

高强度耐磨铝青铜合金及其摩擦学特性^①

李元元 夏伟 张文 罗宗强

(华南理工大学机电工程系, 广州 510641)

摘 要 在充分考虑铝青铜合金综合性能的基础上, 依据铝青铜合金微观组织设计的基本原则, 研制了一种新型高强度耐磨铝青铜合金。对这种合金和国内外同类合金的组织、性能进行了比较分析, 特别对它们的摩擦学特性进行了深入的探讨。研究结果表明, 所研制的新型合金的各项性能明显优于其它同类合金, 是一种优良的工程耐磨材料。

关键词 铝青铜合金 微观组织 机械性能 摩擦磨损

八十年代以来, 国外非常重视对铝青铜合金及其摩擦学特性的研究^[1-5]。Sullivan J L等^[4]通过对铝青铜合金与低合金钢对磨时的摩擦行为的研究, 发现在边界润滑条件下, 磨损表面有明显的铝富集现象, 而且铝迁移到对偶件——钢的表面, 形成固溶体, 从而导致咬合的发生。Robert A Poggie等^[5]不但证实了铝青铜粘着磨损中铝的富集, 而且在摩擦面上还发现了 Al_2O_3 和 Cu_2O 薄层的形成, 指出, 在跑合阶段磨损的主要机制是铝青铜的粘着转移, 而在正常磨损阶段则主要为氧化磨损。人们在探索铝青铜材料的磨损机理的同时, 还积极致力于新型耐磨铝青铜合金的研究开发。除了用各种工艺方法(如激光热处理、粉末烧结等)来改善材料的耐磨性外, 还对各种添加元素的作用进行了探讨, 发现微量添加剂 Ti、B、V、Zr、Ca、Na 等及复合添加剂 V+B、Ti+B、Fe+B 等对铝青铜有变质效果。从已取得的研究成果可以看出, 新型耐磨铝青铜合金材料的发展方向主要有以下三个方面: 第一, 加入变质元素控制组织、细化晶粒, 提高材料的力学性能; 第二, 加入自润滑减摩质点, 提高材料

的减摩性; 第三, 适当增加合金中的硬质点, 提高材料的耐磨性。本文围绕以上三个方面进行了试验探索, 尤其对铝青铜材料的摩擦学特性进行了深入研究。

1 实验方法与材料

1.1 高强度耐磨铝青铜合金的微观组织设计

在对多种铝青铜合金的微观组织与力学性能和摩擦学特性的关系进行深入分析的基础上^[6], 制定了铝青铜合金组织设计的基本原则:

(1) 控制合金组织中软相(α)与硬相(β 和 κ)的相对量比例大约为 70: 30, 软相(α)的晶粒尺寸大约为 35~ 45 μm , 使合金具有最佳的综合力学性能和摩擦磨损性能;

(2) 通过强化 α 相, 提高其显微硬度, 增强它在摩擦磨损中的塑性变形抗力;

(3) 在合金中加入适量的减摩质点, 提高合金的抗粘着能力和减摩性;

(4) 消除合金组织中的气孔、缩孔、缩松

① 广东省自然科学基金资助项目(项目编号: 950168)

收稿日期: 1995- 09- 22; 修回日期: 1996- 02- 06

李元元, 男, 38岁, 教授, 硕士

和夹杂物,提高合金抵抗疲劳的能力;

(5) 适当减少铝青铜合金组织中 α 相的相对量,或适当细化 α 相晶粒,减少铝向表层的扩散迁移,从而减轻粘着磨损和疲劳磨损。

1.2 试样的制备及实验方法

试验合金采用工业纯 Al、Fe、Mn、Ni、Cu 和其它添加剂为炉料,在燃油(柴油)坩埚炉中熔化,采用铂铑—铂热电偶测温,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,并采取富氧除氢、脱氧、除气精炼等措施。浇注前进行含气性和弯曲角断口检验,确保获得合格的合金液,然后浇入 $d456\text{mm} \times 60\text{mm}$ 的铸铁金属模中形成蜗轮毛坯。本实验中用于作对比试验的共有三种典型合金,其一为作者依据本文 1.1 节的设计原则研制的高强度耐磨铝青铜合金(代号为 KK),其二为从日本进口的电梯曳引机铝青铜蜗轮上取样的试样(代号为 J,合金牌号为 AL-BC2 JISH5114-79),其三为根据我国国标而配制的铝青铜合金(代号为 EE、合金牌号为 ZCuAl10Fe3Mn2Ni2 GB1176-87)。三种合金的化学成分见表 1。各有关试样均取自蜗轮轮缘部位,并根据国家有关标准进行试样的加工和力学性能测定。

