

西沙严酷海洋大气环境下紫铜和黄铜的腐蚀行为

崔中雨, 肖 葵, 董超芳, 丁 源, 王 涛, 李晓刚

(北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083)

摘 要: 通过现场暴晒实验, 研究 T2 紫铜和 H62 黄铜在西沙海洋大气环境下分别暴晒 3/4、1、2、和 4 a 的长周期腐蚀行为。利用 SEM 观察表面、截面腐蚀产物以及去除腐蚀产物后的腐蚀形貌, 并分别用 EDS 及 XRD 对腐蚀产物的元素分布及相组成进行分析。结果表明, 紫铜和黄铜均发生了严重的腐蚀, 4 a 内其平均腐蚀速度分别为 5.90 和 5.88 $\mu\text{m/a}$; 紫铜表面发生了均匀腐蚀, 腐蚀产物由内层致密的 Cu_2O 及外层的 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 组成; 黄铜发生了明显的脱锌腐蚀, 腐蚀产物主要为 ZnO 和 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 腐蚀产物层下的基体为 20~50 μm 厚度不等的脱锌层。

关键词: T2 紫铜; H62 黄铜; 海洋大气; 腐蚀; 西沙

中图分类号: TG174

文献标志码: A

Corrosion behavior of copper and brass in serious Xisha marine atmosphere

CUI Zhong-yu, XIAO Kui, DONG Chao-fang, DING Yuan, WANG Tao, LI Xiao-gang

(Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Long period corrosion behavior of copper T2 and brass H62 after atmospheric exposure in Xisha islands for 3/4, 1, 2 and 4 a was investigated. The surface and cross-section morphologies, the elements distribution and phase compositions of corrosion products were observed by SEM, EDS and XRD, respectively. The results indicate that copper and brass undergo severe corrosion. The average corrosion rates for copper and brass in 4 a are 5.90 and 5.88 $\mu\text{m/a}$, respectively. The corrosion type of copper is uniform corrosion, a double layer structure is observed: a compact Cu_2O inner layer and a porous $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ outer layer. Dezincification processes with zinc preferentially dissolution are evident in brass, the zinc-rich corrosion products ZnO and $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ are the predominating patina. Under the corrosion products, there exists a layer of pure copper originated from dezincification with the thickness of 20–50 μm .

Key words: copper T2; brass H62; marine atmosphere; corrosion; Xisha

铜及铜合金因其优良的力学性能及耐蚀性而广泛应用于室外建筑, 且铜较好的导电性使其成为通讯及电子工业中最重要的材料^[1]。一般来说, 铜暴露于大气中后会迅速形成一层 Cu_2O 保护膜^[2], 因此, 在大气环境中具有较好的耐蚀性。但是, 当大气中存在较多的污染性离子如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 等时, 铜会发生较为严重的腐蚀, 从而在表面生成腐蚀产物“铜绿”^[3]。

近些年, 国外学者对铜及其合金在大气环境下的

腐蚀规律进行了一系列研究^[4-8], MENDOZA 等^[4]发现, 铜在古巴的热带气候中的腐蚀产物主要为 Cu_2O 、 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 及 $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$, 且腐蚀产物的形貌及结晶度对腐蚀产物的保护性有很大影响。GOIDANICH 等^[7]对黄铜在欧洲不同户外大气环境中的腐蚀研究发现, 锌的选择性溶解是黄铜在大气环境中的主要腐蚀方式, 腐蚀产物由富铜相和富锌相组成。目前, 国内关于铜及其合金在大气环境中的

腐蚀行为已有一些报道^[9-12], 安百刚等^[9]研究了纯铜在沈阳大气环境下的腐蚀行为, 发现降雨显著加快了铜合金的腐蚀速率。陈杰等^[12]对海军黄铜 HSn62-1 在北京、江津和万宁 3 种典型自然环境下的腐蚀行为进行研究, 发现黄铜在工业环境下的力学性能降低最严重, 且腐蚀类型主要为晶间腐蚀。但目前关于铜在高温、高湿的海洋大气环境下的腐蚀研究相对较少。

西沙海洋大气环境为我国典型的高温、高湿及高 Cl⁻浓度的严酷大气环境, 金属材料在这种环境下的腐蚀严重。目前, 本课题组已对 Q235 钢、铝合金在西沙大气环境中的初期腐蚀行为进行了报道^[13-14], 吴军等^[15]对紫铜和黄铜在西沙大气环境下暴晒 1/12、1/4、1/2 a 的早期腐蚀行为进行了研究。结果表明, 西沙永兴岛常年较高的相对湿度和高 Cl⁻沉积量使得典型金属材料在该地区的初期腐蚀速率高于在青岛、万宁等海洋大气环境的初期腐蚀速率, 金属在该环境下的腐蚀行为具有特殊性。但鉴于短周期内金属锈层形成状况尚不稳定, 大气腐蚀速率波动较大, 为了获得对西沙大气环境下铜及其合金更稳定的腐蚀速率, 进一步阐明该环境下铜合金的腐蚀机理, 本作者对紫铜和黄铜在西沙大气下长周期(3/4~4 a)下腐蚀产物的结构、形貌及机理进行系统研究。

