

文章编号:1000-582X(2002)12-0042-04

# 1420Al-Li 合金模锻件热处理新工艺及机理

黄光杰, 汪凌云, 杨文敏, 蒋作文, 刘诚

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**采用正交法设计了 1420Al-Li 合金模锻件的热处理工艺方案,按设计方案进行了热处理试验和力学性能测试,并运用金相、透射电镜等手段研究了固溶温度、固溶时间、时效温度、时效时间影响 1420Al-Li 合金模锻件强度和韧性的微观机制,获得了 1420Al-Li 合金模锻件的最佳热处理工艺制度。结果表明:合金经 455 °C × 170 min 固溶淬火,140 °C × 12 ~ 16 h 时效工艺处理后,力学性能指标分别为  $\sigma_b \geq 493$  MPa,  $\sigma_{0.2} \geq 398$  MPa,  $\delta \geq 12.9\%$ , 达到最佳的强韧性效果。同时,对该合金的强韧化机理进行了探讨。

**关键词:**铝锂合金;热处理;微观组织;力学性能

**中图分类号:** TG113

**文献标识码:** A

1420 铝锂合金具有密度低、弹性模量高、耐腐蚀性强和优良的可焊性,已成为航空航天领域应用量最大的铝锂合金<sup>[1-2]</sup>。

1420 铝锂合金是热处理可强化的变形铝合金,影响其性能的因素很多,在成分一定,各种加工工艺不变的条件下,热处理制度的影响显得更为突出。对 1420 铝锂合金模锻件,目前国内采用的热处理工艺为:460 °C × 230 min 固溶,淬火水温 60 ~ 70 °C,120 °C (12 h 时效。处理后其性能较低( $\sigma_{0.2} = 235$  MPa,  $\sigma_b = 402$  MPa,  $\delta = 7\%$ )。在实际生产中,常常会出现性能不稳定,上述指标不能完全达到,产品经常因性能不合格而报废,合金

的潜力常未充分发挥。因此,通过热处理工艺的研究,提高 1420 铝锂合金模锻件性能是可能的。

## 1 材料及试验方法

本试验所用材料是经锻造工序加工成的 1420 铝锂合金锻件,化学成分见表 1,表中数据为重量百分数 (wt%)。按所要求的尺寸加工成检测试样,进行淬火—人工时效。淬火水温 60 ~ 70 °C 保持不变,固溶温度 ( $t_{固溶}$ )、固溶时间 ( $\tau_{固溶}$ )、时效温度 ( $t_{时效}$ )、时效时间 ( $\tau_{时效}$ ) 为试验因素。为此,采用正交设计  $L_{16}(4^5)$  来研究这 4 个因素对合金组织和性能的影响(见表 2)。

表 1 1420 铝锂合金成分及试验用料成分

合金	成 分								
	Li	Mg	Si	Fe	Cu	Na	Ti	Er	Al
1420	1.8 ~ 2.3	4.5 ~ 6.0	≤0.15	≤0.20	≤0.02	≤0.005	≤0.1	0.08 ~ 0.15	余量
试验用 1420	2.18	5.27	0.013	0.020	0.05	0.000 4	0.05	0.13	余量

表 2 正交试验列因素水平表

水平	因 素			
	$t_{固溶}/^{\circ}C$	$\tau_{固溶}/min$	$t_{时效}/^{\circ}C$	$\tau_{时效}/h$
1	445	110	120	10
2	450	140	130	12
3	455	170	140	14
4	460	200	150	16

力学性能在 AG-100KNE 万能材料试验机上进行,金相在 PEM 金相显微镜上进行,电镜实验在 HITACHI H-600 透射电子显微镜上进行。

## 2 试验结果

按表 2 所确定的方案进行试验,对力学性能的试验结果进行离差分析(见表 3)。4 个因素对力学性能

• 收稿日期:2002-08-11

基金项目:军工配套项目

作者简介:黄光杰(1964-),男,重庆人,重庆大学副教授,博士,主要从事新材料、先进制备技术的研究。

的影响见图 1。

表 3 各因素对强度和延伸率影响的离差分析

因素	离 差		
	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\sigma_b/\text{MPa}$	$\delta/\%$
$t_{\text{固溶}}$	33	26	0.78
$\tau_{\text{固溶}}$	16	22	0.95
$t_{\text{时效}}$	893	777	17
$\tau_{\text{时效}}$	54	112	1.18

