

Al-Li-Cu-Zr 合金时效过程中 形成的层错调制结构^①

卫英慧 胡兰青 陆路 许并社 黄源

(太原理工大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要 用透射电子显微镜研究了 Al-2.6% Li-3.5% Cu-0.2% Zr-0.5% Ce 合金时效过程中形成的层错调制结构。结果表明随时效时间延长, 层错调制结构密度增大; 层错调制结构的出现与 T_1 相的形成密切相关, 而与 δ' 相没有关系。

关键词 Al-Li 基合金 相变 层错

中图法分类号 TG146

Al-Li 基合金由于其高的强度-重量比而成为很有潜力的航空用材料, 并吸引着众多研究者的兴趣^[1-4], 他们已在合金元素、冶炼工艺、轧制工艺等对材料力学性能的影响方面进行了大量的研究, 取得了很大进展^[5]; 但对 Al-Li 基合金的时效相变过程, 尤其是早期时效相变过程, 对组织性能的影响研究较少。本文报道的是作者在对含稀土 Al-Li-Cu-Zr 合金时效相变过程研究中发现的一种层错调制结构及其形成发展过程。

1 实验方法

实验所用 Al-Li-Cu-Zr 合金的成分为: 2.6% Li, 3.5% Cu, 0.2% Zr, 0.5% Ce。合金在石墨坩埚中熔炼, 均匀化退火后轧制成 3 mm 的薄板。从薄板上截取的试样在 803 K 固溶 30 min, 淬于冰盐水中, 然后在 463 K 时效不同时间。显微组织观察使用带有双倾台的 H-800 透射电子显微镜。电镜试样制备使用 33.3% 硝酸甲醇溶液, 工作温度 233 K、工作

电压 15 V。

2 实验结果及讨论

图 1 示出了所研究的 Al-Li-Cu-Zr 合金在 463 K 时效不同时间的显微组织。随时效时间延长, 图中出现了一种类似层错的亚结构, 且越来越发达, 形成调制状态, 所以我们称之为层错调制结构 (Stacking fault modulated structure)。试样在 463 K 时效 0.5 h 时, 在基体上没有层错调制结构及析出相出现, 图 1(a) 显示了基体上存在的一些位错亚结构。相同温度时效 1.5 h 后, 开始出现层错调制结构的雏形 (图 1(b) 箭头 A 所示)。时效持续到 12 h 以后, 层错调制结构形成, 并出现了 δ' (Al_3Li) 与 T_1 (Al_2CuLi) 等析出相, 在形貌上两者分别呈球形和片状。随时效时间的再度延长, 层错调制结构密度不断加大, 之后保持不变。

图 2 显示了试样在 463 K 时效 10 h 后显微组织的明场、暗场及其衍射花样。明场中显示了高度发达的层错调制结构。暗场是用超点阵

① 山西省青年科学基金资助项目 981024 收稿日期: 1998-10-05; 修回日期: 1998-01-11

卫英慧, 男, 33 岁, 副教授(博士)

有序斑点(δ' 相)操作的。可以看出,层错调制结构与 δ' 相的析出无关。

Al-Li基合金中除了 δ' 相外,片状的 T_1 相也是一种强化相。它是一种四方结构相, $a = 0.496 \text{ nm}$, $c = 0.935 \text{ nm}$ ^[6]。图2(d)显示了两种变体的 T_1 相的衍射花样。

图3示出了另一个晶粒中的层错调制结构。暗场是用主衍射(图2(c))周围的卫星斑点操作的。沿 $\langle 011 \rangle$ 方向的卫星斑点对应于类层错调制结构。一般地讲,由于铝及其合金层错能较高,大约 0.2 J/m^2 ,所以在其中不会形成层错,但在所研究的合金中却出现了类似出现于Cu-Ge合金^[7]中的层错。我们分析出现这种层错调制结构的原因可能有二。一是由于稀土元素Ce的加入降低了铝合金的层错能。Nicholson等人^[8]在对Al-Ag合金时效相变的研究中曾提出Ag的存在降低了铝的堆垛层错能。但值得注意的是,稀土元素加入到铝合金

中的主要作用是细化晶粒,清除杂质;且随时效的进行,大量地以化合物的形式存在于合金之中。而合金的堆垛层错能只可能与溶于基体的合金元素有关。这样随时效的进行,层错调制结构密度增大这一事实与基体中Ce含量减少是互相矛盾的,因而稀土元素降低基体层错能不足以用来解释铝合金中层错调制结构出现的原因。另一个可能的原因是 T_1 相形核时必须首先形成一个形核层错。这种形核堆垛层错可以通过Kuhlmann-Wilsorf反应^[9]在 $(\bar{1}11)$ 、 $(1\bar{1}1)$ 面上来形成。

$$1/2a[\bar{1}10] = 1/3a[\bar{1}11] + 1/6a[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$$

