

## 7A55 铝合金预拉伸板材的回归再时效处理

廖忠全, 罗先甫, 郑子樵, 蔡彪, 钟申

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用拉伸性能测试、慢应变速率拉伸测试、DSC 分析、电导率测试及透射电镜观察, 研究不同回归再时效(RRA)处理制度对 7A55 铝合金淬火预拉伸(W51)板材显微组织、拉伸性能和抗应力腐蚀(SCC)性能的影响。结果表明: 采用 120 °C、24 h 预时效, 180 °C、60 min 回归处理和 120 °C、24 h 终时效的 RRA 工艺, 可使 7A55 合金获得与 T6 态相当的强度, 而电导率大大提高, 抗应力腐蚀性能接近 T73 态水平。7A55 合金经适当的 RRA 处理后, 晶内保持类似于 T6 状态的显微组织结构, 为细小、弥散的  $\eta'$ 相和极少量的  $\eta$  相; 同时使晶界析出物的大小和分布特征与 T73 状态类似, 为呈断续、孤立分布的粗化平衡相。

**关键词:** 7A55 铝合金; 回归处理; 再时效处理; 应力腐蚀; 微观组织

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

## Optimum retrogression and reaging treatment of pre-stretched 7A55 aluminum alloy plate

LIAO Zhong-quan, LUO Xian-fu, ZHENG Zi-qiao, CAI Biao, ZHONG Shen

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The effects of retrogression and reaging (RRA) treatment on the microstructure, tensile properties and resistance to SCC of a pre-stretched 7A55 aluminum alloy plate were studied by tensile test, slow strain rate tensile test, DSC analysis, conductivity measurement and transmission electron microscopy(TEM) observations. The results show that perfect mechanical and stress corrosion resistance properties can be obtained if the alloy is treated by the RRA of 120 °C, 24 h pre-ageing, 180 °C, 45 min retrogression and 120 °C, 24 h re-aging. The strength of the alloy is almost the same compared with the T6 sample, while the conductivity increases greatly, and the stress corrosion resistance property enhances to the levels of T73 condition. Treated by proper RRA, small amount of  $\eta$  and a great amount of fine and dispersive precipitates  $\eta'$  are observed in the matrix which is similar to that of T6 condition, while the coarse and discontinuous equilibrium precipitates are observed at the grain boundaries which is analogous to that of the T73 condition.

**Key words:** 7A55 Al alloy; retrogression treatment; reaging treatment; stress corrosion; microstructure

7000 系高强高韧铝合金是航空、航天、兵器和交通运输等行业重要的结构材料之一<sup>[1-2]</sup>。此系列合金虽然在峰时效(T6)状态下具有很高的强度, 但抗应力腐蚀(SCC)性能较差。采用双级过时效处理如 T73、T74 和 T76, 虽然可使合金得到较好的抗应力腐蚀性能, 但强度相对于 T6 态, 一般降低 10%~15%<sup>[3]</sup>。为了解决强度和抗应力腐蚀性能之间的矛盾, 1974 年以色列

飞机公司的 CINA<sup>[4]</sup>发明了回归再时效(RRA)工艺, 采用这种热处理工艺能够在保持铝合金 T6 状态强度的基础上将抗应力腐蚀性能提高到接近 T73 水平, 为此, 各国开展了大量的研究工作<sup>[5-6]</sup>。RRA 现已成为提高 7000 系铝合金综合性能的有效手段之一, 被广泛用于飞机机身框架、翼梁、壁板、机翼蒙皮、加强筋、起落架支撑部件和铆钉等构件的热处理中。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB619503)

