

文章编号: 1004-0609(2005)11-1670-05

单级时效对 7B04 预拉伸厚板组织和性能的影响^①

李志辉, 熊柏青, 张永安, 朱宝宏, 刘红伟, 王 锋

(北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘 要: 研究了 7B04 合金单级时效处理过程中时效温度和时效时间对合金力学性能和电导率的影响, 观察和对比了几种不同时效处理制度下合金的显微组织。结果表明: 单级时效处理的温度越高, 合金达到峰时效所需的时间越短, 材料的峰时效强度和延伸率越低。电导率随时效时间的延长而不断上升; 时效温度越高, 电导率的增长速率越快。峰时效合金基体内有大量细小的弥散相析出, 晶界析出相呈连续分布。当时效温度较低时, 过时效合金的显微组织与峰时效没有明显差别; 当时效温度较高时, 过时效合金内粗大析出相的数量明显增加, 晶界析出相呈不连续分布。不同时效温度下的峰时效和过时效合金中均不存在明显的晶间无析出带。

关键词: 7B04 合金; 预拉伸厚板; 单级时效; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 166.3

文献标识码: A

Effect of one-step ageing on microstructure and properties of 7B04 pre-stretched thick plate

LI Zhihui, XIONG Baiqing, ZHANG Yong'an,

ZHU Bao-hong, LIU Hong-wei, WANG Feng

(State Key Laboratory for Fabrication and Processing of Nonferrous Metals,
General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The effect of one-step ageing temperature and time upon mechanical properties and electrical conductivity of 7B04 pre-stretched thick plate was studied, and the microstructures of the alloy aged at different temperatures were compared. The results show that the higher the ageing temperature is, the shorter the peak ageing time is. The strength and elongation of the peak-aged alloy will be lowered when the ageing temperature is higher. With increasing the ageing time, the electrical conductivity becomes large. The higher the ageing temperature is, the faster the speed rate of electrical conductivity grows. The microstructure of matrix in peak-aged alloy consists of fine dispersed precipitates and precipitates from grain are continuous. When the ageing temperature is lower than 120 °C, there are no obvious microstructure difference between peak-aged and over-aged alloys; When the ageing temperature is higher than 125 °C, there are many coarse precipitates in over-aged alloys and the precipitates from grain are discontinuous. There are no obvious precipitate free zones along the grain boundary in both peak-aged and over-aged alloys under different ageing temperatures.

Key words: 7B04 alloy; pre-stretched thick plate; one-step ageing; microstructure; mechanical property

超高强铝合金预拉伸厚板是以航空航天用材为背景研制并发展起来的一类铝合金材料, 长期以来被广泛用于各种飞机机身、机翼梁、机舱壁板和火箭中高强度结构零件等的制造, 是世界各国航空航

天工业中不可缺少的重要材料^[1~6]。7B04 合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系, 是一种典型的时效强化铝合金。国内有关该合金的热处理工艺有一些相关的文献报道^[7~9], 但是有关 7B04 合金厚板(尤其是采用辊底

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2003AA331100)

收稿日期: 2005-07-15; 修订日期: 2005-08-20

作者简介: 李志辉(1980-), 男, 博士研究生

通讯作者: 张永安, 教授; 电话: 010-82241162-209; E-mail: zhangyongan@grinm.com

式喷淋淬火炉进行固溶淬火) 的热处理工艺研究报道很少。本文作者重点研究单级时效处理制度对 7B04 合金性能的影响, 并观察和比较几种具有代表性的时效制度下合金的显微组织。

1 实验

实验材料由东北轻合金有限责任公司提供, 其状态规格为经过辊底式喷淋淬火的固溶态 40 mm 厚的预拉伸板; 其化学成分(质量分数) 分析结果见表 1。单级时效处理的温度为 110、115、120、125 和 135 ℃, 时效时间为 1~ 100 h。时效实验在电热鼓风干燥箱中进行。室温拉伸试样均取自厚板沿厚度方向的中心(1/2H 处), 拉伸方向为厚板的横向, 实验按照 GB/T 228—2002 在 MTS—810 型试验机上进行。采用 WD—Z 型数字式涡流电导仪测试材料的电导率。透射电镜观察在 JEM—2010 型高分辨电镜上进行。

表 1 7B04 合金的化学成分

Table 1 Composition of 7B04 alloy(mass fraction, %)				
Cu	Mg	Zn	Mn	Fe
1. 58	2. 88	6. 23	0. 31	0. 15
Si	Ni	Cr	Ti	Al
0. 048	< 0. 01	0. 16	0. 025	Bal.

