

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.06.011

电源参数对铝合金表面复合氧化膜的多彩电解着色的影响规律研究

李志强^{1,2}, 魏红阳^{2,3}, 陈东初^{2*}, 常萌蕾², 叶秀芳², 尹诗衡⁴, 吕健滔⁵,
邓前军²

(1. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528200; 2. 佛山科学技术学院 材料科学与氢能学院, 广东 佛山 528200; 3. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 4. 华南理工大学 分析测试中心, 广东 广州 510640; 5. 佛山科学技术学院 物理与光电学院, 广东 佛山 528200)

摘要: 铝合金表面多彩电解着色对兼顾其产品耐候性和装饰性具有重要意义。本研究依次通过在阳极氧化溶液中的阳极氧化步骤、电沉积液中的直流电解步骤、低压交流电解步骤、直流控色步骤和交流电沉积步骤制得了多彩复合阳极氧化膜,并探究了工艺步骤对其显色的影响。结果表明:经阳极氧化步骤在铝合金基底生成第一层不影响显色的氧化膜;经低压交流电解步骤形成较薄且疏松决定彩色着色能否成功的第二层氧化膜;在直流控色步骤过程中形成控制颜色的第三层氧化膜,此步骤电解时间延长(40~160 s)后,复合阳极氧化膜颜色呈现出从浅黄绿色向黄色、橙色、紫色、蓝色、绿色和黄绿色转变的规律;交流电沉积步骤在氧化膜孔底所沉积含Sn元素的金属粒子,可提高复合阳极氧化膜颜色的饱和度,进而呈现出亮丽的多彩色。本研究结果为后续进一步探究氧化膜的着色机理提供了理论依据。

关键词: 铝合金;复合阳极氧化膜;多彩色;电解着色

中图分类号: TS913+7

文献标识码: A

Effects of Power Parameters on Electrolytic Colouring of Colorful Composite Oxide Film on Aluminum Alloy Surface

LI Zhiqiang^{1,2}, WEI Hongyang^{2,3}, CHEN Dongchu^{2*}, CHANG Menglei², YE Xiufang²,
YIN Shiheng⁴, LV Jiantao⁵, DENG Qianjun²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528200, China; 2. School of Materials Science and Hydrogen Energy, Foshan University, Foshan 528200, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 4. Analytical and Testing Center, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 5. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan 528200, China)

Abstract: The electrolytic colouring on aluminum alloy with multi-colour is of great significance for taking into account the weather resistance and decoration of its products. A composite anodic oxide film

收稿日期: 2021-02-20

修回日期: 2021-05-31

作者简介: 李志强(1993—),男,博士在读,email:lizq9312@163.com

通信作者: 陈东初(1972—),男,博士,教授,email:Chendc@fosu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(21671038);广东省基础与应用基础研究基金项目(2020B1515120093);江西省重点研发计划项目(20201BBE51009)

with multi-color was prepared by a anodization following by an electrolysis with direct current, low voltage with alternating current, color control with direct current and electrodeposition with alternating current in an electrodepositing solution, and the influences of these process steps on color variation of the composite anodic oxide films were explored. The results showed that the first layer of the anodic oxide film was formed by anodization with the constant current without affecting the colouring tone. The second thin and leaky anodic oxide film was formed by electrolysis with low-voltage alternating current, which determined whether the colours of anodic oxide films would be appeared. The third anodic oxide film was formed by electrolysis with direct-current. In this step, with the extension of the electrolysis time (40–160 s), the colour of the anodic oxide film varied from light yellow-green to yellow, orange, purple, blue, green and yellow-green. The Sn-containing compounds were deposited on the bottom of the holes in anodic oxide film, which increased the colour saturation of the anodic oxide film and presented bright multi-colours. The results of this study provided a theoretical basis for further exploration of the colouring mechanism of the anodic oxide film.

Keywords: aluminium alloy; composite anodic oxide film; multi-colour; electrolytic colouring

铝合金是全世界使用量最多且最为广泛的有色金属材料,已广泛应用于交通、建筑、家具、电子产品等各领域。为了提高其防护性能与装饰性能,铝合金材料需要进行表面处理。阳极氧化是铝合金表面处理中较为常见的方法,其为铝合金的防护性和装饰性提供了保障。阳极氧化铝合金的着色方法主要包括有机染料染色和电解着色等^[1-4]。有机染料染色因耐候性较差而难以满足室外产品的装饰要求^[5-6],传统的电解着色通常只能制备古铜、香槟、黑色等深色系,难以满足铝合金表面多彩色的装饰要求^[4,7-8]。因此,研究者们一直在探索阳极氧化铝合金多彩电解着色的方法^[9-15],该方法无需有机染料,通过调整膜孔微结构和在多孔阳极氧化膜孔底部沉积金属纳米粒子来实现阳极氧化膜层的多彩色。该方法不仅具有良好的装饰性,还具有非常好的防护性能,可满足各种工业铝合金材料室外使用的长效性需求。

