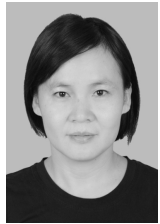


文章编号:1673-9981(2020)01-0036-06

# 热处理对 6013 铝合金显微组织、力学性能和氧化膜质量的影响\*

丁小理<sup>1</sup>, 罗杰<sup>1</sup>, 李建湘<sup>1</sup>, 王顺成<sup>2</sup>

1. 广东和胜工业铝材股份有限公司, 广东 中山 528463; 2. 广东兴发铝业有限公司, 广东 佛山 528137



**摘要:**采用不同的固溶时效热处理方案处理 6013 铝合金, 利用金相显微镜、扫描电镜、维氏硬度计及拉伸实验机等分析仪器, 研究固溶和时效热处理对 6013 铝合金显微组织、力学性能和氧化膜质量的影响。结果表明: 固溶温度越高, 或者固溶时间和时效时间越长, 铝合金中  $Mg_2Si$  析出强化相的尺寸越细小, 分布越均匀, 铝合金的拉伸性能越高, 阳极氧化膜越透亮; 在 550 °C 固溶 30 min 及 170 °C 时效 30 h 的条件下, 6013 铝合金可以获得最优的力学性能, 其维氏硬度值为 131、抗拉强度为 388.1 MPa、屈服强度为 368.5 MPa、伸长率为 10.5%, 同时铝合金还具有优异的氧化效果, 阳极氧化膜通透清亮, 满足 3C 产品对铝合金外壳力学性能和阳极氧化膜质量的双重要求。

**关键词:**6013 铝合金; 固溶; 时效; 阳极氧化

**中图分类号:**TG146.2

**文献标识码:**A

铝合金具有重量轻、比强度高、散热性能好、可氧化着色、可回收利用, 以及独特的金属光泽及质感等优点, 广泛用于智能手机、平板电脑、智能手表、数码相机、随身听等便携式 3C 产品的外壳, 如背板、中框等。随着便携式 3C 产品轻薄化的发展, 急需高强度的铝合金外壳来提高 3C 产品的抗压、抗摔能力, 以避免 3C 产品受压或跌落时出现弯曲、弯折、凹陷等问题。同时消费者的消费观念也在不断的更新和进步, 需求日趋多样化, 要求 3C 产品具有更好的美观装饰效果, 这要求铝合金外壳具有优异的氧化着色效果。

6013 铝合金是美国铝业公司研制的一种综合性能较好的 Al-Mg-Si-Cu 系变形铝合金, 具有高的强度及良好的断裂韧性、抗疲劳性能和塑性加工性能等。6013 铝合金是可热处理时效强化型铝合金, 其主要强化相是  $Mg_2Si$  相,  $Mg_2Si$  析出强化相的形

态、大小和分布不仅会影响 6013 铝合金的力学性能, 还会影响 6013 铝合金制品阳极氧化膜的质量。而  $Mg_2Si$  析出强化相的形态、大小和分布很大程度上又取决于 6013 铝合金的固溶时效热处理工艺。因此, 本文研究了固溶和时效热处理对 6013 铝合金显微组织、力学性能和氧化膜质量的影响。

## 1 实验材料与方法

实验材料为同水平热顶半连续铸造 6013 铝合金圆棒, 在 ARL-460 型光电直读光谱仪上对 6013 铝合金的化学成分进行分析, 结果列于表 1。对 6013 铝合金圆棒在 570 °C 保温 8 h 进行均匀化处理, 然后再进行固溶和时效热处理, 试样编号及热处理方案列于表 2。

收稿日期: 2019-07-31

\* 基金项目: 中山市重大科技计划专项资助(2016A1001); 中山市协同创新中心建设项目资助(2017C1007)

作者简介: 丁小理(1978-), 女, 广东中山人, 工程师, 主要研究方向: 铝合金材料与模具。

表 1 6013 铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 6013 aluminum alloy

| 成分             | Si   | Mg   | Fe   | Cu   | Mn   | Cr    | Ti    | Zn   | Al   |
|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 含量 $\omega/\%$ | 0.68 | 0.91 | 0.08 | 0.66 | 0.25 | 0.002 | 0.014 | 0.02 | 97.4 |

表 2 试样编号及热处理方案

Table 2 Samples number and heat treatment conditions

| 试样编号 | 固溶温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 固溶时间/min | 时效温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 时效时间/h |
|------|--------------------------|----------|--------------------------|--------|
| A1   | 520                      | 10       | 170                      | 10     |
| A2   | 520                      | 30       | 170                      | 10     |
| A3   | 550                      | 30       | 170                      | 10     |
| A4   | 550                      | 30       | 170                      | 30     |