2 结果与分析

2.1 时效制度对合金力学性能的影响

图 1~ 3 所示为合金在 110、115、120、125 和 135 ℃进行单级时效后室温横向抗拉强度、屈服强度和电导率随时效时间的变化。从时效曲线可以看出, 在时效初期即欠时效阶段, 时效强化响应较快, 材料强度快速上升, 120 ℃时效 4 h, 材料的抗拉强度便可达到 550 MPa, 表明该合金有很强的时效硬化能力; 与此同时, 合金的延伸率迅速下降。时效过程是合金中强化相的不断析出和长大过程, 两者共同决定合金的强化效果。时效初期, 合金中析出大量的弥散强化相, 这些细小的析出相具有应变强化、弥散强化和化学强化作用^[10], 从而使材料的强度迅速上升, 时效温度越高, 这种趋势越明显。在这一过程中, 弥散强化相的析出速度远远大于其长大速度, 因此材料的强度不断上升。随着时效时间的延长, 合金达到峰时效状态。温度越高,

弥散强化相的析出速度就越快, 从而合金达到峰时效的时间就越短。对本实验研究的合金, 在 115 ℃下达到峰值时效的时间是 30 h, 而当时效温度升高到 135 ℃时, 合金达到峰时效的时间缩短为 6 h; 表 2 给出了不同时效温度下达到峰时效所需的时间以及对应的力学性能和电导率。可以看出, 时效温度对合金的性能影响较大。时效温度越高, 达到峰时效的时间越短, 材料的峰时效强度和延伸率值越低。

合金越过峰时效点后将进入过时效状态。不同温度下的过时效状态呈现出不同的发展趋势, 当时

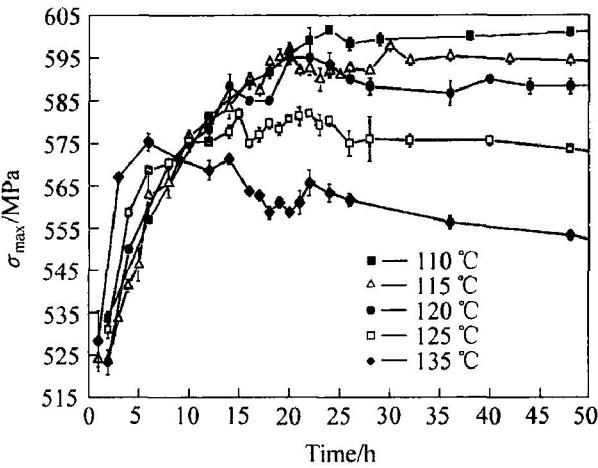


图 1 7B04 合金预拉伸厚板在不同温度下单级时效抗拉强度的变化

Fig. 1 Variation of ultimate tensile strength of artificially aged 7B04 alloy pre-stretched thick plates at different temperatures

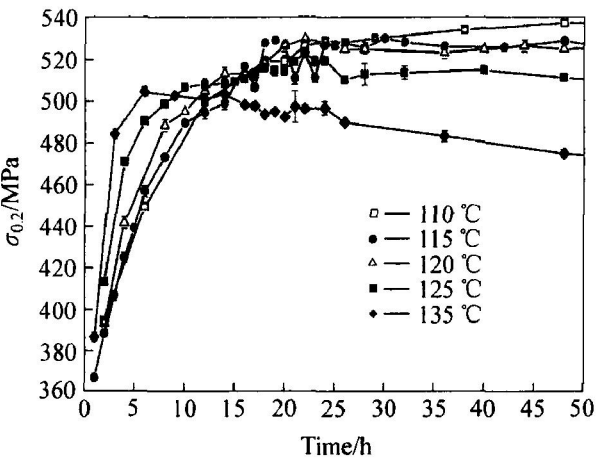


图 2 7B04 合金预拉伸厚板在不同温度下单级时效屈服强度的变化

Fig. 2 Variation of tensile yield strength of artificially aged 7B04 alloy pre-stretched thick plates at different temperatures

