

稀土 Ce 对 7A04 铝合金耐腐蚀性能的影响

李涛, 曹阁, 刘毅, 赵慧颖

(内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 目的 提高 7A04 铝合金的耐腐蚀性能。方法 采用周期浸润腐蚀试验模拟海洋大气环境, 研究了不同稀土 Ce 含量的 7A04 铝合金的腐蚀行为及规律。通过金相显微镜和扫描电子显微镜, 观察了不同试样的组织和夹杂物形貌。采用失重法和电化学阻抗技术, 分析了试样的腐蚀动力学规律及电化学行为特性。结果 在 Ce 质量分数分别为 0%、0.39% 和 0.81% 的 7A04 铝合金中, 稀土 Ce 的加入量为 0.39% 时, 其晶粒最细小, 第二相与夹杂最少且分布最均匀, 合金的基体组织得到了改善。稀土 7A04 铝合金的腐蚀失重明显低于不含稀土 Ce 的 7A04 铝合金, 且锈层电阻升高, 其中含 0.39% 稀土 Ce 的 7A04 铝合金的锈层电阻最高。结论 三种 7A04 铝合金均发生了明显的局部腐蚀, 主要为点蚀。稀土 Ce 的加入, 改变了非稀土铝合金中的 T 相和 S 相, 生成了新的细小的块状金属间化合物, 改善了组织的均匀性, 提高了其腐蚀锈层电阻, 增加了锈层对基体的保护能力, 使铝合金耐海洋大气腐蚀性能提高。在三种稀土 Ce 含量的铝合金中, 含 0.39% 稀土 Ce 的 7A04 铝合金的耐蚀性最佳。

关键词: 稀土 Ce; 周期浸润腐蚀试验; 7A04 铝合金; 海洋大气腐蚀; 电化学阻抗; 腐蚀动力学

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0029-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.005

Effect of Rare Earth Ce on Corrosion Resistance of 7A04 Aluminum Alloy

LI Tao, CAO Ge, LIU Yi, ZHAO Hui-ying

(School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

ABSTRACT: The work aims to improve corrosion resistance of 7A04 aluminum alloy. Corrosion behavior and rule of 7A04 with different contents of rare earth Ce by simulating marine atmospheric environment with alternate immersion test. Micro-structure and inclusion morphology of different samples were observed by using metallographic microscope and scanning electron microscope (SEM). Corrosion dynamic law and electrochemical behavior characteristics of the samples were analyzed in the method of weight loss and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), respectively. In the 7A04 aluminum alloy Ce containing 0%, 0.39% and 0.81% Ce, grains were the smallest, second phase or inclusion was the least and evenly distributed, and matrix structure of the alloy was improved when Ce content was 0.39%. Compared to the Re-free 7A04, corrosion weight loss of the 7A04 aluminum alloy containing Ce was significantly lower, and resistance of the rust layer increased, and the alloy containing 0.39% of Ce exhibited the highest resistance of rust layer. Three kinds of 7A04 aluminum alloy are all subject to obvious local corrosion, mainly the pitting. The addition of rare earth Ce changes phase T and S in non-rare earth aluminum alloy, produces new fine massive intermetallic compounds, refines uniformity of structure, increases the resistance of corrosion rust layer, enhances protective capability of the rust layer against substrate and improves marine atmospheric corrosion resistance. Among three kinds of 7A04 aluminum alloy, the one containing 0.39% Ce exhibits the best corrosion resistance.

收稿日期: 2017-03-02; 修订日期: 2017-07-13

Received: 2017-03-02; Revised: 2017-07-13

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目 (2014MS0525, 2015MS0555)

Fund: Supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2014MS0525, 2015MS0555)

作者简介: 李涛 (1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 材料的腐蚀与防护。

Biography: LI Tao (1974—), Female, Ph. D., Professor, Research focus: corrosion and protection of material.