关于阳极氧化铝合金多彩电解着色的方法,目前报道有氧化-电沉积法^[10,16-17],通过该方法成功制备出了几百纳米至微米厚度、色彩鲜艳的彩色氧化膜;硫酸盐扩孔法^[18]通过控制孔内形成的金属层厚度来实现布拉格干涉着色,但是膜孔内残留的磷酸不易去除;输出电源多步骤交直流变换的方法^[9,19],可在同一电解质溶液中,实现氧化膜的微结构调控和金属粒子电沉积,工艺相对简单可控,膜厚可达15 μm以上,适用于对防护性有较高要求的应用场

合。为了实现良好的颜色重现性与工艺可控性,非常有必要弄清电源交直流变化步骤及其参数对氧化膜着色的影响,掌握影响着色的关键步骤与参数。

本文在前述基础上,研究关键性工艺步骤对氧化膜着色的影响,确定了工艺参数对氧化膜颜色的调控规律,在阳极氧化铝合金表面制备出黄、紫、蓝、绿等多种代表性颜色,为全光谱范围的彩色阳极氧化膜的制备提供理论依据和应用基础。

1 实验方法

1.1 制备方法

本研究所采用的基材为6063铝合金,铝合金基材首先经除油、去灰等常规表面处理,然后将铝合金基材放入H₂SO₄溶液中,采用直流氧化电源(型号为LW-6010 KD),以1.0~1.3 A/dm²的电流密度氧化5~60 min,随后放入SnSO₄(5~15 g/L)、NiSO₄(10~30 g/L)等为主盐的电沉积液中,采用KIKU-SUI公司型号为PBZ80-5的交直流一体电源进行电解着色。

氧化膜彩色着色按照图1所示步骤进行处理,阳极氧化步骤采用恒电流密度1.0~1.3 A/dm²,电解时间5~60 min;直流电解步骤采用恒压5~20 V,电解时间为100 s;低压交流步骤采用交流电压1~7 V,该步骤又分为3个小步骤:首先交流电压5 V,电解时间30 s,然后交流电压2.8 V,电解时间为300 s,最后交流电压2.1 V,电解时间为300 s;直

流控色步骤采用恒压 10~20 V, 电解时间为 40~160 s, 本文将该步骤的电解时间定义为“着色时间”; 交流电沉积步骤采用 10~20 V 的交流电压, 电解时间为 155 s。

1.2 表征方法

采用型号为 Canon700D 相机对电解着色后的试样进行拍摄, 使用型号为 WB-2000 IX A 广度色彩色差计测量复合阳极氧化膜的 Lab 值。通过计算试样间的色差值 ΔE , 分析工艺对颜色的影响程度。 ΔE 通过以下公式计算得到:

$$\Delta E = [(\Delta L)^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]^{1/2}$$

$$\Delta L = L_{\text{样品1}} - L_{\text{样品2}} \quad (\text{明度差异})$$

$$\Delta a = a_{\text{样品1}} - a_{\text{样品2}} \quad (\text{红/绿差异})$$

$$\Delta b = b_{\text{样品1}} - b_{\text{样品2}} \quad (\text{黄/蓝差异})$$

Lab 值中的 L 表示亮度, 数值从 0~100; a 、 b 值为衡量红/绿和黄/蓝的参数。

采用型号为 Hitachi S-4800 FESEM 的扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样截面形貌, 并结合 EDS 分析元素成分。使用型号为 LYRA 3 XMU 聚焦离子束场发射扫描电子显微镜 (FIB-SEM) 制备试样切片, 使用型号为 JEM-2100F 透射电子显微镜 (TEM) 研究试样微观形貌与膜孔内沉积物的分布情况。

2 结果与讨论

本部分将依次对图 1 中的关键性步骤 (阳极氧化步骤、直流电解步骤、低压交流电解步骤、直流控色步骤和交流电沉积步骤) 对复合阳极氧化膜显色的影响进行讨论分析。

2.1 阳极氧化步骤对复合阳极氧化膜显色的影响

铝合金在硫酸中经阳极氧化处理后, 其表面可得到较为透明的多孔阳极氧化膜^[10,17,20-25]。氧化时间越长, 氧化膜越厚^[17-18]; 在一定电压范围内, 阳极氧化电压越高, 氧化膜的孔径越大, 孔隙率越小。本研究分别通过改变氧化时间和氧化电压探究了氧化膜厚度和孔结构对其显色的影响。

