

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170329003

Fe²⁺浓度对2A12铝合金微弧氧化膜性能的影响

文 陈¹, 郝雪龙², 崔庆新¹, 白晶莹¹, 张立功¹, 李思振¹

(1. 中国空间技术研究院 北京卫星制造厂, 北京 100094; 2. 北京有色金属研究总院 国家有色金属及电子材料分析测试中心, 北京 100088)

摘 要: 为分析掺杂元素对微弧氧化膜热控性能的影响, 获得更高太阳吸收比和发射率的热控膜层, 采用磷酸盐体系、Fe²⁺盐添加剂制备了微弧氧化(Micro anodic oxidation, MAO)膜, 并研究了不同浓度Fe²⁺盐添加剂对MAO膜层热控性能的影响; 采用扫描电镜观察了MAO膜微观结构, 结合EDS、XRD, 分析了Fe²⁺浓度对MAO膜层微观形貌、膜层成分、相组成、耐盐雾腐蚀性的影响规律。结果表明: Fe²⁺进入了膜层, Fe元素含量随着添加剂中Fe²⁺浓度升高而增加, 太阳吸收比和发射率均先升后降, 且在Fe²⁺浓度为20 g/L时出现峰值0.89和0.83; 掺杂Fe²⁺进入膜层生成Fe₃O₄, 显著提高了MAO膜的热控性能和耐盐雾性能; Fe²⁺浓度在20 g/L时微弧氧化膜具有优异的热控性能(其太阳吸收比达 α_s 0.89、发射率达 ϵ_H 0.83)和耐盐雾腐蚀性能。

关键词: 微弧氧化; Fe²⁺浓度; 热控性能; 盐雾腐蚀

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)05-0067-07

Effects of Fe²⁺ Content on Properties of MAO Films on 2A12 Aluminum Alloys

WEN Chen¹, HAO Xue-long², CUI Qing-xin¹, BAI Jing-ying¹, ZHANG Li-gong¹, LI Si-Zhen¹

(1. Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094; 2. National Center of Analysis and Testing for Nonferrous Metals & Electronic Materials, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088)

Abstract: In order to obtain a high absorption and high emission thermal control film by making out the effect of doping element on thermal control properties, the micro-arc oxidation (MAO) film was prepared by using a phosphate system and Fe²⁺ salt additive. The effects of different concentrations of Fe²⁺ salt additive on the thermal control performance of MAO film was studied. The effects of Fe²⁺ concentration on the microstructure, membrane composition and salt spray corrosion resistance of MAO were investigated by XRD and EDS, respectively. The results show that Fe²⁺ enters into the film, and its content increases with the increase of Fe²⁺ concentration in the additive. The solar absorption ratio and emissivity firstly increase and then descend, and the peak appears at the Fe²⁺ concentration of 20 g/L, with the values of 0.89 and 0.83, respectively. The addition of Fe²⁺ leads to form Fe₃O₄, which significantly increases the salt spray resistance time and thermal control property. When the concentration of Fe²⁺ is 20 g/L, 2A12 micro-arc oxidation film has the best thermal control properties (α_s is 0.89 and ϵ_H is 0.83) and corrosion resistance.

Keywords: micro-arc oxidation (MAO); concentration of Fe²⁺; thermal control; salt spray corrosion

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-08-30

网络出版日期: 2017-09-11 17:07; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170911.1707.018.html>

通讯作者: 郝雪龙(1977—), 男(汉), 高级工程师, 博士; 研究方向: 材料腐蚀与防护、电化学及表面处理技术; E-mail: xlhaogrinm@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0702100)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFB0702100)

引文格式: 文陈, 郝雪龙, 崔庆新, 等. Fe²⁺浓度对2A12铝合金微弧氧化膜性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(5): 67-73.

WEN C, HAO X L, CUI Q X, et al. Effects of Fe²⁺ content on properties of MAO films on 2A12 aluminum alloys[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(5): 67-73.

