

文章编号: 1004-0609(1999)04-0694-06

# CP276 铝锂合金的应变时效工艺<sup>①</sup>

蒋 呐<sup>1</sup> 向曙光<sup>1</sup> 郑子樵<sup>2</sup>

(1. 西南铝加工厂 技术中心, 重庆 401326; 2. 中南工业大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

**摘 要:** 研究了预拉伸量和时效温度对 CP276 铝锂合金组织与性能的影响。结果表明, 时效前的预拉伸可促进  $T_1$  相异质形核, 显著提高合金的沉淀强化效果, 但同时指出, 过大的预拉伸量 (> 6%) 导致位错胞状缠结, 降低  $T_1$  相分布的均匀性, 对合金性能不利。时效温度则对晶界 PFZ 影响显著, 高温时效的合金 PFZ 较宽, 强度与塑性很差。该合金的最佳应变时效制度为: 3% ~ 6% 预拉伸 + 160 °C 时效 16 ~ 20 h, 该制度下合金具有较好的综合力学性能 ( $\sigma_b = 563$  MPa,  $\sigma_{0.2} = 521$  MPa,  $\delta = 6.6\%$ )。

**关键词:** 铝锂合金; 时效; 组织; 性能

**中图分类号:** TG 151.1 TG 146.22

**文献标识码:** A

通常, 为了提高铝锂合金的强韧性, 需要采用应变时效工艺<sup>[1~3]</sup>。这是一种将预拉伸变形的冷作应变硬化与人工时效的沉淀强化相结合的热处理方法, 是改善合金性能的重要工艺手段。

CP276 铝锂合金是重要的航空、航天结构材料, 但至今关于 CP276 合金热处理工艺的研究报道仍然很少, 因此, 开展该合金应变时效工艺的研究工作具有十分重要的意义。本文着重研究了应变时效的主要工艺参数对 CP276 铝锂合金微观组织结构与常温力学性能的影响, 讨论了该合金组织与性能之间的内在关系; 并且通过选择合理的应变时效制度, 使合金获得理想的综合力学性能, 从而为其在航空与航天结构上的实际应用奠定基础。

## 1 实验方法

实验合金按照 CP276 的名义成分配料。合金在 60 kW 坩埚电阻炉中熔化, 熔炼过程中采用熔剂覆盖。然后, 将熔体在水冷金属模中浇铸成截面为 80 mm × 260 mm 的扁铸锭, 铸造

过程中为防止氧化, 采用了氩气进行熔体保护。铸锭的化学成分分析结果见表 1。将铸锭均匀化退火, 然后按下述工序进行加工: 铣面 → 热粗轧 → 热精轧 → 中间退火 → 冷轧。最终轧制成 2 mm 板材。

从 2 mm 冷轧板上切取试样。将试样在盐浴炉中固溶加热, 水淬至室温, 然后进行应变时效。各工艺参数的实验范围选定为: 预拉伸量 0 ~ 14%, 时效温度分别为 130 °C, 160 °C, 190 °C。分别研究了预拉伸量和时效温度对合金微观组织与力学性能的影响, 并对最佳的应变时效制度进行了工艺验证实验。力学性能测试在 DLY-10 万能材料试验机上进行, TEM 形貌在 H800 透射电子显微镜下进行观察, 电镜试样为双喷薄膜试样。

## 2 实验结果

### 2.1 微观组织

TEM 的观察结果表明, CP276 铝锂合金的时效强化效应主要取决于  $\delta'$  ( $Al_3Li$ ) 相和  $T_1$  ( $Al_2CuLi$ ) 相的沉淀强化。图 1 是预拉伸量

① 收稿日期: 1998-05-14; 修回日期: 1999-05-06 蒋 呐(1968-), 男, 高级工程师, 硕士

表 1 实验合金化学成分

Table 1 Chemical composition of studied alloy (%)

| Compositions | Alloying elements |      |      |      |         | Impurities |        |
|--------------|-------------------|------|------|------|---------|------------|--------|
|              | Li                | Cu   | Mg   | Zr   | Al      | Fe         | Si     |
| Nominal      | 2.20              | 2.80 | 0.50 | 0.12 | Balance | < 0.12     | < 0.10 |
| Actual       | 2.25              | 2.78 | 0.57 | 0.11 | Balance | 0.04       | 0.04   |

