

铸造铝青铜合金 Cu-14Al-4Fe-Mn 的 摩擦磨损性能

徐建林¹, 喇培清², 陈 超³, 路 阳¹, 王智平¹, 李海兰¹, 刘明朗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, 甘肃 兰州 730050;

2 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, 甘肃 兰州 730000;

3 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 用往复式摩擦磨损试验机考察了新型高强度、高耐磨性铸造铝青铜合金 Cu-14Al-4Fe-Mn(代号 HSWAB) 的摩擦磨损性能, 利用形貌扫描电子显微镜观察分析了合金磨损表面形貌, 探讨了其磨损机理。结果表明, HSWAB 合金在干摩擦和油润滑条件下的摩擦磨损性能及磨损机理存在明显差异。在干摩擦条件下, 合金中脱落的硬质点及氧化物等磨粒导致较为严重的磨粒磨损, 摩擦系数高、磨损率大, 主要磨损机理为磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损及疲劳磨损。在油润滑条件下, 摩擦系数和磨损率均显著降低, 疲劳磨损和氧化磨损受到抑制, 主要磨损机理为磨粒磨损和粘着磨损。Cu-14Al-4Fe-Mn 合金在油润滑条件下的摩擦系数低达 0.08, 磨损率低达 3.7×10^{-6} g/m, 是一种优良的耐磨材料。

关键词: 铝青铜合金; 摩擦磨损性能; 磨损机理

中图分类号: TG111.5; TH117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)05-0438-05

铸造铝青铜是 20 世纪初发展起来的合金材料, 它具有很高的强度、一定的塑性、耐磨性和耐腐蚀性优良, 已在船舶螺旋桨、阀门、模具、齿轮坯料及螺纹等零部件中得到了广泛应用^[1~3]。然而, 因铝青铜磨损失效造成的经济损失巨大, 如太原钢铁公司每年因轧机用铝青铜丝母磨损失效造成的经济损失超过千万元^[4]。因此, 提高铝青铜合金的耐磨性一直是相关科研人员奋斗的目标。近 30 年来, 针对铝青铜摩擦性能的研究不断深入, 有关研究涉及硬度对铝青铜耐磨性的影响^[5,6], 残余应力对层错能及粘着磨损的影响^[7], 以及钢/铜摩擦副的选择性转移等^[8]。这为铝青铜摩擦学性能的进一步研究提供了基础。本文作者研制了一种高强度、高耐磨性的铸造铝青铜合金 Cu-14Al-4Fe-Mn^[9], 并考察了其在干摩擦和润滑条件下的摩擦磨损性能, 旨在进一步提高铸造铝青铜材料的耐磨性并扩大其应用范围。

1 实验部分

Cu-14Al-4Fe-Mn 合金(简称 HSWAB)的化学成分(质量分数计, 下同)为 78.87%Cu, 13.37%Al, 3.67%Fe, 1.09%Mn, 0.29%Ni, 其它(微量合金元

素)。采用工业纯铜、纯铝、纯铁、纯锰和其它添加剂作为炉料, 在 100kW 中频感应电炉中熔炼, 采用双铂铑热电偶测温。熔化过程中严格控制各组分的加入温度、加入顺序、添加量、添加方法和熔化速度, 经除气精炼后铸造成合格锭坯。利用机械切割和打磨将锭坯制成试样。试验铝青铜和 ZQAL9-4 合金进行摩擦磨损性能对比试验。

按照国家标准测定试样的力学性能^[10]。采用 40t 液压万能试验机测定拉伸强度; 采用 HD1-187.5 型布洛维三用硬度计测定硬度; 采用 D igaku D/max-2400 型 X 射线衍射仪(XRD)分析试样的物相组成; 采用配备 X 射线能谱仪(EDXA)的 Hitachi-502 型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微组织及磨损表面形貌, 并测定微区成分。

