

电场时效对 2014 铝合金 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的影响

肖伯涛^{1,2}, 何长树¹, 宫明龙¹, 赵 骧¹

(1. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室, 沈阳 110004; 2. 南昌理工学院光信息机电工程系, 南昌 330013)

摘要: 借助TEM研究了在 170 °C条件下进行 6、8、10 和 12 h 电场时效对 2014 铝合金析出行为的影响。结果表明: 电场时效能够有效地减小 2014 铝合金中的析出相 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 的尺寸, 且使其弥散分布; 尤其是在时效时间为 12 h 的时候, 其效果更加显著, 此时析出相 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 细小弥散程度随着电场强度的增强而显著提高。这主要是由于电场时效改变了析出相的形核与长大所致。

关键词: 金属材料; 析出相; 电场时效; 2014 铝合金

中图分类号: TG146.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7180(2009)04-0243-5

Effects of electric field aging on the precipitation of $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ phase in 2014 aluminum alloy

Xiao Botao^{1,2}, He Changshu¹, Gong Minglong¹, Zhao Xiang¹

(1. *Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110004, China;* 2. *Department of Optical Information and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330013, China*)

Abstract: Effects of the electric field aging at 170 °C for 6, 8, 10 and 12 h on precipitation behaviors of 2014 aluminum alloy were investigated by transmission electron microscope (TEM). The results show that electric field can reduce the size of the precipitation phase $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ and increase the dispersion of the fine precipitations. Especially, this kinds of effect is very evident when the aging time is 12 h, the dispersion degree of the fine precipitations is increased with increasing the intensity of electric field. This is because that the nucleation and growth of the precipitation phase $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ are changed by the electric field aging.

Key words: metal material; precipitation phase; electric field aging; 2014 aluminum alloy

0 引 言

2014 铝合金是沉淀强化型合金, 其强化机制主要依靠时效过程从过饱和固溶体中析出的沉淀相进行强

化^[1], 而它的力学性能在很大程度上取决于合金中析出相 (θ 相、 β 相及 s' 相^[2]) 的数量、分布及形态。

已有的研究表明, 电场时效对合金的析出相的析出影响颇大: 电场时效使 1420 合金 δ' 相数量增多, 而且

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20050145030)

作者简介: 肖伯涛(1978-), 男, 助教

通信联系人: 赵骧, 教授, zhaox@mail.neu.edu.cn

细小弥散化^[3-5];电场促使纳米铝合金析出相颗粒细小且弥散^[6];在固溶和时效过程中电场可以使 δ' 相的数量增加、尺寸减小,使合金的亚结构细化,同时使位错密度增加^[7]。另外,研究还发现,电场时效可以增加1420铝锂合金中 β' 相的尺寸大小和体积分数^[8];电场促进晶界偏析以及 δ' 相和T相的长大,抑制PFZ形成和长大^[9]。

因此,本文借助TEM研究了电场时效对2014铝合金析出相析出的影响,以期探索一条能够控制2014铝合金析出相的析出,进而改善其力学性能的新途径。

1 实验

实验用2014铝合金板由东北轻合金有限责任公司提供的250 mm×250 mm×800 mm锻造板坯经过轧制而成,其热轧温度为450 °C,终轧厚度为5.5 mm,然后经420 °C中间退火,最后冷轧成厚度为1.7 mm的薄板。铝合金板的化学成分如表1所列。

表1 2014铝合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of 2014 aluminum alloy(mass fraction, %)

| Cu | Mg | Si | Mn | Fe | Ti | Zn | Ni | Cr | Re |
|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 4.42 | 0.54 | 0.91 | 0.89 | 0.20 | <0.10 | <0.20 | <0.05 | <0.01 | <0.005 |

首先在盐浴炉中对2014铝合金板实施502 °C×20 min的固溶处理,然后分别对其在170 °C条件下进行6、8、10和12 h电场时效与非电场时效处理^[10]。借助于TECNAI透射电子显微镜进行析出相的观察与分析。