对该合金在 160 °C 的时效组织形态的影响。从图 1(a), (b) 可以看出, 时效前的预拉伸没有明显改变  $\delta'$  相的析出形态和数量。图 1(c), (d) 则显示: 未预拉伸的试样时效后  $T_1$  相析出很少, 仅在  $\alpha'$  ( $\text{Al}_3\text{Zr}$ ) 粒子与基体间的界面上观察到少量粗大的  $T_1$  相析出(图 1(c)), 而 6% 预拉伸变形使  $T_1$  相细化, 析出数量显著增

多(见图 1(d)), 这些针片状的  $T_1$  相在晶内均匀分布, 相互间保持着特定的惯析位向关系, 这种形态的  $T_1$  相沉淀组织对基体无疑将产生极佳的强化效果。但是, 当预拉伸量较大时(10%), 晶内可观察到胞状位错组织(图 1(e)), 此时析出的  $T_1$  相反而变得不均匀, 且较粗大, 见图 1(f)。

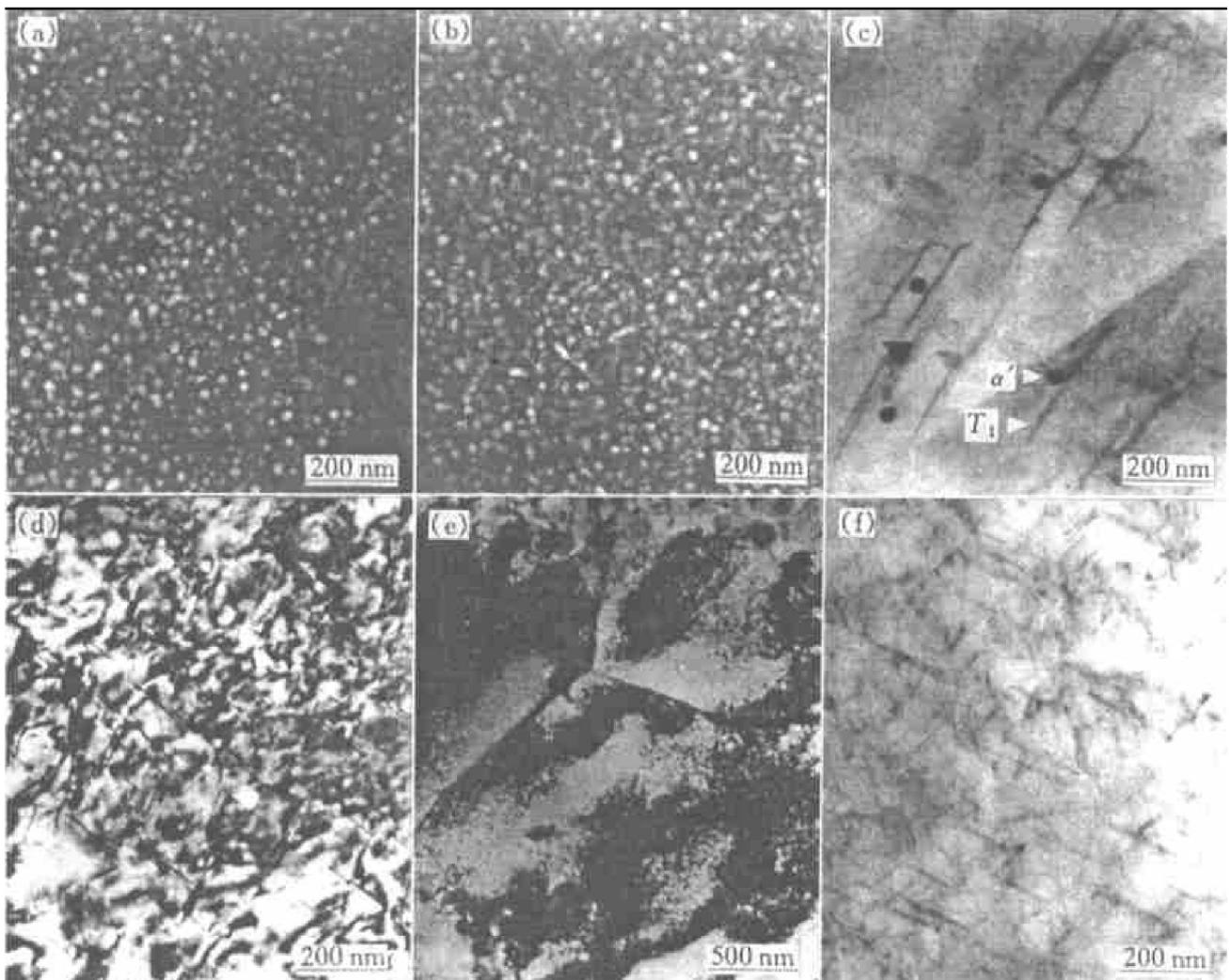


图 1 预拉伸量对合金时效组织形态的影响(160 °C 时效)