0 引言

微弧氧化技术 (Micro-arc oxidation, MAO) 是直接在金属表面原位生长陶瓷膜层, 具有提高基体耐腐蚀性、耐磨性、结合力好等优点, 被广泛应用于镁、铝、钛、锌等金属及其合金表面功能膜层的制备^[1-3]。其中, 铝合金是目前航空航天应用最广泛的结构材料, 通常通过 MAO 提高铝合金的耐磨、耐蚀并改善其焊接性能, 而在航天应用中, MAO 可制备高发射率、中发射率、高吸收-发射比热控涂层及中吸收-发射比热控涂层, 同时具有较高的空间环境稳定性, 即抗真空-紫外辐照、电子辐照、真空-质子辐照、气动冲刷、耐水性及热循环等性能, 克服了传统涂层在真空状态下有水分被释放出来而发生污染的缺点, 满足了铝合金空间应用的功能需求^[4-6]。

MAO 在电解液中通过附加电流在铝合金表面形成致密的氧化膜层, 膜层质量受到电解液种类和工艺参数如电流密度、占空比、温度、时间等的影响^[7-9]。电解液种类决定了电化学反应过程, 是 MAO 成膜的关键因素之一, 针对不同类型电解液形成的 MAO 开展了广泛的研究。Rama等^[10]采用 3 g/L Na₂SiO₃ 和 1.5 g/L KOH 溶液制备了外层为 γ -Al₂O₃, 内层为 α -Al₂O₃ 的微弧氧化膜层, 内层结构具有更好的耐磨性能。Tang^[11]通过研究得到在混酸体系中, 微弧氧化膜耐磨及亲水性能随着磷酸二氢钾的浓度增加而降低。Ma^[12]通过磷酸根体系 MAO 的研究表明, 随着 (NaPO₃)₆ 的增加, AZ31 镁合金微弧氧化膜层微观结构发生改变, 膜层疏松, 导致腐蚀性能下降。龙迎春^[13]用硅酸盐-磷酸盐的复合溶液体系对 6063 铝合金进行微弧氧化, 获得颜色均匀的黑色陶瓷膜, 添加剂使 MAO 膜层黑度增加, 膜层均匀性和附着力显著提高, 粗糙度降低, 但膜层的相组成不变, 均为 Al₂O₃ 和 Al₈₆V₁₄。但是目前, 大部分研究集中在电解液体系上, 包括微弧氧化成膜过程及微观结构变化机理等, 而对添加剂的研究较少^[14-16]。

文中以磷酸盐体系为主, 添加少量不同浓度的 Fe²⁺盐制备性能更优异的 MAO 膜, 在不增加成本的情况下提高膜层性能。同时研究 Fe²⁺浓度对膜层热控性能、耐盐雾腐蚀性能的影响, 并采用扫描电镜、XRD、EDS 对不同浓度 Fe²⁺盐添加剂制备的 MAO 膜进行微观结构分析, 探讨其机理。

1 试验与方法

1.1 材料与试剂

试验材料为 2A12 铝合金, 热处理状态为 T4, 其化学成分见表 1。采用线切割将铝合金试样加工成 40 mm×40 mm×2 mm, 表面机械磨光后, 进行后续试验。

表 1 2A12 铝合金的化学成分

Table 1 Composition of 2A12 alloy (w/%)						
Element	Cu	Mn	Mg	Fe	Si	Al
Content	4.1	0.45	1.37	0.5	0.5	Bal.

1.2 试验工艺

采用 NaHCO₃、Na₂CO₃、Na₃PO₄ 碱性体系对试样进行化学除油。试样表面通过 NaOH 碱洗, 硝酸活化之后, 在 NaH₂PO₄ 为主盐、Fe²⁺盐添加剂的电解液中进行微弧氧化处理, 其 NaH₂PO₄ 浓度为 20 g/L, 添加 Mo 盐浓度为 1 g/L 以提高膜层均匀性, Fe²⁺盐浓度分别为 0、10、15、20 和 40 g/L。采用自制脉冲电源对 2A12 铝合金试样进行微弧氧化处理, 微弧氧化的电流密度为 5 A/dm², 频率为 50 Hz, 氧化时间都为 20 min, 正负向占空比 (D_1 和 D_3) 均选择为 45%, 制备好试样后进行测试表征。

1.3 测试与表征

膜层厚度采用涡流测厚仪进行测量, 随机取 5 个点进行测试, 测后取平均值; 太阳吸收比 (α_s) 和发射率 (ϵ_H) 分别采用 UV3100 太阳吸收比测试仪和 AE1 型辐射计进行测试。

采用扫描电镜 (CS3400) 对不同浓度获得的膜层微观形貌进行表征, 采用能谱 (CS3400) 对膜层成分进行分析。采用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析膜层的物相组成, 扫描范围 20°~80°, 步长 0.02°, 扫描速度 1°/min。采用中性盐雾试验对不同浓度添加剂制备的膜层的耐蚀性进行评价, 盐雾温度为 40 ℃, NaCl 浓度为 5%。

