

# 低温加热对铝合金 7150-T77 状态性能和组织的影响

Effect of Low Temperature Heating on Properties and Microstructure of Aluminum Alloy 7150-T77

史春玲<sup>1,2</sup>, 张建勋<sup>1</sup>

(1 西安交通大学, 西安 710049; 2 西安飞机公司, 西安 710089)

SHI Chun-ling, ZHANG Jian-xun

(1 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

China; 2 Xi'an Aircraft Company, Xi'an 710089, China)

**摘要:** 针对铝合金 7150-T77 状态进行了加热实验研究, 观察了不同加热温度下其性能和组织的变化。研究结果表明: 随着加热温度的升高, 材料的电导率升高, 硬度和拉伸性能降低; 当加热温度大于 175℃时, 材料的电导率、硬度和拉伸性能开始显著变化; 当加热温度升高至 185℃时, 材料的硬度和屈服强度已经降低为不合格; 当加热温度继续升高, 材料的硬度和屈服、抗拉强度降低更多。加热温度超过 175℃时,  $\alpha$  晶粒再结晶,  $\eta'$  相明显长大, 因此热成形加热温度不应超过 175℃; 用来确定机械加工产生的可疑软化区的电导率参考值不应大于 38% IACS。7150-T77 热成形加热温度应控制在 125~175℃范围内。

**关键词:** 铝合金; 7150-T77; 性能; 组织; 热成形

**中图分类号:** TG166.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2007)11-0033-04

**Abstract:** The heating test research aimed at 7150-T77 alloy is performed. The changes of that properties and microstructure under different heating temperatures have been observed. The test results show that, in company with increasing of heating temperature, material's conductivity, hardness and tensile property debase. When heating temperature greater than 175℃, material's conductivity, hardness and tensile property changes notability. When heating temperature greater than 185℃, material's conductivity, hardness and tensile property have changed to be disqualification. When heating temperature keep on heighten, material's conductivity, hardness and tensile property have changed more down. When heating temperature greater than 175℃, grain  $\alpha$  has re-crystallized and phase  $\eta'$  grows up obviously. To ensure material property without greater drop during thermoforming, temperature part be heated shall be not high than 175℃. Conductivity reference value to determine the soften zone due to machining shall not more than 38% IACS. Synthesizes thermoformingbility and behavioral against heating, 7150-T77 thermoforming heating temperature shall be controlled in the range of 125-175℃.

**Key words:** aluminum alloy; 7150-T77; property; microstructure; thermoforming

20 世纪 80 年代后期 Alcoa 公司成功开发了 7150-T77 合金, 它第一次在铝合金中实现了既满足具有很高的断裂韧性、优异的抗疲劳性能和抗腐蚀性能而又不牺牲强度的目标, 是新一代(第四代)航空轻质高强结构材料<sup>[1-3]</sup>。7150 合金具有良好的压缩屈服性能, 当用于抗压结构件时具有很大的优势。当零件图纸要求 7150 合金的采购、使用状态为 T77 状态时, 不能采用退火态预成形后再进行淬火校正的成形方法, 只能直接在已硬化的 T77 状态下热成形。为了保证零件的力学性能不因热成形而下降, 只能采用不改

变材料内部组织状态的低温热成形工艺方法<sup>[4,5]</sup>。在零件加热成形时, 必须对加热温度(或模具加热温度)和加热时间进行严格控制控制。一般而言, 零件加热温度只有在此材料状态最终时效温度以下, 才能不改变材料内部组织状态和力学性能。但 7150-T77 合金的热处理工艺属近期国际专利技术, 没有文献作详细报道<sup>[6]</sup>, 目前还不知道此材料的最终时效温度。为了确保热成形时不使材料性能显著下降, 本工作拟进行加热温度对 7150-T77511 性能和组织影响的工艺研究, 为热成形生产提供依据。

1 实验

在进口 7150-T77511(材料规范 AMS4345) 型材(XCJ6-1) 纵向上截取 10 组试样; 实验加热温度从 125 ~ 215℃之间每隔 10℃取一点, 共 10 个温度, 保温 45min 出炉空冷, 测量试样的电导率、硬度和常规拉伸性能。