用金相显微镜观察和拍照,采用标准定量金相法测定合金组织中各相的相对量和晶粒尺寸,并用显微硬度计测定微区硬度,用电子探针和备有 X 射线能谱仪的扫描电镜对试样的显微组织、微区成分、磨损形貌和磨屑进行分析,以及采用 X 射线衍射仪对试样作物相分析。采用铜靶,石墨单色器滤波,工作管压 40 kV、管流 20 mA。扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$ 。

采用盘销式摩擦试验机测定试样在润滑条件下的摩擦系数。盘试样为铝青铜合金,销试样为 45 钢(淬火态、HRC= 48),试验名义比压为 7.486 MPa,滑动速度为 3.989 m/s,用 WA 电梯油润滑。采用柱环式磨损试验机测定试样的磨损量、磨损率和油的温升。柱试样为铝青铜合金,环试样为 45 钢(淬火态, HRC= 48),试验载荷为 686 N,滑动线速度为 0.886

m/s,用 WA 电梯油线滴冷却和润滑。

表 1 三种合金的化学成分和显微组织特征

样品代号	化学成分/ %	显微组织			
		相	相对(体 积)含量/ %	晶粒尺 寸/ μm	显微硬 度 HV
J	Al 8.25, Fe3.73 Ni 1.37, Mn 0.66 Cu 余量	α	77	92	265
		β	20	30	309
		κ	3	6	
EE	Al8.75, Fe3.29 Ni1.48, Mn1.63 Cu 余量	α	72	78	270
		β	26	40	
		κ	2	3	
KK	Al9.0~ 10.5, Fe3.0~ 5.0 Ni1.0~ 2.5, Mn1.0~ 2.5 Pb $\leq$ 1.0, Ti $\leq$ 0.5 B $\leq$ 0.2, Cu 余量	α	68	35	274
		β	28	25	407
		κ	3	2	
		Pb	1	4	

2 实验结果和讨论

2.1 合金的化学成分和显微组织特征

三种合金的化学成分以及显微组织特征已如表 1 所示。各合金的金相组织如图 1 所示,其中 α 相是以 Cu 为基的置换固溶体,属面心立方点阵, $a = 3.666 \text{ \AA}$ 显微硬度 HV= 200~270。 β 相是在实际铸造条件下共析转变受阻而出现的过冷 β 相,它们属同素异构体,前者具有斜方晶系的点阵结构,在低于 325 $^\circ\text{C}$ 时稳定,后者属体心立方点阵, $a = 3.000 \text{ \AA}$ 在高于 565 $^\circ\text{C}$ 时稳定。 β' 相实际上是以 Cu_3Al 电子化合物为基的固溶体,显微硬度 HV= 290~407。 κ 相为体心立方点阵,具有很高的显微硬度(HV= 700)。Pb 相以独立质点均布于组织中,起减摩组元的作用。Ti 和 B 属变质组元,起诱发核、控制组织和细化晶粒作用。图 2 是 KK 的 X 射线衍射结果。

由上述图表可以看出,在 KK 合金组织中,其软相(α)与强硬相(β' 和 κ)的含量比为 68: 31,并新增了含量为 1% 的减摩质点 Pb 相; α 相晶粒得到细化,其平均尺寸大约为 35 μm 。由于强化作用的加强, α 和 β' 相的显微硬度都有所提高。

2.2 合金的力学性能

三种试样的力学性能如表 2 所列。由该表

可见, KK 合金与同类其它合金相比, 其力学性能均有一定程度的提高, 特别是与摩擦磨损

性能关系最密切的屈服强度, 分别比试样 J 和 EE 高 44.5% 和 19.7% 。



图 1 试样的显微组织

(a) —试样 J; (b) —试样 EE; (c) —试样 KK

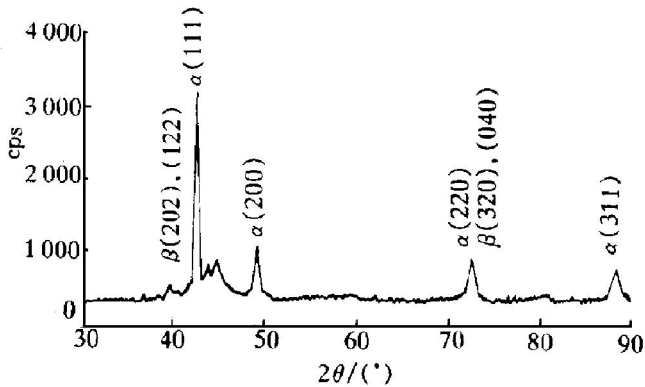


图 2 试样 KK 的 X 射线衍射结果

表 2 试样的力学性能

样品 代号	拉伸强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ /%	布氏硬度 HB	冲击韧性 α_k /J·cm ⁻²
J	565	256	25	145	39
EE	580	309	18	151	41
KK	633	370	18	169	43

