

# 7003 铝合金双级双峰时效工艺优化

毛杰<sup>1</sup> 熊京远<sup>2</sup> 王超<sup>2</sup> 宋仁国<sup>2</sup>

(1 嘉兴职业技术学院,嘉兴 314036)

(2 常州大学材料科学与工程学院,常州 213164)

**文 摘** 设计了 $L_9(3^4)$ 的双级时效正交试验方案,系统地研究了双级双峰时效工艺、时效硬化特性和力学性能。结果表明:终时效对合金的力学性能具有决定性的影响,合金的硬度、强度对终时效温度最敏感,合金的塑韧性则对终时效时间最敏感;利用“双峰”特征对正交试验所得的具有高塑性、高韧性的相对最佳工艺进行强度优化,发现对应不同的目标性能,有最优双级时效工艺与之相应,并没有发现各性能指标同时达到最大值的理论最优工艺,只能获取一种相对的最优工艺,即在保证接近单级峰时效强度的前提下选择塑、韧性最佳的工艺——105℃/4 h+155℃/70 h。

**关键词** 7003 铝合金,双级双峰时效,正交试验,工艺优化,力学性能

## Double-Peak Aging Technology Optimization in 7003 Aluminum Alloy

Mao Jie<sup>1</sup> Xiong Jingyuan<sup>2</sup> Wang Chao<sup>2</sup> Song Renguo<sup>2</sup>

(1 Jiaxing Vocational Technical College, Jiaxing 314036)

(2 School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164)

**Abstract** Two-stage double-peak aging process, aging hardening characteristics and mechanical properties are systematically studied by design of the  $L_9(3^4)$  orthogonal test in this paper. The second stage in the whole aging has a decisive impact on the mechanical properties of the alloy, hardness and strength are more sensitive to final aging temperature while plasticity and toughness are more to final aging time. It can be found that there is an optimal dual aging process corresponding to the different performance, when use double-peak to optimized the process of high plasticity, high toughness coming from the orthogonal test. It is found the performance index can not reach the theoretical optimum maximum, and only a relative optimal process is obtained. We found that the best two-stage double-peak aging process is:105℃/4 h+155℃/70 h.

**Key words** 7003 Aluminum alloy, Two stages double-peak aging, Orthogonal test, Technology optimization, Mechanical property

### 0 引言

目前针对7000系铝合金的研究主要集中在以下两个方面:一是为满足航空工业的需求发展高强、高韧、低应力腐蚀敏感性新型合金;二是探索合理的热处理工艺来满足各类民用需求<sup>[1-6]</sup>。20世纪80年代,阎大京等人<sup>[7]</sup>在研究7475铝合金超长时效时,发现了两个时效峰。后来,宋仁国等人<sup>[8]</sup>在7175铝合金中亦发现了类似现象,且证实第二时效峰的强度比第一时效峰略高,抗应力腐蚀性能也比第一时效峰高。李春梅<sup>[9]</sup>在7012、7509、7208铝合金上也得到了

双时效峰。陈小明<sup>[10]</sup>发现了7000系铝合金单级双峰工艺的普适性并且解释了第二时效峰出现以及第二时效峰下合金具备更优抗应力腐蚀开裂性能的原因。任建平<sup>[11]</sup>发现了7050铝合金经长时间双级时效处理后仍然存在双时效峰。然而,对于同属7000系铝合金的7003合金是否也存在类似的现象,截止目前相关研究甚少。为此,本文对7003铝合金在前期被认为最佳的固溶工艺下统一处理后,按照 $L_9(3^4)$ 方案设计双级时效正交试验,找出各时效参数对于不同目标性能的影响程度及对应的最优工艺,并

收稿日期:2012-12-24;修回日期:2013-04-03

作者简介:毛杰,1963年出生,副教授,主要从事金属材料方面的教学与研究工作。E-mail:maojie840@163.com

做出相应的优化以获取相对最佳的综合性能。

## 1 试验

### 1.1 材料

7003 铝合金板材,美国 ALCOA 公司生产,供货热处理状态为 T651,厚 15 mm,其化学成分见表 1。

表 1 7003 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7003 aluminium alloy

										wt%
Zn	Mg	Cu	Zr	Ti	Mn	Cr	Fe	Si	Al	
6.20	0.60	0.20	0.10	0.20	0.30	0.20	0.35	0.30	bal.	

