

Cu-14Al-X 合金在 5.0% H₂SO₄ 溶液中的腐蚀行为

李文生, 路 阳, 王智平, 袁利华

(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)

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、电子探针、光电子能谱等方法研究高铝青铜合金 Cu-14Al-X 在 5.0% H₂SO₄ 溶液中的耐蚀性能及腐蚀行为。结果表明: 在 H₂SO₄ 溶液中, Cu-14Al-X 合金有良好的耐蚀性能, 合金中的($\alpha+\gamma_2$)共析体与 β' 相、 α 相和 κ 相比, 具有优先腐蚀倾向, 合金主要发生脱铝腐蚀。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 146.1; TG 174

文献标识码: A

Corrosion behavior of Cu-14Al-X alloy in 5.0% H₂SO₄ solution

LI Wen-sheng, LU Yang, WANG Zhi-ping, YUAN Li-hua

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The corrosion resistance and behaviors of Cu-14Al-X bronze alloy in 5.0% H₂SO₄ solution were investigated by using static immersing corrosion and electrochemistry test, X-ray diffraction, scanning electron microscope, X-ray photo-electron spectroscopy and electron probe micro-analyzer. The results show that the corrosion resistance of Cu-14Al-X alloy is well in H₂SO₄ solution. The ($\alpha+\gamma_2$) phase suffers a dealuminization attack superior to β' phase, α phase and κ phase. The passivation patinas and the composition of each phases becoming more homogeneous are moderator to the dealuminization corrosion of high aluminum bronze.

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]。近年来, 关于铜合金的腐蚀行为^[2-4]和低铝 ($w(\text{Al}) \leq 9.4\%$) 的铝青铜脱成分腐蚀机理^[5-6]的研究报道很多, 但对于高铝 ($w(\text{Al}) \geq 9.4\%$) 的铝青铜的腐蚀性能及腐蚀机理的研究鲜见报道^[7-8]。

Cu-14Al-X 高铝青铜是以 Cu、Al 为基体, 添加 Mn、Fe、Ni 等合金元素的多元铜合金。路阳等^[9-15]对该合金的制备、热处理及摩擦磨损性能等进行研究。由于其优良的力学性能、耐磨性能和减摩性能等特点, 正被广泛应用于静态无冲击挤压、拉伸模具。但从工

业实际出发, 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 CO₂、SO₂ 和 NaCl 溶解到这层水膜中就会在金属表面形成电解质溶液, 从而引发金属制品的腐蚀发生^[3, 5, 7-8]。为扩展该合金的海洋冷凝管应用领域, 在对 Cu-14Al-X 合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为研究的基础上^[2, 8], 本文作者进而对合金在 5.0% H₂SO₄ 溶液中的腐蚀行为进行研究。

1 实验

1.1 试样制备

基金项目: 甘肃省科学基金 B 类项目(3ZS062-B25-030)

收稿日期: 2006-10-13; 修订日期: 2007-03-20

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

采用有自主专利方法制备合金^[16], 合金的主要成分如表1所示。

表1 Cu-14Al-X合金的设计成分

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

Cu	Al	Fe	Mn	Others
75-80	14-16	2-4	0.8-1.0	0.8-2.6

在铸态下用线切割、机加工等方法将合金加工成尺寸为20 mm×20 mm×5 mm的实验试样。然后对部分试样进行(920 °C、3 h+580 °C、5 h固溶时效)热处理。铸态和热处理试样分别以CA和HT表示, 并以铸态工业通用铝青铜QA19-4作对比材料。

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, 然后测量其面积和称其质量。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5.0%(质量分数)H₂SO₄溶液, 实验温度为20 °C, 实验持续时间为168 h, 用V(HCl):V(H₂O)=1:1溶液去除腐蚀产物后用万分之一电子天平称量质量。按照式(1)计算其腐蚀速率^[1, 17]。实验数据均为3件平行试样结果的平均值。

$$v = \frac{m_0 - m_1}{St} \quad (1)$$

式中 v 为质量损失时的腐蚀速率, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; m_0 为金属试样的初始质量, g ; m_1 为清除了腐蚀产物后金属的质量, g ; S 为金属试样的面积, m^2 ; t 为腐蚀进行的时间, h 。

