

文章编号: 1004-0609(2004)07-1149-07

两种盐沉积对 LY12 铝合金大气腐蚀行为的影响^①

万 晔¹, 任延杰^{1, 2}, 严川伟¹

(1. 中国科学院 金属研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 长春工业大学 材料工程系, 长春 130012)

摘 要: 在温度为 298 K, 相对湿度为 $(85 \pm 5)\%$ 的条件下, 对硫酸铵和氯化铵两种盐沉积后的 LY12 铝合金大气腐蚀行为进行了研究。腐蚀动力学曲线表明: 沉积硫酸铵和氯化铵的 LY12 样品比空白样品的腐蚀更为严重, 而且经氯化铵沉积的样品比经硫酸铵沉积的样品腐蚀严重得多。采用傅里叶变换红外光谱、扫描电镜以及光电子能谱等微观方法研究了不同腐蚀周期样品表面的结构和形貌, 结果表明腐蚀主要沿着盐沉积的区域进行, 随着时间的延长, 腐蚀产物的生成减缓了 LY12 合金的腐蚀质量损失。对两种盐沉积条件下 LY12 合金的腐蚀机理进行了讨论。

关键词: LY12 铝合金; 盐沉积; 大气腐蚀

中图分类号: TG 172.3

文献标识码: A

Effect of deposition of ammonium chloride and ammonium sulfate on atmospheric corrosion of LY12 alloy

WAN Ye¹, REN Yan-jie², YAN Chuan-wei¹

(1. State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research,
The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Department of Materials Engineering,
Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: The atmospheric corrosion of LY12 alloy deposited with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4Cl particles was investigated at 298 K with relative humidity of $(85 \pm 5)\%$. The results show that: the samples deposited with NH_4Cl particles corrode more seriously than the samples with $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ particles. FTIR, SEM and XPS were utilized to study the development of corrosion process and characterization of corrosion products. The results also indicate that LY12 alloy contaminated by salts is corroded much faster than the clean samples, and corrosion of LY12 alloy initiates along the deposition area of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and NH_4Cl particles. A corrosion mechanism was proposed to explain the observation.

Key words: LY12 alloy; deposition; atmospheric corrosion

随着工业的迅速发展, 大气污染日益严重, 含硫化合物、含氮化合物和卤素化合物等主要污染物引起的腐蚀问题日益受到人们的关注。尤其在城市和工业地区, SO_2 和 NH_3 的排放严重, 导致硫酸盐和铵盐含量增加, 大气中的硫酸铵颗粒越来越多。

而海洋大气主要是以含 Cl^- 的海盐粒子为主, 海洋工业大气是以既含有工业废气的有害杂质又含有海洋环境的海盐粒子为特征, 所以不同大气环境中的不同污染物质对大气腐蚀有着不同的影响。

一般来说, 铝合金在大气中其表面生成一层氧

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59899144)

收稿日期: 2003-09-02; 修订日期: 2004-03-18

作者简介: 万 晔, 博士。

通讯作者: 万 晔, 博士; 电话: 024-23845724; 传真: 024-23921875; E-mail: ywan@imr.ac.cn

化铝保护膜,提高了它在大气中的耐蚀性。在工业大气中保护膜易被破坏,耐蚀性下降,特别是在酸雨地区耐蚀性下降更为明显。海洋大气中的氯离子对钝化膜有很强的破坏作用,从而使处于该环境中的 LY12 铝合金耐蚀性明显降低^[1]。另外由于存在晶界及沉淀相等缺陷,活性阴离子首先会在这些表面活性部位吸附,使铝合金的大气腐蚀呈现明显的点蚀特征。在大气环境中使用时,LY12 铝合金表面的腐蚀产物膜在萌生阶段的性质和发展规律受到许多因素的影响,并作用于其后期的腐蚀发展过程。

影响铝合金大气腐蚀的因素很多,硫酸铵和氯化铵是重要的环境影响因素。这是由于铵盐本身具有腐蚀性,铵盐溶于金属表面的水膜,使水膜的电导率升高,pH 值下降^[2],促进了铝合金的腐蚀。

关于铝的大气腐蚀户外暴露试验,国外已做了许多研究^[3~5],但实验室模拟的较少,瑞典的 Bengtsson 等^[6]研究了氯化钠盐沉积对 AA1070 铝大气腐蚀的影响。铵根离子和氯离子对 LY12 铝合金的大气腐蚀研究还少见报道。本工作主要采用质量损失法考察硫酸铵和氯化铵两种盐沉积下 LY12 铝合金的大气腐蚀行为,同时用傅里叶红外光谱(FTIR)、扫描电镜(SEM)以及光电子能谱(XPS)分析腐蚀样品的化学状态及表面形貌,以期对大气腐蚀机理有较深入的认识,从而对 LY12 铝合金的防护具有一定的指导作用。