原材料的硬度为 94.8 HRB、电导率为 36.8% IA CS、拉伸性能见表 1。

表 1 7150-T77511 型材原材料拉伸性能

Table1 Test result of tension properties of 7150-T77511 extrusion raw material			
Direction of test	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_s$ / MPa	$\delta$ / %
L	667	650	10.9
Required by AMS434	$\geq 600$	$\geq 565$	$\geq 8$

试样加热在 RJF-36-6 型空气循环电炉中进行, 炉温均匀性  $\pm 5^\circ\text{C}$ 。一般规定热成形的最大累计加热时间为 45min, 所以, 试样入炉后, 炉温恢复到设定温度再保温 45min 出炉空冷。

电导率测量用 Sigmatest D2.068 型电导仪, 每个试样测 5 点取平均值。硬度测量选用 TH300 型洛氏硬度计, 每个试样测 5 点取平均值。拉伸性能在 1186 型电子拉力实验机上测试, 每个温度点三个试样, 取平均值。光学组织在莱卡 MEF 4A 卧式显微镜上观察。在 JEM-2000EX 透射电镜上做薄膜透射观察。

2 实验结果与分析

2.1 加热温度对 7150-T77511 硬度、电导率和力学性能的影响

图 1 是加热温度对 7150-T77511 常规拉伸性能的影响曲线。可见, 随着加热温度的升高, 抗拉强度和屈服强度均呈下降趋势, 低于 195℃下降缓慢。当温度超过 195℃时,  $\sigma_b$  快速下降; 低于 190℃时,  $\sigma_b$  高于 AMS4345 的要求值 600MPa。当温度超过 185℃时,  $\sigma_s$  快速下降; 低于 180℃时,  $\sigma_s$  高于 AMS4345 的要求值 565MPa。与表 1 的数据比较可知, 125℃加热使  $\sigma_b$  下降很少, 但使  $\sigma_s$  下降高达 20MPa。

图 2 是加热温度对硬度的影响曲线。可见, 随着加热温度的升高, 硬度呈下降趋势, 低于 175℃下降缓慢, 当加热温度大于 185℃时, 硬度开始显著降低。与拉伸曲线相比较, 185℃加热后的硬度(92.8HRB)对应于合格的强度, 却对应于不合格的屈服强度。

图 3 是加热温度对电导率的影响曲线。可见, 随

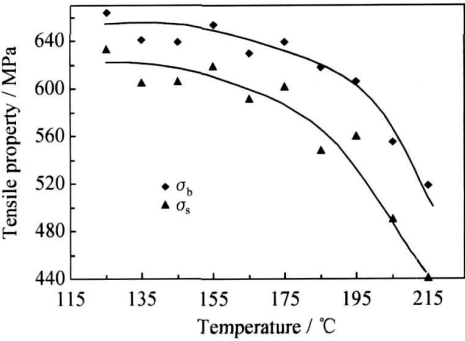


图 1 加热温度对拉伸性能的影响

Fig 1 Effect of heating temperature on tensile proprieties

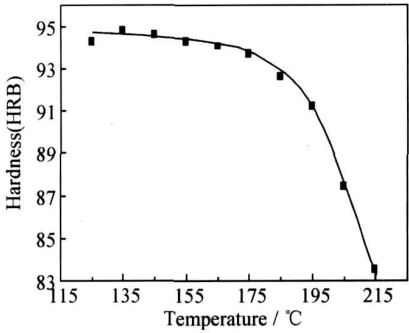


图 2 加热温度对硬度的影响

Fig 2 Effect of temperature on hardness

着加热温度的升高, 电导率呈上升趋势, 低于 175℃上升缓慢, 当加热温度大于 185℃时, 电导率加速升高。与拉伸曲线相比较, 185℃加热后的电导率(37.8% IA CS)对应于合格的强度, 却对应于不合格的屈服强度。