恒流条件下, 铝合金试样的氧化时间分别设定为: 5 min、10 min、20 min 和 30 min, 此外, 将图 1 所示的直流控色步骤的电解时间 (着色时间) 分别设定为: 55 s、100 s、125 s 和 145 s, 其余步骤参数保持不变。所制备试样的光学图片如图 2 所示。

当氧化时间从 5 min 延长至 30 min 时, 氧化膜

的厚度从 3.3 μm 增加到 13.0 μm 。从图 2 中可以看到, 恒流条件下, 氧化时间的改变并未显著影响试样最终的颜色。说明该步骤的氧化时间不会对氧化膜的颜色产生显著的影响, 通过本实验所述工艺可制备出颜色相同而厚度不同的阳极氧化膜, 进而满足不同环境对阳极氧化膜厚度的需求。

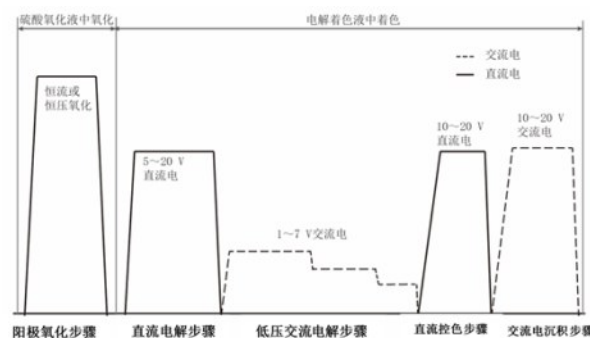


图1 复合阳极氧化膜的制备工艺过程及参数

Fig.1 The process and parameters for fabricating composite anodic oxide film with multi-color

实验进一步地探究了氧化电压对复合阳极氧化膜显色的影响。恒流氧化条件下 ($1.0 \sim 1.3 \text{ A/dm}^2$) 的稳定电压约为 17 V, 因此, 实验以其对应的 17 V 为基础电压, 探究了 14 V、17 V、20 V 三种电压条件氧化 10 min 后形成的氧化膜对后续着色的影响。为进行多种颜色对比, 该过程中直流控色步骤的电解时间 (着色时间) 依然设定为: 55 s、100 s、125 s 和 145 s。测量不同氧化电压制备氧化膜着色后的 Lab 值, 计算得到试样的 ΔE 值 (以 17 V 条件下得到的 Lab 值为基准, 即色差值为 0), 结果如表 1 中所示。

从表 1 中可以看到, 着色时间相同时, 不同电压氧化着色制备试样的 ΔE 数值均较好地保持在 5 左右, 因此认为, 氧化电压的改变不会对氧化膜颜色产生明显的影响。已有的研究表明, 硫酸体系氧化形成氧化膜的孔径随氧化电压的升高而增大, 同时其他膜孔结构参数也受氧化电压影响^[25-27]。实验中, 升高氧化步骤的电压, 并未观察到氧化膜的颜色出现明显变化, 说明氧化步骤所形成氧化膜的孔径等膜孔结构参数不会影响氧化膜的着色颜色。由此可以确定, 该步骤形成的氧化膜不参与着色过程, 不会对氧化膜的颜色产生影响。在后面步骤的探究过程中, 本步骤电流密度均为 $1.0 \sim 1.3 \text{ A/dm}^2$, 氧化时间为 10 min。

2.2 直流电解步骤电压对复合阳极氧化膜显色的影响

在仅改变直流电解步骤通电电压的条件下,所制备试样的光学图片如图 3 所示,对应试样的 Lab 值如图 4 所示。从图 3 中可以看到,在 11.7 V 和

17.7 V 下所制备试样的颜色较深暗,而 14.7 V 电压所制备的试样颜色最为鲜艳。从图 4 中也可以观察到,在 14.7 V 电压下,试样的 a 、 b 值具有最大的波动范围,这也说明 14.7 V 所制备的颜色最为亮丽。因此,直流电解步骤的较优电压为 14.7 V。

