文章编号：1004-0609(2007)08-1273-07

含稀土 HAl77-2 铝黄铜的腐蚀行为

程建奕[1,2,4]，李 周[3]，唐 宁[3]，汪明朴[3]，曹建国[2]，赵学龙[2]，杨天足[4]

(1. 南昌大学 材料科学与工程学院，南昌 330031；
2. 浙江海亮集团，诸暨 311835；
3. 中南大学 材料科学与工程学院，长沙 410083；
4. 中南大学 冶金科学与工程学院，长沙 410083)

摘 要：通过测定 3 种不同成分的铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液和 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中的腐蚀速率、电化学行为分析，以及对腐蚀产物层进行 SEM 观察和 XRD 分析，研究了铝黄铜的腐蚀行为。结果表明：添加 Ce 可以降低铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中极化时的自腐蚀电流密度；含 Ce 的 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 在 NaCl(3.5%)溶液中腐蚀后腐蚀产物层表现出最佳的腐蚀形貌和耐腐蚀性能，而添加稀土并不能改善铝黄铜在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中的耐腐蚀性能；联合添加 As 和 Ce 的 Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 在这 2 种介质中的耐腐蚀性能反而下降。

关键词：稀土；铝黄铜；腐蚀介质；腐蚀行为
中图分类号：TG 146.11; TG 174.2 **文献标识码**：A

Corrosion behavior of aluminum brass contained rare earth

CHENG Jian-yi[1,2], LI Zhou[3], TANG Ning[3], WANG Ming-pu[3],
CAO Jian-guo[2], ZHAO Xue-long[2], YANG Tian-zu[4]

(1. School of Materials Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. Hailiang Group Co. Ltd., Zhuji 311835, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
4. School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The corrosion behaviors of three Al-brasses with different components in 3.5% NaCl and in 3.5% NaCl+0.5 mol/L NH_4Cl were investigated with immersion test, electrochemical method and SEM observation and XRD analysis on the corrosion product layers. The results show that the addition of trace rare-earth can lower the corrosion electrical current density of Al-brass when polarized in NaCl(3.5%) solution. Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce alloy containing Ce exhibits optimum corrosion layer morphology and corrosion resistance after corroded in NaCl(3.5%) solution, while the addition of rare earth can not improve the corrosion resistance of Al-brass in NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L) solution. The corrosion resistance of Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce alloy jointly added with As and Ce decreases slightly.

Key words: rare earth; Al-brass; corrosion medium; corrosion behavior

HAl77−2、HSn70−1 黄铜等铜合金具有良好的导热和耐蚀性能，因此被广泛应用于滨海电厂和舰船中热交换器用冷凝管材料[1−3]。多年来为了抑制黄铜的选择性脱锌溶解，普遍采用添加微量 As 和 B 来提高其耐蚀性能[4−6]。但是 As 呈剧毒性，是一种环境不友好物质，它在生产过程中的挥发对人体健康十分有害[7]，

收稿日期：2006-11-01；**修订日期**：2007-04-20
通讯作者：程建奕，博士，副教授；电话：0791-5198260；E-mail: bigchengjianyi@163.com

因此要避免使用。而稀土可以改善铜及铜合金的耐蚀性能，但其对铜及合金腐蚀性能的影响的研究远不如物理性能和力学性能的研究那样广泛和深入，对耐蚀性影响的作用机理至今尚不清楚[8]，国内对含稀土锡黄铜研究较多[7, 9−11]，而对含稀土铝黄铜未见有报道。当氨与氧共存时，铜合金对应力腐蚀破裂和腐蚀疲劳非常敏感[12−15]。而在热交换器空抽区铜管汽侧和支撑隔板的两侧，由于调节给水 pH 值而引入的氨的局部浓缩，冷却水中的氨含量比主凝结水(含氨量为 1~10 mg/L)高出数十倍，使冷凝器铜管产生严重的氨腐蚀，如果腐蚀严重，会引起局部泄漏[12]。因此研究黄铜合金在含氨的人工海水介质中的腐蚀行为非常重要。