1 实验

实验用材为 LY12 铝合金,其化学成分如表 1 所示。样品尺寸为 15 mm × 15 mm × 2 mm,一端钻有挂样孔。用 800[#] ~ 1 000[#] 砂纸逐级打磨,再用粒度为 1.5 μm 的金刚石研磨膏抛光,用三次蒸馏水充分冲洗,然后用乙醇和丙酮超声波除油清洗干净后,干燥备用。腐蚀加速实验用的硫酸铵溶液是按三次蒸馏水和无水乙醇体积比为 3:7 配制成的,浓度分别为 1.0, 2.0, 3.0 和 4.0 g·L⁻¹,用微量进样器按 15, 30, 45 和 60 μg·cm⁻²喷涂不同的溶液,并

使其均匀铺展于样品表面。氯化铵溶液是按三次蒸馏水和无水乙醇体积比为 2:8 配制成的,浓度分别为 2.0 和 4.0 g·L⁻¹,用微量进样器按 30, 60 μg·cm⁻²喷涂不同的溶液,使其均匀铺展于样品表面。将样品缓慢吹干,置于干燥器中备用。实验所用试剂的含量分别是:乙醇 99.5%,丙酮 99.8%,硫酸铵和氯化铵 99.5%。

腐蚀实验装置及挂样方法见文献[7]。每周取样一次,各个实验周期取出样品后,随即进行各种分析。

对每种条件下的样品进行质量分析,每个条件取 3 个平行样品,采用化学方法清除腐蚀产物。首先轻刷样品,去除附着的不牢固的块状腐蚀产物,然后将样品浸在三次蒸馏水中去除可溶性盐,接着在室温下将样品浸入浓度为 1.42 g/mL 的分析纯硝酸中 3 min,除去腐蚀产物,然后用三次蒸馏水冲洗干净,吹干,准备测量质量。每周准备 3 个未腐蚀样品进行校正,腐蚀质量损失为未腐蚀试样质量减去除掉腐蚀产物试样的质量。质量测量采用瑞士 Mettler-Toledo 天平(感量为 10⁻⁷ g)。

对腐蚀产物结构的分析主要包括:采用 Nicolet 公司的 Magna-IR560 红外光谱仪(VeeMax 反射附件)进行傅里叶红外光谱测试,采用荷兰 PHILIPS 公司生产的 XL-30 FEG 型场发射扫描电子显微镜进行扫描电镜测试,采用英国 VG 公司生产的 VG ESCALAB MK II 型表面分析系统进行光电子能谱测试,用 C 1s 电子校正样品的核电效应,其电子结合能为 284.6 eV。

2 结果与讨论

一般说来,在自然环境中铝合金表面生成一层大约 25 Å 厚的氧化膜^[8],因此不容易继续腐蚀,但是当其表面接触到 SO₄²⁻, Cl⁻ 等阴离子后,氧化膜就会被破坏,从而降低其耐蚀性。

图 1 所示为经不同浓度的两种盐沉积后的样品单位面积的腐蚀质量损失随时间的变化。可以看出,在实验初期,有硫酸铵和氯化铵沉积的样品其

表 1 LY12 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of LY12 alloy (mass fraction, %)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Ti	Impurity	Al
3.8~4.9	1.2~1.8	0.30~0.90	0.50	0.50	0.30	0.10	0.15	0.10	Bal.

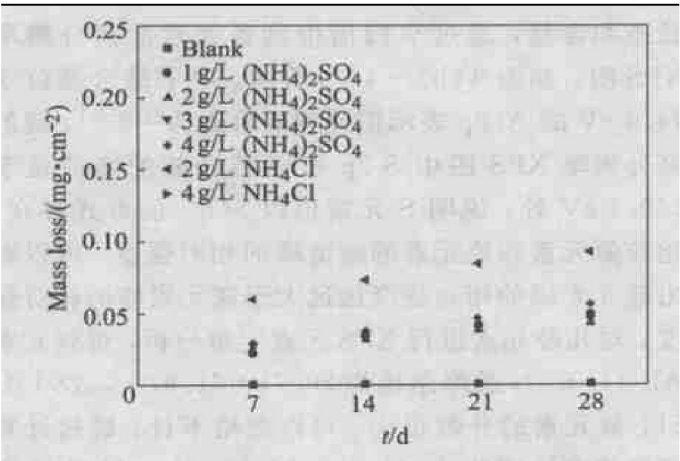


图 1 经不同盐沉积的样品的腐蚀质量损失

Fig. 1 Corrosion mass loss of LY12 alloy deposited with different salts after exposed for different time