用M263电化学测试系统测定Cu-14Al-X合金及对比合金QA19-4在5.0% H₂SO₄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; 用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QA19-4在5.0% H₂SO₄溶液中20 °C的腐蚀速率。从表2可以看出, 所研究的铝青铜在H₂SO₄溶液中的腐蚀速率稍低于普通铸态铝青铜QA19-4的腐蚀速率, 合金经热处理后的腐蚀速率稍降低。

表2 20 °C时Cu-14Al-X合金在5.0% H₂SO₄溶液中的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of Cu-14Al-X alloys in 5.0% H₂SO₄ solution at 20 °C

Alloy	Corrosion rate/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
CA/Cu-14Al-X	27.5
HT/Cu-14Al-X	26.4
QA19-4	28.4

CA: cast; HT: Heat treatment

2.2 腐蚀现象

Cu-14Al-X合金在5.0% H₂SO₄溶液中腐蚀后, 试样表面干净, 溶液基本不变色, 浸泡168 h后取出的试样表面呈红色。图1所示为HT/Cu-14Al-X合金腐蚀后的表面EPMA面扫描元素分布像。

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)和QA19-4合金在5.0% H₂SO₄溶液中的极化曲线。由极化曲线(阳极极化曲线)可知, 合金在腐蚀介质中的自腐蚀电位如表3所示, 不同合金中活化元素被腐蚀的速率有明显不同, 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由HT/Cu-14Al-X、CA/Cu-14Al-X到QA19-4依次降低, 与表2中结果相符合。

2.4 组织及微区成分

图3所示为CA/Cu-14Al-X合金的X射线衍射谱。由图可见, Cu-14Al-X合金的铸态组织为 $\alpha+\beta'+\gamma_2+\kappa$ 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Cu₃Al为基的固溶体, 属体心立方结构。在565 °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Al₄Cu₉为基的固溶体, 具有复杂立方晶格; κ 相主要是金属间化合物(AlFe、AlFe₃等), 属于体心立方结构。