因此，本文作者研究微量稀土 Ce 对 HAl77−2 铜合金腐蚀性能的影响，并对含稀土 HAl77−2 铜合金在不同腐蚀介质中的腐蚀行为进行研究。

1 实验

1.1 材料制备

实验用铝黄铜在工频感应炉中熔炼，再将铸锭热轧成板材，经 560 ℃，30 min 退火处理后，随炉冷却。铝黄铜的化学成分列于表 1。

表 1 3 种铝黄铜的化学成分

Table 1 Nominal composition of Al brass(mass fraction, %)

No.	Cu	Al	Ni	As	B	Ce	Zn
1	77.24	2.14	0.79	0.054	0.007 3	−	Bal.
2	77.25	2.15	0.78	−	0.007 5	0.09	Bal.
3	77.30	2.12	0.81	0.057	0.007 6	0.08	Bal.

1.2 实验方法

在金相试样预磨机上对锯切下来的样品进行打磨，然后金相砂纸细磨。最后在金相抛光机上进行抛光，直至试样表面无明显划痕。测量抛光后的试样的表面积，然后依次用蒸馏水、丙酮、酒精清洗后干燥称量。将样品全浸入腐蚀液并静置腐蚀 30 d。腐蚀后对试样进行干燥处理，然后将样品表面疏松的腐蚀产物轻轻刮下，然后将样品浸入 1:1 的盐酸溶液中以彻底溶解去除腐蚀产物，干燥后称量。同时，将同种未经过腐蚀的空白试样浸入盐酸中轻轻振荡，而后测量计算其单个表面的质量损失，以便对样品在盐酸清洗过程中的腐蚀质量损失进行校正。用自来水配制腐蚀溶液，所采用的试剂为分析纯，腐蚀液分别为 NaCl(3.5%)溶液和 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液。

采用 SI1287 电化学工作站测量实验黄铜在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线，辅助电极为 Pt 片，参比电极为饱和甘汞电极(SCE)，扫描速度为 2 mV/s。

腐蚀产物(漂浮物与沉淀)过滤、烘干后，研磨成粉末，然后采用 DMAX−2000 的 X 射线仪对其进行物相检测。测量条件为：Cu 靶，石墨单色器滤波，管电压 35 kV，管电流 50 mA，扫描范围为 20°~80°。测量中采用连续扫描，扫描速度为 8(°)/min。采用 X 射线分析软件 MID Jade 5.0 对实验所得的 X 射线谱进行分析。

利用 Sirion200 场发射扫描电镜对在所采用的腐蚀介质中浸泡腐蚀 30 d 后样品的表面以及断面进行腐蚀形貌观察和能谱分析。

2 结果与分析

2.1 静态腐蚀实验

表 2 所列为实验铜合金在 2 种不同腐蚀溶液中的腐蚀速率。可以看出，3 种实验合金在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀速率均较低，而在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5mol/L)溶液中的腐蚀速率提高了一个数量级。无疑 NH_4^+的存在明显加速了铜合金在海水中的腐蚀。

表 2 实验铝黄铜的静态腐蚀速率

Table 2 Statistic corrosion rate of studied Al brass

Alloy	Corrosion rate in NaCl(3.5%)/ ($mm\cdot a^{-1}$)	Corrosion rate in NaCl(3.5%)+ NH_4Cl(0.5 mol/L)/ ($mm\cdot a^{-1}$)
Cu-Zn-Al-Ni-As-B	0.006 38	0.066 22
Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce	0.006 20	0.075 13
Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce	0.007 22	0.072 77

2.2 极化曲线测定

图 1 所示为 3 种实验铜合金在 NaCl(3.5%)溶液中的极化曲线。腐蚀电位 φ_{corr} 和腐蚀电流密度 J_{corr} 如表 3 所列。

由图 1 和表 3 可以看出：

1) 没有添加稀土的 Cu-Zn-Al-Ni-As-B 合金自腐蚀电流最大，而添加了稀土的 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 和 Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 合金其极化电阻增加了一倍，自腐蚀电流密度则降低了一半左右，其中 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金为最低。这说明稀土的加入可以降低铝黄铜的自腐蚀电流密度，使海水腐蚀速度变慢。

表 3　铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中的自腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 3　Natural corrosion potential and current density of Al brass in NaCl(3.5%) solution

