

文章编号: 1004 - 0609(2006)01 - 0089 - 05

2090 铝锂合金中 δ 相和 T_1 相的复合强化作用^①

赵志龙, 刘 林, 陈 铮
(西北工业大学 机电学院, 西安 710072)

摘 要: 采用 TEM 观察 2090 和 2090+ Ce 两种铝锂合金中 δ 相和 T_1 相与位错的交互作用行为, 利用图形定量分析结果和微观变形理论分别计算两个相的强化贡献, 进而分析两相复合强化作用形式。分析结果表明: 在近峰值时效区域, δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系与 $q=1.4$ 的关系符合较好; 欠时效时, δ 、 T_1 相强化贡献的叠加关系接近线性关系 ($q=1$); 过时效时, 却与抛物线型关系 ($q=2$) 符合较好。 δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系对时效时间表现出较强的依赖性。

关键词: 铝锂合金; 沉淀相; 强化

中图分类号: TG 146.21

文献标识码: A

Co-strengthening contribution of δ and T_1 phases of Al-Li alloy 2090

ZHAO Zhi-long, LIU Lin, CHEN Zheng
(School of Mechatronic Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

Abstract: The microstructures of dislocation in two kinds of aluminum-lithium alloy 2090 and 2090+ Ce were observed by TEM. The contribution of precipitates of δ and T_1 phases were separately calculated by the results of quantitative metallography and micro-deformation theory. Furthermore, the co-strengthening effects of δ and T_1 phases were studied. The results show that the adding relationship of co-strengthening of δ and T_1 phases accords with that of $q=1.4$ at near peak-aged condition. But the adding relationship is approximately linear relation ($q=1$) at under-aged condition, and become parabola form at over-aged ($q=2$). The adding relation of co-strengthening contribution of δ and T_1 phases is obviously dependent on aging time.

Key words: aluminum-lithium alloy; precipitates phase; strengthening

球状的 δ 相和片状的 T_1 相是 2090 铝锂合金中两个主要的时效强化相。 δ 相强化的主机制是有序强化作用, 但 Miura 等^[1-3] 提出位错与 δ 相间的交互作用依赖于成分和时效条件。Howe 利用 HR-TEM 清楚地观察到 T_1 相可被位错切截, 化学强化和 Orowan 机制是 T_1 相两种可能的强化机制, 甚至有人提出了混合强化机制^[4-6]。由此可见, 目前对 T_1 相和 δ 相的强化贡献主机制仍未彻底搞清, δ 相与 T_1 相复合强化的问题要从实验和理论分析来量化是件困难较大的工作。本文作者采用 2090

铝锂合金和添加微量稀土 Ce 的 2090+ Ce 铝锂合金, 利用 TEM 及体视分析技术在沉淀相随时效的变化和位错组态分析的基础上, 利用微观力学原理计算了 δ 相和 T_1 相的强化贡献, 进而探讨了两相的复合强化形式。

1 实验

2090 和 2090+ Ce 铝锂合金的化学成分如表 1 所列。实验材料采用铸冶法获取。铸锭经均匀化处

① 基金项目: 航天创新基金资助项目

收稿日期: 2005-04-30; 修订日期: 2005-08-08

作者简介: 赵志龙(1963-), 男, 副教授, 博士

通讯作者: 赵志龙, 博士; 电话: 029-88493498; E-mail: zhaolong@nwpu.edu.cn

理后, 锻制开坯, 经热轧和温轧至 2 mm 厚板材。采用 T8(固溶处理+ 预变形+ 人工时效) 处理, 于 190 °C 时效 3~ 48 h。经时效处理后, 线切割出拉伸试样, 在电子拉伸机上获取不同时效条件试样的屈服强度($\sigma_{0.2}$)。制作透镜试样: 机械减薄至 60~ 80 μm , 双喷穿孔, 电解液为 25% 的硝酸甲醇溶液, 液氮冷却。消光轮廓法测量薄膜厚度为 250~ 350 nm。采用 H-800 型透射电镜(加速电压为 200 kV) 分别观察和记录 δ 和 T_1 相中心暗场像, Leica 图形分析系统确定和计算沉淀相的体积分数。位错组态的观察采用透射电镜 JEM-200CX(加速电压为 160 kV)。

表 1 实验材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental materials (mass fraction, %)

Alloy	Li	Cu	Zr	Ce	Al
2090	2.36	2.33	0.11	—	Bal.
2090+ Ce	2.30	2.54	0.10	0.05	Bal.

