

新型高铝青铜合金 Cu-12Al-X 在高温下的摩擦磨损行为

戴安伦^{1,2}, 严高闯^{1,3}, 朱治愿^{1,2}, 朱 凯¹, 陈 惠¹, 牛文明¹

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 镇江 212003;

2. 江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室, 镇江 212003;

3. 南京航天晨光股份有限公司, 南京 211100)

摘 要: 以 Cu-Al 为基添加适量的 Ni、Fe、Mn 在金属型模具中铸造一种多元铝青铜合金 Cu-12Al-X, 利用扫描电镜、UMT-2 摩擦磨损仪研究 Cu-12Al-X 合金的摩擦磨损行为, 并以合金 ZCuAl10Fe3 作为对比材料进行分析。结果表明: Cu-12Al-X 合金的耐磨性显著优于 ZCuAl10Fe3 合金的, 且经过固溶时效后(950 °C, 2 h, 固溶)+(550 °C, 4 h, 时效), Cu-12Al-X 合金在常温、高温环境下的摩擦因数及磨损量均低于铸态合金的, 具有良好的耐磨性能。

关键词: 新型高铝青铜; 固溶时效; 摩擦; 磨损; 耐磨性能

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

Wear-friction behavior of novel high aluminum bronzes alloy Cu-12Al-X in high temperature condition

DAI An-lun^{1,2}, YAN Gao-chuang^{1,3}, ZHU Zhi-yuan^{1,2}, ZHU Kai¹, CHEN Hui¹, NIU Wen-ming¹

(1. School of Materials and Science and Engineering,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology,

Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

3. Aerosun Corporation of Nanjing, Nanjing 211100, China)

Abstract: A wear resistant aluminum-bronze alloy Cu-12Al-X was prepared by adding some elements (Ni, Fe, Mn) based on the Cu-Al alloy, then was produced by casting. Wear-friction behavior of aluminum bronze Cu-12Al-X was studied with making use of SEM, UMT-2 friction and wear tester, and use ZCuAl10Fe3 alloy as the contrast material. The results show that the wear-friction behavior of Cu-12Al-X alloy is higher than that of ZCuAl10Fe3 alloy, and the friction factor and wear loss of Cu-12Al-X alloy under the conditions of solution at 950 °C for 2 h and aging at 550 °C for 4 h are lower than the that of as-cast alloy, the alloy in this state has good wear resistant.

Key words: novel high aluminum bronze; solution and aging; friction; wear; wear resistant

在高品质带材的生产过程中, 要求获得的成品表面光滑, 这就要求精密轧辊材料具有高的强度, 高的耐磨性和合适的硬度等; 常用的轧辊材料主要包括一些合金铸铁、冷热作模具合金钢(GCr15SiMn、Cr12MoV、H13)等, 而这些模具材料与带钢之间有较大的互溶性, 在轧制过程中容易粘着并划伤产品, 缩短轧辊的使用寿命。铝青铜合金作为一种综合性能优

异的工程材料, 具有强度高、刚性稳定、导热系数高、耐磨耐蚀性能良好等一系列优点, 且与铁基材料之间不存在互溶性, 可以作为轧辊材料应用于高品质带材的生产中^[1-4]。目前, 国内的众多学者对铝青铜合金的研究主要集中在应用于不锈钢拉伸模具方向的高铝青铜合金, 其 Al 含量(质量分数)在 14%及以上的, 且对该种合金的耐磨性能试验也仅仅考虑在室温环境下进

行^[5-10], 而对 Al 含量在 11%~13% 的铝青铜合金及其在高温下的耐磨性研究涉足较少^[11-13], 而通常带材轧制过程是在高温环境中完成。为此, 本课题组制备了一种新型高铝青铜合金, 尝试以 Cu-12Al 为基合金, 通过添加适量的 Fe、Ni、Mn 等元素, 经非真空熔炼、浇注, 以获得具有高强度、高硬度、高耐磨性及良好的塑韧性的合金, 并且讨论了温度对该合金摩擦磨损性能的影响。

1 实验

1.1 试验材料

试验的多元铝青铜合金所用的铜为 1 号电解铜, 其它元素都是以纯金属的方式加入, 合金的成分(质量分数, %): 12~13Al、5~6 Fe、6~7 Ni、1.2~1.5 Mn, 余量为 Cu。在无保护气、常压下, 采用中频炉共装法一次熔炼, 加料的顺序为先将铝锭加入坩埚中, 铝锭熔化后加入纯铁, 经搅拌全部熔化后再升温加 1 号电解铜、Ni、Mn 等元素, 试验铝青铜合金熔炼时用六氯乙烷进行化学除气、用玻璃和石灰石的混合物作为覆盖剂, 静置、扒渣, 然后加入稀土元素精炼、终脱氧, 最后浇注砂型试样, 空气中冷却。

