

7475 铝合金阳极氧化膜表面-界面组织与特征

孔德军, 王进春, 刘 浩

(常州大学 机械工程学院, 常州 213016)

摘 要: 利用阳极氧化法在 7475 铝合金表面制备一层氧化膜。通过 SEM、EDS、XRD 等手段分析其表面-界面形貌、化学元素组成和物相, 对其表面和结合界面化学元素进行面扫描和线扫描分析, 并对氧化膜界面结合形式进行表征。结果表明: 阳极氧化膜主要是由 Al 和 O 元素组成, 还含有板材中所不具备的 C、K 和 S 元素, 主要来源于阳极氧化的电解液; 生成的氧化膜为稳相 α -Al₂O₃ 和亚稳相 γ -Al₂O₃, 其中以 α -Al₂O₃ 为主; Al 和 O 原子在氧化膜结合界面形成富集层, 其界面为化合物型+扩散型形式。

关键词: 7475 铝合金; 阳极氧化膜; 表面; 界面

中图分类号: TQ153.6; S781.61

文献标志码: A

Surface-interface structures and characteristics of anodic oxidation film on 7475 aluminium alloy

KONG De-jun, WANG Jin-chun, LIU Hao

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: The layer of oxide film was prepared on the surface of 7475 aluminum alloy by anodic oxidation method. The surface-interface morphologies, chemical element compositions and phases were analyzed by SEM, EDS and XRD, respectively, and the chemical elements of the surface and bonding interface were analyzed by plane scan and line scan, respectively, and the interface binding of oxide film was characterized. The results show that anodic oxide film is made up of Al and O elements and C, K and S elements from the anodic oxidation electrolyte of anodic oxidation film. The produced oxide film is composed of stationary phase α -Al₂O₃ and metastable phase γ -Al₂O₃, mainly includes α -Al₂O₃. The hierarchical enrichment phenomenon of Al and O atoms in the oxide film is produced after anodic oxidation, the bonding form of compound type + diffusion type forms at the interface.

Key words: 7475 aluminium alloy; anodic oxidation film; surface; interface

7475 铝合金是 Al-Zn-Mg-Cu 系一种新型的热处理强化铝合金, 由于其提高了铝合金的元素纯度, 限制 Fe、Si 等杂质含量, 使得 7475 铝合金的断裂韧度比 7045 铝合金得到了提高, 具有优异的综合性能。7475 铝合金主要用于制造高强度、中等疲劳强度和高断裂韧度的结构件, 如机翼蒙皮、机身和隔框等, 可以提高飞机的安全可靠性和使用寿命^[1]。为了进一步提高铝合金耐磨性、耐蚀性和表面硬度, 一般需要对铝合金表面进行改性处理, 主要方法有溶胶-凝胶法、

稀土转化膜、激光熔覆和等离子体微弧氧化等^[2-5]。其中阳极氧化是指在适当的电解液中, 以金属作为阳极, 在外加电流的作用下, 使其表面生成一层致密氧化膜的方法。铝合金表面制备一层 Al₂O₃ 氧化膜, 使其具有较强的结合力, 表面硬度得到提高, 能达到改善耐磨性能的目的^[6]。阳极氧化技术从 20 世纪 20 年代开始应用于 Al、Mg、Ti 等金属的表面改性处理。根据酸性电解液的不同, 又可分为硫酸阳极氧化法、铬酸阳极氧化法、草酸阳极氧化法和混合酸阳极氧化法等。

基金项目: 中国学位与研究生教育学会研究课题(C1-2013Y07-051)

收稿日期: 2013-08-27; **修订日期:** 2013-11-04

通信作者: 孔德军, 副教授, 博士; 电话: 0519-83290205; E-mail: kong-dejun@163.com

而其中典型的方法主要是硫酸阳极氧化,1929年硫酸阳极氧化的出现代表了铝及其合金阳极氧化的兴起。在硫酸阳极氧化中,一般以铝工件为阳极,以 Pb 或 Al 作阴极。硫酸阳极氧化存在着氧化膜厚度小、显微硬度低、耐蚀性和耐磨性差等问题^[7-8]。近几十年来,研究人员一直致力于如何综合地提高膜层厚度、显微硬度、耐蚀性、耐磨性等研究^[9]。本文作者采用硫酸阳极氧化法在 7475 铝合金表面制备了一层氧化膜,通过 SEM、EDS、XRD 等分析其表面-界面形貌、化学元素组成和物相,并用面扫描和线扫描对氧化膜结合界面进行了表征。

