

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.05.003

ZL102 表面阳极氧化及性能研究

戴美洛, 秦会斌*

(杭州电子科技大学 新型电子器件与应用研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 选用 ZL102 合金作为一种新型封装基板的中间镀层进行阳极氧化试验, 制备厚的多孔层阳极氧化膜。研究了电解液、电流密度、温度、时间对阳极氧化膜的形貌特征、孔隙率、厚度、硬度、耐压性和热阻性能的影响, 得到了综合性能最佳的厚膜实验条件。结果表明: ZL102 铝合金在不同的电解液(硫酸、硫酸-草酸、硫酸-酒石酸、硫酸-柠檬酸)、电流密度(2~6 A/dm²)、温度(10~30 °C)、时间(80~160 min)下均能形成颜色均一、表面光滑的氧化膜。综合性能最佳的厚阳极氧化膜的工艺条件为: 硫酸-草酸为电解液, 电流密度 6 A/dm², 温度 15 °C, 时间 80 min。

关键词: ZL102 合金; 阳极氧化; 孔隙率; 膜厚; 硬度; 耐电压; 热阻

中图分类号: TQ153.6 **文献标识码:** A

Study on surface anodizing and properties of ZL102

Dai Meiluo, Qin Huibin*

(Institute of New Electronic Devices and Applications, Hangzhou Dianzi University,
Hangzhou 310018, China)

Abstract: ZL102 alloy was selected as the intermediate coating of a new type of packaging substrate for anodic oxidation test, and thick porous anodic oxidation film was prepared. The influence of different electrolyte, current density, temperature and time on the morphology, porosity, thickness, hardness, pressure resistance and thermal resistance of the anodic oxidation film was studied, and the experimental conditions of the thick film with the best comprehensive performance were obtained. The results show that ZL102 aluminum alloy in different electrolyte (sulfuric acid, sulfuric acid-oxalic acid, sulfuric acid-tartaric acid, sulfuric acid-citric acid), different current density (2–6 A/dm²), different temperature (10–30 °C) and different time (80–160 min) can form a uniform color, smooth surface oxide film. The optimum conditions of thick anodic oxide film were as follows: sulfuric acid-oxalic acid as electrolyte, current density of 6 A/dm², temperature of 15 °C and time of 80 min.

Keywords: ZL102 alloy; anodizing; porosity; film thickness; hardness; voltage resistance; thermal resistance

高硅铝合金 ZL102 以优良的铸造性能、低密度、无热裂及疏松倾向、良好的耐磨性和抗蚀性^[1-3], 在

航空航天和汽车零件领域有广泛的应用前景^[4-5]。由于 ZL102 具有良好的抗热裂性和流动性, 研究者

收稿日期: 2023-12-14

修回日期: 2024-01-03

作者简介: 戴美洛(1999—), 男, 硕士, 研究方向为电路与系统, email: hsy_dml@163.com

*通信作者: 秦会斌(1961—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为新型电子器件、抗电磁干扰、分布式储能、智能控制等, email: qhb@hdu.edu.cn

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004g01020003)

尝试将熔融态的铝合金经过真空压力浸渗法^[6-7]处理,形成一种新型封装基板的中间镀层,然后进行进一步的强化处理,主要关注其绝缘性能和导热性能。目前研究已经证实,阳极氧化工艺适用于 ZL102 合金的表面处理,阳极氧化膜作为表面改性层可使 ZL102 合金的性能明显提高^[8-11]。

阳极氧化是一种能用来提高铝合金的硬度、绝缘强度、耐热性能和耐蚀性能的常见工艺^[12-13]。由于厚且均匀的膜层能耐受高强度的电压冲击,有助于保证其绝缘性能,本文采用阳极氧化技术,制备了较厚的多孔型阳极氧化膜。在不同的电解液、电流密度、温度和时间条件下,分别对 ZL102 铝合金试样

进行阳极氧化,分析了阳极氧化膜的结构及性能,优选出了最佳工艺,研究了该工艺对基材力学、电学和热学性能的影响。由于 ZL102 表面氧化工艺,是针对新型封装基板的中间镀层设计的,因此暂不考虑直接的耐蚀性。后续的封孔处理会进一步考虑其绝缘性能和导热性能。