2 结果与分析

2.1 Fe²⁺浓度对 MAO 膜热控性能的影响

对不同 Fe²⁺浓度下所得微弧氧化膜的太阳吸收比和发射率进行测试, MAO 膜的发射率和太阳吸收比随 Fe²⁺浓度的变化如图 1 所示。从图 1 中可以看出: 未添加 Fe²⁺(Fe²⁺浓度为 0 g/L) 制备的膜

层的发射率最低, 此时的发射率为 0.62; 膜层的发射率随着添加剂中 Fe^{2+} 浓度的增加而增大, 当达到某一峰值时开始减小, Fe^{2+} 浓度为 10 g/L 时膜层的发射率是 0.75, 当 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 时, 发射率增大到了 0.83, 当 Fe^{2+} 浓度继续增大到 25 g/L 时, 发射率开始减小到 0.8, 这主要是因为 Fe 元素的增加促进了膜层孔径的增加和均匀性, 同时提高

了膜层的热控性能, 而随着浓度增加超过 20 g/L, 膜层表面出现了微裂纹, 导致膜层发射性能降低。

图 2 为不同 Fe^{2+} 浓度下制备的 MAO 膜的截面形貌, 从图中可以看到膜层厚度有所不同, Fe^{2+} 浓度为 0 g/L 时膜厚为 35.2 μm ; Fe^{2+} 浓度为 10 g/L 时膜厚为 44.1 μm ; Fe^{2+} 浓度为 15 g/L 时膜厚为 46.2 μm ; Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 时膜厚为 48.0 μm 。

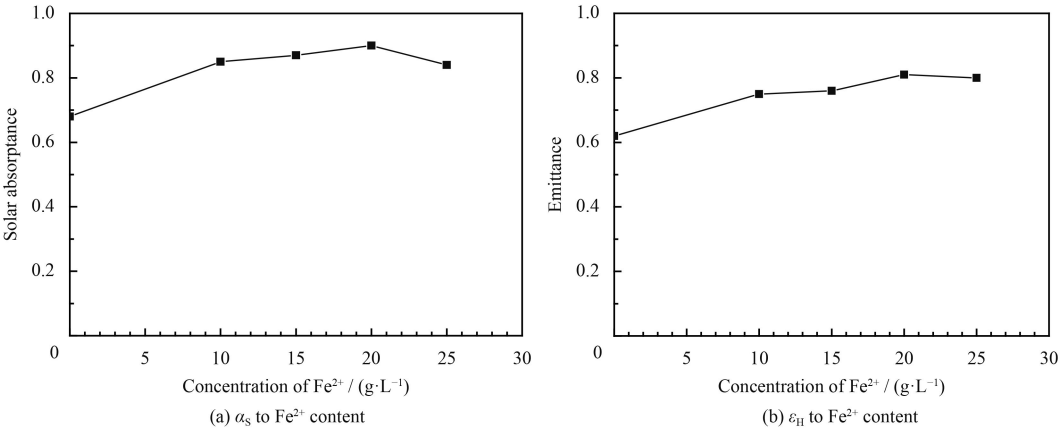


图 1 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜层太阳吸收比 α_s 和发射率 ϵ_H 的影响

Fig.1 Effects of Fe^{2+} concentration on solar absorbance (α_s) and emittance (ϵ_H) of MAO film