热处理实验完成后,分别在试样上取样,试样经磨制、抛光和腐蚀后,利用 OLYMPUS GX5 型金相显微镜和 JSM6390 型扫描电镜观察合金的显微组织.在 HVS-1000F 型数显维氏硬度计上检测试样的维氏硬度值.将试样加工成标准拉伸试样,在 DNS200 电子拉伸试验机上进行室温拉伸,拉伸速度为 2 mm/min,检测试样的拉伸力学性能.按智能手机用铝合金中框的加工流程(CNC 粗加工、纳米注塑、CNC 精加工、抛光、阳极氧化)对试样进行阳极氧化,然后在 60 W 日光灯、距离 45 cm 条件下对试样的阳极氧化膜质量进行目视观察.

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

图 1 为固溶时效热处理后 6013 铝合金试样的显微组织.从图 1 可看到:A1 和 A2 试样的固溶温度低,试样的晶界及晶粒内上存在较多的大小不等颗粒析出物,如图 1(a)和(b)所示;而 A3 和 A4 试样的固溶温度较高,试样的晶界上的大颗粒物质以及晶粒内的大颗粒物质明显减少,小颗粒物质也有不同程度的减少,如图 1(c)和(d)所示;A1 和 A2 试样的

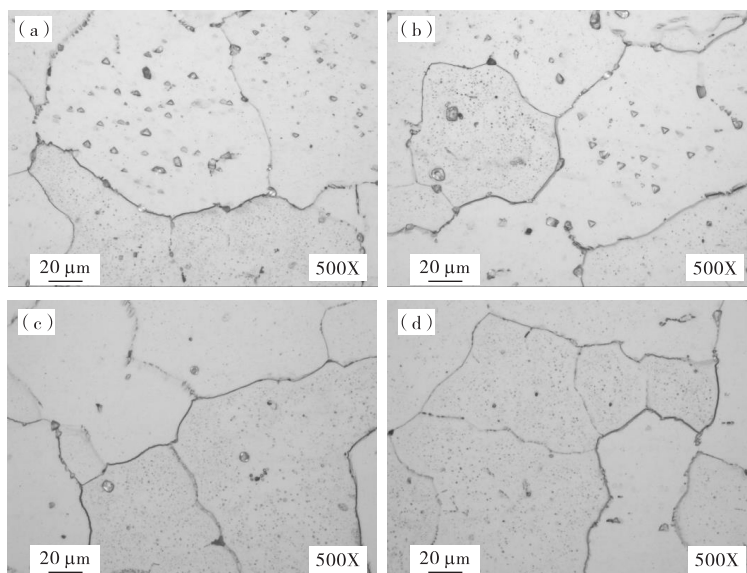


图 1 6013 铝合金试样的显微组织

(a)A1 试样;(b)A2 试样;(c)A3 试样;(d)A4 试样

Fig. 1 Microstructures of 6013 aluminum alloy samples

(a) sample A1; (b) sample A2; (c) sample A3; (d) sample A4

固溶温度相同,保温时间不同,大颗粒物有一定程度的减少;A3和A4试样的固溶工艺完全相同,时效保温时间不同,显微组织所显示出的特征无明显差别.结果表明,显微组织特征与固溶温度关联度最大,其次为固溶时间,时效时间的影响不明显.

图2为固溶时效热处理后6013铝合金试样的扫描电镜图.从图2可看到:A2和A3试样的固溶时间、时效温度和时效时间相同,但A3试样的固溶温度比A2试样的固溶温度高,导致A3试样中的黑色颗粒明显比A2试样中的黑色颗粒少,如图2(b)和(c)所示;A1和A2试样相比,固溶温度、时效温

度和时效时间都相同,但A2试样的固溶时间比A1试样的固溶时间高,A2试样中的黑色颗粒明显比A1试样中的黑色颗粒少,如图2(a)和(b)所示.

通过对试样中的黑色颗粒物进行EDS分析,结果如图3所示.从图3可知,黑色颗粒物为6013铝合金的析出强化相颗粒 $Mg_2Si$ 相,主要为Mg和Si元素;白色颗粒物为Fe相,主要为Fe,Mn和Si元素.上述实验结果表明,析出强化相 $Mg_2Si$ 其特征与固溶温度关联度最大,其次为固溶时间,而时效时间的影响不明显.