在 RFT-III 型往复摩擦磨损试验机上评价试样在干摩擦和润滑条件下同 45[#] 配副时的摩擦磨损性能。上试样为 $\phi 30$ mm $\times$ 30 mm 的铝青铜合金圆柱, 下试样为 10 mm $\times$ 14 mm $\times$ 70 mm 的 45[#] 钢块(淬火, 硬度 48HRC); 接触形式为面接触。试验条件: 室温大气环境, 载荷为 300 N、速度为 0.6 m/s。试验时间为 30 min, 干摩擦或 20[#] 机油润滑; 采用滴油润滑方式,

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: 2003-10-08; 修回日期: 2004-02-20/联系人徐建林, email: ggdlx@sina.com.

作者简介: 徐建林, 男, 1970 年生, 博士研究生, 副教授, 目前主要从事材料科学与计算机应用研究。

每 40 s 滴油 1 滴 采用精度为 0.1 mg 的分析天平测量试样的磨损质量损失, 进而经计算得到磨损率

2 结果与分析

2.1 铸态显微组织和力学性能

利用 Cu-Al 状态图, 根据不同组成可以确定铝青铜的平衡组织, 其中铝含量为 13% 左右的铝青铜平衡组织应为 $(\alpha + \gamma_2) + \gamma_2$ 图 1 示出了铸造 HSWAB 合金



Fig 1 Microstructure of HSWAB

图 1 HSWAB 合金显微组织 SEM 照片

的显微组织 XRD 分析结果 (见图 2) 表明该合金由 α

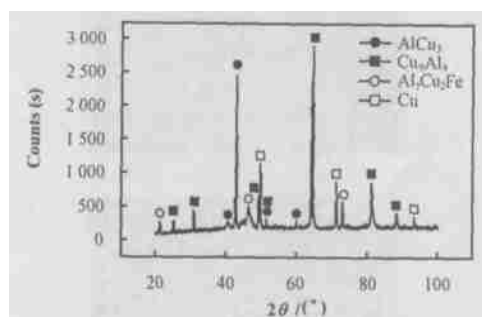


Fig 2 EDXA spectrum of HSWAB

图 2 铸态 HSWAB 合金 XRD 图谱

β' 、 γ_2 及 κ 相构成, 其中 β' 相是由高温 β 相过冷形成的同素异构体, 为介稳组织, 类似于钢中的马氏体; γ_2 相为硬脆相, 存在于晶界处, 是以 Cu_9Al_4 化合物为基体的固溶体, 其虽可提高合金的硬度, 但易导致合金塑性降低, 故必须避免其形成网状结构; 显微组织中的 $\text{Al}_2\text{Cu}_2\text{Fe}$ 即是 κ 相, 其具有很高的硬度 ($\geq 700\text{HV}$), 在合金中呈点状弥散分布, 可提高合金的性能; 在 κ 相周围还存在以铜为基体的 α 固溶体, 这是由于 κ 相析出使得周围区域富 Cu, 而 Fe 和 Al 等元素含量较低所致; α 相为面心立方晶格, 强度和塑性较高 因此, HSWAB 合金的显微组织特征为: 在强度、硬度较高的 β' 基体中弥散分布硬度很高的 κ 相、 γ_2 相和具有一

定塑性的 α 相 该合金的抗拉强度为 564 MPa, 延伸率为 0.8%, 硬度为 340HBS.

2.2 干摩擦下的摩擦磨损性能

图 3 示出了干摩擦条件下 HSWAB 合金的摩擦

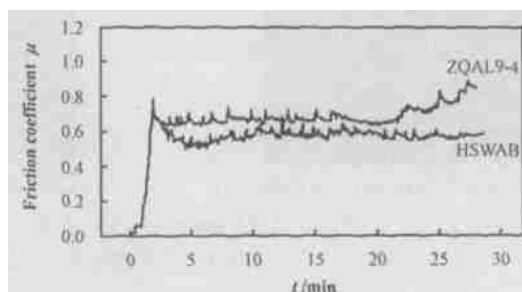


Fig 3 Friction coefficient vs time

图 3 HSWAB 摩擦系数-时间曲线

系数随试验时间变化的关系曲线 可以看出, 在初始跑合阶段, 摩擦系数随试验时间延长急剧上升, 达到最高点后迅速降低并进入相对稳定阶段 在稳定阶段, 摩擦系数呈现小幅度不规则波动, 不会对实际应用带来不利影响 HSWAB 合金的干摩擦系数约为 0.55, ZQAL9-4 的约为 0.65

