κ 相的粘着力^[14, 15]。被剪切的 α 相在继续摩擦过程中形成磨屑，该磨屑在反复的摩擦过程中被碾压成片状。图4中右上角的片状白色物通过微区成分分析也证明其为富铜相。根据粘着理论，摩擦界面之间产生的材料转移现象是粘着剪切的必然结果。由于在粘着过程中HSWAB合金中的 α 相被剪切，该剪切物也会粘附于45#钢表面，在其表面会扩散到45#钢中去。图5所示是对45#钢表面的铜元素进行面分布

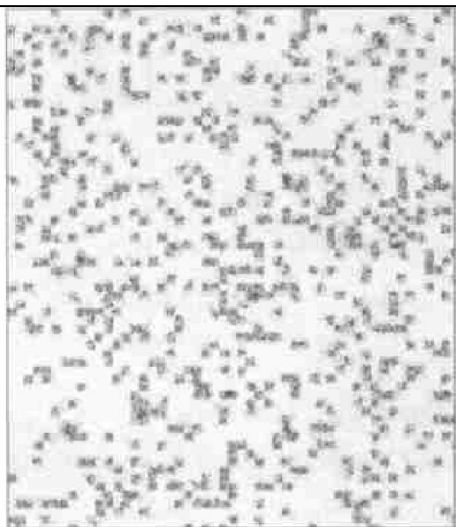


图5 Cu元素在45#钢表面的分布

Fig. 5 Distribution of Cu on wear surface of 45# steel

扫描的检测结果。由图5可看出在45#钢表面含有较多的铜元素，铜元素还在一些区域形成聚集状，

这可能是与HSWAB中的 α 相粘附的部位。这也从另一方面表明了HSWAB中的 α 相产生了粘着剪切、扩散的现象。但是，由粘着而产生的磨损并不严重，其原因主要是因为较硬的 β' 相、 γ_2 相和 κ 相在基体中起着支撑骨架的作用，同时在光滑承载面的辅助下，使基体中的 α 相不能与45#钢发生进一步的粘着。同时，由于粘着形成的凹坑对储存润滑油有利，也降低了粘着磨损。

2.5 磨粒磨损与微切削

HSWAB合金与45#钢对摩时，部分硬质点相（如 κ 相和 γ_2 相）会从 β' 相中脱落，脱落的硬质点相会成为磨粒。该磨粒在法向载荷的作用下嵌入到HSWAB合金的表面中，并在摩擦力的作用下沿着摩擦方向产生运动。运动的磨粒会对基体产生犁沟或微切削作用。大部分磨粒把材料推向两边或前缘，这样会在犁沟两侧或前沿产生隆起的犁皱。犁皱在继续的摩擦中也可能产生再次的变形，形成了塑性变形区。该区域在法向载荷的作用下被压平，经过如此反复的塑性变形造成该区域产生加工硬化，最后形成光滑的支撑面。在图4中可观察到犁沟中存在磨粒，对该磨粒进行微区成分分析也证明其为硬质点相。由此看出，磨粒磨损主要是由于脱落的硬质点相造成的结果。当磨粒形状和迎角合适时，也会产生微切削作用。在摩擦表面也可观察到在一些划痕的一侧比较光滑，而另一侧则有滑动的台阶，有些还会发生卷曲的现象，如图6所示。但是，这种微切削产生的概率一般来说比较小，主

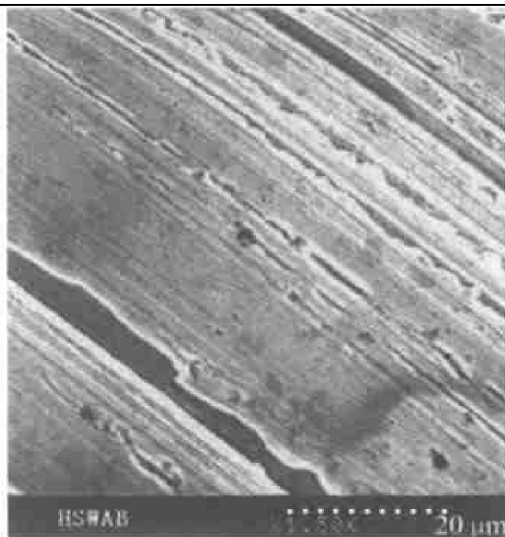


图6 HSWAB合金表面的微切削形貌

Fig. 6 Micro-cutting morphology of HSWAB

要原因是磨粒的棱角并不像真正的刀具有非常锋利的刀刃，棱角也不可能时时保持与摩擦运动方向相

一致,磨粒与被磨材料表面之间的夹角太小,也只有局部高应力状态下可能产生,这些都说明尽管微切削现象存在,但它在整个磨损中产生的概率不大。磨粒磨损也与磨粒的硬度、大小、形状和数量有关。如果硬质点相呈细小球状弥散分布,并能很好地镶嵌入基体中,则可降低磨粒磨损。