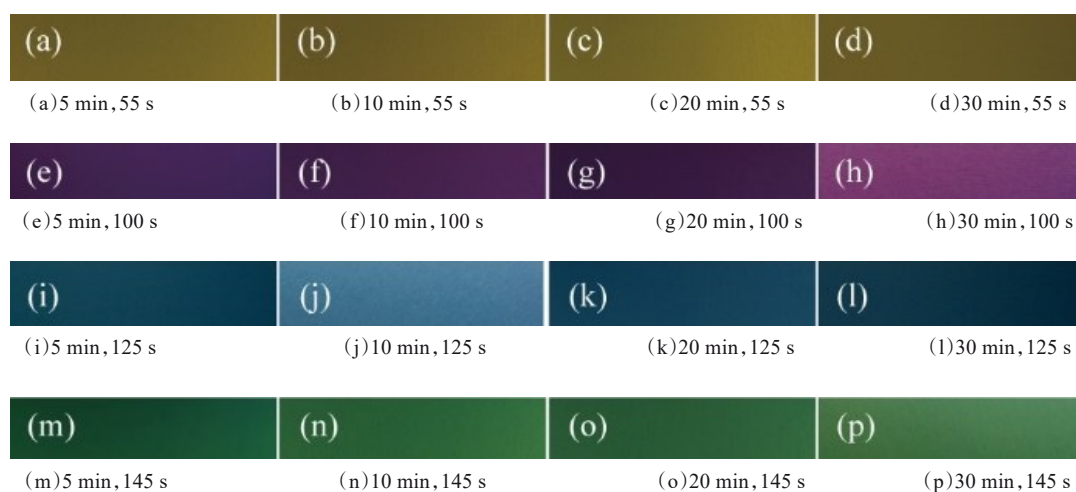


图 2 不同氧化时间所制备不同颜色试样的光学照片

Fig.2 Optical photographs of samples with different colors prepared at different oxidation time

表 1 不同氧化电压下制备的试样色差值

Tab.1 The color difference of the samples prepared at different oxidation voltage

氧化电压/V	着色时间/s			
	55	100	125	145
14	0.06	18.57	14.49	4.31
17	0	0	0	0
20	5.9	1.4	2.9	5.3

2.3 低压交流电解步骤对阳极氧化膜显色的影响

2.3.1 低压交流电解步骤的缺失对复合阳极氧化膜颜色的影响

未进行低压交流电解步骤所制备试样的光学图片如图 5 中(e)~(f)所示。从图 5 中可以看到,进行了低压交流电解步骤的试样(着色时间分别为 55 s、100 s、125 s 和 150 s),获得了黄色、紫色、蓝色和绿色几种鲜艳亮丽的多彩色。未进行低压交流电解步骤的各试样表现为棕黑色,多彩着色失败,说明该步骤是获得多彩色的必需步骤。

通过分析代表性样品(着色时间为 100 s 试样)的截面 SEM 形貌图,探究低压交流电解步骤对氧化膜结构的影响,其截面形貌如图 6 所示。从图 6(a)

中可以看到,进行了低压交流电解步骤所制备的试样,由于氧化膜中存在中间一层较薄的氧化膜(在图 6(a)中使用浅蓝色标识部分),使整个氧化膜形成了三层结构。未进行低压交流电解步骤的氧化膜截面形貌如图 6(b)所示,并未观察到类似的多层结构。因此认为,低压交流电解步骤会氧化形成中间一层较薄的氧化膜,如图 7(a)中所示浅蓝色标识层。可以确定,第二层较薄的氧化膜存在与否,是氧化膜是否表现出彩色的主要原因。

2.3.2 低压交流电解步骤电压输出类型对复合氧化膜颜色的影响

为进一步探究此步骤输出电流类型对氧化膜着色的影响,本研究分别使用电压为 5.0 V、2.8 V 和 2.1 V 的直流电替代该原步骤中所对应的交流电,实验试样颜色如图 7 所示。图 7(a)为未进行直流替换的试样,(b)、(c)、(d)分别为使用 5.0 V、2.8 V、2.1 V 的直流电替换对应交流电的试样。由图 7 可知,交流电所制备的试样(a)表现出多彩色(蓝紫色),而使用直流电所制备的试样(b)、(c)、(d)均未能表现出鲜艳亮丽的多彩色。这说明中间一层膜层由低压交流电通电所形成的特殊结构是着色成功的关键。