1.2 试验方法

试验的铝青铜合金在额定温度为 1 200 °C、误差 < 20 °C 的 SX2-10-12 箱式电阻炉中进行热处理。采用 HRS-150 洛氏硬度仪测定洛氏硬度, 将力学性能试样按照 GB/T 228—2002 《金属拉伸试验试样》的要求加工成棒状试样, 采用 CMT5305 微机控制电子万能试验机进行室温拉伸试验, 摩擦磨损试验在 UMT-2 摩擦磨损试验仪上进行, 待磨试样为方形(20 mm × 20 mm × 3.5 mm)与直径为 9.38 mm 的 Al₂O₃ 球对磨, 在室温及高温环境下, 在载荷为 3 N, 转速为 50 r/min 下进行摩擦磨损试验, 摩擦圆周半径为 4 mm, 摩擦时间为 30 min。金相试样经粗磨、细磨、抛光后用 FeCl₃ 溶液进行腐蚀, 用 JSM-6480 扫描电镜观察合金组织及磨痕形貌, 用 X 射线衍射仪定性分析试验合金的相组成, 并用能谱分析仪 EDS 对各种形态的相进行定量或半定量的分析。

2 结果与讨论

2.1 试验合金的组织

试验合金的显微组织如图 1 所示, 图 1(a)~(c)所示

的分别为 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的显微组织, 其中 CA 及 HT 分别表示铸态及热处理态(950 °C, 2 h, 固溶)+(550 °C, 4 h, 时效)。由图 1(a)和(b)可以看出, 合金中存在枝晶偏析, 经过 XRD 衍射, 发现 Cu-12Al-X/CA 合金主要由 α 、 β' 、 γ_2 和 k 相组成(见图 2(a)), 其中图 1(b)中黑色细小颗粒状组织(4 部分)为 k 相金属间化合物, 亮黑色条纹区域(3 部分)为 $(\alpha+\gamma_2)$ 共析体, 灰色区域(1 部分)为 $\alpha+\beta'$ 相, 黑色的点状、杆状相周围的白色相(2 部分)为 γ_2 相。经过(950 °C, 2 h, 固溶)+(550 °C, 4 h, 时效)处理的 Cu-12Al-X 合金的显微组织如图 1(c)所示, 主要由 α 、 β' 、 γ_2 和 k 相组成(见图 2(b)), 相对于图 1(b)可以看出, 固溶时效处理对 Cu-12Al-X 合金的显微组织有明显的影 响, 弥散分布的 k 相金属间化合物及 γ_2 相显著细化, 且明显增多。

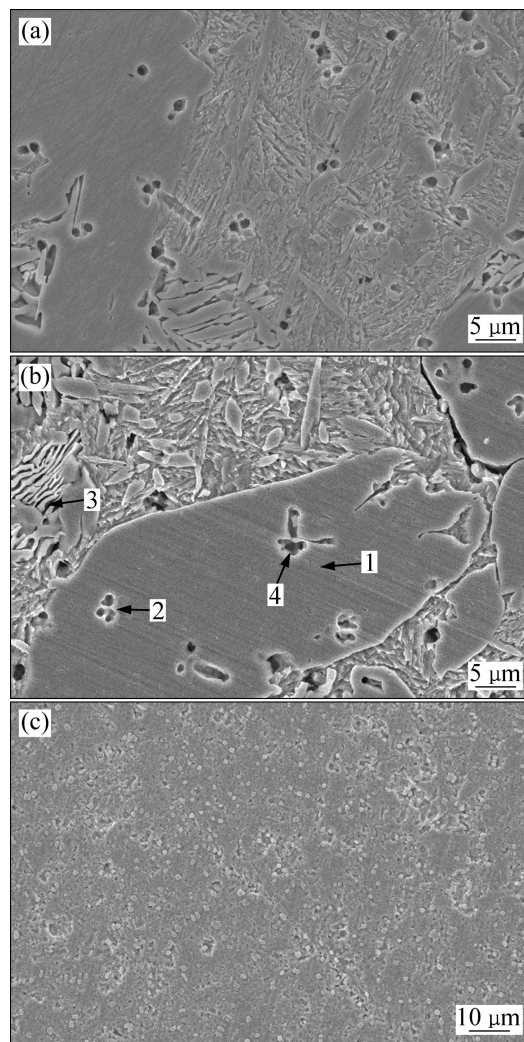


图 1 试验合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of tested alloys: (a) ZCuAl10Fe3; (b) Cu-12Al-X/CA; (c) Cu-12Al-X/HT

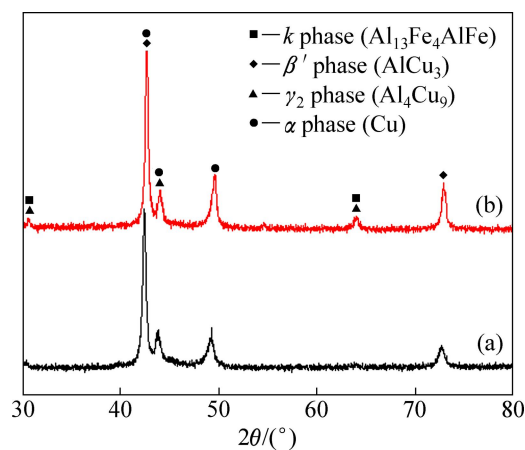


图 2 试验合金的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of tested alloys: (a) Cu-12Al-X/CA; (b) Cu-12Al-X/HT