图4(a)和(b)所示分别为CA/Cu-14Al-X合金未腐

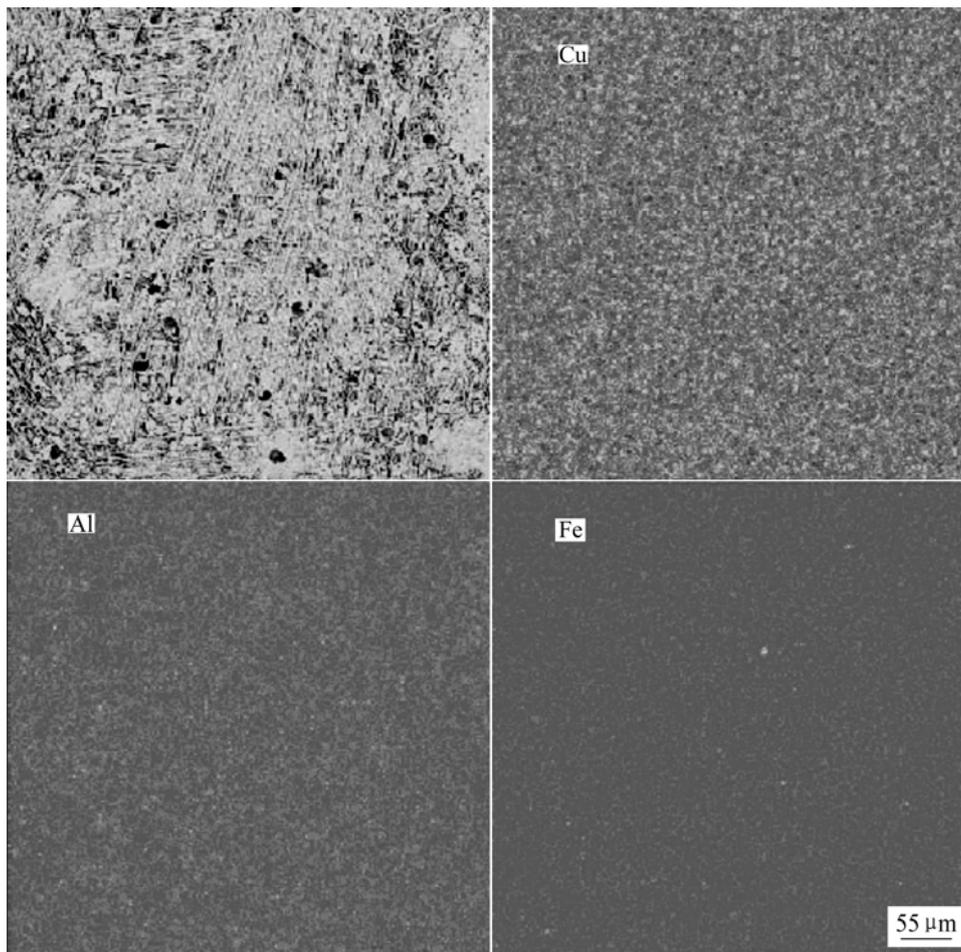


图 1 HT/Cu-14Al-X 合金在 5.0% H₂SO₄ 中腐蚀后的表面 EPMA 面扫描元素分布像

Fig.1 EPMA images of surface elements of HT/Cu-14Al-X alloy corroded in 5.0% H₂SO₄ solution

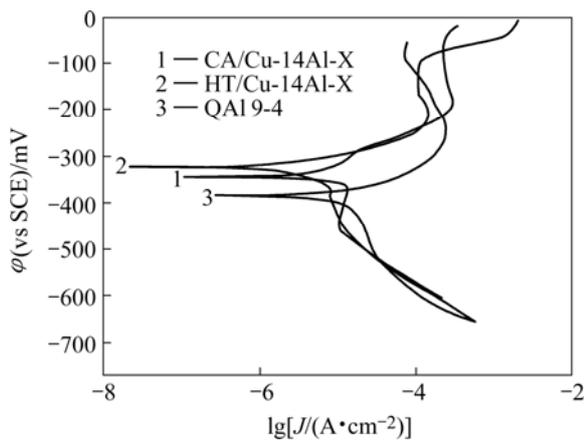


图 2 Cu-14Al-X 合金和 QAl9-4 合金在 5.0% H₂SO₄ 溶液中的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of Cu-14Al-X alloy and QAl9-4 alloy in 5.0% H₂SO₄

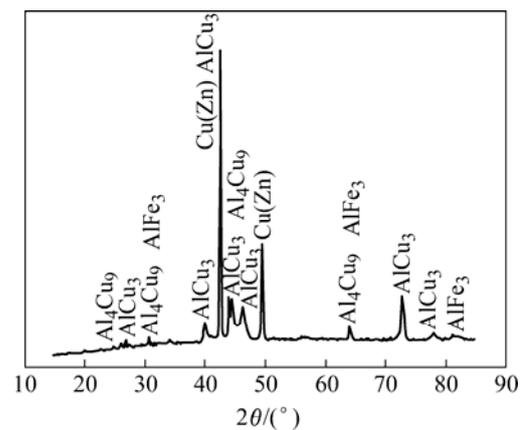


图 3 CA/Cu-14Al-X 合金的 X 射线衍射谱

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

蚀和腐蚀后的 SEM 照片, 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

主要成分的质量分数和摩尔分数如表 4 和 5 所示。分析可知, 图 4(a)中弥散分布的黑色花状、杆状、粒状或树枝状的相(A 区)为 κ 相。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, 灰色区域

