

文章编号: 1004-0609(2006)03-0511-07

高铝青铜 Cu-14Al-X 合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为^①

李文生¹, 王智平¹, 路 阳¹, 袁利华¹, 徐建林¹, 魏迪生²

(1. 兰州理工大学 有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 甘肃省水利水电工程局, 兰州 730000)

摘 要: 通过静态浸泡腐蚀实验、电化学实验、X 射线衍射分析、扫描电镜、电子能谱仪、电子探针等方法研究高铝青铜合金 Cu-14Al-X 在 3.5% NaCl(质量分数)溶液中的耐蚀性能及腐蚀行为。结果表明: 在 NaCl 溶液中, Cu-14Al-X 合金具有良好的耐蚀性能, 合金中的 ($\alpha + \gamma_2$) 共析体和 β 相、 α 相、 K 相相比, 具有优先腐蚀倾向, 合金发生的主要是脱铝腐蚀。腐蚀钝化膜的形成及热处理后合金各相成分趋于一致, 均使合金耐腐蚀性能得到改善。

关键词: 铝青铜; 腐蚀; 耐蚀性能; 腐蚀速率; 脱铝

中图分类号: TG 174

文献标识码: A

Corrosion behavior of Cu-14Al-X bronze alloy in 3.5%NaCl solution

LI Wen-sheng¹, WANG Zhi-ping¹, LU Yang¹,

YUAN Li-hua¹, XU Jian-lin¹, WEI Di-sheng²

(1. State Key Laboratory of Advanced Nonferrous Materials,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Province Conservancy and Hydro-power Engineering Bureau,
Lanzhou 730000, China)

Abstract: The corrosion resistance and behavior of Cu-14Al-X bronze in 3.5% NaCl (mass fraction) solution was investigated by using static immersing corrosion and electrochemistry test, X-ray diffractometry, scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and electron probe micro-analyzer. The results indicate that the corrosion resistance of Cu-14Al-X is perfect in 3.5% NaCl solution. ($\alpha + \gamma_2$) phase suffers a dealuminization attack superior to β phase, α phase and K phase, the high Al-bronze suffers dealuminization corrosion. And the passivation patterns and the composition of each phases becoming more homogeneous are moderator to corrosion.

Key words: aluminum bronze; corrosion; corrosion resistance; corrosion rate; dealuminization

铝青铜是目前应用较广泛的一种铜合金, 以其优良的导热、耐蚀性能而广泛地用于电厂、海船中冷凝管的热交换材料及其他耐蚀耐磨部件^[1]。关于铜合金的腐蚀行为的研究报道很多^[2-4], 近年来也有关于低铝含量(Al 的质量分数 $\leq 9.4\%$) 的铝青铜

脱成分腐蚀机理的报道^[5-7], 但是对于含铝量高(Al 的质量分数 $\geq 9.4\%$) 的铝青铜的腐蚀性能及腐蚀机理的研究鲜见报道。

Cu-14Al-X 复杂高铝青铜是以铜、铝为基, 添加 Mn、Fe、Ni 等合金元素的多元铜合金。文献

① 基金项目: 甘肃省科技攻关资助项目(GS992-A52-052)

收稿日期: 2005-06-16; 修订日期: 2005-09-20

作者简介: 李文生(1973-), 男, 工程师, 博士研究生

通讯作者: 李文生, 工程师; 电话: 0931-2976640; E-mail: Wensheng-li@sohu.com.

[8-13] 就该合金的制备、热处理及摩擦磨损性能等进行了深入研究, 由于其优良的力学性能、耐磨性能和减磨性能等其他特种性能, 正被广泛应用于静态无冲击挤压、拉伸模具。但当合金制品暴露在潮湿的空气中时, 表面会凝结一层薄薄的水膜, 空气中的 CO_2 , SO_2 , NaCl 溶解到这层水膜中就会在金属表面形成电解质溶液, 从而引发金属制品发生腐蚀^[3, 7]。本文作者对 Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为进行研究。

1 实验

1.1 试样制备

合金主要成分列于表 1。制备采用具有自主知识产权(200310122220.3)的一次共装、氯化物化学精炼、预脱氧和稀土终脱氧相结合的熔炼工艺方案^[8-10]。即先将电石(CaC_2 还原性覆盖剂)放入炉底, 并依次将铜、铝炉料相间放入炉堂深处(用铜块两面包住铝块一起压入熔炉的深处), 再将 Co、Ni、Fe、Mn 等少量或微量合金的金属碎块夹杂其中, 尽量装实, 并剩余少量的铝板(约占铝总量的 5% 左右)和锌以作调节温度和预脱氧之用。装料后将炉体连同合金料一起小功率预热 5~8 min, 而后加大功率快速熔化。待所有炉料化清后, 用石墨棒充分搅拌, 使熔体内各种合金元素混合均匀并压入剩余的铜板和铝板进行预脱氧, 温度调节至 1250℃ 左右, 之后对合金进行的化学精炼和稀土终脱氧处理。并对合金进行含气量检验, 控制浇注温度(1160~1250℃)进行浇注。

