文章编号：1004-0609(2013)03-0628-07

第二相对 Al-Zn-Sn-Ga-Mg 合金腐蚀行为的影响

贺俊光，文九巴，周旭东

(河南科技大学 材料科学与工程学院，洛阳 471003)

摘 要：通过分析 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金中的第二相及其腐蚀特性，研究第二相对该合金腐蚀行为的影响。结果表明：Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金中的第二相主要为球状和棒状的 $MgZn_2$ 相。$MgZn_2$ 相的腐蚀电位较 α(Al)基体的负，腐蚀电流密度较高且极化电阻较小。$MgZn_2$ 相对于 α(Al)基体为阳极相，其在 3.5%NaCl 溶液中与 α(Al)基体组成腐蚀微电池，引起 $MgZn_2$ 相自身优先溶解，进而引发合金全面溶解。

关键词：铝合金；牺牲阳极；第二相；腐蚀行为

中图分类号：TG174. 41 **文献标志码**：A

Influence of second phase on corrosion behavior of Al-Zn-Sn-Ga-Mg alloy

HE Jun-guang, WEN Jiu-ba, ZHOU Xu-dong

(School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: Influence of the second phase on the corrosion behavior of Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy was investigated through the analysis of the second phase and its corrosion characteristics in Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy. The results show that the second phases in Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy mainly are $MgZn_2$ particles with spherical and rod-like. $MgZn_2$ has a more negative corrosion potential, a higher corrosion current density and a smaller polarization resistance than α(Al) matrix. The $MgZn_2$ particles are the anodic phase relative to α(Al) matrix, they form many micro-corrosion cells with α(Al) matrix in 3.5% NaCl solution, which lead to the anodic self-dissolution of $MgZn_2$ particles preferential, and resulting in the whole dissolution process of the aluminum sacrificial anode.

Key words: aluminum alloy; sacrificial anode; second phase; corrosion behavior

铝合金的微观组织对其宏观电化学性能有较大的影响。REBOUL 等[1]指出合金中的金属间化合物对铝合金的活化有重要影响。SALINA 等[2]发现偏析相是腐蚀的引发部位，自腐蚀引起电流效率损失严重。齐公台等[3−4]认为铝阳极溶解的均匀性与第二相数量有关，第二相数量多，阳极溶解就均匀，但第二相的增加也造成电流效率降低。丁振斌等[5]认为具有大小均匀、形态规则、 数量适中第二相粒子的铝阳极有较好的综合电化学性能。刘斌等[6]通过模拟 Al_2Zn 研究了其在 NaCl 溶液中的电化学行为，认为阳极型偏析相 Al_2Zn 优先溶解，一方面活化铝合金阳极表面，另一方面引起自腐蚀。LI 等[7]则通过模拟 Al_2Cu、Al_2CuLi 等研究了析出相类型在铝合金局部腐蚀中的作用机理。BIRBILIS 等[8]通过模拟 Al_7Cu_2Fe 研究了铝合金中该偏析相的电化学行为，认为阴极型偏析相 Al_7Cu_2Fe 引发了偏析相与基体界面处的点蚀。本课题组在三元 Al-Zn-Sn 合金的基础上，开发出电化学性能较好的 Al-Zn-Sn-Ga 系列牺牲阳极合金[9−11]，但是，该系合金中第二相对其腐蚀行为的影响尚不清楚。

为此，本文作者以第二相较多的 Al-Zn-Sn-Ga-Mg

基金项目：河南省科技创新杰出人才计划资助项目(094200510019)；河南省自然科学基金资助项目(092300410132)
收稿日期：2012-04-25；**修订日期**：2012-07-21
通信作者：贺俊光，博士；电话：13525440285；E-mail：he.ellen@163.com

阳极合金为研究对象，通过分析该合金的第二相及其存在形态，并根据第二相和 α(Al)基体的成分熔炼它们的模拟合金，研究第二相的腐蚀特性及其对合金腐蚀行为的影响，以探讨该合金的腐蚀机理。

1　实验

1.1　合金制备

将高纯 Al、 Zn 和 Mg 锭(＞99.9%)及分析纯 Sn 和 Ga 按质量分数(%)Al-7Zn-0.1Sn-0.015G-2Mg 称取。在 ZGJL0.01−4C−4 真空感应炉中熔炼合金，于铸铁模具中浇注成 d 20 mm×140 mm 的圆棒，自然冷却。

