

镁合金黑色微弧氧化膜 在 NaCl 溶液中腐蚀电化学演变

张立功, 文陈, 李思振, 冯立, 白晶莹, 崔庆新, 王景润

(中国空间技术研究院 北京卫星制造厂, 北京 100190)

摘要: 目的 评价镁合金黑色微弧氧化热控膜层在氯离子作用下的腐蚀演变行为。方法 在电解液中添加不同浓度的添加剂制备微弧氧化膜层, 分析不同微弧氧化膜试样在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的电化学演变过程。采用电化学极化、电化学交流阻抗表征和拟合, 结合扫描电镜等方法, 对膜层演变规律及机理进行了探讨。结果 未经微弧氧化的镁合金自腐蚀电流密度为 $17.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 自腐蚀电位为 -1.464 V ; 经微弧氧化后, 试样自腐蚀电流密度减小至 $0.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 自腐蚀电位下降至 -1.628 V 。添加剂加入后制备的微弧氧化膜相比于镁合金基体, 其耐蚀性能提高, 且随着添加剂浓度的增加, 耐蚀效果呈现先增加、后减弱的趋势, 添加剂质量浓度在 10 g/L 时制备的膜层具有最好的防腐效果。镁合金微弧氧化热控膜层在 NaCl 溶液中腐蚀过程分为三个阶段: 一是腐蚀性离子进入多孔膜层, 引起界面熔融层变化; 二是 MgO 与水分子反应造成内层膜更加致密, 阻抗有所增加; 三是腐蚀溶液接触到部分镁合金基底, 发生电化学腐蚀, 形成楔形效应, 引发裂纹, 最终导致局部腐蚀失效。结论 微弧氧化提高了膜层的耐蚀性能, 其在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的腐蚀过程可分为介质进入孔内、水合反应和局部腐蚀三个阶段。

关键词: 微弧氧化; 磷酸盐; 镁合金; NaCl; 腐蚀; 电化学

中图分类号: TG147.45 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)06-0055-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.06.009

Electrochemical Evolution of Corrosion Mechanism of Black Micro-arc Oxidation Film in NaCl Solution of Magnesium Alloys

ZHANG Li-gong, WEN Chen, LI Si-zhen, FENG Li, BAI Jing-ying, CUI Qing-xin, WANG Jing-run

(Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, 100190 Beijing, China)

ABSTRACT: **Objective** To evaluate the corrosion evolution behavior of black micro-arc oxide (MAO) film layer on magnesium alloy caused by chloride ion. **Methods** The electrochemical characteristics of the film were investigated using electrochemical polarization, electrochemical impedance spectrum (EIS) and scanning electron microscopy (SEM). **Results** The results showed that the potential and current were -1.464 V and $17.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, while those of the micro-arc oxide specimens were reduced to -1.628 V and $0.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively. The addition of additive enhanced the corrosion properties compared to magnesium alloy. With increasing concentration of the additive, the corrosion property of the micro-arc oxide film first increased and then reduced. The optimized content was 10 g/L. The corrosion process of magnesium alloy could be divided into three

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-20

Received: 2016-03-10; Revised: 2016-04-20

作者简介: 张立功 (1966—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为热控涂层技术。

Biography: ZHANG Li-gong (1966—), Male, Master, Researcher, Research focus: thermal control film.

processes. (1) Corrosive ions entered the film and caused changes of the melted interface. (2) The reaction happened between water and MgO, which led to density increase of the film. (3) Ions reached the magnesium and electrochemical corrosion occurred, forming wedge effect, which induced cracks and finally resulted in local corrosion failure. **Conclusion** The corrosion property of micro-arc oxide film was better than that of Mg alloy. The corrosion process could be divided to three stages: the entry of corrosive ions, reaction between water and MgO and local corrosion.

KEY WORDS: micro-arc oxidation; phosphate; magnesium alloy; NaCl; corrosion; electrochemistry

镁合金虽然具有轻质、机械力学性能良好等优势,但耐蚀性能一直是影响其应用的关键^[1-3],通常通过表面改性方法改善镁合金的防腐性能。微弧氧化作为镁合金表面改性最重要的一种方法,能够提高镁合金的耐蚀性、耐磨性等,被广泛应用于镁合金的处理中^[4-9]。

为满足空间高辐射和低真空等特殊环境的应用,镁合金应用于航天时往往需通过微弧氧化实现热控性能^[10-11],而在航天器制备和地面存放过程中,特别是近海发射,镁合金热控膜层必须具备一定的防腐性能,以保证热控性能不受影响。为评价微弧氧化膜层的耐海洋腐蚀性能,很多学者采用 NaCl 环境腐蚀实验^[12-15]。高峰等^[14]研究了 AZ31 镁合金在盐雾环境下的腐蚀速率,结果表明微弧氧化膜具备一定的防腐性能。Han 等^[15]通过高密度离子改性微弧氧化膜,采用电化学方法评价了改性前后膜层在 NaCl 溶液中的腐蚀行为,EIS 结果表明,改性后膜层电阻提高,耐蚀性能更好。