Alloy	Polarization resistance, R_p/(Ω·cm^{-2})	Natural corrosion current density, J_{corr}/(A·cm^{-2})	Natural corrosion potential, φ_{corr}/V
Cu-Zn-Al-Ni-As-B	1387.8	$1.879\ 7\times10^{-5}$	−0.2638
Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce	2668.3	$9.776\ 8\times10^{-6}$	−0.3456
Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce	2632.8	$9.908\ 3\times10^{-6}$	−0.2940

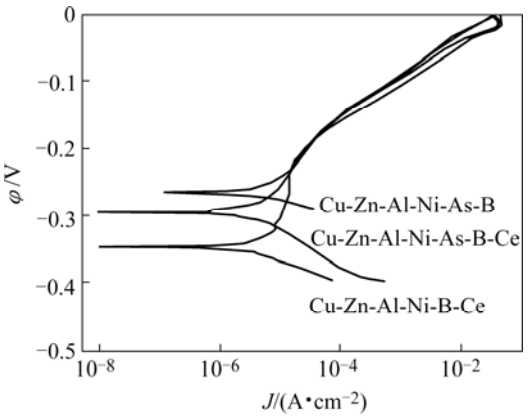

图 1　铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中的极化曲线

Fig.1　Polarization curves of Al brass in NaCl(3.5%) solution

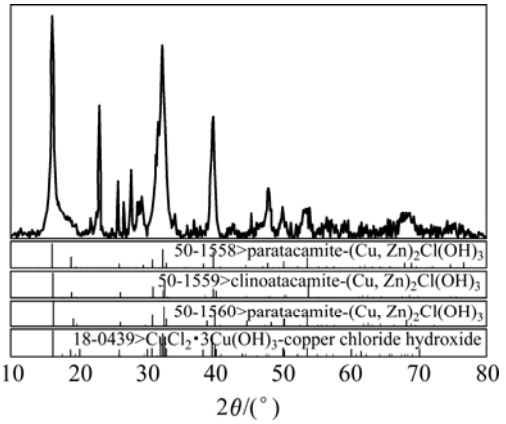

图 2　Cu-Zn-Al-Ni-B-RE 合金在 NaCl(3.5%)溶液中腐蚀产物的 XRD 谱

Fig.2　XRD patterns of corrosion products of Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce alloy after corroded in NaCl(3.5%) solution

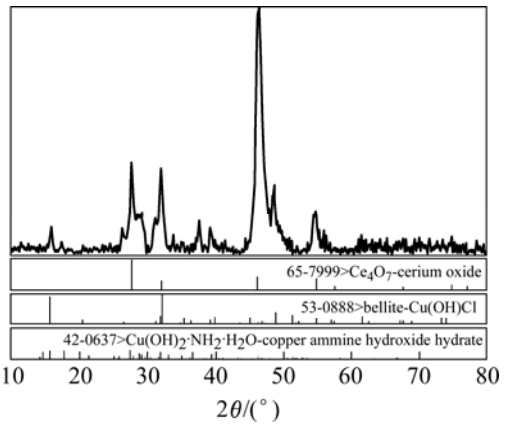

图 3　Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl (0.5 mol/L) 溶液中腐蚀产物的 XRD 谱

Fig.3　XRD pattern of corrosion products of Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce alloy after corroded in NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L) solution

2) 在阳极极化的弱极化区以外，添加了稀土的 Cu-Zn-Al-Ni-B-CE 和 Cu-Zn-Al-Ni-As-B-CE 合金的极化曲线迅速上升，斜率增大，表明阳极极化程度增大，这可能与稀土的添加有关。因为稀土的氧化物参与了样品表面腐蚀产物膜的形成，改善了该膜对合金基体的保护性能，起到了强烈抑制阳极过程的作用。

2.3　腐蚀产物 X 射线衍射物相分析

图 2 所示为 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金在 NaCl(3.5%)溶液中腐蚀产生的沉淀和漂浮物的 X 射线衍射分析结果。X 射线衍射分析表明，铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀产物的主要成分均为复杂的 Cu、Zn 和 Ni 的碱式氯化物($(Cu, Zn, Ni)_2Cl(OH)_3$ 和 $CuCl_2·Cu(OH)_2$)。