2.3 变质处理对合金组织与性能的影响

变质处理的作用在于控制组织中各相的比例, 细化晶粒, 以获得更好的力学性能。在减摩及耐磨材料中, 变质处理还有助于提高材料的耐磨性和减摩性。本文对试验铝青铜合金的变质剂的选择及其对合金组织和性能的影响也作了探讨。

在含铝量为 10% 左右的试验铝青铜合金中加入微量硼、钛进行变质处理后发现, 合金的抗拉强度, 尤其是屈服强度有较大的提高, 硬度也有所提高。对提高抗拉强度而言, 硼的效果比钛好, 而对提高屈服强度而言, 钛的变质效果较硼强。采用硼钛复合变质, 合金的抗拉强度、屈服强度和硬度分别比变质前提高 6.9%、59.5% 和 23.9% 。

变质处理后合金的显微组织得到一定程度的细化, 采用平均截线法测定合金的晶粒尺寸 (以 α 相为对象), 得到的结果是: 与变质处理前相比, 加硼变质后晶粒尺寸减小了 60% 左右, 加钛变质后晶粒尺寸减小了 75% 左右, 二者复合变质后晶粒尺寸仅为原来的 1/12。

2.4 合金的摩擦磨损性能

三种试样的滑动距离与摩擦系数之关系曲线如图 3。试样的滑动距离与磨损体积的关系如图 4。合金的综合摩擦磨损性能见表 3。

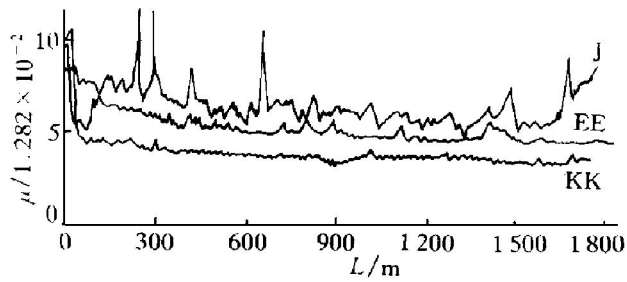


图 3 试样的滑动距离(L)与摩擦系数(μ) 的关系

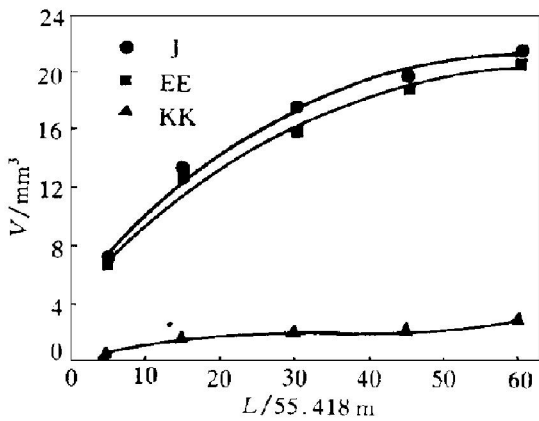


图 4 试样的滑动距离(L)与磨损体积 V 的关系

表 3 试样的摩擦磨损性能

样品 代号	摩擦系数 μ	磨损率 W_V $/10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$	润滑油温升 $t/^\circ\text{C}$	干摩擦系数 μ
J	0.071 2	3.514 7	70.0	0.368 7
EE	0.059 6	1.840 7	66.2	0.358 9
KK	0.053 0	0.353 6	48.3	0.310 1

由上述图表可以看到: 试样 KK 的减摩性和摩擦相容性均优于试样 J 和 EE, 其摩擦过程也较后者平稳得多; 试样 KK 的承载能力, 耐磨性能和跑合性能都显著优于试样 J 和 EE; 试样 KK 摩擦过程中的润滑油相对温升分别比试样 J 和 EE 的低 31% 和 27% 。