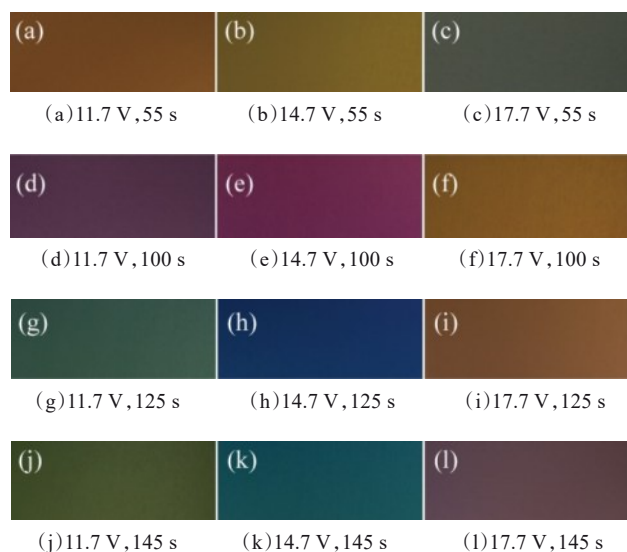


图3 电解电压对颜色的影响

Fig.3 The effect of electrolytic voltage on colors

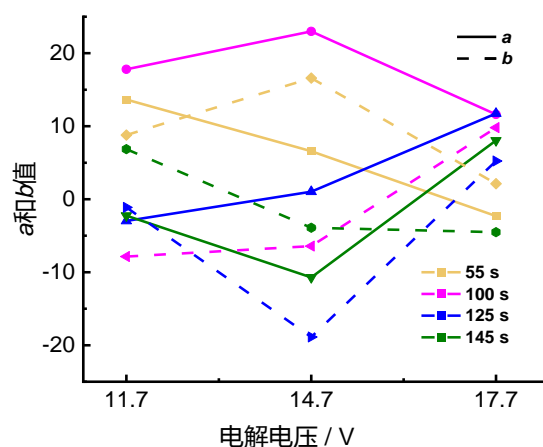
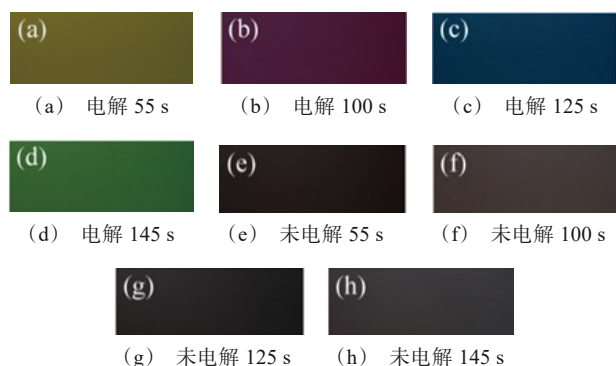
图4 不同电解电压所制备试样Lab值中的 a 、 b 值

图5 低压交流电解步骤的缺失对颜色的影响

Fig.5 Influence of step with absence of low-voltage alternating current electrolysis on colors

2.4 直流控色步骤对复合阳极氧化膜显色的影响

直流控色步骤的着色时间可影响复合阳极氧化膜的颜色,但其颜色随着着色时间的具体变化规律尚不得而知,因此,本研究进一步探究在此步骤中着色时间(40~160 s)对复合阳极氧化膜显色的影响。本步骤在14.7 V电压下,得到的多彩色试样如图8所示,试样对应的 a 、 b 值如图9所示。从图8中可以看到,随着着色时间的延长(40~160 s),复合阳极氧化膜的颜色呈现出从浅黄绿色向黄色、橙色、红色、紫色、蓝色和绿色的转变规律。仅调控着色时间,即可在单一的电解着色溶液中制备出多种颜色的复合阳极氧化膜。

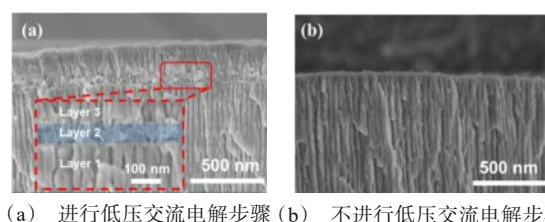


图6 低压交流电解对氧化膜结构的影响

Fig.6 The influence of low-voltage alternating current electrolysis on the structure of anodic oxide film

从图9中可以看到,随着着色时间从40 s延长至70 s时, a 值从0附近增加,而 b 值较大,依据Lab值的色彩学意义,说明氧化膜的颜色从初始的黄绿色转变为黄色和橙色,与试样的光学照片一致。着色时间从75 s延长至90 s左右时, b 值逐渐降低到0,而 a 值处于较大值,此时氧化膜的颜色从橙色逐渐向红色转变。着色时间从90 s延长至110 s时, a 值并未出现显著的变化,但 b 值快速降低,此时颜色从红色向紫色转变。着色时间从110 s延长到125 s时, a 值在0轴附近, b 值处于小于-15,氧化膜的颜色呈现蓝色。着色时间从125 s延长至160 s时, a 值从0轴降低到-10,颜色转绿。 b 值从-15增加到10,颜色转黄,此时试样即从蓝色向绿色转变,并进一步转向黄绿色。说明控制着色时间,可使氧化膜的颜色发生连续转变,获得可见光谱中绝大部分的颜色。

在该步骤的电解过程中,会形成另外的一层氧化膜,该步骤的电解时间决定该层氧化膜的厚度^[28-29]。通过改变着色时间调控氧化膜的厚度,可精确控制复合阳极氧化膜的颜色。