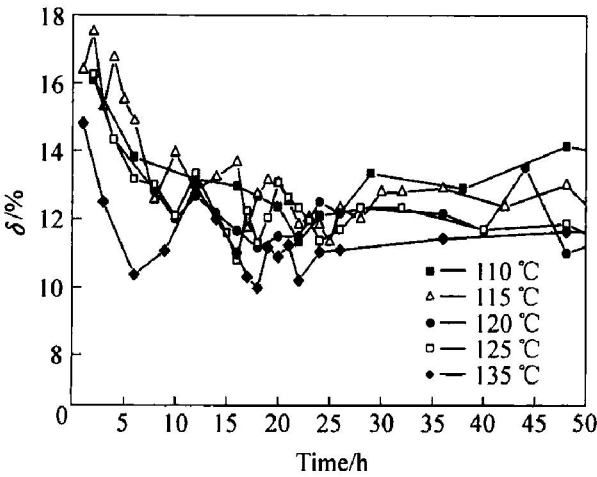


图 3 7B04 合金预拉伸厚板在不同温度下
单级时效延伸率的变化

Fig. 3 Variation of elongation of artificially aged
7B04 alloy pre-stretched thick plates at
different temperatures

表 2 几种典型峰值时效状态下合金板材的
横向拉伸力学性能和电导率值

Table 2 Tensile properties and electric
conductivity of studied alloy plate under
peak-ageing at different temperatures

Temperature/ °C	Time/ h	$\sigma_{\max}$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	γ / ($\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$)
110	48	603	538	14.0	18.3
115	30	597	530	12.8	18.5
120	22	595	530	11.5	18.3
125	15	582	520	11.6	18.8
135	6	575	504	10.4	18.5

效温度相对较低(110、115 和 120 °C)时,合金的抗拉强度呈现一个较长的时效平台,性能下降不明显;而当时效温度较高(125 和 135 °C)时,随着时效时间的延长,材料强度损失明显。造成这种趋势的原因是在过时效阶段,弥散强化相的析出基本完成,从而强化相的长大成为影响合金性能的主要因素;时效温度较低(110、115 和 120 °C)的情况下,强化相的长大并不明显,材料的强度性能得以保持;而当时效温度较高(125 和 135 °C)时,合金内强化相明显长大,材料的强度逐渐降低。

2.2 时效制度对合金电导率的影响

合金在不同温度下进行单级时效处理时,电导率随时间的变化如图 4 所示。可以看出,当单级时效温度一定时,随着时效时间的延长,电导率逐渐

上升。时效温度越高,电导率的增长速率越快。在 115 °C 时效时,电导率增长的幅度较小,30 h 后电导率达到 18.5 MS/m。135 °C 时效时,6 h 电导率便达到 18.5 MS/m。

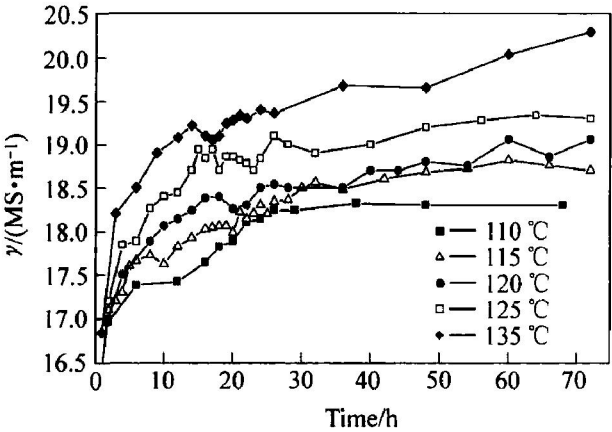


图 4 7B04 合金预拉伸厚板在不同温度下
单级时效电导率的变化

Fig. 4 Variation on electrical conductivity of
artificially aged 7B04 alloy pre-stretched
thick plates at different temperatures