收稿日期: 2011-10-14; 修订日期: 2012-05-09

通信作者: 郑子樵, 教授; 电话: 0731-88830270; E-mail: s-maloy@csu.edu.cn

美国 Alcoa 公司在 1991 年开发了高性能 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金(7055 合金,国内牌号为 7A55)<sup>[7-8]</sup>,并且开发了针对 7055 合金的 RRA 热处理工艺(T77 处理),7055-T77 热处理状态的制品已在 B777 和 A380 等先进民用飞机中获得广泛的应用,如上翼蒙皮、水平尾翼、龙骨架、座轨和货运滑轨等。我国也将采用 7055 合金制作国产大飞机机翼上壁板和长桁。近 10 年以来,国内已开展了较多关于 7055 合金的研究。其中,张新明课题组详细研究了 7055 合金的均匀化制度和固溶处理制度<sup>[9-11]</sup>,郑子樵课题组则在 7055 合金的常规 RRA 工艺、连续 RRA 工艺和双级时效工艺方面进行了大量的研究<sup>[12-14]</sup>。但公开发表的报道主要集中在 7055 合金薄板,而大飞机上所用 7055 合金以中厚板居多,且由于国外具体的 T77 工艺高度保密,所以,研究和开发可工业化应用的 7A55 合金厚板的 RRA 热处理制度对于我国大飞机的发展具有十分重要的意义。由于传统的 RRA 处理工艺过程中高温回归时间很短(几十秒到几分钟),对于厚截面产品不适合工业化应用。因此,本文作者以工业化生产的 7A55 铝合金预拉伸(W51)厚板为研究对象,通过差热分析(DSC)、室温拉伸、慢应变拉伸测试、电导率测量和透射电镜(TEM)观察,研究不同回归温度和时间对 7A55 合金晶内、晶界微观组织演变及合金常规力学性能和抗应力腐蚀性能的影响,确定一种回归温度较低和回归时间更长的 RRA 热处理制度,希望更适合工业化生产条件下 7A55 合金厚板的 RRA 处理。

## 1 实验

实验材料为东北轻合金有限责任公司提供的 50 mm 厚 7A55 铝合金淬火预拉伸(W51)热轧板。首先进行 120 °C, 24 h 的预时效(T6 时效处理),然后将试样分别在 160、170、180、190 和 200 °C 进行回归处理,最后进行 120 °C、24 h 的再时效。作为比较, T73 处理采用(108 °C, 8 h)+(177 °C, 8 h)的工艺。

拉伸样品均是沿厚板轧制方向截取圆棒状试样,采用 MTS 810 材料试验机进行拉伸性能测试,拉伸速率为 2 mm/min。电导率测量在 D60K 数字金属电导率测量仪上进行,测量前用标准块进行校准,试样尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm。慢应变速率拉伸实验在 WDML-1 型慢速率拉伸应力腐蚀试验机上进行,应变速率为  $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,腐蚀溶液为 3.0% NaCl + 0.5% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(质量分数)水溶液,根据 GB/T 15970.7—2000<sup>[15]</sup>采用慢应变速率拉伸的抗拉强度、断裂时间和强度损

失率来评价合金的抗应力腐蚀性能。透射电镜观察在 FEI Tecnai G<sup>2</sup>20 透射电镜上进行。在 NETZSH STA449C 差热分析仪上对预时效试样进行差热分析实验,升温速率为 10 °C/min。

## 2 结果与分析

### 2.1 DSC 分析

图 1 所示为合金在 120 °C 预时效 24 h 后的 DSC 曲线。由图 1 可以看出,预时效状态合金析出相的溶解温度范围在 110~205 °C 之间,溶解的峰值温度为 179.5 °C。