2.5 交流电沉积步骤对复合阳极氧化膜显色的影响

交流电沉积步骤采用 15 V 交流电电解 155 s, 先

通过比较该步骤前后氧化膜颜色的变化, 探究交流电沉积是否对复合氧化膜显色有影响, 随后改变该步骤的通电时间, 探究沉积时间对其颜色的影响。

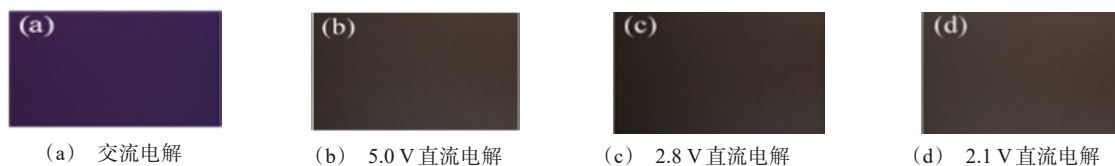


图 7 低压交流电解步骤的输出电压类型(交流或直流)对试样颜色的影响

Fig.7 Influence of the output voltage type of the low-voltage alternating current electrification step on the color

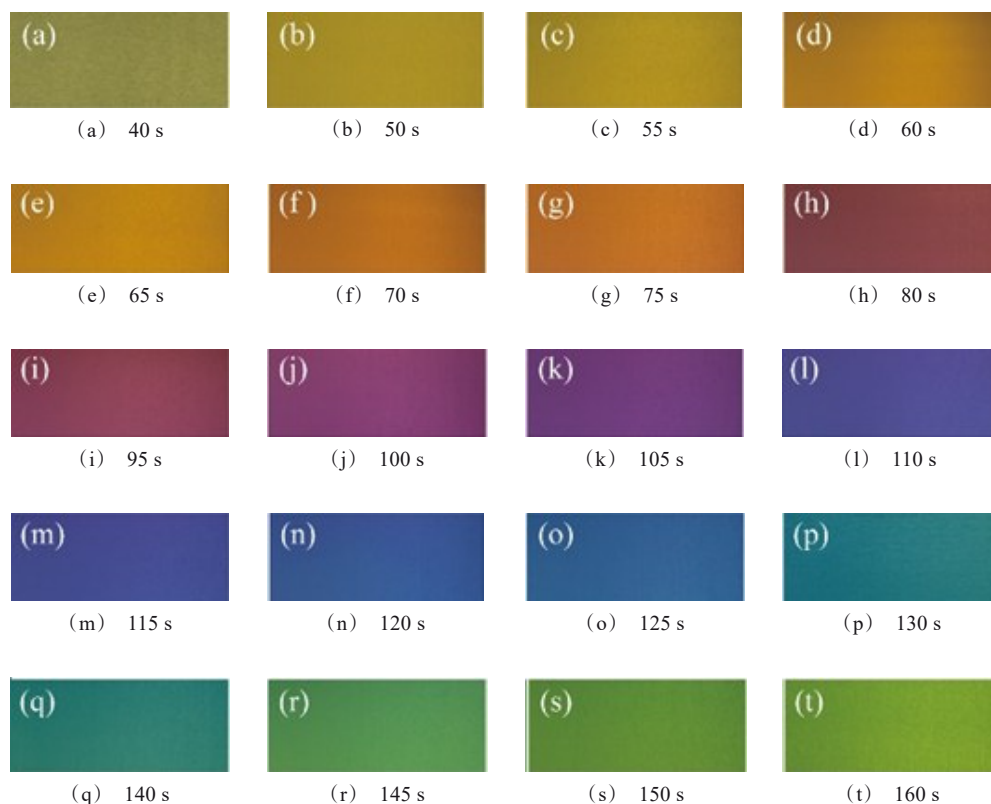


图 8 着色时间对氧化膜颜色的影响

Fig.8 Effect of coloring time on the colors of anodic oxide films

2.5.1 交流电沉积步骤的缺失对复合阳极氧化膜显色的影响

如图 10 所示, (a) ~ (d) 试样为经过了交流电沉积处理的试样, (e) ~ (h) 试样为未进行交流电沉积处理的试样。由图 10 可知, 未进行交流电沉积步骤的试样无法得到彩色氧化膜。说明交流电沉积步骤对试样多彩色的显现也起着至关重要的作用, 可提高试样颜色的饱和度而使人肉眼可见。

分析了交流电沉积步骤进行前后氧化膜成分, 其结果如图 11 所示。未进行交流电沉积的试样没有检测到 Sn 元素, 而进行了交流电沉积的试样含有 Sn 元素。说明交流电沉积步骤的主要作用是在氧化膜中形成含 Sn 的沉积物。为进一步确定氧化膜中沉积物的位置, 实验中使用 TEM 观察了氧化膜切片的形貌, 结果如图 11(c) 所示, 其中黑色物质为沉积物。氧化膜孔中的沉积物能够吸收和遮蔽在复合