1 实验

实验材料为紫铜 T2 和黄铜 H62, 紫铜化学成分(质量分数, %)为 Cu(≥99.90)及微量元素 Bi、Sb、As、Fe、Ni、Pb 和 Sn; 黄铜化学成分(质量分数, %)为 Cu 61.56、Zn 38.43 和 Pb 0.006。将试样加工成 100 mm×50 mm×3 mm 的片状样品, 按 GB11112—89《有色金属大气腐蚀试验方法》在西沙进行暴晒, 时间为 2007—12~2011—12, 取样周期为 3/4、1、2 和 4 a。西沙大气试验站气象数据如表 1 所列。其年平均温度为 27℃, 年平均湿度达 77%。表面润湿时间为 2 628 h/a,

表 1 西沙群岛的气候参数以及大气污染物含量

Table 1 Climatic parameters and atmospheric pollutants of Xisha islands

Average temperature/℃	Average relative humidity/%	Time of wetness/(h·a ⁻¹)
27	77%	2 628(τ_4)
Rain amount/(h·a ⁻¹)	Cl ⁻ deposition rate/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	
1 536	112.68(S ₂)	

属 ISO—9223 标准^[16]中的 τ_4 级, 平均 Cl⁻沉积速度为 112.68 mg/(m²·d), 属 ISO—9223 标准中的 S₂ 级, 为典型的高温、高湿、高盐雾环境。

试样取回后, 在 100 mL H₂SO₄ 和蒸馏水配置成的 1 L 溶液中去腐蚀产物。用数码相机观察腐蚀后紫铜和黄铜的颜色变化, 用 Quanta250 型扫描电镜观察试样表面腐蚀产物的形貌。分别利用 EDS 及 XRD 对腐蚀产物成分和相组成进行分析。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀速度

在西沙大气环境下, 紫铜和黄铜的腐蚀速度大致相同。暴晒期间, 紫铜和黄铜的平均腐蚀速度分别为 5.90 和 5.88 $\mu\text{m/a}$ 。参照 ISO—9223^[16]可知, 两种铜的腐蚀速度均高于 C5 等级(2.8~5.6 $\mu\text{m/a}$)。如图 1 所示, 与青岛、江津、万宁等其他大气试验站^[17]相比, 两种铜在西沙环境下的腐蚀明显严重。这表明西沙海洋大气环境是一种较为苛刻的腐蚀环境, 温度、湿度、降雨、颗粒及 Cl⁻沉积的协同作用加速了铜在此区域的腐蚀。

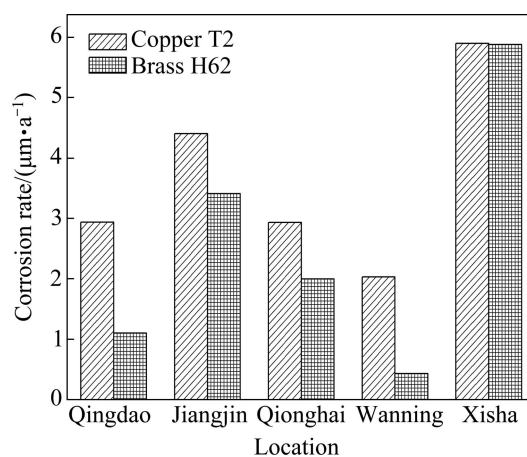


图 1 紫铜和黄铜在西沙站与其他大气试验站的腐蚀速度

Fig. 1 Corrosion rates of copper and brass in Xisha and other atmospheric test stations

2.2 宏观腐蚀形貌

铜及其合金在室外大气环境下暴晒后其颜色会发生明显变化, 研究表明, 西沙暴晒 0.5 a 后, 紫铜表面出现较大面积的红褐色腐蚀斑点, 而黄铜表面成雾状^[15]。继续暴晒直至 4 a, 紫铜和黄铜颜色变化如图 2 所示。从图 2 中可以明显看出, 随暴晒时间的延长, 紫铜光泽渐渐消失, 而黑色腐蚀产物逐渐增多, 部分