3 结论

1) 在润滑条件下,HSWAB合金具有小的摩擦因数和磨损率,磨损失效形式主要为粘着磨损与磨粒磨损。

2) 在润滑条件下,HSWAB合金与45[#]钢对摩后摩擦表面由犁沟、光滑的支撑面、凹坑和磨粒、磨屑等组成。

3) 由于HSWAB合金基体硬度高,硬质点相呈细小粒状的弥散分布,使基体具有很好的承载能力,凹坑的储油性与基体的骨架支撑使粘着磨损不能深入发展。

4) HSWAB合金摩擦表面无氧化磨损以及无脆性氧化物脆断(无裂纹扩展),减小了氧化磨损。

REFERENCES

- [1] Callcut V A. Aluminum bronze for industrial use[J]. Metals and Materials, 1989, 5(3): 128 - 132.
- [2] 邓忠民. Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的时效强化[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(Suppl. 1): 278 - 282.
DENG Zhong-min. Aging strengthening of Cu-5Ni-4Sn-3Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9 (Suppl. 1): 278 - 282.
- [3] Anonymous. Basic of design engineering: Bronze and copper-alloy bearings[J]. Machine Design, 1995, 27(15): 126 - 127.
- [4] Sadayappan M, Zavadil R, Sakoo M. Mechanical properties of aluminum bronze alloy C95400[J]. AFS Transactions, 2001, 109: 745 - 758.
- [5] 李元元, 郭国文, 张卫文, 等. 合金元素对 Al-Cu 合金热裂倾向的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11 (5): 791 - 795.
LI Yuan-yuan, GUO Guo-wen, ZHANG Wei-wen, et al. Effects of alloying elements on hot tearing trends of Al-Cu alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11 (5): 791 - 795.
- [6] ZHANG Wei-wen, NGAI Tungwai Leo, XIA Wei, et al. Influence of heat treatment on tribological behaviors of novel wrought aluminum bronze[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2002, 12(4): 770 - 774.
- [7] 张玉平, 孙 钢, 张 琰. 含硅铝青铜及其热处理[J]. 铸造设备研究, 1996(5): 17 - 18, 37.
ZHANG Yu-ping, SUN Gang, ZHANG Yan. Silicon and aluminum bronze and heat treatment[J]. Research of Foundry Equipment, 1996(5): 17 - 18, 37.
- [8] Reid J V, Schey J A. The effect of surface hardness on friction[J]. Wear, 1987, 118: 113 - 125.
- [9] Rohatgi A, Vecchio K S, Gray G T III. The influence of stacking fault energy on the mechanical behavior of Cu and Cu-Al alloys: Deformation twinning, work hardening, and dynamic recovery[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32A(1): 135 - 145.
- [10] 浩宏奇, 丁华东, 李雅文, 等. 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 Hong-qi, DING Hua-dong, LI Ya-wen, et al. 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.
- [11] 曹中秋, 刘 焱, Gesmundo F. 显微组织对 Cu-Cr-Ni 合金高温氧化行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 394 - 397.
CAO Zhong-qiu, LIU Yan, Gesmundo F. Effect of microstructure on high-temperature oxidation of Cu-Cr-Ni alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11 (3): 394 - 397.
- [12] LI Yuan-yuan, ZHANG Da-tong, NGAI Tungwai Leo, et al. Diffusion couple between high strength wear-resisting aluminum bronze and machining tools materials[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(1): 6 - 10.
- [13] XU Jian-lin, WANG Zhi-ping, CHEN Chao, et al. Research of a new high-strength aluminum bronze alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18(5): 24 - 31.
- [14] 高彩桥. 金属的摩擦磨损及其热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985, 16 - 17.
GAO Cai-qiao. Metal Friction, Wear and Heat Treatment [M]. Beijing: China Machine Press, 1985, 16 - 17.
- [15] NGAI Tungwai Leo, XIA Wei, ZHANG Da-tong, et al. Tool wear mechanism in turning of novel wear-resisting aluminum bronze[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(1): 165 - 169.

(编辑 何学锋)