2 实验结果

图1所示为经过502 °C固溶处理20 min后在170 °C

条件下进行6 h电场时效和非电场时效的2014铝合金试样析出相TEM形貌。其中图1(a)所示为非电场时效试样析出相的TEM形貌,图1(b)和(c)所示为电场时效试样析出相的TEM形貌。由图可知,在非电场时效2014铝合金试样中有片状 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相析出(图1(a));而在电场时效试样中没有看到类似的析出相(图1(b)和(c)),这可能是由于电场时效推迟了析出相的析出所致。

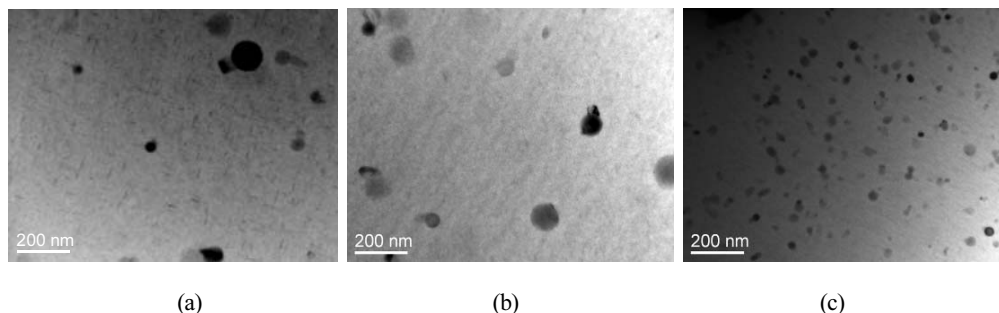


图1 170 °C电场时效与非电场时效6 h试样的析出相的TEM形貌

Fig. 1 TEM morphologies of precipitation of samples aged at 170 °C for 6 h with and without electric field:

(a) $E=0$ kV/cm; (b) $E=2$ kV/cm; (c) $E=4$ kV/cm

图2所示为经过502 °C固溶处理20 min后在170 °C条件下进行8 h电场时效和非电场时效2014铝合金试样析出相的TEM形貌。其中图2(a)所示为非电场时效试样析出相的TEM形貌,图2(b)和(c)所示为电场时效试样析出相的TEM形貌。由图2可知,经过8 h电场时效和非电场时效处理的2014铝合金试样中均有大量的

片状的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相析出,并且在电场时效试样中析出相的析出尺寸比非电场时效试样中析出相的析出尺寸细小且分布弥散,其细小弥散程度随着电场强度的增强而提高。

图3所示为经过502 °C固溶处理20 min后在170 °C条件下进行10 h电场时效和非电场时效2014铝合金试

样析出相的 TEM 形貌。其中图 3(a)所示为非电场时效试样析出相的 TEM 形貌,图 3(b)和(c)所示为电场时效试样析出相的 TEM 形貌。由图 3 可知,10 h 电场时效

和非电场时效 2014 铝合金试样中的析出相均为片状的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相,与 6 h 非电场时效及 8 h 电场时效和非电场时效的 2014 铝合金试样中的析出相相同。

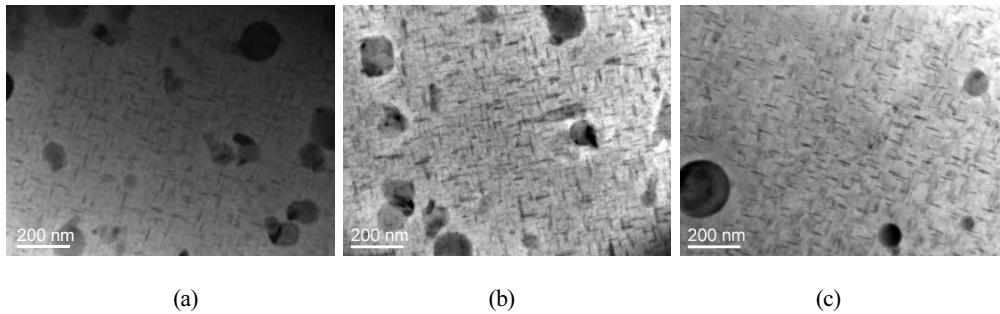


图 2 170 °C 电场与非电场时效 8 h 试样的析出相的 TEM 形貌

Fig. 2 TEM morphologies of precipitation of samples aged at 170 °C for 8 h with and without electric field:
(a) $E=0$ kV/cm; (b) $E=2$ kV/cm; (c) $E=4$ kV/cm