### 1.2 试样制备

热处理试样尺寸为 15 mm×10 mm×10 mm,采用空气炉进行固溶处理,处理制度为 470℃/70 min,室温水淬,淬火转移时间在 5 s 以内。试样经水淬后立即在烘干箱内进行人工时效,其中时效温度误差控制在(±1)℃。采用双级时效处理制度,预时效温度  $\theta_1$  和时间  $t_1$ 、终时效温度  $\theta_2$  和时间  $t_2$  这 4 个因素各取三个水平,设计  $L_9(3^4)$  正交试验方案对试样进行处理。

冲击韧性试样采用线切割加工,尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,表面粗糙度为  $Ra1.6 \mu\text{m}$ 。

拉伸试样按照 GB/T16865—1997 标准执行,标距为 25 mm,试样长轴垂直于轧制方向。

### 1.3 测试方法

将时效后的试样依次用 200#、400#、600#、800#、1000#、1200#号砂纸打磨表面去除氧化膜后,在 HR-150DT 型洛氏硬度计上测试硬度,测定 5 个值取平均值。在日本岛津 AG-10TA 型万能材料试验机上进行拉伸试验,应变速率为  $8.33 \times 10^{-4}$ /s。按照 GB/T18658—2002 标准,在 JB-6 冲击试验机上测试夏比(Charpy V)型缺口冲击试样的冲击韧性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 正交试验设计与试验结果

前期研究<sup>[8-9]</sup>表明,铝合金时效工艺中“第二时效峰”附近具备良好的抗应力腐蚀性能,而 7003 铝合金经长时间时效处理,“第二时效峰”的位置一般出

现在 70~90 h。本文终极时效时间分别选取 70、80 和 90 h。

对 7003 铝合金  $\theta_1$ 、 $t_1$ 、 $\theta_2$  和  $t_2$  各取 3 个水平,设计  $L_9(3^4)$  正交试验方案。按照正交试验的原理挑选出 9 种具有代表性的组合,从表 2 中可以发现,合金最高硬度为 69HRB,最大  $\sigma_{0.2}$  为 289.3 MPa,最大  $\sigma_b$  为 354.4 MPa,最大  $\delta$  为 15.72%,最大  $\alpha_k$  为 15.50 J/cm<sup>2</sup>。

表 2 双级时效态 7003 铝合金的正交设计与力学性能

Tab.2 Orthogonal table of  $L_9(3^4)$  and mechanical properties of two stages aging in 7003 aluminum alloy

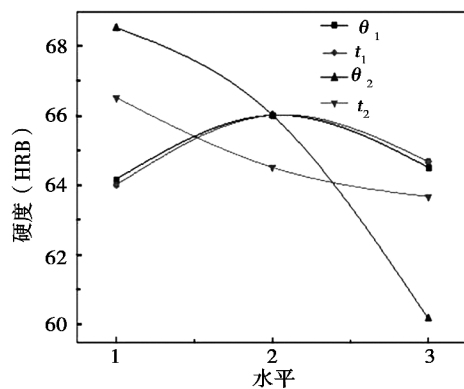
方案	时效制度	硬度 (HRB)	$\sigma_{0.2}/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$\delta/$ %	$\alpha_k/$ J·cm <sup>-2</sup>
1#	90℃/4h+125℃/70h	68.5	283	347	15.2	14.0
2#	90℃/8h+140℃/80h	66	276	338	14.7	11.7
3#	90℃/12h+155℃/90h	58	247	302	15.0	12.6
4#	105℃/4h+140℃/90h	65	263	324	15.4	13.6
5#	105℃/8h+155℃/70h	64	253	311	15.7	15.5
6#	105℃/12h+125℃/80h	69	289	354	15.1	12.8
7#	120℃/4h+155℃/80h	58.5	247	303	15.0	12.9
8#	120℃/8h+125℃/90h	68	288	351	15.1	12.9
9#	120℃/12h+140℃/70h	67	276	340	15.3	14.0