1 实验

1.1 材料与设备

采用 ZL102 铝合金薄板,其主要成分如表 1 所示。

表 1 ZL102 合金元素质量分数
Tab.1 The element mass fraction of ZL102 alloy

铸造方法	元素质量分数/%							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
砂型铸造	10-13	≤ 0.7	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.2	余量
金属型铸造	10-13	≤ 1.0	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.2	余量

试样尺寸为 80 mm×80 mm×1 mm。材料需要经过除油(HO-730 型铝材清洗剂,常温,1~3 min)、碱蚀(NaOH 60 g/L,常温,1~3 min)、出光(HNO₃ 60 g/L, HF 12 g/L, 常温,浸泡 1~3 min)、清洗(去离子水,常温)和干燥等预处理。

阳极氧化设备主要由电源、模温机和阳极氧化槽组成。采用 MPS-3003L-3 型双组直流稳压阳极氧化电源,通过 BLKII-1YF-R 型模温机,配合定制散热盘管来控制槽液温度。阳极氧化槽体采用聚丙烯塑料材质,以 80 mm×80 mm×1 mm 铅板作为阴极。阳极和阴极的表面积比为 1:1,两者距离为 250±20 mm。

1.2 阳极氧化膜的制备

1.2.1 不同电解液对比

从实际生产的角度出发,硫酸阳极氧化工艺具有简单、操作方便、溶液稳定、电能消耗少、允许杂质含量范围较大、适用范围广和成本低等优点。所以实验中以硫酸溶液为基础,只改变添加的有机酸。为了对比,分别在硫酸、硫酸-草酸、硫酸-酒石酸、硫酸-柠檬酸中制备阳极氧化膜,其中有机酸的摩尔浓度保持相同。阳极氧化时,电流密度为 2.5 A/dm²,温度保持在 20±2 °C,氧化时间均为 80 min。

硫酸体系:硫酸 150 g/L + 硫酸铝 5 g/L。

硫酸-草酸体系:150 g/L 硫酸 + 15 g/L 草酸 + 硫酸铝 5 g/L。

硫酸-酒石酸体系:150 g/L 硫酸 + 25 g/L 酒石酸 + 硫酸铝 5 g/L。

硫酸-柠檬酸体系:150 g/L 硫酸 + 35 g/L 柠檬酸 + 硫酸铝 5 g/L。

添加硫酸铝的目的是保持 Al³⁺ 含量,维持槽液的导电性能。硫酸铝含量决定了氧化能耗和膜层质量。硫酸铝含量过少对氧化膜溶解能力强,含量过多对 H⁺ 和 SO₄²⁻ 的拦截面积增加,导致槽液导电性能下降^[14-15]。

1.2.2 不同电流密度对比

实验中电流密度为 2~7 A/dm²。溶液为硫酸-草酸体系,阳极氧化时溶液温度保持在 20±2 °C,氧化时间均为 80 min。

1.2.3 不同温度对比

实验温度为 10~30 °C。溶液为硫酸-草酸溶液体系,电流密度保持在 2.5 A/dm²,氧化时间均为 80 min。

1.2.4 不同时间对比

实验过程中,时间为 80~160 min。溶液为硫酸-草酸体系,电流密度保持在 5 A/dm²,温度保持在 15±2 °C。

1.3 性能测试

采用DHG500-00型高温干燥箱,将阳极氧化板在110℃下烘干30 min。同时采用GP-200MRT型金相显微镜观察不同阳极氧化膜的表面形貌。然后放入干燥箱,230℃烘干1 h,再次观察不同阳极氧化膜的表面形貌,并用细胞计数法得到孔隙率比例。

采用CT-800型涡流测厚仪,测试不同阳极氧化膜的膜层厚度。经过ZL102铝合金基材校正后,每个样品测试9个位置的厚度,取平均值。采用W-20型韦氏硬度计,测试ZL102铝合金基材和不同阳极氧化膜的硬度。将试样置于钻座和压针之间,一次施加足够握力压下手柄,直至感到已压到底,避免扭动。每个样品测试5个位置的硬度,取平均值。

采用ZC7122D型交、直流耐电压/绝缘电阻测试仪,测试不同阳极氧化膜的单点和直径为10 mm的单面耐电压值。漏电流为2 mA,电压上升速度为500 V/s,最大电压值为6 kV。测试点耐电压过程中,将负极鳄鱼夹夹在未氧化的基材处,正极鳄鱼夹与试样表面接触,保持不动,直至击穿。每个样品测试6个位置,取平均值。测试单面耐电压过程中,负极保持不动,正极夹在直径为10 mm的不锈钢砝码上,砝码紧贴试样,保持不动,直至击穿。每个样品测试3个位置,取平均值。