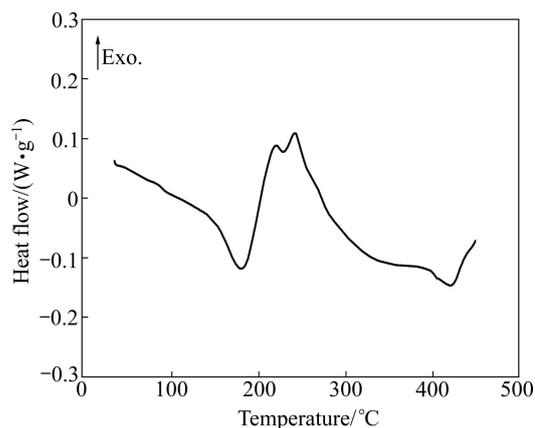


图 1 合金 120 °C 预时效 24 h 的 DSC 曲线

Fig. 1 DSC thermogram of studied alloy in pre-aging at 120 °C for 24 h

### 2.2 力学性能及电导率变化

回归时间为 45 min 时,合金拉伸性能和电导率随回归温度的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,随着回归温度的升高,合金强度逐渐下降;180 °C 以下合金仍然保持很高的强度,当回归温度超过 180 °C 时,合金强度快速下降。合金电导率随着回归温度的升高而单调上升,且上升幅度较大。合金在 180 °C 回归并在 120 °C 再时效后的强度与 160 °C 和 170 °C 回归条件下的相差不大,但是电导率提高较多;而在 190 和 200 °C 下回归虽然合金电导率进一步提高,但强度下降太多。考虑到利用 RRA 处理是为了在保持合金较高强度水平下提高合金抗应力腐蚀性能,而电导率的升高又与合金抗应力腐蚀性能的提高紧密相连<sup>[16-17]</sup>,因此,综合力学性能、电导率和 DSC 数据确定 7A55 合金 RRA 处理较优的回归温度为 180 °C。

确定回归温度后,通过改变回归时间来优化合金的 RRA 热处理制度。图 3 所示为回归温度为 180 °C

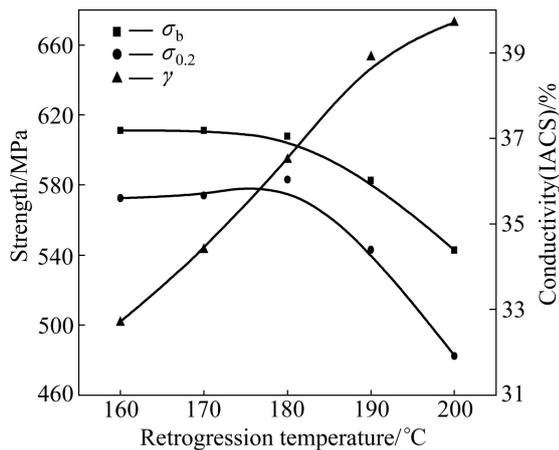


图2 回归时间为45 min时合金力学性能和电导率随回归温度的变化

Fig. 2 Change of mechanical properties and conductivity of alloys after RRA at different retrogression temperatures for 45 min

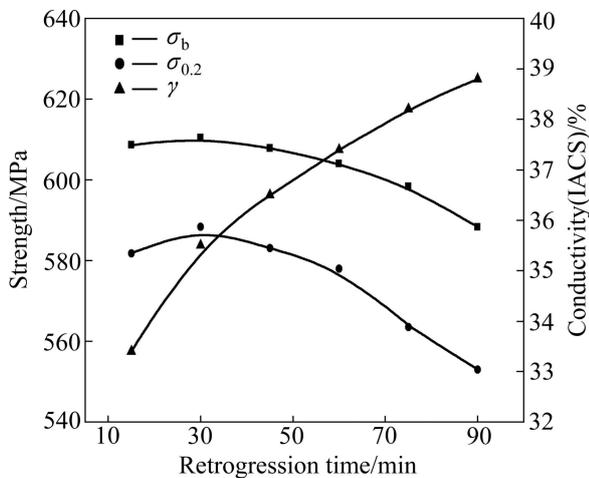


图3 180 °C回归温度下RRA处理合金的力学性能和电导率随回归时间的变化

Fig. 3 Change of mechanical properties and conductivity of alloys after RRA with different retrogression times at retrogression temperature of 180 °C

时, 7A55合金经RRA处理后的抗拉强度和电导率随回归时间的变化曲线。由图3可知, 在180 °C进行回归处理条件下, 7A55合金的抗拉强度随回归时间的延长先略微上升再逐渐降低, 电导率随回归时间的延长而升高。虽然进一步延长回归时间可继续增加合金的电导率, 但也会导致合金强度太低, 因此, 综合考虑确定7A55合金RRA处理的回归时间为60 min。