1.2　微观组织分析

由铸态 Al-7Zn-0.1Sn-0.015G-2Mg 合金制取试样，用 JSM−5610LV 扫描电镜(SEM)观察合金组织并对第二相成分进行分析。对合金进行(470 ℃，4 h 固溶)+(200 ℃，24 h 时效)处理，并将处理后的试样用 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行 XRD 分析和用 JEM−2100 型高分辨透射电镜(HRTEM)观察，分析该合金中的微观组织和第二相。其中 X 射线衍射仪使用的加速电压为 40 kV，电流为 40 mA，步长为 0.02°，扫描速度为 0.4 s/步；高分辨观察试样电解双喷时的电解液为 25%的硝酸甲醇溶液，电解电压为 20~30 V，电流为 40~55 mA，温度约为−30 ℃。

1.3　模拟第二相制备

根据 α(Al)基体(Ga 按 0.015%均匀分布于铝基体)和第二相的化学成分，配制且熔炼它们的模拟合金。将配制好的原料放入纽扣式真空熔炼炉中，反复加热熔化、冷却凝固，重复 3 次得到 α(Al)基体和第二相的模拟合金。对模拟合金进行(470 ℃，24 h)的固溶处理，以确保合金中的元素成分均匀分布。

1.4　极化曲线测试

采用三电极体系在 CHI660C 型电化学工作站测试模拟合金在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线。辅助阴极和参比电极分别为石墨电极和饱和甘汞电极(SCE)。其扫描范围为−0.7~ −1.3 V(vs SCE)，扫描速率为 1 mV/s。

1.5　合金腐蚀形貌观察

用 HRTEM 观察腐蚀前合金中第二相的形貌。然后将用于透射观察的时效 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 试样在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 和 30 min，取出后快速放入 80 ℃的 CrO_3+H_3PO_4 溶液中保温 5 min 以去除腐蚀产物，用酒精清洗 3 次，吹干，在透射下观察合金腐蚀后的形貌。将铸态合金试样在 3.5%NaCl 溶液中分别浸泡 30 min 和 6 h，用扫描电镜观察铸态合金的腐蚀形貌。

2　结果与分析

2.1　组织分析

图 1 所示为 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg(质量分数，%)合金的背散射 SEM 像及第二相的 EDX 谱。从第二相的点能谱结果可以看出，该合金的第二相主要含有 Al、Zn 和 Mg 元素，其中 Zn 与 Mg 的摩尔比约为 2，如图 1(b)所示。在铝合金中 w(Mg)＜1.0 %时，Mg 完全固溶于基体，w(Mg)≥1.0 %，晶界将出现含镁化合物。n(Zn)/n(Mg)＞2 时，首先形成金属间化合物 η 相 $MgZn_2$，进一步提高 Mg 含量，会形成 T 相 $Mg_3Zn_3Al_2$ 和 β 相 Mg_2Al_3 及 Mg_3ZnAl_2 等金属间化合

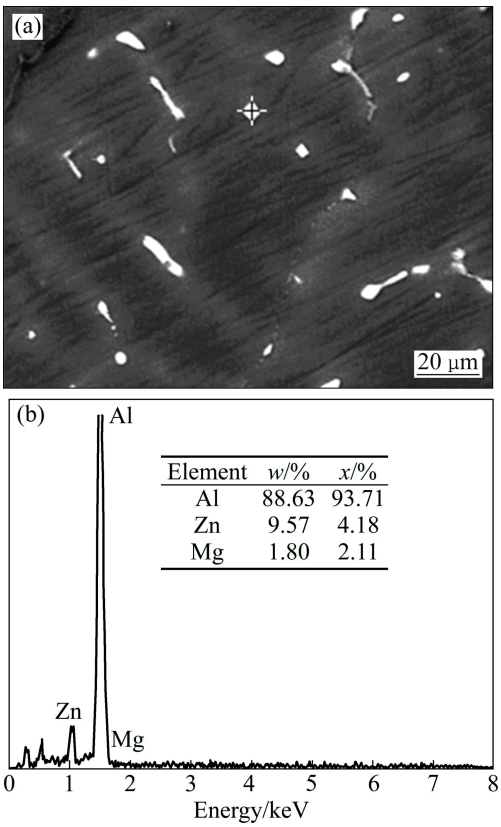

图 1　Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金的背散射 SEM 像及 EDX 能谱分析

Fig. 1　SEM image (a) and EDX pattern (b) of Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy

物[12−13]。Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金中 n(Zn)/n(Mg)＞2，且能谱分析也符合 $MgZn_2$ 相，因此初步确定该合金中的第二相主要为 $MgZn_2$ 相。

为进一步确定 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金中的第二相，对该合金进行(470 ℃，4 h 固溶)+(200 ℃，24 h 时效)处理，然后对其进行 XRD 分析、透射电镜组织观察和选区电子衍射分析。图 2 所示为该合金经热处理后的 XRD 谱。由图 2 可知，该合金时效后的衍射峰分别与 Al 及 $MgZn_2$ 的 PDF 衍射卡片的峰值相对应，表明该合金中除 Al 外还含有 $MgZn_2$ 这种第二相。图 3 所示为 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金经热处理后的典型 TEM 像及第二相的选区电子衍射图。从图 3(a)可以看出，灰色的 α(Al)基体上弥散分布着灰黑色的球状或棒状第二相。经对第二相进行标定，球状第二相衍射谱和 $MgZn_2$ 的(0002)、$(\bar{2}112)$ 及 $(\bar{2}110)$ 晶面间距有很好的对应关系，属于 $[01\bar{1}0]$ 晶带轴(见图 3(b))；棒状第二相和 $MgZn_2$ 的 $(0\bar{1}13)$、$(\bar{1}103)$ 及 $(10\bar{1}0)$ 晶面间距有很好的对应关系，属于 $[1\bar{2}1\bar{1}]$ 晶带(见图 3(c))。因此，确定 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金球状和棒状第二相均为 $MgZn_2$ 相。ASHOK 等[14]指出 Al-Zn 阳极合金中的第二相为 AlZn 和 Al_2Zn。但经过以上分析，Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金中的第二相主要为 $MgZn_2$ 相。这与 CLARK[15]的研究结果相一致，他们通过时效处理、透射电子形貌和选区电子衍射分析发现 $MgZn_2$ 存在两种不同的过渡相即棒状和圆盘状。

2.2 第二相的极化性能

将 $MgZn_2$ 和 α(Al)基体这两种模拟合金浸泡在

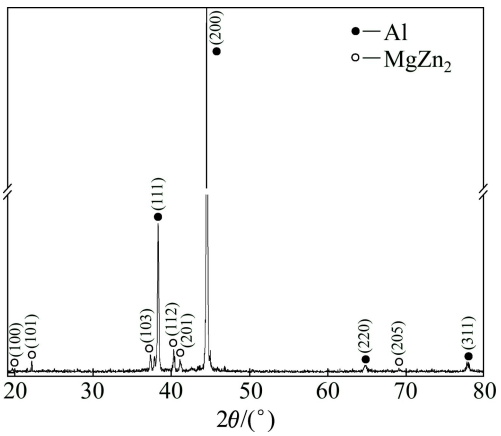

图 2 热处理后 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金的 XRD 谱

Fig. 2 XRD pattern of Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy after heat treatment