文中在前期热控膜层热控性能评价的基础上^[11],针对航天应用镁合金微弧氧化热控膜层所处海洋环境的特点,采用电化学极化和电化学交流阻抗谱,研究了不同添加剂浓度下微弧氧化处理后的热控膜层在 NaCl 溶液中的腐蚀电化学规律,并结合扫描电镜形貌分析对其腐蚀机理进行了探讨。

1 试验

1.1 镁合金微弧氧化膜的制备

基体材料为 AZ40M 镁合金,化学组成(以质量分数计)为:Al 3.0%~4.0%,Zn 0.20%~0.80%,Mn 0.15%~0.50%,Si≤0.10%,Fe≤0.10%,Cu≤0.05%,Be≤0.01%,其他元素≤0.30%,Mg 余量。

试样规格为 10 mm×10 mm×1 mm,清洗除油

后,放入微弧氧化电解槽中,接好电极,控制微弧氧化处理的电流、电压等参数(采用恒流模式),在不同添加剂浓度的溶液中氧化不同时间,获得不同的微弧氧化膜层,经水洗、干燥后,备用。添加剂质量浓度分别为 0、5、10、15、20 g/L,所得微弧氧化膜试样依次编号为 C_W、C₁、C₂、C₃、C₄。

1.2 测试及表征

将五种微弧氧化试样及纯镁合金样品放入 0.1 mol/L NaCl 水溶液中浸泡一定时间,然后进行动电位极化曲线和电化学阻抗谱的测试。电化学测试采用三电极体系,在普林斯顿 2273 电化学工作站上进行。所有试样采用三个平行样,试验在室温下进行,文中所有电位均相对于 SCE。

2 结果与讨论

2.1 微弧氧化热控膜层的极化行为

不同添加剂浓度下所得微弧氧化膜试样及纯镁合金样品浸泡 30 min 后的极化曲线如图 1 所示,其相应拟合参数见表 1。未经微弧氧化的镁合金具有较大的腐蚀电流密度和较正的腐蚀电位,其自腐蚀电流密度达到了 17.7 μA/cm²,腐蚀电位为 -1.464 V。经微弧氧化后,试样腐蚀电流减小至 0.09 μA/cm²,自腐蚀电位下降至 -1.628 V,极化电阻达到了 872 kΩ·cm²。这说明微弧氧化提高了膜层的耐蚀性能。加入添加剂后,试样腐蚀电流密度均有所增加,这主要是因为添加剂具有较高的电化学活性,降低了表面的抗腐蚀能力。随着添加剂浓度的增加,自腐蚀电流呈现先减少、后增加的趋势,而极化电阻呈现先增加、后减小的趋势,当添加剂质量浓度为 10 g/L 时,热控膜层的耐蚀性能最佳。

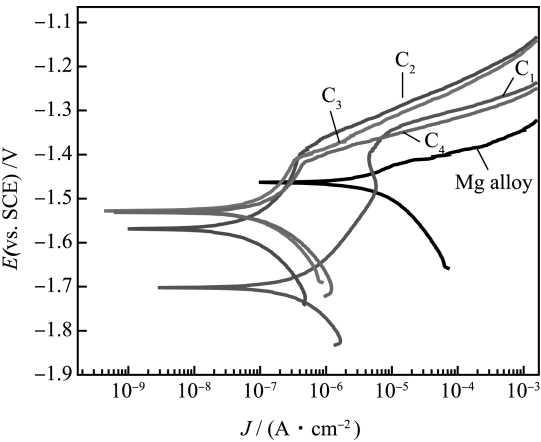
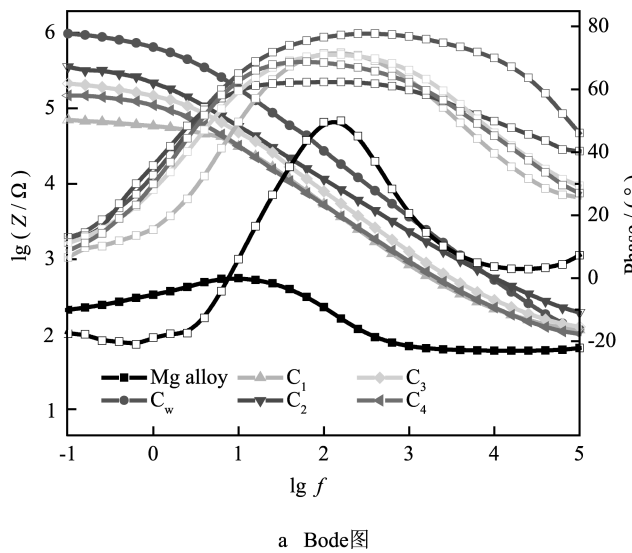


图 1 不同微弧氧化膜层在 NaCl 溶液中的动电位极化曲线
Fig.1 Polarization curves of different MAO films in 0.1 mol/L NaCl solution after 30 min