2 结果及分析

2.1 δ 相的强化贡献

图 1 所示为 2090+ Ce 铝锂合金在 190 °C 时效 3 h 时试样的 TEM 像。由图 1 可看出, 在位错组态中, 许多位错都是成对出现的。由此说明, 在欠时效时, 位错主要以切截方式通过 δ 相; 而过时效时, δ 相已足够大(大于 18 nm), 位错以绕过的方式通过 δ 相, 因此位错组态中位错环特征占优势^[7, 8]。

在欠时效条件下(190 °C, 3 h), δ 相以有序强化作用为主(其它强化机制贡献作用可略而不计)。利用共格有序强化公式^[9, 10]:

$$\Delta\tau_{\delta} = \frac{E_{\text{apb}}}{2b} \left[\left| \frac{3\pi E_{\text{apb}} \Phi_{\delta} \bar{r}}{32F} \right| - \Phi_{\delta} \right] \quad (1)$$

式中 E_{apb} 为 δ 相反相畴界面能, $E_{\text{apb}} \approx 158 \text{ mJ/m}^2$; Φ_{δ} 和 \bar{r} 分别为 δ 相体积分数和平均半径; b 为 Burgers 矢量大小, $b = |\bar{b}|$; F 是位错的线张力, 可表示为

$$F = \frac{Gb^2}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{r_s}{r_0} \right] \quad (2)$$

式中 G 为 Al 基体弹性剪切模量, 约 30 GN/m^2 ; r_0 和 r_s 分别为位错内、外半径, $r_0 = 2b$, $b = 0.286 \text{ nm}$ 。

$$r_s = \left[\frac{2\pi}{3\Phi_{\delta}} \right] \cdot \bar{r} \quad (3)$$

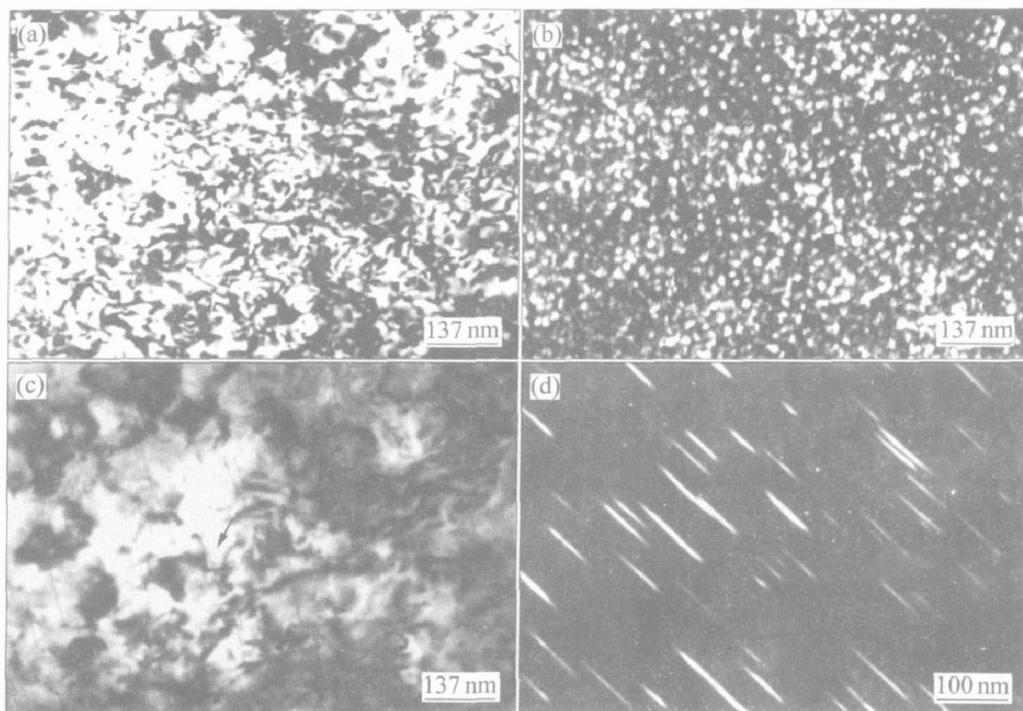


图 1 2090+ Ce 合金 190 °C 时效 3 h 试样的 TEM 像

Fig. 1 TEM images of 2090+ Ce alloy specimen aged at 190 °C for 3 h

- (a) —Dislocations;
- (b) —Centered dark field of δ at same area;
- (c) —Interaction between dislocation and T_1 precipitates;
- (d) —Centered dark field of T_1 -phase, electronic beam near $\langle 112 \rangle$