表 1 Cu-14Al-X 合金的设计成分

Table 1 Designed composition of Cu-14Al-X alloy (mass fraction, %)

Cu	Al	Fe	Mn	Bal.
75.0~80.0	14.0~16.0	2.0~4.0	0.8~1.0	0.8~2.6

实验试样是在铸态下用线切割、机加工等方法加工成尺寸为 20 mm × 20 mm × 5 mm。而后对部分试样进行(920℃, 3 h + 580℃, 5 h 固溶时效)热处理。文中以 CA 和 HT 分别代表铸态和热处理试样, 并以铸态的 QAl9-4 为对比材料。

1.2 实验过程及方法

腐蚀试样在实验前采用水磨砂纸依次将试样工作面打磨至 1200#, 经超声清洗后, 放置干燥器

24 h, 然后测量面积和称量质量。腐蚀实验采用静态浸泡的方法, 腐蚀介质为用蒸馏水做溶剂配制的 3.5% NaCl 溶液, 实验温度为 20℃, 实验持续时间为 168 h, 用 $V(\text{HCl}) : V(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 1$ 的溶液去除腐蚀产物后称量。实验数据均为 3 次试样结果的平均值。

用 M263 电化学测试系统测定 Cu-14Al-X 合金及对比合金 QAl9-4 在 3.5% NaCl(质量分数)中的极化曲线, 辅助电极为铂片, 参比电极为饱和甘汞电极, 扫描速度为 0.5 mV/s。

采用带 EDAX9100 能谱分析仪的 S-520 扫描电子显微镜(SEM)和电子探针(EPMA)对试样进行表面形貌观察和微区成分分析, D/MAX2500PC 型 X 射线衍射仪进行物相分析。采用 PHI 5702 多功能电子能谱仪, Al 靶, 对腐蚀磨损表面膜进行检测。

2 实验结果

2.1 静态腐蚀速率

表 2 所列为 Cu-14Al-X 合金铸态(CA)、热处理态(HT)和铸态 QAl9-4 在 3.5% NaCl 溶液中 20℃ 时的腐蚀速率。从表中可以看出, 热处理后合金的腐蚀速率相对降低了, 低于普通铸态铝青铜 QAl9-4。

表 2 20℃ 时 Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of Cu-14Al-X alloys in 3.5% NaCl solution at 20℃ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)

CA/Cu-14Al-X	HT/Cu-14Al-X	QAl9-4
0.0264	0.0258	0.026

2.2 腐蚀产物

腐蚀实验过程中, NaCl 溶液中的试样表面有白色的絮状物生成, 溶液呈微黄色, 且容器底部有大量的白色沉淀和少量的黄色沉淀。图 1 所示为合金腐蚀沉淀物的 EPMA 全扫元素分布图, 可以发现腐蚀产物中含有 Cu、Fe、Al 等元素。说明在腐蚀过程中 Cu、Fe、Al 等都发生了腐蚀并脱落。

2.3 极化曲线

图 2 所示为 Cu-14Al-X 合金(铸态 CA 和热处理态 HT)、QAl9-4 合金在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线。由极化曲线(阳极极化曲线)可得到合金在腐蚀介质中的自腐蚀电位 E_R , 列于表 3。不同合金