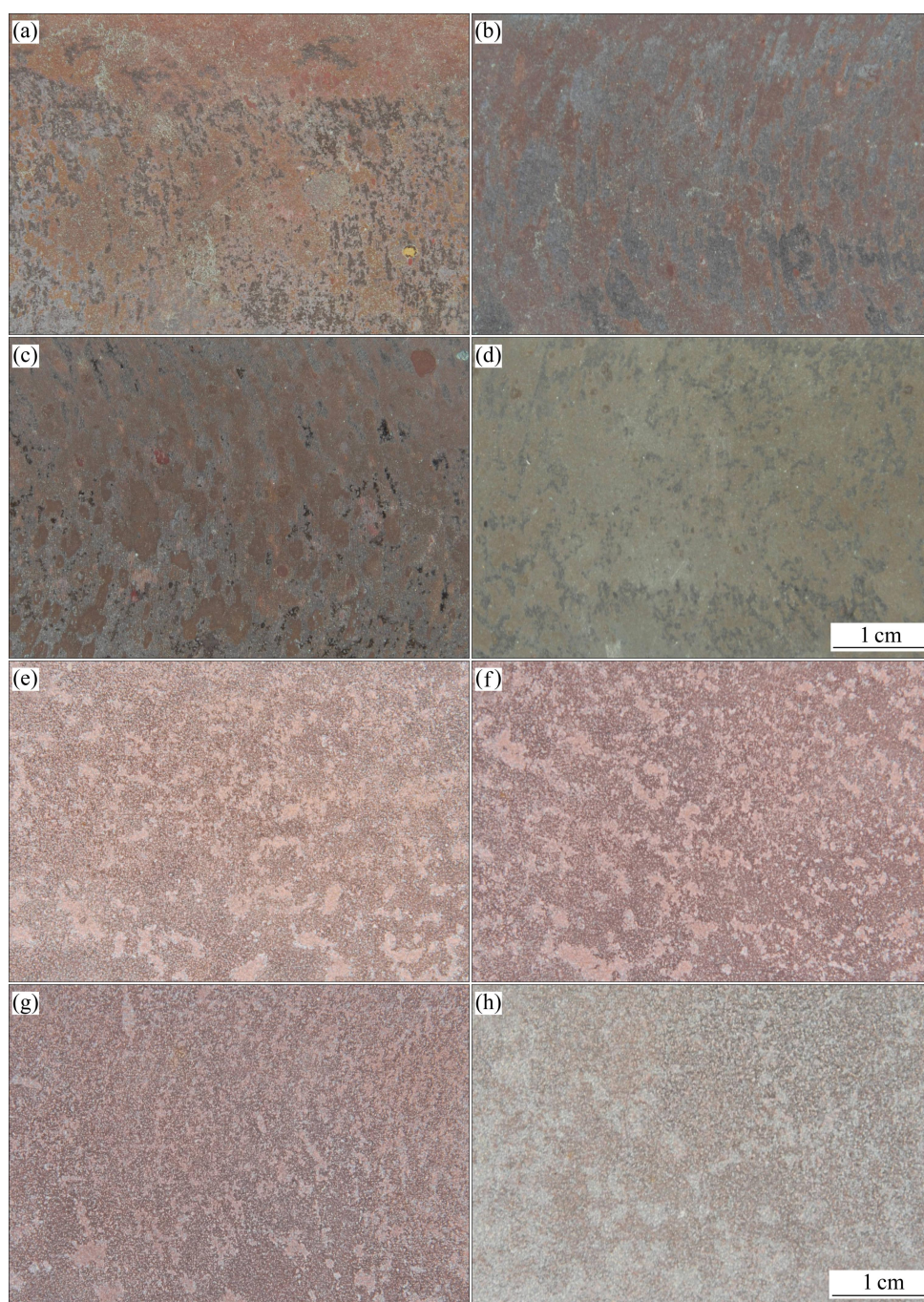


图 2 紫铜和黄铜在西沙暴晒(3/4~4) a 的宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphologies of copper and brass exposed for (3/4–4) a in Xisha atmosphere: (a)–(d) Copper for 3/4, 1, 2 and 4 a, respectively; (e)–(f) Brass for 3/4, 1, 2 and 4 a, respectively

区域出现腐蚀产物的剥落；黄铜表面红褐色产物越来越少，白色斑点越来越多，直至 4 a 时几乎覆盖整个表面，这与腐蚀产物中富锌相在表面的富集有关。

2.3 腐蚀形貌观察

图 3 所示为紫铜和黄铜暴晒不同时间后的腐蚀产物形貌。由图 3 可以看出，紫铜暴晒 1 a 后，局部腐

蚀产物膜出现成块剥落(见图 3(a))。暴晒 4 a 后，表层腐蚀产物变得非常均匀致密(见图 3(b))，在致密的产物膜层上分布着块状产物。黄铜暴晒 1 a(见图 3(c))和 4 a(见图 3(d))后腐蚀产物形貌没有明显区别，其表面均覆盖一层厚度不均匀的块状腐蚀产物。