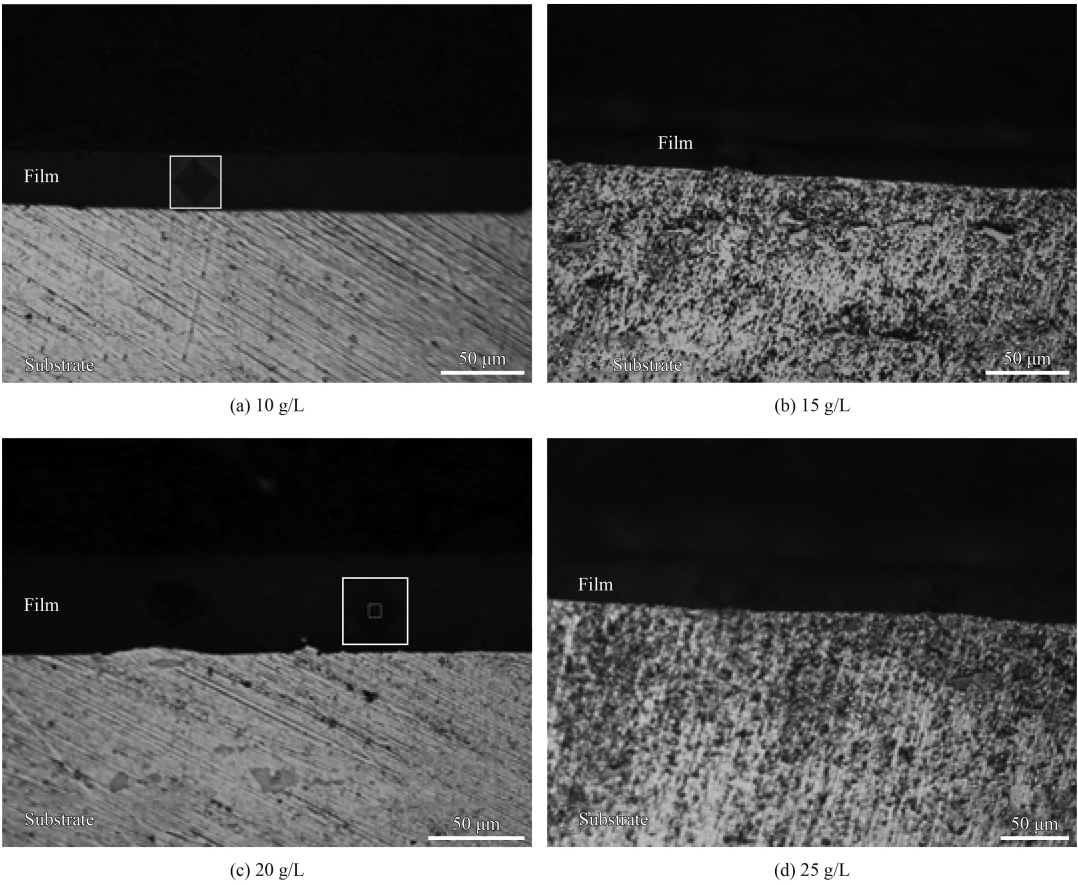


图 2 不同 Fe^{2+} 浓度下 MAO 膜层的截面形貌

Fig.2 Cross section morphologies of the film with different Fe^{2+} concentration

图 3 为膜层厚度随 Fe^{2+} 浓度的变化曲线，从图中可以看出未添加 Fe^{2+} 制备的膜层厚度较薄， Fe^{2+} 的加入对膜层生长有重要作用。膜层的厚度随着 Fe^{2+} 浓度呈现先增加后减小的趋势，在 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 之前，膜层的厚度是增加的；随后 Fe^{2+} 浓度继续增大时，膜层的厚度开始逐渐减小，当 Fe^{2+} 浓度达到 25 g/L 时所得膜层厚度为 38.6 μm 。这与太阳吸收比和发射率随 Fe^{2+} 浓度的变化具有