KEY WORDS: rare earth Ce; alternate immersion test; 7A04 aluminum alloy; marine atmospheric corrosion; electrochemical impedance; corrosion kinetics

7A04 铝合金是 Al-Mg-Zn-Cu 系合金中应用较广泛的变形铝合金,具有非常好的综合机械性能和较高的比强度,在交通、航天航空、建筑装潢、能源等国民经济重要部门得到了大量应用^[1-6]。一般环境中,7A04 铝合金具有优良的抗蚀性能,但随着使用环境的恶化,铝合金的腐蚀敏感性不断加剧,引发了极大的安全事故,给国民经济造成了大量的损失^[7-14]。本文以不同含量稀土 Ce 的 7A04 铝合金为实验材料,采用周期浸润室内加速模拟实验,研究了实验材料的海洋大气腐蚀行为规律及稀土对其的影响,对充分利用本地稀土资源优势,开发新型稀土超高强铝合金及增强其耐蚀性提供了一定的理论指导。

1 实验材料及方法

本文以西南铝业公司生产的 12 mm 厚的 7A04 铝合金板材为实验材料。实验中的 1[#]试样为未添加稀土 Ce 的 7A04 铝合金,2[#]试样和 3[#]试样分别是稀土 Ce 含量(质量分数,全文同)0.39%和 0.81%的 7A04 铝合金。大量文献表明,当稀土含量大于 0.30%时,稀土元素主要固溶在化合物中或以化合物的形式存在。稀土与合金元素结合,开始形成许多含稀土元素的新相,致使第二相的形状、尺寸发生变化^[16]。

为了测试 7A04 铝合金平时使用状态的耐腐蚀性能,对铸态合金进行轧制、固溶处理和人工时效。把铸锭加热到 480 ℃,热轧四道次,然后进行固溶处理(加热到 470 ℃保温 1 h,水淬),接着进行人工时效(140 ℃下保温 16 h,空冷)。

利用 EA-08 周期性浸润腐蚀试验箱模拟海洋大气环境(3.5%NaCl 溶液,水浴温度 35 ℃,干燥温度 45 ℃),腐蚀总时间为 1008 h。不同腐蚀周期后的失重试样用于腐蚀质量损失的计算,电化学试样用于电

化学阻抗谱测试。电化学阻抗谱测试采用 Zahner 电化学工作站。

2 结果与讨论

2.1 显微组织分析

用蔡司金相显微镜观察三种不同含量稀土 Ce 的 7A04 铝合金试样的铸态金相组织,如图 1 所示。在 7A04 铝合金的微观组织中存在大量的第二相粒子,大多为不规则圆球状或长条状。从图 1 可以看到,合金的晶粒组织随 Ce 含量的不同而明显不同。在三种试样中,1[#]试样的第二相粒子含量最多,晶粒粗大,存在较多的杂质相和组织缺陷,而且这些杂质相和缺陷连续分布在晶界上。与 1[#]试样相比,2[#]试样的铸态枝晶组织变得更细小,杂质相减少且均匀分布于合金中。这是因为在 7A04 铝合金铸锭凝固的过程中,Ce 元素聚集在固液界面前沿,引起溶质元素再次分配,成分过冷增加,分枝过程加剧,使得枝晶形状变细,细化了合金的晶粒组织^[15]。此外,这也归因于稀土元素 Ce 对晶界的净化作用。但当 Ce 的添加量为 0.81%时,晶粒细化程度反而下降,且第二相含量也比 2[#]试样更多。过量稀土 Ce 的加入粗化了枝晶组织,这是因为 Ce 的加入量过多,将在合金中首先形成大量球状稀土化合物,从而减少了稀土元素 Ce 在固/液界面上的富集,致使合金组织逐渐粗化,时效后,稀土化合物在晶界以块状难熔化合物析出,此时合金中出现的粗大共晶相在后续的热处理和热加工过程中根本无法去除。只有稀土含量合适,才会在细化晶粒的同时细化枝晶组织。因此 Ce 的添加量在 0.39%左右时,组织得到了最佳改善,此时第二相粒子较少,夹杂较少,晶粒细小^[16]。