2.2 微弧氧化热控膜层的交流阻抗行为

图 2 为试样浸泡 30 min 后的电化学阻抗谱，由等效电路（图 3）拟合得到的结果见表 2。等效电

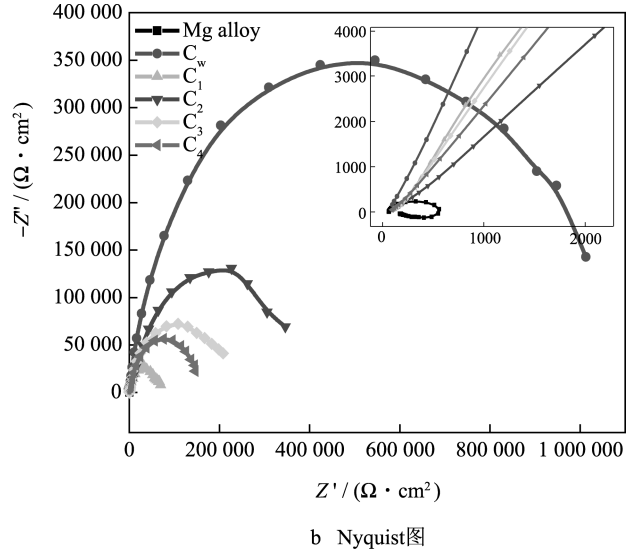


a Bode图

表 1 不同微弧氧化膜层极化曲线对应的 Tafel 拟合参数
Tab.1 Tafel fitting parameters corresponding to polarization curves of different MAO

样品	$J / (\mu A \cdot cm^{-2})$	$R_p / (\times 10^3 \Omega \cdot cm^2)$	E_{corr} / V
Mg alloy	17.7	3.98	-1.464
C _w	0.09	872	-1.628
C ₁	0.89	70.9	-1.702
C ₂	0.19	385	-1.568
C ₃	0.26	267	-1.531
C ₄	0.57	203	-1.528

路中， R_s 为溶液电阻， R_{ct} 为膜层界面腐蚀电阻， Q 为溶液与腐蚀界面的化学电容。从电化学阻抗 Bode 图中的低频区可以看到， C_w 试样阻抗最大， C_1 — C_4 中， C_1 样品的阻抗最小， C_2 样品的最大， C_3 、 C_4 样品依次降低。加入添加剂后，随添加剂用量增加，反应电阻呈现先增加、后降低的趋势，质量浓度为 10 g/L 时膜层电阻最大，耐蚀性能最好。



b Nyquist图

图 2 不同微弧氧化膜层试样在 NaCl 溶液中浸泡 30 min 后的电化学阻抗谱

Fig.2 EIS results of different MAO films in 0.1 mol/L NaCl solution after 30 min (a) Bode (b) Nyquist

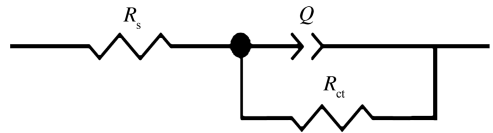


图 3 浸泡 30 min 的阻抗谱等效电路图
Fig.3 Equivalent circuit of EIS after 30 min

2.3 微弧氧化热控膜层短时浸泡电化学规律分析

将一批试样连续浸泡 12 h，每隔 1 h 取出其中

表 2 经等效电路拟合得到的相应样品各参数
Tab.2 Fitted parameters by EIS simulation of Fig.3

样品	$R_s / (\Omega \cdot cm^2)$	$R_{ct} / (\times 10^3 \Omega \cdot cm^2)$	$Q / \mu F$	n
Mg alloy	67.2	1.1	8.97	0.95
C _w	60.9	954	0.16	0.85
C ₁	109.2	69.1	1.01	0.80
C ₂	118.5	411.0	0.88	0.70
C ₃	107.4	212.2	0.77	0.79
C ₄	87.0	164.6	1.28	0.77

3 个试样进行电化学阻抗测试，测试结果由图 4 的交流阻抗模型进行拟合，得到膜层阻抗（ R_{ct} ）和化

学电容(Q)的变化曲线,如图5所示。等效电路中, R_s 为溶液电阻, R_1 为溶液的渗透电阻, Q_1 为微弧氧化膜层/溶液双电层电容, R_{ct} 为膜层界面腐蚀电阻, Q_2 为溶液与腐蚀界面的化学电容。所有样品的膜层阻抗在前1 h内迅速下降,然后缓慢上升,但最初的阻抗数值差别非常明显, C_2 样品的阻抗最大, C_1 样品的阻抗最小。 C_w 样品的化学电容在2 h后基本不发生变化,而其他样品则持续稳定地缓慢增长,不过增长速率相比2 h内慢得多,说明此时水溶液都在镁合金表面的致密层中缓慢渗透。