采用DRL-V型导热系数测试仪,测试ZL102合金基材和不同阳极氧化后的热阻值。参考ASTM-D5470-12标准,裁取26 mm×26 mm大小的标准样片,砂纸逐级打磨(600#,800#,1000#)、裁剪边缘后,放入冷热探头之间,让热流垂直均匀穿过样品。图1是采用导热系数测试仪,并通过稳态热流法测试热阻的示意图。测试中,保持热面温度80℃,压力372 N。

$$R_{th} = \frac{T_h - T_c}{P} \cdot S \quad (1)$$

式中: R_{th} 为样品厚度方向的热阻($\text{cm}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$); T_h 和 T_c 分别为样品的上、下表面的温度(K); P 为样品厚度方向的热流量(W); S 为样品面积(cm^2)。

2 结果与讨论

2.1 电解液的对比

ZL102铝合金在硫酸、硫酸-草酸、硫酸-酒石酸及硫酸-柠檬酸这4种电解液中均可形成完整、连续、致密、颜色一致的氧化膜。阳极氧化膜颜色灰度

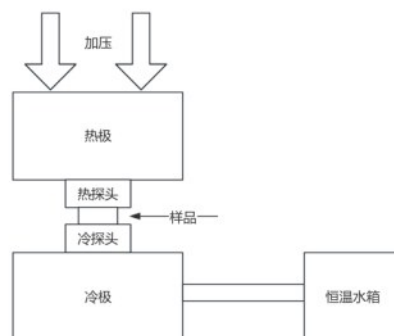


图1 稳态热流法进行导热系数测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of thermal conductivity test by steady-state heat flow method

为:硫酸-草酸>硫酸-酒石酸>硫酸>硫酸-柠檬酸。通过区分灰度的细胞计数法,大致计算出4种溶液体系(硫酸、硫酸-草酸、硫酸-酒石酸、硫酸-柠檬酸)中阳极氧化膜的孔隙率比例为36:17:22:28。可见,添加有机酸有助于减小阳极氧化膜的孔隙率,添加草酸的效果最好。图2是不同电解液中制备的阳极氧化膜微观形貌(200倍放大)。

图3是不同电解液对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响。由图3(a)可知,硫酸-草酸体系生成的阳极氧化膜最厚,为27.5 μm。由图3(b)可知,添加有机酸对于阳极氧化的硬度并没有太大影响,基本在16.2 HW~16.6 HW之间,但阳极氧化膜的存在确实提升了整板的硬度,相比基材的11.2 HW,提升了至少45%。如图3(c)所示:添加草酸对单点耐电压提升最高,为1.698 kV;硫酸电解液中得到的单面耐电压最高,为0.777 kV。但此时的阳极氧化膜由于未封孔,在阳极氧化过程中,存在由杂质形成的缺陷(或者是不均匀造成的缺陷)。所以需要进一步使用其它材料进行封孔^[16-17],填补点、面缺陷,尽量提升其耐电压的平均水平。由图3(d)可知,添加有机酸能减小热阻的提升程度,其中柠檬酸效果最好,最终值为1.120 $\text{cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$,最少提升了64.2%。对比得出,在硫酸-草酸电解液中得到的阳极氧化膜综合性能最优。

2.2 电流密度的对比

ZL102铝合金在电流密度为2 A/dm²、3 A/dm²、4 A/dm²、5 A/dm²、6 A/dm²下均可形成完整、连续、致密、颜色一致的氧化膜。氧化膜颜色随膜厚加深,由