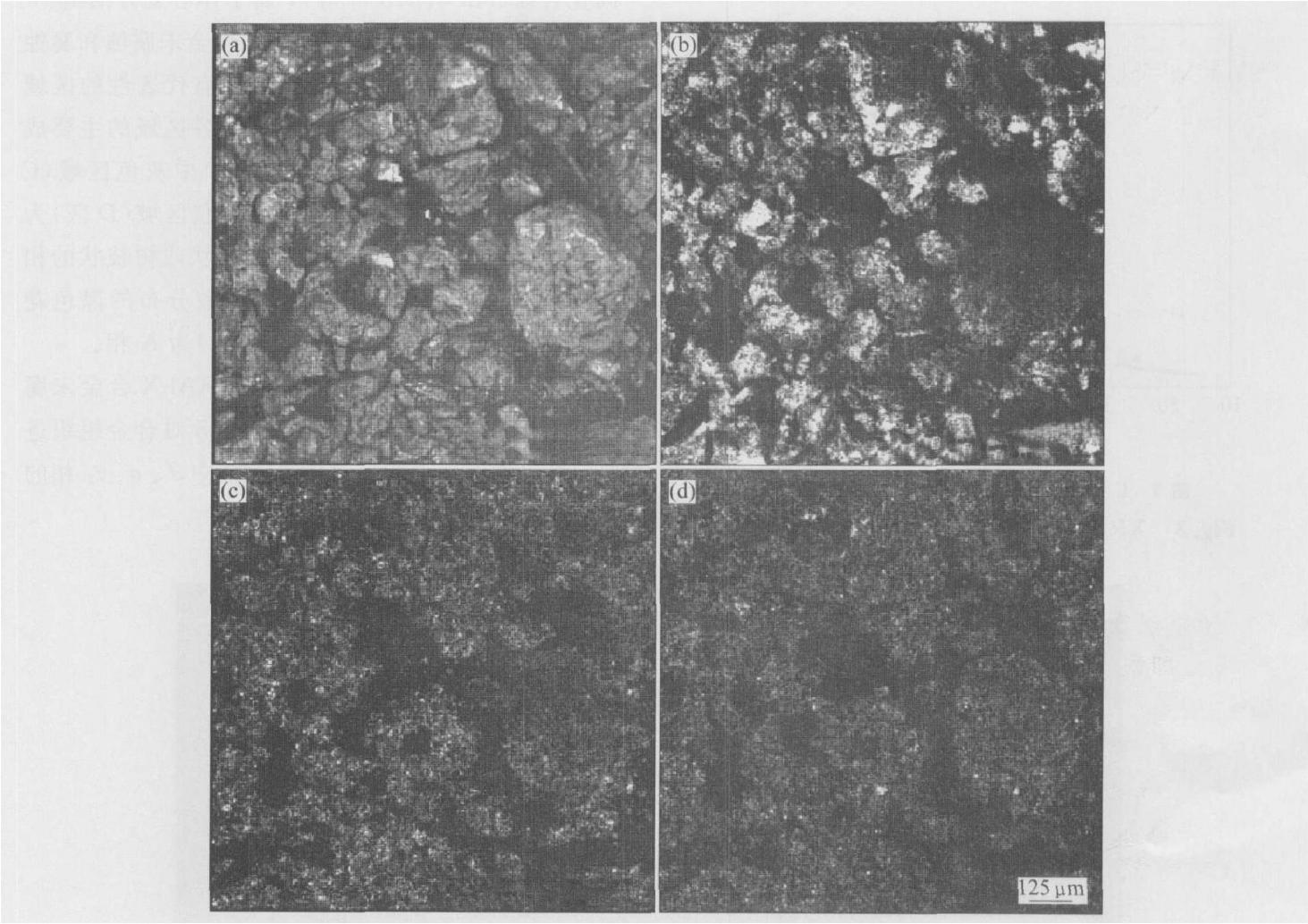


图 1 合金在 NaCl 中腐蚀产物 EPMA 全扫元素分布

Fig. 1 Debris scan mapping photograph of Cu-14Al-X alloy in NaCl solution

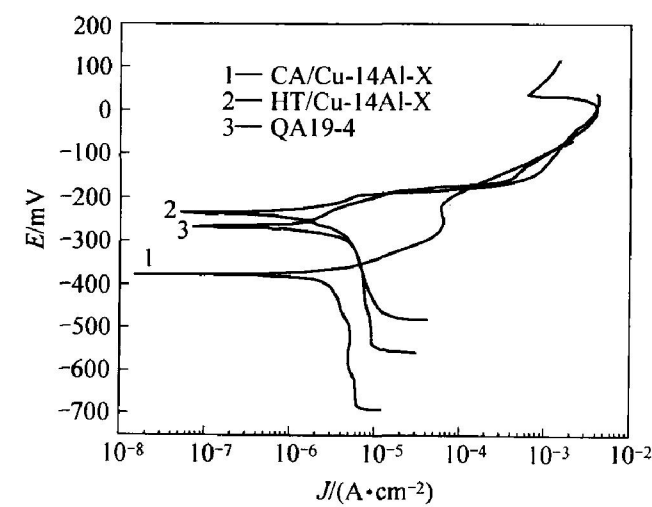


图 2 铝青铜在 3.5% NaCl 溶液中的极化曲线

Fig. 2 Polarization curves of bronzes in 3.5% NaCl

在腐蚀溶液中维钝、致钝电流密度不同, 曲线上有明显的活化—钝化转化区。因为自腐蚀电位越高, 合金的耐蚀性能越好, 因此可以判断出合金的稳定性即耐蚀性顺序为: HT/Cu-14Al-X、QA19-4、CA/Cu-14Al-X, 与表 2 中结果相符合。