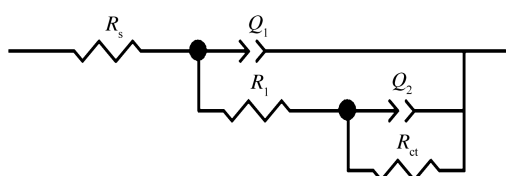
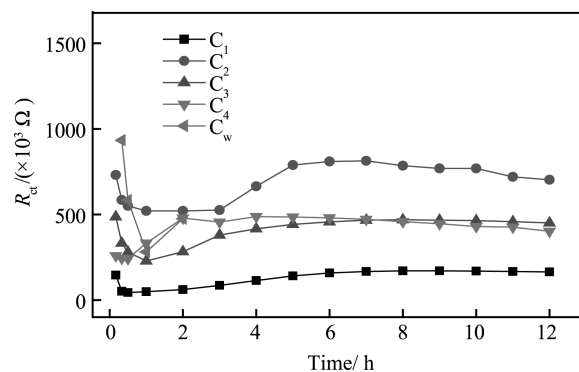


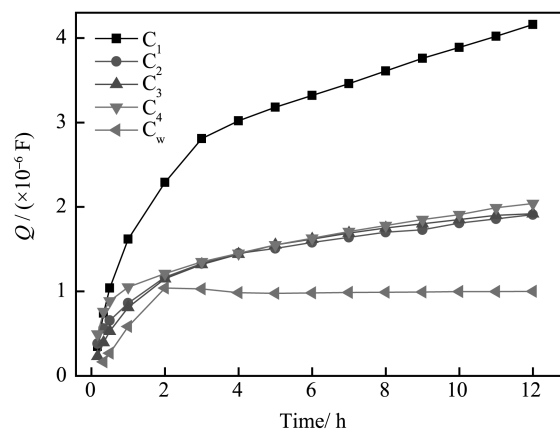
图4 浸泡后期的阻抗谱等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit of EIS at late stage of immersion

图6为不同微弧氧化膜试样浸泡12 h后的表面形貌。 C_1 样品膜层微孔比较浅,表面可明显看到一些腐蚀微孔,周围存在一些腐蚀产生的颗粒,已经开始发生明显的局部腐蚀。 C_2 样品表面基本上找不到明显腐蚀的区域; C_3 样品开始局部腐蚀的迹象,表面有些区域出现了一些小裂纹和小颗粒;

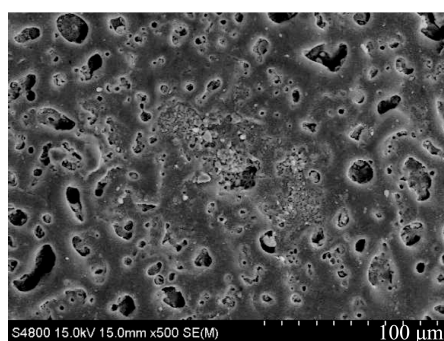


a 膜层阻抗的变化

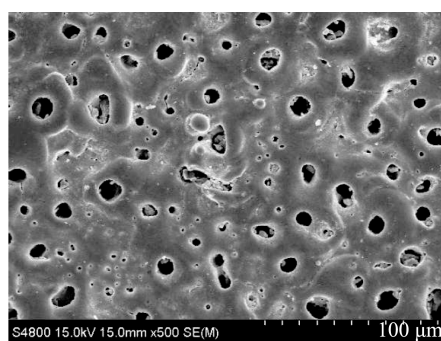


b 化学电容的变化

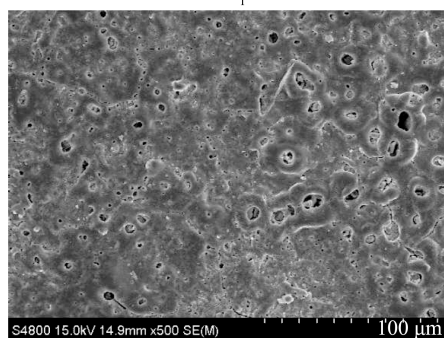
图5 试样短时浸泡时膜层阻抗和化学电容随浸泡时间的变化
Fig.5 Variation of impedance and electrochemical capacitance with immersion time of different MAO films in 0.1 mol/L NaCl solution during short-term immersion



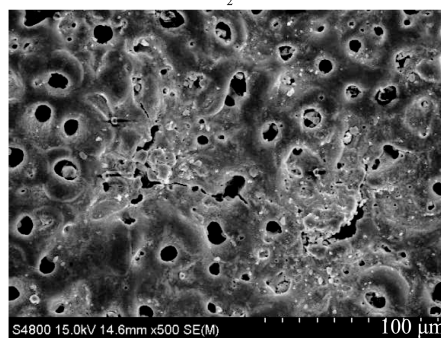
a C_1



b C_2



c C_3



d C_4

图6 不同微弧氧化黑膜浸泡12 h后的表面 SEM 形貌

Fig.6 Surface morphologies of different MAO films after 12 h immersion

C₄ 样品在某些微裂纹区域出现了明显的小颗粒, 但还没出现腐蚀微孔, 表明膜层表面开始了局部腐蚀。在含有添加剂的电解液中制得的黑色膜层存在大量的深孔, 因此耐蚀性只是略有增加。