表 3 和图 1 给出硬度、屈服和抗拉强度的极差结果,由图 1(a)可知硬度随  $\theta_1$  和  $t_1$  的变化趋于一致,均经历先升后降的过程。而随  $\theta_2$  和  $t_2$  的变化则呈现线性下降的趋势。从极差大小可以判断,各因素对硬度指标的影响程度依次为  $\theta_2$ 、 $t_2$ 、 $t_1$ 、 $\theta_1$ 。从表 3 中比较出获取最大硬度值的目标工艺为 105℃/8 h+125℃/70 h。从图 1(b)可知屈服强度对  $\theta_1$ 、 $t_1$  和  $t_2$  不太敏感,而随  $\theta_2$  的升高而急剧降低。从极差大小可以判断,各因素对屈服强度的影响程度从大到小依次为  $\theta_2$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\theta_1$ 。从表中均值的大小比较出获取最大屈服强度的目标工艺为 120℃/8 h+125℃/80 h。从图 1(c)可知抗拉强度与屈服强度的变化趋势相同,从表中均值的大小比较出获取最大抗拉强度的目标工艺为 120℃/8 h+125℃/70 h。

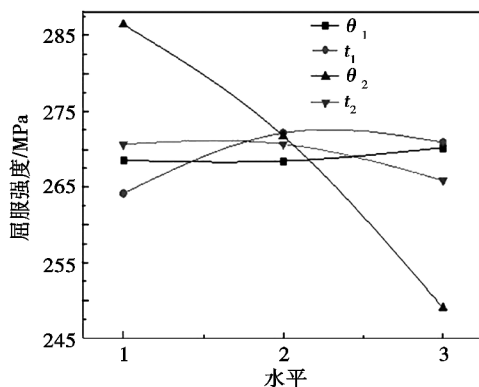
表 3 双级时效态 7003 铝合金硬度、屈服、抗拉强度分析表

Tab.3 Hardness, yield strength, ultimate tensile strength analysis table of two stages aging in 7003 aluminum alloy

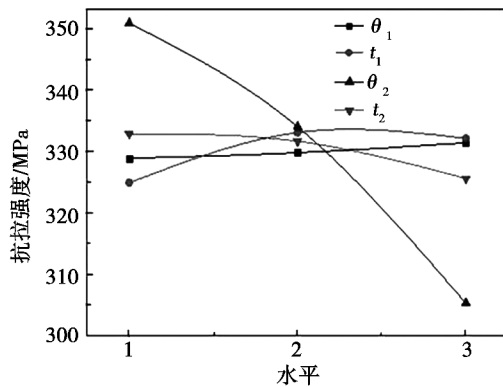
水平	硬度(HRB)				屈服强度/MPa				抗拉强度/MPa			
	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$
1	64.2	64.0	68.5	66.5	269	264	286	271	329	325	351	333
2	66.0	66.0	66.0	64.5	268	272	272	271	330	333	334	332
3	64.5	64.7	60.2	63.7	270	271	249	266	331	332	305	326
极差	1.83	2.00	8.33	2.83	1.77	8.00	37.5	4.80	2.57	8.17	45.7	7.23



(a) 硬度



(b) 屈服强度



(c) 抗拉强度

图1 硬度、屈服、抗拉强度因素指标效应曲线图

Fig. 1 Curve of the effect of hardness, yield strength, and ultimate strength factor index

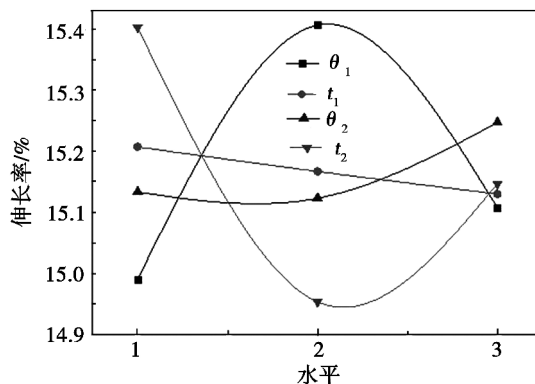
表4和图2给出了伸长率、冲击功的极差结果。

由图2(a)可知,伸长率随 $\theta_1$ 的升高先升后降;随 $t_1$ 的延长略有降低,总体上变化不大;随 $\theta_2$ 的升高变化不明显,总体趋于升高;随 $t_2$ 的延长先降后升。同时,从极差的大小值可以得出,各因素对塑性指标伸长率的影响程度依次为: $t_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $t_1$ 。从表中均值的大小比较出获取最大伸长率的目标工艺为 $105^\circ\text{C}/4\text{h}+155^\circ\text{C}/70\text{h}$ 。图2(b)表明冲击功和伸长率有着同样的变化趋势。从极差大小可以得出,各因素对韧性指标的影响程度依次为: $t_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $t_1$ 。从表中均值的大小比较出获取最大冲击功的目标工艺为 $105^\circ\text{C}/4\text{h}+155^\circ\text{C}/70\text{h}$ 。