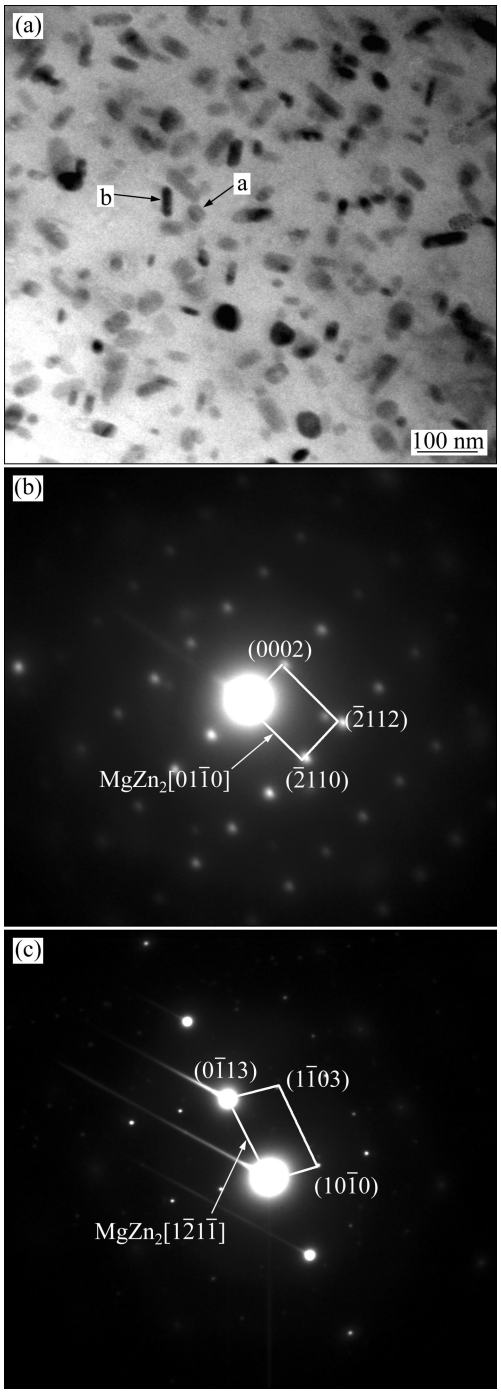

图 3 热处理后 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金的 TEM 明场像及其球状和棒状第二相的选区电子衍射图

Fig. 3 TEM bright field image of Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy after heat treatment (a) and SAED patterns of ellipsoid-like (b) and rod-like (c) particles in Fig. 3(a)

3.5%NaCl 溶液中 4 000 s 后，分别进行极化曲线测试，其极化曲线如图 4 所示。由极化曲线根据外推法[16−17]得出的腐蚀参数如自腐蚀电位(E_{corr})、自腐蚀电流密度(j_{corr})和极化电阻(R_p)如表 1 所列。由图 4 及表 1 可以

看出，第二相 $MgZn_2$ 的自腐蚀电位(φ_{corr})为−1.094 V(vs SCE)比 α(Al)基体的自腐蚀电位−1.014 V(vs SCE)负，而第二相 $MgZn_2$ 的腐蚀电流密度(j_{corr})比 α(Al)基体的大了近一个数量级，其相应的腐蚀电阻(R_p)为 429.2 Ω/cm^2，而 α(Al)基体的为 3 571.6 Ω/cm^2 小了近一个数量级。表明 $MgZn_2$ 相在 3.5%NaCl 溶液中比 α(Al)基体更容易腐蚀，为阳极相。张琦等[18]和李劲风等[19]通过测试模拟 $MgZn_2$ 和 α(Al)中的开路电位也证明 $MgZn_2$ 的电位较基体电位负，在腐蚀过程中为阳极相优先溶解。

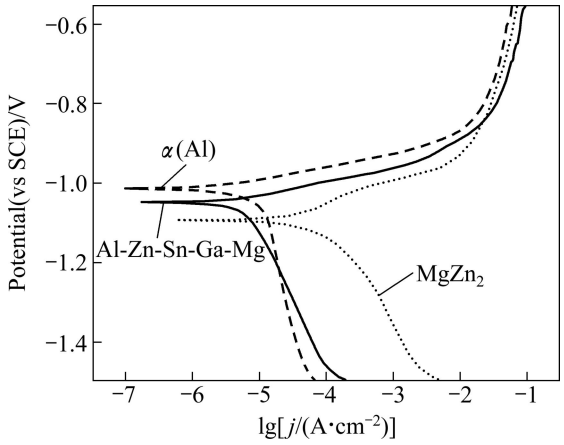

图 4　模拟合金在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 4　Potentiodynamic scanning curves of simulated alloys in 3.5% NaCl solution

表 1　由图 4 极化曲线获得的合金的腐蚀参数

Table 1　Corrosion parameters of alloys obtained from Fig. 4

Alloy	φ_{corr} (vs SCE)/V	j_{corr} /(A·cm^{-2})	R_p/(Ω·cm^2)
Al-Zn-Sn-Ga-Mg	−1.049	6.603×10^{-6}	2 544.8
α(Al)	−1.014	5.301×10^{-6}	3 571.6
$MgZn_2$	−1.094	3.627×10^{-5}	429.2