2.4 微弧氧化热控膜层长时浸泡电化学规律分析

图 7 为不同微弧氧化黑膜浸泡 120 h 的过程中进行电化学交流阻抗测试并按图 4 拟合得到的膜层阻抗 (R_{ct}) 和化学电容 (Q) 的变化曲线。由图可知, 随着试验的进行, 在 36 h 以前, 试样电阻出现了不规律变化, 这说明不同浓度的添加剂导致试样表面的活性存在差异。添加剂质量浓度高于 15 g/L 时能够减缓微弧氧化膜试样的腐蚀速度; 添加剂质量浓度低于 15 g/L 时, 微弧氧化膜试样的反应电阻逐渐下降。试验 36 h 后, 所有试样的反应电阻呈现下降趋势; 120 h 后, 所有样品的膜层

阻抗都降为 $10^3 \Omega$ 量级, 此时膜层完全失效。

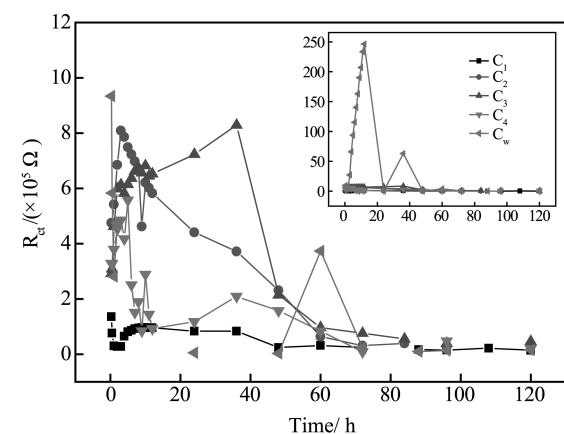
图 8 和图 9 分别为不同样品浸泡 120 h 后表面的宏观形貌和 SEM 形貌。可以发现, 所有样品都在局部出现了明显的腐蚀坑, 显示腐蚀过程为局部腐蚀。在没有腐蚀坑的区域可以看到, 膜层表面都出现了明显的裂纹, 说明腐蚀坑的形成主要是从裂纹发展起来的。当膜层出现裂纹后, 溶液中的大量腐蚀性离子从此处聚集并进入膜层内部, 加速了腐蚀过程的进行。裂纹会逐步扩大, 当几个裂纹交织在一起时, 膜层会被切断成颗粒并脱落, 膜层表面就形成腐蚀坑。

2.5 分析与讨论

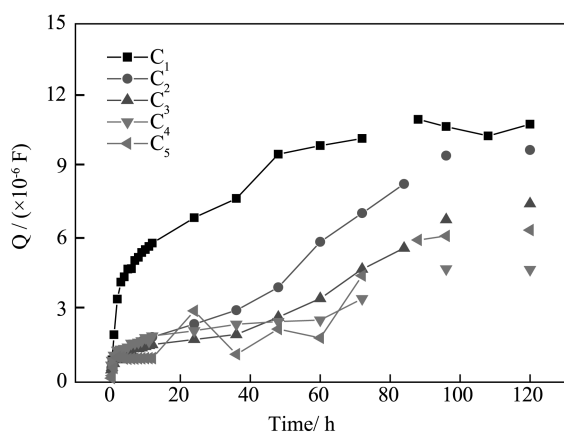
从 0.1 mol/L NaCl 溶液中短时浸泡和长时浸泡的试验结果可知, 微弧氧化提高了镁合金基体的耐蚀性能, 但是如在电解液中国加入添加剂则会降低镁合金微弧氧化膜层的耐蚀性能, 并且随着添加剂浓度的增加, 耐蚀效果呈现先增加、后减弱的趋势。从表面腐蚀形貌可以看出, 随着添加剂浓度的增加, 膜层腐蚀程度先减缓后加重, 与电化学反应电阻 (R_{ct}) 变化规律一致。这主要是因为添加剂的加入虽然促进了成膜^[16-17], 但是浓度较低时, 膜层微孔比较浅; 浓度过高时, 膜层增厚而均匀性下降, 导致耐蚀性能下降。随着浸泡时间的延长, 腐蚀介质一直缓慢地向膜层内部渗透, 膜层电容增大, 而膜层电阻则经历了先降低、再增加、后降低三个过程。

在浸泡初期, 腐蚀介质缓慢向微弧氧化膜层内部渗透, 膜层电阻随浸泡时间的延长而降低, 相应地, 化学电容则迅速增加。这主要是因为渗入的腐蚀介质相比于膜层中的氧化物具有较大的介电常数和较小的电阻值, 使得膜层阻抗下降。