本研究确定180 °C、60 min为7A55合金RRA

处理时的回归处理制度。经此RRA处理后, 合金的抗拉强度、屈服强度和电导率分别为604 MPa、578 MPa和37.4%(IACS); 与峰值时效态(T6态)合金相应性能608 MPa、546 MPa和30.6%(IACS)相比, 抗拉强度只降低了4 MPa, 屈服强度提高了32 MPa, 电导率提高了6.8%(IACS), 表明合金的抗应力腐蚀性能大大改善; 与T73态合金相应性能512 MPa、412 MPa和41.7%(IACS)相比, 抗拉强度提高了96 MPa, 屈服强度提高了134 MPa, 电导率则下降了4.3%(IACS)。

### 2.3 慢应变拉伸性能

表1所列7A55合金经不同时效处理后在空气和腐蚀介质中进行慢应变拉伸试验的结果。由表1可以看出: 对7A55合金进行T6时效处理后, 虽然在空气中慢应变速率拉伸强度最高, 但在腐蚀溶液中的强度显著降低, 且断裂时间也明显缩短(从在空气中的22.2 h到溶液中的10.3 h)。经T73过时效处理后, 7A55合金抗应力腐蚀性能大大提高, 强度损失降至1.4%, 但不利的是抗拉强度下降太多。与T6状态相比, 经本实验确立的较优RRA工艺处理后, 合金在空气中的慢应变拉伸强度下降较少, 而在溶液中的强度甚至略有提高且断裂时间也延长; 合金的抗应力腐蚀性能大幅提高, 其实验合金强度损失率下降至2.5%, 接近T73过时效状态的1.4%。这表明本实验确定的RRA工艺可在降低较少强度的条件下显著改善实验合金的抗应力腐蚀性能。

表1 7A55合金的慢应变速率拉伸实验结果

Table 1 Slow strain tensile test results of 7A55 alloy

Condition	Atmosphere	Tensile strength/MPa	Time to failure/h	Strength loss/%
T6	Air	622.4	22.2	6.0
	Medium	585.2	10.3	
RRA	Air	607.8	21.1	2.5
	Medium	592.6	13.9	
T73	Air	515.8	22	1.4
	Medium	508.5	16.5	

RRA heat-treatment condition: (120 °C, 24 h)+(180 °C, 60 min)+(120 °C, 24 h).