2.3　腐蚀形貌分析

图 5 所示为经热处理的 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金腐蚀前其球状和棒状 $MgZn_2$ 相的高分辨形貌。图 5(a)中的 $MgZn_2$ 的形貌与基体的差异较小，其晶格间距与 α(Al)的基本相等。通过直接测量 α(Al)晶格条纹的晶面间距，d_1=d_3=2.476 Å，d_2=2.135 Å，与 Al 的$(1\bar{1}1)$、$(11\bar{1})$和(200)的晶面间距相符，属于[0 1 1]晶带轴。对第二相的晶格像进行测量，与 $MgZn_2$ [0 0 0 1]晶带轴的$(1\bar{1}00)$和$(02\bar{2}0)$晶面相符，且$(11\bar{1})_{Al}//(1\bar{1}00)_{MgZn_2}$，$(1\bar{1}1)_{Al}//(02\bar{2}0)_{MgZn_2}$。通过直接测量，图 5(b)中 α(Al)晶格条纹的晶面间距 d=2.476 Å，与 Al 的(1 1 1)的晶面间距相符。棒状第二相也与 $MgZn_2$ 的$(1\bar{1}00)$和$(02\bar{2}0)$晶面相符，与图 5(a)中的球状 $MgZn_2$ 相晶面及晶向指数相同，只是沿$(1\bar{1}00)$晶面的长大速度明显高于沿$(02\bar{2}0)$晶面的，形成长棒状形貌。

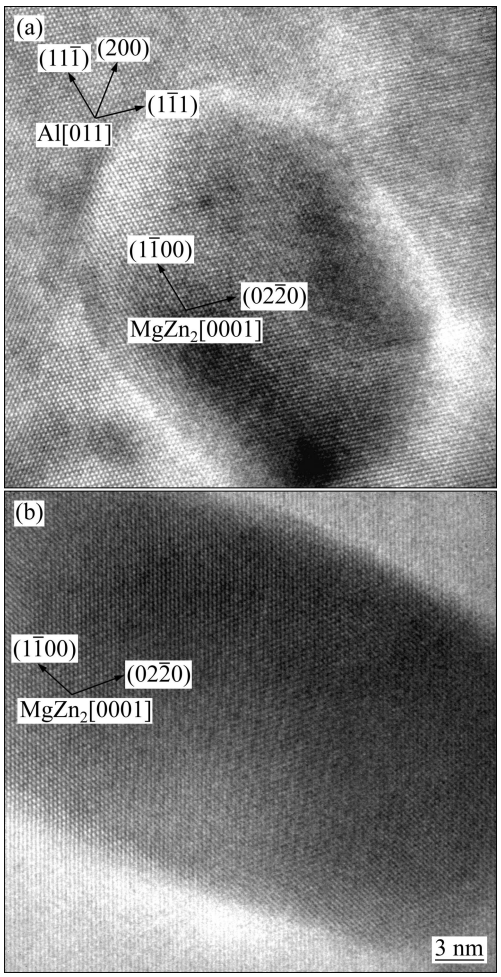

图 5　时效 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金球状和棒状 $MgZn_2$ 的 HRTEM 像

Fig. 5　HRTEM images of granular (a) and rod-like (b) $MgZn_2$ in Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy after heat treatment

图 6 所示为经热处理的 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 和 30 min 的 TEM 像，目的主要是为了观察 $MgZn_2$ 相在腐蚀前后的变化。如图 6(a)所示，当该时效合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 min 时部分 $MgZn_2$ 相的轮廓已模糊。这可能是由于 $MgZn_2$ 相的电位比 α(Al)基体的电位低，在 3.5%NaCl 溶液中 $MgZn_2$ 相与 α(Al)基体构成微腐蚀电池，$MgZn_2$ 相作为阳极优先溶解导致 $MgZn_2$ 的轮廓变模糊。如图 6(b)所示，浸泡 30 min 时，时效合金中部分第二相(球状或棒状 $MgZn_2$)已腐蚀脱落，第二相