图 3 所示为 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5mol/L)溶液中生成的漂浮物的 X 射线衍射谱。可以看出，两者的 X 射线衍射谱很相似，其主要成分也是一样的，主要为稀土氧化物(Ce_4O_7)、铜的碱式氯化物(Cu(OH)Cl)和铜氨络合物的水合物($Cu(OH)_2NH_3·H_2O$)。

2.4　腐蚀形貌 SEM 观察及能谱分析

2.4.1　铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀形貌及能谱分析

图 4 所示为实验铝黄铜合金在 NaCl(3.5%)溶液中浸泡腐蚀 30 d 后的横断面腐蚀形貌的背散射电子像以及元素的能谱扫描分析。由图 4 可以看出，3 种铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀层深度都比较浅(约 2 μm)，其中 Cu-Zn-Al-Ni-As-B 合金的残留腐蚀层较薄，

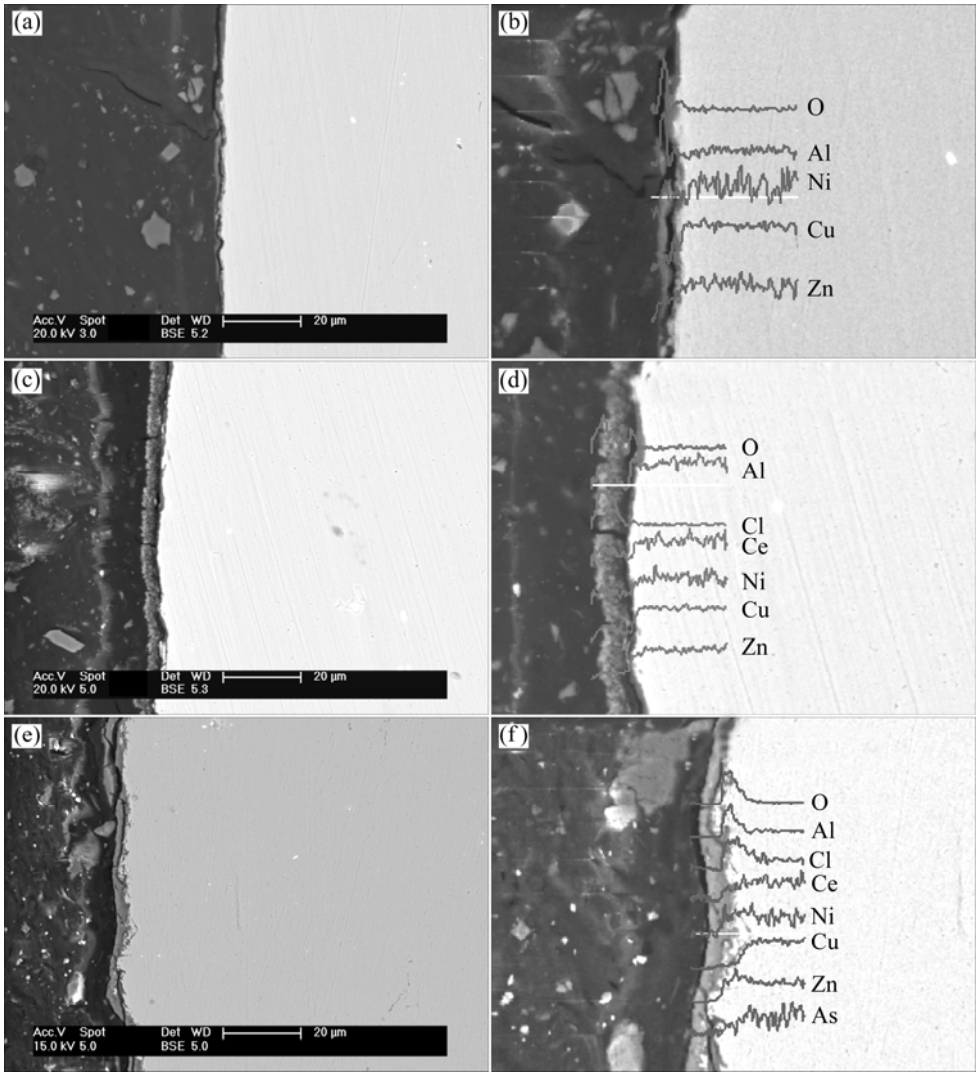

图 4 铝黄铜在 NaCl 溶液中腐蚀形貌((a), (c), (e))及 X 射线能谱分析((b), (d), (f))