### 2.4 TEM观察

图4所示为经不同时效处理后合金的TEM像。由图4(g)可见, 经T6时效处理的样品晶内析出相主

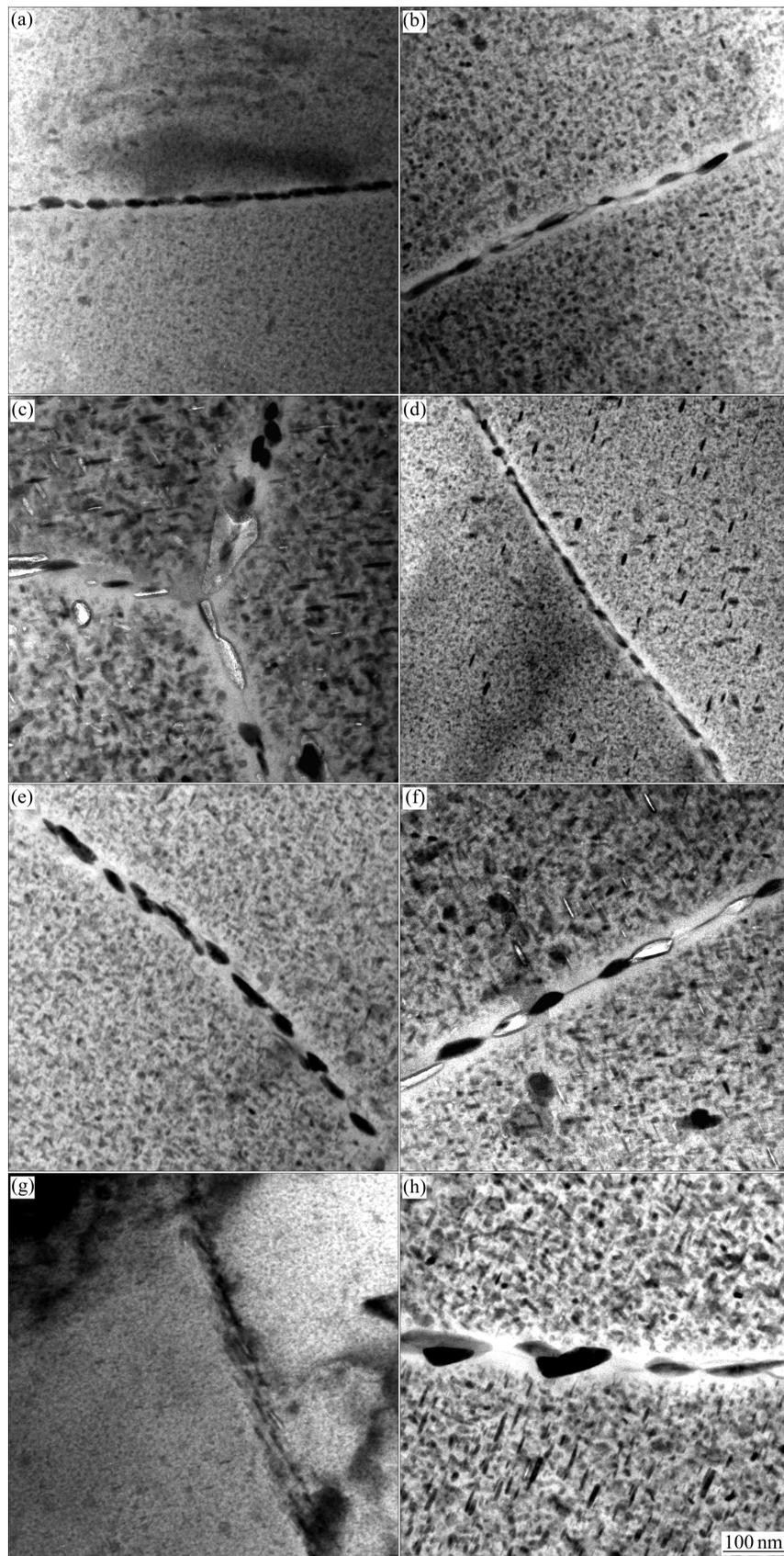


图 4 经 T6、T73 和不同 RRA 工艺处理后合金的 TEM 像

Fig. 4 TEM images of alloy after T6, T73 and several RRA treatments: (a) 160 °C, 45 min; (b) 180 °C, 45 min; (c) 200 °C, 45 min; (d) 180 °C, 15 min; (e) 180 °C, 60 min; (f) 180 °C, 90 min; (g) T6; (h) T73

要为 GP 区和细小弥散的  $\eta'$  相; 而晶界上的  $\eta$  相尺寸较小, 呈连续分布, 且并未观察到晶界无沉淀析出带 (PFZ)。由图 4(f) 可见, 经 T73 时效处理的样品晶内析出相主要为粗化  $\eta'$  相和短棒状  $\eta$  相, 晶界上  $\eta$  相已严重粗化, 呈断续离散分布, 晶界 PFZ 较宽。由图 4(a)~(f) 可见, 经 RRA 处理后的样品, 其晶界和晶内析出相形貌介于 T6 态和 T73 态样品之间。回归时间为 45 min, 经 160 和 180 °C RRA 处理后的样品, 晶内析出相较 T6 态略有长大, 其析出相为  $\eta'$  相和极少量的  $\eta$  相, 晶界析出相粗化且呈断续分布(见图 4(a)和(b)); 经 200 °C RRA 处理后的样品, 晶内析出相粗化明显且  $\eta$  相数量增多, 晶界  $\eta$  相极其粗化, 断续分布程度增加, 晶界 PFZ 变宽(见图 4(c))。在 180 °C 回归 15 min 和 60 min RRA 时效处理后的样品, 其晶内析出相较 T6 态略有长大, 但  $\eta'$  相和少量  $\eta$  相仍然呈细小弥散分布, 晶界析出相比低温回归 RRA 处理态(见图 4(a))粗化程度和断续分布程度都有所增加, 晶界 PFZ 变宽。回归时间继续延长至 90 min 后, 虽然样品的晶界析出相粗化程度和断续分布程度继续增加, 晶界 PFZ 继续变宽, 但晶内析出相已出现了较明显的粗化现象。