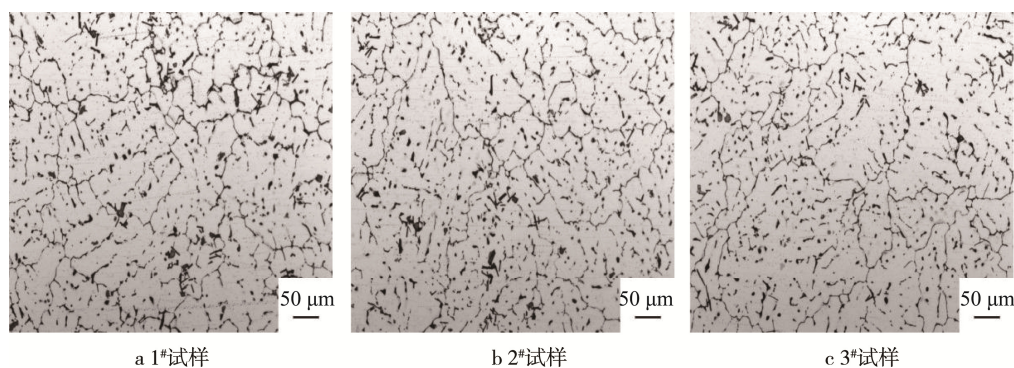


图 1 3 种铝合金试样的显微组织
Fig.1 Microstructure of 3 aluminum alloy samples

2.2 第二相分析

利用扫描电子显微镜观察 1[#]、2[#]试样的第二相粒子,并结合能谱仪对第二相粒子的元素组成进行分析。已有的研究表明,稀土在铝合金中主要以三种形式存在:固溶在基体(Al)中,偏聚在相界、晶界和枝晶界,固溶在化合物中或以化合物的形式存在。从图 2 可以看出,1[#]试样第二相的形状主要为长条形或者针形,其主要元素成分为 Al、Zn、Mg、Cu、Fe 等。结合相关文献资料分析,这些第二相成分为 η -MgZn₂、Al₇Cu₂Fe、Mg₂Si (β 相)和(Al,Cu)₇(Fe,Cu)。 η -MgZn₂相作为铝合金 7A04 的主要强化相,分布广泛。对比图 2 和图 3 可以看出,2[#]试样的第二相形状

大多数为菱形或方形,根据能谱分析可知,2[#]试样的第二相主要含有 Al、Mg、Zn、Cu、Ce 等元素,其主要的第二相可能为 η -MgZn₂、Mg₂Si (β 相)、Al₂CuMg (S 相)以及 Al₂Mg₃Zn₂ (T 相)。因为稀土 Ce 的加入会促进微小相区域由非晶态转变为晶态,加快晶体转化速率^[17]。同时,稀土元素 Ce 具有最活泼的化学性质,更容易和 7A04 铝合金里的一些杂质元素(如 Si、Fe 等)发生化学反应,生成稀土化合物并聚集在晶界上,且分布更密集。添加 0.39%稀土 Ce 时,稀土 Ce 与 7A04 合金中的其他元素开始形成含稀土的新相,同时使第二相的尺寸、形状发生变化,呈弥散分布。

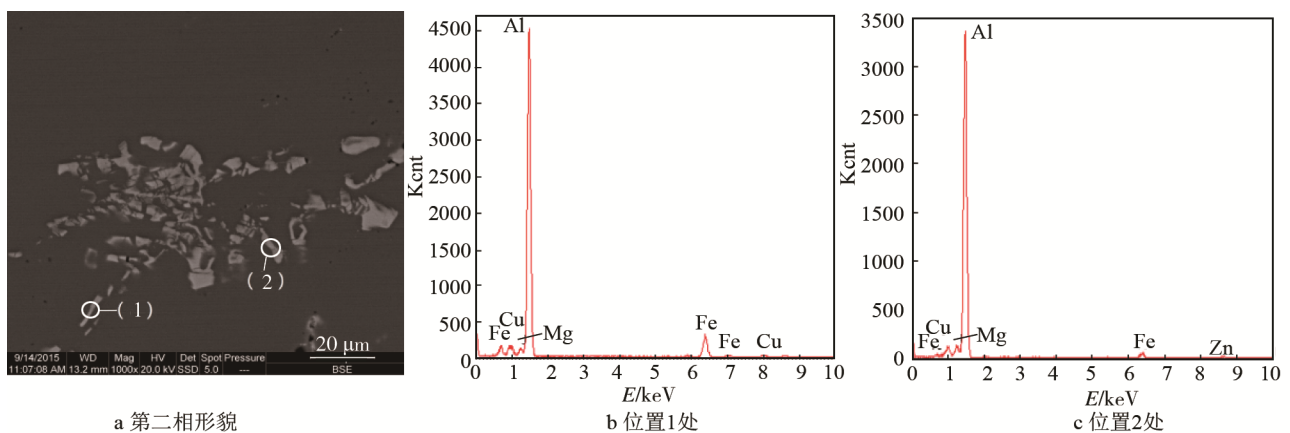


图 2 1[#]试样的第二相形貌及其对应能谱

Fig.2 Second phase morphology of 1[#] sample and corresponding energy spectrum: (a) second phase morphology; (b) position 1; (c) position 2