Al-Zr-Mg-Cu 合金沉淀相析出顺序为^[11~14]: α (过饱和固溶体) $\rightarrow$ GP 区 $\rightarrow \eta'$ (MgZn_2) $\rightarrow \eta$ (MgZn_2)。其中 GP 区与基体共格, η' 相与基体半共格, η 平衡相与基体非共格。电导率的大小主要与基体内溶质的固溶程度及共格脱溶相周围的应变能大小相关^[15]。时效初期,合金中有大量的共格析出相析出,导致基体固溶度减小,晶格畸变程度降低,而晶格畸变程度降低使得基体点阵中电子散射源的数量和密度减小,导电电子的平均自由程增加,因此会使电导率上升^[16]。同时,共格析出相的析出会使其周围产生应力场,使电导率降低,由于前者的作用大于后者,导致电导率升高。延长时效时间,合金内有半共格和共格沉淀相析出,基体的固溶度下降,电导率继续上升;当时效处理温度较高时,电导率增加速率比在较低温度时效时快,这是因为提高时效温度,沉淀相析出加快,基体加速贫化,电导率快速上升。

2.3 显微组织观察

图 5 所示为合金在单级时效实验中具有代表性的时效制度所对应的透射电镜显微组织。其中图 5 (a) 为合金在 115 °C 下时效 20 h 所对应的显微组织。可以看出,基体内具有大量的细小析出相,尺寸约为 2~5 nm,晶界析出相呈连续链状分布;图 5