在峰值时效和近峰值区域, 由于 δ 相已粗化到一定程度, 此时位错出现了较大的弯曲, Friedel 统计规律已不再适合。采用半经验估算法^[10, 11], 表达式为

$$\Delta\tau_{\delta, \max} = \frac{0.95E_{\text{apb}} \sqrt{\varphi_{\delta}}}{(2.275 - 2\sqrt{\varphi_{\delta}})b} \quad (4)$$

在过时效条件下, 由于 δ 相尺寸较大, 位错与其相互作用时以绕过的方式通过, 采用 Orowan 数学模型进行计算^[8]:

$$\Delta\tau_{\delta} = 0.84 \frac{Gb}{2\pi(1-\nu)^{1/2} \cdot r_s} \cdot \ln\left[\frac{r}{r_0}\right] \quad (5)$$

在不同时效条件下, δ 相强化贡献的计算如表 2 所列。

2.2 T_1 相的强化贡献

T_1 相与位错交互作用情况图 1(c) 所示。图 1(d) 所示为束向接近 $\langle 112 \rangle$ 的 T_1 相中心暗场像。

由图 1 可见, 欠时效时, 在 T_1 相聚集的区域存在着大量的短弯曲位错。图 1(c) 中箭头所示为 T_1 相与位错交互作用的情况, 可以观察到位错切过 T_1 相, 但又不是单一切过, 由于此时位错具有较大的弯曲角, 位错线张力不容忽视; 而过时效时, 虽然存在大量 Orowan 环, 但仍可观察到位错切过 T_1 相。因此, 位错与 T_1 相间的交互作用形式为切过和绕过的混合型。

在所有有关切过机制的理论模型中, 由于 T_1 相刃边的半共格性以及较大的长厚比, 位错切过刃边造成的界面能增加是位错运动能量的消耗源, 因此, 有关切过机制的计算中只考虑化学强化作用。化学强化作用的表达式为

$$\tau_{\text{ch}} = \left[\frac{4E_i^3 b}{r_s^2 F} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中 E_i 为 T_1 相刃边界面能, $E_i \approx 2.71 \text{ J/m}^2$;

$r_s = \frac{1}{\sqrt{n_s}}$, n_s 则为滑移面单位面积上所切截的 T_1

相数目, $n_s = \frac{3\varphi_{T_1}}{4hd}$ 。 T_1 相尺寸表示为直径 d 、厚度 h , 体积分数为 φ_{T_1} 。

$$F = 2.026 \frac{Gb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (7)$$

式中 G 为 $\{111\}$ 面基体的剪切模量, 取 $G = 30 \text{ GN/m}^2$; r_0 和 R 分别为螺型位错的内、外半径, $r_0 = 2b$, $R = 0.84 \sqrt{hd}$ ^[3, 10]。

Orowan 形式经推演所得到的表达式形式为

$$\tau_0 = \frac{Gb \times 0.81}{2\pi(1-\nu)^{1/2}} \cdot \left[\frac{\varphi_{T_1}}{hd} \right]^{1/2} \cdot \frac{\ln(d/\pi b)}{1.23 - \sqrt{\varphi_{T_1}}} \quad (8)$$

式中 ν 为泊松比, 取 $\nu = 0.339$ 。

T_1 相的强化作用 τ_{T_1} 应该为

$$\tau_{T_1} = \eta_1 \tau_{\text{ch}} + \eta_2 \tau_0 \quad (9)$$

式中 η_1 和 η_2 为修正系数, $\eta_1 + \eta_2 = 1$ 。根据实验结果的对比以及和回溶实验结果的对比来看, $\eta_1 = 2/3$, $\eta_2 = 1/2$ 为好。计算结果表明, T_1 相的强化贡献约为屈服强度的 30%~60%, 其计算结果如表 2 所列。