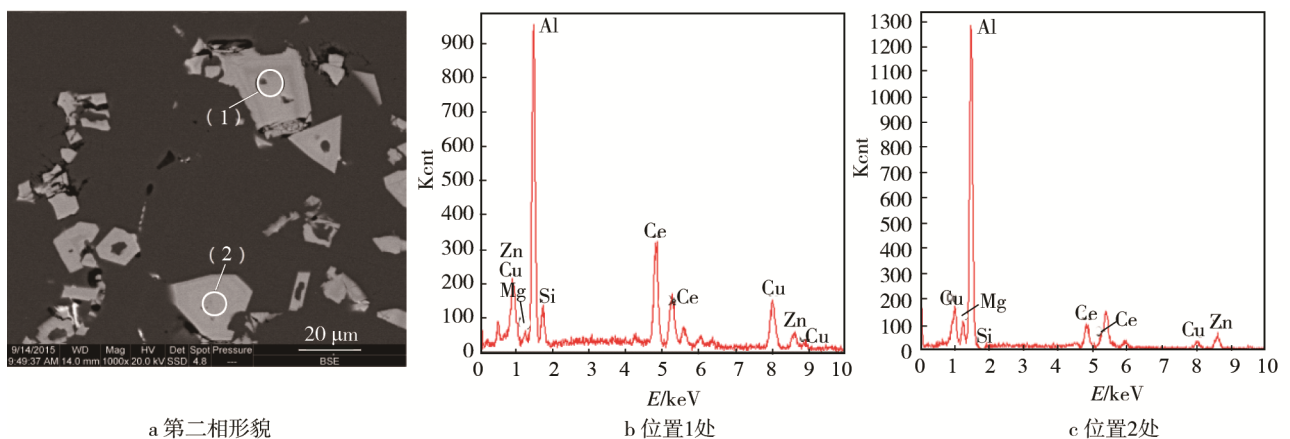


图 3 2[#]试样的第二相形貌及其对应能谱

Fig.3 Second phase morphology of 2[#] sample and corresponding energy spectrum: (a) second phase morphology; (b) position 1; (c) position 2

2.3 去除腐蚀产物后的微观形貌

7A04 铝合金在周期浸润试验 480 h 后,由图 4 可见,发生了明显的局部腐蚀,主要为点蚀。与 2[#]和 3[#]试样相比,1[#]试样的蚀孔数量多且密集,而且大

量的蚀孔相连通,个别连通处的产物出现层状剥落,形成了大而深的蚀坑,腐蚀最严重。7A04 铝合金点蚀是一种由小阳极大阴极腐蚀电池引起的阳极区高度集中的局部腐蚀。

Cl⁻浓度是影响 7A04 铝合金腐蚀行为的重要原

因之一。水解形成的 Cl^- 是吸附力很强的活性粒子,具有很强的侵蚀性,是发生点蚀的主要原因。氯离子和氧竞争吸附或由液膜中的 Cl^- 首先在铝合金表面的活性位发生吸附,这种吸附在氧化膜不完整或缺陷处增强,随后吸附离子与氧化膜发生化学反应,氧化膜减薄,裸露铝直接溶解。在上述一系列过程中, Cl^- 吸附是导致点蚀出现的重要原因。

7A04 铝合金的腐蚀与合金元素和析出的第二相有密切联系,点蚀最初从第二相颗粒附近开始,通过第二相颗粒之间或与铝合金基体形成电偶对,发生阳极溶解。在 7A04 铝合金中,第二相成分为 $\eta\text{-MgZn}_2$ 、 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 、 Mg_2Si (β 相) 和 $(\text{Al,Cu})_7(\text{Fe,Cu})$ 。其中, $\eta\text{-MgZn}_2$ 相作为铝合金 7A04 的主要强化相,在合金中广泛分布。 $\eta\text{-MgZn}_2$ 在 3.5%NaCl 溶液中的电位为 -1.05 V (vs. SCE), 相对于 Al 基体为阳极相,因此