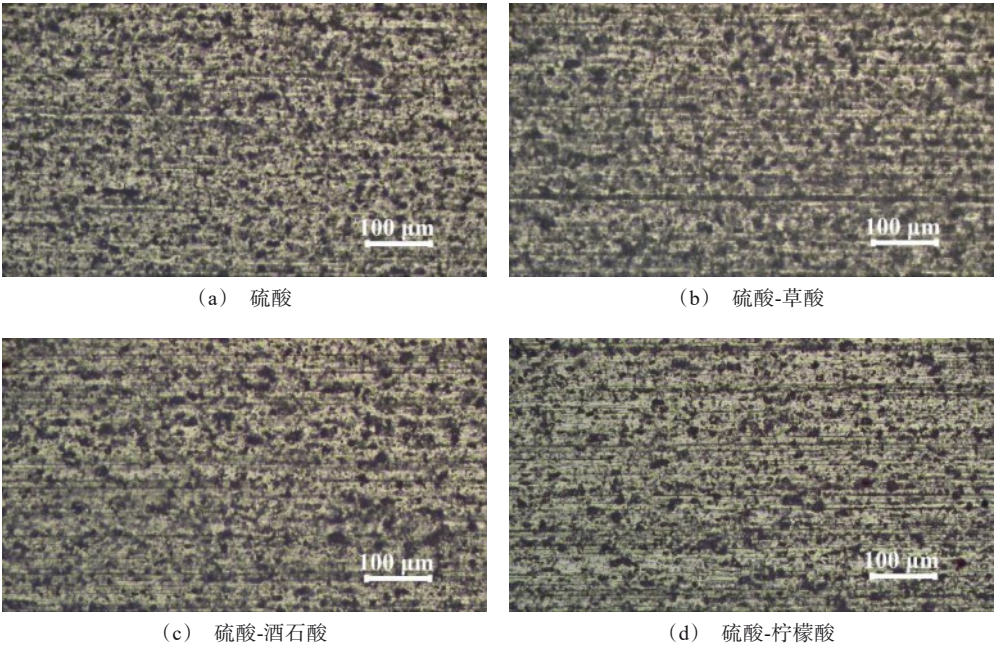


图 2 不同电解液中制备的阳极氧化膜微观形貌

Fig.2 The morphology of anodic oxide films prepared in different electrolytes

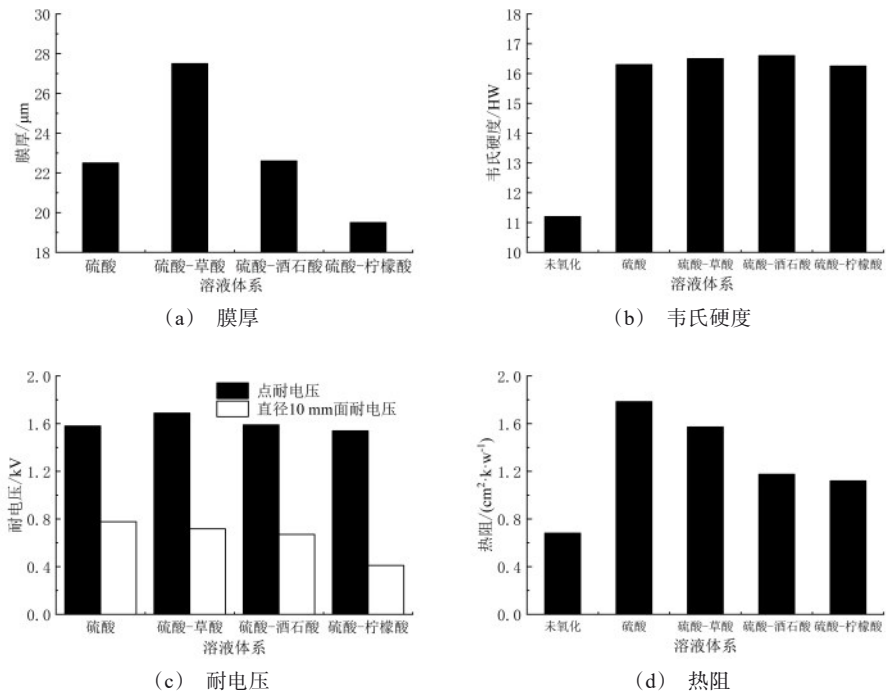


图 3 不同电解液对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响

Fig.3 Influences of electrolytes on film thickness, hardness, voltage resistance and thermal resistance