2.2 试验合金的力学性能

试验合金 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的力学性能如表 1 所列, 可以看出, Cu-12Al-X/HT 的力学性能如表 1 所列, 可以看出, Cu-12Al-X/CA 的抗拉强度及 HRC 硬度明显优于 ZCuAl10Fe3 的, 伸长率与之相比则较低, 而 Cu-12Al-X 合金经过固溶时效处理后, 抗拉强度及硬度值均大幅度提升, 伸长率有所下降。这是因为: 一方面, Cu-12Al-X 合金相对于 ZCuAl10Fe3 合金相比, Al 及其他合金元素含量有明显的提高, 这导致合金组织中的 β' 、 γ_2 和 k 相含量增加, 而 α 相的含量则相对降低, 而 β' 、 γ_2 和 k 相的显微硬度显著高于 α 相, 使得 Cu-12Al-X/CA 的抗拉强度及 HRC 硬度高于 ZCuAl10Fe3 的, 而 α 相的含量降低, 导致 Cu-12Al-X/CA 合金的脆性增加, 伸长率低于 ZCuAl10Fe3 的; 另一方面, 固溶处理使得合金元素充分溶入到 β' 相中形成过饱和固溶体, 随后进行的时效则是过饱和固溶体 β' 相脱溶过程, 形成大量的 γ_2 及 k 相, 弥散的分布于基体中, 使 Cu-12Al-X/HT 相对于 Cu-12Al-X/CA 合金的强度、硬度、塑性均得到一定程度的升高^[14]。

图 3 所示为试验合金 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的拉伸断口微观形貌。从图 3 可以看出, ZCuAl10Fe3 合金的微观形貌呈现河

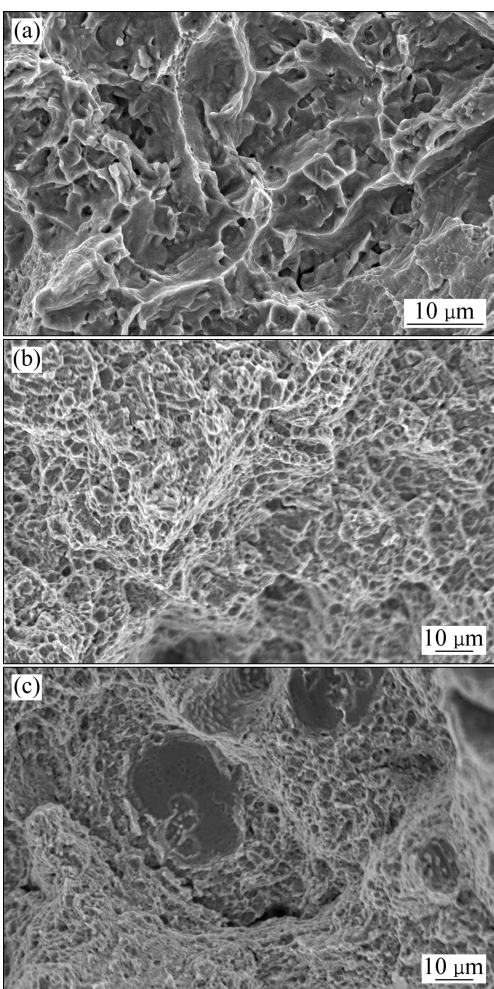


图 3 试验合金的拉伸断口形貌

Fig. 3 Fracture morphologies of tested alloys: (a) ZCuAl10Fe3; (b) Cu-12Al-X/CA; (c) Cu-12Al-X/HT

流花样、舌状花样且存在较多数量的韧窝, 韧窝周围还存在较多的撕裂棱, 可以推断该种断裂机理为典型的准解理断裂; 而 Cu-12Al-X/CA 合金的拉伸断口形貌相对于 ZCuAl10Fe3 合金的来看, 宏观上无颈缩现象, 韧窝数量明显减少, 且微观形貌上的河流花样、舌状花样由于韧窝数量的减少而显示出密度增大的趋势, Cu-12Al-X/HT 合金的拉伸断口呈现出阶梯状的形貌, 有一定数量的韧窝, 可知, Cu-12Al-X/CA 及 Cu-12Al-X/HT 合金的断裂机制是相同的, 为准解理断裂。

表 1 试验多元铝青铜的力学性能

Alloy	HRC	σ_b /MPa	δ /%
ZCuAl10Fe3	21.8	635	24.48
Cu-12Al-X/CA	29.4	770	7.60
Cu-12Al-X/HT	42.5	890	9.28