首先溶解。 Mg_2Si 相的电位比合金基体负,一般作为阳极优先溶解。而 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 和 $(\text{Al,Cu})_7(\text{Fe,Cu})$ 一般作为阴极,导致铝基体腐蚀溶解。因此,在第二相粒子与基体之间极易形成局部电偶对,导致局部腐蚀的发生,对基体产生加速侵蚀。

由图 4 可见, 2[#]、3[#]试样的局部腐蚀面积比 1[#]试样少,大部分点蚀孔径小且深度较浅,腐蚀相对较轻微。这主要是由于一部分稀土 Ce 溶入 T 相和 S 相,生成极其细小且均匀的块状化合物 (AlCuMgCe) 和 (AlZnMg-CuCe) , 降低了点蚀敏感性。同时,稀土元素 Ce 具有较高的电化学活性和独特的物理化学性质,在模拟海洋大气腐蚀环境中,极易与 3.5%NaCl 中的 Cl^- 或者 O_2^{2-} 发生化学反应,生成致密的含稀土的氯化物或氧化物层,降低了 7A04 铝合金的晶间腐蚀和剥落腐蚀的倾向,从而提高了 7A04 铝合金的耐腐蚀性能。

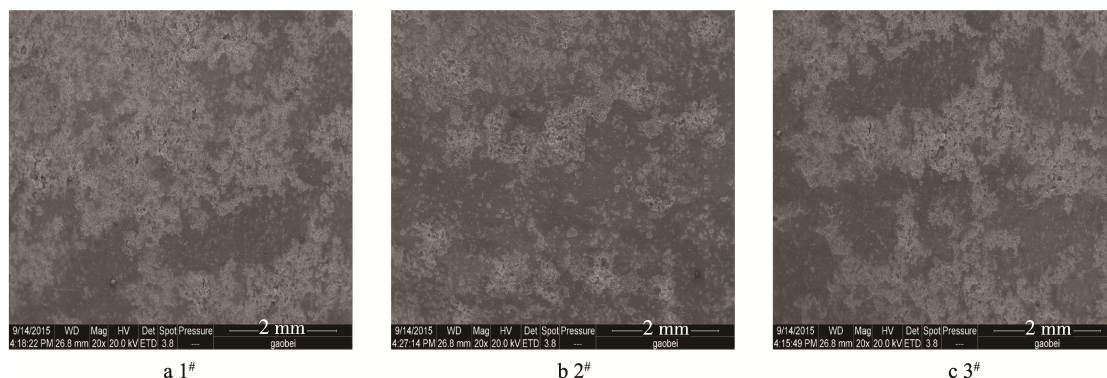


图 4 试样腐蚀 480 h 并去除腐蚀产物后的微观形貌

Fig.4 Sample microstructure after 480 h of corrosion after removal of corrosion products

2.4 腐蚀动力学分析

采用失重法计算了三种铝合金试样腐蚀不同周期后的失重。失重随时间的变化如图 5 所示。从图 5 可以看出,三种铝合金试样的失重均随时间的延长而单调增大。添加稀土 Ce 的试样在各腐蚀周期的失重始终明显低于未添加稀土的试样。三种试样中,稀土 Ce 含量为 0.39% 的 7A04 铝合金的腐蚀失重最小。

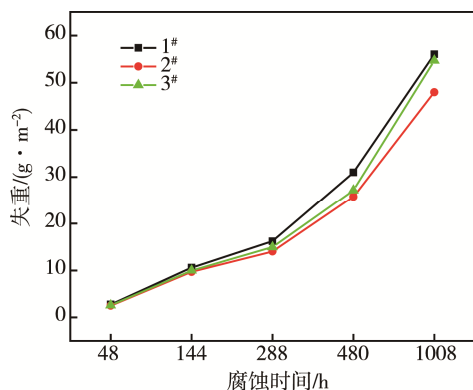


图 5 失重随腐蚀时间的变化

Fig.5 Weight loss v.s. corrosion time

失重结果表明,稀土 Ce 的加入提高了 7A04 铝合金的耐腐蚀性能。稀土 Ce 能够促进铝合金表面生成致密、连续、附着性好的钝化膜,有效阻止氯离子等侵蚀性介质向基体的运动,减缓基体表面的电化学腐蚀,从而提高 7A04 铝合金的耐腐蚀性^[18-20]。