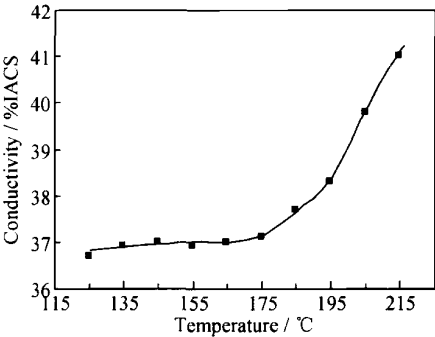


图 3 加热温度对电导率的影响

Fig 3 Effect of temperature on conductivity

为确保热成形时不使材料性能显著下降, 加热温度应不超过 175℃; 热成形前后硬度变化差值应不大于两个 HRB; 电导率应不大于 38% IACS。

在零件制造过程中, 机械加工产生的热量也会

零件的最终性能产生影响, 所以对于机械加工产生的热量也应按此控制。由不适当机械加工可能产生的软点, 通常用硬度实验法是不易查出的, 电导率实验可以用来确定可疑软化区。实验结果表明, 软化区的电导率参考值应不大于 38% IACS。

2 2 加热温度对 7150-T77511 显微组织的影响

2 2 1 加热前、后 7150-T77511 状态的光学显微组织

图 4 为加热前试样 7150-T77511 原材料的显微组织。由图 4 可以看出, 冷变形时拉长的  $\alpha$  晶粒还没有完全再结晶, 但是, 一部分拉长的晶粒中已形成细小的等轴晶粒, 这就是 7150-T77511 状态的光学显微组织特征。

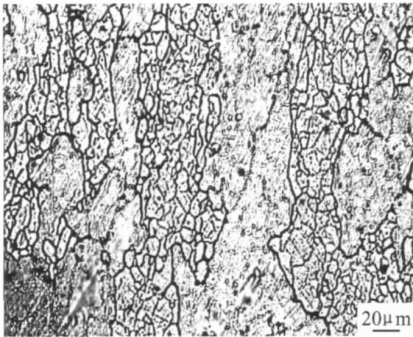


图 4 7150-T77511 原材料的显微组织  
Fig 4 Microstructure of raw material

175℃和 185℃加热后的显微组织见图 5、6。与图 4 相比, 拉长的  $\alpha$  晶粒尺寸明显变小, 说明再结晶程度有所发展。175℃加热后材料的电导率、硬度和拉伸性能开始显著变化, 抗拉强度相对于原材料下降了约 20 MPa, 屈服强度相对于原材料下降了约 50 MPa。185℃加热后材料的抗拉强度相对于原材料下降了约 40 MPa, 屈服强度下降了约 100 MPa, 已低于 AMS4345 要求值, 这应该与晶界和基体都已处于过时效状态有相当关系。

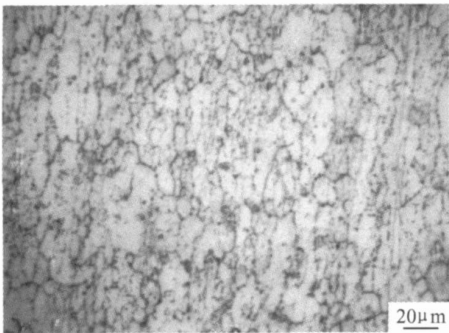


图 5 175℃加热后材料的显微组织  
Fig 5 Microstructure after heating at 175℃

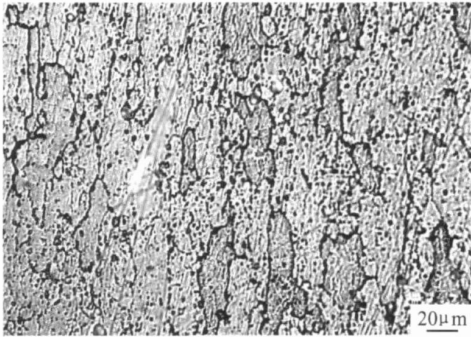


图 6 185℃加热后材料的显微组织  
Fig 6 Microstructure after heating at 185℃

粒更细小, 等轴化程度更高, 说明  $\alpha$  晶粒已经基本再结晶。组织的这种变化对材料性能的影响进一步加强, 材料的抗拉强度下降了约 140 MPa, 屈服强度下降了约 210 MPa。需要强调说明的是, 强度的大幅度下降还应该有时效强化相的重要影响。