图 4 示出了干摩擦条件下 HSWAB 合金磨损表面形貌 SEM 照片 可以看出, HSWAB 合金磨损表面主要呈现 4 个特征: 磨损表面沿滑动方向存在宽约为 7 μm 的犁沟, 呈现明显的磨粒磨损特征; 磨损表面存在磨粒、磨屑及大小不等的凹坑; 磨损表面犁沟两侧较为光滑, 边缘部位存在裂纹; 磨损表面局部存在氧化膜, 且氧化膜呈现明显的断裂特征 其中磨粒主要来源于 3 个途径: 首先, HSWAB 合金中的 κ 相从基体 β' 相中脱落形成磨粒 [见图 4(a) 左上角因硬质点脱落形成彗星状划痕]; 其次, 在磨损表面局部区域产生裂纹, 裂纹扩展导致局部脆性断裂剥落, 断裂剥落的磨屑作为磨粒加剧磨粒磨损; 第三, 磨损表面形成的氧化物膜可发生断裂、脱落, 从而成为磨粒 [见图 4(c)] 而导致磨粒磨损和氧化磨损 磨粒在法向载荷的作用下嵌入到 HSWAB 合金表面, 并在压应力和切应力作用下沿滑动方向运动, 从而对磨损表面产生犁沟或微切削作用, 并在犁沟两侧或前沿产生隆起的犁皱, 犁皱在后续摩擦过程中可发生变形而形成塑性变形区, 反复的塑性变形导致加工硬化, 并使磨损表面变光滑 [见图 4(b)]

合金磨损表面的凹坑主要源于硬质相 (κ 相) 脱落及粘着磨损 脱落区域一般为 α 相, 这是由于 α 相与钢的粘着力大于其与 β' 相、 γ_2 相和 κ 相的粘着力所致^[12] 被剪切的 α 相在反复摩擦过程中形成磨屑 总



Fig 4 SEM morphologies of the worn surface of HSWAB alloy under dry sliding

图 4 干摩擦条件下 HSWAB 合金磨损表面形貌 SEM 照片

体而言, HSWAB 合金在干摩擦条件下的摩擦系数较高, 磨损形式主要包括磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损和疲劳磨损

2.3 润滑状态下的摩擦磨损性能

图 5 对比出了 HSWAB 合金和 ZQAL 9-4 合

磨粒磨损 但油润滑下的摩擦力显著降低, κ 相受到的剪切作用明显减弱, 从基体中脱落的可能性降低, 由 κ 相脱落形成的磨粒减少, 故油润滑下的犁沟和微切削减轻[见图 6(a)] 与此同时, 油润滑摩擦力波动

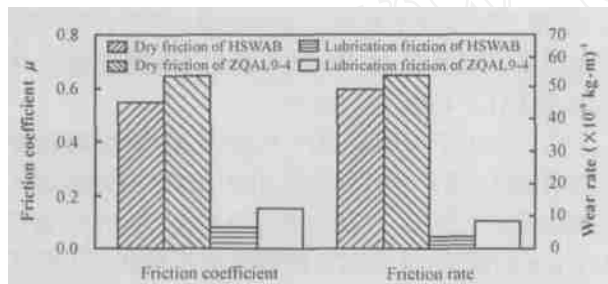


Fig 5 Comparison of friction and wear behaviors of HSWAB alloy and ZQAL 9-4 alloys at dry and oil-lubricated conditions