由表 3 可知,时效温度是影响性能的最主要的因素,其次是时效时间,再次是固溶温度和固溶时间。由图 1 可见,在试验条件下,提高固溶温度和延长固溶时

间,强度略有提高,塑性略有下降的趋势。因此,可以选取固溶工艺为  $455\text{ }^\circ\text{C} \times 170\text{ min}$ 。时效温度越高,合金强度提高,塑性下降。 $150\text{ }^\circ\text{C}$  时效强度高,塑性太低,而  $140\text{ }^\circ\text{C}$  时效时,综合性能好( $\bar{\sigma}_b = 484\text{ MPa}$ ,  $\bar{\sigma}_{0.2} = 292\text{ MPa}$ ,  $\bar{\delta} = 13.4\%$ ),综合考虑强度和塑性,选择时效时间为  $14 \sim 16\text{ h}$ 。

综上所述,1420 铝锂合金锻件的最佳热处理工艺为  $455\text{ }^\circ\text{C} \times 170\text{ min}$  固溶,淬火水温  $60 \sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ ,时效温度为  $140\text{ }^\circ\text{C}$ ,时效时间为  $14 \sim 16\text{ h}$ 。

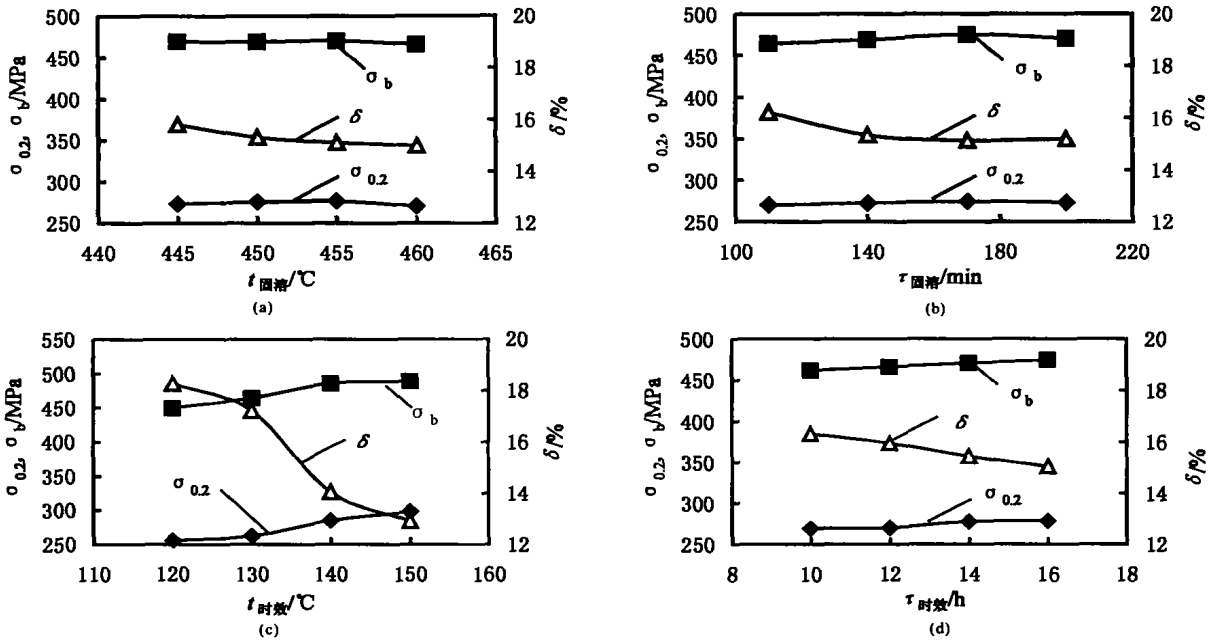


图 1 固溶温度、固溶时间、时效温度和时效时间对力学性能的影响