2.3 试验合金的摩擦磨损行为

2.3.1 试验合金在常温下的摩擦磨损行为

试验合金 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的摩擦参数如下: 载荷为 3 N, 转速为 50 r/min, 温度为 20 ℃, 摩擦半径为 4 mm, 磨损时间

为 30 min。磨损量及平均摩擦因数数值如表 2 所示, 摩擦因数曲线如图 4 所示; 由表 2 中数据可以得出, ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 合金的磨损量是依次递减的, 3 种合金的平均摩擦因数数值的由大到小依次为 Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT、ZCuAl10Fe3 依次递减。这是因为试验合金的摩擦磨损特性与其组织有直接的关系^[1], 组织中的 α 相保持着材料的韧性, 使其在摩擦过程中可以减少微裂纹的产生, β' 、 γ_2 和 k 相主要起着提高材料硬度的作用, 在摩擦过程中起着减磨及支撑的作用, 两种作用的有机结合可以大大提高合金的耐磨性能; 就上面 3 种合金的磨损量而言, 由于 Cu-12Al-X/CA 合金组织中的 β' 、 γ_2 和 k 相的含量要比 ZCuAl10Fe3 合金组织中的多, 所以 Cu-12Al-X/CA 合金减磨作用强, 而经过固溶时效处理(950 °C, 2 h, 固溶)+(550 °C, 4 h, 时效)后, β' 、 γ_2 和 k 相硬质相均匀地分布在软基 α 相上, 保证合金同时具有较好的强度及韧性, 这就说明 Cu-12Al-X/HT 合金相对于 Cu-12Al-X/CA 合金而言, 在保证强度、硬度不降低的情况下, 提高了韧性, 所以磨损量进一步降低; 另一方面, 就摩擦因数而言, 由于 ZCuAl10Fe3 合金组织中 α 相含量相对较多, 而 α 相在合金组织中的作用是保持材料的韧性, 在摩擦磨损过程中, 则合金磨损表面产生塑性变形所需要的剪切力相对于 Cu-12Al-X/CA 合金而言要小, 这就导致 ZCuAl10Fe3 合金的平均摩擦因数(COF)低于 Cu-12Al-X/CA 合金

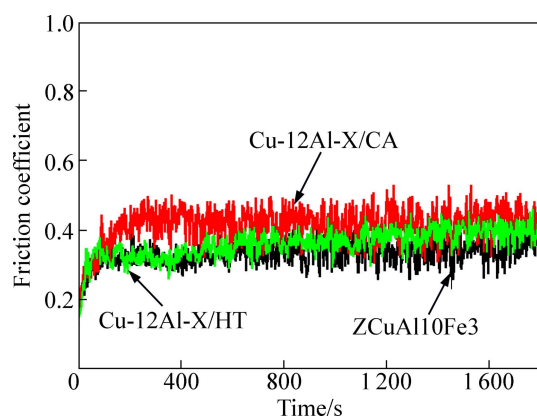


图 4 试验合金的摩擦因数曲线

Fig. 4 Friction coefficient of tested alloys

表 2 试验合金的磨损量和平均摩擦因数

Table 2 Wear loss and average COF of tested alloys

Alloy	Wear loss/mg	Average COF
ZCuAl10Fe3	7.2	0.333 6
Cu-12Al-X/CA	4.0	0.414 4
Cu-12Al-X/HT	2.0	0.362 2

的, 而经过固溶时效处理以后, 能够保证合金强度、硬度不降低的情况下, 韧性提高, 这也就使得 Cu-12Al-X/HT 合金的磨损量及平均摩擦因数都比 Cu-12Al-X/CA 合金的低^[15]。

试验合金 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的磨损形貌如图 5 所示, 3 种合金磨损表面均有犁沟出现, 说明磨损机制以磨粒磨损为主, 并兼有一定的粘着磨损, 对比图 5(a)、(c)、(e)发现, ZCuAl10Fe3 合金表面磨损产生的犁沟最深, Cu-12Al-X/HT 合金的最浅, 结合上文的磨损量及摩擦因数, 试验合金 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的耐磨性是依次增强的, 为了进一步研究磨损形貌及机理, 对图 5(d)箭头所指区域进行 EDS 能谱分析(见表 3), 结果显示: 该区域 Fe、Ni 元素显示富集, 可知磨痕表面存在 k 相金属间化合物, Cu、Al 元素的摩尔分数比接近 9:4, 为 γ_2 相, 还发现存在一定量的 O 元素。这说明 Al_2O_3 球与合金试样在往复摩擦接触过程中, 把软相 α 相挤向运行轨迹的两边形成犁沟, 其宏观形貌如图 5(a)、(c)、(e)所示。同时, Al_2O_3 球与 k 、 γ_2 相硬质点进行点接触, 摩擦使得这些硬质点周围产生微裂纹进而造成小块硬质点脱落。随着摩擦的进行, 磨痕表面温度升高, Al、Fe、Ni 等活性元素在空气介质的作用下发生氧化反应并产生粘着, 形成如图 5(b)、(d)、(f)所示的斑驳形貌。