表 3 合金在介质中的稳定电位

Table 3 Stable potential of bronzes in solution (mV)

CA/Cu-14Al-X	HT/Cu-14Al-X	QA19-4
- 378	- 239	- 269

2.4 组织及微区成分

图 3 所示为铸态 CA/Cu-14Al-X 合金的 X 射线衍射谱。结果表明, Cu-14Al-X 合金的铸态组织为 $\alpha + \beta + \gamma_2 + K$ 相组成。其中, α 相是以 Cu 为基的固溶体 (Cu (Zn) 等), 即富铜相, 属面心立方结构; β 相是 β 相的同素异构体, β 相是以 Cu_3Al 为基的固溶体, 属体心立方结构, 在 565 $^{\circ}\text{C}$ 时 β 相发生共析转变, 形成 ($\alpha + \gamma_2$) 共析体, 但在实际铸造条件下, 很难达到 β 相共析转变所需的缓慢冷却的要求, 因而 β 相在快速冷却时会来不及分解而产生亚稳定的 β' 相组织; γ_2 相是以电子化合物 Cu_9Al_4 为基的固溶体, 具有复杂立方晶格; K 相主要是金属

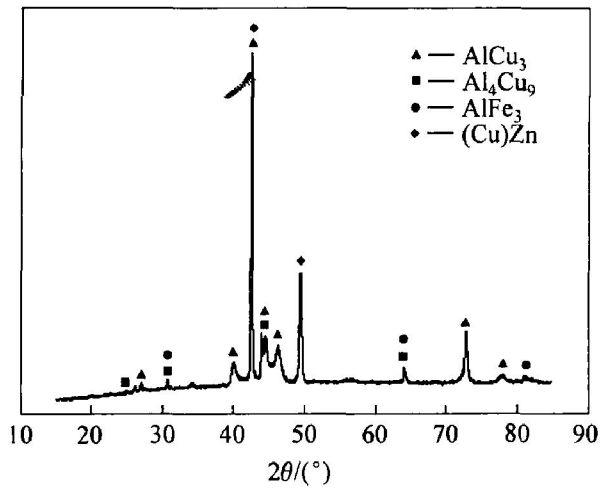


图 3 CA/Cu-14Al-X 合金的 X 射线衍射谱

Fig. 3 XRD pattern of CA/Cu-14Al-X alloy

间化合物(AlFe 、 AlFe_3 等), 属于体心立方结构。

图 4 所示为 CA/Cu-14Al-X 合金未腐蚀和腐蚀后的 SEM 像, 从中分别选取 4 个有代表性的区域用能谱(EDS)进行微区成分分析, 各区域的主要成分列于表 4 与表 5。可知, 图 4(a) 中灰色区域(C 区)为 $\beta + \alpha$ (少量) 相, 亮灰色条纹状区域(D 区)为 ($\alpha + \gamma_2$) 体, 黑色的花状、杆状、粒状或树枝状的相周围的白色相(B 区)为 γ_2 相, 弥散分布的黑色花状、杆状、粒状或树枝状的相(A 区)为 K 相。

图 4(c), (d) 所示为 HT/Cu-14Al-X 合金未腐蚀和腐蚀后的 SEM 像, 同样用 DES 对合金组织进行分析, 结果发现除 K 相外, 合金中 β 、 α 、 γ_2 相的相成分均趋于一致, 分布很均匀。