Fig. 1 Effect of stretching on microstructures of 160 °C aged alloy

- (a) —  $\delta'$  phase (unstretched); (b) —  $\delta'$  phase (stretched 6%); (c) —  $T_1$  phase (unstretched);  
 (d) —  $T_1$  phase (stretched 6%); (e) — Morphology of dislocations (stretched 10%);  
 (f) —  $T_1$  phase (stretched 10%)

图2显示了合金分别在130℃和190℃时效的晶界微观形貌。在130℃时效时，晶界无沉淀带很窄，晶内析出的 $\delta$ 相弥散、细小。而在190℃时效时，析出的 $T_1$ 相稀疏而粗大，并在晶界上析出了链状分布的平衡相，这些晶界链状相的析出与长大可导致晶界附近的溶质原子贫乏，从而使晶界无沉淀带明显宽化，如图2(b)所示。

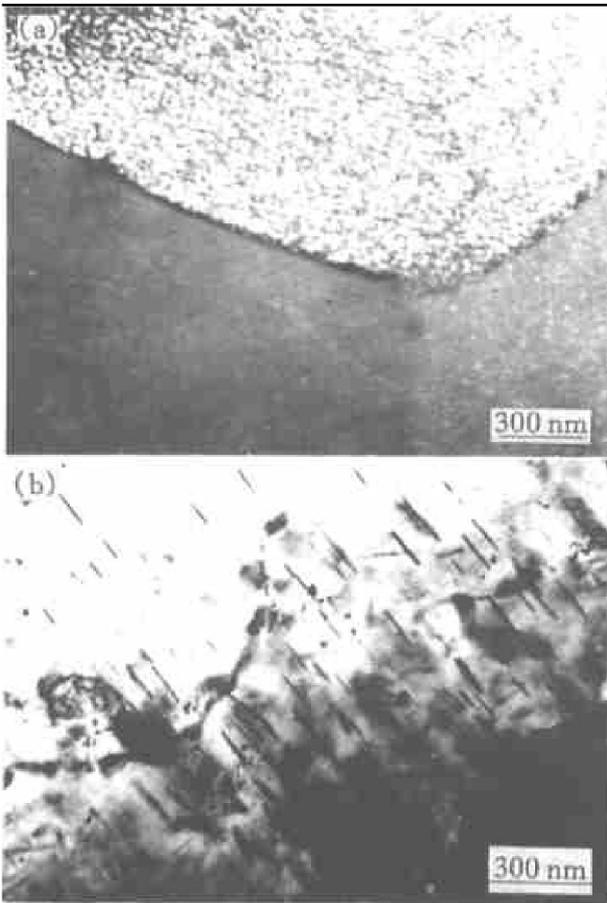


图2 合金在不同温度下时效的晶界形貌

Fig. 2 Morphologies of grain boundaries for alloy aged at different temperatures  
(a) —130 °C for 24 h; (b) —190 °C for 20 h

### 2.2 工艺参数对力学性能的影响

图3所示是预拉伸量对合金经160℃时效后的常温力学性能的影响规律。可以看出，时效前的预拉伸对合金力学性能的影响非常显著，这与其它铝锂合金的热处理特性是一致的。随着预拉伸量增加，合金的强度指标均显著提高。当预拉伸量增加至6%时， $\sigma_b$  大约提高了60 MPa， $\sigma_{0.2}$  则提高了130 MPa左右。但是，当预拉伸量超过6%以后， $\sigma_b$  却几乎不再

增加， $\sigma_{0.2}$  的增幅也趋于平缓，而此时合金的延伸率则偏低( $\delta < 6\%$ )，如图3所示。由此表明，过度增加预拉伸量并不能进一步提高合金的强度，却有损于合金的延伸率，导致其力学性能下降。根据图3，预拉伸量应控制在3%~6%为宜，在此范围，一方面，合金的强度可得到充分提高( $\sigma_b$  提高40~60 MPa， $\sigma_{0.2}$  提高100~130 MPa)；另一方面，合金可保持较佳的延伸率( $\delta = 6\% \sim 8\%$ )，表现出理想的强度与塑性配合。