Fig.4 Corrosion morphologies ((a), (c), (e)) and X-ray energy spectrum analysis ((b), (d), (f)) of Al brasses after corroded in NaCl solution: (a), (b) Cu-Zn-Al-Ni-As-B; (c), (d) Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce; (e), (f) Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce

但腐蚀层厚度分布不均匀，有的地方几乎没有腐蚀层，结合表 2 可以推断，这是由于腐蚀层与基体的结合强度较差而脱落导致的。Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金的腐蚀产物较厚，在腐蚀层中出现了一些微小的裂纹，腐蚀层与基体界面较为规则。Cu-Zn-Al-Ni- As-B-Ce 合金的基体被腐蚀得很粗糙，存在沿晶界腐蚀的情况，腐蚀产物层开裂现象非常严重，而且腐蚀通道延伸到基体中，腐蚀层与基体呈犬牙交错的形态。结合失重法的实验结果，对这几种合金的腐蚀形貌分析如下：由于 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金的腐蚀产物层完整而均匀，而且与基体的结合较 Cu-Zn-Al-Ni- As-B-Ce 合金要紧密，起到对基体的保护作用，所以该合金的腐蚀速率比较低；而 Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 合金的腐蚀产物层裂纹很多，致使腐蚀产物层在腐蚀过程中的剥离，失去对基体的保护作用，因此腐蚀速率较高。

图 4(b)、(d)和(f)为相对应的贯穿腐蚀产物层能谱线扫描分析的结果。由能谱分析可知，Cu-Zn-Al-Ni-As-B 合金(图 4(b))的腐蚀产物层中 Al 和 O 含量很高，而 Cu 和 Zn 的含量在表层较低，且由外到内逐渐上升到基体的含量水平，这说明残留腐蚀层中腐蚀产物的成分主要为铝的氧化物，腐蚀产物中的 Cu 与 Zn 则以离子的形式进入溶液中。

Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金(图 4(d))腐蚀层中的腐蚀产物主要元素为 Cu、O 和 Cl，除此以外，其中还检测到了 Ce 元素的存在，其含量高于基体的名义含量。元素在腐蚀层的表层和内层的分布并不均匀，Al 和 O 的分布有明显的层次性，在表层和内层都比较多，而在中间则存在一个低含量区域；Cu 和 Cl 在表层分布

比较多，内层要少一些。由此可以认为，表层主要为 Cu 的化合物，例如 Cu_2O、$CuCl_2$ 和 Cu(OH)Cl 等，另外还有少量的 Al 的化合物；内层则主要是 Al_2O_3。

Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 合金(图 4(f))腐蚀层的元素线分布图表明，O、Cl、Al 和 Ni 等元素在腐蚀层与基体之间的界面处富集，Cu 和 Zn 等元素含量较之基体低，说明腐蚀产物中的 Cu 与 Zn 以离子的形式进入到溶液中。

综上所述，铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中腐蚀后只添加了稀土的 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金的腐蚀产物层表现出最佳的耐腐蚀形貌，说明稀土在此参与了腐蚀产物层的形成，并由此而起到了改善膜层结构，提高膜层与基体的结合强度，对合金基体保护性能的作用增强；而添加了 As 和 Ce 的合金则表现出晶界优先腐蚀，膜层与基体界面结合也不紧密，出现裂纹。这说明在此基础上添加 As，不但其耐腐蚀性能没有提高，还起到了负面影响。

2.4.2　铝黄铜在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中的腐蚀形貌及能谱分析

图 5 所示为设计的铝黄铜在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中浸泡腐蚀 30 d 后的横断面腐蚀形貌的背散射电子像以及元素的能谱线扫描分析。