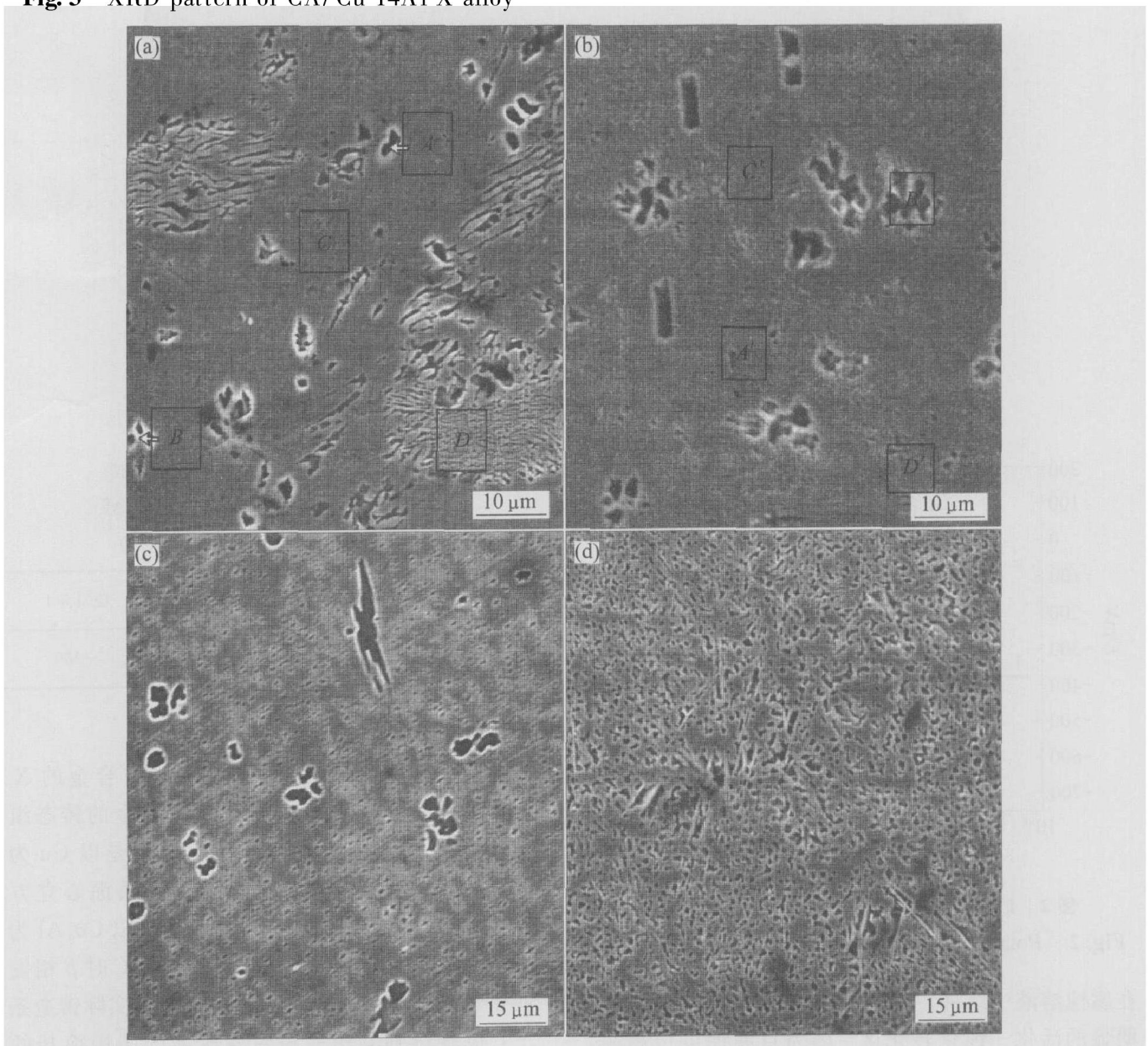


图 4 Cu-14Al-X 合金及腐蚀后的组织形貌

Fig. 4 SEM microstructures of Cu-14Al-X alloy

(a) —CA; (b) —CA/Corrosion; (c) —HT; (d) —HT/Corrosion

表 4 CA/Cu-14Al-X 合金组织中各区域的主要化学成分

Table 4 Main chemical composition in different zones on CA/Cu-14Al-X alloy surface

Point	Al		Fe		Mn		Cu	
	w / %	x / %	w / %	x / %	w / %	x / %	w / %	x / %
A	4.37	9.61	8.41	8.93	0.60	0.65	86.61	80.80
B	11.21	22.68	7.82	7.65	0.69	0.68	80.28	68.98
C	4.29	9.44	8.63	9.17	0.50	0.54	86.59	80.86
D	4.61	10.10	8.66	9.16	0.65	0.69	86.08	80.04

表 5 CA/Cu-14Al-X 合金在 20 ℃ 腐蚀后的组织中各区域的主要化学成分

Table 5 Main chemical composition in different zones on corroded CA/Cu-14Al-X alloy surface at 20 ℃

Point	Al		Fe		Mn		Cu	
	w / %	x / %	w / %	x / %	w / %	x / %	w / %	x / %
A'	0.91	2.10	4.55	5.09	0.16	0.19	94.38	92.63
B'	6.10	13.12	8.42	8.75	0.60	0.63	88.88	77.49
C'	3.93	8.72	7.08	7.57	0.17	0.19	88.82	83.53
D'	2.42	5.45	7.00	7.63	0.67	0.74	89.92	86.18