2.5 电化学阻抗谱

7A04 铝合金在模拟海洋大气环境中腐蚀不同周期后,带锈试样的电化学阻抗谱如图 6 所示。从图 6 可以看出,腐蚀 1008 h 后, Nyquist 曲线均由高低频容抗弧组成。2[#]和 3[#]试样的容抗弧半径均比 1[#]试样的大,电荷转移电阻增大,材料的耐腐蚀性增强。本实验中,非稀土试样表面的腐蚀产物浓厚,为疏松多孔的产物膜,腐蚀介质通过产物中的孔洞和缝隙扩散,使基体表面的腐蚀加剧。另外,由于金属基体界面的腐蚀加速,出现了产物脱落现象。与非稀土试样相比,稀土铝合金试样的表面腐蚀产物相对较少且致密,与失重结果相一致,这主要与稀土提高了铝合金的组织均匀性有关。

使用 ZsimpWin 软件,采用 $R(Q(R(QR)))$ 对 7A04

铝合金在 3.5%NaCl 溶液中周浸的 EIS 进行拟合, 如图 7 所示。 Q_{dl1} 为腐蚀产物层(包含产物膜和腐蚀产物)电容, R_1 为电极表面腐蚀产物层的电阻, Q_{dl2} 和 R_1 分别是工作电极界面的双电层电容和电极表面反应的电荷转移电阻。由于腐蚀试样表面比较粗糙, 腐蚀产物疏松, 弥散性大, 因此采用常相角元件来进行数据拟合。

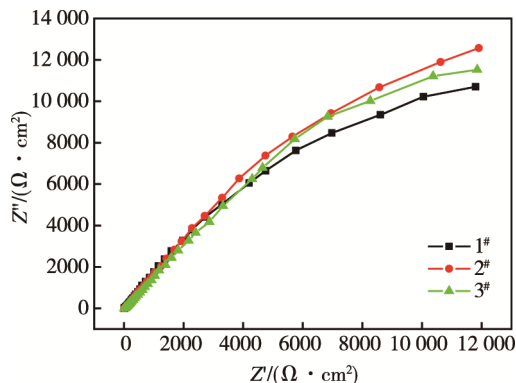


图 6 试样的电化学阻抗谱图
Fig.6 EIS image of the samples

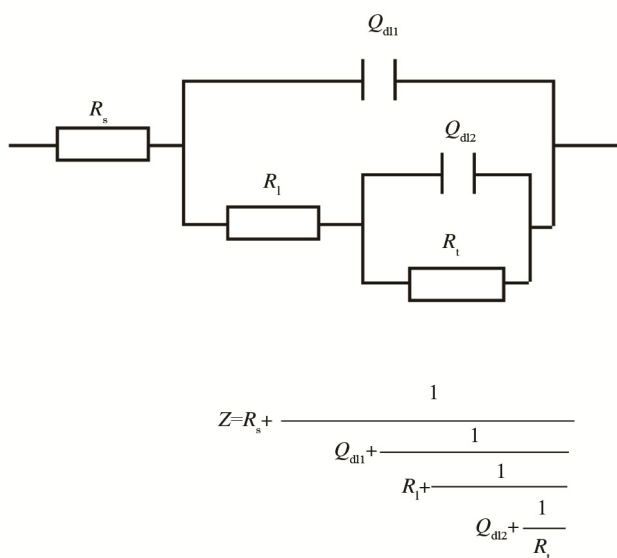


图 7 试样的等效电路及数学表达式
Fig.7 Equivalent circuit and mathematical expression of the sample

拟合电路中, 锈层电阻 R_1 的大小可以表征锈层的致密度及阻碍腐蚀介质离子透过的能力, 是评价锈层保护能力的关键参数。锈层电阻 R_1 随腐蚀时间的变化曲线如图 8 所示。对比发现, 腐蚀 1008 h 后, 2#试样和 3#试样的锈层电阻比 1#试样的分别提高了 15.70%和 3.74%。这说明稀土 Ce 元素可以使 7A04 铝合金的锈层致密化, 对基体的保护性增强。这与失重结果一致, 说明腐蚀锈层致密性的提高, 使腐蚀产物对铝合金基体的保护作用增强。