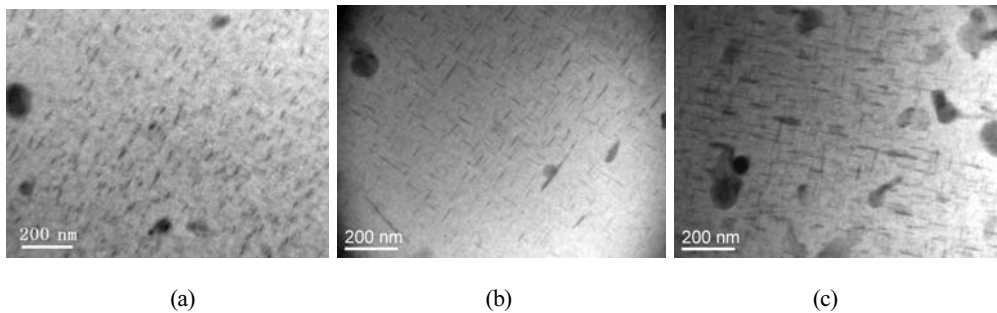


图 3 170 °C 电场与非电场时效 10 h 试样的析出相的 TEM 形貌

Fig. 3 TEM morphologies of precipitation of samples aged at 170 °C for 10 h with and without electric field:
(a) $E=0$ kV/cm; (b) $E=2$ kV/cm; (c) $E=4$ kV/cm

图 4 所示为经过 502 °C 固溶处理 20 min 后在 170 °C 条件下进行电场时效和非电场时效 12 h 的 2014 铝合金试样析出相的 TEM 形貌。其中图 4(a)所示为非电场时效试样析出相的 TEM 形貌,图 4(b)和(c)所示为电场时效试样析出相的 TEM 形貌。由图 4 可知,析出相为片状 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$

相,在非电场时效和 2 kV/cm 电场时效 12 h 的试样中, $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相的析出尺寸显著长大。但是,随着电场强度的增加, $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的析出尺寸与分布的变化规律与电场时效 8 和 10 h 的试样中 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的析出尺寸与分布的变化规律相同。

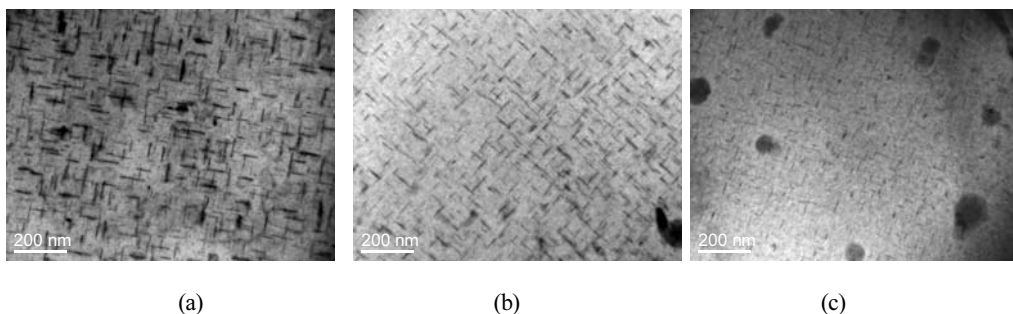


图 4 170 °C 电场与非电场时效 12 h 试样的析出相的 TEM 形貌

Fig. 4 TEM morphologies of precipitation of samples aged at 170 °C for 12 h with and without electric field:
(a) $E=0$ kV/cm; (b) $E=2$ kV/cm; (c) $E=4$ kV/cm

另外,由图1~4还可看出,2014铝合金经过502℃固溶处理20 min后,大部分化合物都已溶入铝合金基体,而未溶入基体的相,其周边也都发生了球化,如图中的黑色粒子^[2]。

