

高强铝合金板材电脉冲辅助时效热处理工艺研究*

马云龙¹, 湛利华^{2,3}, 徐永谦², 童璨瑜², 谭景升³

(1. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

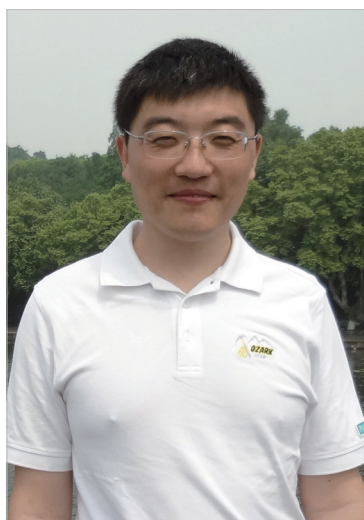
2. 中南大学轻合金研究院, 长沙 410083;

3. 中南大学机电工程学院, 长沙 410083;)

[摘要] 以 2219 铝合金轧制板材为研究对象, 通过仿真分析、电脉冲辅助时效热处理试验、拉伸力学性能测试和透射电镜观察, 系统研究了低密度电脉冲对板材时效热处理过程中电流密度分布、焦耳热效应及其时效后的力学性能与析出相微观组织的影响。结果表明: 电脉冲辅助时效热处理过程中, 板材峰值电流密度呈中心对称分布; 80 A/cm² 低密度脉冲电流作用下, 板材大部分区域的峰值电流密度值在 40~120 A/cm² 范围, 温升最大不超过 1℃。与常规时效工艺相比, 电脉冲辅助时效热处理工艺促进了晶内强化相析出进程, 同时改善了晶内析出相分布, 使板材峰时效时间从 15h 缩短到 10h, 峰时效屈服强度也从 283MPa 提升到 303MPa。综上所述, 电脉冲辅助时效工艺有利于缩短铝合金板材时效热处理周期并改善峰时效力学性能。

关键词: 时效; 电脉冲; 2219 铝合金; 电流密度; 焦耳热效应; 力学性能; 微观组织

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.23/24.042



马云龙

高级工程师, 从事运载火箭结构设计及结构材料研究。

* 基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0306300); 国家自然科学基金重点基金资助项目 (51235010); 国家 973 计划资助项目 (2014CB046602)。

已有研究表明, 在铝合金时效热处理过程中的外场引入会影响强化相析出的数量、形貌及大小等微观特征, 从而改善合金的性能。因铝合金具有优良的导电性, 电场或电脉冲辅助时效热处理工艺引起了国内外学者的广泛关注。Conrad^[1]、Koch^[2]等利用 DSC 技术研究了电场时效对铝锂合金中 T1 相和 S' 相析出动力学的影响, 结果表明: 电场时效对两种析出相的析出动力学产生了不同的影响, 电场对 S' 相的影响较小, 但使 T1 相的析出温度向高温移动。黎俊初等^[3]提出了电场固溶 + 时效成形方法, 该方法较普通固溶处理 + 时效成形表现出更好的成形性和伸长率。郭磊^[4]系统研究了 Al-5%Cu 合金在静电场及脉冲电场时效过程中的微观组织演变规律, 发现施加静电

场或脉冲电场时效后, 合金样品在时效初期的硬度明显上升, 缩短了合金达到峰值硬度所需时间, 提高了时效硬化速率。湛利华等^[5]研究不同频率的正负交变电脉冲对 7075 铝合金组织和性能的影响。结果表明正负交变电脉冲辅助时效热处理比常规时效热处理工艺对铝合金组织和性能的改善效果更加明显。贾树峰^[6]系统研究了电脉冲作用下的恒应力蠕变时效对 2219 铝合金成性行为的影响, 发现电脉冲作用下的蠕变时效可以降低合金的时效析出激活能, 提高合金的形核率, 加速合金的时效析出进程。综上可知, 电场或电脉冲辅助时效的研究目前还仅仅针对铝合金材料尺度的试样进行。而将该技术进一步应用到构件尺寸 (如铝合金板材), 电脉冲作用下板材电流密