2.5 光电子能谱分析结果

图 5 所示为 HT/Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀后的表面 XPS 全扫描图。谱图中可以观察到除了 Cu 2p 谱带外, 还有 O 1s、C 1s、Cl 2p 等谱带, 但没有发现 Fe、Al 的谱带, 说明在溶液中腐蚀后, 试样的浅表层(< 2 nm) 已没有 Fe、Al 存在。

图 6 所示为与图 4(d) 相应 XPS 分扫描图。图 6 (a) 中 932.5 eV 和 952.6 eV 处的两峰为 Cu 和 Cu⁺ 形成的 Cu 2p; 图 6 (b) 中在 198.6、199.8 和 200.4 eV 处 3 个峰叠加在一起, 是 Cl⁻ 形成的 Cl 2p 特征峰^[14, 15]。

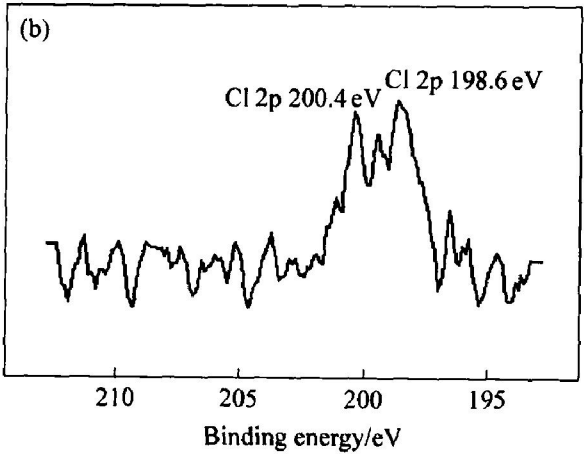
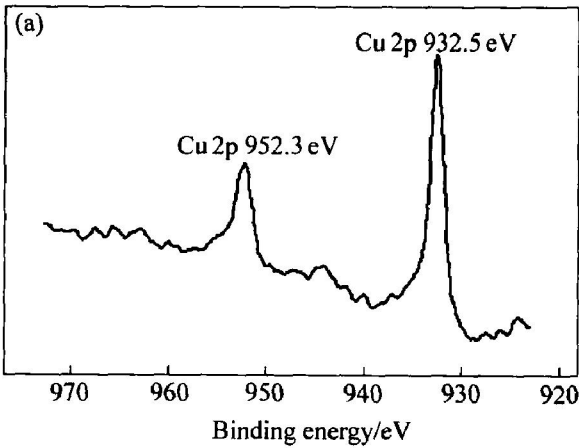


图 5 Cu-14Al-X 合金在 NaCl 溶液腐蚀后的 XPS 全扫描图

Fig. 5 XPS spectrum measured for Cu-14Al-X alloy corroded in NaCl solution

图 6 Cu-14Al-X 合金在 NaCl 溶液腐蚀后的 XPS 分扫描图

Fig. 6 XPS spectra measured for Cu-14Al-X alloy surface corroded in NaCl solution
(a) —Cu2p; (b) —Cl2p

3 讨论与分析

3.1 Cu-14Al-X 合金的耐蚀性能

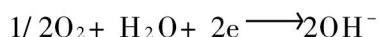
由表 2 中可以看出, Cu-14Al-X 合金和 QAl9-4 合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀速率均很低, 都处在腐蚀四级标准中的优良级^[1, 2, 16], 说明该材料在 3.5% NaCl 溶液中有良好的耐腐蚀性能。

由图 2 可以看出, 在 NaCl 溶液中自腐蚀电位按 2, 3, 1 顺序逐渐负向增大, 说明 HT/Cu-14Al-X 合金在 NaCl 溶液中的耐蚀性最好, QAl9-4 次之, 而 CA/Cu-14Al-X 合金最差, 这与静态腐蚀速率相吻合。曲线 1, 2, 3 上都呈现出明显的活化-钝化-活化转变现象, 且钝化电位按 1, 2, 3 逐渐增大, 并且同一电位下, CA/Cu-14Al-X 合金的极化电流密度增加很大, QAl9-4 次之, HT/Cu-14Al-X 合金较小, 说明在 NaCl 溶液中 CA/Cu-14Al-X 合金容易被腐蚀, 而后形成稳定腐蚀膜, 再后被破坏的倾向最大, 而 NaCl 溶液对 QAl9-4 和 HT/Cu-14Al-X 的腐蚀作用较弱。

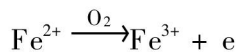
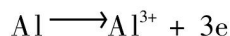
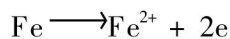
3.2 腐蚀机理