### 3 分析讨论

#### 3.1 固溶条件对合金组织和性能的影响

不同工艺条件下淬火的金相组织如图 2 所示。

由图 2 可见,  $460\text{ }^\circ\text{C}$  固溶时,虽然第二相溶入较充分,但由于温度较高,晶粒平均尺寸大(图 2(c)、图 2(d)),合金的性能较低。 $455\text{ }^\circ\text{C}$  固溶时,随着固溶时间的延长,未溶的第二相质点逐渐减少,而且由于温度适中,晶粒尺寸较细小(见图 2(a)、图 2(b)),合金强度增加,塑性仍保持在较高的水平上。这主要是由于合金元素溶入基体后,使基体金属的位错密度增大,同时,晶粒晶格发生畸变,形成对位错运动的阻碍作用。再者,合金元素的原子还会改变固溶体的弹性常数、扩散系数、内聚力和原子的排列缺陷,使位错运动阻力增大,使材料得到强化。据文献[3]介绍,当固溶体中溶质原子平均浓度为  $\bar{c}$  时,溶质原子产生的滑动阻力对

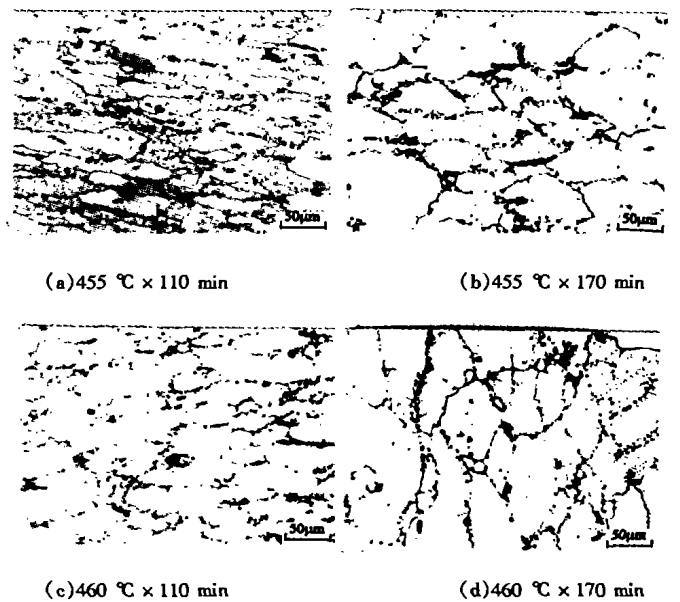


图 2 不同条件固溶的组织

强度的贡献  $\Delta\sigma_s$  可以近似表示为:  $\Delta\sigma_s = kc^{-\frac{2}{3}}$ 。因此, 溶质原子强度越高, 原子尺寸差别越大, 价电子差越大, 错配度越大, 固溶强化效果越好。同时, 经热力学分析表明<sup>[4-5]</sup>, 基体的合金元素含量越高, 时效过程中析出第二相的相变驱动力增加, 可减少第二相临界晶核尺寸, 使形核率提高, 从而使析出物数量增加, 尺寸减小, 达到强化的目的。合金强度随固溶时间延长而增加。此外, 细小的晶粒尺寸对提高材料的综合性能是有利的。