腐蚀质量损失明显大于空白样品, 而且经氯化铵沉积的样品的腐蚀质量损失远远大于经硫酸铵沉积样品的腐蚀质量损失。这说明氯化铵和硫酸铵对于 LY12 的初期大气腐蚀产生了明显的诱发作用, 氯化铵的诱发作用更加明显, 这是由于氯离子半径比硫酸根离子的小, 比较容易渗透到铝合金基体中,

导致对应样品的腐蚀质量损失远远大于经同样条件硫酸铵沉积的样品。空白样品的腐蚀质量损失很小, 几乎为零。综合考虑盐沉积情况可知, 腐蚀质量损失随着盐浓度的增加而增加。

在实验过程中可以看到, 经氯化铵和硫酸铵盐沉积的样品表面有白色的腐蚀产物生成, 而空白样品表面腐蚀现象并不明显。图 2 所示为经不同盐沉积的 LY12 样品暴露 4 周后表面的扫描电镜照片。由图 2 可以看到, 经盐沉积后样品表面发生了局部腐蚀, 表面有凹凸不平的腐蚀产物存在, 腐蚀产物的不均匀分布也许可以解释为阳极和阴极区宏观上的分离^[4]。经氯化铵盐沉积的样品表面的腐蚀产物比经硫酸铵盐沉积的均匀, 而且前者的腐蚀产物颗粒也比后者的大。随着盐沉积量的增加, 腐蚀产物也随之增多。当盐的沉积量较大时, 样品表面的腐蚀产物较为密集, 覆盖在样品的表面, 在一定程度上阻碍了金属基体与环境中氧气和水份的接触, 从而减缓了后期腐蚀的进程。这些密集的腐蚀产物似乎会阻止氧气和水份向金属基体扩散, 但仔细观察图 2 可以看出, 腐蚀产物膜上存在细微的裂缝, 这就为氧气和水份向金属基体扩散提供了通道, 促使腐蚀进一步进行。