表 3 Cu-12Al-X/CA 合金的磨损表面的 EDS 分析

Table 3 EDS analysis to wear surfaces of Cu-12Al-X/CA alloy

Element	w/%	x/%
Cu	61.10	49.24
Al	12.50	23.72
Ni	9.87	8.61
Fe	13.29	12.19
Mn	1.82	1.70
Else	1.42	4.54

2.3.2 试验合金在高温下的摩擦磨损行为

试验合金 Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 在摩擦参数分别为: 载荷为 3 N, 转速为 50 r/min, 温度为 100 和 300 °C, 摩擦半径为 4 mm, 磨损时间为 30 min。所得磨损量及平均摩擦因数如表 4 所列, 摩擦因数曲线如图 6 所示。从表 4 可以看出, Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 两种试验合金在 100 °C 下的磨损量相对于常温下而言都比较小且相差不大, 在 300 °C 下的磨损量为负数, 说明磨损过程中产生了严重的粘着、

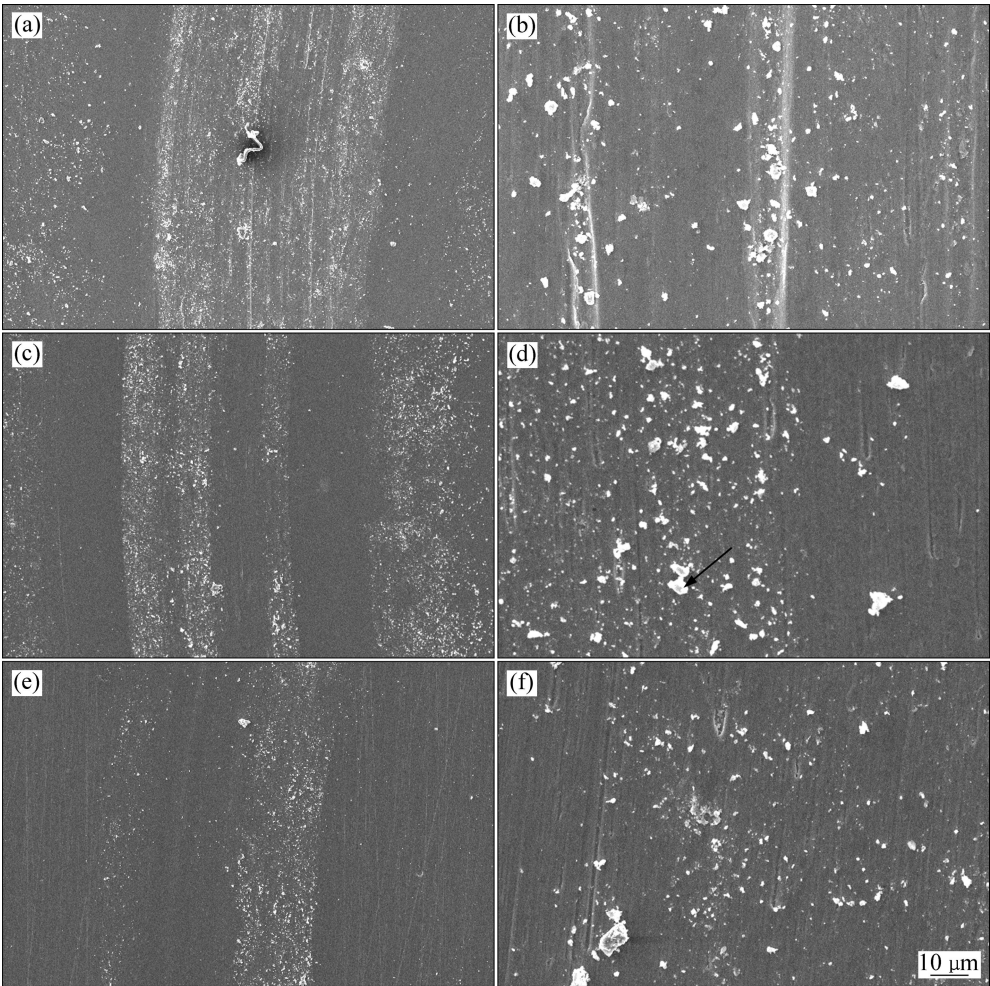


图 5 试验合金的摩擦磨损形貌

Fig. 5 SEM images of tested alloys after friction tests: (a), (b) ZCuAl10Fe3; (c), (d) Cu-12Al-X/CA; (e), (f) Cu-12Al-X/HT

表 4 高温下试验合金的磨损量和平均摩擦因数

Table 4 Wear loss and average COF of tested alloys at high temperature

Alloy	Wear loss/mg		Average COF	
	100 °C	300 °C	100 °C	300 °C
Cu-12Al-X/CA	1.8	−6.4	0.385 7	0.458 5
Cu-12Al-X/HT	1.6	−4.5	0.369 7	0.447 3