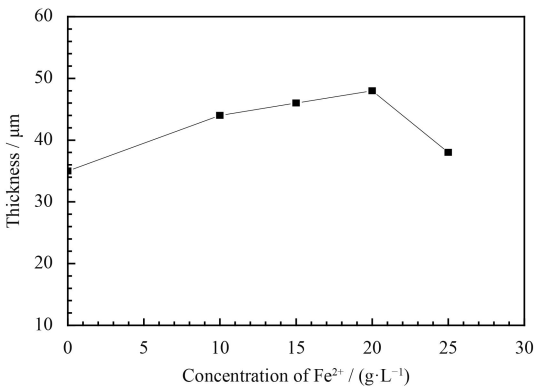


图 3 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜层厚度的影响

Fig.3 Effects of Fe^{2+} concentration on MAO film thickness

相同的趋势，由此可断定 Fe^{2+} 的浓度对太阳吸收比和发射率有重要作用。

当 Fe^{2+} 浓度小于 20 g/L 时，膜层厚度随 Fe^{2+} 浓度的增加而增加，厚度的增加有利于膜层发射率的提高，因而发射率逐渐增加，而当 Fe^{2+} 浓度增加到 25 g/L 时，膜层的厚度变小，即覆盖在铝合金基体上的热控膜层减少，因而其发射率的值也就开始减小。在整个 Fe^{2+} 浓度的变化范围之内，膜层的太阳吸收比变化不大，只是在 0.84~0.9 之间变化，太阳吸收比值在 Fe^{2+} 浓度变化的范围内，有一个先增大后减小的趋势，即随着 Fe^{2+} 浓度的增加，膜层的太阳吸收比值先增大，当 Fe^{2+} 浓度增大到 20 g/L 时，膜层的太阳吸收比值达到了最大，此时其值为 0.89，当 Fe^{2+} 浓度继续增大到 25 g/L 时，其太阳吸收比值较 20 g/L 时减小了，减小到了 0.84。这说明掺杂 Fe^{2+} 最佳浓度为 20 g/L。

2.2 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜微观形貌的影响

图 4 是不同 Fe^{2+} 浓度下获得的 MAO 膜的表面

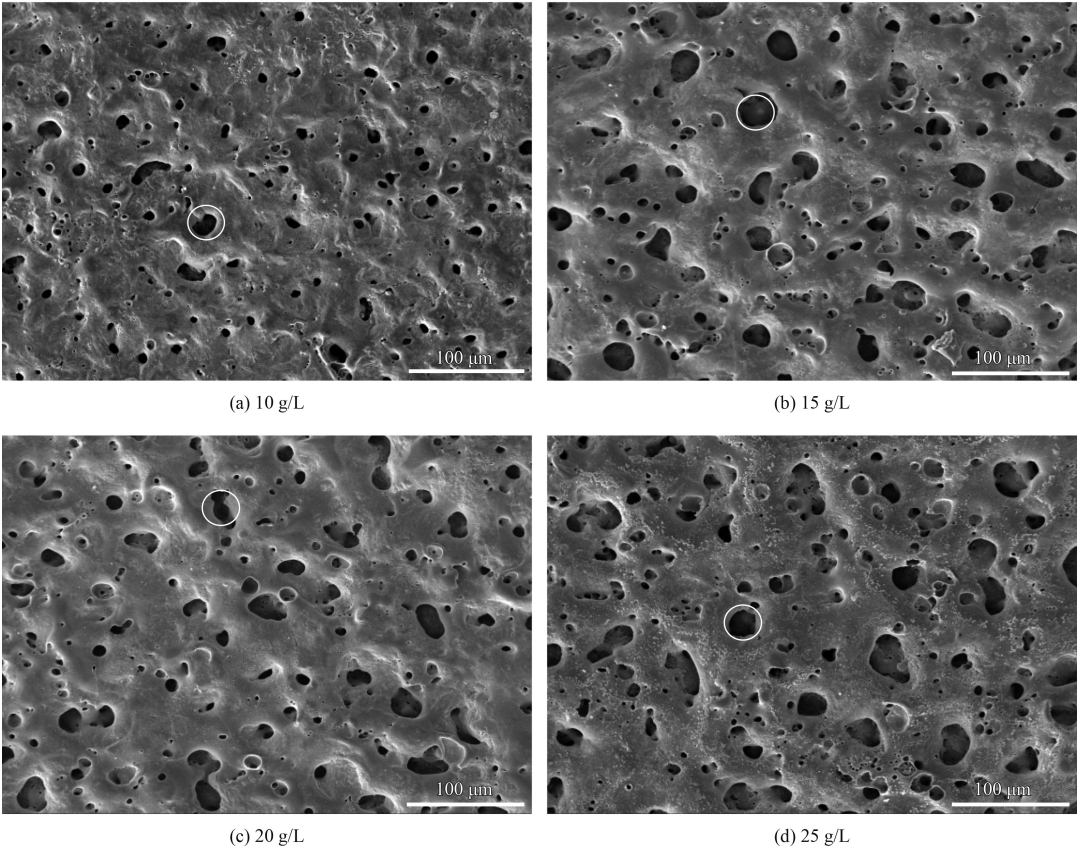


图 4 不同 Fe^{2+} 浓度下制备的 MAO 膜的表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of films prepared by different Fe^{2+} concentration

形貌。从图中可以看出：当 Fe^{2+} 浓度为 10 g/L 时所制备膜层表面疏松、并且有大量气孔，铝合金试样基体并没有完全被膜层所覆盖，受到基体低发射率的影响导致膜层表面发射率低，当 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 时所制备的膜层孔径适中、孔洞数量较少，所制备的膜层较好的覆盖了低发射率的铝合金基体；当浓度达到 30 g/L 时，膜层表面孔径增大，同时增加了许多微小气孔，导致了发射率的降低，因此，浓度 20 g/L 时，试样具有最好的发射率。