### 3.2 时效工艺对合金组织和性能的影响

1420 铝锂合金是时效强化型合金, 主要靠时效过程从过饱和和固溶体中析出沉淀相来强化。合金变形时, 位错与粒子间的交互作用方式有切割和绕过两种机制, 取决于不同时效态析出物的粒度。根据位错理论, Gleiter 和 Asbby 分别对切割绕过机制进行了详细分析, 得出如下关系式<sup>[5-6]</sup>:

$$\tau_C = k_1 \frac{\gamma_A^{2/3} f^{1/3}}{\sqrt{Gb^2}} r^{1/2} + \tau_0$$

$$\tau_A = k_2 \frac{Gb f^{1/3}}{r} \ln \frac{2r}{r_0} + \tau_0$$

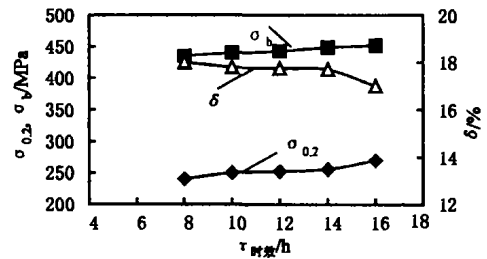
由此两式可知, 当析出物体积分散一定时, 切割机制的强化效应则随质点尺寸的增大而增加。合金在欠时效状态下变形时, 位错切割析出物质点, 而峰值时效状态下位错由切割机制向绕过机制转变, 合金强度最高。因此, 合金强度随时效时间的延长而上升, 达到峰值后又下降。

对于 1420 铝锂合金, 采用 120 °C 时效 12 h, 合金仍处于欠时效阶段(图 3(a))。电镜分析表明, 合金在 14 h 前时效, 析出的  $\delta'$  相较小, 产生的“化学”硬化效应相对较弱, 位错切过时不会产生很大的初始应变抗力, 合金的强度不高, 塑性相对较好, 因此, 目前国内采用的热处理工艺没有发挥出材料的潜力。

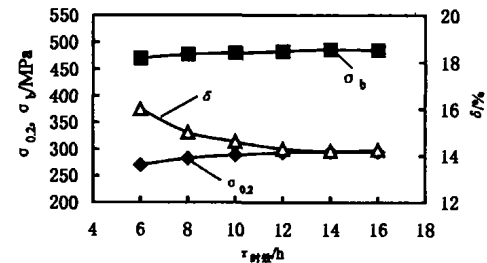
150 °C 时效温度较高, 合金在 10 h 就达到峰值时效状态, 此时基体中有大量的析出物存在。时效 14 h 时, 析出物十分粗大, 析出数量减少(图 4(b)), 表明已过时效, 强度性能降低, 塑性亦较差(图 3(c))。其原因是稳定相析出物通常与基体非共格, 没有共格弹性应力场, 由于它们之间的距离增大, 位错包围稳定相所需的应力较小, 对沉淀强化贡献不大。同时, 粗大的析出物存在不利于合金塑性的提高。

140 °C 时效时, 时效峰值在 14 ~ 16 h 之间出现(图

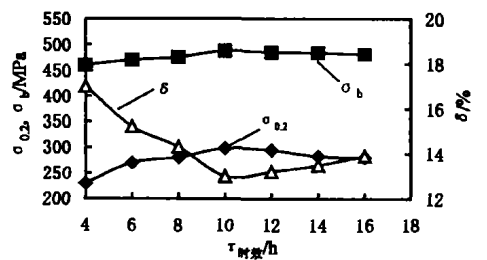
3(b)), 电位分析表明, 此时析出大量的细小球形亚稳相( $\delta'$ ) 质点(图 4(a)), 并与基体共格或部分共格, 合金强度高, 塑性也较好。过渡相密度高, 且与基体结构差异较大, 因此它们的原子排列更易被位错剪切扰乱, 引起更强烈的“化学”硬化, 使得各初始变形抗力急剧增加, 强度提高较大, 而塑性略有下降, 属典型的相时效阶段。由于 140 °C 时效温度适中, 在过时效状态, 析出物仍保持细小弥散的球状, 保持较高的强度和良好的塑性, 所以, 140 °C 时效在较宽的时效时间范围内保证了工艺的稳定性。



