

[文章编号] 1004-0609(2001)S1-0001-04

Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr 合金中 δ' 相的长大^①

谷亦杰^{1,2}, 王立军¹, 周铁涛¹, 张永刚¹, 陈昌麒¹

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程系, 北京 100083; 2. 山东科技大学 材料科学与工程系, 泰安 271019)

[摘 要] 研究了 Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr 合金在 393 K, 433 K 和 473 K 时效过程中 δ' 相的长大规律, 发现当合金在 393 K 时效时, δ' 相的长大符合 LSW 长大规律; 当合金在 433 K 和 473 K 时效时, δ' 相半径的 3 次方与时效时间符合抛物线关系, 这与在此温度下沉淀析出 X 相有关。

[关键词] Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr 合金; δ' 相; LSW 规律

[中图分类号] TG 166.3

[文献标识码] A

铝锂合金具有高的比强度和比刚度, 在过去的几十年里, 开发出的铝锂合金系列有 Al-Cu-Li, Al-Cu-Mg-Li 和 Al-Mg-Li 等。在铝锂合金中, δ' 相是主要的强化相之一。 δ' 相与基体共格, 具有 L1₂ 有序结构, 它与基体点阵错配度只有 0.08%^[1]。有相当多的文献报道了 δ' 相的沉淀析出和长大^[2~4], 但直到现在对 δ' 相的早期相变还存在争论^[5,6]。本文作者着重讨论 Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr 合金中 δ' 相的长大规律。

1 实验

用真空熔炼法熔制成分为 Al-4.14% Zn-2.10% Li-2.5% Mg-1.66% Cu-0.1% Zr (质量分数) 的合金。合金在真空电阻炉中熔化后, 在氩气保护下精炼和浇铸。铸锭先经均匀化处理(798 K, 24h), 除去表面氧化皮, 然后在 725 K 保温 4 h, 热挤压成 ϕ 12 mm 的棒材。从棒材上取样, 在 793 K 固溶 1 h, 冷水淬火然后, 在不同温度下进行时效。

TEM 组织观察在 H-800 分析电镜下进行, 采用 Image-Pro Plus 软件对 δ' 相暗场像进行图象处理。

2 实验结果

图 1 所示为合金在 393 K 时效 5 h, 40 h 和 130 h 时 δ' 相的中心暗场像。可以看出, 随着时效时间的增加, δ' 相的尺寸不断增大。合金在此温度时效

时, 除了基体上沉淀析出 δ' 相, 明场相和选区衍射均未发现其它相。合金在 433 K 时效 5 h, 10 h 和 50 h 时 δ' 相的中心暗场像如图 2 所示, 可以看到存在 δ' 相的无沉淀区(PFZ)。图 3 所示为合金在 473 K 时效 0.5 h, 2 h 和 10 h 时 δ' 相的中心暗场像, 与图 2 相似, 合金在此温度下时效也存在 δ' 相的 PFZ。

图 4~6 分别为合金在 393 K, 433 K 和 473 K 时效时 δ' 相的粒度分布图。图 7 为 δ' 相颗粒半径的 3 次方与时效时间的关系图。可以看到合金在 393 K 时效时 δ' 相的长大基本符合 LSW 时效粗化规律; 当合金在 433 K 和 473 K 时效时, δ' 相的长大不符合 LSW 时效粗化规律, δ' 相颗粒半径的 3 次方与时效时间符合抛物线关系。

3 分析和讨论

可以用改进的 LSW (Lifshitz-Slyozov-Wagner) 等式^[7]描述 δ' 相的长大动力学:

$$r^3 - r_0^3 = k(\varphi)t, \\ k(\varphi) = \left[\frac{8\gamma c_e D V_m^2}{9RT} \right] \left| \frac{\rho(\varphi)}{\rho_0} \right| \quad (1)$$