度和温度分布、性能和微观组织特征尚无相关文献报道,所以,有必要进一步探索外电场对铝合金板材时效热处理过程的影响机制与作用。

本文以 2219 铝合金轧制薄板为研究对象,进行了常规时效和电脉冲辅助时效两种工艺对比试验。利用 Comsol 软件仿真分析了电脉冲作用下板材电流密度分布和焦耳热效应,确定了电脉冲辅助时效工艺参数。通过常温拉伸力学性能测试和透射电镜观察,探明了有无脉冲电流作用对时效后板材力学性能和强化相微观组织的影响机制。

试验及方法

1 材料与电脉冲辅助时效试验

本文试验所用的材料为某铝业公司提供的 2219 铝合金 O 态轧制板,利用剪板机裁剪成尺寸为 $420\text{mm} \times 250\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的矩形薄板,其主要成分如表 1 所示。

电脉冲辅助时效试验,即在铝合金时效过程中添加额外的电脉冲能场。该试验配备的是自主研发的大功率脉冲电源^[7]。根据 2219 铝合金的热处理规范^[8],对 2219 铝合金 O 态轧制板进行电脉冲辅助时效试验。电脉冲辅助时效试验主要包括固溶、淬火和电脉冲辅助时效 3 个步骤,如图 1 所示。首先,对板材进行固溶处理,固溶温度为 535℃ ,保温时间为 60min 。然后,立即水淬,转移时间小于 35s 。最后,将固溶淬火态板材置于时效炉中,并与电脉冲发生装置连接;板材先随炉升温,当达时效温度后,接通脉冲电流,脉冲电源将在设定作用时间结束后自动关闭,停止脉冲电流作用,板材继续保温进行常规时效直到试验结束,然后把板材取出空冷到室温。本文采用铜圆盘将脉冲电流引入板材,导电铜盘分别放置于板材两端,脉冲电流由发生装置控制;脉冲电源主要参数为:输入电源为三相交流

$380\text{V} \pm 15\%/50\text{Hz}/50\text{kVA}$,脉冲形式为正脉冲,脉冲电流为 $0\sim 5400\text{A}$ (幅值)可调;电流频率为 $100\sim 1000\text{Hz}$ 连续可调;占空比 $10\%\sim 90\%$ 可调。

2 板材电流密度分布与温度场仿真

在电脉冲辅助时效过程中,板材内部脉冲电流通过导电盘接触引入,其内部电流密度分布尚未可知,且难于用试验方法定量测量。此外,电流在通过导体时会产生焦耳热效应,并引起一定程度的温升,也可能影响板材的性能。因此,拟采用 Comsol Multiphysics 多物理场有限元分析软件作为计算工具,查明脉冲电流在板材上的分布规律,并得出焦耳热效应对时效温度的影响。板材初始状态为 $420\text{mm} \times 250\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的矩形平板件,导电盘是 $\phi 60\text{mm}$ 的圆盘,加载贴模后几何模型如图 2(a)所示。采用四面体单元对几何模型进行网格划分,导电盘附近区域网格局部细化,见图 2(b)。

当脉冲电流从一个导电盘传递

到另一个导电盘时,板材上的电子流沿最小路径运动,使板材上电流密度呈不均匀分布,同时电流接通时会因电阻损耗而产生一定的热量,即焦耳热效应。焦耳热效应通过电流守恒定律和能量守恒定律来描述。环境温度设置为时效温度,即 165℃ ,脉冲电流参数根据前期研究结果初步设定为:占空比为 50% ,频率为 500Hz ,电流作用时间为 1h ,电流密度 $80\text{A}/\text{cm}^2$ 。板材各个面均与周围环境进行自然对流,周围空气环境的温度即为时效温度 165℃ (438.15K),传热系数为 $5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。此外,板材材料为 2219 铝合金,而导电盘为纯铜,其具体的物性参数见表 2。

3 时效后板材力学性能和微观组织测试

时效成形试验结束后,利用由三思泰捷生产的 CMT-5504 型电子万能试验机进行常温拉伸力学性能测试。拉伸试样按国家标准^[9]金属板材拉伸试样尺寸加工制造。在经过