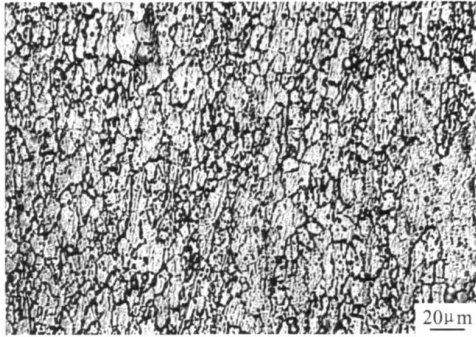


图 7 215℃加热后材料的显微组织  
Fig 7 Microstructure after heating at 215℃

2 2 2 加热前、后 7150-T77511 状态的透射电镜组织

图 8 是 7150-T77511 原材料的透射电镜组织, 可以看出,  $\alpha$  晶内弥散分布着大量的时效析出相  $\eta'$ , 晶界上有大小不等的、断续的析出相  $\eta$  (图 8b), 这可能就是 7150 合金的回归再时效的正常组织。根据 7000 系列铝合金时效机理可知, 自然时效或 120℃以下一级时效后, 主要强化相为“GP”区+ 少量  $\eta'$  相; 150~ 190℃二级时效后, 主要强化相是  $\eta'$  相。虽然还无资料证实 7150-T77 是经过回归再时效处理 (RRA 处理) 及其工艺参数, 但有资料<sup>[6, 7]</sup> 分析认为 T77 状态与 RRA 处理密切相关。回归处理是将 T6 态的合金在低于固溶处理温度以下的较高温度短时加热, 或在高于时效温度以上的较低温度长时间加热后快冷, 使  $\alpha$  晶内的部分  $\eta'$  相回溶, 同时也使晶界上的连续链状析出相  $\eta$  合并和聚集而不再连续, 再时效后晶内又析出  $\eta'$  强化相, 而晶界仍为不连续的非共格析出物。经过完整的 RRA 处理后, 晶粒内部形成了如同时效到最大强度

215℃加热后的显微组织见图 7。可以看出,  $\alpha$  晶

(T6 状态) 的组织, 而晶界形成的无析出带类似软化时效(T 73 状态) 后的组织。由于形成这样两种显微组织

特征的结合使合金具备了高强度、高抗应力腐蚀开裂性和高抗剥落腐蚀性。

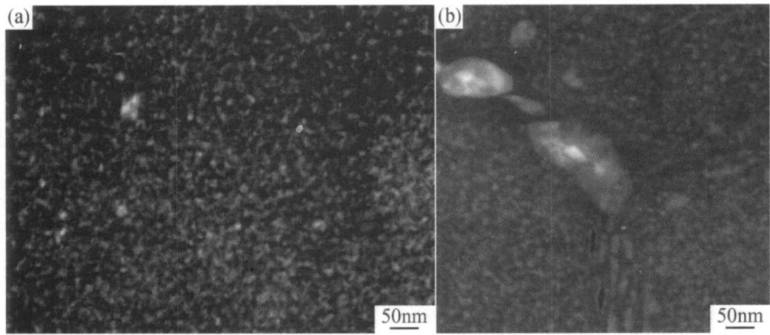


图 8 7150-T77511 原材料的电镜组织 (a) 暗场; (b) 明场  
Fig 8 TEM of raw material  
(a) dark field image; (b) bright field image