由此可见, 经 RRA 处理后合金可以同时具有与 T6 时效态类似的均匀弥散的晶内析出相和与 T73 时效态类似的晶界析出相形貌特征。在相同的回归时间下随着回归温度的升高或在相同的回归温度下随着回归时间的延长, 经 RRA 处理后合金的晶内和晶界析出相的粗化程度逐渐增加, 晶界 PFZ 逐渐增宽, 晶界析出相断续程度逐渐增加。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 RRA 处理对合金组织和性能的影响

大量研究表明, Al-Zn-Mg-Cu 系合金的时效析出过程按过饱和固溶体  $\rightarrow$  GP 区  $\rightarrow \eta' \rightarrow \eta$  相的顺序进行<sup>[5-6, 12]</sup>。经 120 °C 第一级预时效至峰值状态后, 合金基体为 GP 区和细小弥散的  $\eta'$  相, 晶界为连续链状析出物  $\eta'$  和  $\eta$  相(见图 4(g))。第二级时效为回归处理, 由于晶界为溶质原子的易扩散通道, 预时效时在晶界处溶质偏析程度高, 形核速度快, 析出相成核后迅速长大, 因此, 在第一级时效后已形成的较稳定  $\eta'$  和  $\eta$  相在高温回归下不溶解, 而向着更稳定的方向演化, 晶界析出物尺寸逐渐增大并开始聚集、孤立, 成为断续结构。第三级再时效过程中, 回归后过饱和状态的

合金基体中重新析出强化相, 使合金的强度回复到接近峰值状态的强度, 从而使得 RRA 处理的合金既保持了 T6 峰值态的强度, 又使晶界析出相形貌和特征类似于 T73 状态的, 从而获得强度和抗应力腐蚀性能的良好匹配。

在回归时间相同的条件下, 随着回归温度升高, 合金的抗拉强度逐渐下降, 这是由于随着时效温度的升高, 达到完全回归所需的时间缩短, 随后则是过度回归了。过度回归会导致晶内回溶后重新析出尺寸较大的  $\eta'$  和  $\eta$  相, 并且在最终的再时效工艺中, 这些析出相又会进一步长大。过高温度回归导致经 RRA 处理后合金晶内析出相较粗大, 并且降低了晶内析出相的弥散度(见图 4(c)), 从而导致合金强度大幅降低。同理, 在同一温度、不同回归时间的条件下, 随着回归时间的延长, 预时效合金逐渐达到充分回归, 但继续延长回归时间将使合金进入过度回归。因此, 经 RRA 处理后合金强度会出现先略微上升再逐渐降低的现象。