图 4 所示为紫铜和黄铜表面去除腐蚀产物后的腐蚀形貌。吴军等^[15]对紫铜在西沙海洋大气环境下暴晒

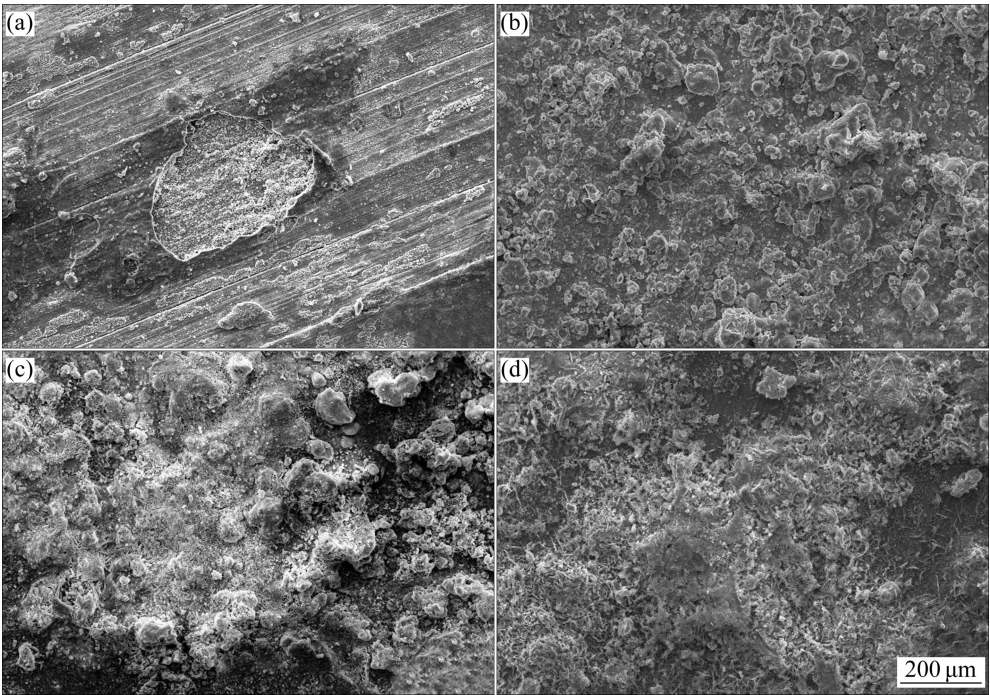


图 3 紫铜和黄铜在西沙暴晒后的腐蚀产物形貌

Fig. 3 Microscopic morphologies of corrosion products for copper and brass exposed in Xisha atmosphere: (a) Copper, 1 a; (b) Copper, 4 a; (c) Brass, 1 a; (d) Brass, 4 a

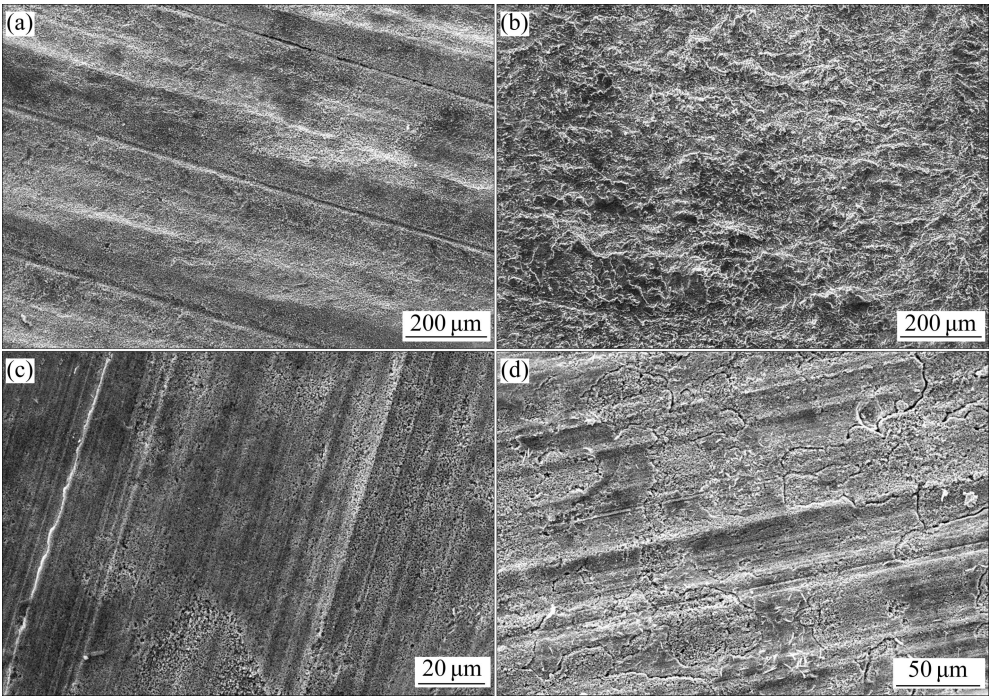


图 4 紫铜和黄铜去除腐蚀产物后的腐蚀形貌

Fig. 4 Corrosion morphologies of copper and brass after removing corrosion products: (a) Copper, 1 a; (b) Copper, 4 a; (c) Brass, 1 a; (d) Brass, 4 a