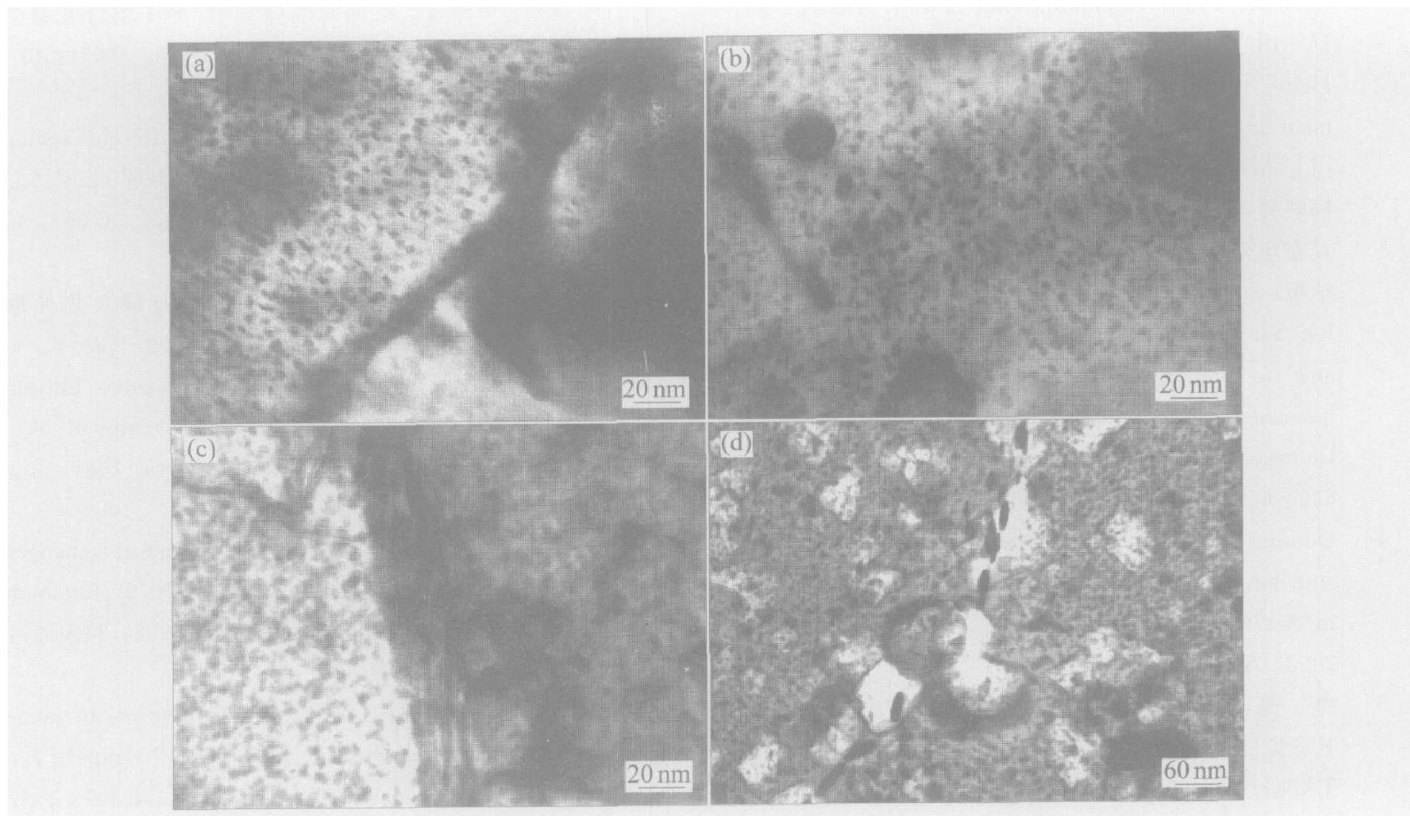


图 5 7B04 合金预拉伸厚板不同时效状态下的透射电镜明场像

Fig. 5 TEM bright images of artificially aged 7B04 alloy pre-stretched thick plates ageing under different conditions

(a) —Ageing at 115 °C for 20 h; (b) —Ageing at 115 °C for 48 h;
(c) —Ageing at 135 °C for 6 h; (d) —Ageing at 135 °C for 48 h

(b) 所示为合金在 115 °C 下时效 48 h 所对应的显微组织。与图 5(a) 相比, 合金内有少量的析出相已经长大, 但总体上析出相的形貌大小、数量和分布基本一致。图 5(c)、(d) 分别为合金在 135 °C 时效 6 h 和 48 h 所对应的显微组织。5(c) 中基体内析出相尺寸较小且呈均匀分布; 而图 5(d) 中晶界的析出相呈不连续分布, 晶内和晶界上出现了较多的粗大相, 尺寸为 30~70 nm, 这些粗大相对合金的性能十分不利, 这与合金的性能测试结果是一致的。此外, 从图 5 中还可以看出, 不同时效制度下合金内均不存在明显的晶间无析出带(PFZ)。

3 结论

1) 合金的时效处理温度越高, 达到峰时效的时间越短, 相应的峰时效强度和延伸率值越低。在 115 °C 时效时, 合金达到峰时效所需的时间是 30 h, 此状态下合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 597 MPa, 530 MPa 和 12.8%; 135 °C 时效时, 6 h 便达到峰时效, 此时合金的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 575 MPa, 504 MPa 和 10.4%。

2) 当单级时效温度一定时, 随着时效时间的延长, 电导率逐渐上升。时效温度越高, 电导率的增长速率越快。在 115 °C 时效时, 电导率增长的幅度较小, 30 h 后电导率达到 18.5 MS/m, 135 °C 时效时, 6 h 电导率便达到 18.5 MS/m。

3) 合金在 115 °C 时效 20 h 后, 其基体内析出大量弥散强化相, 晶界析出相呈连续分布; 延长时效时间至 48 h, 合金的显微组织没有明显变化。当时效温度升高至 135 °C 时, 合金经 6 h 时效后, 其基体内有大量弥散强化相析出, 但与 115 °C 时效 20 h 的组织相比, 其析出相有所长大, 晶界粗大析出相呈连续分布; 延长时效时间至 48 h, 合金内的粗大析出相的数量明显增加, 晶界析出相呈不连续分布。不同时效制度处理的合金内均无明显晶间无析出带(PFZ)。