腐蚀实验过程中, NaCl 溶液中的试样表面有白色的絮状物生成, 该溶液呈微黄色, 且容器底部有大量的白色沉淀和少量的黄色沉淀。从合金腐蚀沉淀物的 EPMA 全扫元素分布图(图 1)可知, 该白色的絮状物和白色的沉淀为 $\text{Al}(\text{OH})_3$, 黄色的沉淀为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 CuCl 。用 $V(\text{HCl}) : V(\text{H}_2\text{O}) = 1 : 1$ 的溶液去除腐蚀产物后, 试样表面变红, 呈现出纯铜的颜色。这也说明: 在 NaCl 溶液中, Al、Fe 发生了选择性腐蚀, 表面剩下大量 Cu, 合金发生了脱成分腐蚀。

另外, 对比合金铸态表面(图 4(a), (b))中的各相合金元素含量, 腐蚀后各区域中的 Al、Mn 元素的含量均明显减少, 尤其是含 Al 量的变化量相当大, 而各区域中 Cu 的含量均有明显的增加, K 相中的 Fe 元素的含量明显下降(表 4, 表 5)。可见, 高强耐磨铝青铜 Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀过程中 Al、Fe 等元素优先溶解, 亦可以说明合金腐蚀机理是脱铝腐蚀。由此可以推断, Cu-14Al-X 合金在 NaCl 溶液中发生的是氧的去极化腐蚀, 阴极反应为



阳极反应为



由图 5 和图 6 的光电子能谱(XPS)分析可知, 在腐蚀产物中有 Cu^+ 存在。所以, 发生腐蚀后合金表面亦存在平衡关系: $\text{Cu} + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{Cu}^+$, 并极大地向右移动, 生成 $[\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_3]$ 等络合物^[7, 17, 18]。因为在含 Cl^- 的溶液中, Cu^+ 会被消耗转化为 CuCl_2 , 有利于一价铜离子作为主要溶解产物。氯化亚铜水解生成氧化亚铜, $2\text{CuCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Cu}_2\text{O} + 2\text{HCl}$ 。根据文献[17, 18]的研究, 在任何特殊的部位上, 如果形成 CuCl_2 的速率加快或水解消耗 CuCl_2 的速度降低, 那么在该部位就会发生小孔腐蚀。在有些部位形成的氧化亚铜薄膜覆盖有小块固体氯化铜, 被氧化成铜离子, $\text{CuCl}_2 \longrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{Cl}^- + \text{e}^-$, 这些新生成的铜离子和基体反应产生亚铜离子, $\text{Cu}^{2+} + \text{Cu} \longrightarrow 2\text{Cu}^+$, 这就构成促使基体金属腐蚀的阳极反应。但相对脱 Al、Fe 等选择性溶解腐蚀, 这样的电化学腐蚀相对困难且发生得很慢。而生成的 Cu^{2+} 大多为可溶盐, 所以在 X 光电子能谱分析中并未发现 Cu^{2+} 存在的事实。

与图 2 中极化曲线活化-钝化转化相一致, 即合金在溶液中腐蚀后, 表层形成一层铜络合物膜, 从而有效地降低了合金的腐蚀速率, 在极化曲线上表现出一定的钝化趋势。

3.3 合金的组织与脱成分腐蚀

CA/Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 中腐蚀后的表面 SEM 形貌(图 4(b))与未被腐蚀(图 4(a))进行对比, 可知腐蚀后的表面亮灰色条纹状区域明显减少, 表明 $(\alpha + \gamma_2)$ 共析体首先发生了腐蚀; 基体 $\beta + \alpha$ (少量)相、K 相和 γ_2 相也受到了不同程度的腐蚀, 但腐蚀程度较轻。也就是说, 和 β 、 α 、K 相比较, $(\alpha + \gamma_2)$ 共析体具有明显的优先腐蚀倾向。这是因为这种 $(\alpha + \gamma_2)$ 共析体中的 γ_2 相是连续分布于 α 相中的, 而它相对于 α 相是一个十分危险的阳极, 并且可以作为一个通道, 使共析组织发生腐蚀^[3, 6]; 可见, 在铝青铜的脱成分腐蚀中, 共析 $(\alpha + \gamma_2)$ 、亚稳 β 相组织的含 Al、Fe 量高于 α 相中, 化学不均匀性差异产生了微电池效应, 使含 Al、Fe 量高的 $(\alpha + \gamma_2)$ 和 β 相成为电位更负的阳极相, 并首先发生腐蚀。而在热处理后, HT/Cu-14Al-X 合金中 β 、 α 、 γ_2 相分布很均匀(图 4(c)), 且各相成分均趋于一致, 所以腐蚀很均匀(图 4(d))。