1 实验

试验材料为 7475 铝合金板材,化学成分(质量分数,%)如下: Si $\leq$ 0.10, Fe $\leq$ 0.12, Cu 1.2~1.9, Mn $\leq$ 0.06, Mg 1.9~2.6, Cr 0.18~0.25, Ti $\leq$ 0.06, Zn 5.2~6.2, 余量为 Al。阳极氧化工艺:去油→去除自然氧化膜→化学抛光→水洗→阳极氧化→热封闭。阳极氧化膜制备工艺参数: H₂SO₄ 浓度为(180 $\pm$ 2) g/L; Al³⁺浓度为 5~10 g/L; 温度为(20 $\pm$ 0.5) °C; 电流密度为(1.5 $\pm$ 0.1) A/dm², 搅拌方式:压缩空气,时间:45 min, 即得试验所需要的阳极氧化膜。用 JSUPRA55 型场发射扫描电镜观察表面-界面形貌,并用其配置的能谱仪对原始状态和阳极氧化后试样进行面扫描和线扫描,然后用 D/max2500 PC 型 X 射线衍射仪对阳极氧化前后表面物相进行分析。

2 结果与分析

2.1 表面形貌

原始状态铝合金表面存在自然氧化膜^[10],如图 1(a)所示,表面平整,没有明显的凹凸起伏。阳极氧化后表面存在微孔和龟裂状裂纹,如图 1(b)所示,这是在沸水封闭时形成的^[11]。阳极氧化膜在沸水封闭过程中,多孔层内发生较好的水解,产生 Al(OH)₃ 胶体从孔中外逸,与氧化膜表面产生的胶体连成整体。干燥后胶体不断失水,导致体积发生收缩,这是形成龟裂状裂纹的原因。阳极氧化实质就是水的电解,即电解液通电后在电流作用下发生水解,在阴极上产生氢气。带负电的阴离子向阳极移动,在阳极产生电子,一部分新生 O 与阳极 Al 反应,生成氧化铝膜。同时, H₂SO₄ 对 Al 和生成的氧化膜进行化学溶解,只有当氧化膜

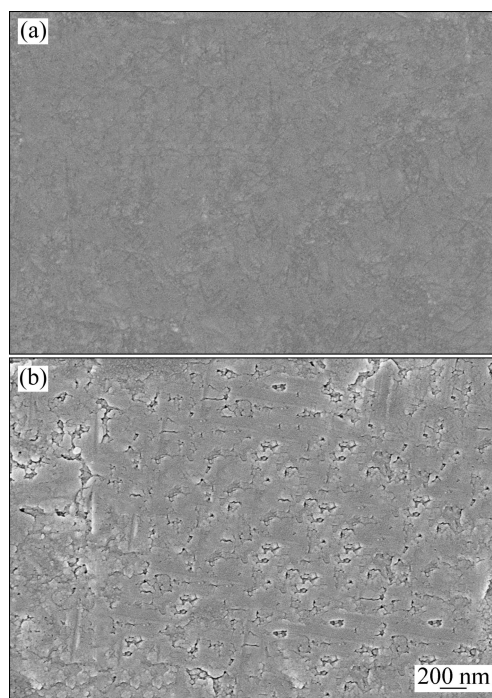


图1 阳极氧化后铝合金表面形貌

Fig. 1 Surface morphologies of aluminum alloy after anodic oxidation: (a) Original state; (b) After anodic oxidation

的生成速度大于化学溶解速度时,才能形成氧化膜,且保持一定的厚度。

2.2 EDS 分析

原始状态铝合金表面 EDS 分析结果如图 2(a)所示, Al 原子的峰线很强,说明 Al 原子是铝合金的主要组成成分。同时 EDS 还显示了 O 原子的能谱线,这说明原始状态表面也含有 O 原子,这是在空气中铝合金自然氧化的缘故。其表面化学成分如下: Al 51.57、O 21.10、C 23.79、Mg 2.70、Si 0.46、Ca 0.39(质量分数, %); Al 35.74、O 24.65、C 37.04、Mg 2.07、Si 0.30、Ca 0.19(摩尔分数, %)。阳极氧化后表面 EDS 分析结果如图 2(b)所示, Al 和 O 原子的峰线较强,说明 Al 和 O 原子是氧化膜的主要组成成分。其化学成分: Al 28.80、O 56.62、C 11.08、Si 0.18、S 3.15、K 0.17(质量分数, %); Al 18.93、O 62.77、C 16.36、Si 0.11、S 1.74、K 0.08(摩尔分数, %)。氧化膜中 O 和 Al 原子的质量分数之和为 85.42%, 这表明氧化膜是以 O 和 Al 为主要组成成分。阳极氧化膜表面的 EDS 分析未发现 Cu 原子, 这可能是在抛光过程中铝合金表面 Cu 原子被化学溶解的缘故^[12]。此外, 阳极氧化膜表面还含有 C、K 和 S 原子, 其主要来源于阳极氧化的电解液和电解液中杂质。