前期的腐蚀的研究发现, 紫铜主要表现为局部腐蚀。而(3/4~4) a 的腐蚀程度以 1 a 为分界点分为中期(3/4 a、1 a, 轻微)和后期(2 a、4 a, 严重)两个阶段。暴晒中期, 紫铜表面仍留有明显的划痕, 腐蚀以均匀腐蚀

为主(见图 4(a)); 暴晒后期, 试样表面呈凹凸不平的丘陵状, 腐蚀较为严重(见图 4(b))。

与暴晒前期相同, 黄铜的腐蚀形态以选择性腐蚀为主。暴晒中期, 由于锌的选择性溶解, 黄铜表面密密麻麻分布着连成网状的蚀坑(见图 4(c))。暴晒后期, 试样表面布满缝隙和裂纹(见图 4(d))。缝隙和裂纹的形成主要是由于黄铜发生了脱锌腐蚀, 锌的选择性溶解使得富铜相与富锌相之间产生了缝隙和裂纹。这种缝隙和裂纹的形成使得材料表面更容易受到进一步的腐蚀, 使得黄铜脱锌进一步向材料深处扩展。

2.4 腐蚀产物分析

2.4.1 XRD 分析

紫铜和黄铜暴晒 4 a 后的 X 射线衍射结果如图 5 所示。暴晒前期紫铜表面只生成 Cu_2O ^[15], 而暴晒后期紫铜的腐蚀产物由 Cu_2O 和 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 两部分组成。前者是铜暴晒于大气环境下的主要腐蚀产物, 而后者是当大气中 Cl^- 浓度较高时(尤其是海洋环境),

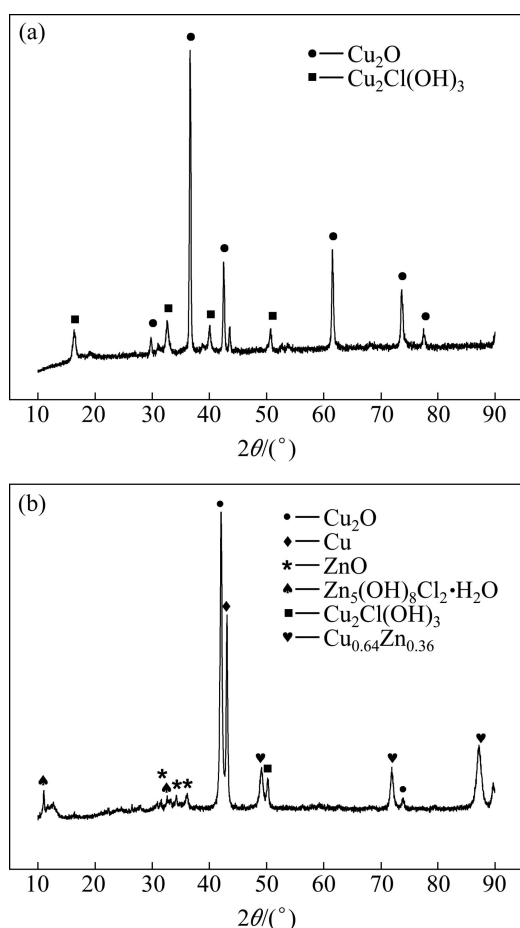


图 5 紫铜和黄铜在西沙大气下暴晒 4 a 后的 XRD 谱

Fig. 5 XRD patterns of copper (a) and brass (b) exposed in Xisha atmosphere for 4 a

由水膜下 Cu_2O 与 Cl^- 作用下产生的。

黄铜暴晒 4 a 后的腐蚀产物比较复杂, 既有 Cu_2O 和 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 等铜化合物, 又有 ZnO 和 $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ 等含锌化合物。由于黄铜发生脱锌腐蚀, 腐蚀产物层下的部分基体变成纯铜, XRD 谱中出现纯铜峰, 这与陈杰等^[12]的研究结果一致。另外, XRD 谱检测的 $\text{Cu}_{0.64}\text{Zn}_{0.36}$ 来自基体黄铜中的 α 相。