于Si存在,整体为灰色。但是在电流密度为7 A/dm²时,出现局部烧焦的情况,如图4所示。

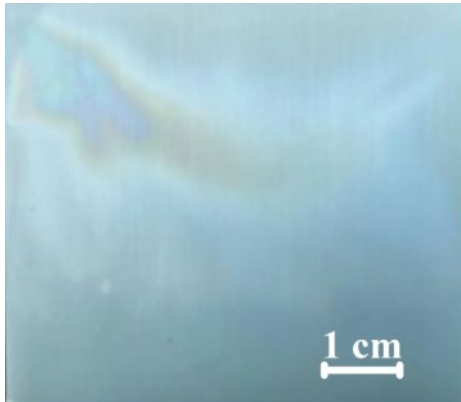
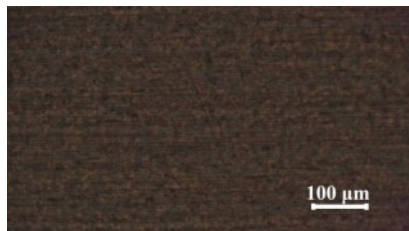


图4 电流密度为7 A/dm²时ZL102合金氧化膜的外观形貌

Fig.4 The appearance of ZL102 alloy oxide film at the current density of 7 A/dm²

图5是在电流密度为7 A/dm²下,放大100倍的未烧焦和烧焦的膜表面。由图5可见,烧焦的膜表面显现出更浅的颜色,而且二者都清晰看出膜表面的裂痕。这是因为电流密度过大,导致局部过热、表面冷热冲击形成的。想要防止这种情况的发生,可以降低氧化温度、加强搅拌或者改用脉冲电源^[18-19]。

通过区分灰度的细胞计数法,大致计算出6种



(a) 未烧焦



(b) 烧焦

图5 电流密度为7 A/dm²时未烧焦和烧焦膜的微观图像

Fig.5 Microscopic images of unburnt and charred films at current density of 7 A/dm²

电流密度(2 A/dm²、3 A/dm²、4 A/dm²、5 A/dm²、6 A/dm²、7 A/dm²)中阳极氧化膜的孔隙率比例为45:18:16:11:12:28。这是因为对同样面积的铝合金,在相同的电阻下,提高电流密度会带动电压提高,从而使得膜孔隙率先减小后增大,在电流密度为5 A/dm²时最小。在一定的时间内,阳极氧化膜的厚度与通过的电量呈正比,而氧化电压影响更多的是阳极氧化膜阻挡层的厚度、孔径大小和数量^[20]。

阳极氧化生成的氧化膜厚度^[21]可按法拉第第二定律推导出的公式计算:

$$\sigma = KIt \quad (2)$$

式中: σ 为氧化膜厚度(μm); I 为电流密度(A/dm²); t 为氧化时间(min); K 为系数, $K=1057/\gamma$, γ 为氧化铝密度(kg/m³)。

图6是不同电流密度对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响。由图6(a)可知,膜厚度和电流密度近似呈正比,从最薄的17.9 μm 提高到最厚的46.0 μm 。但是随着电流密度达到7 A/dm²,ZL102合金表面产生的热量没有及时散去,反而会加快膜的溶解。因此其它条件不变时,存在一个电流密度的拐点,或者说存在一个阳极氧化膜厚度的极限值。

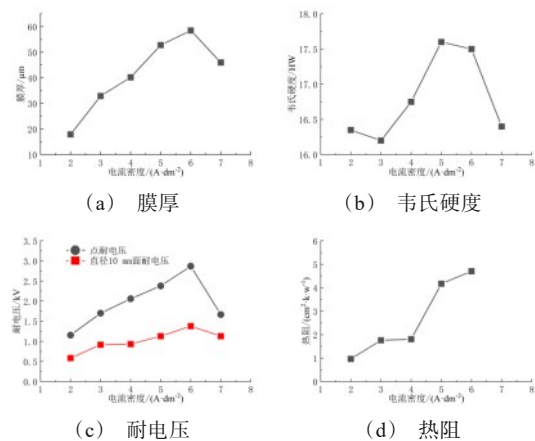


图6 电流密度对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响
Fig.6 Influences of current densities on film thickness, hardness, voltage resistance and thermal resistance

此外,随着电流密度的增加,也就是膜的加厚,垂直阳极氧化的ZL102铝合金的上下膜厚差距开始增大。电流密度小于和等于4 A/dm²时,膜厚差只有2~3 μm ,电流密度等于5 A/dm²时,膜厚差为9 μm ,

电流密度等于 6 A/dm^2 时,膜厚差达到 $12 \mu\text{m}$ 。电流密度提高形成的厚膜均匀度会有所下降,一方面是槽液上下层温度不同导致溶液的浓度有所差别,另一方面是挂铝材周边部分的电流容易通过^[22]。