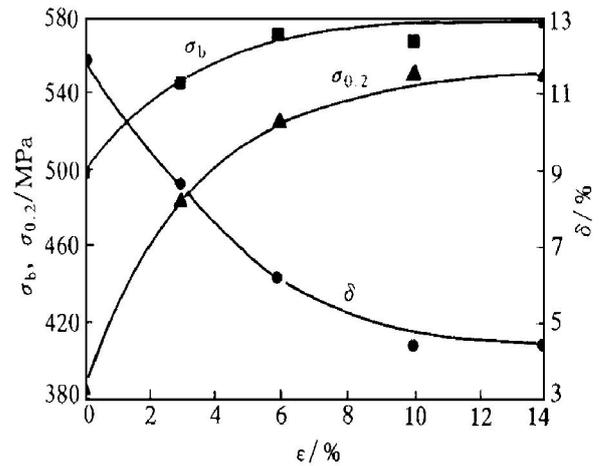


图3 预拉伸对合金力学性能的影响  
(160℃时效20h)

Fig. 3 Effect of stretching ( $\epsilon$ ) on mechanical properties for alloy aged at 160 °C for 20 h

图4为合金分别在130℃、160℃、190℃进行应变时效的性能—时间曲线。从图4(a)可以看出，130℃时效的合金强度较低，延伸率很高，属于典型的欠时效，至32h也未达到强度峰值；而在160℃时效的合金强度很高，大约在20~24h出现时效峰，但过时效状态下合金延伸率偏低。在图4(b)中，合金在160℃的时效进程较图4(a)中稍缓，这是由于时效前预拉伸量稍低的缘故，峰时效时间大约在24~28h左右；而合金在190℃的时效进程极快，时效峰较早地出现在12h左右，合金强度不太高， $\sigma_b$  和  $\sigma_{0.2}$  接近，延伸率很低，呈现出强烈的过时效倾向，与160℃时效相比力学性能较差。综合图4的结果可以看出，该合金在160℃时效的综合力学性能显然优于在130℃和190℃

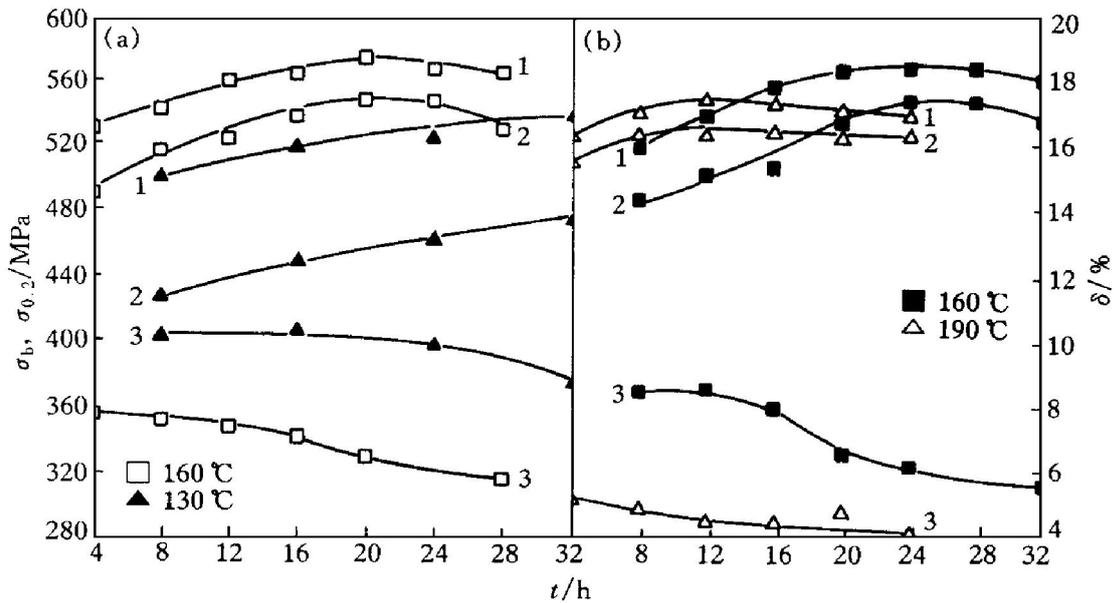


图4 合金在不同温度下进行应变时效的力学性能变化

Fig. 4 Curves of mechanical properties vs ageing time at various temperatures, for alloy stretched 6% (a), 3% (b), respectively, prior to ageing