图5所示为经过502℃固溶处理20 min后在170℃条件下分别进行8、10和12 h电场时效和非电场时效的2014铝合金试样中析出相的平均尺寸与电场强度之间的关系。

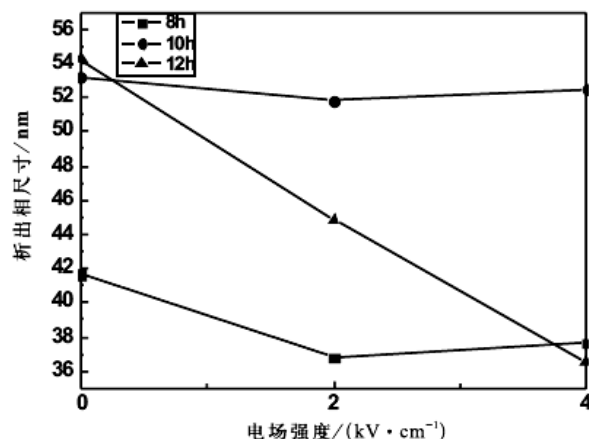


图5 2014铝合金析出相平均尺寸与电场强度之间的关系图

Fig. 5 Average size of precipitations of 2014 Al alloy as a function of intensity of electric field

由图可见,在8和10 h电场与非电场时效处理的试样中, $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的析出尺寸随着电场强度的变化所呈现出的变化规律相同,均是随着电场强度的增加先减小后变大,但是电场时效试样中析出相的尺寸均比非电场时效试样中析出相的尺寸细小;而在12 h电场与非电场时效处理的2014铝合金中析出的 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的尺寸随着电场强度的增强而急剧减小。

3 分析与讨论

合金的时效过程是一个固态相变过程,是第二相粒子从过饱和固溶体沉淀脱溶过程,包括第二相粒子的形核与长大。新相的形核和长大是通过空位控制的长程扩散来运输原子,扩散系数^[6]可表示为:

$$D = a^2 P v_f Z_p \exp(-\Delta G/kT), \quad (1)$$

式中, a 为晶面间距, P 为晶面间原子跃迁几率, Z_p 为晶体原子配位数, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, v_f 为原子向 Z_p 个空位中的1个空位跃迁的几率, ΔG 为原子扩散激活能。

时效过程中2014铝合金试样与电场正极相连接,这样就会有大量感应正电荷富集于试样的表面,感应正

电荷与金属内部的缺陷(如空位等)之间形成微电场 $E^{[1]}$,处于微电场中的金属原子受到的电场力为 $F = ZeE$,其中 Ze 为金属原子所带的有效电荷, E 为电场强度,该力将原子从1个晶位跃迁到邻近空位时所做的功为: $W = Fa$ 。

在恒温时,原子扩散激活能(ΔG)可表示为^[6]:

$$\Delta G = Q - W - T\Delta S, \quad (2)$$

式中, Q 为跃迁原子的内能, ΔS 为原子跃迁引起的熵值变化。

假定 P 、 v_f 不变,则由以上分析可知,2014铝合金进行电场时效时,随着电场强度 E 的增加,金属原子所受到的电场作用力增大,金属原子从1个晶位跃迁到邻近空位时电场所做的功变大,在电场与非电场时效温度相同时,原子扩散激活能就会降低,结合式(1)可知,空位扩散系数将变大,析出相的形核率增大,与此同时,试样中空位的浓度减小,这样就会改变析出相的形核和长大进程。

从2014铝合金的析出相TEM形貌可以看出,在相同的热处理制度下,电场时效试样中析出相的析出尺寸较非电场时效试样中的析出相尺寸小,这主要应归因于电场时效促进了空位的运动,加快了 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的形核速度,同时,由于电场时效降低了铝合金基体内空位的浓度,析出相长大时的驱动力被减小,析出相的长大受到抑制,从而导致析出相细小弥散。

4 结论

经过502℃固溶20 min后在170℃条件下进行电场时效能够有效地减小2014铝合金中 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的析出尺寸,且使其弥散分布;尤其是在电场时效时间为12 h的时候,其效果更加显著,此时 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 析出相的细小弥散程度随着电场强度的增强而显著提高。