#### 3.2 RRA 处理对合金抗应力腐蚀性能的影响

研究表明, 合金的电导率与其抗应力腐蚀性能密切相关, 电导率的大小可用来衡量合金抗应力腐蚀性能的优劣<sup>[18]</sup>。与单级峰值时效相比, 经 RRA 处理后, 合金电导率的提高(见图 2 和 3)对应于合金的抗应力腐蚀性能的明显改善(见表 1)。关于 7XXX 系合金的抗应力腐蚀机理, 虽然进行了大量的研究, 但仍未形成统一的认识, 较为熟知的说法有钝化膜破裂理论、阳极溶解理论和氢致破裂理论, 其中, 氢致破裂理论得到了较多研究者的认同。其基本观点是, 在拉伸应力作用下, 晶界与表面相交处的水分与铝合金反应生成活性氢原子, 即  $2Al+3H_2O \rightarrow Al_2O_3+6[H]$ , 氢原子进入晶格中, 沿晶界扩散或通过形变产生的位错管道运输, 聚集到裂纹尖端前沿, 从而加速应力腐蚀过程<sup>[19]</sup>。研究表明<sup>[20]</sup>, 晶界上粗大的析出物粒子能够捕捉自由的氢原子, 使之重新合成氢分子, 并形成气泡而逸出, 从而降低晶界氢原子浓度和裂纹扩展速率, 提高抗应力腐蚀性能。因此, 晶界析出物越粗大, 且彼此间距越大, 越有利于抗应力腐蚀性能的改善。另一方面, 合金经 RRA 处理后, 由于晶界上平衡相充分析出, 溶质原子因进入析出相而使偏聚程度减轻, 致使晶内和晶界的电化学差异缩小, 也有利于改善抗应力腐蚀性能, 本实验中 6 个回归再时效状态合金均具有分离、尺寸较大的晶界析出相(见图 4), 因此, 具有优良

的抗应力腐蚀性能。经 180 °C、60 min 回归后再时效处理的合金晶界析出物的大小和分布特征与 T73 态合金的比较相似, 所以该状态合金具有与 T73 态合金相近的优良抗应力腐蚀性能(见表 1)。

## 4 结论

1) 7A55 合金经适当的 RRA 处理后, 晶内保持类似于 T6 状态的显微组织结构, 为细小弥散的  $\eta'$ 相和极少量的  $\eta$  相; 同时, 晶界析出物的大小和分布特征与 T73 状态的类似, 为呈断续、孤立分布的粗化  $\eta$  相。

2) 采用 120 °C、24 h 预时效, 180 °C、60 min 回归处理和 120 °C、24 h 终时效的 RRA 工艺, 可使 7A55 合金获得力学性能和抗应力腐蚀性能的良好匹配。具有与 T6 态相当的强度, 而电导率则大大提高, 抗应力腐蚀性能接近 T73 态水平。