1— $\sigma_b$ ; 2— $\sigma_{0.2}$ ; 3— $\delta$

时效,其中以160 °C时效16~20 h的性能最为理想:  $\sigma_b = 560 \sim 580$  MPa,  $\sigma_{0.2} = 500 \sim 530$  MPa、 $\delta = 6\% \sim 8\%$  (见图4)。

### 2.3 最佳应变时效制度

根据前述实验结果,可将CP276合金的最佳应变时效制度确定为:3%~6%预拉伸+160 °C时效16~20 h。按照该制度进行工艺验证实验,合金的力学性能为:  $\sigma_b = 563$  MPa,  $\sigma_{0.2} = 521$  MPa,  $\delta = 6.6\%$ 。可以看出,强度和延伸率的配合较为理想,合金的综合力学性能令人满意。

## 3 讨论

### 3.1 预拉伸对合金时效组织、性能的影响

对于热处理强化型的铝锂合金而言,应变时效强化并非应变硬化与时效强化的简单迭加。已有研究表明<sup>[4~6]</sup>,时效前预变形处理的作用在于增加基体的位错密度,促进强化相的异质形核。

Ashton 等人的实验指出<sup>[7]</sup>,由于 $\delta$ 相与

基体间的共格应变能和界面能均较低,倾向于以均质形核的方式在基体内脱溶,因而 $\delta$ 相的脱溶机制不依赖于位错,故其析出形态和数量不受预拉伸变形的影响。图1(a), (b)的TEM观察结果证实了这一点。

与此相反,和基体呈非共格关系的 $T_1$ 相的析出过程则非常缓慢。研究证实<sup>[8]</sup>, $T_1$ 相主要依靠在位错、亚晶界等晶体学缺陷处异质形核析出,以降低形成新相时所产生的界面能。

未预拉伸的试样,基体内位错密度很低,时效过程中仅有少量的 $T_1$ 相在晶内沿 $\alpha'$ 粒子与基体的相界形核析出,见图1(c);而预拉伸变形则可使基体中的位错密度成倍地增加,从而为 $T_1$ 相提供大量的异质形核点,使其在晶内的析出数量显著增加,且呈均匀分布,如图1(d)所示。因此,随着预拉伸量增大(至6%),合金强度显著提高(见图3),正是由于预拉伸变形可促进 $T_1$ 相大量、均匀地析出,从而使合金的沉淀强化效果显著增加。

但若进一步增大预拉伸量(>6%),将使基体中的位错数量过多,从而造成大量的位错缠结在一起,最终形成胞状位错组织(见图1

(e)。这种胞状位错组织的特点是,胞壁处的位错密度很高,而胞内的位错很少。在这种情形下,  $T_1$  相往往沿位错胞壁形核,因而其形核率降低,而且,由于位错胞壁的变形贮能较高,可为新相长大提供较大的驱动力,因此,其综合作用的结果是:  $T_1$  相长得较为粗大,但分布的均匀性下降,如图 1(f) 所示。这种形态的  $T_1$  相强化效果不佳,而且容易导致基体变形不均匀,影响合金塑性,从而出现图 3 所示情况:当预拉伸量超过 6% 以后,合金的强度没有明显的增加,延伸率却较低。

### 3.2 时效温度对合金组织与性能的影响

合金的时效温度对其组织与性能的影响主要取决于两个方面,一是对强化相脱溶沉淀的影响,二是对晶界无沉淀带(PFZ)的影响。

当合金在较低温度(130 °C)时效时,由于原子扩散速率较慢,强化相的长大将受到抑制,因而合金难以获得充分的沉淀强化。但低温下溶质原子的相对过饱和程度较高,相变驱动力大,故强化相的形核率高。由于  $\delta'$  相的大量形核,将释放出大量被 Li 原子所束缚的淬火空位,使基体中自由空位浓度增加,于是,低温时效时因“贫空位机制”而导致晶界无沉淀带宽化的可能性大为降低。所以,在图 2(a) 中可观察到晶内细小而弥散的  $\delta'$  相和细窄的晶界 PFZ,相应的力学性能结果显示,130 °C 时效的合金强度较低而延伸率很高,如图 4(a) 所示。

而当合金在 160 °C 时效时,由于原子扩散加剧,强化相的长大已较为充分,如图 1(b) 及 (d) 所示,因而合金的沉淀强化效果明显增加。从图 4 可以看出,合金在 160 °C 时效时具有较高的综合力学性能。