式中 φ 为体积分数, γ 为界面能, c_e 为平衡浓度, D 为 Li 的扩散率, $\rho(\varphi)$ 为与体积分数有关的函数。

由式(1)可以看出, 合金中 δ' 相颗粒半径的 3 次方与时效时间符合直线关系。

当合金在 393 K 时效时, δ' 相的长大受到 Li 在固溶体中扩散的影响。虽然在合金中加入了 Zn,

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G199906490)

[收稿日期] 2000-08-31; [修订日期] 2001-01-02

[作者简介] 谷亦杰(1972-), 男, 博士研究生。

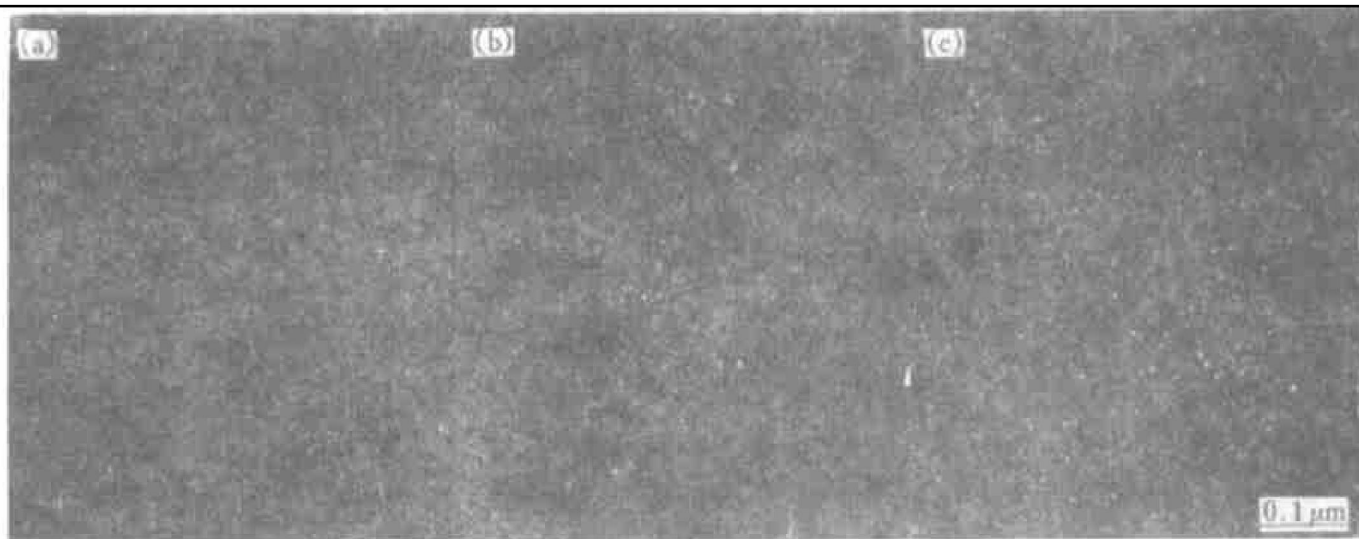


图 1 合金在 393 K 时效时 δ' 相的中心暗场像

Fig. 1 δ' phase dark field images of alloy aged at 393 K for different time
(a) —5 h; (b) —40 h; (c) —130 h