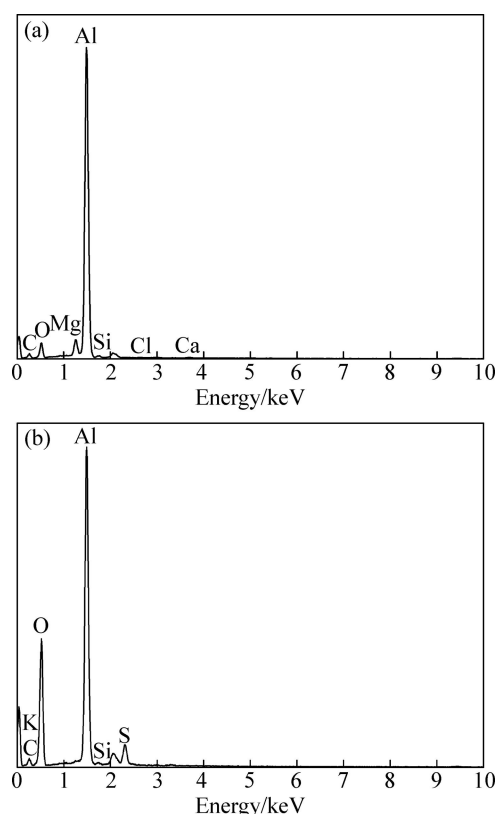


图2 阳极氧化后铝合金表面的EDS分析

Fig. 2 EDS analysis of aluminum alloy surface after anodic oxidation: (a) Original state; (b) After anodic oxidation

2.3 XRD 分析

阳极氧化后试样表面形成一层 Al_2O_3 氧化膜, Al_2O_3 占据了 Al 的位置, 出现 4 个尖锐峰, 且在第一个衍射峰处强度有了显著提高, 后面 3 个衍射峰基本保持不变。这既说明阳极氧化膜是由 Al_2O_3 所组成的, 又说明此阳极氧化膜含有非晶态结构。图 3 所示为阳极氧化后铝合金表面的 XRD 谱。由图 3(a)和(b)对比可知, 阳极氧化膜在衍射角为 38.38° 和 78.1° 处出现两个尖锐峰, 分别对应于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的(104)和(201)。氧化膜在衍射角为 44.62° 和 64.98° 处出现 2 个尖锐峰, 与 JCPDS(10-465)标准卡片对照, 分别对应于 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的(400)、(440) 2 个晶面的衍射峰, 说明氧化膜中含有 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 结构。由于 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为亚稳相, 存在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 向稳定相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的转变, 因此, 阳极氧化最终形成的氧化膜是以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主。由于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的硬度远高于 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的硬度, 所以 7475 铝合金经阳极氧化处理后有利于提高其耐磨性能。

2.4 表面扫描分析

原始状态试样表面扫描位置如图 4(a)所示, 原

始状态铝合金表面存在细小的微孔, 这不利于铝合金的耐蚀性和耐磨性。如图 4(b)和(c)所示, Al 和 O 原子在原始状态表面含量较高。O 原子含量较高可能是空气中的 O_2 和 Al 发生氧化反应, 在 Al 合金表面形成了一层几个纳米厚度的自然氧化膜所致。这使铝合金在大气中具有良好的耐蚀性, 但这层自然氧化膜存在结构疏松、薄而多孔、耐磨性差、机械强度低等一系列问题, 无法满足使用的要求。

氧化膜表面扫描位置如图 5(a)所示, 阳极氧化膜表面分布着许多明显的圆形坑洞, 可能是被 H_2SO_4 电解液溶解所致, 另一个原因是部分杂质因溶解与氧化膜剥落。如图 5(b)和(c)所示, Al 原子和 O 原子在氧化膜表面含量较高, 且 Al 与 O 原子在面上分布存在对应关系。氧化膜表面出现了局部发黑和发暗的现象, 主要是氧化膜中出现空洞和杂质所致。图 5 所示为阳极氧化后铝合金表面的中间部位膜层较薄, 存在缺陷, 氧化膜容易在缺陷边缘尖角处发生开裂现象。同时, 氧化膜厚度不均匀, 这样削弱了氧化膜对基体的保护作用。

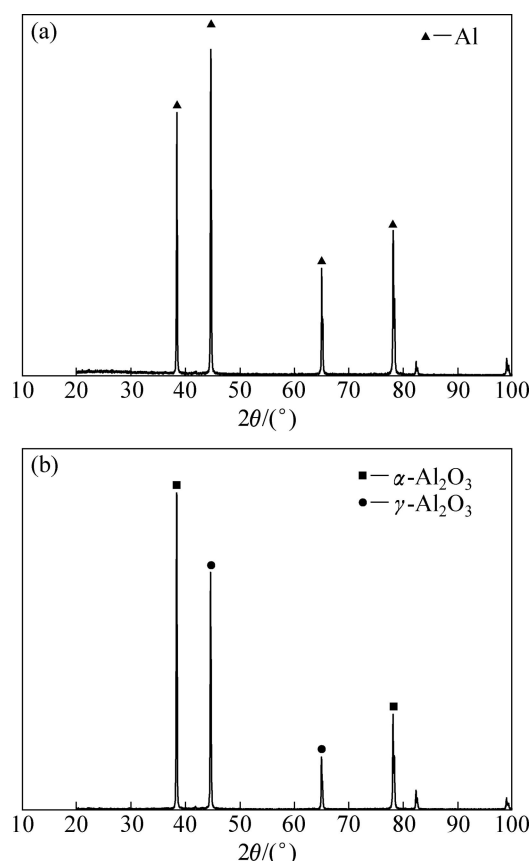


图3 阳极氧化后铝合金表面的XRD谱

Fig. 3 XRD patterns of aluminum alloy surface after anodic oxidation: (a) Original state; (b) After anodic oxidation