脱落的位置呈白色。这可能是 $MgZn_2$ 相在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀形成的。

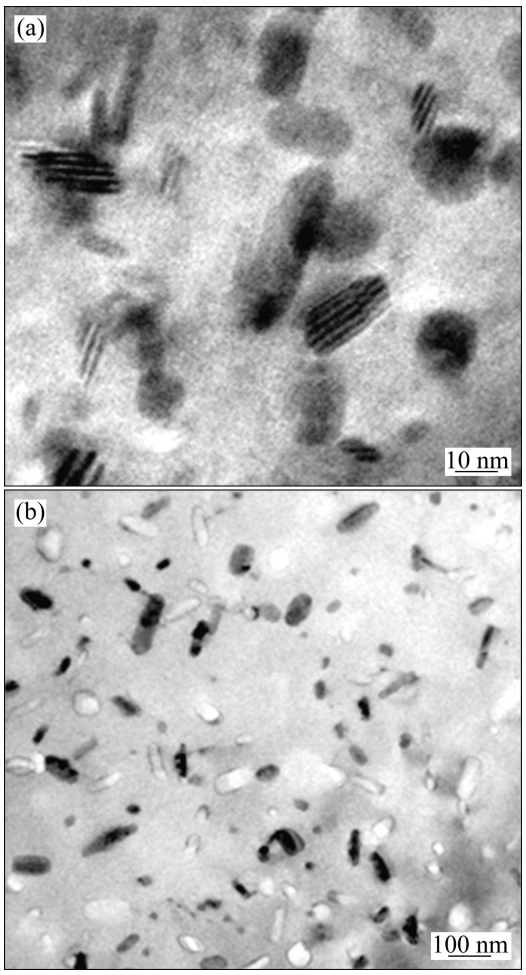

图 6 热处理后 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金在 3.5%NaCl 中浸蚀 5 和 30 min 的 TEM 像

Fig. 6 TEM images of Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy after heat treatment and immersed in 3.5% NaCl solution for 5 min (a) and 30 min (b)

图 7 所示为铸态 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 30 min 和 6 h 的 SEM 像。腐蚀 30 min 时，试样表面有大量小且浅的点蚀坑分布于合金晶界上，有的点蚀坑中的第二相已经脱落(见图 7(a))。腐蚀 6 h 时，试样表面的腐蚀坑已迅速横向扩展，形成水平尺寸远大于深度的宽浅型腐蚀区域(见图 7(b))，这说明阳极性 $MgZn_2$ 相在侵蚀性介质中优先溶解，形成点蚀。LI 等[7]和马景灵[20]也通过用热模拟机在 410 ℃加压将 $MgZn_2$ 颗粒压入两块 α(Al)中制成模拟合金，并通过腐蚀试验证明 $MgZn_2$ 颗粒为阳极相，在腐蚀时优先腐蚀脱落。$MgZn_2$ 相优先溶解后露出 α(Al)基体，引起 α(Al)基体的溶解。另一方面，$MgZn_2$ 的溶解生成 Mg^{2+}、Zn^{2+}，由于 Zn^{2+}的还原电位比 Al^{2+} 的还原电位正，Zn^{2+}通过反应($Zn^{2+} + Al \rightarrow Al^{3+} + Zn$)被还原并在蚀坑的附近沉积，破坏氧化膜使蚀坑快速横向扩展[21]。另外，由于溶解过程中蚀孔周围固溶于合金中的 Ga 与 Al 形成液态的 Ga-Al 汞齐，这些液态合金的流动性较好，对氧化膜与基体起到机械分离作用，使新鲜表面不断暴露而使合金发生横向溶解[22]。同时也使腐蚀产物不断脱落，维持点蚀坑长时间的横向活化扩展，横向腐蚀扩展速度很快，从而最终导致合金全面溶解[9]。