2.4.2 截面产物分析

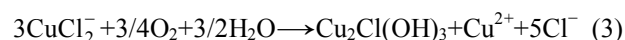
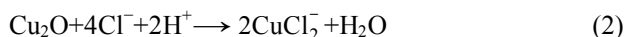
图 6 所示为紫铜和黄铜暴晒 4 a 的截面腐蚀产物形貌及元素面分布图。由图 6 可以看出, 紫铜和黄铜的锈层都较为致密, 与基体结合较好, 锈层厚度为 20~50 μm 。而且, 黄铜发生了明显的脱锌腐蚀, 局部脱锌厚度达到 50 μm , 这将极大地降低黄铜的力学性能。

由元素的面分布图可以看出, 紫铜的腐蚀产物分为两层, Cl 元素主要在产物的表面富集, 说明表层是铜的含氯化合物, 应为 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$; 下面覆盖较厚的部分为铜的氧化物即 Cu_2O 。在黄铜腐蚀产物层中没有发现 Cu 元素, 主要是 Zn 和 O 两种元素, 即 ZnO ; 而腐蚀产物下是一层较厚的脱锌层, 脱锌之后余留的是纯 Cu 以及少量的铜氧化物。

2.5 腐蚀机理分析

2.5.1 紫铜

铜在大气下的腐蚀反应是发生在薄液膜下的电化学反应, 腐蚀取决于相对湿度、表面润湿时间、 Cl^- 沉积量等许多因素。紫铜暴晒于大气中后, 首先在表面形成一层 Cu_2O 产物膜(见反应式(1)), 接着由于结露作用表面会形成厚度不均匀的含 Cl^- 薄液膜。薄液膜中的 Cl^- 会破坏 Cu_2O 产物膜使之转化为 CuCl 或 CuCl_2 (见反应式(2))。 CuCl_2 进一步被氧化为 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ (见反应式(3)), 这样, 紫铜表面就形成了双层结构的锈层(见图 6(a)), 即致密的 Cu_2O 内层和 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 外层。其反应步骤如下^[18-19]:



由于表面新生成的 $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ 极易潮解^[4], 因此, 铜表面凝露的临界相对湿度降低, 从而延长表面润湿时间, 使得紫铜的腐蚀速度长期保持较高的水平, 从而经受严酷条件下腐蚀。