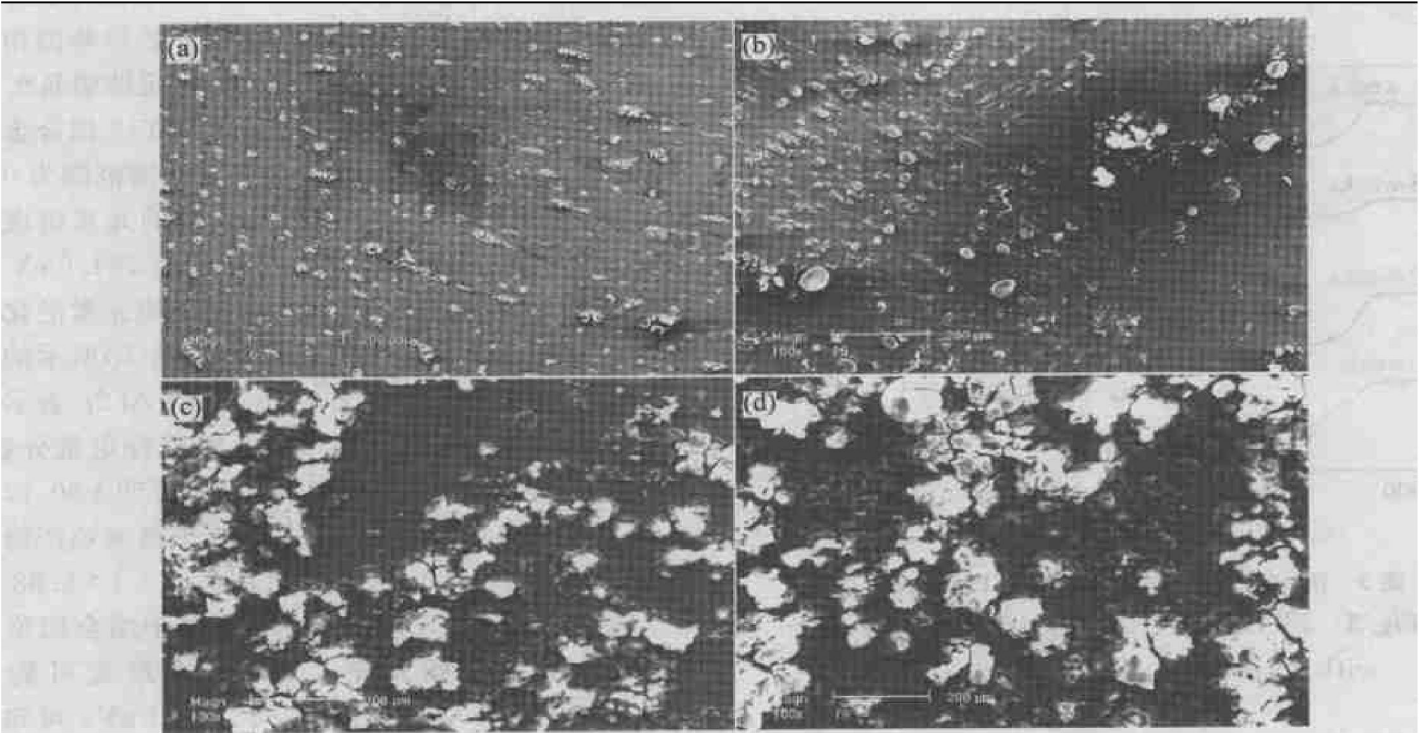


图 2 经不同盐沉积的 LY12 合金暴露 4 周后表面的 SEM 像

Fig. 2 SEM images of LY12 alloy surface deposited with different salts after exposed for 4 weeks

(a) $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; (b) $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$;
(c) $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{Cl}$; (d) $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{Cl}$

从图 2 中的 SEM 像还可以看到硫酸铵和氯化铵盐沉积区域的腐蚀产物数量明显多于未沉积区, 腐蚀主要在氯化铵和硫酸铵盐沉积的地方发生, 这是由于氯化铵和硫酸铵具有较强的吸潮性, 加快了该区域的腐蚀进程。

图 3 所示为经 4 g/L 硫酸铵盐沉积腐蚀后的 LY12 铝合金样品表面的红外光谱(FTIR)图, 图中 4 条曲线分别代表腐蚀 1, 2, 3 和 4 周后的样品。图 3 中波数在 $2\ 330\sim 2\ 360\text{ cm}^{-1}$ 处的两个肩峰为 CO_2 的特征峰^[9]。 NH_4^+ 在波数为 $3\ 330\text{ cm}^{-1}$ 左右处有一宽的伸缩振动峰, 与位于 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 左右结晶水的伸缩振动峰^[9]重合, 难以辨别。但由图 3 可以看出, NH_4^+ 有一波数为 $1\ 415\text{ cm}^{-1}(\text{s})$ 的弯曲振动吸收峰^[10, 11], 随时间的增加峰面积逐渐减小, 因而可以判断在样品的腐蚀过程中, 随着腐蚀时间的延长, NH_4^+ 的含量逐渐减少^[12]。另外, 波数为 $1\ 040\sim 12\ 109\text{ cm}^{-1}(\text{s})$, $683\text{ cm}^{-1}(\text{m})$ 以及 $960\sim 1\ 030\text{ cm}^{-1}(\text{w})$ 为 SO_4^{2-} 的特征吸收峰^[10]。波数为 $1\ 645\text{ cm}^{-1}$ 左右的峰为分子内结晶水的弯曲振动峰, 从第 2 周开始其峰的相对强度逐渐变大, 腐蚀产物含有一定的结晶水, 说明腐蚀产物形成了含结晶水的硫酸铝, 该晶体在样品表面形成一种保护膜, 对样品的后期腐蚀具有一定的阻碍作用。

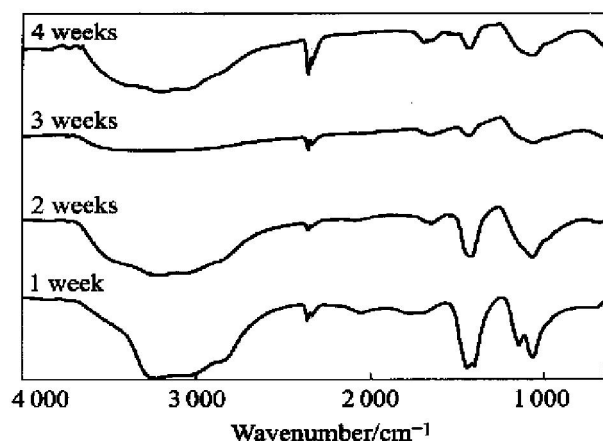


图 3 沉积 4g/L 硫酸铵的样品的 FTIR 光谱图

Fig. 3 FTIR spectra of samples deposited with 4 g/L $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ after exposed for different time