REFERENCES

- [1] 周鸿章. 铝合金预拉伸厚板[J]. 铝加工, 1999, 22 (3): 16-19.
ZHOU Hong-zhang. Aluminum alloy pre-stretched

- thick plates[J]. *Aluminum Fabrication*, 1999, 22(3): 16-19.
- [2] Heinz A, Haszler A, Keidel C, et al. Recent development in aluminium alloys for aerospace applications [J]. *Mater Sci Eng A*, 2000, A280: 102-107.
- [3] 柯映林, 董辉跃. 7075 铝合金厚板预拉伸模拟分析及其在淬火残余应力消除中的应用[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(4): 639-645.
- KE Yin-lin, DONG Hui-yue. Pre-stretching process and its application in reducing residual stress of quenched 7075 aluminum alloy thick-plates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(4): 639-645.
- [4] Dumont D, Deschamps A, Brechet Y. On the relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy [J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, A356: 326-336.
- [5] 唐 伟, 张华, 马英义. 7475-T7351 厚板热处理工艺研究[J]. *轻合金加工技术*, 1999, 27(8): 20-24.
- TANG Wei, ZHANG Hua, MA Ying-yi. Study on heat treatment process of 7475-T7351 plate[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 1999, 27(8): 20-24.
- [6] 张 华, 谢延翠, 于洪伟. 7075-T7651 铝合金厚板热处理工艺研究[J]. *轻合金加工技术*, 2002, 30(3): 12-14.
- ZHANG Hua, XIE Yan-cui, YU Hong-wei. Study of heat treatment process of 7075-T7651 aluminium alloy plate [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2002, 30(3): 12-14.
- [7] 宁爱林, 曾苏民. 时效制度对 7B04 铝合金组织和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(6): 922-927.
- NING Ai-lin, ZENG Su-min. Effects of ageing system on microstructure and mechanical properties of 7B04 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(6): 922-927.
- [8] 彭速中. 高强铝合金 7B04 强韧化固溶时效热处理工艺的研究[J]. *铝加工*, 2004, 156(3): 49-56.
- PENG Su-zhong. Study on solution-ageing heat treatment process for high strength 7B04 aluminum alloy [J]. *Aluminum Fabrication*, 2004, 156(3): 49-54.
- [9] 汝继刚, 伊琳娜. 不同时效处理对 7B04 铝合金腐蚀性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2004, 32(5): 45-47.
- RU Ji-gang, YI Lin-na. Effect of different ageing treatment on corrosion properties of 7B04 alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2004, 32(5): 45-47.
- [10] 《有色金属及热处理》编写组. 有色金属及热处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 50-52.
- 《Nonferrous Metals and Heat Treatment》Editing Group. *Nonferrous Metals and Heat Treatment* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. 50-52.
- [11] Danh D. A TEM study of microstructural changes during retrogression and reageing in 7075 aluminum [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1983, 14A(9): 1843-1850.
- [12] Park J K, Ardell A J. Microstructures of the commercial 7075Al alloy in the T651 and T7 tempers[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1983, 14A(10): 1957-1965.
- [13] Berg L K, Gjønnes J, Hansen V, et al. GP-zones in Al-Zn-Mg alloys and their role in artificial aging[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49: 3443-3451.
- [14] Sha G, Cerezo A. Early-stage precipitation in Al-Zr-Mg-Cu alloys (7050) [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 4503-4516.
- [15] 田荣璋. 金属热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 132.
- TIAN Rong-zhang. *Metal Heat Treatment* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984. 132.
- [16] 李红英, 程勇胜. 时效制度对 7475 铝合金挤压件组织与性能的影响[J]. *中南工业大学学报*, 2001, 32(4): 394-397.
- LI Hong-ying, CHENG Yong-sheng. Effect of the ageing temper on microstructure and properties of 7475 aluminum alloy extrusion[J]. *Journal of Central South University*, 2001, 32(4): 394-397.

(编辑 陈爱华)