2.5.2 黄铜

图 4(c)和 5(b)均表明, 黄铜 H62 在海洋大气环境

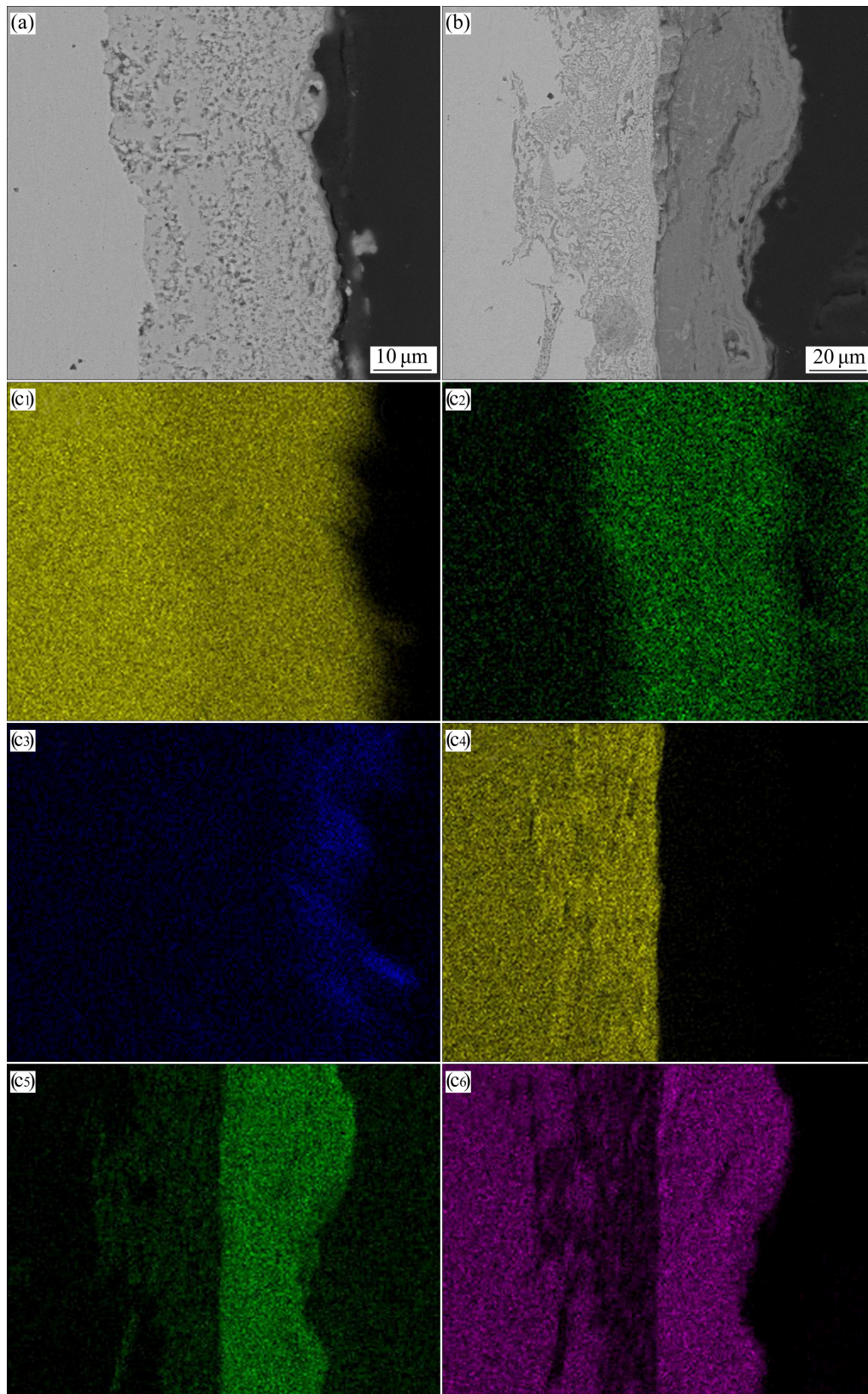


图 6 紫铜和黄铜在西沙大气下暴晒 4 a 后的截面腐蚀产物形貌及 EDS 元素面扫描结果

Fig. 6 Cross-section morphologies (a), (b) and EDS element scanning maps (c_1 – c_6) of corrosion products on copper and brass exposed in Xisha atmosphere for 4 a: (a) Copper; (b) Brass; (c_1) Copper, Cu; (c_2) Copper, O; (c_3) Copper, Cl; (c_4) Brass, Cu; (c_5) Brass, O; (c_6) Brass, Zn

下发生了脱锌腐蚀。关于黄铜脱锌的机理有很多, 但被认可的主要有两种, 即优先溶解机制和溶解-再沉积机制^[20]。前者认为, 合金表面的锌从黄铜中优先溶解, 留下较稳定、呈疏松多孔结构的铜层; 后者认为, 黄铜表面上的锌和铜一起溶解, 当溶液中铜离子达到一定的浓度后, 铜离子又被还原成金属铜沉积在表面, 作为附加阴极, 加速合金中锌的溶解。在西沙暴晒实验中, 截面产物的 EDS 分析结果证明黄铜 H62 腐蚀产物中几乎未出现 Cu 元素(见图 6(b)), 这说明 Cu 并未发生溶解再沉积过程; 相反, 腐蚀产物膜下出现了一层疏松多孔结构的纯铜层(见图 6(b)), 这进一步说明黄铜 H62 在海洋大气下发生了以优先溶解机制为主的脱锌腐蚀, 即脱锌首先在 Zn 含量较高的 β 相开始, 当一个晶粒完成脱锌后, 腐蚀将向另一个 β 相晶粒发展, 当周围 β 相及晶界脱锌完成后, 剩余的 α 相将继续脱锌, 留下疏松多孔的铜^[12, 21]。Zn 溶解后与液膜中的 O_2 和 Cl^- 反应生成 ZnO 与 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$, 其形成过程如下:



而 XRD 谱中检测到的 Cu_2O 及 $Cu_2Cl(OH)_3$ 等腐蚀产物是溶解的少量 Cu 与薄液膜中的 O_2 和 Cl^- 反应形成的。

3 结论

1) 紫铜和黄铜在西沙海洋大气环境下暴晒 4 a 期间的平均腐蚀速度分别为 5.90 和 5.88 $\mu m/a$, 腐蚀非常严重。

2) 紫铜暴晒过程中发生了严重的均匀腐蚀, 腐蚀产物膜分为两层, 内层为较为致密的 Cu_2O , 外层为 $Cu_2Cl(OH)_3$ 。

3) 黄铜在暴晒过程中发生了以优先溶解机制为主的脱锌腐蚀, 腐蚀产物主要为 ZnO 和 $Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O$, 腐蚀产物下的基体为 20~50 μm 厚度不等的脱锌层。

REFERENCES

- [1] 张生龙, 尹志民. 高强高导铜合金设计思路及其应用[J]. 材料导报, 2003, 17(11): 26-29.
ZHANG Sheng-long, YIN Zhi-min. High-strength and high-conductivity copper alloys: Designing considerations and their