随着浸泡时间的延长, 腐蚀介质到达镁合金基底表面的致密层, 与膜层的主要成分 MgO 发生水合反应, 造成体积膨胀, 使膜层的致密性进一步增加, 进而引起膜层阻抗上升, 在此阶段, 化学电容增速变慢。当腐蚀介质完全浸润氧化膜后, 水合作用不再进一步进行, 腐蚀介质进一步往内部渗透, 到达膜层与镁合金基底的界面, 在膜层薄弱处发生侵蚀, 产生可溶性的 Mg^{2+} 和腐蚀微孔, 界面处出现电化学腐蚀反应, 阻抗图谱中明显出现两个时间常数, 分别表示膜层电阻/化学电容和界面反应电阻/双电层电容, 使得膜层总体阻抗开始下降, 双



a 膜层阻抗的变化



b 化学电容的变化

图 7 试样长时浸泡时膜层阻抗和化学电容随浸泡时间的变化
Fig.7 Variation of impedance and electrochemical capacitance with immersion time of different MAO in 0.1 mol/L NaCl solution during long-term immersion

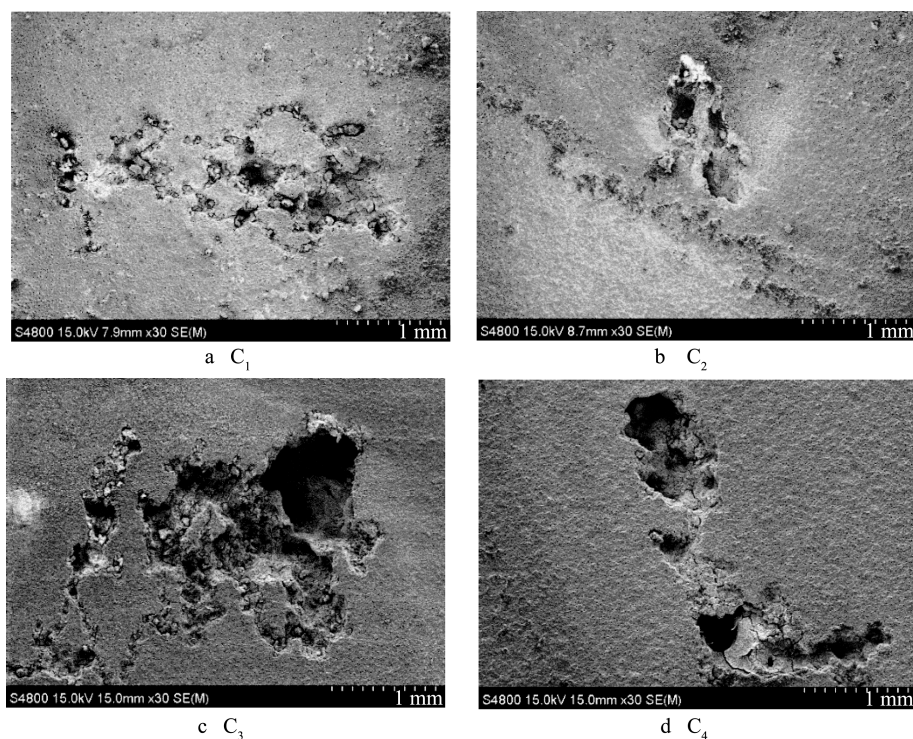


图 8 不同微弧氧化黑膜浸泡 120h 后的宏观表面形貌

Fig.8 Surface macro morphologies of different MAO films after 120h immersion

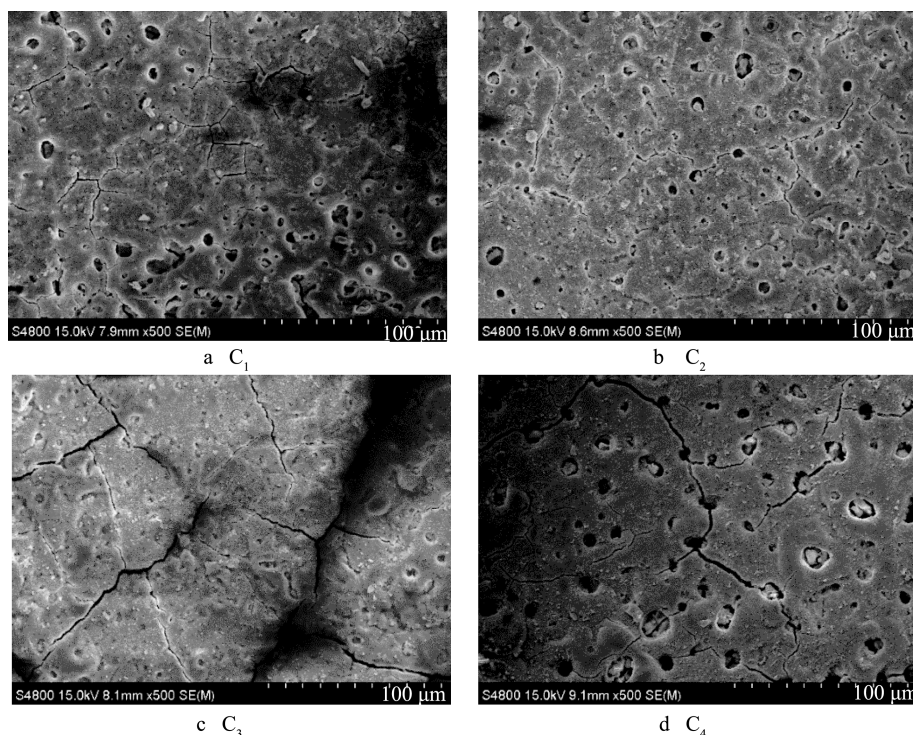


图 9 不同微弧氧化黑膜浸泡 120 h 后的表面 SEM 形貌

Fig.9 Surface micro morphologies of different MAO films after 120 h immersion

电层电容增加。随着腐蚀的缓慢进行,产生的 Mg^{2+} 以及界面处的 Mg 会和水发生反应形成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀,并破坏氧化层与基底之间的结合力。