如图6(b)所示,在电流密度为 5 A/dm^2 时,硬度最大(17.6 HW)。后续更大的电流密度产生的表面热量反而会导致结构松散,硬度下降。由图6(c)可知,电流密度为 6 A/dm^2 时,点、面耐电压都达到最大,分别为 2.870 kV 和 1.380 kV 。由图6(d)可知,随着电流密度的增大,热阻从 $0.967 \text{ cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 增大到 $4.705 \text{ cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。 4 A/dm^2 时的热阻比预计值小,可能是因为结构均匀引起的。

2.3 温度的对比

电解液的温度也是影响阳极氧化膜层性质的一个因素。通过调节设定模温机的温度,经过散热盘管中的冷水循环带走阳极氧化产生的热量,从而实现槽液的温度控制。通常模温机设定温度要比实际槽液温度低 2°C 。

通过区分灰度的细胞计数法,大致计算出5种温度(10°C 、 15°C 、 20°C 、 25°C 、 30°C)下阳极氧化膜的孔隙率比例为 $11:11:17:385:57$ 。可以看出温度低至 15°C ,就能达到一个极限的低孔隙率,有助于耐压性的提升。

图7是不同温度对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响。由图7(a)可知,随着温度的升高,膜层的厚度先上升后下降,在 15°C 时达到最大值 $30.4 \mu\text{m}$ 。继续降低温度并未得到更厚的膜,可能是因为温度降低会提高电解液的黏度,同时也会降低金属原子的热运动速率,从而降低膜层增长的速率。由图7(b)可知,随着温度的升高,硬度先上升后下降再上升,在 15°C 达到最大值 16.8 HW 。由图7(c)可知,随着温度的升高,点、面的耐电压整体降低,在 10°C 最大,分别为 2.154 kV 和 0.960 kV 。但在 25°C 有所回升,这是因为添加草酸对于阳极氧化工艺适用的温度范围有所拓宽。由图7(d)可知,整板的热阻在 15°C 时达到最低值 $1.114 \text{ cm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。这可能是因为 15°C 时,电解液的黏度提高对膜层的影响和金属原子的热运动速率降低对膜层的影响达成了平衡,生成的膜层结构较为均匀。

2.3 时间的影响

之前的研究已经能得到 $50 \mu\text{m}$ 厚度的阳极氧化膜。根据公式(2)可知,增加阳极氧化时间可以增加

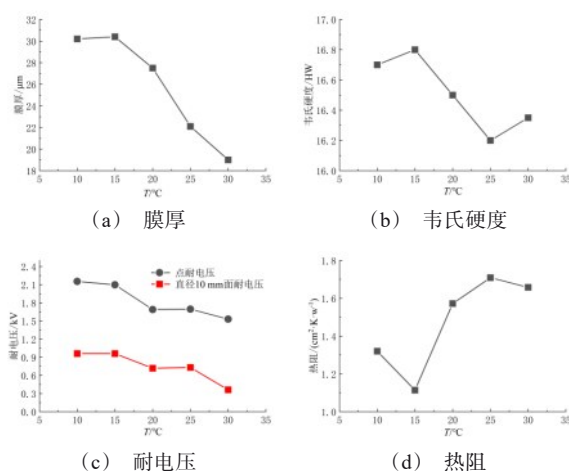


图7 温度对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响

Fig.7 Influences of temperatures on film thickness, hardness, voltage resistance and thermal resistance

阳极氧化膜的厚度。而膜层结构保持不变时,膜层越厚,绝缘性能越强。

通过区分灰度的细胞计数法,大致计算出4段时间(80 min 、 100 min 、 130 min 、 160 min)下阳极氧化膜的孔隙率比例为 $63:19:12:7$ 。可以看出时间延长有助于降低孔隙率。因为随着阳极氧化的进行,膜层的厚度变厚,电阻值也变高。在维持电流密度不变的情况下,电压会变大,最终达到平衡。图8是每隔 5 min 记录的阳极氧化电压值的变化,总时长为 160 min 。