- application[J]. Materials Review, 2003, 17(11): 26-29.
- [2] RICE D W, PETERSON P, RIGBY E B, PHIPPS P B P, CAPPELL R J, TREMOUREUX R. Atmospheric corrosion of copper and silver[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1981, 128(2): 275-284.
- [3] VERA R, DELAGADO D, ROSALES B M. Effect of atmospheric pollutants on the corrosion of high power electrical conductors—Part 2: Pure copper[J]. Corrosion Science, 2007, 49(5): 2329-2350.
- [4] MENDOZA A R, CORVO F, GÓMEZ A, GÓMEZ J. Influence of the corrosion products of copper on its atmospheric corrosion kinetics in tropical climate[J]. Corrosion Science, 2004, 46(5): 1189-1120.
- [5] FONSECA I T E, PICCIOCHI R, MENDONÇA M H, RAMOS A C. The atmospheric corrosion of copper at two sites in Portugal: A comparative study[J]. Corrosion Science, 2004, 46(3): 547-561.
- [6] NÚÑEZ L, REGUERA E, CORVO F, GONZÁLEZ E, VAZQUEZ C. Corrosion of copper in seawater and its aerosols in tropical island[J]. Corrosion Science, 2005, 47(2): 461-484.
- [7] GOIDANICH S, BRUNK J, HERTING G, ARENAS M A, WALLINDER O I. Atmospheric corrosion of brass in outdoor applications: Patina evolution, metal release and aesthetic appearance at urban exposure conditions[J]. Science of the Total Environment, 2011, 412/413: 46-57.
- [8] SKENNERTON G, NAIRN J, ATRENS A. Atmospheric corrosion of copper at Heron Island[J]. Materials Letters, 1997, 30(2/3): 141-146.
- [9] 安百刚, 张学元, 韩恩厚. 沈阳大气环境下纯铜的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2007, 43(1): 77-81.
AN Bai-gang, ZHANG Xue-yuan, HAN En-hou. Corrosion behavior of pure copper during initial exposure stage in atmosphere of Shenyang City[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(1): 77-81.
- [10] 杨敏, 王振尧. 铜的大气腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(4): 38-44.
YANG Min, WANG Zhen-yao. Review of atmospheric corrosion of copper[J]. Equipment Environment Engineering, 2006, 3(4): 38-44.
- [11] 刘琼, 王庆娟, 杜忠泽. 铜在自然环境中的腐蚀研究[J]. 新技术新工艺, 2008, 8: 80-82.
LIU Qiong, WANG Qing-juan, DU Zhong-ze. The research of copper corrosion in natural environment[J]. New Technology New Process, 2008, 8: 80-82.
- [12] 陈杰, 郑弃非, 孙霜青, 温军国. 海军黄铜 HSn62-1 的长周期大气腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 577-582.
CHEN Jie, ZHENG Qi-fei, SUN Shuang-qing, WEN Jun-guo. Long-term atmospheric corrosion behavior of naval brass HSn62-1[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 577-582.

- [13] LI T, LI X G, DONG C F, CHENG Y F. Characterization of atmospheric corrosion of 2A12 aluminum alloy in tropical marine environment[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2009, 19(4): 591–598.
- [14] 郝献超, 李晓刚, 肖葵, 董超芳. Q235 钢在西沙大气环境中的初期腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2009, 29(6): 465–469.
- HAO Xian-chao, LI Xiao-gang, XIAO Kui, DONG Chao-fang. Corrosion behaviors at the initial stage of Q235 steel in Xisha atmosphere[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2009, 29(6): 465–469.
- [15] 吴军, 李晓刚, 董超芳, 张三平, 周建龙. 紫铜 T2 和黄铜 H62 在热带海洋大气环境中的早期腐蚀行为[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2012, 32(1): 70–74.
- WU Jun, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, ZHANG San-ping, ZHOU Jian-long. Initial corrosion behavior of copper and brass in tropical marine atmospheric environment[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2012, 32(1): 70–74.
- [16] ISO9223. Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Classification[S]. 1992.
- [17] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- CAO Chu-nan. Material natural environmental corrosion of China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [18] STRANDBERG H, JOHANSSON L G. Some aspects of the atmospheric corrosion of copper in the presence of sodium chloride[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145(4): 1093–1100.
- [19] LIAO X N, CAO F H, ZHENG L Y, LIU W J, CHEN A N, ZHANG J Q, CAO C N. Corrosion behavior of copper under chloride-containing thin electrolyte layer[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(10): 3289–3298.
- [20] 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): 222–226.
- LI Yong, ZHU Ying-lu. Advances in researches of dezincification mechanism of brass[J]. *Corrosion and Protection*, 2006, 27(5): 222–226.
- [21] 王晓华, 林乐耘. HSn62-1 铜合金海水腐蚀行为特征的扫描电镜研究[J]. *稀有金属*, 1998, 22(6): 410–413.
- WANG Xiao-hua, LIN Le-yun. Study on scanning electron microscope of corrosion characteristics of HSn62-1 Cu alloy in seawater[J]. *Rare Metals*, 1998, 22(6): 410–413.

(编辑 陈卫萍)