(a) 120 °C

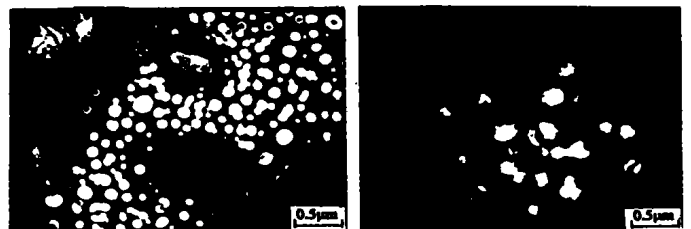


(b) 140 °C



(c) 150 °C

图 3 不同温度的时效动力学



(a) 140 °C x 16 h

(b) 150 °C x 14 h

图 4 不同条件时效的组织

## 4 结 论

1) 固溶处理制度对合金的强化效果有影响。随固溶温度的升高和固溶时间的延长, 合金元素溶入更充分, 分布更均匀, 有利于提高时效形核率, 提高合金的强度, 但温度过高和时间太长, 易导致晶粒长大, 降低强化效果。新工艺确定的固溶处理制度为 455 °C 固溶 170 min, 60 ~ 70 °C 水中淬火。

2) 随着时效温度的升高, 达到时效峰值强度时间缩短, 峰值区变窄。对于 1420 铝锂合金, 采用合理的时效制度, 析出大量细小、弥散的球形  $\delta'$  ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) 亚稳相质点, 使合金具有优良的综合机械性能。最佳的时效制度为 140 °C  $\times$  14 ~ 16 h 时效。

3) 1420 铝锂合金模锻件采用新热处理工艺后, 力学性能  $\sigma_b \geq 493$  MPa,  $\sigma_{0.2} \geq 398$  MPa,  $\delta \geq 12.9\%$ , 显著超过了目前合金的性能指标。

## 参考文献:

- [1] DEJONG H F. A Survey of the Development, Properties and Application of Aluminum-Lithium Alloys[J]. Aluminum, 1984, 60(9):673 - 679.
- [2] WEBSTER D, KIRKERIDE R. Mechanical Properties and Microstructure of Al - Li - Cu - Mg - Er Dieforgings [J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17A(11):2 007 - 2 016.
- [3] MURRKAMI Y. Recent Fundamental Research and Development in Age-Hardenable Alloys[J]. Mater Trans Jpn Inst Met, 1990, 31:8.
- [4] SHERDIFF H R, ASHBY M F. A Process Model for Age Hardening of Aluminum Alloys-I The Model [J]. Acta Metallurgy, 1990, 38(10):1 789 - 1 802.
- [5] NOVIKOV E E, WANG EYYOU. Theory of Metal Heat Treatment [M]. Beijing:Mechanical Industrial Press, 1987. 277 - 316.
- [6] 约翰 D, 弗豪文著. 物理冶金学基础[M]. 卢光照, 赵子伟译. 上海:上海科学技术出版社, 1998. 243.

## New Heat Treatment Process for 1420 Al - Li Alloy Die - Forging and Mechanism

HUANG Guang-jie, WANG Ling-yun, YANG Wen-min, JIANG Zuo-wen, LIU Cheng

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The plan of heat treatment processes for 1420 Al - Li alloy die-forging is designed using the orthogonal method. The heat-treatment experiments are made and the mechanical properties are tested according to the designed plan. The effect of solid solution temperature, solid solution time, ageing temperature, ageing time on microscopic mechanism of the mechanical properties of the 1420 Al - Li alloy is investigated using microscope and TEM. The best heat treatment process of the 1420 Al - Li alloy is obtained. The experimental results indicate that the strength  $\sigma_b$ , yield stress  $\sigma_{0.2}$ , percentage elongation  $\delta$  of the alloy reach separately 493 MPa, 398 MPa, 12.9% adopting 455 °C  $\times$  170 min quenching, 140 °C  $\times$  12 ~ 16 h ageing. The mechanism of the high strength and toughness is also discussed.

**Key words:** Al - Li alloys; heat treatment; microstructure; mechanical properties

(责任编辑 李胜春)