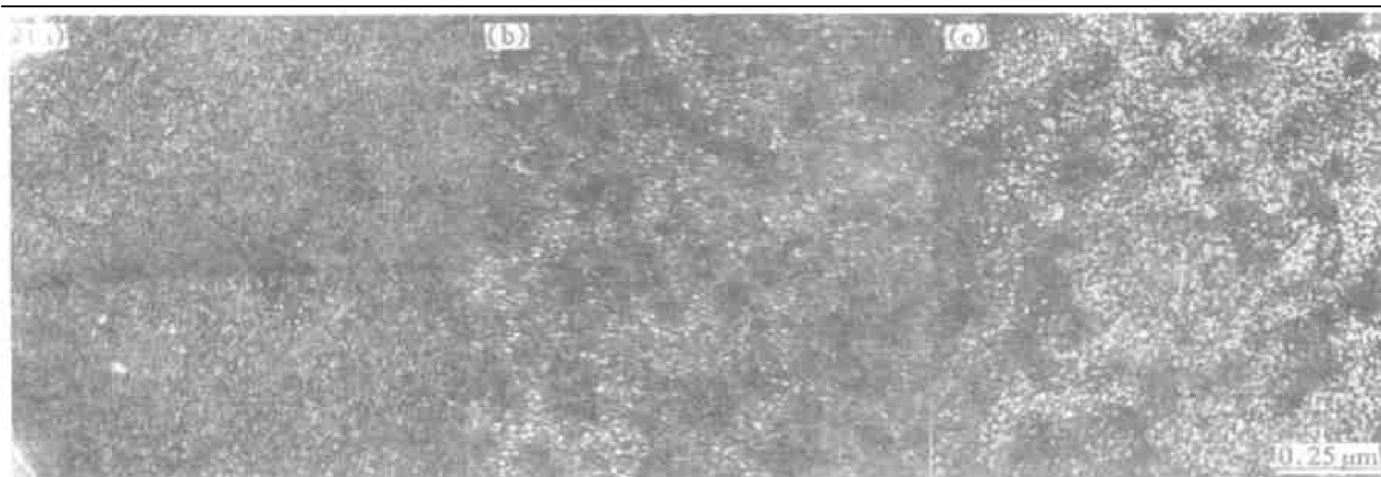


图 2 合金在 433 K 时效时 δ' 相的中心暗场像

Fig. 2 δ' phase dark field images of alloy at 433 K for different time
(a) —5 h; (b) —10 h; (c) —50 h

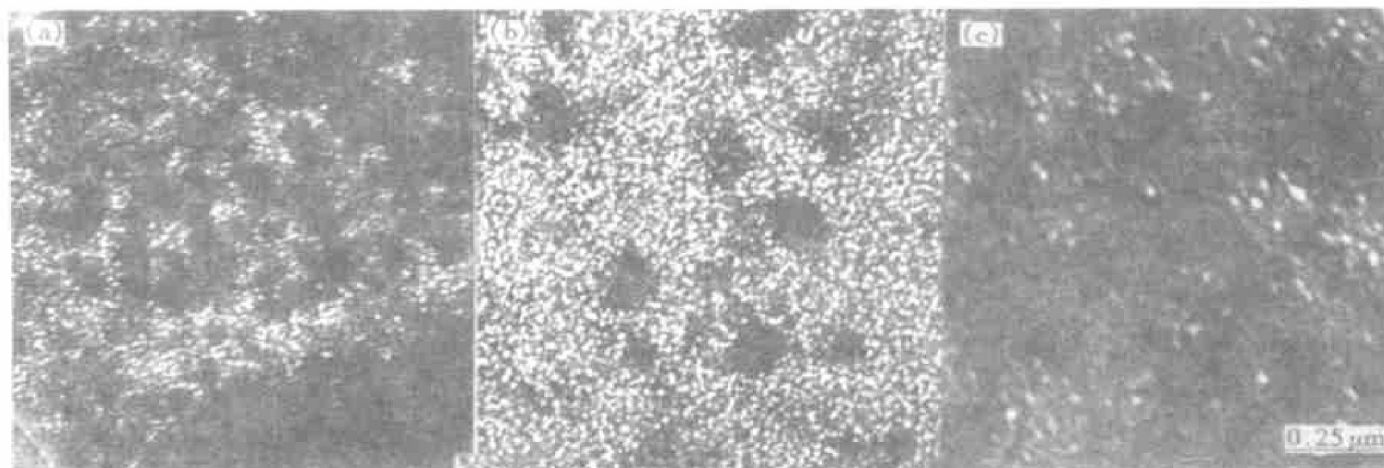


图 3 合金在 473 K 时效时 δ' 相的中心暗场像

Fig. 3 δ' phase dark field images of alloy aged at 473 K for different time
(a) —0.5 h; (b) —2 h; (c) —10 h