表1 2219铝合金的主要化学成分(质量分数) %

Cu	Mn	Si	Fe	Mg	Zn	Zr	Al
5.8~6.8	0.2~0.4	0.2	0.3	0.02	0.1	0.1~0.25	余量

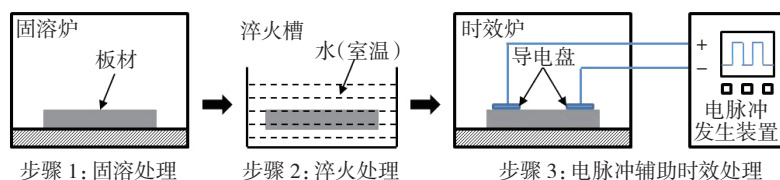
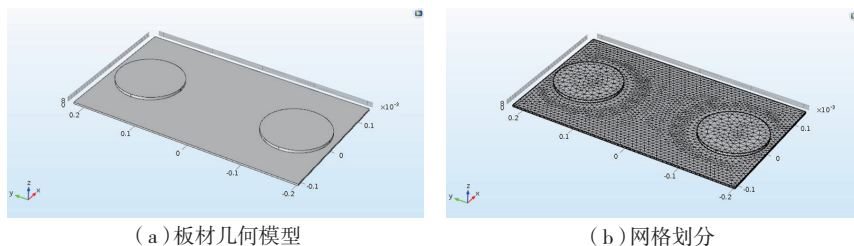


图1 电脉冲辅助热压罐时效成形过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electric pulse assisted autoclave aging process



(a) 板材几何模型

(b) 网格划分

图2 板材几何模型与网格划分

Fig.2 Component geometry model and meshing

表2 板材与导电盘材料物性参数

金属	电导率 / ($\times 10^7 \cdot S \cdot m^{-1}$)	常压热容 / ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	相对介电 常数	密度 / ($kg \cdot m^{-3}$)	导热系数 / ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
铜	5.998	385	1	8960	400
铝合金	3.744	900	1	2700	238

电脉冲时效处理后的板材 4 个不同区域位置取拉伸样并编号,分别进行常温力学性能拉伸测试。同时,在板材中心附近取透射电镜(TEM)观察试样。力学性能测试和 TEM 微观组织观察取样位置如图 3 所示。微观组织特征决定材料性能。为了阐明电脉冲作用下板材的时效强化机制,本文利用 JEM-2100F 场发射高分辨透射电镜观察合金的时效析出相微观组织。该设备由日本株式会社生产,操作电压为 200KV。试样是直径为 3mm 的双喷电解减薄试样。电解双喷液为 HNO_3 和 CH_3OH 的混合溶液,体积分数分别为 30% 和 70%,使用液氮将电解液温度控制在 $-35 \sim -25^\circ C$ 间,电压设置为 15V。

结果与讨论

1 电脉冲作用下板材电流密度分布和焦耳热效应

电流趋向于沿最小路径运动,使板材上电流密度呈不均匀分布,同时产生耳热效应引起温升。为模拟真实的电脉冲辅助时效试验过程,板材表面环境温度假设为均匀的时效温度,即 $165^\circ C$ 。脉冲电流参数根据前期研究成果^[5-6,10-15]及相关文

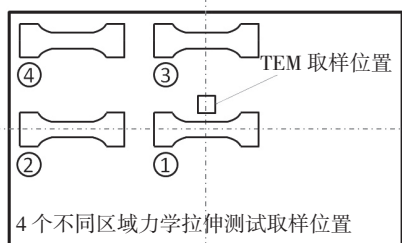
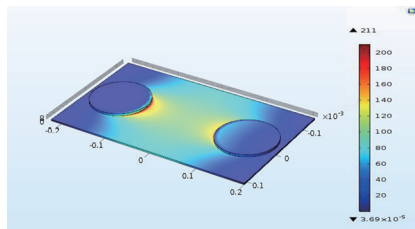


图3 力学性能测试和TEM微观组织观察取样位置

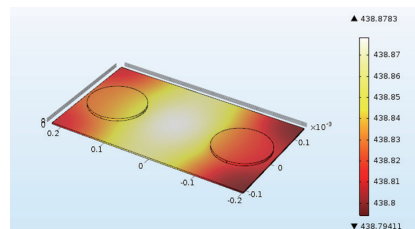
Fig.3 Sampling position of mechanical properties test and TEM microstructure observation