REFERENCES

- [1] 朱相荣,王相润. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京:国防工业出版社,1999:1-4.
ZHU Xiang-rong, WANG Xiang-rong. Marine Corrosion and Protection of Metals[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 1-4.
- [2] 蒋金勋,张佩芳,高满同. 金属腐蚀学[M]. 北京:国防工业出版社,1986. 2-15.
JIANG Jin-xun, ZHANG Pei-fang, GAO Man-tong. Metals Corrosion[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1986. 2-15.
- [3] Ateya B G, Ashour E A, Sayed S M. Stress corrosion behavior of α aluminum bronze in saline water[J]. Corrosion, 1994, 50(1): 20-25.
- [4] Hashem A, Caceres P G, Riad W T. Cavitation corrosion behavior of cast nickel-aluminum bronze in sea water[J]. Corrosion, 1995, 51(5): 331-342.
- [5] Stupnisek-Lisac E, Galic N, Gasparac R. Corrosion inhibition of copper in hydrochloric acid under flow conditions[J]. Corrosion, 2000, 56(11): 1105-1111.
- [6] 韩忠,江伟明,林海潮. 海水管路系统中铝青铜腐蚀行为的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(6): 188-192.
HAN Zhong, JIANG Wei-ming, LIN Hai-chao. Study on corrosion behavior of aluminum bronze in sea water pipe line system[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000, 20(6): 188-192.
- [7] 于辉,董飒英,黄国胜. 铝青铜在 3.5% NaCl 溶液中的脱成分腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(6): 345-349.
YU Hui, DONG Sa-ying, HUANG Guo-sheng. Corrosion behavior of Al-bronze in 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(6): 345-349.
- [8] 路阳,李文生,王智平. 新型模具铝青铜合金材料的研制[J]. 热加工工艺, 2002(3): 45-47.
LU Yang, LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping. New developed aluminum bronze alloy for die[J]. Hot Working Technology, 2002(3): 45-47.
- [9] 李文生,王智平,路阳. 高强耐磨铝青铜热处理工艺的研究[J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 28(2): 26-29.
LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, LU Yang. Research on heat-treatment process of high strength wear-resistance aluminum alloy[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2002, 28(2): 26-29.
- [10] 李文生,路阳,王智平,等. 高铝青铜 Cu-14Al-X 合金的气孔及消除方法[J]. 铸造, 2003, 52(9): 682-686.
LI Wen-sheng, LU Yang, WANG Zhi-ping, et al. Causes and preventive measures of the gas holes in the Cu-14Al-X bronze castings[J]. Foundry, 2003, 52(9): 682-686.
- [11] 路阳,李文生,王智平,等. 热处理对铜合金模具材料硬度性能的影响[J]. 金属热处理, 2002(3): 40-43.
LU Yang, LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, et al. Effects of heat treatment process on microstructure and hardness of copper alloy die[J]. Metals Heat-treatment, 2002(3): 40-43.
- [12] 李文生,路阳,彭焕先,等. 挤压不锈钢用高铝青铜合金模具材料[J]. 有色金属, 2004, 56(2): 15-18.
LI Wen-sheng, LU Yang, PENG Huan-xian, et al. New aluminum bronze for stainless steel squeezing mould[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(2): 15-18.
- [13] 李文生,路阳,金玉花,等. 新型铝青铜合金的摩擦性能[J]. 材料导报, 2005, 19(4): 121-124.
LI Wen-sheng, LU Yang, JIN Yu-hua, et al. Tribological properties of a novel aluminum bronze[J]. Materials Review, 2005, 19(4): 121-124.
- [14] Moulder J F, Stickle W F, Sobol P D, et al. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy[M]. Minnesota: Physical Electronics Inc, 1992. 45-46.
- [15] Squarcialupi M C, Bernardini G P, Faso V, et al. Characterisation by XPS of the corrosion products formed on bronze surfaces[J]. Journal of Cultural Heritage, 2003(3): 199-204.
- [16] 张文奇,石声泰,肖纪美. 金属腐蚀手册[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987. 114-127.
ZHANG Wen-qi, SHI Shen-tai, XIAO Ji-mei. Handbook of Metals Corrosion[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Press, 1987. 114-127.
- [17] Scendo M. Potassium ethyl xanthate as corrosion inhibitor for copper in acidic chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2005, 47(7): 1738-1749.
- [18] Savaskan T, Aydin M. Fatigue behavior of monotectoid-based Zn-Al-Cu in 3.5% NaCl and 1% HCl solutions[J]. Materials Characterization, 2004, 52(4): 269-278.

(编辑 陈爱华)