2.3 δ 和 T_1 相的复合强化作用形式

如用 $\Delta\tau_p$ 表示 δ 和 T_1 相的复合强化作用, 则 $\Delta\tau_{\delta}$ 和 $\Delta\tau_{T_1}$ 分别表示 δ 和 T_1 相的强化贡献。一些研究者认为, $\Delta\tau_p$ 和 $\Delta\tau_{\delta}$ 、 $\Delta\tau_{T_1}$ 间关系式为

$$\Delta\tau_p = \Delta\tau_{\delta} + \Delta\tau_{T_1} \quad (10)$$

基体的强化作用 τ_m 对合金总的剪切抗力 τ_c 的贡献符合线性叠加律^[3, 12], 即

$$\tau_c = \tau_m + \Delta\tau_p \quad (11)$$

τ_c 的计算利用了 Taylor 关系式, 即 $\tau_c = \alpha_2/M$, M 为 Taylor 系数^[13-15]。 τ_c 和 τ_m 实验结果及理论分析结果如表 2 所列。

图 2 所示为 $\Delta\tau_p$ 随时效时间的变化情况以及 q 为 1 和 2 时式 (10) 的计算结果。由图 2 可看出, 实

表 2 实验结果及理论计算结果

Table 2 Experimental results and theoretical results

Aging condition	Alloy	α_2 / MPa	$\Delta\tau_{T_1}$ / MPa	$\Delta\tau_{\delta}$ / MPa	τ_c / MPa	$\Delta\tau_p$ / MPa	τ_m / MPa
190 °C, 3 h	2090	466.8	50.7	41.0	155.6	91.6	64.0
	2090+ Ce	467.4	48.5	34.5	155.8	95.0	60.8
190 °C, 12 h	2090	477.6	60.4	54.6	159.2	95.2	64.0
	2090+ Ce	463.2	63.0	51.0	154.4	93.6	60.8
190 °C, 48 h	2090	391.4	73.2	32.4	130.5	76.5	54.0
	2090+ Ce	386.9	77.0	26.6	129.0	83.7	45.3

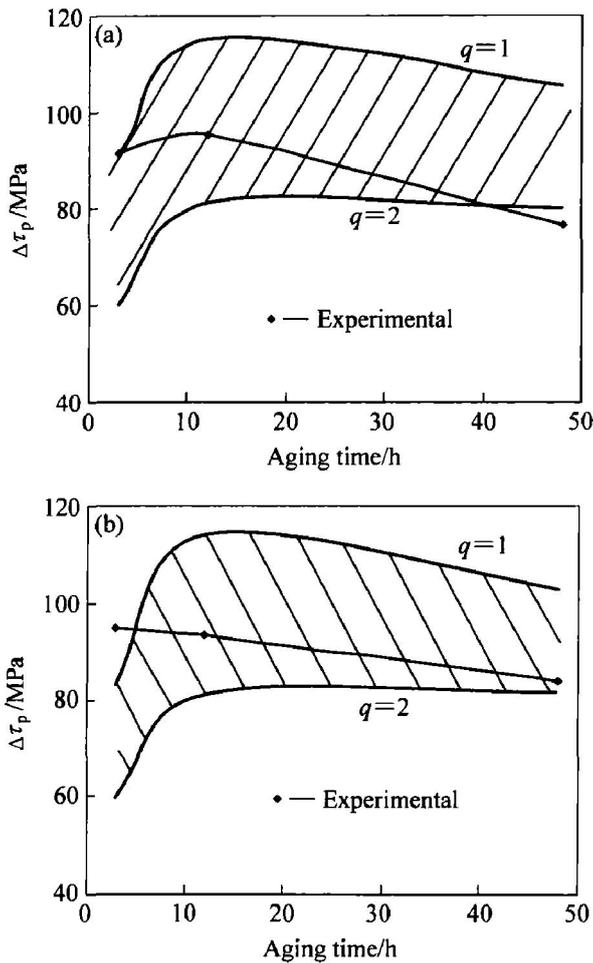


图2 合金的 $\Delta\tau_p$ 随时效时间的变化曲线

Fig. 2 Change curves of $\Delta\tau_p$ with aging time of alloy

(a) —2090 alloy; (b) —2090+ Ce alloy

验结果基本上处于 $\Delta\tau_p|_{q=1}$ 和 $\Delta\tau_p|_{q=2}$ 两条曲线所包容的区域中, 说明理论分析结果基本可靠。