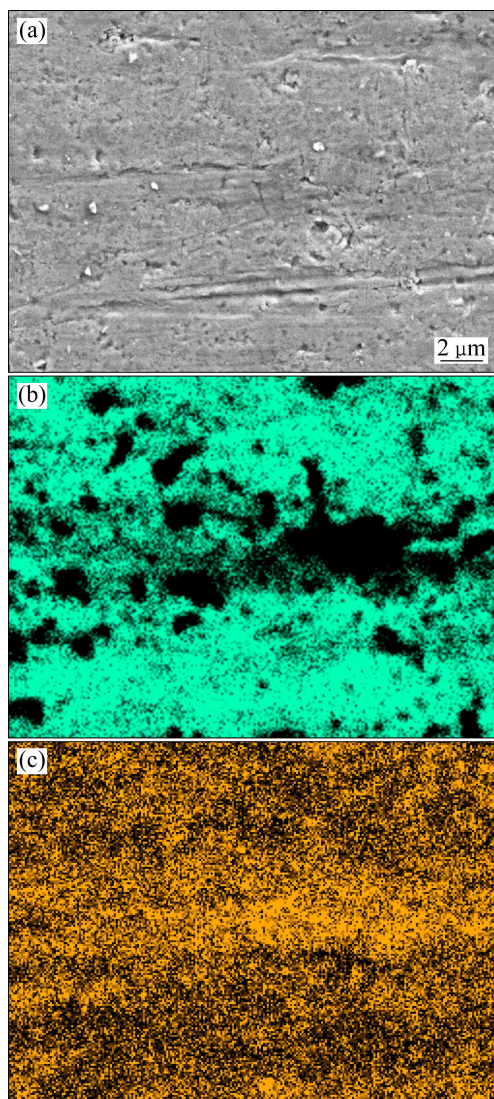


图 4 原始状态铝合金表面面扫描分析

Fig. 4 Surface scan analysis of primitive aluminum alloy surface: (a) Scan position; (b) Al; (c) O

2.5 界面面扫描分析

原始状态铝合金界面的面扫描位置如图 6(a)所示; Al、O、Mg 和 C 的面扫描如图 6(b)~(e)所示。Al 原子均匀地分布在基体的界面上, 没有出现明显的突变现象, 这进一步说明 Al 原子是铝合金的主要组成成分。O 原子也均匀分布在基体的界面上, 这和文献[10]中所述铝的化学性质活泼, 干燥空气中在 Al 的表面立即生成一层几个纳米厚度的自然氧化膜一致。Mg 和 C 原子也均匀地分布在基体的界面上, 表明试样材料界面是均质的。Mg 原子均匀地分布在基体的界面上, 可以降低界面的张力, 而 C 原子的存在可能是界面被污染所致。

阳极氧化后界面的面扫描位置如图 7(a)所示, 阳

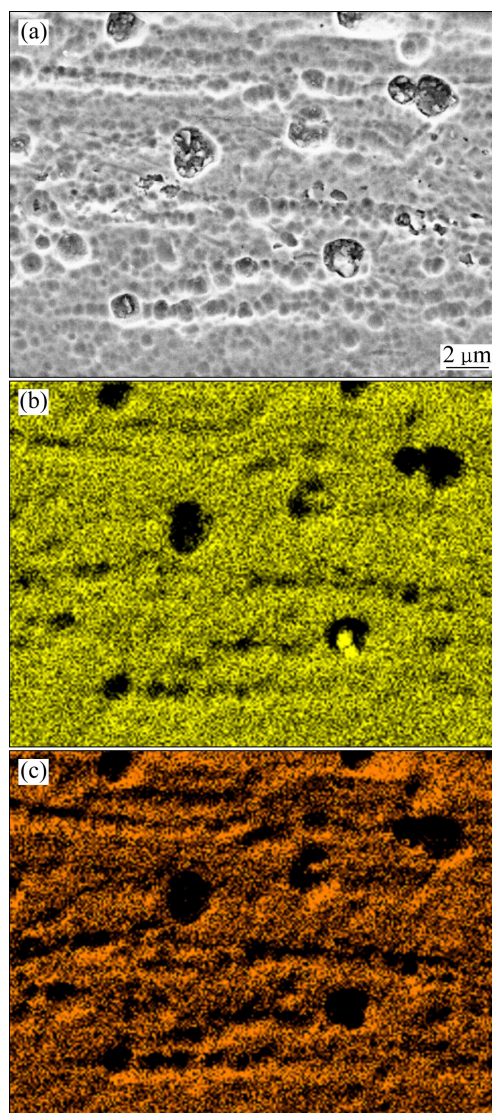


图 5 阳极氧化后铝合金表面面扫描分析

Fig. 5 Surface scan analysis of aluminum alloy surface after anodic oxidation: (a) Scan position; (b) Al; (c) O