2.5 试样的磨损表面形貌及主要磨损机制

经连续 1h 的柱环磨损试验的试样磨损表

面形貌如图 5。可见, 三种试样的磨损表面形貌明显不同。其中, J 显示出较严重的粘着磨损和疲劳磨损, EE 显示出较严重的粘着磨损

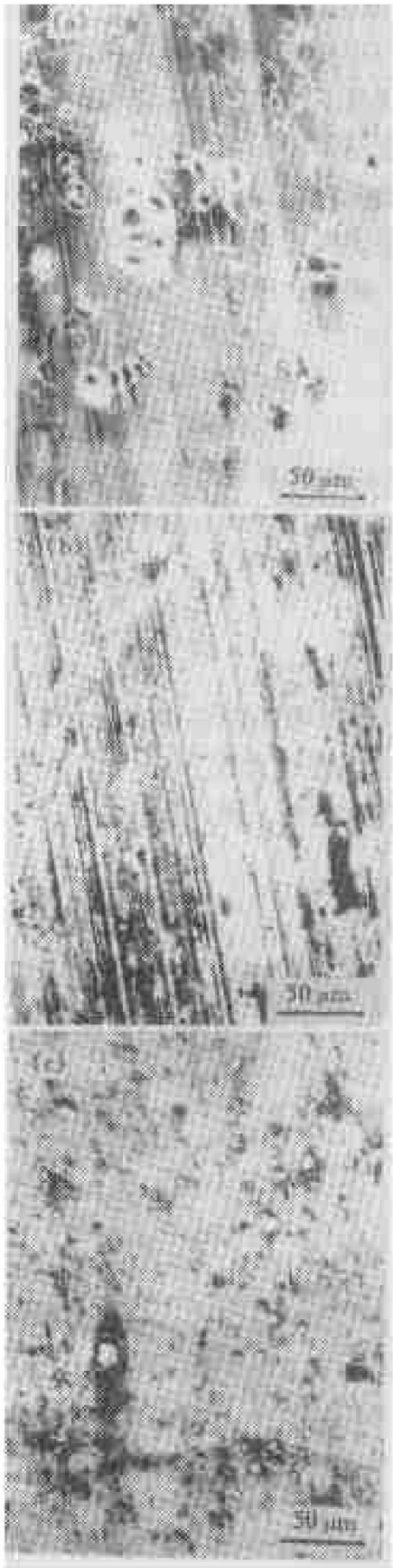


图 5 试样的磨损表面
(a) —试样 J; (b) —试样 EE; (c) —试样 KK

和磨粒磨损,而KK则表现为正常的较轻微的疲劳磨损,并且清楚地显示出存在着两个滑动面。利用电子探针对磨损表面作微区分析表明,第一滑动面主要由硬质点包括 κ 相、辗压后的 α 相和 β' 相磨粒组成,它们直接承受来自钢表面的正向载荷,并且在润滑油膜和Pb膜破裂的情况下,直接和钢表面滑动接触。第二滑动面由基体相 α 和 β' 组成,实际上它们几乎不与钢表面发生滑动接触,或者接触不紧密,主要是起镶嵌硬质点和将载荷向四周均匀分布的作用。在第一和第二滑动面之间存在着大量的空隙,这样既有利于润滑油的储存、改善接触面润滑条件,又有利于润滑油的流动,由此及时将磨屑微粒从接触面带走,减轻磨粒磨损。大量的试验表明,铝青铜的这种摩擦磨损微观机制有利于获得最佳的减摩和耐磨效果。

3 结论

(1) 依据本文中铝青铜合金组织设计原则所研制的新型铝青铜合金,具有高强、减摩、耐磨的显微组织,其各项力学和摩擦磨损性能

明显优于其它同类合金;

(2) 铝青铜中加入适量的Pb,有利于改善其摩擦磨损性能,但会降低其力学性能,故须辅以变质处理;加入适量的Ti和B后,能明显细化合金组织并提高合金的综合性能;

(3) 在边界润滑条件下,新型铝青铜合金与钢的滑动摩擦中存在着两个滑动面,表现为正常的较轻微的疲劳磨损,这种磨损机制可以获得较佳的减摩和耐磨效果。

参考文献

- 1 Dawson R J C *et al.* Engineering Materials and Design, 1978, 22(12): 25- 282.
- 2 Severson R J. Encyclopedia of Materials Science and Engineering, 1986, 1: 152- 155.
- 3 Poole W, Sullivan J L. ASLE Transactions, 1979, 22(12): 154- 161.
- 4 Sullivan J L, Wong L F. Tribol Int, 1985, 18(5): 275- 281.
- 5 Robert A Poggie *et al.* J Adhesion Sci Technol, 1994, 8(1): 11.
- 6 Li Y *et al.* In: Proceedings of the 8th International Colloquium (Tribology 2000). Ostfildern, Germany: 1992.

STRONG AND WEAR-RESISTANT ALUMINIUM-BRONZE ALLOY AND ITS TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

Li Yuanyuan, Xia Wei, Zhang Wen, Luo Zongqiang
*Department of Mechanical and Electronic Engineering,
South China University of Technology, Guangzhou 510641*

ABSTRACT Based upon considering the comprehensive properties of the aluminium-bronze and judging by the design principles of the micro-structure of the aluminium-bronze, a new high-strength and wear-resistance aluminium-bronze has been developed; its structures, properties, and tribological characteristics were discussed thoroughly and compared with those of the similar alloys at home and abroad. The results showed that the newly developed aluminium-bronze is superior to other similar alloys in mechanical properties and friction-wear behaviours, showing the characteristics of a kind of excellent wear-resistant material for engineering uses.

Key words aluminium-bronze alloy micro-structure mechanical property friction and wear

(编辑 赖海辉)