图 4 所示是经硫酸铵沉积的 LY12 样品腐蚀 4 周后的光电子能谱(XPS)图, 图 4(a)为对样品表面进行全扫描获得的全谱图, 录谱范围为 $0\sim 1\ 300\text{ eV}$ 。由图 4 可知, 该样品表面的元素组成包括铝、硫、碳、氮和氧, 其中电子结合能为 284.6 eV 的碳用以校正样品的核电效应。为鉴定这些元素的化学状态和含量, 通过窄扫描得到各元素的高分辨率

XPS 图, 如图 4(b)~ 4(e) 所示。电子结合能位于 74.4 eV 的 Al 2p 表示铝元素的价态为 $+3$ ^[13], 硫的高分辨率 XPS 图中 S 2p 电子结合能的峰值位于 169.1 eV 处, 说明 S 元素仍以 SO_4^{2-} 的形式存在。比较氮元素和硫元素的能谱峰的相对强度, 可以看出硫元素峰的相对强度远远大于氮元素峰的相对强度。对几种元素进行 XPS 元素定量分析, 得到元素 Al、O、S、N 的摩尔比为 $29.74: 61.97: 7.78: 0.51$, 氮元素的分数很小, 可以忽略不计。通过计算可知该腐蚀产物中 Al_2O_3 、 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 H_2O 的摩尔比为 $4.64: 1: 25.5$ 。

图 5 所示为经 4 g/L 氯化铵盐沉积腐蚀后的 LY12 铝合金样品表面的红外光谱图, 图中 4 条曲线分别代表腐蚀 1, 2, 3 和 4 周后的样品。 NH_4^+ 在波数为 $3\ 330\text{ cm}^{-1}$ 左右处有一宽的伸缩振动峰, 与位于 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 左右结晶水的伸缩振动峰^[9]重合, 难以辨别。但由图 5 可以看出, NH_4^+ 有一波数为 $1\ 415\text{ cm}^{-1}(\text{s})$ 的弯曲振动吸收峰^[10, 11], 随腐蚀时间的增加, 峰面积逐渐减小, 因而可以判断在样品的腐蚀过程中, 随着腐蚀时间的延长, NH_4^+ 的含量逐渐减少^[12]。波数为 $1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 左右的峰为分子内结晶水的弯曲振动峰, 从第 2 周开始该峰的相对强度逐渐变大, 说明腐蚀产物含有一定的结晶水。

图 6 所示是经氯化铵盐沉积的 LY12 铝合金的 XPS 图, 图 6(a)为样品的全谱图, 录谱范围为 $0\sim 1\ 300\text{ eV}$ 。由图 6 可知, 该样品表面的元素组成包括铝、氯、碳、氮和氧, 电子结合能为 284.6 eV 的碳用以校正样品的核电效应。为分析铝元素的化学状态, 对其进行了窄扫描, 得到如图 6(b)所示的高分辨图。电子结合能位于 74.5 eV 的 Al 2p 表示铝元素的价态为 $+3$ ^[13]。对几种元素进行定量分析, 得到元素 Al、O、Cl 的摩尔比为 $32.59: 60.77: 6.63$, 未检测到氮元素, 由此计算出该腐蚀产物中 Al_2O_3 、 AlCl_3 、 H_2O 的摩尔比为 $6.87: 1: 6.88$ 。

空白样品 XPS 谱图中 Al 2p 电子结合能位于 74.5 eV , 说明铝是 $+3$ 价, 存在形式可能为 Al_2O_3 ^[13]; O 1s 电子结合能位于 532.1 eV , 可知氧以 -2 价的形式存在。同时由元素的定量分析结果可知 LY12 空白样品表面的氧化膜主要以 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在, 铝元素和氧元素的摩尔分数分别为 26.03% 和 73.97% , 通过计算得出 x 的值大约为 2.68 。