献^[16-22]设定为: 占空比为 50%, 频率为 500Hz, 电流作用时间为时效前期 1h, 电流密度为 $80A/cm^2$ 。此外, 板材与周围环境满足自然对流。图 4 (a) 和 (b) 是板材在电脉冲作用下的峰值电流密度及其温度场的分布云图, 单位分别是 A/cm^2 和 K。从图 4 (a) 可以看出, 板材电流密度呈中心对称分布。电流密度值仅在两导电盘相对侧边的区域最高(约为 $200A/cm^2$), 电流较小的地方在矩形板 4 个端角附近(约为 $1A/cm^2$), 而在两个导电盘之间区域的电流密度值在 $40 \sim 120A/cm^2$ 范围。这说明, 在此电脉冲辅助时效条件下, 板材内部电流密度分布不均匀。从图 4 (b) 的温度场云图可以看出, 在电脉冲辅助时效 1h 后, 板材中心处温度较高, 而边缘处温度较低。板材的最高温度为 439.1K, 与时效温度 438.15K 相比, 温升为 $0.95^\circ C$ 。温升差异不大的原因可能是脉冲电流断续电流使得板材内部进行充分热传递。

在上述的时效温度和电参数下进行电脉冲辅助时效, 并在板材上不同位置粘贴上热电偶, 监测试验过程中板材上的温度情况, 取板材中心处温度监测结果与常规试样的监测结果对比, 如图 5 所示。常规试样与电脉冲作用下的试样温差小于 $1^\circ C$, 与



(a) 构件峰值电流密度



(b) 温度场

图4 构件峰值电流密度及其温度场分布云图

Fig.4 Current density field and the temperature distribution of the component

仿真结果相一致。综合仿真结果和试验测试结果可知, 在本试验的时效工艺制度和电参数下, 焦耳热效应对时效温度的影响可以忽略不计。

2 电脉冲作用对时效热处理板材力学性能的影响

有无电脉冲作用的 2219 铝合金时效性能演变规律见表 3。表中力学性能数据是板材 4 个不同位置试样力学性能的平均值及方差值。可知, 板材固溶淬火后屈服强度、抗拉强度和延伸率分别是 143MPa、339MPa 和 22.1%。随着时效时间的延长, 有无电脉冲作用的合金都经历了欠时效、峰时效和过时效 3 个阶段, 屈服强度和抗拉强度随时间呈先迅速上升后缓慢下降的趋势; 而延伸率则都随着时效时间的延长而逐渐降低。有无电脉冲作用下不同时效时间后的方差值差异不显著也说明材料最终力学性能对脉冲电流密度不敏感。

图 6 是根据表 3 中两种工艺不同时效时间的力学性能数据绘制的性能演化图。常规人工 $165^\circ C$ 时效条件下, 板材经 15h 后达到峰时效(屈服强度 284MPa、抗拉强度 426MPa, 延伸率为 19.4%), 而在电脉冲辅助时效条件下, 板材在 10h 后就达到峰时效(屈服强度 303MPa、抗拉强度 420MPa, 延伸率为 19.2%)。从性能的演变规律可以看出, 电脉冲作用大幅提高了合金的时效进程, 使合金到达峰值时效的时间缩短了 5h, 并提高了板材的屈服强度, 但抗拉强度和延伸率稍有降低。

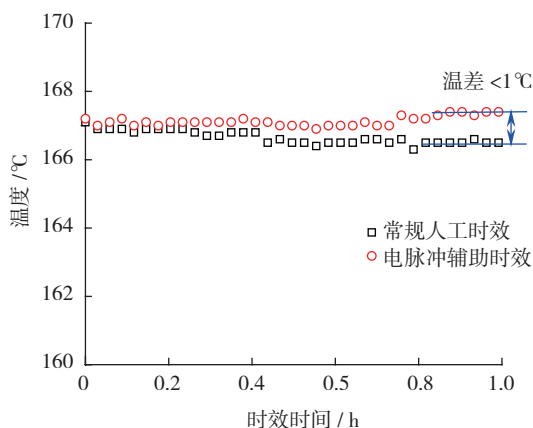


图5 常规时效成形与电脉冲辅助时效成形工艺温度变化曲线对比

Fig.5 Comparison of temperature between the conventional aging process and the electric pulse assisted aging process