氧化膜中传播的光束,削弱光束光强^[30],进而使氧化膜颜色的饱和度得到提高,实现氧化膜的多彩色。

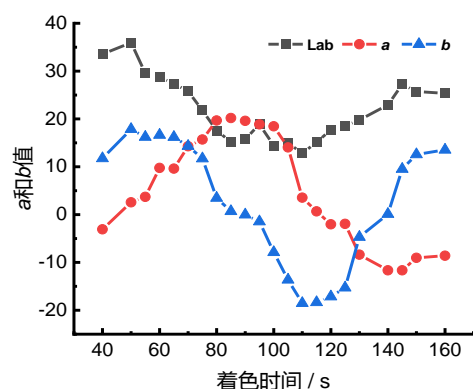


图9 不同着色时间试样的Lab值

Fig.9 Lab value of samples with different coloring time

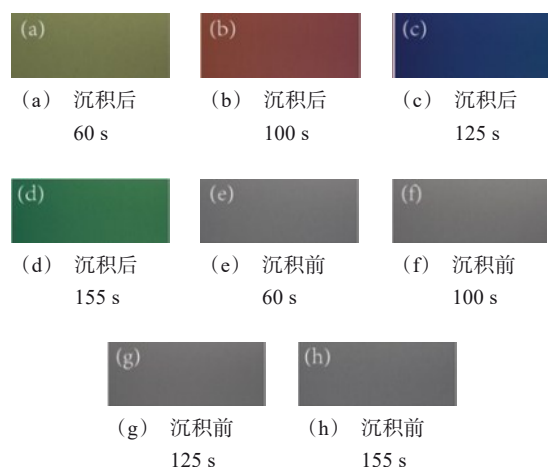


图10 交流电沉积步骤进行前后氧化膜颜色的变化

Fig.10 The color changes of anodic oxide films before and after alternating current electrodeposition

2.5.2 交流电沉积时间对复合阳极氧化膜颜色的影响

为进一步探究沉积物高度对氧化膜颜色的影响,实验制备了不同沉积时间(125 s、155 s、185 s)的试样,其色差值如表2中所示。其中,以沉积时间155 s条件下得到的Lab值为基准,即色差值为0。从表2中可以看到,不同电沉积时间所制备出的试样,色差值 ΔE 的数值基本在5以下,说明沉积时间不会对氧化膜颜色产生明显影响。沉积时间延长,沉积物高度也随之增加。实验结果表明,在本研究范围内,沉积物高度变化不影响着色颜色。

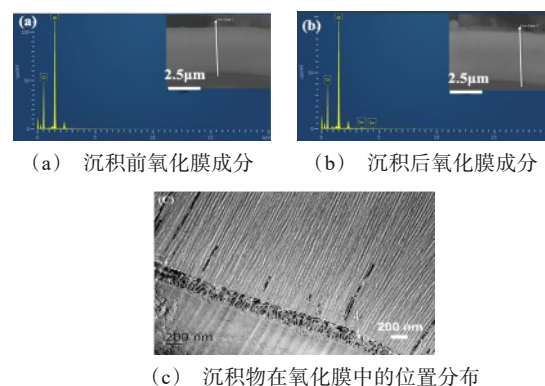


图11 交流电沉积对氧化膜成分的影响

Fig.11 Effects of alternating current electrodeposition on the composition of anodic oxide film

表2 不同沉积时间试样的颜色色差值

Tab.2 The color difference of the samples prepared at different electrodeposition time

沉积时间/s	着色时间/s			
	55	100	125	150
125	0.25	0.61	3.01	1.10
155	0	0	0	0
185	5.35	0.34	1.51	2.14

3 结论

(1)通过交直流电解变换的方法,可在铝合金表面制备出具有三层微结构且其孔底嵌含Sn金属粒子沉积物的彩色复合阳极氧化膜。

(2)阳极氧化步骤所生成膜层的微结构对显色无显著影响;直流电解步骤电压为14.7 V时,试样所着颜色最鲜艳;低压交流电解步骤决定复合阳极氧化膜是否显色;直流控色步骤具有调控复合阳极氧化膜色调的作用,随电解时间延长,复合阳极氧化膜的颜色呈现出从黄绿色向黄色、橙色、红色、紫色、蓝色、绿色转变的规律;交流电沉积步骤会在氧化膜孔底形成含Sn金属颗粒,使氧化膜表现出较高饱和度的彩色,沉积时间不改变复合氧化膜的色调。

参考文献

- [1] 张志强. 电解着金黄色工艺的研究[J]. 材料保护, 1999 (4): 3-5.
- [2] 王艳芝. 铝及铝合金阳极氧化膜着色技术研究进展[J]. 电镀与精饰, 2001(3): 20-22+26.
- [3] 周鼎华. 铝合金表面处理技术新进展[J]. 热处理技术