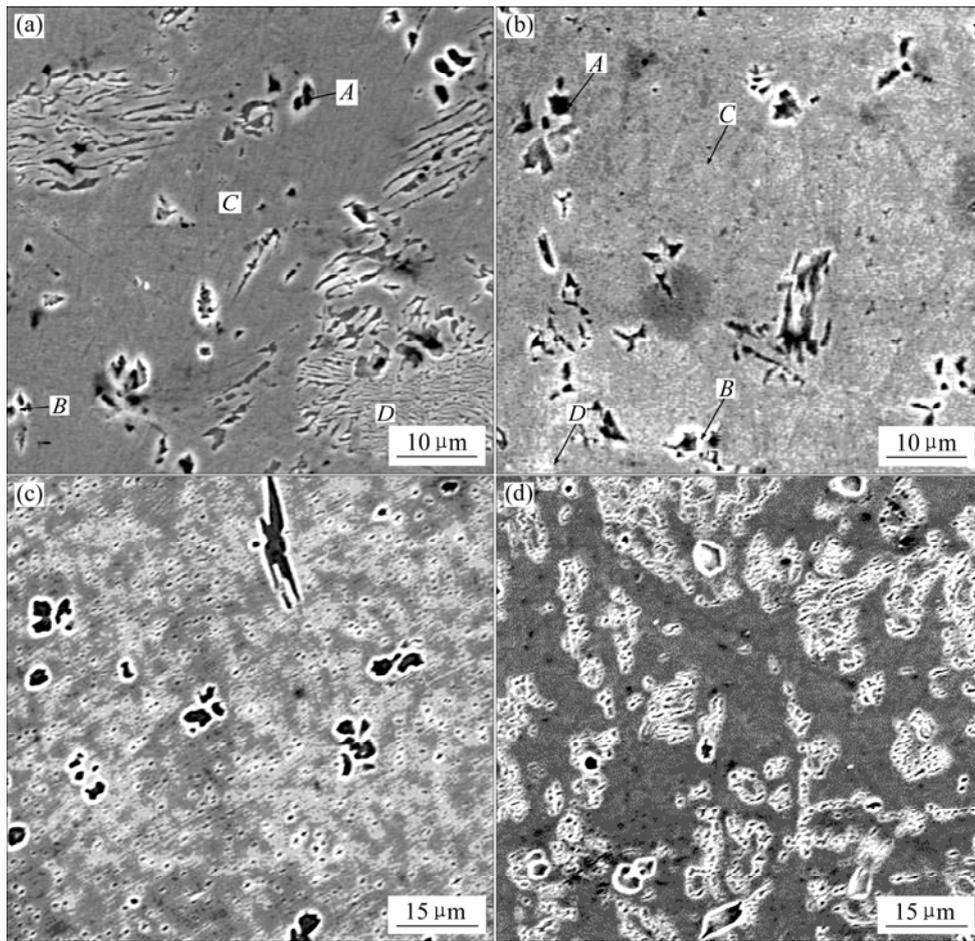


图4 Cu-14Al-X合金及腐蚀后的SEM像

Fig.4 SEM images of Cu-14Al-X alloy: (a) CA; (b) CA/corrosion; (c) HT; (d) HT/corrosion

表3 合金在介质中的稳定电位

Table 3 Stable potential of bronzes in solution

Alloy	Stable potential/mV
CA/Cu-14Al-X	-347
HT/Cu-14Al-X	-325
QA19-4	-390

(C区)为β'+α(少量)相,亮灰色条纹状区域(D区)为(α+γ₂)体。

图4(c)和(d)所示分别为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κ相外,合金中β'、α和γ₂相的相成分均趋于一致,分布很均匀。