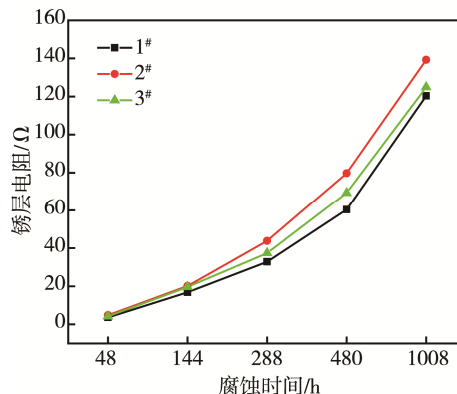


图 8 试样的锈层电阻 R_1 随时间的变化曲线
Fig.8 Variation curve of rust layer resistance R_1 of the samples with time

3 结论

1) 稀土 Ce 的加入细化了 7A04 铝合金的组织。当稀土 Ce 的加入量为 0.39%时, 稀土铝合金的晶粒最细小, 第二相与夹杂物少且分布最均匀, 合金的基体组织得到了改善。

2) 三种 7A04 铝合金均发生了明显的局部腐蚀, 主要为点蚀。稀土 Ce 的加入, 改变了非稀土铝合金中的 T 相和 S 相, 生成了新的细小的块状金属间化合物。含 0.39%稀土 Ce 的 7A04 铝合金, 大部分点蚀孔径小且深度较浅, 腐蚀相对较轻。

3) 添加稀土 Ce 的 7A04 铝合金的腐蚀失重明显降低。周期浸润腐蚀 1008 h 后, 含 0.39%稀土 Ce 和 0.81%稀土 Ce 的 7A04 铝合金的腐蚀失重与非稀土试样相比分别降低了 14.38%和 2.34%。

4) 稀土 Ce 的加入提高了 7A04 铝合金的锈层电阻。与未添加稀土的试样相比, 腐蚀 1008 h 后, 含 0.39%和 0.81%稀土 Ce 的 7A04 铝合金的锈层电阻分别提高了 15.70%和 3.74%, 耐腐蚀性得到了提高。

参考文献:

- [1] 赵勇, 薛文斌, 刘宏芳, 等. 稀土铈对铝合金 LY12CZ 微生物腐蚀行为的影响[J]. 物理化学学报, 2011, 27(11): 2618-2624.
ZHAO Yong, XUE Wen-bin, LIU Hong-fang, et al. Effect of Rare Earth Ce^{3+} on the Microbial Induced Corrosion Behavior of Aluminum Alloy LY12CZ[J]. Acta Phys Chim Sin, 2011, 27(11): 2618-2624.
- [2] 王孟云. 稀土元素在铝合金中作用的研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(3): 290-292.
WANG Meng-yun. Study on Effect of Rare Earth in Aluminum Alloys[J]. Foundry Technology, 2013, 34 (3): 290-292.
- [3] ANDREATTA F, TERRY H, WIT J H W, et al. Effect of Solution Heat Treatment on Galvanic Coupling be-