极氧化膜厚度约为 $6\ \mu\text{m}$ 。对图 7(a)中结合界面进行面扫描分析, Al 的峰线很强, 说明 Al 原子是界面的主要成分。其化学成分如下: Al 44.15、O 27.38、Mg 0.36、C 26.51、Si 0.19、S 0.85、Cr 0.05、Cu 0.23、Ag 0.28(质量分数, %)。Al 29.17、O 30.51、Mg 0.26、C 39.34、Si 0.12、S 0.47、Cr 0.02、Cu 0.06、Ag 0.05(摩尔分数, %)。如图 7(b)和(c)所示, Al 和 O 出现了明显分层富集现象, Al 主要分布在基体中, O 主要分布在氧化膜中。氧化膜层是由疏松层和致密层组成, 外层是疏松层, Al 和 O 的含量较低; 内层是致密层, Al 和 O 的含量较高。Al 和 O 主要分布在氧化膜中, 这有助于提高铝合金表面的显微硬度、耐蚀性和耐磨性。如图 7(d)所示, Mg 也出现了富集现象, 可以降低界面的张力,

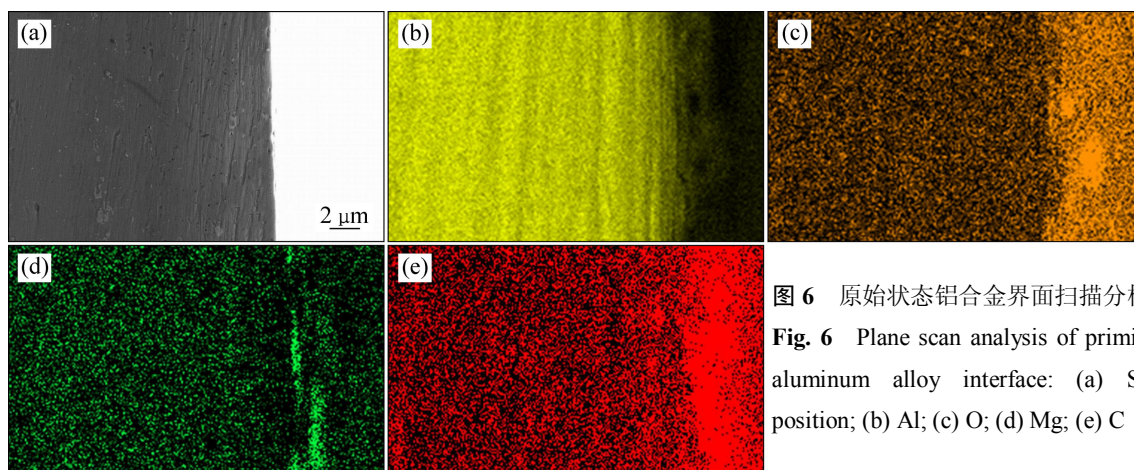


图 6 原始状态铝合金界面扫描分析
Fig. 6 Plane scan analysis of primitive aluminum alloy interface: (a) Scan position; (b) Al; (c) O; (d) Mg; (e) C