## REFERENCES

- [1] 王洪斌, 黄进峰, 杨 滨, 张济山, 张永安, 熊柏青. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 1-4.  
WANG Hong-bin, HUANG Jin-feng, YANG Bin, ZHANG Ji-shan, ZHANG Yong-an, XIONG Bai-qing. Current status and future directions of ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys [J]. Materials Review, 2003, 17(9): 1-4.
- [2] 冯 春, 刘志义, 宁爱林, 曾苏民. 超高强铝合金 RRA 热处理工艺的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(4): 98-101.  
FENG Chun, LIU Zhi-yi, NING Ai-lin, ZENG Su-min. Research and progress in retrogression and reaging treatment of super-high strength aluminum alloy [J]. Materials Review, 2006, 20(4): 98-101.
- [3] OLIVER A F Jr, de BARROS M C. The effect of RRA on the strength and SCC resistance on AA7050 and AA7150 aluminium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 379(1/2): 321-326.
- [4] CINA B M. Reducing the susceptibility of alloys, particularly aluminium alloys, to stress cracking: US, 3856584[P]. 1974-12-24.
- [5] DANH N C, RAJAN K, WALLACE W. A TEM study of microstructural changes during retrogression and reaging in 7075 aluminum [J]. Metallurgical Transactions A, 1983, 14(9): 1843-1850.
- [6] KANNO M, ARAKI I. Precipitation behavior of 7000 alloys during retrogression and reaging treatment [J]. Materials Science and Technology, 1994, 10(6): 599-603.
- [7] LUCASAK D A, HART R M. Aluminum alloy development efforts for compression dominated structure of aircraft [J]. Light Metal Age, 1991, 49(5): 11-15.
- [8] 吴一雷, 李伟光, 强 俊, 李春玉. 超高强度铝合金的发展与应用[J]. 航空材料学报, 1994, 14(1): 49-55.  
WU Yi-lei, LI Wei-guang, QIANG Jun, LI Chun-yu. Development and application of super-strength aluminum alloy [J]. Material Science of Aviation, 1994, 14(1): 49-55.
- [9] 贺永东, 张新明, 游江海. 7A55 合金均匀化处理[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 638-644.  
HE Yong-dong, ZHANG Xin-ming, YOU Jiang-hai. Homogenizing treatment of 7A55 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(4): 638-644.
- [10] 黄振宝, 张新明, 刘胜胆, 刘文辉, 张 翀, 高 慧. 固溶处理对 7A55 铝合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(1): 87-91.  
HUANG Zhen-bao, ZHANG Xin-ming, LIU Sheng-dan, LIU Wen-hui, ZHANG Yu, GAO Hui. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of 7A55 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(1): 87-91.
- [11] 刘文辉, 张新明, 李惠杰, 刘胜胆, 黄振宝. 固溶处理对 7A55 合金断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 41-45.  
LIU Wen-hui, ZHANG Xin-ming, LI Hui-jie, LIU Sheng-dan, HUANG Zhen-bao. Effect of solution on fracture toughness of 7A55 aluminum alloy [J]. J Cent South Univ: Science and Technology, 2007, 38(1): 41-45.
- [12] 郑子樵, 李红英, 莫志民. 一种 7055 型铝合金的 RRA 处理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 771-776.  
ZHENG Zi-qiao, LI Hong-ying, MO Zhi-ming. Retrogression and reaging treatment of a 7055 type aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 771-776.
- [13] 龙 佳, 郑子樵, 魏修宇, 周 娴, 闫 焱, 余玲娟. 7A55 铝合金在常规 RRA 和连续 RRA 处理过程中的性能及组织演变 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1588-1592.  
LONG Jia, ZHENG Zi-qiao, WEI Xiu-yu, ZHOU Xian, YAN Yan, SHE Ling-juan. Microstructural evolution and properties of 7A55 aluminum alloys during conventional RRA treatment and continuous RRA treatment [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 1588-1592.
- [14] 李 海, 郑子樵, 王芝秀. 含银 7055 铝合金回归再时效过程中的组织与性能变化[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(7): 718-722.  
LI Hai, ZHENG Zi-qiao, WANG Zhi-xiu. Retrogression and reaging of Ag-containing 7055 Al alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004, 33(7): 718-722.

- [15] 金属和合金腐蚀、应力腐蚀试验第7部分:慢应变速率试验[S]. GB15970.7—2000. 2000-07-24.  
Standard Test Method for Corrosion of Metals and Alloys-Stress Corrosion Testing—Part 7: Slow strain rate testing [S]. GB15970.7—2000. 2000-07-24.
- [16] 宁爱林, 刘志义, 冯春, 曾苏民. Al-Zn-Mg-Cu合金组织和电导率及抗应力腐蚀性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(2): 108-113.  
NING Ai-lin, LIU Zhi-yi, FENG Chun, ZENG Su-min. Study of microstructure, electrical conductivity and stress corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(2): 108-113.
- [17] BRAUM R. Slow strain rate testing of aluminum alloy 7050 in different tempers using various synthetic environment [J]. Corrosion, 1997, 53(6): 467-474.
- [18] TSAI T C, CHUANG T H. Relationship between electrical conductivity and stress corrosion cracking susceptibility of Al 7075 and Al 7475 alloys [J]. Corrosion, 1996, 52(6): 414-416.
- [19] 杜爱华, 龙晋明, 裴和中. 高强铝合金应力腐蚀研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(4): 251-256.  
DU Ai-hua, LONG Jin-ming, PEI He-zhong. Investigation of stress corrosion cracking of high strength aluminium alloys [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(4): 251-256.
- [20] 褚武扬, 谷 飏, 高克玮. 应力腐蚀机理研究的新进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(2): 97-101.  
ZHE Wu-yang, GU Biao, GAO Ke-wei. Research and progress in theories of strength corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1995, 7(2): 97-101.

(编辑 陈卫萍)