表3 有无电脉冲作用的2219铝合金板材时效后力学性能对比

时效时间 /h	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa		抗拉强度 σ_b /MPa		延伸率 δ /%	
	常规	电脉冲	常规	电脉冲	常规	电脉冲
0	143 ± 3	143 ± 2	339 ± 3	339 ± 4	22.1 ± 1.1	22.1 ± 1.3
8	257 ± 4	282 ± 3	409 ± 4	423 ± 4	22.0 ± 1.2	21.7 ± 1.4
10	271 ± 5	303 ± 4	415 ± 5	424 ± 4	21.5 ± 1.3	19.2 ± 0.9
12	276 ± 6	287 ± 3	421 ± 4	416 ± 5	21.0 ± 0.9	19.1 ± 1.6
15	284 ± 7	—	426 ± 6	—	19.4 ± 1.0	—
18	283 ± 5	—	422 ± 5	—	19.4 ± 1.0	—

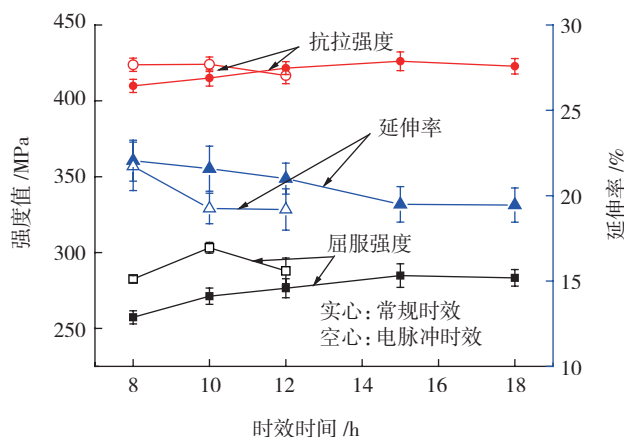


图6 有无电脉冲作用条件下板材不同时效时间后的力学性能对比

Fig.6 Comparison of the mechanical properties between the conventional aging process and the electrical pulse assisted aging process

3 电脉冲作用对时效成形板材微观组织的影响

在时效温度为 165 °C 下,2219 铝合金常规时效(15h)和电脉冲辅助时效(10h)峰时效后的透射电镜(TEM)观察结果如图 7 所示。TEM

照片的电子束入射方向为 [100] 方向。此外,为对比有无电脉冲作用下析出相尺寸和分布的差异,图 8 给出了两种的析出相尺寸分布和面积分数。定量数据是从至少 5 张不同倍数的晶内析出相 TEM 照片中统计获

取。从图 7 (a)可以看出,常规时效处理 15h 后合金基体内已经析出了较多互相垂直的针状析出相 GP 区 / θ' ,析出相分别沿平行于 [010]AL 和 [001]AL 两个方向析出。常规时效处理 15h 后析出相的平均尺寸和面积分数分别是 47.1nm 和 1.8% (图 8)。图 7 (b)为常规时效处理 15h 后晶界微观组织形貌,可以发现,晶界内没有明显的晶界析出相和无沉淀析出带。同时,晶界处和晶界附近可以观察到粗大的弥散相,尺寸范围为 0.2~0.5 μm 之间^[23]。相比之下,在时效中加入了脉冲电流的试样在 10h 后已达到峰值时效状态,从图 7 (c)可以看出,在电脉冲前期 1h 作用条件下,10h 电脉冲辅助时效板材析出相均匀而弥散,同样均匀地沿平行于 [010]AL 和 [001]AL 两个方向交叉析出。虽然电脉冲时效 10h 后析出相尺寸与常规时效 15h 后并无明显差异,但析出相的面积分数明显大于常规时效 15h 时的试样(图 8)。产生这一现象的主要原因可能是电脉冲的作用下提高了析出相的形核率并促使析出相均匀长大。图 7 (d)给出了电脉冲辅助时效板材峰时效处理后的晶界微观组织图像,此时晶界微观形貌与常规人工时效峰时效条件下晶界微观组织并无显著差异。综合有无电脉冲条件下,板材峰时效微观组织可以推断,电脉冲对材料晶内微观组织有明显的改善作用,有助于促进合金晶内析出相均匀形核,而对材料晶界微观组织的影响不显著。