2.5 光电子能谱分析结果

图5所示为HT/Cu-14Al-X合金在H₂SO₄溶液中腐蚀后的表面XPS全扫描图。从图中可以观察到,除了Cu2p谱带外,还有O1s、C1s、S2p等谱带,但没

有发现Fe、Al的谱带,说明试样在溶液中腐蚀后,它的浅表层(<2 nm)已没有Fe、Al存在。

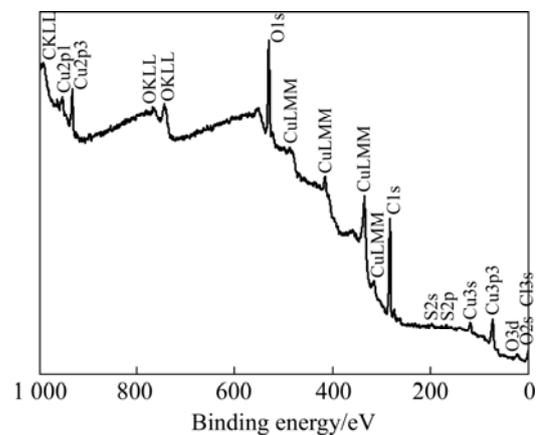


图5 HT/Cu-14Al-X合金在H₂SO₄溶液中腐蚀后的XPS全扫描图

Fig.5 XPS survey spectra of HT/Cu-14Al-X alloy corroded in H₂SO₄ solution

表4 CA/Cu-14Al-X 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

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

表5 20℃时 3.5% H₂SO₄ 腐蚀后 CA/Cu-14Al-X 组织各区域主要化学成分

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

Zone	Mass fraction/%				Mole fraction/%			
	Al	Fe	Mn	Cu	Al	Fe	Mn	Cu
A	2.16	3.57	1.12	93.15	4.91	3.93	1.25	89.91
B	1.36	6.65	0.14	91.85	3.12	7.36	0.16	89.36
C	4.45	6.95	0.39	88.22	9.78	7.39	0.42	82.41
D	4.40	6.67	0.64	88.29	7.68	7.10	0.69	82.53

图6所示为 HT/Cu-14Al-X 合金在 H₂SO₄ 溶液中腐蚀后的表面 XPS 分扫描图。图6(a)中 932.3 eV 和 952.1 eV 处的两峰为 Cu 和 Cu⁺形成的 Cu2p, 在 944 eV 和 964 eV 有 2 个不太明显的峰, 说明表面亦有 Cu²⁺存在, 但与 Cu 和 Cu⁺相比, 量很小; 图6(b)中在 169.2 eV 和 171.4 eV 处两个峰叠加在一起, 是 S⁶⁺形成的 S2p 特征峰, 因此判定表面腐蚀产物中有 SO₄²⁻ [18-19]。

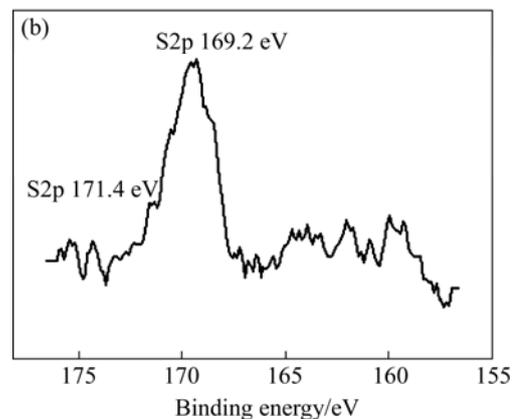
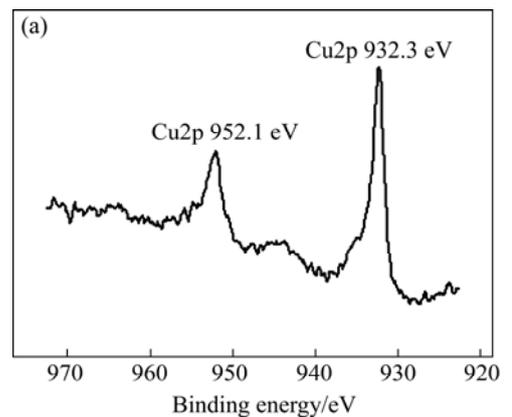
3 讨论与分析

3.1 Cu-14Al-X 合金的耐蚀性能

根据金属的耐蚀性的十级标准^[1, 17], 由表2可知, 20℃时合金在 H₂SO₄ 溶液中的耐蚀性等级为4级, 表明在这此温度下, Cu-14Al-X 合金在 H₂SO₄ 溶液中均耐腐蚀, 也就是说, 该合金具有良好的耐腐蚀性。

由图2可以看出, 在 H₂SO₄ 溶液中自腐蚀电位按曲线2、1、3顺序逐渐负向增大, 说明 HT/Cu-14Al-X 合金在 H₂SO₄ 溶液中的耐蚀性最好, CA/Cu-14Al-X 次之, 而 QA19-4 最差。这与合金在 NaCl 溶液中有所不同, 可能是与合金中的 Al 在 H₂SO₄ 溶液中的钝化性能有关^[7-8]。曲线1、2、3表明活化元素被腐蚀的速率不同, QA19-4 的极化电流密度增加最大, CA/Cu-14Al-X 次之, HT/Cu-14Al-X 最小, 说明 QA19-4 在 H₂SO₄ 溶液中很容易被腐蚀。