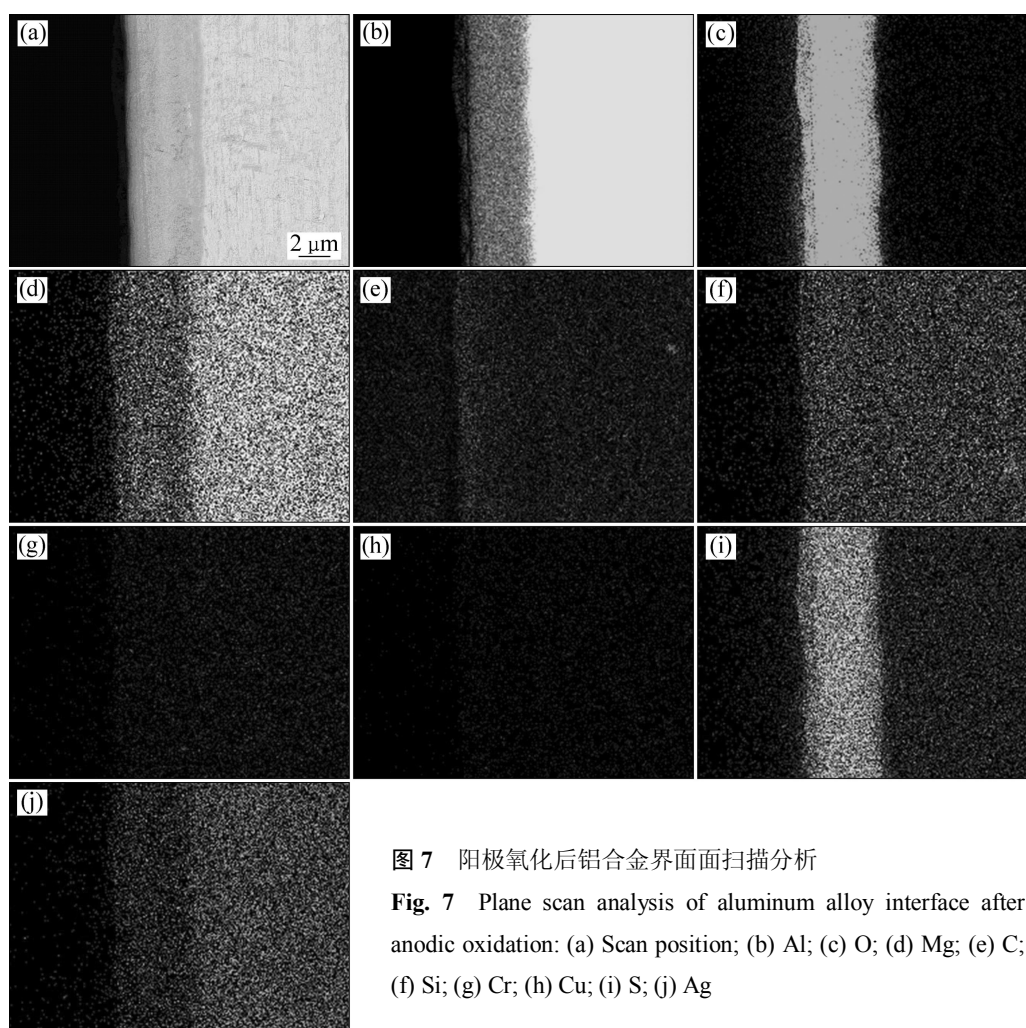


图 7 阳极氧化后铝合金界面扫描分析

Fig. 7 Plane scan analysis of aluminum alloy interface after anodic oxidation: (a) Scan position; (b) Al; (c) O; (d) Mg; (e) C; (f) Si; (g) Cr; (h) Cu; (i) S; (j) Ag

同时也会使 Al_2O_3 变成低价态氧化物,降低其致密性。如图 7(e)~(h)所示, C、Si、Cr 和 Cu 等浓度在氧化膜和基体中基本保持不变,其中 Si 和 Cu 为基体中原有的元素, C 和 Cr 则来自于阳极氧化溶液中反应的化学元素。S 和 Ag 在氧化膜中出现了富集现象,如图 7(i)

和(j)所示,其主要来源于阳极氧化时 H_2SO_4 溶液中。

2.6 界面线扫描分析

对图 7(a)中结合界面进行线扫描分析,其化学成分如下: Al 42.04、O 27.33、Mg 0.35、C 28.99、Si 0.18、

S 0.84、Ag 0.27(质量分数, %); Al 27.19、O 29.82、Mg 0.25、C 42.12、Si 0.11、S 0.46、Ag 0.04(摩尔分数,