时效强化是提高铝合金强度的主要手段,目前一般用位错理论来解释这种强化现象。根据位错阻力来源的不同,时效强化又可以概括为 3 类强化机制,即内应变强化机制、在质点周围生成位错环的机制、脱溶质点被位错切割的机制^[24]。在时效开始阶段,脱溶相与铝基体共格且尺寸较小,此时位错主要以切过方式运动;随着时效的进行,脱溶相的尺寸

和体积分数逐渐增大,位错的切过阻力也随之增大,当脱溶相长大到一定尺寸时,位错切过质点所需应力将大于在质点周围成环所需的应力,此时位错绕过质点机制开始起主要作用。位错切过机制起主要作用时,强化效果随脱溶相尺寸增大而增大,而位错绕过机制起主要作用时则表现为脱溶相质点越小合金强化增量越大。

位错切过第二相的临界切应力可以用公式表示^[25]:

$$\Delta\tau = \left(\frac{2.74E^3\varepsilon^3b}{\pi T(1+\nu)^3} \right)^{\frac{1}{2}} f^{\frac{5}{6}} r^{\frac{1}{2}}$$

式中, E 表示正弹性模量; ε 表示两相常数差异度函数; b 表示位错的柏氏矢量模; T 表示位错线张力; ν 表示泊松比; f 表示第二相体积分数; r 则表示质点平均半径。其中 $k = ((2.74E^3\varepsilon^3b) / (\pi T(1+\nu)^3))^{1/2}$ 为与材料相关的常数。

从式中可以看出,位错切过第二相的临界应力与第二相体积分数 f 成正相关的关系,即第二相体积分数越高,则位错切过第二相所需的切应力越大,反映在宏观上则表现为材料的强度越高。由图 8 可知,板材电脉冲辅助时效工艺峰时效后的晶内析出相体积分数要高于常规人工时效工艺峰时效后的晶内析出相体积分数。所以板材电脉冲辅助时效工艺峰时效后的屈服强度要高于常规人工时效工艺的屈服强度。而相比板材常规人工时效工艺,电脉冲辅助时效工艺下抗拉强度和延伸率稍有降低,其原因可能是电脉冲的电子风力作用冲开了部分相互缠结的位错,一定程度减少了位错强化(加工硬化)对抗拉强度的贡献。