一般来说, 暴露在空气中的铝合金表面极容易

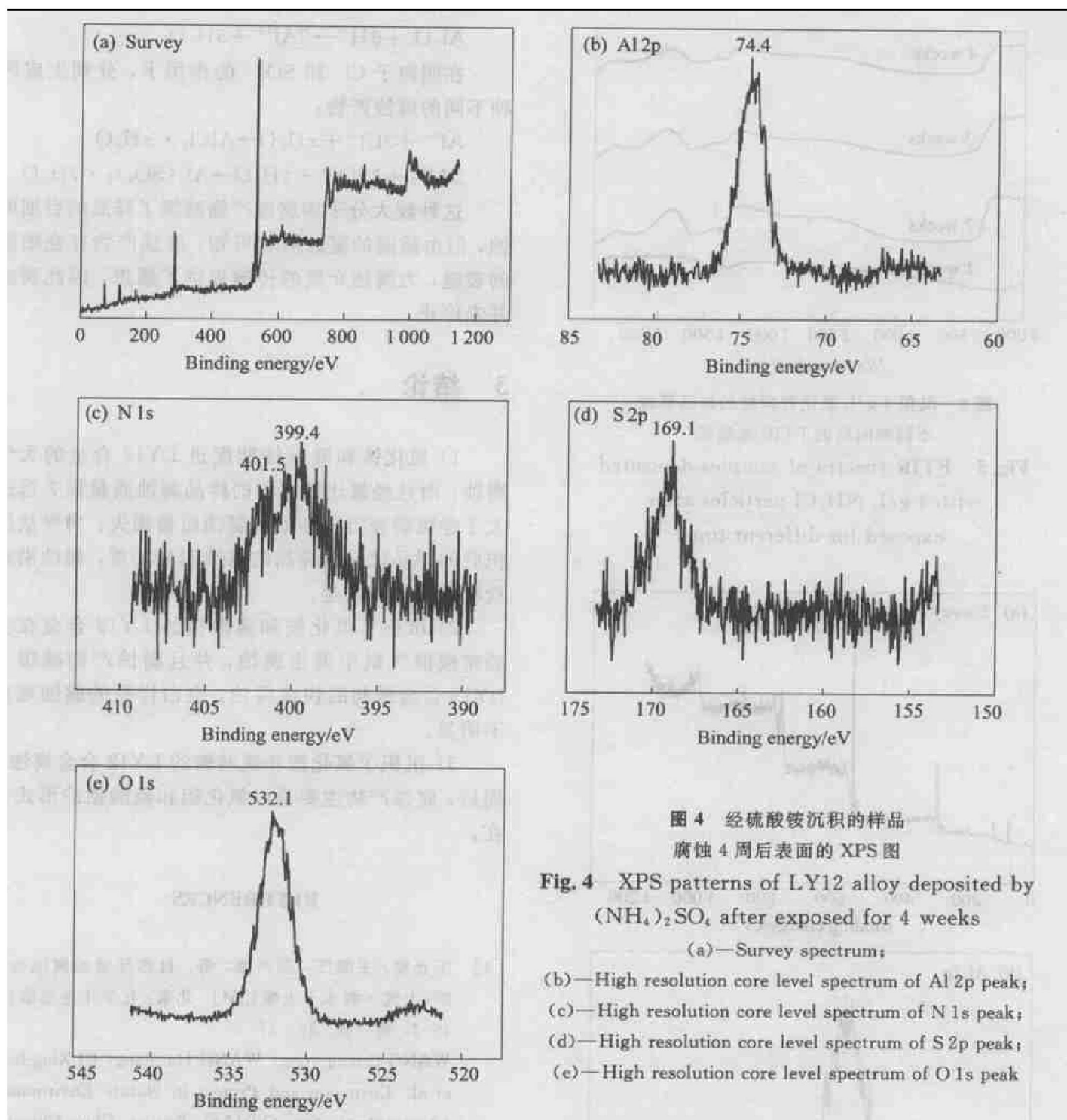


图 4 经硫酸铵沉积的样品
腐蚀 4 周后表面的 XPS 图

Fig. 4 XPS patterns of LY12 alloy deposited by $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ after exposed for 4 weeks

- (a)—Survey spectrum;
(b)—High resolution core level spectrum of Al 2p peak;
(c)—High resolution core level spectrum of N 1s peak;
(d)—High resolution core level spectrum of S 2p peak;
(e)—High resolution core level spectrum of O 1s peak

形成一层钝化膜, 该膜能对铝的进一步腐蚀起到一定的阻碍作用。由于氯化铵和硫酸铵具有较强的潮解性, 沉积这两种盐的样品能从周围的环境中吸附水份, 在样品的表面形成一层薄的电解质溶液, 从而发生电化学腐蚀。众所周知, 由于氯离子的存在, 铝容易产生点蚀。但是关于点蚀的诱发机制目前存在几种不同的观点^[14~16]。Kaeshe^[14]认为铝的点蚀是由于吸附在表面的氯离子诱发, 导致该钝化膜的溶解。与这种观点相似, Stumm^[17]提出 Al_2O_3 的溶解是由于铝表面的阴离子和铝形成不同的化合物的缘故。他们认为阴离子的负电荷能弱化