图 9 是经过 165℃加热后材料的透射电镜组织,

可见  $\alpha$  晶内  $\eta'$  相的数量有所减少而尺寸有所长大。

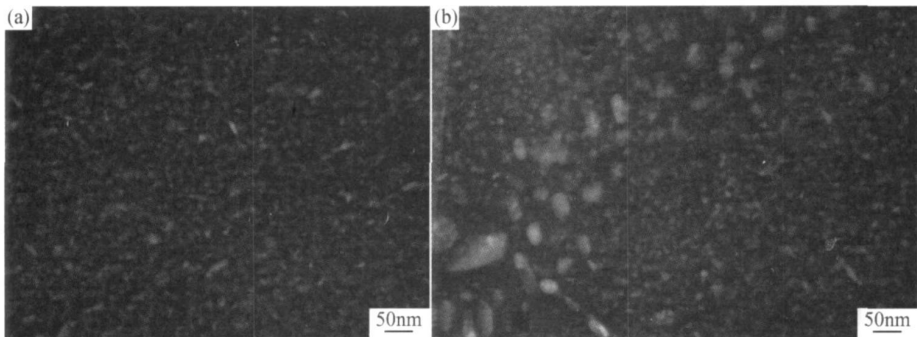


图 9 经过 165℃加热后材料的电镜组织 (a) 暗场; (b) 明场  
Fig 9 TEM after heating at 165℃  
(a) dark field; (b) bright field

图 10 是经过 175℃加热后材料的透射电镜组织, 可见  $\alpha$  晶内  $\eta'$  相的尺寸进一步长大。强化相的长大无疑会明显减低材料的强度, 这与图 2 的曲线相吻合, 说

明 175℃可能已超过再时效温度。因此, 可以确认原材料经过回归处理, 再时效温度应在 150~175℃之间。

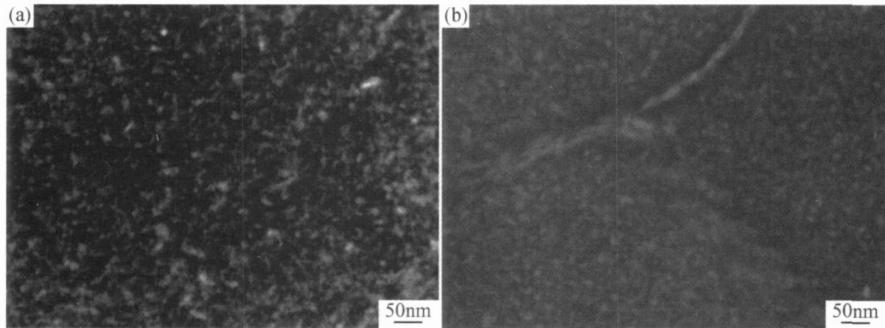


图 10 经过 175℃加热后材料的电镜组织 (a) 暗场; (b) 明场  
Fig 10 TEM after heating at 175℃  
(a) dark field; (b) bright field

- 2908.
- [10] 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, 2004. 216.
- [11] 王周成, 唐毅, 许杰. AZ91D 镁合金微弧阳极氧化膜及表面处理 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(增刊): 292–295.
- [12] 李鑫庆, 陈迪勤, 余静琴. 化学转化膜技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 231.
- [13] MCNEILL W. The Cr-22 coating for magnesium [J]. Metal Finishing, 1955, 53(12): 57–59.
- [14] SCHMELING, EDITH L, ROSCHENBLECK, et al. Method of preparing the surfaces of magnesium and magnesium alloys [P]. USA Patent: 4976830, 1990-12-11.
- [15] SCHMELING, EDITH L, ROSCHENBLECK, et al. Method of producing protective coatings that are resistant to corrosion and wear on magnesium and magnesium alloys [P]. USA Patent: 4978432, 1990-12-18.
- [16] BARTAK, DUANE E, LEMIEUX, et al. Hard anodic coating for magnesium alloys [P]. USA Patent: 5470664, 1995-11-28.
- [17] BARTON, FRANCIS T, MACCULLOCH, et al. Anodization of magnesium and magnesium-based alloys [P]. USA Patent: 6280598, 2001-08-28.
- [18] TAN A L K, SOUTAR A M, ANNERGREN I F, et al. Multi-layer sol-gel coatings for corrosion protection of magnesium [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, (198): 478–482.
- [19] SHAN D Y, ZHANG R F, HAN E H. Effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film on corrosion resistance of pure Mg and its anodic coating [J]. Materials Science Forum, 2005, 488–489: 865–868.
- [20] 蔡启舟, 王栋, 骆海贺, 等. 镁合金微弧氧化膜的  $\text{SiO}_2$  溶胶封孔处理研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(10): 612–614.
- [21] 刘元刚, 张巍, 高瑾, 等. 镁合金微弧氧化涂装体系的研究 [J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(2): 213–217.
- [22] LIU Y G, ZHANG W, LI J Q. Microarc electrodeposition of ceramic films on double electrodes of AZ91D magnesium alloy by symmetrical AC pulse method [J]. Surface Engineering, 2003, 19(5): 345–350.
- [23] 李澄, 黄明珠, 周一扬. 提高铝及铝合金耐蚀性的无机覆盖膜 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(3): 177–178.
- [24] 王玲, 张巍, 李久青. 镁合金微弧氧化及涂装耐电偶腐蚀的研究 [J]. 材料保护, 2005, (4): 12–14.
- [25] 王天石, 何劼, 夏乐洋, 等. 镁合金微弧氧化膜有机封孔耐腐蚀性能的研究 [J]. 表面技术, 2006, 35(6): 8–10.
- [26] 袁兵, 袁森, 蒋百灵, 等. 镁合金微弧氧化及后续涂装耐盐雾腐蚀的研究 [J]. 材料保护, 2006, 39(9): 15–17.
- [27] 蒋百灵, 张淑芬, 吴国建. 镁合金微弧氧化陶瓷层耐蚀性的研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(5): 300–303.
- [28] LIU Z M, GAO W. A novel process of electroless Ni-P plating with plasma electrolytic oxidation pretreatment [J]. Applied Surface Science, 2006, (253): 2988–2991.