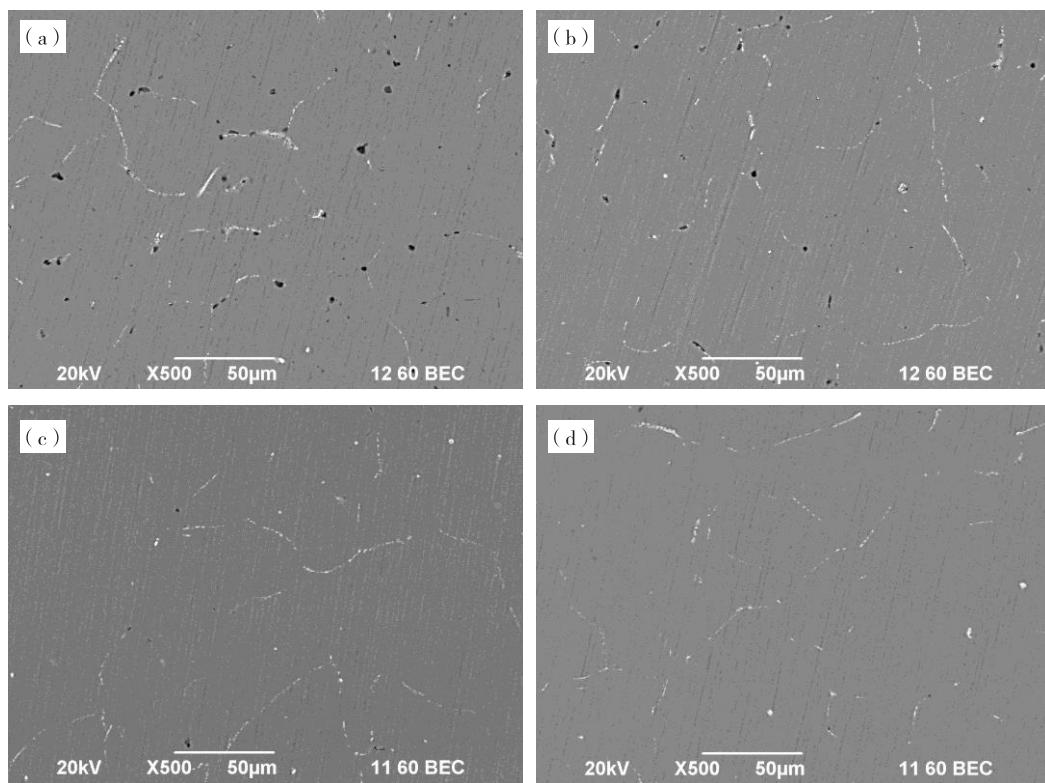


图2 6013铝合金试样的扫描电镜图

(a)A1试样;(b)A2试样;(c)A3试样;(d)A4试样

Fig. 2 SEM images of 6013 aluminum alloy samples

(a)sample A1;(b)sample A2;(c)sample A3;(d)sample A4

## 2.2 力学性能

图4为固溶时效热处理后6013铝合金试样的维氏硬度值.从图4可看到,试样的维氏硬度值在122.6至131之间,其中A1试样维氏硬度值最低,A4试样的维氏硬度值最高.上述结果表明,试样的维氏硬度值与固溶温度、固溶时间和时效时间有关,固溶温度越高、固溶时间或者时效时间越长,试样的

维氏硬度值越高.

表3为固溶时效热处理后6013铝合金试样的拉伸力学性能.从表3可看到,采用不同的固溶时效工艺进行热处理后,试样的抗拉强度和屈服强度有较明显的变化,固溶温度越高或固溶时间、时效时间越长,试样的抗拉强度和屈服强度也越高.在550℃固溶30min及170℃时效30h条件下,6013铝合