%), 如图 8(a)所示。EDS 能谱分析表明: 界面 Al 的峰线很强, 说明 Al 是界面的主要组成成分。还存在少

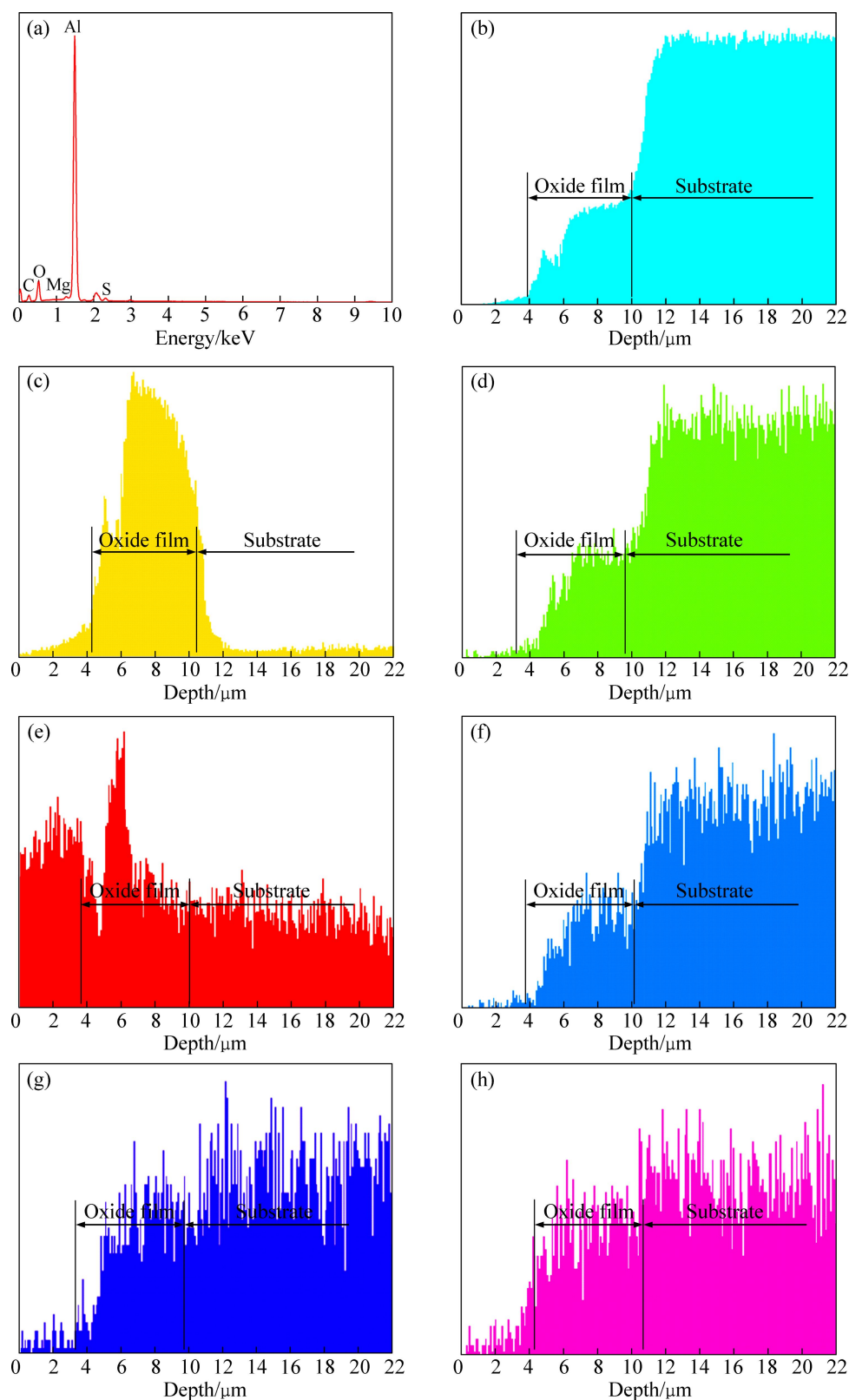


图 8 阳极氧化后铝合金界面线扫描分析

Fig. 8 Line scan analysis of aluminum alloy interface after anodic oxidation: (a) EDS analysis; (b) Al; (c) O; (d) Mg; (e) C; (f) Si; (g) S; (h) Ag

许 C、O、Mg 和 S, 不含 Si 和 Ag, 说明其中微量的 Ag 等杂质在 EDS 下测不出来。界面区域可分为突变型、化合物型和扩散型 3 种^[13-14]。如图 8(b)和(c)所示, 阳极氧化膜和基体有明显的分界, 基体中 Al 浓度远高于 O 浓度, 基体中 Al 浓度含量很高, 且趋于稳定。阳极氧化膜中, Al 浓度低于基体中的, O 浓度高于基体中 O 浓度。由界面沿膜层向外, Al 浓度出现了下降的趋势, 而 O 浓度出现了上升的趋势。基体中 Al 由基体向膜层扩散, 膜层中 O 由膜层表面向基体扩散。在结合界面处形成的是 Al_2O_3 化合物, 此时界面为化合物型, 同时阳极氧化膜 Al_2O_3 溶解基体中 Al 原子, 形成扩散界面, 这表明阳极氧化膜结合界面是化合物型+扩散型形式, 由 Al—O 化学键提供结合力^[15-16]。如图 8(d)所示, 基体里的 Mg 含量高于膜层的, 由界面沿膜层向外, Mg 浓度出现了下降的趋势; Mg 也由基体向膜层发生了扩散。如图 8(e)所示, C 原子均匀地分布在氧化膜和基体中, 在界面处过渡比较平缓, 氧化膜中 C 原子浓度略高于基体中的浓度, 为阳极氧化过程中参加反应的化学元素。而 Si 在氧化膜中的浓度略低于基体的, 如图 8(f)所示, 为基体中原有的化学元素。如图 8(g)~(h)所示, S 和 Ag 等为阳极氧化过程中掺入氧化膜中溶质离子。

3 结论

1) 阳极氧化膜由 Al 和 O 原子组成, 生成的氧化膜组成物相为稳相 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和亚稳相 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

2) 阳极氧化后, Al 和 O 原子在氧化膜表面分布一致。

3) Al 和 O 原子在氧化膜的结合界面发生富集现象, 其界面为化合物型+扩散型形式, 表现出较高的结合强度。

REFERENCES

- [1] 刘冰, 彭超群, 王日初, 王小峰, 李婷婷. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.
LIU Bing, PENG Chao-quen, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LI Ting-ting. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1705-1715.
- [2] 刘建华, 刘洲, 于美, 李松梅, 陈高红. 3种溶液体系下铝合金阳极氧化膜的性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7):

2032-2039.