当合金在 190 °C 进行时效时,由于在这种较高的时效温度下,固溶体的相对过饱和程度较低,因而强化相的形核率明显下降,但此时其生长速率较快,强化相易粗化。在图 2(b) 中观察到了稀疏而粗大的  $T_1$  相脱溶组织,正是它使合金的沉淀强化效果下降,因此,合金在 190 °C 时效的强度反而低于其 160 °C 时效的强度,见图 4(b)。而且,在高温下晶界易析出连

续分布的粗大平衡相(图 2(b)),导致晶界附近的溶质原子贫乏,则晶界无沉淀带可因高温时效的“贫溶质机制”而宽化,从而易使变形被局限在柔软的 PFZ 中,引起应变局域化及导致低能沿晶断裂。因此,190 °C 时效的合金的综合力学性能最差。

## 4 结论

(1) 时效前适量的预拉伸变形可增加基体位错密度,促进  $T_1$  相的异质形核,从而提高 CP276 合金的强度。但若预拉伸量过大,则将导致位错缠结而形成胞状位错组织,于  $T_1$  相的析出形态与分布反而不利,进而影响合金性能。

(2) 时效温度对强化相尺寸和 PFZ 宽度有着显著影响。时效温度低,则沉淀相细小,合金强化不充分;时效温度过高,则合金时效进程太快,促使沉淀相粗化及 PFZ 加宽,合金强度和塑性均很差。

(3) 使 CP276 合金获得最佳综合力学性能的应变时效制度为: 3% ~ 6% 预拉伸 + 160 °C 时效 16~ 20 h。

## REFERENCES

- 1 Gregson P J and Flower H M. Acta Met, 1985, 33: 527~ 537.
- 2 Meng Liping(孟力平) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4 (Suppl.): 271.
- 3 Yin Dengfeng(尹登峰) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4 (Suppl.): 275.
- 4 Venkateswara Rao K T and Ritchie R O. Materials Science and Technology, 1989, 5: 882.
- 5 Tosten M H, Vasudevan A K and Howell P R. Metall Trans, 1988, 19A: 51~ 66.
- 6 Jiang Na(蒋 呐) and Xiang Shuguang(向曙光). In: Zheng Ziqiao(郑子樵) *et al* eds. Proceedings of the 2nd China National Conference on Al-Li Alloys

- (第二届全国铝锂合金研讨会论文集), Changsha: Central South University of Technology Press, 1993, 43~ 45.
- 7 Ashton R F *et al.* In: Baker C, Gregson P J, Harris S J *et al* eds. Aluminium-Lithium Alloys III, London: The Institute of Metals, 1986, 66~ 77.
- 8 Lee E W and Frazier W E. Script Metall, 1988, 22: 53.

## Strain ageing process for Al-Li alloy CP276

Jiang Na<sup>1</sup>, Xiang Shuguang<sup>1</sup>, Zheng Ziqiao<sup>2</sup>

1. Technology Center, Southwestern Aluminium Fabrication Plant, Chongqing 401326, P. R. China

2. Department of Materials Science and Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

**Abstract:** Effects of the pre-ageing stretch and ageing temperatures on the microstructure and mechanical properties for Al-Li alloy CP276 were investigated. The results show that stretch before ageing promotes the heterogeneous nucleation of  $T_1$  precipitates throughout the matrix and hence increases the ageing strengthening effect of this alloy significantly. However, over-stretching ( $> 6\%$ ) results in cellular tangles of dislocations, which decreases the uniform distribution of  $T_1$  precipitates inside the grains, and therefore, deteriorates the strength and ductility of the alloy to some extent. The results also show that, ageing temperatures affect morphologies of precipitation free zones along grain boundaries remarkably. Al alloy aged at high temperature exhibits wider PFZ, corresponding to the poor combination of strength and ductility. As a result, the favorable strain ageing process for this alloy is that pre-ageing stretching  $3\% \sim 6\% +$  ageing at  $160\text{ }^\circ\text{C}$  for  $16\sim 20\text{ h}$ , upon which the alloy achieves desirable strength-ductility balance, i. e.,  $\sigma_b$  is  $563\text{ MPa}$ ,  $\sigma_{0.2}$  is  $521\text{ MPa}$ ,  $\delta$  is  $6.6\%$ , respectively.

**Key words:** Al-Li alloys; ageing strengthening; structure; property

(编辑 黄劲松)