随着浸泡时间的进一步延长,界面处被侵蚀的

区域越来越多,腐蚀产物 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 也越来越多。由于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的摩尔体积大于 MgO ,使膜层的体积进一步膨胀,进而开始出现微裂纹,加速了腐蚀介质的渗透侵蚀。当界面处的侵蚀范围变大,氧化

膜层完全被破坏, 腐蚀速率会迅速增加, 从而使膜层在局部失效。

综上, 镁合金微弧氧化热控膜层在 0.1 mol/L NaCl 溶液中的腐蚀过程如图 10 所示。镁合金微弧氧化膜的腐蚀过程主要分为三个过程: 1) 腐蚀初期, 腐蚀性离子或分子随溶液进入微弧氧化多孔膜层, 并很快到达膜层和镁合金基底界面处的致密熔融层, 然后继续向膜层内部渗透。2) 腐蚀中期, 随着时间的延长, 腐蚀溶液缓慢向内部致密层渗透, 在此过程中溶液中的水分子会和膜层中的 MgO 发生水合反应, 造成体积膨胀, 使内层膜层变得更加

致密, 阻抗反而有所增加。3) 腐蚀后期, 随着浸泡时间的继续延长, 腐蚀溶液接触到部分镁合金基底, 发生电化学腐蚀, 如镁和水反应生成氢氧化镁和氢气, 随着腐蚀反应的进行, 生成的氢氧化镁使得膜层体积膨胀, 形成楔形效应, 在腐蚀孔周边产生应力, 导致膜层出现微裂纹, 加速了腐蚀反应的发生, 一定时间后, 部分微裂纹相互联结, 将膜层切成小颗粒并在氢气的鼓泡下逐渐脱落, 露出镁合金基底, 在膜层表面形成腐蚀坑, 使膜层的保护功能在局部失效。

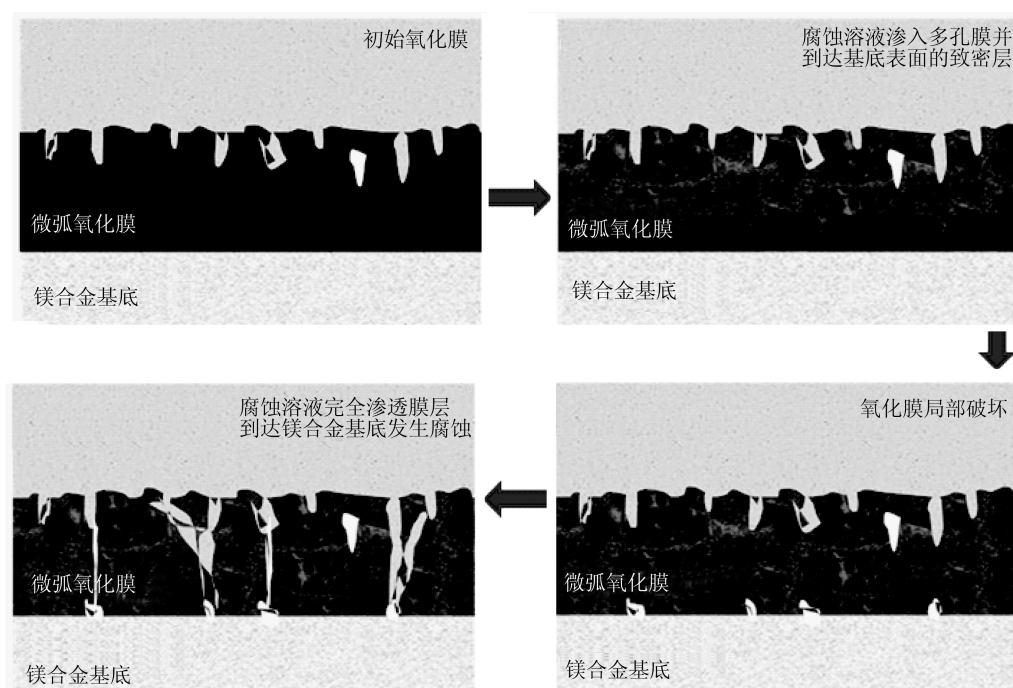


图 10 镁合金微弧氧化膜的腐蚀过程示意图

Fig.10 Corrosion process of MAO film on Mg alloy

3 结论

1) 在含添加剂的电解液中制备的微弧氧化热控膜层相比于基体具有更好的耐蚀性, 且随着添加剂浓度的增加, 膜层耐蚀效果呈现先增加、后减弱的趋势。添加剂质量浓度在 10 g/L 时, 微弧氧化热控膜层具有最好的防腐效果。