氧化。从图 6 可以看出, 温度升高使得试验合金的摩擦因数产生较大波动, 摩擦磨损过程不稳定, 分布在软基 α 相上的 γ_2 和 k 相硬质点不能起到支撑作用, 当磨球在软化的 α 相基体中接触到硬质点时, 摩擦剧烈波动, 使得摩擦因数上下浮动。由表 4 可知, 同一温度下, Cu-12Al-X/HT 合金的平均摩擦因数低于 Cu-12Al-X/CA 合金的; 同一状态下的合金, 其平均摩擦因数随着温度的升高(20、100 和 300 °C)呈现先下降后上升的趋势(见表 2), 这可能与摩擦过程中磨痕表面

形成的氧化物起到固体润滑作用有关^[16-17]。

试验合金 Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 在高温下的磨损形貌如图 7 所示。由图 7(a)和(d)看出, 磨痕表面无明显的犁沟出现, 从其放大图(见图 7(c)和(f))可以看出, 由于温度的升高, 磨痕表面产生了严重的粘着磨损。由此可知, 在 300 °C 情况下, 两种合金的磨损机制主要为粘着磨损; 由图 7(b)和(e)可以看出, 在 100 °C 情况下, Cu-12Al-X/CA 磨痕表面可以看出有明显的斑驳形貌, 磨损机制为磨粒磨损加上粘着磨损; 而 Cu-12Al-X/HT 的磨痕表面有严重的粘着形貌, 磨损机制为粘着磨损。这是因为在 100 °C 情况下, Cu-12Al-X/CA 合金组织中初生的 γ_2 相及 k 相尺寸较大, 支撑作用强, 大大地降低了其粘着磨损的趋势, 可有效抵抗温度对耐磨性的影响^[1, 14]; 而经过固溶时效处理以后即 Cu-12Al-X/HT 组织中 k 相金属间化合物及 γ_2 相显著细化, 在高温的作用下起不到支撑作用^[1, 14]; 随着温度进一步升高到 300 °C, 不管是

Cu-12Al-X/CA 还是 Cu-12Al-X/HT 合金, 其组织中的 γ_2 相及 k 相的支撑作用相对于温度的影响都已经变的微乎其微, 磨损机制变为粘着磨损。

从图 7 中还可以看出, 试验合金在高温下进行摩擦磨损, 在磨损表面粘着了两种形态的磨屑, 一种是尺寸较小的呈现出规则形状的颗粒(见图 7(b)), 另

一种是沿着摩擦方向形成的大面积的长条形物质(见图 7 (c)、(e)、(f)); 为了进一步研究在高温下试验合金磨痕表面粘着的磨屑, 对图 7(b)、(c)、(e)、(f)箭头所指区域 A、B、C、D 进行 EDS 能谱分析, 结果如表 5 所列。从表 4 可以看出, 在高温摩擦磨损过程中, 磨损表面在温度的作用下会产生氧化作用, 且对同一