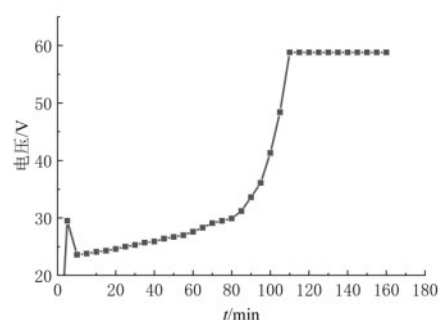


图8 阳极氧化过程中电压的变化

Fig.8 Variation of voltage during anodizing

如图8所示,通电刚开始的 15 s 内,电压由 0 V 急剧增至 29.5 V ,形成一层连续的、无孔的阻挡层。随后电压降至 23.6 V ,意味着多孔层开始形成。接着从 30 s 开始多孔层开始增厚。当阳极氧化时间到 115 min 时,电压已经到达顶峰(58.8 V),整体电阻

值不再改变。但由于多孔层的生成速度大于溶解速度,未到达平衡,膜层将继续增厚,膜整体的结构反而会变得松散。

图9是时间对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响。由图9(a)可知,随着时间的延长,阳极氧化膜的厚度逐渐从53.1 μm 提升到103.2 μm 。图像近似一次函数,也验证了公式(2)中时间对阳极氧化膜厚度的影响。由图9(b)可知,随着时间的延长,硬度先上升后下降,在100 min时最大值18.7 HW。过长时间的阳极氧化反而会导致膜层结构不均匀。由图9(c)可知,随着时间的延长,点耐电压先下降后上升,在160 min达到最高值2.076 kV,和80 min

制备的阳极氧化膜的点耐电压2.056 kV相比,相差不大。这是因为延长时间一方面增厚膜层,帮助提高耐电压性;另一方面又会导致膜层结构的不均匀,整体质量下降。由图9(d)可知,随着时间的延长,热阻从3.096 $\text{cm}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ 上升到8.850 $\text{cm}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ 。上升的速率随着时间的延长有所减小,可能是达到某个时间后会有一个极限热阻。材料的热阻取决于其导热率、厚度和传热条件(例如传导、对流或辐射)^[23],因为氧化膜有孔存在,这个极限热阻取决于膜层的整体孔隙率,也就是空气热阻和 Al_2O_3 热阻的比例。

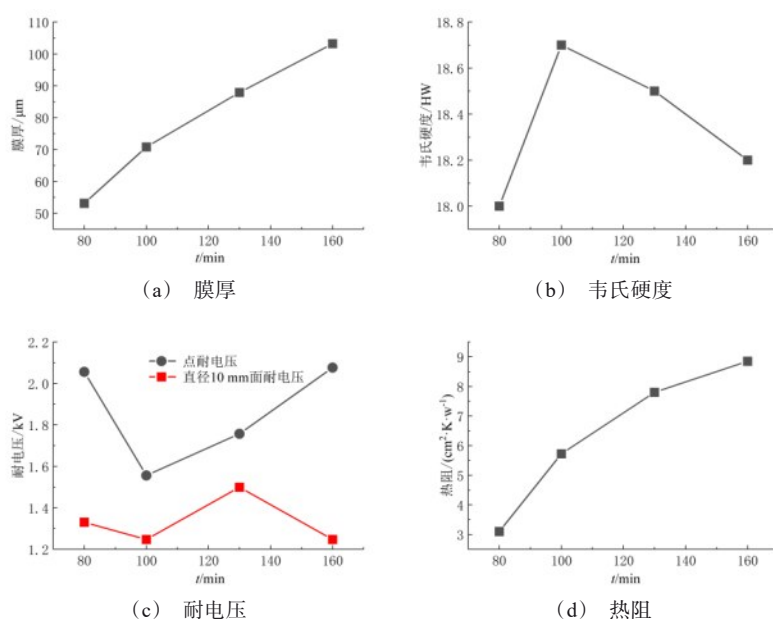


图9 时间对膜厚、韦氏硬度、耐电压性及热阻的影响

Fig.9 Influences of time on film thickness, hardness, voltage resistance and thermal resistance

3 结论

本文通过在ZL102合金表面上制备厚阳极氧化膜,并对电解液、电流密度、温度、时间四个因素进行对比,分析膜孔隙率、厚度、硬度、耐电压、热阻,得到以下结论:

(1)对于以硫酸为主体的四种电解液,添加草酸对于提升膜厚、耐电压效果最佳,对于提升硬度和降低热阻也有不错的效果。通常较高的电流密度会带来厚膜、高硬度和高耐电压,但过高的电流密度会放大阳极氧化时表面热能的影响,可能会造成缺陷,只