- LIU Jian-hua, LIU Zhou, YU Mei, LI Song-mei, CHEN Gao-hong. Properties of aluminum alloy anodic films formed in three kinds of solutions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2032-2039.
- [3] 张学军, 高春香, 王蕾, 李琪, 王淑菊, 张英. 溶胶-凝胶法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ 涂层及对 $\gamma\text{-TiAl}$ 合金高温氧化行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(2): 367-371.
ZHANG Xue-jun, GAO Chun-xiang, WANG Lei, LI Qi, WANG Shu-ju, ZHANG Ying. Preparation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ coating by sol-gel method and its effect on high-temperature oxidation behavior of $\gamma\text{-TiAl}$ based alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(2): 367-371.
- [4] 王新东, 武世民, 刘艳芳, 孙根生, 段淑贞. 用电化学交流阻抗法研究铝合金表面稀土转化膜[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(4): 320-323.
WANG Xin-dong, WU Shi-ming, LIU Yan-fang, SUN Gen-sheng, DUAN Shu-zhen. An AC impedance characteristics of the cerium oxide film formed on the aluminum surface[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2001, 23(4): 320-323.
- [5] YUE T M, HUANG K J, MAN H C. Laser cladding of Al_2O_3 coating on aluminium alloy by thermite reactions[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 194: 232-237.
- [6] 陈岁元, 杨永泽, 梁京, 刘常升. 铝合金表面高耐磨自润滑硬质阳极氧化膜的制备[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(12): 1721-1724.
CHEN Sui-yuan, YANG Yong-ze, LIANG Jing, LIU Chang-shen. Aluminum alloy on the surface of high wear-resistant self-lubricating hard anode oxidation membrane preparation[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2010, 31(12): 1721-1724.
- [7] HAN Ke, OU Zhong-wen, PU Teng. Development of hard anodizing of aluminum and aluminum alloy[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 92-96.
- [8] 黄元林, 马世宁, 李长青, 李新. 铝合金 $\text{Ti}(\text{C},\text{N})/\text{TiN}$ 多元多层膜与阳极氧化膜性能比较[J]. 材料工程, 2004(5): 23-29.
HUANG Yuan-lin, MA Shin-ing, LI Chang-qing, LI Xin. Comparison of properties between anodic oxide film and $\text{Ti}(\text{C},\text{N})/\text{TiN}$ multi-element-layer film prepared on aluminium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(5): 23-29.
- [9] 于美, 陈高红, 刘建华, 李松梅. LY12CZ 铝合金的己二酸硫酸阳极氧化[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 363-367.
YU Mei, CHEN Gao-hong, LIU Jian-hua, LI Song-mei. Adipic-sulfuric acid anodizing for LY12CZ aluminum alloy[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

- 2012, 38(3): 363–367.
- [10] 朱绪飞, 宋 晔, 俞华栋, 贾红兵, 杨修丽, 肖迎红, 陆路德, 汪 信. 多孔阳极氧化铝的微观结构与气压的关系[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(1): 90–95.
- ZHU Xu-fei, SONG Ye, YU Hua-dong, JIA Hong-bing, YANG Xiu-li, XIAO Ying-hong, LU Lu-de, WANG Xin. Oxygen release rate and microstructures of porous anodic alumina[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(1): 90–95.
- [11] 赵 军, 朱建龙, 薛花娟, 刘晓磊, 骆心怡, 何建平. 阳极氧化对 7075 铝合金疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(3): 412–416.
- ZHAO Jun, ZHU Jian-long, XUE Hua-juan, LIU Xiao-lei, LUO Xin-yi, HE Jian-ping. Effects of anodizing methods on behavior of 7075 aluminum alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(3): 412–416.
- [12] ZHOU X, THOMPSON G E, HABAZAKI H, SKELDON P, WOOD G C, THOMPSON G E. Copper enrichment in Al-Cu alloys due to electropolishing and anodic oxidation[J]. Thin Solid Films, 1997, 293(1/2): 327–332.
- [13] DU Nan, WANG Shuai-xing, ZHAO Qing, SHAO Zhi-song. Effects of boric acid on microstructure and corrosion resistance of boric/sulfuric acid anodic film on 7050 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(7): 1655–1660.
- [14] 刘建华, 李永星, 于 美, 李松梅, 孙玉静. 己二酸铵对 7075-T6 铝合金硫酸阳极氧化的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 324–330.
- LIU Jian-hua, LI Yong-xing, YU Mei, LI Song-mei, SUN Yu-jing. Effects of ammonium adipate on sulphuric acid anodizing of 7075-T6 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 324–330.
- [15] MONFORT F, BERKANI A, MATYKINA E, SKELDON P, THOMPSON G E, HABAZAKI H, SHIMIZU K, et al. Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 672–693.
- [16] SAEEDIKHANI M, JAVIDI M, YAZDANI A. Anodizing of 2024-T3 aluminum alloy in sulfuric-boric-phosphoric acids and its corrosion behavior[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(9): 2551–2559.

(编辑 李艳红)