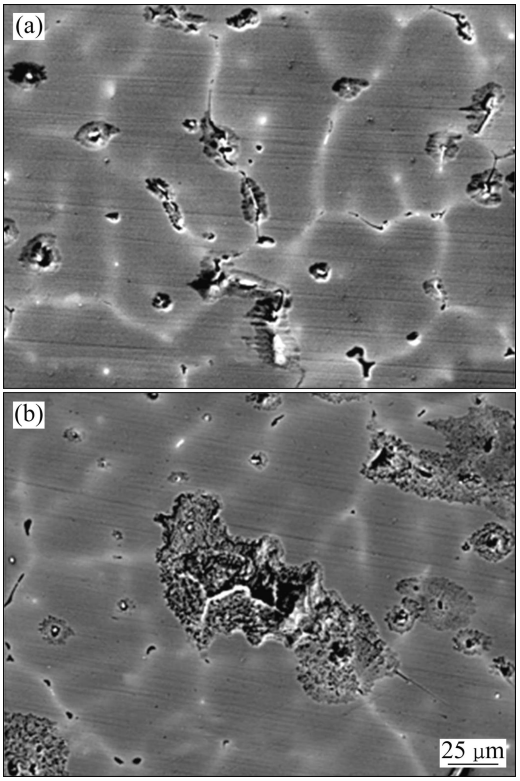

图 7 铸态 Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 合金在 3.5%NaCl 溶液中浸蚀 30 min 和 6 h 的 SEM 像

Fig. 7 SEM images of as-cast Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg alloy immersed in 3.5% NaCl solution for 30 min (a) and 6 h (b)

3 结论

1) Al-7Zn-0.1Sn-0.015Ga-2Mg 阳极合金中的第二相主要为球状和棒状的 $MgZn_2$ 相。

2) $MgZn_2$ 相的腐蚀电位较 α(Al)基体负，腐蚀电流密度较高且极化电阻较小。

3) $MgZn_2$ 相对于 α(Al)基体为阳极相，其在 3.5%NaCl 溶液中与 α(Al)基体组成腐蚀微电池，引起 $MgZn_2$ 相自身优先溶解，进而引发合金全面溶解。

REFERENCES

[1] REBOUL M C, GIMENEZ P H, RAMEAU J J. Activation mechanism for sacrificial Al-Zn-Hg anodes[J]. Material Performance, 1980, 19(5): 3539−3546.

[2] SALINAS D R, GARCIAA S G, BESSONE J B. Influence of alloying elements and microstructure on aluminum sacrificial anode performance: Case of Al-Zn[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1999, 29(9): 1063−1071.

[3] 齐公台，郭稚弧，魏伯康，林汉同. 固溶处理对 Al-Zn-In-Sn-Mg 阳极组织与电化学性能的影响[J]. 金属热处理学报, 2000, 21(4): 68−72.
QI Gong-tai, GUO Zhi-hu, WEI Bo-kang, LIN Han-tong. Effect of water-quenching on microstructure and electrochemistry performance of Al-Zn-In-Sn-Mg anode[J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2000, 21(4): 68−72.

[4] 齐公台, 郭稚弧, 张华民, 邱于兵, 张兴中. 铝合金牺牲阳极金相组织与电化学性能关系研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1997, 9(7): 231−235.
QI Gong-tai, GUO Zhi-hu, ZHANG Hua-min, QIU YU-bing, ZHANG Xing-zhong. Microstructure and electrochemical performance of aluminum alloys for sacrificial anode[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1997, 9(7): 231−235.

[5] 丁振斌, 孔小东, 朱梅五. 铝合金阳极微观组织对其性能的影响[J]. 材料保护, 2002, 35(7): 8−10.
DING Zhen-bin, KONG Xiao-dong, ZHU Mei-wu. Influence of microstructure on property of aluminum alloy sacrif icial anode[J]. Materials Protection, 2002, 35(7): 8−10.

[6] 刘　斌, 齐公台, 冉　伟, 赵婷婷. 模拟偏析相 Al_2Zn 在 3% NaCl 溶液中的电化学行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(2): 92−96.
LIU Bin, QI Gong-tai, RAN Wei, ZHAO Ting-ting. Electrochemical behavior of the simulated Al_2Zn segregation in 3% NaCl solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(2): 92−96.

[7] LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, CHEN W J, REN W D, ZHAO X S. Simulation study on function mechanism of some precipitates in localized corrosion of Al alloys[J]. Corrosion Science, 2007, 49(6): 2436−2449.