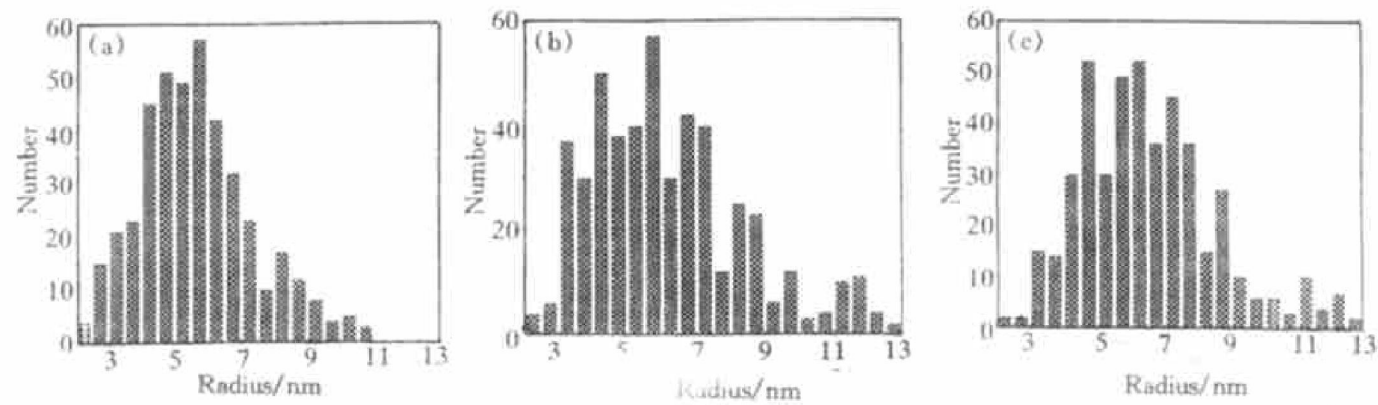


图 4 合金在 393 K 时效时 δ 相的粒度分布图

Fig. 4 δ particle size histogram of alloy aged at 393 K for different time
(a) —5 h; (b) —40 h; (c) —130 h