- tween Intermetallics and Matrix in AA7075-T6[J]. Corrosion Science, 2003, 45(8): 1733-1746.
- [4] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 76-80.
YANG Shou-jie, DAI Sheng-long. A Glimpse at the Development and Application of Aluminum Alloys in Aviation Industry[J]. Materials Review, 2005, 19(2): 76-80.
- [5] 姬浩. 7000 系高强铝合金的发展及其在飞机上的应用[J]. 航空科学技术, 2015(6): 75-78.
JI Hao. Development and Application of 7000 High Strength Aluminum Alloys on Airplane[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015(6): 75-78.
- [6] ROKNI M R, ZAREI-HANZAKI A, ROOSTAEI Ali A, et al. An Investigation into the Hot Deformation Characteristics of 7075 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2011, 32(4): 239-244.
- [7] 尹卓湘, 陈延超, 周红娟, 等. 稀土与铝合金中常见元素的耐腐蚀机理研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2007, 36(5): 18-32.
YIN Zhuo-xiang, CHEN Yan-chao, ZHOU Hong-juan, et al. The Study of Corrosion-resisting Mechanisms of the RE-elements and Some Common-elements in Aluminium Alloy[J]. Journal of Guizhou University of Technology(Natural Science Edition), 2007, 36(5): 18-32.
- [8] 马腾, 王振尧, 韩薇, 等. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155-161.
MA Teng, WANG Zhen-yao, HAN Wei, et al. A Review of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(3): 155-161.
- [9] GONZALEZ J A, MORCILLO M, ESCUDERO E, et al. Atmospheric Corrosion of Bare and Anodized Aluminium in a Wide Range of Environmental Conditions. Part I: Visual Observation and Gravimetric Results[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 153(2/3): 225-234.
- [10] 安百刚, 张学元. 铝和铝合金的大气腐蚀研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 11-14.
AN Bai-gang, ZHANG Xue-yuan. Research Situation of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 11-14.
- [11] FELIU S, MORCILLO M. The Prediction of Atmospheric Corrosion from Meteorological and Pollution Parameters[J]. Corrosion Science, 2013, 34(3): 403-414.
- [12] 柳东, 王浩程, 孙荣禄, 等. 铝及其合金表面改性技术的研究与发展[J]. 表面技术, 2007, 42(5): 75-77.
LIU Dong, WANG Hao-cheng, SUN Rong-lu, et al. Aluminum and Its Alloy Surface Modification Technology Research and Development[J]. Surface Technology, 2007, 42(5): 75-77.
- [13] DEEPA P, PADMALATHA R. Corrosion Behaviour of 6063 Aluminium Alloy in Acidic and in Alkaline Media[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, 5: 26-36.
- [14] 陈朝铁, 杨京, 李军旗, 等. 模拟海洋大气环境下 Cl⁻质量分数对 3003 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 116-121.
CHEN Chao-yi, YANG Jing, LI Jun-qi, et al. Effect of Chloride Ion Concentration on Corrosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 116-121.
- [15] 朱志云, 张雪辉, 陈慧玲, 等. 稀土 Ce 对 7249 铝合金晶间及剥落腐蚀行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(9): 74-78.
ZHU Zhi-yun, ZHANG Xue-hui, CHEN Hui-ling, et al. Effect of Cerium on Intergranular Corrosion and Exfoliation Corrosion Behavior of 7249 Aluminum Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(9): 74-78.
- [16] 张德恩, 卢锦德, 张晓燕, 等. 稀土对新型铸造铝合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(4): 93-96.
ZHANG De-en, LU Jin-de, ZHANG Xiao-yan, et al. Influence of RE-Ce on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Al Alloy[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(4): 93-96.
- [17] 李荣, 陈伦军, 高宏, 等. 稀土 Ce 含量与分布状态对铸造铝合金力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2013, 34(12): 1615-1616.
LI Rong, CHEN Lun-jun, GAO Hong, et al. Influence of RE Ce Content and Distribution on Mechanical Properties of Casting Aluminum Alloy[J]. Foundry Technology, 2013, 34(12): 1615-1616.
- [18] 蔡郭生, 李志龙, 陆华峰, 等. 富 Ce 混合稀土对 2A14 铝合金铸态组织和性能的影响[J]. 铸造, 2014, 63(12): 1263-1265.
CAI Guo-sheng, LI Zhi-long, LU Hua-feng, et al. Influences of Ce-rich Mixed RE on the Microstructure and Properties of as Cast 2A14 Aluminum Alloy[J]. Foundry, 2014, 63(12): 1263-1265.
- [19] 蔡厚道. 稀土元素 Nd 变质对 ZL101 铝合金的显微组织与力学性能的影响[J]. 铸造, 2015, 64(6): 499-503.
CAI Hou-dao. Effects of Nd Addition on Microstructure and Mechanical Properties of ZL101 Aluminum Alloys[J]. Foundry, 2015, 64(6): 499-503.
- [20] 钟建华, 张聚国, 刘金明, 等. 稀土对 6063 铝合金组织性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 33(5): 27-29.
ZHONG Jian-hua, ZHANG Ju-guo, LIU Jin-ming, et al. Effects of Rare Earth on Microstructure and Property of 6063 Al Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 33(5): 27-29.