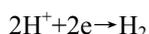
3.2 腐蚀机理

图6 HT/Cu-14Al-X 合金在 H₂SO₄ 溶液中腐蚀后的 XPS 分扫描图Fig.6 XPS multiplex spectra of HT/Cu-14Al-X alloy corroded in H₂SO₄ solution: (a) Cu2p; (b) S2p

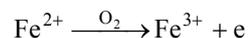
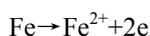
试样在 H_2SO_4 溶液中表面干净, 没有腐蚀产物, 溶液基本不变色, 浸泡 168 h 后取出的试样表面呈红色。这说明在 H_2SO_4 溶液中, 铝青铜中除 Cu 以外的其他元素都溶解在硫酸溶液中。由图 1 可知, 试样表面的 Fe、Al 元素被腐蚀了, 在腐蚀表面分布了大量的 Cu 元素, 说明该合金在 H_2SO_4 溶液中发生脱成分腐蚀。

实验证明 Cu-14Al-X 合金在 H_2SO_4 溶液中主要发生氢的去极化腐蚀反应^[20-21]:

阴极反应:



阳极反应:



由图 5 和 6 可知, 合金发生脱元素成分选择腐蚀以后, 生成的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 都溶于腐蚀溶液中, 腐蚀表面基本上为单质的 Cu 所覆盖。这与图 2 中活化元素被腐蚀后的情况一样, 合金在溶液中腐蚀后, 表层形成一层铜膜, 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活化趋势。

3.3 合金的组织与脱成分腐蚀

Cu-14Al-X 合金在 H_2SO_4 溶液中腐蚀后, 将腐蚀后合金表面各区域主要成分(表 5)与合金铸态未腐蚀表面各区域主要成分(表 4)进行对比, 发现各区域中 Al、Fe 元素的含量明显减少, Cu 元素的含量明显增加, 合金发生脱成分腐蚀。由腐蚀合金的 SEM 像(图 4(b))可知, 组织中的 $(\alpha+\gamma_2)$ 共析相、基体 $\beta'+\alpha$ 相、 κ 相和 γ_2 相都受到了不同程度的腐蚀。腐蚀后 D 亮区 $(\alpha+\gamma_2)$ 处的凹坑明显增多, A 点(κ 相)的蚀坑明显增加, 基体(C 区) $\beta'+\alpha$ 相的腐蚀量相对较小, 脱成分现象不明显。 $(\alpha+\gamma_2)$ 共析相和 κ 相腐蚀非常明显, 腐蚀表面的蚀坑较基体相的深。合金基体腐蚀后在表面形成了凹凸不平的针状形貌。可见, Cu-14Al-X 合金在 H_2SO_4 溶液的腐蚀过程中, 主要是电位较低的活泼金属 Al、Fe 等元素发生析氢反应。

由 XPS 谱可知, 腐蚀表面没有 Cu^{2+} 的痕迹, 合金基体 Cu 并没有直接与 H_2SO_4 溶液发生腐蚀反应。这是因为 Cu 具有很好的耐蚀性, 热力学稳定性高, 即 Cu 的离子化困难, 不与 H_2SO_4 溶液发生析氢反应, 但由于 Cu-14Al-X 合金中的 Al 和其他合金元素的存在, 从而导致了 Cu 的腐蚀。例如, 铝青铜中含有 Fe 元素,

它先与硫酸反应, 生成具有氧化性的 Fe^{3+} , 会加速 Cu 的腐蚀。在酸性溶液中, 这种加速作用尤为显著^[2-5, 20-21]。即 Cu 先生成 Cu_2O , 然后逐渐生成 CuSO_4 , 由于 CuSO_4 的可溶性, 在腐蚀表面并没有 Cu^{2+} 的存在。但是这种腐蚀在溶液中是相当细微的。