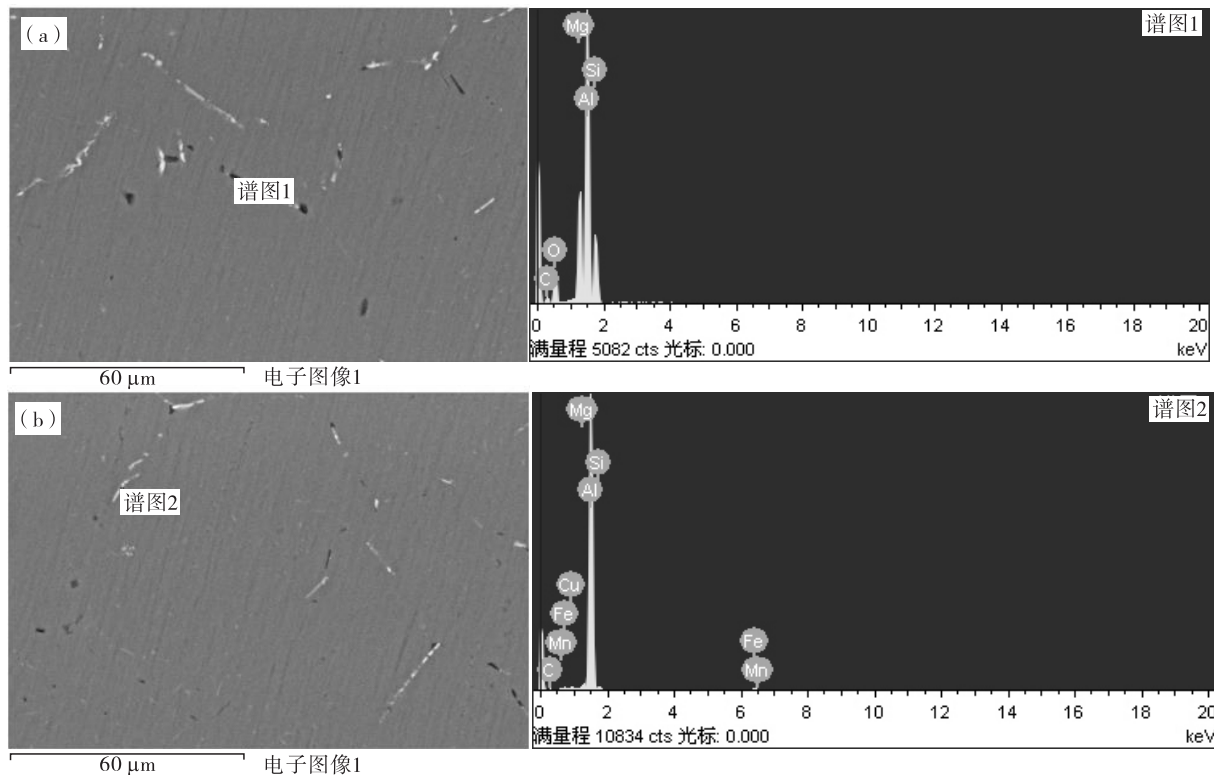


图 3 6013 铝合金试样中析出物的 EDS 分析结果

(a)黑色颗粒物;(b)白色颗粒物

Fig. 3 EDS analysis of precipitates in 6013 aluminum alloy samples

(a)black particles;(b)white particles

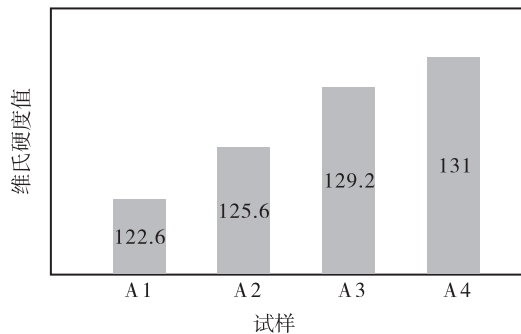


图 4 6013 铝合金试样的维氏硬度

Fig. 4 Vickers hardness of 6013 aluminum alloy samples

表 3 6013 铝合金试样的拉伸力学性能

Table 3 Tensile mechanical properties of 6013 aluminum alloy samples

| 试样编号 | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
|------|----------|----------|-------|
| A1   | 367.0    | 348.7    | 10.1  |
| A2   | 372.5    | 353.9    | 10.2  |
| A3   | 384.3    | 365.6    | 10.5  |
| A4   | 388.1    | 368.5    | 10.5  |

金可以获得最优的力学性能,其抗拉强度为 388.1 MPa、屈服强度为 368.5 MPa、伸长率为 10.5%。

### 2.3 氧化膜质量

表 4 为固溶时效热处理后 6013 铝合金试样阳极氧化膜质量检测结果,图 5 为 6013 铝合金试样阳极氧化成品.从表 4 可看到:由于 A1 和 A2 试样的析出物颗粒大而且数量多,导致试样的阳极氧化膜发麻;而 A3 和 A4 试样的析出物颗粒小而且数量少,试样的阳极氧化膜则透亮,无肉眼可见的区别,能满足 3C 产品对铝合金外壳力学性能和阳极氧化膜质量的双重要求.上述结果表明,析出物颗粒大而且数量多,影响氧化膜的整体效果,原因主要是析出颗粒物在阳极预处理过程掉落,形成凹坑,目视后产生漫反射,最终导致阳极氧化膜不透亮,发麻严重.