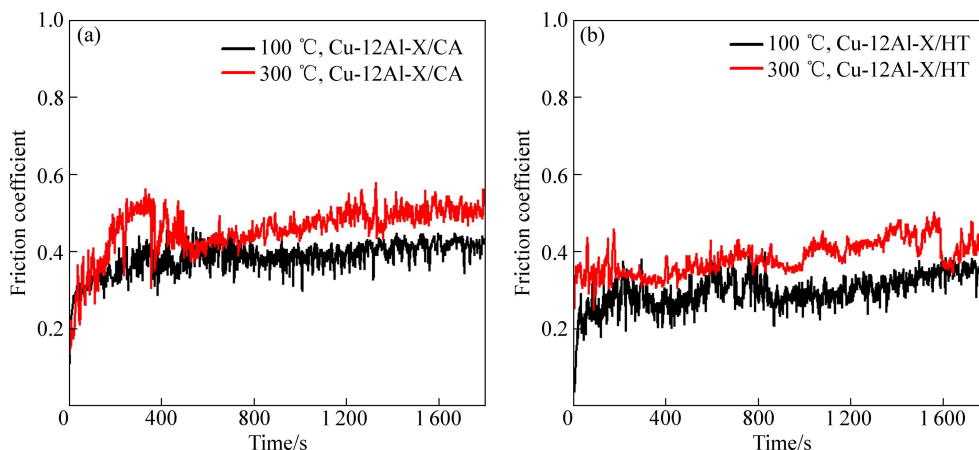


图 6 试验合金的摩擦因数曲线

Fig. 6 Friction coefficient of tested alloys: (a) Cu-12Al-X/CA; (b) Cu-12Al-X/HT

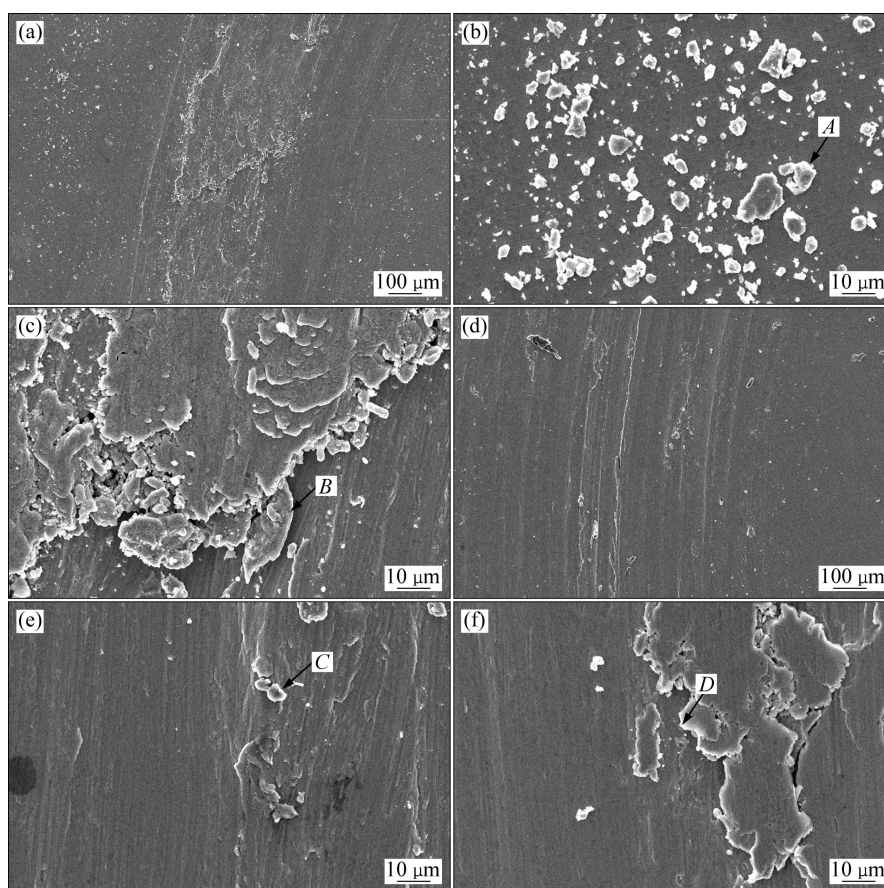


图 7 试验合金的摩擦磨损形貌

Fig. 7 SEM images of tested alloys after friction tests: (a), (c)Cu-12Al-X/CA, 300 °C; (b)Cu-12Al-X/CA, 100 °C; (d), (f) Cu-12Al-X/HT, 300 °C; (e) Cu-12Al-X/HT, 100 °C

表 5 试验合金磨损表面的 EDS 分析

Table 5 EDS analyses of wear surface of tested alloy

Element	A		B		C		D	
	w/%	x/%	w/%	x/%	w/%	x/%	w/%	x/%
Cu	71.98	59.32	60.22	46.28	67.20	55.48	70.92	56.97
Al	11.26	21.84	12.88	23.31	11.44	22.24	11.98	22.65
Fe	4.67	4.38	9.86	8.62	9.91	9.31	5.71	5.22
Ni	8.17	7.29	11.22	9.33	8.42	7.53	7.38	6.41
O	1.48	4.86	3.37	10.28	1.10	3.60	2.21	7.06
Mn	2.43	2.32	2.45	2.18	1.93	1.84	1.81	1.68

状态的合金而言, 随着温度的升高, 氧化程度会加剧^[18]。分析认为: 表面的粘着物一部分来源于试验合金中活性元素磨损氧化生成的氧化物; 另一部分来源于 k 、 γ_2 硬质相在摩擦过程中脱落的磨屑, 在温度的作用下粘着在磨痕表面。

3 结论

1) 所研究的 ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA 合金铸态下的组织为 α 、 β' 、 γ_2 及 k 相, 经过固溶时效处理以后, Cu-12Al-X/HT 合金的组织主要由 β' 、 γ_2 及 k 相组成, 综合力学性能优良。

2) 常温下, ZCuAl10Fe3、Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的耐磨性是依次增强的, 磨损机制主要是磨粒磨损。

3) 高温下, Cu-12Al-X/CA、Cu-12Al-X/HT 的磨损机制转变为以粘着磨损为主, 且随着温度的升高, 磨痕表面的氧化程度加剧。

REFERENCES

[1] 路 阳, 刘明朗, 徐建林, 苏义祥, 王智平, 李海兰. 多元铝青铜铸态下的组织与力学性能[J]. 金属热处理, 2004, 29(8): 23-26.

LU Yang, LIU Ming-lang, XU Jian-lin, SU Yi-xiang, WANG Zhi-ping, LI Hai-lan. Microstructure and mechanical properties of the as-cast multi-aluminum bronze[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(8): 23-26.

[2] 林高用, 曾菊花, 王 莉, 金一伟, 宋佳胜. 新型 Cu-Al-Fe-Ni 变形铝青铜的固溶和时效强化[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1586-1593.