由图中可以明显地看出，3 种铝黄铜在 NH_4^+ 和 Cl^-的共同作用下，表面均积累了一层很厚的腐蚀产物，其厚度(10~20 μm)远远大于同种合金在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀产物层厚度。仔细观察其腐蚀产物层及其与基体的界面，发现 Cu-Zn-Al-Ni-As-B 合金的腐蚀产物层最薄(约 10 μm)，厚度比较均匀，腐蚀层与基体

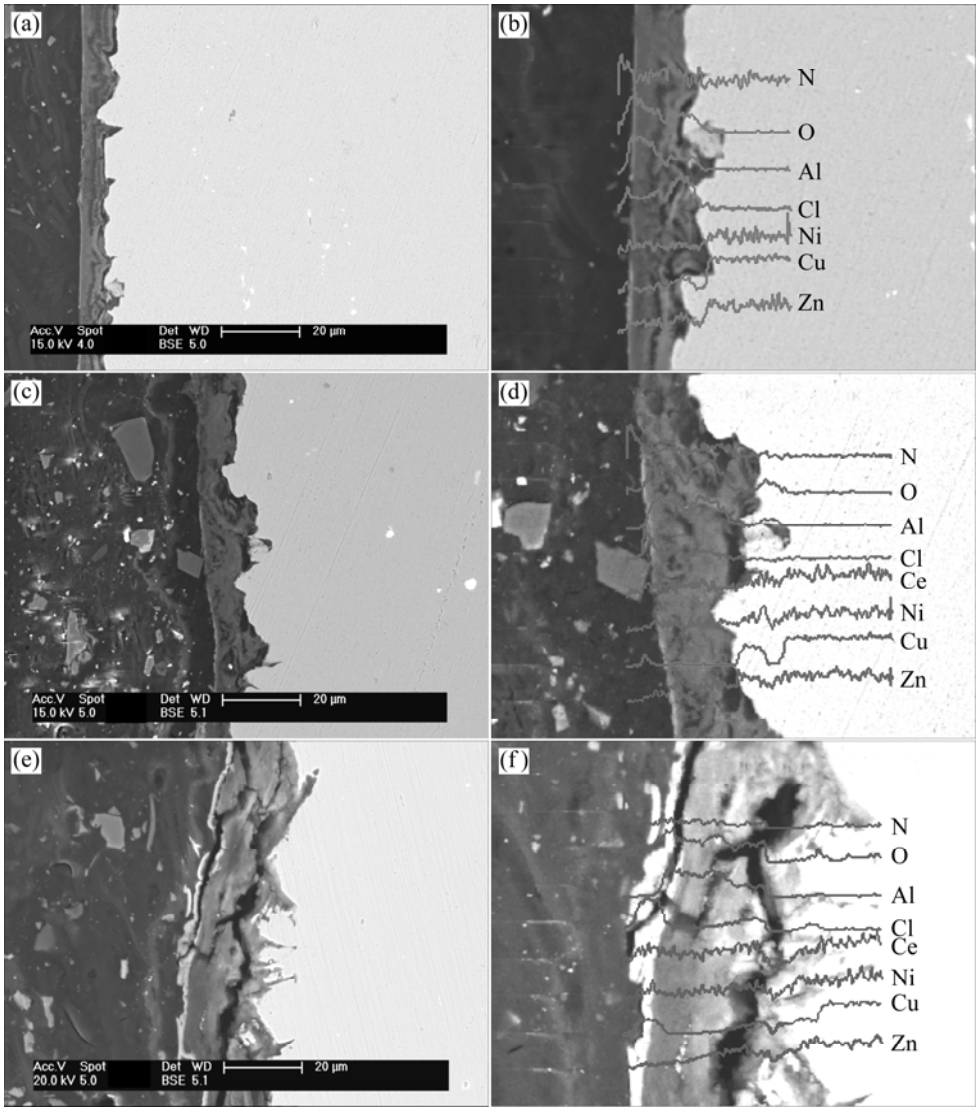

图 5　铝黄铜在 NaCl+NH_4Cl 溶液中腐蚀形貌及 X 射线能谱分析

Fig.5　Corrosion morphologies (a), (c),(e) and X-ray energy spectrum analysis (b), (d), (f) of Al brasses after corroded in NaCl+NH_4Cl solution: (a), (b) Cu-Zn-Al-Ni-As-B; (c), (d) Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce; (e), (f) Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce

之间结合也比较紧密。Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 合金的腐蚀产物层最厚(约 20μm)，腐蚀层中分布着很多裂纹，致使腐蚀产物与基体分离开来，有着强烈的剥离趋势，而且腐蚀产物表现出明显的沿晶界渗透的现象。Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金的腐蚀产物层较厚(约 15 μm)，腐蚀层没有观察到明显的裂纹，沿晶界渗透的情况不明显。

由线扫描的结果可以看出，三者的腐蚀产物存在着一些共同点：腐蚀层中存在 Cu、N 和 Cl 的富集区，也含较多的 O，重元素 Cu 在其间的富集使其相对于内层有较高的亮度；而内层则主要是 Al 和 O 的富集。选择部分点进行点扫描的结果和上述分析是一致的，显示了 Al 在内层的含量达到了基体名义含量的 10 倍以上。根据元素的能谱分析以及 X 射线衍射分析的结果，可以认为外层的成分主要为铜-氨络合物的水合物和碱式氯化铜，内层则以 Al 的氧化物 Al_2O_3 为主，另外还有一些含氨的络合物以及 Cu、Zn 的氧化物。

综上所述，3 种铝黄铜在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl (0.5 mol/L)溶液中腐蚀时，在氧存在的情况下，由于 NH_4^+ 的作用，$4Cu+8NH_4^+ +O_2 \rightarrow 4[Cu(NH_3)_2]^+ +2H_2O+4H^+$，Cu 迅速被络合而溶入溶液，由于腐蚀产物为可溶性的络合离子，因而腐蚀过程能不受阻滞地进行下去,因此合金的腐蚀速度要远高于在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀速度。而 Al 则氧化为 Al_2O_3 并在表面聚集起来，从而在样品内表面形成一层很厚的以 Al_2O_3 为主要成分的腐蚀产物层。该层 Al_2O_3 将合金基体与含 NH_4^+ 的腐蚀介质隔离开来，在一定程度上阻碍了基体的 Cu 继续向溶液中扩散。在 Al_2O_3 层的外表面则分布一层很薄的富铜化合物。比较 3 种合金的腐蚀行为，发现 As 的加入有利于在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5mol/L)溶液中耐腐蚀性能的提高，Ce 的效果较 As 差，而 As 和 Ce 同时添加的效果也并不理想，其原因还有待于进一步研究。

3 结论

1) 添加稀土可以降低铝黄铜在 NaCl(3.5%)溶液中极化时的自腐蚀电流密度。

2) 在 NaCl(3.5%)溶液中腐蚀后只添加了稀土的 Cu-Zn-Al-Ni-B-Ce 合金的腐蚀产物层表现出最佳的耐腐蚀形貌，稀土在此参与了腐蚀产物层的形成，并由此而起到改善膜层结构，提高膜层与基体的结合强度，对合金基体保护性能的作用增强；而同时添加 As 和 Ce 的 Cu-Zn-Al-Ni-As-B-Ce 合金却晶界优先腐蚀，膜层与基体界面结合也不紧密，出现裂纹，耐腐蚀性能反而稍稍下降。

3) 3 种合金的在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中腐蚀速度分别约为其在 NaCl(3.5%)溶液中的腐蚀速度 10 倍。其中，Cu-Zn-Al-Ni-As-B 合金的腐蚀产物层最薄(约 10 μm)，厚度比较均匀，腐蚀层与基体之间结合比较紧密。As 的加入有利于合金在 NaCl(3.5%)+NH_4Cl(0.5 mol/L)溶液中耐腐蚀性能的提高，Ce 的效果较 As 差，而 As 和 Ce 同时添加的效果并不理想。

REFERENCES

[1] Sayed S M, Ashour E A, Youssef G I. Effect of sulfide ions on the stress corrosion behaviour of Al-brass and Cu10Ni alloys in salt water[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 2267−2272.