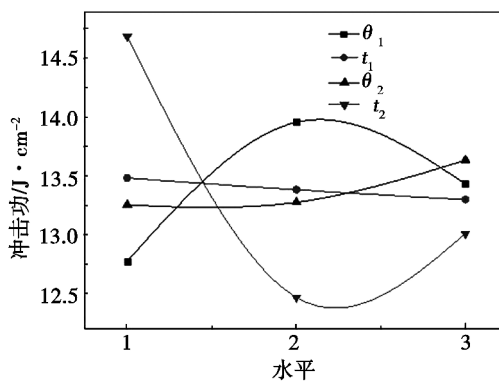
表4 双级时效态7003铝合金伸长率、冲击功直观分析表

Tab. 4 Elongation and impact work analysis table of two stages aging in 7003 aluminum alloy

水平	伸长率/%				冲击功/ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$			
	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$	$\theta_1$	$t_1$	$\theta_2$	$t_2$
1	15.0	15.2	15.1	15.4	12.8	13.5	13.3	14.7
2	15.4	15.2	15.1	15.0	14.0	13.4	13.3	12.5
3	15.1	15.1	15.2	15.1	13.4	13.3	13.6	13.0
极差	0.42	0.08	0.124	0.450	1.19	0.183	0.383	2.22



(a) 伸长率



(b) 冲击功

图2 伸长率、冲击功因素指标效应曲线

Fig. 2 Curve of the effect of elongation and impact work factor index

由图1可看出,硬度与强度指标 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_b$ 变化趋势基本一致,即随着 $\theta_1$ 的升高变化不明显;随着 $t_1$ 的延长先升后降;随着 $\theta_2$ 的升高而急剧地降低;随着 $t_2$ 的延长而缓慢降低。从各均值的极差大小上可以看出, $\theta_2$ 的变化所引起的硬度、强度变化幅度最大。由图2可以看出, $\delta$ 与 $\alpha_k$ 变化趋势基本一致,即随着 $\theta_1$ 的升高先升后降;随着 $t_1$ 的延长缓慢降低;随着 $\theta_2$ 的升高先降低后升高;随着 $t_2$ 的伸长长先降低后升高。从各均值的极差大小上可以看出, $t_2$ 、 $\theta_1$ 变化所引起的塑韧性的变化幅度更大,而 $\theta_2$ 、 $t_1$ 的影响程度较小,其中 $t_2$ 对7003铝合金的塑韧性的影响程度最大。

### 2.3 最优双级时效工艺

最优双级时效工艺就是7003铝合金的目标性能(硬度、强度、塑性、韧性)值最大化所对应的各项参

数( $\theta_1, t_1, \theta_2, t_2$ )的组合。对于各目标性能,最优工艺的目的是要使其达到最大值或者最优性能组合。因此可以由图1-图2达到最大值的点来确定最优工艺。各因素(工艺参数)对目标性能的影响除了可以通过极差的大小分析,也可直接从图中各曲线的变化幅度来判断。在上述各图中,某些曲线变化较小,几乎与横坐标平行,而有些变化很明显。从曲线变化的幅度可以看出各个因素对各目标性能影响程度的大小,即目标值变化越大,对应的因素影响程度也越大,其判断结果与极差分析的结果一致。以目标参数 $\sigma_{0.2}$ 为例,从图1(b)可以看出, $\sigma_{0.2}$ 分别在 $\theta_1$ 为120℃、 $t_1$ 为8h、 $\theta_2$ 为125℃、 $t_2$ 为80h时达到最大值,则其最优双级时效工艺为120℃/8h+125℃/80h。而由曲线的变化幅度可以判断各因素对 $\sigma_{0.2}$ 的影响程度从大到小顺序为: $\theta_2, t_1, t_2, \theta_1$ 。同理,可对其他目标性能进行类似分析。依据各目标性能的极差分析而制定的最优双级时效工艺及各因素的影响程度见表5。从表5中可以看出,各目标性能的最优工艺各不相同。例如硬度HRB的最优工艺为105℃/8h+125℃/70h,而 $\delta$ 的最优工艺为105℃/4h+155℃/70h。因此,应根据不同的实际使用要求,针对不同的单一目标性能,可选择相应的最优双级时效工艺。

表5 各类最优双级时效处理下的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of various optimal two stages aging treatment