LIN Gao-yong, ZENG Ju-hua, WANG Li, JIN Yi-wei, SONG Jia-sheng. Solution and aging strengthening of novel Cu-Al-Fe-Ni wrought aluminum bronze[J]. The Chinese Journal

of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1586-1593.

[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] 李文生, 王智平, 路 阳, 袁利华, 徐建林, 魏迪生. 高铝青铜 Cu-14Al-X 合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(3): 511-517.

LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang, YUAN Li-hua, XU Jian-lin, WEI Di-sheng. Corrosion behavior of Cu-14Al-X bronze alloy in 3.5% NaCl solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(3): 511-517.

[6] 管红艳, 袁庆龙, 张宝庆. 高铝高铁青铜 Cu-15Al-xFe 合金在 5%H₂SO₄ 溶液中的腐蚀行为[J]. 热加工工艺, 2012, 41(8): 68-71.

GUAN Hong-yan, YUAN Qing-long, ZHANG Bao-qing. Corrosion behavior of high aluminum and iron bronze Cu-15Al-xFe alloy in 5% H₂SO₄ solution[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(8): 68-71.

[7] 路 阳, 金娥馨, 李文生, 张 鹤, 李 振, 王亚青. Fe 对高铝青铜摩擦磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2008, 22(2): 135-137.

LU Yang, JIN E-xin, LI Wen-sheng, ZHANG He, LI Zhen, WANG Ya-qing. Effect of Fe on wear-friction properties of high aluminum bronze[J]. Materials Review, 2008, 22(2): 135-137.

[8] 王智平, 金玉花, 路 阳, 李文生, 徐建林. 高铝青铜 Cu14AlX 摩擦磨损特性的研究[J]. 铸造, 2003, 52(3): 185-189.

WANG Zhi-ping, JIN Yu-hua, LU Yang, LI Wen-sheng, XU Jian-lin. Friction property of new wear-resistance Cu14AlX aluminum bronze[J]. Foundry, 2003, 52(3): 185-189.

[9] 米国发, 张锦志, 南红艳, 王有超. 固溶时效对新型 Cu-Al-Fe-X 合金摩擦磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(4): 175-184.

MI Guo-fa, ZHANG Jin-zhi, NAN Hong-yan, WANG You-chao. Effects of solution and aging treatment on sliding wear behavior

- of Cu-Al-Fe-X aluminum bronzes alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(4): 175-184.
- [10] LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang, YUAN Li-hua, XIAO Rong-zhen, ZHAO Xu-dong. Corrosion and wear behaviors of Al-bronzes in 5% H_2SO_4 solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 311-318.
- [11] 朱治愿, 史永臣, 柯维涛. 一种多元铝青铜合金的摩擦磨损特性[J]. 金属热处理, 2011, 36(12): 82-85.
- ZHU Zhi-yuan, SHI Yong-chen, KE Wei-tao. Tribological characteristic of a multi-aluminum bronze alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(12): 82-85.
- [12] 黄海友, 聂铭君, 栾燕燕, 谢建新. 连续柱状晶组织 Cu-12% Al 合金在 3.5%NaCl 和 10%HCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2469-2476.
- HUANG Hai-you, NIE Ming-jun, LUAN Yan-yan, XIE Jian-xin. Corrosion behavior of continuous columnar-grained Cu-12%Al alloy in 3.5%NaCl and 10%HCl solutions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2469-2476.
- [13] 刘锦平, 刘雪峰, 黄海友, 谢建新. Cu-12% Al 合金线材的马氏体结构及其对力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1052-1058.
- LIU Jin-ping, LIU Xue-feng, HUANG Hai-you, XIE Jian-xin. Martensite structure of Cu-12%Al alloy and its effect on mechanical properties[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1052-1058.
- [14] 路阳, 王智平, 李文生, 寇生中, 苏义祥, 任虎平, 徐建林. 热处理对铜合金模具材料组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2002, 27(3): 40-42.
- LU Yang, WANG Zhi-ping, LI Wen-sheng, KOU Sheng-zhong, SU Yi-xiang, RENG Hu-ping, XU Jian-lin. Effects of heat treatment process on microstructure and hardness on copper alloy die[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(3): 40-42.
- [15] 康立忠, 张荻, 欧阳求保. 颗粒增强铝基复合材料干摩擦磨损研究进展[J]. 热加工工艺, 2008, 37(12): 104-108.
- KANG Li-zhong, ZHANG Di, OUYANG Qiu-bao. Research progress of friction and wear behavior of particle reinforced aluminum matrix composite under dry sliding[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(12): 104-108.
- [16] ALPAS A T, ZHANG J. Wear rate transition in cast aluminum-silicon alloys reinforced with SiC particles[J]. Scr Metall, 1992, 26: 505-509.
- [17] ALPAS A T, ZHANG J. Wear regimes and transitions in Al_2O_3 particulate reinforced aluminum alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1993, 161: 273-284.
- [18] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 233-236.
- SUN Jia-shu. Wear of alloy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 233-236.

(编辑 何学锋)