对图 4 圆圈处的黑点进行点扫描分析，均表明该处的 Fe 含量较高，可能是 Fe^{2+} 参与了氧化反应，随着浓度的增加，微孔内蓄积的 Fe 也越来越多，显示为大而均匀黑色斑点。掺杂 Fe^{2+} 较少时，黑色微孔分布不均，且大小不一，随着 Fe^{2+} 浓度的增加，黑色微孔逐步变大且均匀分布，可见掺杂 Fe^{2+} 能有效控制 MAO 膜微孔直径及分布。

2.3 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜物相的影响

采用 XRD 分析不同 Fe^{2+} 添加浓度制备的 MAO 膜的物相，如图 5 所示。XRD 图谱的分析结果表明：MAO 膜主要由 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相组成的，而添加 Fe^{2+} 制备的 MAO 膜中还出现了新相 Fe_3O_4 相。所有膜层中均检测出对应 2A12 铝合金基体的衍射峰。由此可见，在添加 Fe^{2+} 制备微弧氧化膜时， Fe^{2+} 参加了反应，被氧化并形成了比较稳定的新相 Fe_3O_4 ，而且从峰强度看， Fe_3O_4 相随着添加 Fe^{2+} 浓度的增加而增加，这也可能是导致发射率随着 Fe^{2+} 增加而增加的原因。

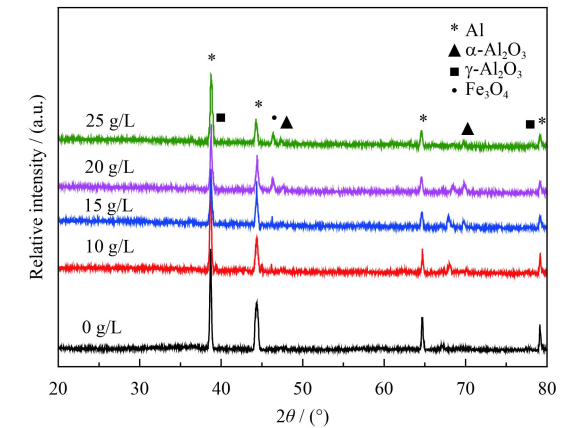


图 5 不同 Fe^{2+} 浓度下制备 MAO 膜层的 XRD 图谱
Fig.5 XRD patterns of MAO films prepared by different Fe^{2+} concentration

2.4 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜成分的影响

表 2 为是不同 Fe^{2+} 浓度下制备的 MAO 膜层表面元素含量。从表中可以看出膜层中含有大量的 P、Al、O 和 Fe 元素以及少量的 K、Na 等元素。随着电解液中 Fe^{2+} 浓度的增加，膜层中 Fe 元素的含量也逐渐增加；当 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 时，膜层中 Fe 元素的含量达到最大值^[17]，Fe 元素的存在将在可见光区产生更多的吸收，因而膜层也将具有更高的太阳吸收比。图 4(b) 所示圆圈标记微孔处点扫描 EDS 分析表明该位置的 Fe 元素含量高，结合 XRD 图可以推断此处为 Fe_3O_4 。此外， Fe_3O_4 是一种发射率很高的红外陶瓷，微弧氧化处理后试样的发射率主要取决于基体上所覆盖的陶瓷膜层的性质，Fe 元素的增加，表明膜层中含有更多的 Fe_3O_4 ，进而提高了膜层的发射率。

表 2 不同浓度 Fe^{2+} 制备膜层的元素含量

Table 2 Element contents of the film prepared by different Fe^{2+} concentration

Element	Mass fraction, w/%				
	0 g/L	10 g/L	15 g/L	20 g/L	25 g/L
O	36.44	25.83	20.40	16.69	21.85
Na	7.86	4.01	4.49	4.04	4.75
Al	24.99	16.41	11.03	11.33	10.92
P	27.23	26.12	21.42	25.47	19.95
K	03.48	01.39	01.95	01.63	02.21
Fe	0	26.24	40.71	40.84	40.32