4 结论

1) Cu-14Al-X 合金在 5.0% H_2SO_4 溶液中腐蚀速率处在十级腐蚀标准中的第四级, 该种铜合金具有很好的耐腐蚀性能。

2) Cu-14Al-X 合金在 5.0% H_2SO_4 溶液中时, 合金表面的 Fe、Al 元素因发生了氢的去极化腐蚀反应而被腐蚀了, 合金在 H_2SO_4 溶液中发生脱成分腐蚀。

3) Cu-14Al-X 合金在 5.0% H_2SO_4 溶液中发生了相间选择腐蚀, 即合金中的 $(\alpha+\gamma_2)$ 共析相与 β' 相、 α 相和 κ 相相比, 具有优先腐蚀倾向。

4) 发生脱成分腐蚀后, 合金腐蚀表面形成了一层铜络合物膜, 对合金的腐蚀钝化有一定的促进作用, 从而有效地降低了合金的腐蚀速率。

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-run. Marine corrosion and protection of metals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 1-4.
- [2] Li W S, Wang Z P, Lu Y, Yuan L H. Corrosion wear behavior of Al-bronze in 3.5% NaCl solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(1): 102-110.
- [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 seawater[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] 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.
- [9] 路阳,李文生,王智平,苏义祥,寇生中,任虎平,徐建林. 新型模具铝青铜合金材料的研制[J]. 热加工工艺, 2002, 31(3): 45-47.
LU Yang, LI Wen-sheng, WANG Zhi-ping, SU Yi-xiang, KOU Sheng-zhong, REN Hu-ping, XU Jian-lin. New developed aluminum bronze alloy for die[J]. Hot Working Technology, 2002, 31(3): 45-47.
- [10] 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.
- [11] 李文生,姜洁,王智平,路阳. 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, JIANG Jie, WANG Zhi-ping, LU Yang. Causes and preventive measures of the gas holes in the Cu-14Al-X bronze castings[J]. Foundry, 2003, 52(9): 682-686.
- [12] Li W S, Wang Z P, Lu Y, Jin Y H, Yuan L H, Wang F. Mechanical and tribological properties of a novel aluminum bronze material for drawing dies[J]. Wear, 2006, 261(10): 155-163.
- [13] 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硬度性能的影响[J]. 金属热处理, 2002, 27(3): 40-43.
LU Yang, WANG Zhi-ping, LI Wen-sheng, KOU Sheng-zhong, SU Yi-xiang, REN Hu-ping, XU Jian-lin. Effects of heat treatment process on microstructure and hardness of copper alloy die[J]. Metals Heat-treatment, 2002, 27(3): 40-43.
- [14] 李文生,路阳,彭焕先,刘华,白创明. 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, LIU Hua, BAI Chuang-min. New aluminum bronze for stainless steel squeezing mould[J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(2): 15-18.
- [15] 李文生,路阳,金玉花,袁利华,王智平. 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, YUAN Li-hua, WANG Zhi-ping. Tribological properties of a novel aluminum bronze[J]. Materials Review, 2005, 19(4): 121-124.
- [16] 路阳,王智平,李文生,苏义祥,徐建林,金玉花,朱小武. 铝青铜及其制备方法[P]. 中国专利 ZL200310122220.3, 2007-02-14.
LU Yang, WANG Zhi-ping, LI Wen-sheng, SU Yi-xiang, XU Jian-lin, JIN Yu-hua, ZHU Xiao-wu. An aluminum bronze and its preparation[P]. CN ZL 200310122220.3, 2007-02-14
- [17] Moulder J F, Stickle W F, Sobol P D. Handbook of X-ray photoelectron spectroscopy[M]. Eden Prairie: Physical Electronics Inc, 1992.
- [18] Squarcialupi M C, Bernardini G P, Faso V. Characterisation by XPS of the corrosion patina formed on bronze surfaces[J]. Journal of Cultural Heritage, 2003, 67(3): 199-204.
- [19] 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.
- [20] Scendo M. Potassium ethyl xanthate as corrosion inhibitor for copper in acidic chloride solutions[J]. Corrosion Science, 2005, 47(7): 1738-1749.
- [21] 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 杨幼平)