- 与装备, 2006(4): 10-15.
- [4] 周蕾玲, 丁毅, 马立群. 铝合金电解着色技术 [J]. 轻合金加工技术, 2008(6): 33-37.
- [5] 刘祥玲, 李廷取. 6061 铝合金表面阳极氧化膜着蓝色工艺 [J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(23): 1288-1290.
- [6] 刘祥玲, 李廷取, 索忠源, 等. 6061 铝合金板材阳极氧化及着色工艺的试验研究 [J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(6): 49-52.
- [7] 刘春玲, 赵春英, 张志仁, 等. 铝合金在亚锡盐及镍盐溶液中电解着黑色工艺的研究 [J]. 电镀与精饰, 2011, 33(6): 33-35.
- [8] 刘馨, 李玉海, 张勤. 2024 铝合金阳极氧化、电解着黑色工艺优化及膜的性能 [J]. 材料保护, 2014, 47(7): 42-44+47+48.
- [9] 龚循飞, 潘学著, 陈东初, 等. 铝合金多色化电解着色溶液配方与极板材料的优化 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(10): 968-971+977.
- [10] Wang L, Qin X, Ji D, et al. Engineering optical properties of metal/porous anodic alumina films for refractometric sensing[J]. Applied Surface Science, 2015, 355(15): 139-144.
- [11] Liu Y S, Chang Y, Ling Z Y, et al. Structural coloring of aluminum [J]. Electrochemistry Communications, 2011, 13(12): 1336-1339.
- [12] Xu Q, Yang Y H, Liu L H, et al. Synthesis and optical properties of iridescent porous anodic alumina thin films [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2012, 159(1): C25-C28.
- [13] Wang X, Zhang H, Zhang D, et al. Color tuning by local sputtering metal nanolayer on microstructured porous alumina [J]. Microscopy Research and Technique, 2012, 75(5): 698-701.
- [14] Chen H M, Hsin C F, Liu R-S, et al. Controlling optical properties of aluminum oxide using electrochemical deposition [J]. J Electrochem Soc, 2007, 154(6): K11-K14.
- [15] Wang X H, Akahane T, Orikasa H, et al. Brilliant and tunable color of carbon-coated thin anodic aluminum oxide films [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(1): 011908.
- [16] Zhang Z J, Zhang J J, Xue H, et al. Iridescent thin films of porous anodic aluminum oxide with embedded silver nanowires[J]. Thin Solid Films, 2014, 558(19): 344-348.
- [17] Liu H, Sun H, Liu L, et al. Optical properties of porous anodic alumina embedded Cu nanocomposite films[J]. Optical Materials, 2015, 44: 9-12.
- [18] 朱祖芳. 铝合金阳极氧化与表面处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [19] Benitez-Garriga E. Colored anodized aluminum and electrolytic method for the manufacture of same. United States: 08/274684[P]. 1995-12-05.
- [20] Li Y, Yue W J, Chen Z X, et al. Large-area structural color filtering capitalizing on nanoporous metal-dielectric-metal configuration [J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1): 1-10
- [21] Yang S, Han W, Li H, et al. Study of structural colors of anodic alumina thin films prepared by a point electrode [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2015, 162(8): E123-E127.
- [22] Hu N, Dong X, He X, et al. Effect of sealing on the morphology of anodized aluminum oxide[J]. Corrosion Science, 2015, 97:17-24.
- [23] Lee W, Park S J. Porous anodic aluminum oxide: anodization and templated synthesis of functional nanostructures [J]. Chemical Reviews, 2014, 114(15): 7487-7556.
- [24] Sulka G D, Parkola K G. Temperature influence on well-ordered nanopore structures grown by anodization of aluminium in sulphuric acid [J]. Electrochimica Acta, 2007, 52(5): 1880-1888.
- [25] Sulka G D, Stepniowski W J. Structural features of self-organized nanopore arrays formed by anodization of aluminum in oxalic acid at relatively high temperatures [J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(14): 3683-3691.
- [26] Meng G, Jung Y J, Cao A, et al. Controlled fabrication of hierarchically branched nanopores, nanotubes, and nanowires [J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America, 2005, 102(20): 7074-7078.
- [27] Belwalkar A, Grasing E, Van Geertruyden W, et al. Effect of processing parameters on pore structure and thickness of anodic aluminum oxide (AAO) tubular membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 319(1-2): 192-198.
- [28] Alkire R C, Gogotsi Y, Simon P. Nanostructured materials in electrochemistry [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [29] Lai M, Riley D J. Templated electrosynthesis of nanomaterials and porous structures [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 323(2): 203-212.
- [30] Zhang J J, Hou X, Liu L H, et al. Optical and magnetic properties of PAA@Fe nanocomposite films [J]. Aip Advances, 2013, 3(7): 0721116.