样品表面钝化膜的化学键, 因而钝化膜会发生溶解。基于这种观点, 样品表面氧化物的溶解是一个受不同阴离子影响的缓慢的非平衡过程, 离子的吸附强烈依赖于样品表面的电荷种类, 硫酸铵和氯化铵具有吸湿性和酸性, 表面带有正电荷, 容易吸附带负电荷的氯离子和硫酸根离子, 从而导致铝表面钝化膜的溶解和点蚀的发生。

其可能的反应机理如下:

首先, 铵盐电离产生铵根离子, 铵根离子水解产生 H^+ , 使样品表面带有一定的酸性, 促使 LY12 铝合金表面的钝化膜溶解, 产生 Al^{3+} :

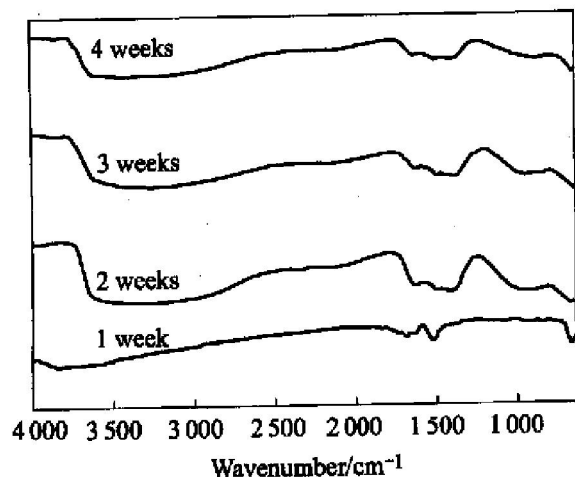


图 5 沉积 4 g/L 氯化铵颗粒的样品暴露不同时间后的 FTIR 光谱图

Fig. 5 FTIR spectra of samples deposited with 4 g/L NH_4Cl particles after exposed for different time

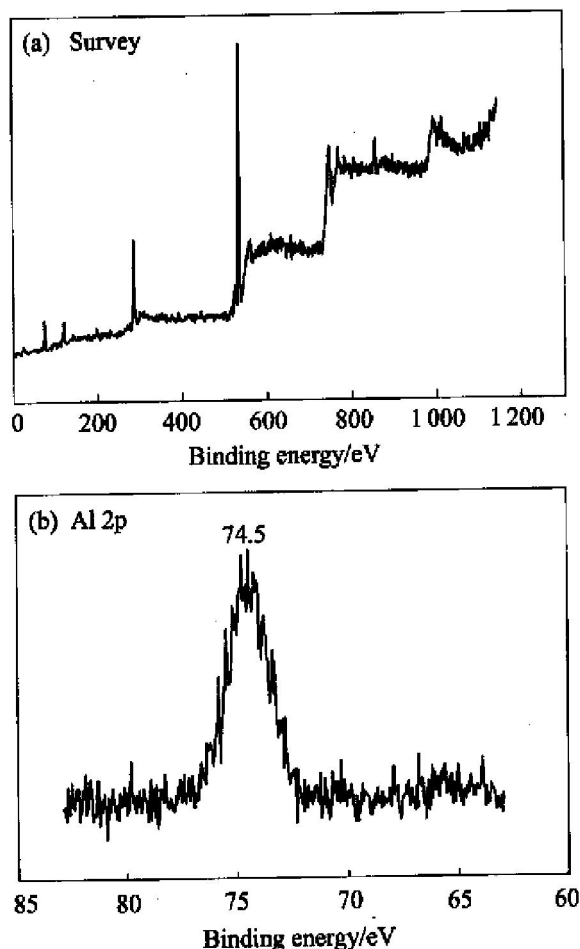
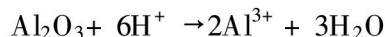
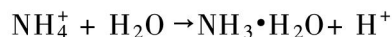


图 6 经氯化铵沉积的样品腐蚀 4 周后表面的 XPS 谱图

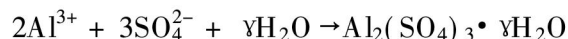
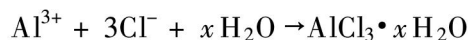
Fig. 6 XPS patterns of LY12 alloy deposited by NH_4Cl after exposed for 4 weeks

(a) —Survey spectrum;

(b) —High resolution core level spectrum of Al 2p peak



在阴离子 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的作用下, 分别生成两种不同的腐蚀产物:



这种较大分子的腐蚀产物减缓了样品的后期腐蚀, 但由前面的腐蚀形貌可知, 腐蚀产物存在细微的裂缝, 为腐蚀介质的传输提供了通道, 因此腐蚀并未停止。

3 结论

1) 氯化铵和硫酸铵能促进 LY12 合金的大气腐蚀, 而且经氯化铵沉积的样品腐蚀质量损失远远大于经硫酸铵沉积样品的腐蚀质量损失。两种盐沉积后的样品比空白样品的腐蚀明显加重, 腐蚀沿着盐沉积的区域发生。

2) 沉积了氯化铵和硫酸铵的 LY12 合金在实验室模拟气氛中发生腐蚀, 并且腐蚀产物减缓了 LY12 合金最初的快速腐蚀。空白样品的腐蚀现象不明显。

3) 沉积了氯化铵和硫酸铵的 LY12 合金腐蚀 4 周后, 腐蚀产物主要是以氯化铝和硫酸铝的形式存在。

REFERENCES

- [1] 王光雍, 王海江, 李兴濂, 等. 自然环境的腐蚀与防护(大气·海水·土壤)[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997, 第一版. 26-27.
WANG Guang-yong, WANG Hai-jiang, LI Xing-lian, et al. Corrosion and Protect in Nature Environment (Atmosphere, Sea, Oil)[M]. Beijing: China Chemical Press, 1997. 26-27.
- [2] 梁成浩. 金属腐蚀学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 132.
LIANG Cheng-hao. Principle of Corrosion of Metals [M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 132.
- [3] Graedel T E. Corrosion mechanisms for aluminum exposed to the atmosphere[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1989, 136(4): 204-212.
- [4] Vashi R T, Patel H G. Atmospheric corrosion study of baroda industrial area[J]. Bulletin of Electrochemical, 1997, 13: 343-348.
- [5] Elola A S, Otero T F, Porro A. Evolution of the pitting

- of aluminum exposed to the atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10): 854 - 863.
- [6] Blücher Bengtsson D, Lindström R, Svensson J E, et al. The effect of CO₂ on the NaCl-induced atmospheric corrosion of aluminum[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2001, 148(4): B127 - B131.
- [7] 万 晔, 严川伟, 屈 庆, 等. 硫酸铵颗粒沉积作用下 A3 钢大气腐蚀行为[J]. 物理化学学报, 2002, 18(2): 156 - 159.
- WAN Ye, YAN Chuanwei, QU Qing, et al. Atmospheric corrosion of A3 steel deposited by ammonium sulfate[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2002, 18(2): 156 - 159.
- [8] Godard H P, Jepson W B, Bothwell M R, et al. The Corrosion of Light Metals[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1967. 3.
- [9] 吴瑾光. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用(下卷)[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 272.
- WU Jinguang. Techniques and Applications of Infrared Fourier Transform Spectroscopy (Volume Two) [M]. Beijing: Science and Technology Information Press, 1994. 272.
- [10] Nyquist R A, Kagel R O. Infrared Spectra of Inorganic Compounds[M]. New York and London: Academic Press, 1971. 16.
- [11] 吴瑾光. 近代傅立叶变换红外光谱技术及应用(上卷)[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994. 606.
- WU Jinguang. Techniques and Applications of Infrared Fourier Transform spectroscopy (Volume One) [M]. Beijing: Science and Technology Information Press, 1994. 606.
- [12] Lobnig R E, Siconoffi D J, Psota-Kelty L. Atmospheric corrosion of zinc in the presence of ammonium sulfate particle[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1996, 143(5): 1539 - 1546.
- [13] 刘世宏, 王当慈, 潘承璜. X 射线光电子能谱分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 305.
- LIU Shihong, WANG Danghan, PAN Chenghuang. Analyst of X-ray Photoelectron Spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 1988. 305.
- [14] Kaeshe H. Passivity of Metals[M]. Princeton NJ: The Electrochemical Society, 1978. 935.
- [15] Foroulis Z A, Thubrikar M J. A study of the pitting corrosion of Al by scanning electron microscopy[J]. Werkstoffe und Korrosion, 1975, 5: 350 - 355.
- [16] Richardson J A, Wood C G. A study of the pitting corrosion of Al by scanning electron microscopy[J]. Corrosion Science, 1970, 10: 313 - 323.
- [17] Stumm W. Aquatic Surface Chemistry, Chemical Processes at the Particle-Water Interface[M]. New York: John Wiley & Sons, 1987. 197.

(编辑 杨 兵)