由此可见，当 Fe^{2+} 浓度在小于 20 g/L 时，电解液中 Fe^{2+} 浓度的增加有利于膜层中 Fe 元素含量的增加，从而有利于膜层对光的吸收，因而膜层的太阳吸收比值在电解液中 Fe^{2+} 浓度在 20 g/L 之前随其浓度的增加而增加；而当 Fe^{2+} 浓度达到 25 g/L 时，膜层表面有严重的击穿现象而变得不均匀，且在膜层表面出现了颗粒状物质，影响了太阳吸收比，其太阳吸收比开始降低，降低到了 0.84。因此，2A12 铝合金表面微弧氧化制备高发射率膜层 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L。

2.5 Fe^{2+} 盐浓度对膜层耐盐雾腐蚀性的影响

对不同 Fe^{2+} 盐浓度添加剂制备的膜层样品进行中性盐雾试验，记录样品表面出现腐蚀的试验时间，以评价样品的耐中性盐雾腐蚀性能。不同添加剂制备的膜层的耐蚀性不同，未添加 Fe^{2+} 盐制备的样品中性盐雾腐蚀 12 h 后就出现了腐蚀；

Fe^{2+} 盐浓度为 10 g/L 制备的膜层在中性盐雾腐蚀 48 h 后出现腐蚀; Fe^{2+} 盐浓度为 15 g/L 的情况, 膜层在中性盐雾腐蚀 96 h 后出现腐蚀; Fe^{2+} 盐浓度为 20 g/L 时, 膜层在中性盐雾腐蚀 144 h 后出现腐蚀; Fe^{2+} 盐浓度为 40 g/L 时, 膜层在中性盐雾腐蚀 120 h 后出现腐蚀。可见, 膜层耐中性盐雾腐蚀时间与 Fe^{2+} 盐添加剂的浓度成正比; 当 Fe^{2+} 盐浓度为 20 g/L 时达到峰值 (144 h); 随后, 耐中性盐雾腐蚀时间随 Fe^{2+} 盐添加剂浓度的升高而呈现下降趋势, 如图 6 所示。结合膜层形貌、成分及物相分析可以推断, 添加 Fe^{2+} 盐浓度越高, 由 Fe^{2+} 转变成稳定的 Fe_3O_4 的量也就越多, Fe_3O_4 具有较强的渗透性, 容易吸附在微弧氧化膜的微孔中, 填充微孔进而提高膜层的耐蚀性。当 Fe^{2+} 盐浓度为 20 g/L 时膜层的耐蚀性最好。

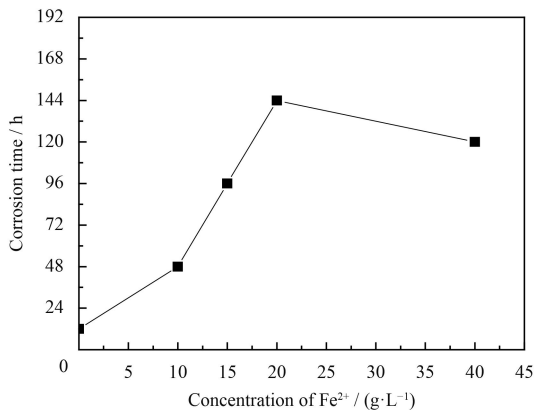


图 6 Fe^{2+} 浓度对 MAO 膜层耐蚀性的影响

Fig.6 Effects of Fe^{2+} concentration on corrosion resistance of MAO film

3 结 论

(1) 掺杂 Fe^{2+} 进入 MAO 膜层, 且膜层厚度随 Fe^{2+} 浓度的增加而增加; 掺杂 Fe^{2+} 提高 MAO 膜热控性能; Fe^{2+} 掺杂最佳浓度 20 g/L, 此时 MAO 膜获得最佳太阳吸收比 0.89 和最佳发射率 0.83。

(2) 形貌分析表明掺杂 Fe^{2+} 能有效控制 MAO 膜微孔直径及分布; XRD 分析表明掺杂 Fe^{2+} 进入了 MAO 膜层生成 Fe_3O_4 , 膜层中 Fe 元素含量随掺杂 Fe^{2+} 浓度的升高而增加, 在 Fe^{2+} 浓度为 20 g/L 时达峰值。

(3) 添加的 Fe^{2+} 盐生成 Fe_3O_4 , 能显著提高膜层的耐盐雾腐蚀性。膜层耐中性盐雾腐蚀时间随 Fe^{2+} 盐浓度的增加而增加, Fe^{2+} 盐浓度为 20 g/L 时达峰值, 随后降低。