[8] BIRBILIS N, CAVANAUGH M K, BUCHHEIT R G. Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al_7Cu_2Fe particles in aluminum alloy 7075-T651[J]. Corrosion Science, 2006, 48(12): 4202−4215.

[9] HE Jun-guang, WEN Jiu-ba, LI Xu-dong. Influence of Ga and Bi on electrochemical performance of Al-Zn-Sn sacrificial anodes[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7): 1580−1586.

[10] 贺俊光, 文九巴, 李旭东, 郝庆国. Al-Zn-Sn-Ga 阳极腐蚀过程的电化学阻抗谱分析[J]. 中国有色金属学报, 2012, 35(1): 187−193.
HE Jun-guang, WEN Jiu-ba, LI Xu-dong. Electrochemical impedance spectroscopy of Al-Zn-Sn-Ga anode during corrosion process[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 35(1): 187−193.

[11] 贺俊光，文九巴，李旭东，郝庆国. 热处理对 Al-Zn-Sn-Ga-Mg 合金组织和电化学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(7): 110−115.
HE Jun-guang, WEN Jiu-ba, LI Xu-dong, HAO Qing-guo. Effect of heat treatment on microstructure and electrochemical properties of Al-Zn-Sn-Ga-Mg alloy sacrificial anode[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(7): 110−115.

[12] 董超芳, 安英辉, 李晓刚, 生　海, 肖　葵. 7A04 铝合金在海洋大气环境中初期腐蚀的电化学特性[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(2): 346−352.
DONG Chao-fang, AN Ying-hui, LI Xiao-gang, SHENG Hai, XIAO Kui. Electrochemical performance of initial corrosion of 7A04 aluminium alloy in marine atmosphere[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(2): 346−352.

[13] 林　钢. 铝合金应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 38−43.
LIN Gang. Aluminum alloy application manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 38−43.

[14] ASHOK S R, VENKATARAMANI A, PARTHIBAN G T, SRINIVASAN S, PALANISWAMY N, MANI A, RAGHAVAN M. Performance of aluminium anodes under heat treatment[J]. Corrosion on Prevention & Control, 2002, 49(2): 60−63.

[15] CLARK J B. Transmission electron microscopy study of age hardening in a Mg-5 wt.% Zn alloy[J]. Acta Metallurgica, 1965, 13(12): 1281−1289.

[16] WANG Jie, YANG Yuan-sheng, TONG Wen-hui. Effect of purification treatment on corrosion resistance of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 949−954.

[17] 李　翔, 严　彪, 董　鹏, 王宇鑫, 杜春风. Fe 基非晶合金的晶化及其在 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 156−162.
LI Xiang, YAN Biao, DONG Peng, WANG Yu-xin, DU Chun-feng. Crystallization and electrochemical corrosion behaviors of amorphous Fe-based alloys in NaCl solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 156−162.

[18] 张　琦, 李　荻, 丁学谊, 张玉梅. LC4 铝合金晶间腐蚀电化学机理[J]. 材料保护, 1996, 29(8): 6−8.
ZHANG Qi, LI Di, DING Xue-yi, ZHANG Yu-mei.

Electrochemical mechanism of intergranular corrosion of LC4 aluminum alloy[J]. Materials Protection, 1996, 29(8): 6−8.

[19] 李劲风, 郑子樵, 任文达. 第二相在铝合金局部腐蚀中的作用机制[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 81−83.
LI Jin-feng, ZHENG Zi-qiao, REN Wen-da. Function mechanism of secondary phase on localized corrosion of Al alloy[J]. Materials Review, 2005, 19(2): 81−83.

[20] 马景灵. 微合金化铝基阳极材料的组织与性能[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009: 65−66.
MA Jing-ling. Microstructure and properties of microalloyed Al anode materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009: 65−66.

[21] VENUGOPAL A, RAJA V S. A C impedance study on the activation mechanism of aluminium by indium and zinc in 3.5% NaCl medium[J]. Corrosion Science, 1997, 39(12): 2053−2065.

[22] NESTORIDI M, PLETCHER D, WOOD R J K, WANG S, JONES R L, STOKES K R, WILCOCK L. The study of aluminium anodes for high power density Al/air batteries with brine electrolytes[J]. J Power Sources, 2008, 178(1): 445−455.

(编辑 何学锋)