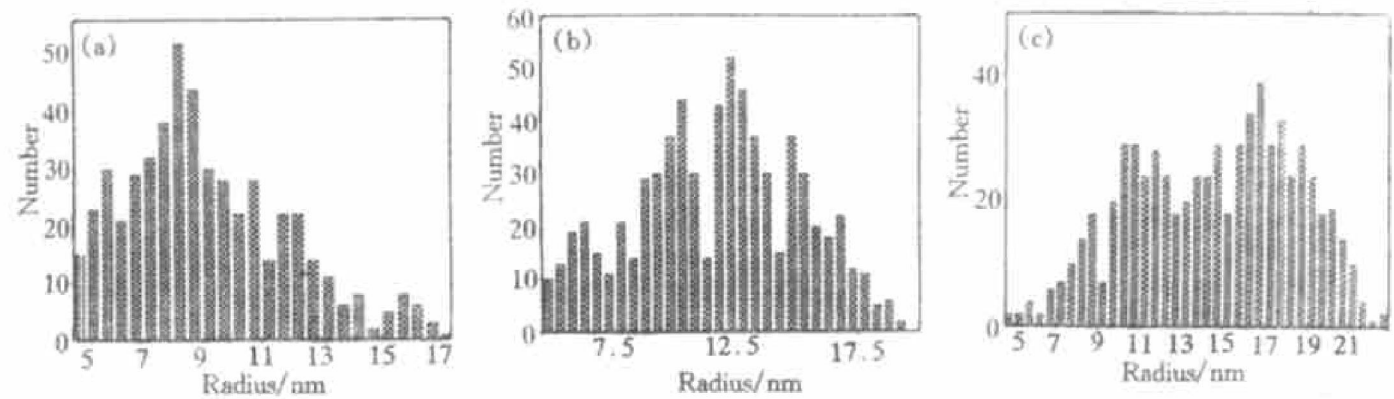


图 5 合金在 433 K 时效时 δ 相的粒度分布图

Fig. 5 δ particles size histogram of alloy aged at 433 K for different time
(a) —5 h; (b) —10 h; (c) —50 h

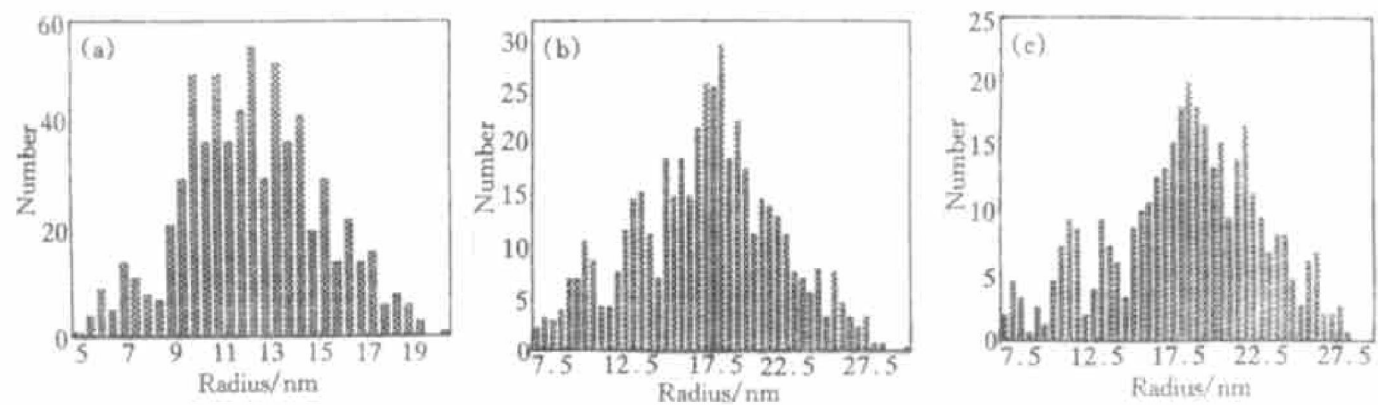


图 6 合金在 473 K 时效时 δ 相的粒度分布图

Fig. 6 δ particles size histogram of alloy aged at 473 K for different time
(a) —0.5 h; (b) —2 h; (c) —10 h

Mg 和 Cu, 但由于 Li 与空位的结合能较高^[8], 其它固溶原子对 Li 扩散影响不大, 因此合金在 393 K 时效时 δ 相颗粒半径的 3 次方与时效时间符合直线关系, 这与 Shaiu^[9]的研究结果一致。

当合金在 433 K 时效时, 由于合金基体上沉淀

析出了 X 相, X 相含有 Li 原子^[10], 在 X 相周围的 δ 相将溶解使 X 相长大。由图 2 可以看到靠近 PFZ 的 δ 相尺寸小于远离 PFZ 的, 说明靠近 X 相的 δ 相的长大速度小于远离 X 相的。因此从统计学的观点看, δ 相整体的长大速度降低, 从而 δ 相半径