2) 未经微弧氧化的镁合金自腐蚀电流密度为 $17.7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 自腐蚀电位为 -1.464 V ; 经微弧氧化后, 试样自腐蚀电流密度减小至 $0.09 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 自腐蚀电位下降至 -1.628 V 。

3) 从电化学交流阻抗结果可知, 不同添加剂浓度引起试样表面活性存在差异。添加剂质量浓度高于 15 g/L 时, 能够减缓膜层的腐蚀速度; 而添加剂质量浓度低于 15 g/L 时, 膜层的反应电阻逐渐下降。

4) 镁合金微弧氧化热控膜层在 NaCl 溶液中的腐蚀过程分为三个阶段: (1) 腐蚀性离子进入多孔膜层, 引起界面熔融层发生变化; (2) MgO 与水分子反应, 造成内层膜更加致密, 阻抗有所增加; (3) 腐蚀溶液接触到部分镁合金基底, 发生电化学腐蚀, 形成楔形效应, 引发裂纹, 最终导致膜层局部腐蚀失效。

参考文献

- [1] CHU C L, HAN X, BAI J, et al. Surface Modification of Biomedical Magnesium Alloy Wires by Micro-arc Oxidation[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2014, 24:1058—1064.
- [2] WANG C, JIANG B L, LIU M, et al. Corrosion Characterization of Micro-arc Oxidization Composite Electrophoretic Coating on AZ31B Magnesium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 12:53—61.
- [3] WANG S Y, SI N C, XIA Y P, et al. Influence of Nano-SiC on Microstructure and Property of MAO Coating Formed on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2015, 25:1926—1934.
- [4] LU X Y, FENG X G, ZU Y. Evaluation of the Micro-arc Oxidation Treatment Effect on the Protective Performance of a Mg-rich Epoxy Coating on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270:227—235.
- [5] DONG K H, SONG Y W, SHAN D Y, et al. Corrosion Behavior of a Self-sealing Pore Micro-arc Oxidation Film on AM60 Magnesium Alloy[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 275—283.
- [6] LI Y, LU F, LI H L, et al. Corrosion Mechanism of Micro-arc Oxidation Treated Biocompatible AZ31 Magnesium Alloy in Simulated Body Fluid[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2014, 24: 516—522.
- [7] WANG C J, JIANG B L, LIU M, et al. Corrosion Characterization of Micro-arc Oxidization Composite Electrophoretic Coating on AZ31B Magnesium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 621: 53—61.
- [8] MA X, ZHU S J, WANG L G, et al. Synthesis and Properties of a Bio-composite Coating Formed on Magnesium Alloy by One-step Method of Micro-arc Oxidation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 590: 247—253.
- [9] TAZEGUL O, MUHAFFEL F, MEYDANOGLU O, et al. Wear and Corrosion Characteristics of Novel Alumina Coatings Produced by Micro Arc Oxidation on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 258: 168—173.
- [10] KABIRIAN F, KHAN A S. Anisotropic Yield Criteria in σ - τ Stress Space for Materials with Yield Asymmetry[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 67/68: 116—126.
- [11] LI S Z, BAI J Y, FENG L, et al. Research on Micro-arc Oxidation Coatings with Thermal Control on Magnesium Alloy[J]. Physics Procedia, 2013, 50: 185—190.
- [12] LI H, LU S T, QIN W, et al. Improving the Wear Properties of AZ31 Magnesium Alloy under Vacuum Low-temperature Condition by Plasma Electrolytic Oxidation Coating[J]. Acta Astronautica, 2015, 116: 126—131.
- [13] 刘向艳, 郭锋, 李鹏飞, 等. 镁合金微弧氧化陶瓷层表面化学镀镍研究[J]. 表面技术, 2010, 39(5): 8—11.
- LIU X Y, GUO F, LI P F, et al. Study on Electroless Nickel Plating on Micro-arc Oxidation Ceramics Layer of Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 8—11.
- [14] 高峰, 李鹏飞, 郭锋, 等. 镁合金微弧氧化电解液研究及耐蚀性分析[J]. 表面技术, 2007, 36(6): 42—44.
- GAO F, LI P F, GUO F, et al. Study on Electrolyte for MAO and Corrosion Resistance of Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2007, 36(6): 42—44.
- [15] HAN X G, ZHU F, ZHU X P. Electrochemical Corrosion Behavior of Modified MAO Film on Magnesium Alloy AZ31 Irradiated by High-intensity Pulsed Ion Beam[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228:S164—S170.
- [16] SHI L L, XU Y J, LI K, et al. Effects of Additives on Structure and Corrosion Resistance of Ceramic Coatings on Mg-Li Alloy by Micro-arc Oxidation[J]. Current Applied Physics, 2010, 10:719—723.
- [17] BAI A, CHEN Z J. Effect of Electrolyte Additives on Anti-corrosion Ability of Micro-arc Oxide Coating Formed on Magnesium Alloy AZ91D[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 1956—1963.