[参考文献](References)

- [1] 黄光杰,汪凌云. 时效制度对LD10铝合金组织和性能的影响[J]. 铝加工, 1994, 17(1): 52-55.
Huang Guangjie, Wang Lingyun. Effects of aging on microstructures and mechanical properties of LD10 aluminum alloy [J]. Aluminum Fabrication, 1994, 17(1): 52-55. (in Chinese)
- [2] 金头男,尹志民,肖严庆. LD10合金的时效特性[J]. 轻合金加工技术, 1996, 24(9): 27-30.
Jin Tounan, Yin Zhimin, Xiao Yanqing. The aging features of LD10 aluminum alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1996, 24(9): 27-30. (in Chinese)
- [3] 王秀芳,李仁顺,刘北兴,等. 强电场对预拉伸变形1420合金时效行为的影响[J]. 材料科学与工艺, 1999, 7(12): 39-43.
Wang Xiufang, Li Renshun, Liu Beixing, et al. Effect of strong electric field on aging behavior of tension preformed 1420 alloy [J].

- Material Science and Technology, 1999, 7(12): 39-43. (in Chinese)
- [4] 刘北兴, 王秀芳, 杨德庄, 等. 预轧制变形电场时效对 1420Al-Li 合金组织和性能的影响[J]. 理化检验-物理分册, 2002, 38(7): 277-279.
Liu Beixing, Wang Xiufang, Yang Dezhuang, et al. Effect of pre-rolling deformation and aging in electric field on microstructure and mechanical properties of 1420 Al-Li alloy [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Parta Physical Testing, 2002, 38(7): 277-279.(in Chinese)
- [5] 李仁顺, 王秀芳, 罗健. 预变形电场时效对 1420Al-Li 合金组织与性能的影响[J]. 宇航学报, 1998, 19(3): 57-61.
Li Renshun, Wang Xiufang, Luo Jian. Effect of predeformation and aging treatment in an electric field on microstructure and mechanical properties of 1420 Al-Li alloy [J]. Journal of Astronautics, 1998, 19(3): 57-61. (in Chinese)
- [6] 贾威, 邓江宁, 曾梅光. 快凝 Al9213Fe413V017Si117Nd110 纳米晶合金电场时效过程研究[J]. 材料热处理学报, 2001, 22(4): 13-16.
Jia Wei, Deng Jiangning, Zeng Meiguang. Influence of an electric charge during the aging of RS Al_{92.3} Fe_{4.3} V_{0.7} Si_{1.7} Nd_{1.0} nanocrystalline alloy ribbon [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 2001, 22(4): 13-16.(in Chinese)
- [7] 刘北兴. 电场热处理对 1420 合金组织与性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(2): 156-159.
Liu beixing. Effect of electric field heat treatment on microstructure and properties of alloy1420 [J]. Material Science and Technology, 2002, 10(2): 156-159. (in Chinese)
- [8] Liu Beixing, Li Hongtao, Li Renshun. Effect of aging in electric field on microstructure and properties of 1420 Al-Li a [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 5(1): 85-88.
- [9] 魏齐龙, 陈铮, 刘兵, 等. 电场时效对铝锂合金性能和断裂特性的影响[J]. 稀有金属, 2002, 26(3): 161-165.
Wei Qilong, Chen Zheng, Liu Bing et al. Effect of aging treatment under electric field on properties and fracture characteristics of Al-Li alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2002, 26(3): 161-165. (in Chinese)
- [10] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业出版社, 2000.
Wang Zhutang, Tian Rongzhang. Handbook of the aluminum alloys and its fabrication [M]. Changsha:Central South University Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 曲家惠, 吴静婷, 李四军, 等. 电场作用下 AZ31 镁合金的组织与织构的演变[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(2): 36-39.
Qu Jiahui, Wu jingting, Li Sijun, et al. Microstructures and textures of AZ31 magnesium alloy in electric field [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2006, 34(2): 36-39. (in Chinese)