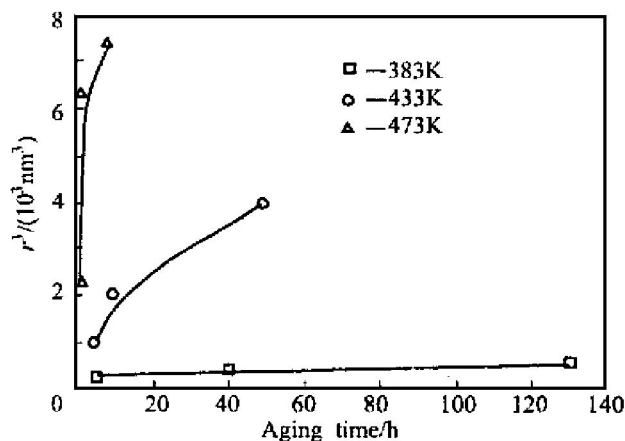


图7 在 δ' 相半径的3次方与时效时间的关系图

Fig. 7 Variation of δ' particles radii cubed against aging time of alloys aged at 473 K, 433 and 473 K

的3次方与时效时间符合抛物线关系。

当合金在 473 K 时效时, 由于温度升高, X 相长大速度加快, δ' 相的溶解数量增多, 靠近 X 相的 δ' 相长大速度下降更多, δ' 相半径的 3 次方与时效时间也符合抛物线关系。

[REFERENCES]

- [1] Baumann S F, Williams D D. New method for the determination of the precipitate-matrix interfacial energy [J]. Scripta Metall, 1984, 18: 611- 614.
- [2] Gu B P, Kulwicki J H, Liedl G L, et al. Coarsening of delta prime (Al// 3Li) precipitates in an Al-2.8Li-0.3Mn alloy [J]. Mater Sci Eng A, 1985, 70: 217- 228.
- [3] Gu B P, Liedl G L, Mahalingam K, et al. Application of the Weibull density function to describe the delta prime (Al// 3Li) particle size distribution in binary Al-Li alloys [J]. Mater Sci Engng, 1986, 78: 71- 85.
- [4] Cassada W A, Shifet G J, Jesser W A. Heterogeneous nucleation and growth of δ' in Al-8% Li [J]. Acta Metall Mater, 1992, 40: 2101- 2111.
- [5] Mahadev V, Mahalingam K, Liedl G L, et al. Very early stages of δ' precipitation in a binary Al-11.4% Li alloy [J]. Acta Metall Mater, 1994, 42: 1039- 1043.
- [6] Khachaturyan A G, Lndesy T F, Morris J W. Theoretical investigation of the precipitation of delta prime in Al-Li [J]. Metall Trans A, 1988, 19A: 249- 58.
- [7] Ardell A J. The effect of volume fraction on particle coarsening theoretical considerations [J]. Acta Metall, 1972, 20: 61- 71.
- [8] Raman K S. Resistometric studies of solute-vacancy interactions and clustering kinetics in an fcc matrix [J]. Scripta Metall, 1971, 5: 79.
- [9] Shaiu B J, Li H T, Lee H Y, et al. Decomposition and dissolution kinetics of δ' prime precipitation in Al-Li binary alloys [J]. Metall Trans, 1990, 21: 1133- 1141.
- [10] GUY Y-jie (谷亦杰), WEI Bing-chen (魏炳忱), ZHANG Yong-gang (张永刚), et al. Al-Li-Zr-Mg-Cu 合金在 433 K 的时效行为 [J]. Acta Metall Sinica (金属学报), (accepted)

Growth of δ' phase in Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr alloy

GU Y-jie^{1,2}, WANG Li-jun¹, ZHOU Tie-tao¹, ZHANG Yong-gang¹, CHEN Chang-qi¹

(1. Department of Materials Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, P. R. China;

2. Department of Materials Science and Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, P. R. China)

[Abstract] The growth of δ' phase in a Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr alloy aged at 393 K, 433 K and 473 K was investigated. The results show that the growth of δ' phase obeys the LSW law when aged at 393 K. δ' particle size cubed against aging time shows a parabolic relationship when aged at 433 K and 473 K, which is related with the precipitation of X phase.

[Key words] Al-Zn-Li-Mg-Cu-Zr alloy; δ' phase; LSW law

(编辑 杨兵)