结论

通过开展有无电脉冲作用下 2219 铝合金板材时效试验,分别从板材的电流密度和温度场分布、力学性能和微观组织等方面分析了脉冲

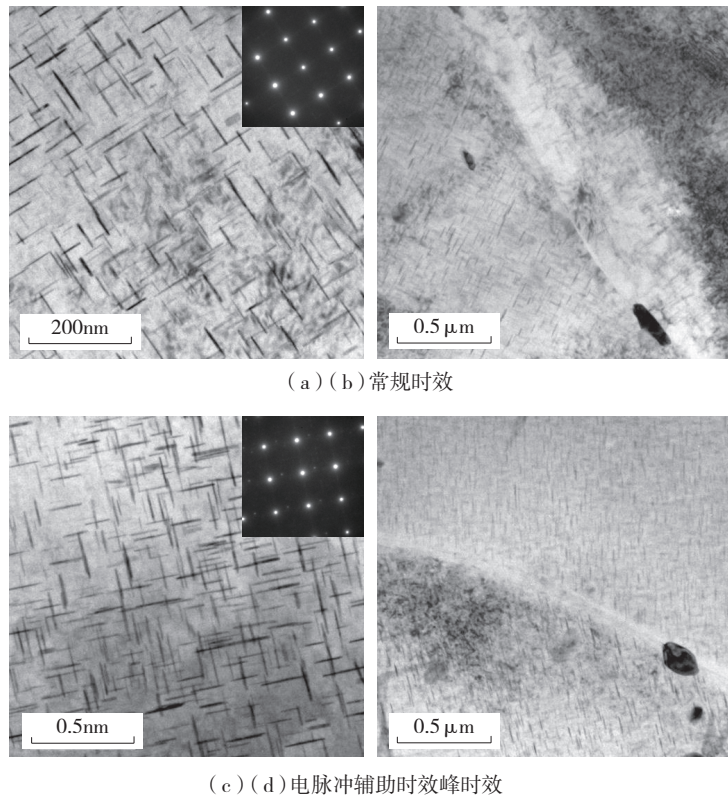


图7 铝合金常规时效和电脉冲辅助时效峰时效后的晶界晶内TEM
Fig.7 TEM images after the conventional aging process

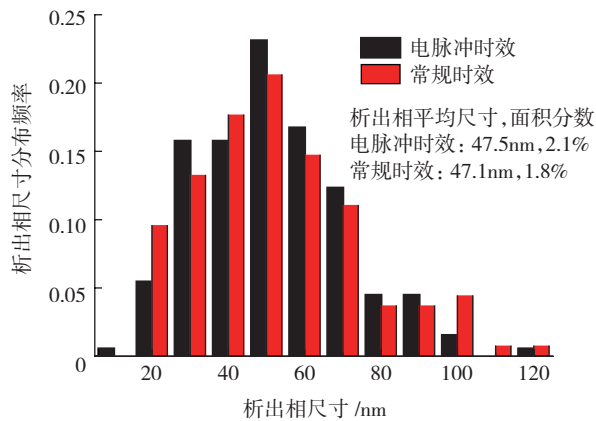


图8 铝合金常规时效和电脉冲辅助时效峰时效后的晶内析出相统计图
Fig.8 Quantitative statistical data of the precipitates size and frequency between the conventional aging process and the electrical pulse assisted peak aging process

电流对板材时效工艺的影响,得出结论如下:

(1) 板材时效过程中引入电脉冲会使得板材内部电流密度呈不均匀分布。在低密度脉冲电流下,板材的温升小于 1℃。因此,设定合理的电脉冲参数是电脉冲辅助时效工

的基础,也是避免温升过大导致时效温度偏差的主要手段。

(2) 有无电脉冲作用下,不同时效时间后的方差值差异不显著也说明材料最终力学性能对脉冲电流密度不敏感。与常规人工时效后板材的力学性能相比,电脉冲辅助时效工

艺有效促进了板材时效强化进程,提高了板材的峰值屈服强度,但对抗拉强度和延伸率稍影响不显著。这说明电脉冲时效工艺可以提高板材时效热处理效率,缩短生产周期。

(3) 电脉冲辅助时效工艺峰时效后晶内时效强化相比常规时效工艺更密且均匀,改善了 2219 铝合金板材晶内析出相微观组织,但对晶界微观组织影响不显著。

参考文献

- [1] CONRAD H, JR A F S, CAO W D, et al. Electro plasticity—the effect of electricity on the mechanical properties of metals[J]. *Applying Materials Science and Engineering*, 1990, 42(9): 28–33.
- [2] KOCH C C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, 287(2): 213–218.
- [3] 黎俊初, 李明华, 刘大海. 电场固溶处理对 2A12 铝合金时效成形的影响[J]. *锻压技术*, 2015, 40(6): 102–107.
- [4] LI Junchu, LI Minghua, LIU Dahai. Effect of electrostatic field solution on aging forming of 2A12 aluminum alloy[J]. *Forging Technology*, 2015, 40(6): 102–107.
- [5] 郭磊. 外加电场下 Al-5%Cu 合金的时效析出行为与机理[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [6] GUO Lei. Experimental and precipitation behavior of Al-5% Cu alloy under external electric field[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [7] 湛利华, 贾树峰, 张皎. 电脉冲时效对 7075 铝合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014(3): 600–605.
- [8] ZHAN Lihua, JIA Shufeng, ZHANG Jiao. Effect of electrical pulse aging on microstructure and properties of 7075 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014(3): 600–605.
- [9] 贾树峰. 2219 铝合金电脉冲作用下的应力时效行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [10] JIA Shufeng. 2219 aluminum alloy electric pulse under the action of stress aging behavior[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [11] 祝志坤. 高性能铝合金特种工艺专用脉冲电源的研究与设计[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [12] ZHU Zhikun. Study and design of special pulse power for high performance aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [13] 王祝堂. 变形铝合金热处理工艺[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011.
- [14] WANG Zhutang. Deformed aluminum alloy heat treatment process[M]. Changsha: Central South University Press, 2011.
- [15] 李久林, 梁新邦. GB/T2039—1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法国家标准编制说明[J]. *冶金标准化与质量*, 1998(3): 4–8.
- [16] LI Jiulin, LIANG Xinbang. GB/T2039—1997 Metallic tensile creep test method Specification for national standards[J]. *Metallic Standardization and Quality*, 1998(3): 4–8.
- [17] 尹旭妮, 湛利华, 赵俊. 2219 铝合金稳态蠕变本构方程的建立[J]. *中国有色金属学报*, 2014(9): 2250–2256.
- [18] YIN Xuni, ZHAN Lihua, ZHAO Jun. Establishment of steady-state creep constitutive equation for 2219 aluminum alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014(9): 2250–2256.
- [19] 湛利华, 张皎, 贾树峰. 2219 铝合金应力时效强度演变规律及其强化模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016(7): 2235–2241.
- [20] ZHAN Lihua, ZHANG Jiao, JIA Shufeng. Study on stress aging law of 2219 aluminum alloy and its strengthening model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016(7): 2235–2241.
- [21] 谭斯格. 工艺参数对 2524 铝合金板材蠕变时效形成性影响规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [22] TAN Sige. Study on the influence of process parameters on creep formation performance of 2524 aluminum alloy sheet[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [23] 王萌, 湛利华, 李文科, 等. 2219 铝合金蠕变时效研究及宏微观本构建模[J]. *热加工工艺*, 2017(6): 221–225.
- [24] WANG Meng, ZHAN Lihua, LI Wenke, et al. Study on creep aging of 2519 aluminum alloy and macro microstructure[J]. *Hot Working Technology*, 2017(6): 221–225.
- [25] ZHAN L, LIN J, DEAN T A. A review of the development of creep age forming: experimentation, modelling and applications[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(1): 1–17.
- [26] 湛利华, 杨有良. 大型构件蠕变时效成形技术研究[J]. *航空制造技术*, 2016(13): 16–23.
- [27] ZHAN Lihua, YANG Youliang. Research on creep aging forming technology for large scale components[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(13): 16–23.
- [28] 刘晓艳. 含 Ag 的 Al-Cu-Mg 耐热铝合金微观组织与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [29] LIU Xiaoyan. Study on microstructure and properties of Al-Cu-Mg heat-resistant aluminum alloy containing Ag[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [30] 黄官伟. 静电场对 7075 铝合金时效成形性能的影响研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- [31] HUANG Guanwei. Electrostatic field on the impact of 7075 aluminum alloy forming performance[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [32] 李智燕. 电场时效对 2E12 铝合金的组织性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [33] LI Zhiyan. Effects of electric field aging on microstructure and properties of 2E12 aluminum alloy[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [34] 李智燕, 易丹青, 李荐, 等. 电场对 2E12 铝合金时效硬化曲线和微观组织的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2009(5): 749–751.
- [35] LI Zhiyan, YI Danqing, LI Jian, et al. Effect of electric field on aging hardening curve and microstructure of 2E12 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Science and Engineering*, 2009(5): 749–751.
- [36] 徐前刚, 武保林, 万刚, 等. 直流电场对 Al-4.5%Cu 合金定向凝固组织的影响[J]. *航空材料学报*, 2006(1): 16–19.
- [37] XU Qiangang, WU Baolin, WAN Gang, et al. Effect of DC electric field on directionally solidified microstructure of Al-4.5% Cu alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006(1): 16–19.
- [38] 何树先, 王俊, 周尧和. 电流在金属凝固过程中的应用[J]. *特种铸造及有色合金*, 2001(5): 28–31.
- [39] HE Shuxian, WANG Jun, ZHOU Yaohe. Application of current in solidification of metal[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2001(5): 28–31.

(下转第 53 页)