双级时效工艺	HRB	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\alpha_K/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$
105℃/8h+125℃/70h	69	288	351	15.1	13.9
120℃/8h+125℃/80h	68	295	359	14.9	13.3
105℃/4h+155℃/70h	66	278	347	15.7	15.2

## 2.4 验证实验

对表5可能的最优工艺进行实验验证,即按各类最优工艺进行时效处理,测试各类最优工艺的合金力学性能指标,各目标性能均有不同程度的提升,均能达到各自目标性能得以改善的目的。但是,现代工业特别是航空工业对7000系铝合金性能的要求已经不再停留在对某一单一性能上,所以人们更希望通过某种工艺使合金的多个性能指标同时达到一种最佳的状态。综合分析表5,选择较高伸长率及冲击功的原则,合金综合性能较好的双级时效工艺为105℃/4h+155℃/70h。

## 3 结论

(1)双级时效对合金的力学性能的影响程度更大,合金的硬度、强度对双级时效温度最敏感,而合金的塑、韧性对双级时效的时间最敏感。具体结果如下,对硬度指标的影响程度从大到小依次为: $\theta_2, t_2, t_1, \theta_1$ ;对屈服、抗拉强度的影响程度从大到小依次为:

$\theta_2, t_1, t_2, \theta_1$ ;对伸长率的影响程度从大到小依次为: $t_2, \theta_1, t_1, \theta_2$ ;对韧性指标的影响程度从大到小依次为: $t_2, \theta_1, \theta_2, t_1$ 。

(2)对应不同的目标性能,有最优双级时效工艺与之相应。追求最大硬度指标的最优工艺为105℃/8h+125℃/70h,追求最大强度指标的最优工艺为120℃/8h+125℃/80h,追求最大塑、韧性指标的最优工艺为105℃/4h+155℃/70h。试验并没有发现各性能指标同时达到最大值的理论最优工艺,只能获取一种相对的最优工艺,即在保证接近单级峰时效强度的前提下选择塑、韧性最佳的工艺——105℃/4h+155℃/70h。

## 参考文献

- [1] Liu D, Atkinson H V, Kapranos P, et al. Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixo-formed high performance aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2003, 361: 213-224
- [2] Robinson J S, Tanner D A. The influence of aluminum alloy quench sensitivity on the magnitude of heattreatment induced residual stress [J]. Materials Science Forum, 2006, 524-525: 305-310
- [3] Ren J P, Song R G. Hardness prediction of 7003 aluminum alloy by gradient descent algorithm in BP artificial neural networks [J]. Advanced Materials Research, 2011, 217/218: 1458-1461
- [4] Chen X M, Song R G. Burnt microstructure and properties of 7003 aluminum alloy [J]. Advanced Materials Research, 2011, 217/218: 1454-1457
- [5] Robinson J S, Tanner D A, Truman C E, et al. The influence of quench sensitivity on residual stresses in the aluminium alloys 7010 and 7075 [J]. Materials Characterization, 2012, 65: 73-85
- [6] Jurczak W, Kyziol L. Dynamic properties of 7000-series aluminum alloys at large strain rates [J]. Polish Maritime Research, 2012, 19: 38-43
- [7] 阎大京, 张宇东, 王洪顺, 等. 时效制度对7475和7050铝合金应力腐蚀及剥层腐蚀性能的影响 [J]. 材料工程, 1992(2): 13-16
- [8] 宋仁国, 张金宝, 曾梅光, 等. 7175铝合金时效双峰应力腐蚀敏感性的研究 [J]. 金属热处理学报, 1996, 17(2): 51-54
- [9] 李春梅, 陈志谦, 程南璞, 等. 超高强超高韧铝合金的热处理工艺研究 [J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(12): 36-40
- [10] 陈小明, 宋仁国. 7xxx系铝合金双峰时效工艺的普适性研究 [J]. 热加工工艺, 2009, 38(2): 93-97
- [11] 任建平, 宋仁国. 双级双峰时效对7050铝合金组织与性能的影响 [C]. 中国热处理会议论文集, 2009
- [12] 陈小明, 宋仁国. 7000系铝合金应力腐蚀开裂的研究进展 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(2): 120-123
- [13] 陈小明, 宋仁国, 张宇, 等. 7003合金双峰时效工艺研究 [J]. 新技术新工艺, 2009(9): 106-108

(编辑 吴坚)