增加热阻,其它性能反而降低。较低的温度会带来厚膜、高硬度、高耐电压和低热阻,但不需要太低。通常较长的时间会带来厚膜、高硬度、高耐电压,但时间过长反而会只增长膜厚和热阻,硬度和耐压降低。

(2)ZL102铝合金在不同电解液(硫酸、硫酸-草酸、硫酸-酒石酸、硫酸-柠檬酸)中、不同电流密度(2~6 A/dm^2)下、不同温度(10~30 $^{\circ}\text{C}$)下和不同时间(80~160 min)下均能形成颜色均一、表面光滑的氧化膜。综合性能最佳的厚阳极氧化膜的工艺条件为:硫酸-草酸为电解液,电流密度6 A/dm^2 ,温度

15 °C, 时间 80 min。

参考文献

- [1] 罗兵辉, 柏振海, 周华, 等. 几种铸造铝合金的铸造性能、力学性能及耐蚀性[J]. 矿冶工程, 2001(2): 67-68.
- [2] 范应光, 陈汝霞, 杨启杰, 等. 改良铸造铝硅合金常温耐腐蚀性能的研究[J]. 铸造, 2013, 62(2): 148-151.
- [3] Luo G, Zhou X, Li C B, et al. A quantitative study on the interaction between silicon content and heat treatment on thermal conductivity of Al-Si binary alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 16(3): 1-10.
- [4] Wu R Z, Qu Z K, Zhang M L. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li base alloys[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2010, 24(1): 35-43.
- [5] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68-75.
- [6] Ma Y Q, Qi L H, Zheng W Q, et al. Effect of specific pressure on fabrication of 2D-C f/Al composite by vacuum and pressure infiltration[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1915-1921.
- [7] 王晓东, 骆毅, 胡耀政, 等. 真空压力浸渗法制备 B₄C/ZL301 复合材料的组织与性能[J]. 西安航空学院学报, 2023, 41(3): 61-66.
- [8] 李双双. 近共晶铝硅合金阳极氧化工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 2017.
- [9] 李明祥, 邹玉洁, 孙宝龙, 等. 铝合金阳极氧化技术发展[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(8): 41-46.
- [10] 张盼, 李增超, 郭明钦, 等. 金具零部件表面防腐蚀试验研究[J]. 有色金属材料与工程, 2021, 42(4): 40-44.
- [11] 钱建国, 郝延刚. ZL102、ZL101A 砂型铝合金铸件的防腐研究[J]. 价值工程, 2017, 36(32): 120-122.
- [12] 廖重重, 陈岁元. 铝阳极氧化膜及生长机理的研究进展[J]. 辽宁化工, 2012, 41(7): 699-701.
- [13] O'Sullivan J P, Wood G C. The morphology and mechanism of formation of porous anodic films on aluminium[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1970, 317(1531): 511-543.
- [14] 王雨辰. 铝合金硫酸阳极氧化槽液的质量控制[J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(8): 91-93.
- [15] 王英君, 刘洪雷, 王国军, 等. 新型高强稀土 Al-Zn-Mg-Cu-Sc 铝合金的阳极氧化及其抗腐蚀性能研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 131-138.
- [16] 薛莹. 铝合金阳极氧化封孔工艺的探析[J]. 冶金与材料, 2021, 41(6): 129-130.
- [17] 张策, 张德忠, 潘学著, 等. 铝及铝合金阳极氧化膜封孔技术机理、应用及研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41(18): 1305-1312.
- [18] 黄元盛, 陈焕明. 6063 铝合金的大电流密度间歇式阳极氧化[J]. 金属热处理, 2014(1): 117-119.
- [19] Jensen F, Gudla V C, Kongstad I, et al. High frequency pulse anodising of aluminium: anodising kinetics and optical appearance[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 360: 222-231.
- [20] 高崇, 江钟宇, 赵丕植, 等. 电流密度对 5252 铝合金阳极氧化膜性能的影响[J]. 电镀与环保, 2020, 40(3): 63-66.
- [21] 王祝堂, 田李璋. 铝合金及其加工手册(第二版)[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
- [22] 刘伟华. 热循环作用下铝合金阳极氧化膜的开裂行为与机理研究[D]. 北京: 北京化工大学材料科学与工程学院, 2008.
- [23] 库尔班江·乌丝曼, 戴晓业, 史琳. 相变材料对储热系统换热速率的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2023, 44(9): 1292-1297.