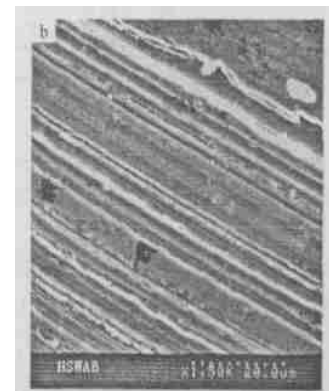
图 5 HSWAB 合金和 ZQAL 9-4 合金在干摩擦和油润滑下的摩擦磨损性能对比

金在干摩擦和润滑条件下的摩擦磨损性能 可以看出, Cu-14Al-4Fe-Mn 合金在干摩擦和油润滑条件下的平均摩擦系数分别为 0.55 和 0.08, 磨损率分别为 $49.259 \times 10^{-6} \text{ g/m}$ 和 $3.7 \times 10^{-6} \text{ g/m}$; ZQAL 9-4 合金在干摩和油润滑条件下的平均摩擦系数分别 0.65 和 0.15, 磨损率分别为 $53.678 \times 10^{-6} \text{ g/m}$ 和 $8.33 \times 10^{-6} \text{ g/m}$. HSWAB 合金的减摩抗磨性能优于 ZQAL 9-4 合金

图 6 示出了润滑状态下 HSWAB 合金磨损表面形貌 SEM 照片. 可以看出, 在油润滑条件下, HSWAB 合金磨损表面同样呈现犁沟、微切削及凹坑等特征; 但油润滑下磨损表面的犁沟较细小(宽约为 $4 \mu\text{m}$)、无裂纹、凹坑数量比干摩擦下磨损表面的凹坑数量少得多. 在油润滑条件下, HSWAB 合金中的部分 κ 相依然会从基体中脱落而形成磨粒, 从而导致



(a) Overall worn surface (200 ×)



(b) Overall worn surface (1 500 ×)

Fig 6 SEM morphologies of the worn surface of HSWAB under oil-lubricated condition

图 6 油润滑下 HSWAB 合金磨损表面形貌 SEM 照片

很小, 裂纹不易萌生和扩展, 故合金磨损表面不产生裂纹, 无疲劳磨损迹象. 而油润滑同样可以减轻粘着磨损, 其原因在于, HSWAB 合金中的 α 相同 45# 钢粘着后形成的小凹坑有利于储油, 从而阻断合金中的

α 相同 45[#] 钢的接触 而油膜在降低摩擦副接触表面温度的同时还能隔绝 HSWAB 合金同空气中氧的接触, 从而抑制氧化磨损, 因此 HSWAB 合金在润滑条件下几乎不发生氧化磨损 总体而言, HSWAB 合金在油润滑下的摩擦系数和磨损率比干摩擦下低得多; 磨损机理则主要为磨粒磨损和粘着磨损

此外, 同干摩擦下的磨损表面形貌不同, 油润滑下 HSWAB 合金磨损表面出现片状磨屑[见图 6(b) 右上角的白色片状区域] 这种片状磨屑源自 HSWAB 合金中的 α 相同 45[#] 钢的粘着及其从基体的脱落, EDXA 分析结果表明其主要为富 Cu 相 我们推测, 干摩擦下合金磨损表面之所以难以形成片状磨屑, 原因在于干摩擦下摩擦力波动较大, 片状磨屑易在冲击作用下发生破裂

3 结论

a 铸造铝青铜合金 Cu-14Al-4Fe-Mn 由强度和硬度较高的 β 相中弥散分布的高强度 γ_2 相、 κ 相和一定塑性的 α 相组成, 这使得 HSWAB 合金具有优良的耐磨性能

b 在干摩擦条件下, 铸造铝青铜合金 Cu-14Al-4Fe-Mn 的主要磨损形式为磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损及疲劳磨损; 在润滑条件下, 铸造 Cu-14Al-4Fe-Mn 铝青铜合金的主要磨损形式为磨粒磨损和粘着磨损

c Cu-14Al-4Fe-Mn 合金在油润滑条件下的摩擦系数和磨损率(0.08 和 3.7×10^{-6} g/m) 很低, 是一种优良的耐磨材料

参考文献:

[1] Callcut V AA aluminum bronze for industrial use[J]. Metals and

Materials, 1989, 5(3): 128-132

[2] Anonymous Basic of design engineering: Bronze and copper alloy bearings[J]. Machine Design, 1995, 27 (15): 126-127.

[3] Sadayappan M, Zavadil R, Sakoo M. Mechanical properties of aluminum bronze alloy C95400[J]. AFS Transactions, 2001, 109: 745-758

[4] 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 Y P, Sun G, Zhang Y. Silicon-aluminum bronze and heat treatment[J]. Research of Foundry Equipment, 1996, (5): 17-18, 37.

[5] Reid J V, Schey J A. The effect of surface hardness on friction [J]. Wear, 1987, 118: 113-125

[6] 李元元, 夏伟, 温利平, 等 铝青铜合金的基本特性与摩擦学性能的关系[J]. 摩擦学学报, 1996, 16 (2): 130-136

Li Y Y, Xia W, Wen L P, et al The relationships between the basic characteristics of aluminum bronze and its tribological behaviors[J]. Tribology, 1996, 16(2): 130-136

[7] Rohatgi A, Vecchio K S, Gray III(?) G T. 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, 32 (1): 135-145

[8] 克拉盖尔斯基 ИВ. 摩擦、磨损与润滑手册(第二册)[M]. 汪一麟译 北京: 机械工业出版社, 1985

[9] Xu J L, Wang Zh P, Chen C, et al Research of a new high-strength aluminum bronze alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2003, 18 (5): 24-31.

[10] 刘羽辉 金属材料物理性能检验工作手册[M]. 北京: 技术标准出版社, 1992

[11] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003

[12] 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

Friction and Wear Behavior of As-Cast Cu-14Al-4Fe-Mn Aluminum Bronze Alloy

XU Jian-lin¹, LA Pei-qing², CHEN Chao³, LU Yang¹,

WANG Zhi-ping¹, LI Hai-lan¹, LIU Ming-lang¹

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

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. College of Mechanical-Electronic Engineering, Lanzhou University of Science & Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aluminum bronze alloy Cu-14Al-4Fe-Mn was fabricated by casting. The friction and wear behaviors of the resulting Al-bronze alloy sliding against AISI-1045 steel under dry- and oil-lubricated conditions were evaluated on a reciprocal friction and wear tester in pin-on-block configuration. The worn surface morphologies were observed on a scanning electron microscope, and the wear mechanisms were discussed. It was found that the HSWAB alloy showed much different friction and wear behaviors under dry- and oil-lubricated conditions. Namely, the alloy was characterized by abrasive wear, adhesion wear, oxidation wear, and fatigue wear under dry sliding, owing to the micro-cutting action of the hard wear debris peeled off from the alloy matrix and the surface oxide layer and the adhesion of the α phase in the HSWAB alloy with the counterpart AISI-1045 steel. The fatigue wear and oxidation wear were restrained under oil-lubricated condition, owing to the cooling action of the oil film and its ability to retard fracture initiation and propagation. Thus the HSWAB alloy was dominated by abrasive wear and adhesion wear under oil-lubricated sliding against the steel. The HSWAB alloy had a friction coefficient as small as 0.08 and wear rate as small as 3.7×10^{-9} kg/m, under the oil-lubricated condition, thus it could be reckoned as an excellent wear-resistant material.

Key words: aluminum bronze alloy; friction and wear behavior; wear mechanism

Author: XU Jian-lin, male, born in 1970, Ph.D. candidate, Associate Professor, e-mail: ggdlxu@sina.com