收稿日期: 2007-05-09; 修订日期: 2007-08-30

作者简介: 张荣发(1965—), 男, 博士, 教授, 从事镁合金腐蚀与防护的研究, 联系地址: 江西科技师范学院 224 信箱(330013)。E-mail: rfzhang-10@163.com

(上接第 36 页)

### 3 结论

(1) 7150-T77511 的硬度和拉伸性能随加热温度升高而降低。当加热温度升高至  $185^\circ\text{C}$  时, 材料的  $\sigma_s$  已经降低为不合格。要确保热成形不使材料性能显著下降, 零件加热温度不应超过  $175^\circ\text{C}$ , 热成形前后硬度变化差值应不大于 2 个 HRB。

(2) 随加热温度的升高, 特别是超过  $175^\circ\text{C}$  后,  $\alpha$  晶粒再结晶, 时效强化相明显减少和长大。

(3) 电导率随加热温度的升高而升高, 当电导率高于 38% IACS ( $185^\circ\text{C}$  加热) 时, 材料的  $\sigma_s$  已经降低为不合格。确定机械加工产生的可疑软化区的电导率参考值应不大于 38% IACS。

(4) 生产过程中, 机械加工产生的热量应予以严格控制, 应确保零件发热温度不超过  $175^\circ\text{C}$ 。

### 参考文献

- [1] 甘卫平, 范洪涛, 许可勤, 等. Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金研究进

展 [J]. 铝加工, 2003, (3): 6–12

- [2] 张永甲. 飞机抗压结构用铝合金的开发 [J]. 轻合金加工技术, 1998, 21(10): 37–43
- [3] 张君尧. 铝合金材料的新进展 (1) [J]. 轻合金加工技术, 1998, 26(5): 1–6
- [4] 张国昌. 铝合金的低温热成形工艺 [J]. 昌河科技, 2003, (2): 19–22
- [5] 吴继森. 7075 铝合金型材下陷热成形工艺 [J]. 航空制造技术, 2004, (1): 77–82
- [6] 谢燮揆. Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金 RRA 处理 [J]. 轻合金加工技术, 1996, 24(2): 31–32
- [7] 宫波, 赖祖涵. 时效和 RRA 处理对国产 7050 铝合金性能的影响 [J]. 东北工程学报, 1989, 10(5): 483–488

收稿日期: 2007-01-20; 修订日期: 2007-07-21

作者简介: 史春玲(1965—), 女, 高级工程师, 工程硕士学位, 一直从事金属材料及热处理工艺工作, 联系地址: 西安飞机公司技术中心 (710089)。E-mail: scfshichunling@163.com