参考文献

- [1] EMMANUEL R, DELPHINE V R, KHADOUDJ G. Electrochemical behavior of zinc in KOH media at high voltage: Micro-arc oxidation of zinc[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2015, 754: 125-132.
- [2] 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.
- [3] LEE J, YOUN J, KIM Y, et al. Photocatalytic characteristics of boron and nitrogen doped titania film synthesized by micro-arc oxidation[J]. Ceramics International, 2015, 41(9): 11899-11907.
- [4] KHANNA R, KOKUBO T, MATSUSHITA T, et al. Novel artificial hip joint: A layer of alumina on Ti-6Al-4V alloy formed by micro-arc oxidation[J]. Materials Science and Engineering C, 2015, 55: 393-400.
- [5] 龚沛, 曹学军, 宁韶奇. 不同环境对 AZ61 镁合金大气腐蚀的影响[J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 123-128.
GONG P, CAO X J, NING S Q. Influence of different environments on atmospheric corrosion of AZ61 magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 123-128 (in Chinese).
- [6] YANG Y, ZHOU L L. Improving corrosion resistance of friction stir welding joint of 7075 Aluminum alloy by micro-arc oxidation[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2014, 30(12): 1251-1254.
- [7] 顾艳红, 蔡晓君, 崔泽琴, 等. 电压对 AZ31 镁合金微弧氧化涂层微观结构及腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2012, 25(6): 21-28.
GU Y H, CAI X J, CUI Z Q, et al. Effects of voltage on the microstructure and corrosion performance of microarc oxidation coated AZ31 magnesium alloys[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(6): 21-28 (in Chinese).
- [8] KONG D J, LIU H, WANG J C. Effects of micro arc oxidation on fatigue limits and fracture morphologies of 7475 high strength aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 650: 393-398.
- [9] YUREKTURK Y, MUHAFFEL FAIZ, BAYDOGAN MURAT. Characterization of micro arc oxidized 6082 aluminum alloy in a electrolyte containing carbon[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 269(PR7): 83-90.
- [10] RAMA K L, GUPTA P S, SUNDARARAJAN G. The influence of phase gradient within the micro arc oxidation(MAO) coatings on mechanical and tribological behaviors[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 269: 54-63.
- [11] TANG W X, YAN J K, YANG G, et al. Effect of electrolytic solution concentrations on surface hydrophilicity of micro-arc oxidation ceramic film based on Ti6Al4V titanium

- alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 2883-2888.
- [12] MA H J, LI D L, LIU C, et al. An investigation of $(\text{NaPO}_3)_6$ effects and mechanisms during micro-arc oxidation of AZ31 magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 266: 151-159.
- [13] 龙迎春, 李文芳, 张果戈, 等. 添加剂 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$ 对 6063 铝合金微弧氧化黑色陶瓷膜结构与性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(5): 388-392.
- LONG Y C, LI W F, ZHANG G G, et al. Influence of additive on preparation of black ceramic coating on aluminum alloy by micro-arc oxidation method[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(5): 388-392 (in Chinese).
- [14] 陈显明, 罗承萍, 刘江文, 等. 镁合金微弧氧化膜层形成过程探讨[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 14-19.
- CHEN X M, LUO C P, LIU J W, et al. Discussion of growth process of micro-arc oxidation film on magnesium alloys[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 14-19 (in Chinese).
- [15] 陈显明, 罗承萍, 刘江文. 镁合金微弧氧化膜层结构分析[J]. 中国表面工程, 2009, 22(5): 45-49.
- CHEN X M, LUO C P, LIU J W, et al. Structure analysis of micro-arc oxidation on magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(5): 45-49 (in Chinese).
- [16] 王淑艳, 夏永平, 陆正萍. 电解液组分对 AZ9D 镁合金微弧氧化膜层耐蚀性的影响[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 38-44.
- WANG S Y, XIA Y P, LU Z P. Effects of constituents of electrolyte on the corrosion resistance of the coating fabricated on AZ91D magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(5): 38-44 (in Chinese).
- [17] 吴晓宏, 王小东, 王锐. 硫酸亚铁浓度对微弧氧化膜光学性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(3): 80-84.
- WU X H, WANG X D, WANG R. Effect of FeSO_4 concentration on the optical property of ceramic coatings by micro-arc oxidation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(3): 80-84.

(责任编辑: 黄艳斐)