[2] 王东辉, 王志英, 贺金宇. 电站凝汽器用新型耐蚀铜合金[J]. 稀有金属, 2003, 27(6): 738−741.
WANG Dong-hui, WANG Zhi-ying, HE Jin-yu. A New anti-etch copper alloy appropriate for condenser used in power plant[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 738−741.

[3] Ravichandran R, Rajendran N. Electrochemical behavior of brass in artificial seawater: effect of organic inhibitors[J]. Applied surface Science, 2005, 241: 449−458.

[4] 金头男, 尹志民, 陈 湘, 蒋茨雪, 李锡珍, 袁朝辉. 微量硼对HSn70−1冷凝管材耐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(3): 90−94.
JIN Tou-nan, YIN Zhi-ming, CHEN Xiang, JIANG Ci-xue, LI Xi-zhen, YUAN Zhao-hui. The effects of small traces of boron on the corrosion resistance of HSn70−1 condenser tube [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(3): 90−94.

[5] Sohn S, Kang T. The effects of tin and nickel on the corrosion behavior of 60Cu-40Zn alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 335: 281−289.

[6] 李 勇, 朱应禄. 黄铜脱锌腐蚀的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(5): 222−225.
LI Yong, ZHU Ying-lu. Advances in researches of dezincification mechanism of brass[J]. Corrosion & Protection, 2006, 27(5): 222−225.

[7] 张智强. 添加稀土铈对 HSn70−1 冷凝管耐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2004, 25(1): 17−20.
ZHANG Zhi-qiang. Effect of rare earth element cerium addition on corrosion resistance of condensation tube of HSn70−1[J]. Corrosion & Protection, 2004, 25(1): 17−20.

[8] 赵争荣. 稀土对铜及其合金的耐蚀性能的影响[J]. 山西机械, 1999(S2): 164−166.
ZHAO Zheng-rong. Effect of rare earth on the corrosion resistance of copper and its alloys[J]. Mechanism in Shanxi,

1999(S2): 164−166.

[9] 张胜华, 黄政权. 稀土铈对冷凝管用锡黄铜组织及性能的影响[J]. 材料保护, 2006, 39(3): 62−64.
ZHANG Sheng-hua, HUANG Zheng-quan. Effect of rare earth on the structure and properties of tin brasses used as condenser tubes[J]. Materials Protection, 2006, 39(3): 62−64.

[10] 谈荣生, 蒋建清, 孙连超. 稀土锡黄铜的耐蚀性能及腐蚀机理研究[J]. 中国稀土学报, 1995, 15(7): 457−461.
TAN Rong-sheng, JIANG Jian-qing, SUN Lian-chao. Corrosion resistance and mechanism of tin brasses containing rare earth[J]. Journal of Rare Earth of China, 1995, 15(7): 457−461.

[11] 孙连超, 谈荣生, 刘心红. 提高冷凝器用锡黄铜耐蚀性的研究[J]. 中国机械工程, 1994, 5(5): 32−34.
SUN Lian-chao, TAN Rong-sheng, LIU Xin-hong. Study on improvement of corrosion resistance of tin brass used as condenser[J]. Mechanic Engineering of China, 1994, 5(5): 32−34.

[12] 朱志平, 杨道武, 李宇春. 凝汽器空冷区铜管氨腐蚀过程分析与防护措施[J]. 中国电力, 2002, 35(5): 23−26.
ZHU Zhi-ping, YANG Dao-wu, LI Yu-chun. Analysis of ammonia corrosion process of copper tubes in the air removal section of condenser and preventive measures[J]. Electric Power in China, 2002, 35(5): 23−26.

[13] 杨德钧, 沈卓身. 金属腐蚀学[M]. (第二版). 北京: 冶金工业出版社, 1999: 174.
YANG De-jun, SHEN Zhuo-jun. Metals Corrosion Science[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999: 174.

[14] 化学工业部化工机械研究院. 腐蚀与防护手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994: 77.
Chemical machinery research institute of ministry of chemical industry. handbook of corrosion and protection[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1994: 77.

[15] LU Hong, GAO Ke-wei, CHU Wu-yuan. Determination of tensile stress induced by dezincification layer during corrosion for brass[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1663−1670.

(编辑　李向群)