综合以上实验结果可知,固溶和时效热处理条件的改变直接影响到 6013 铝合金内部析出物颗粒的大小,并最终影响到 6013 铝合金的力学性能和阳极氧化膜质量.提高铝合金的固溶度,可以提高铝合

表4 6013 铝合金试样阳极氧化膜质量检测结果

Table 4 Quality of anodic oxide film of 6013 aluminum alloy samples

| 试样编号  | A1   | A2    | A3    | A4    |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 氧化膜质量 | 发麻严重 | 发麻较严重 | 氧化膜透亮 | 氧化膜透亮 |

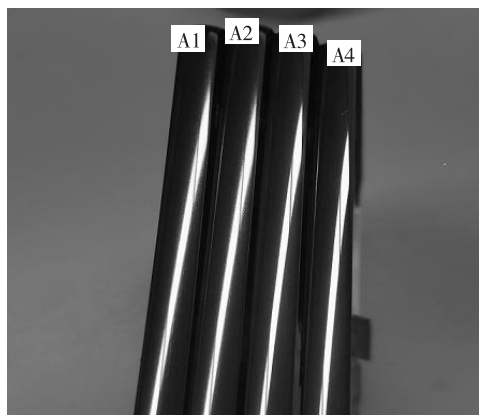


图5 6013 铝合金试样阳极氧化成品

Fig. 5 6013 aluminum alloy anodic oxide samples

金的拉伸力学性能和阳极氧化膜的通透性。而提高固溶度的最优办法是提高固溶温度,其次是延长固溶时间。固溶度不够的6013铝合金,由于存在一定数量颗粒较大的 $Mg_2Si$ 化合物,这些大颗粒化合物不仅会降低铝合金的拉伸力学性能,并在阳极氧化预处理过程掉落,形成孔洞,产生漫反射,影响了阳极氧化膜的透亮度。

### 3 结论

(1)随着固溶温度、固溶时间和时效时间的延

长,6013 铝合金中 $Mg_2Si$ 析出强化相的尺寸越细小,分布越均匀,铝合金的硬度和拉伸力学越高,阳极氧化膜越透亮。

(2)影响6013 铝合金力学性能和阳极氧化膜质量的主要因素是固溶温度,其次是固溶时间,而时效时间的影响不明显。

(3)在550 °C固溶30 min,然后在170 °C时效30 h,6013 铝合金可以获得最优的力学性能,其维氏硬度值为131,抗拉强度为388.1 MPa,屈服强度为368.5 MPa,伸长率为10.5%,同时还具有优异的氧化效果,阳极氧化膜通透清亮。

#### 参考文献:

- [1] 王祝堂,田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1988:66-253.
- [2] 蒋建军. 6063 铝合金挤压型材质量影响因素及解决方法[J]. 铝加工,2005(2):35-39.
- [3] 叶拓. 固溶和时效处理对挤压态6013 铝合金显微组织及动态力学行为的影响[J]. 机械工程材料,2017(6):41-45.
- [4] 陈康敏,固溶温度对6013 铝合金组织和抗晶间腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013(4):46-50.
- [5] 陈准,热处理制度对6013 和6061 合金拉伸性能的影响[J]. 轻合金加工技术,2001(4):25-27.

## Effect of heat treatment on microstructure, mechanical properties and oxide film quality of 6013 aluminum alloy

DING Xiaoli<sup>1</sup>, LUO Jie<sup>1</sup>, LI Jianxiang<sup>1</sup>, WANG Shuncheng<sup>2</sup>

1. Guangdong Hoshion Industrial Aluminum Co., Ltd., Zhongshan 528463, China; 2. Guangdong Xingfa Aluminum Co. Ltd, Foshan, 528137, China

**Abstract:** The effects of solution and aging heat treatment on the microstructure, mechanical properties and oxide film quality of 6013 aluminum alloy were studied by metallographic microscope, scanning electron microscope, vickers hardness tester and tensile test machine. The results show that with the prolongation of solution temperature, solution time and aging time, the smaller the size of the  $Mg_2Si$  precipitation strengthening phase in the 6013 aluminum alloy and the distribution is more uniform. Correspondingly,

(下转第54页)

---

(上接第 40 页)

the vickers hardness and tensile strength of 6013 aluminum alloy are higher and the anodic oxide film is better brighter. The optimum mechanical properties of 6013 aluminum alloy can be obtained by solid solution at 550 °C for 30 min and aging at 170 °C for 30 h. The vickers hardness value is 131, the tensile strength is 388.1 MPa, the yield strength is 368.5 MPa and the elongation is 10.5%, respectively. Meanwhile, the 6013 aluminum alloy also has excellent oxidation effects, the anodic oxide film is transparent and clear, which meets the dual requirements of mechanical properties and anodic oxide film quality of aluminum alloy shell for 3C products.

**Key words:** 6013 aluminum alloy; solution; aging; anodic oxidation