经过演算发现在近峰值时效区域(时效时间为12 h), 2090 合金利用式(10)计算的 $q=1.374$, 而2090+ Ce 合金的 $q=1.404$ 。由此可见, 在峰值及近峰时的时效区域, δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系与文献[2]所提出 $q=1.4$ 的关系符合得较好。在欠时效时, δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系接近 $q=1$ 的线性叠加关系; 而过时效时, 实验结果更接近于抛物线型的叠加关系, 即 $q=2$ 的关系。因此, 由本实验的结果及理论分析结果可以看出, δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系并非一成不变, 而是与时效时间呈现一定的依赖关系, 则式(10)更准确地表达为

$$\Delta\tau_p^{(t)} = \Delta\tau_p^{(t)} + \Delta\tau_{T_1}^{(t)} \quad (12)$$

式中 t 为时效时间, $1 \leq q(t) \leq 2$, 即当 t 较小时, $q(t) \rightarrow 1$; 而当 t 较大时, $q(t) \rightarrow 2$ 。

3 结论

- 1) 在近峰值时效区域, δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系与 $q=1.4$ 的关系符合得比较好, 即 $\Delta\tau_p^{1.4} = \Delta\tau_p^1 + \Delta\tau_{T_1}^1$ 。
- 2) 欠时效时, δ 和 T_1 相强化贡献的叠加关系接近线性关系($q=1$); 而过时效时, 却与抛物线型的关系($q=2$)符合得较好。
- 3) δ 和 T_1 相强化作用的叠加关系表现出较强的对时效时间的依赖性。

REFERENCES

- [1] Miura Y, Matsui A, Furukawa M, et al. Plastic deformation of AlLi single crystals[A]. Baker C, Gregson P J, Harris S J, et al. Aluminium-Lithium Alloys III[C]. London: Inst of Metals, 1986. 427-434.
- [2] Huang J C, Ardell A J. Addition rules and the contribution of δ precipitates to strengthening of aged AlLi-Cu alloys[J]. Acta Metall, 1988, 36(11): 2995-3006.
- [3] Huang J C, Ardell A J. Precipitation strengthening of binary AlLi alloys by δ precipitates[J]. Mater Sci Eng, 1988, A104: 149-156.
- [4] Howe J M, Lee J, Vasudevan A K. Structure and deformation behavior of T_1 precipitate plates in an Al-2Li-1Cu alloy[J]. Metall Trans, 1988, 19A(12): 2911-2919.
- [5] 赵志龙, 李晓玲, 徐磊, 等. 2090 铝锂合金 T_1 相的强化作用及微量 Ce 的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 546-551.
ZHAO Zhilong, LI Xiaoling, XU Lei, et al. Strengthening effect of T_1 precipitates and influence of minor cerium in 2090 AlLi alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 546-551.
- [6] CHEN Zheng, HE Ming. Effects and mechanisms of extrinsic strengthening during aging for alloy 2090+ Ce[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1992, 2(2): 76-81.
- [7] ZHAO Zhilong, LIU Lin, CHEN Zheng. Effect of rare earth cerium on yield strength anisotropy of AlLi alloy sheet and its theoretical prediction[J]. J Rare Earths, 2004, 22(3): 410-413.
- [8] Schlesier C, Nembach E. Strengthening of aluminium-lithium alloys by long range ordered γ -precipitates[J]. Acta Metall, 1995, 43: 3983-3992.
- [9] 赵志龙, 刘林, 陈铮. δ 相的强化贡献及微量稀

- 土 Ce 的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(5): 342 - 345.
- ZHAO Zhirong, LIU Lin, CHEN Zheng. The strengthening contribution of δ phase and the influence of trace addition of rare earth element cerium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(5): 342 - 345.
- [10] Ardell A J. Precipitation hardening [J]. Metall Trans, 1985, 16A: 21310 - 2165.
- [11] Baumann S F, Williams D B. A new method for the determination of the precipitate-matrix interfacial energy[J]. Scripta Metall, 1984, 18(6): 611 - 616.
- [12] Lyttle M T, Wert J A. The plastic anisotropy of an Al-Li-Cu-Zr alloy extrusion in unidirectional deformation[J]. Metall Mater Trans, 1996, 27A(11): 3503 - 3511.
- [13] Gudladt H J, Lendvai J, Schneider J. Precipitation strengthening and its influence on the mechanical behavior of cyclically deformed Al-Li alloys [J]. Acta Metall, 1989, 37: 3327 - 3337.
- [14] Embury J D. Plastic flow in dispersion hardened materials[J]. Metall Trans, 1985, 16A: 2191 - 2201.
- [15] Nack J K, Eui W L. Effect of T_1 precipitate on the anisotropy of Al-Li alloy 2090[J]. Acta Metall Mater, 1993, 41(3): 941 - 948.

(编辑 李艳红)