这里 $1/2a[\bar{1}10]$ 是螺位错, $1/3a[\bar{1}11]$ 和 $1/6a[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ 分别是Frank, Shockley不全位错。 T_1 相的长大通过 $1/6a[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$ Shockley不全位错沿析出面的双边迁移(lateral migration)来进行。因而随着时效时间的延长,层错调制结构越来越发达。

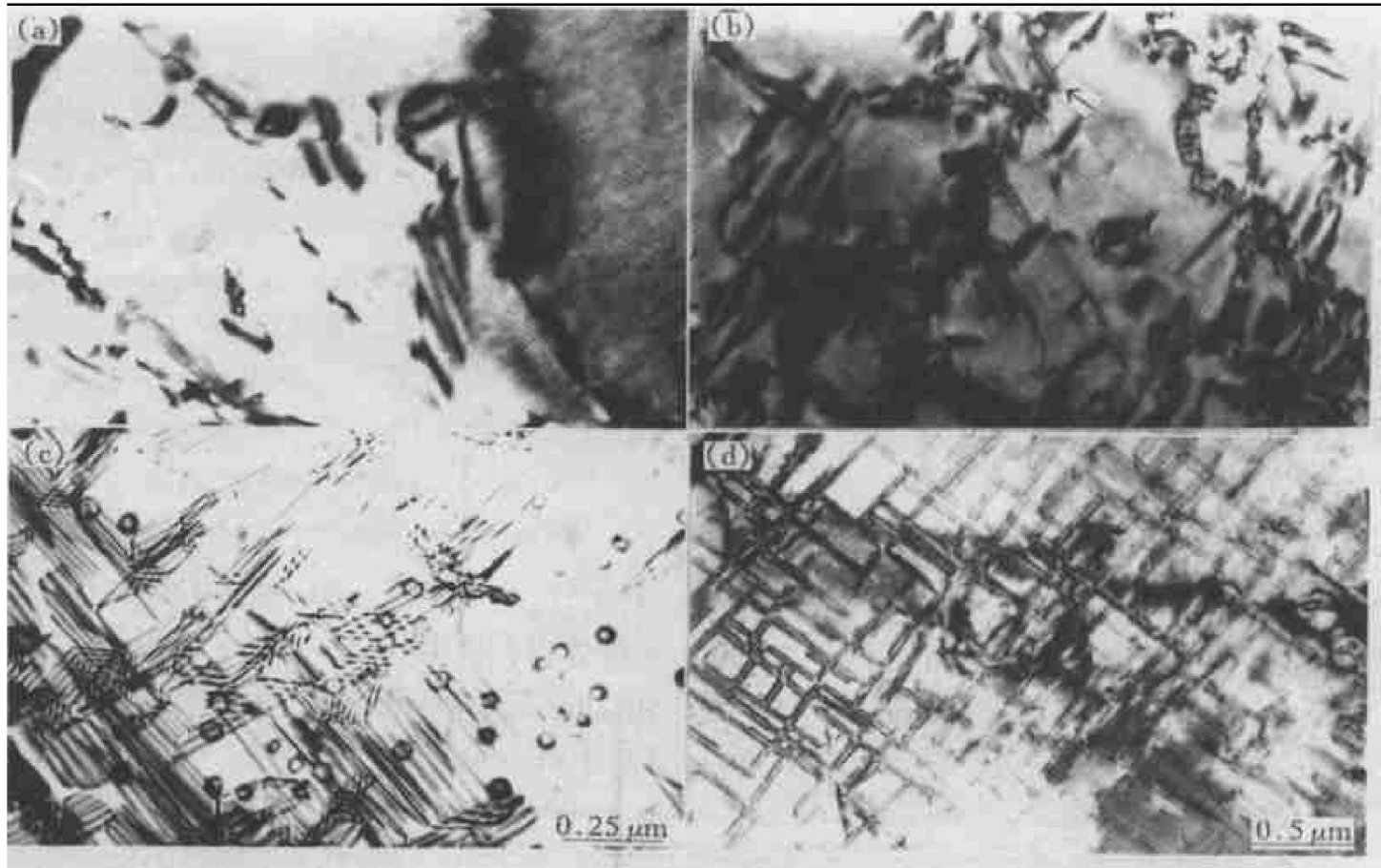


图1 Al-Li-Cu-Zr合金在463 K时效不同时间的显微组织相貌

Fig. 1 Morphologies of Al-Li-Cu-Zr aged at 463 K for various times revealing stacking fault modulated structures
(a) —0.5 h; (b) —1.5 h; (c) —12 h; (d) —30 h

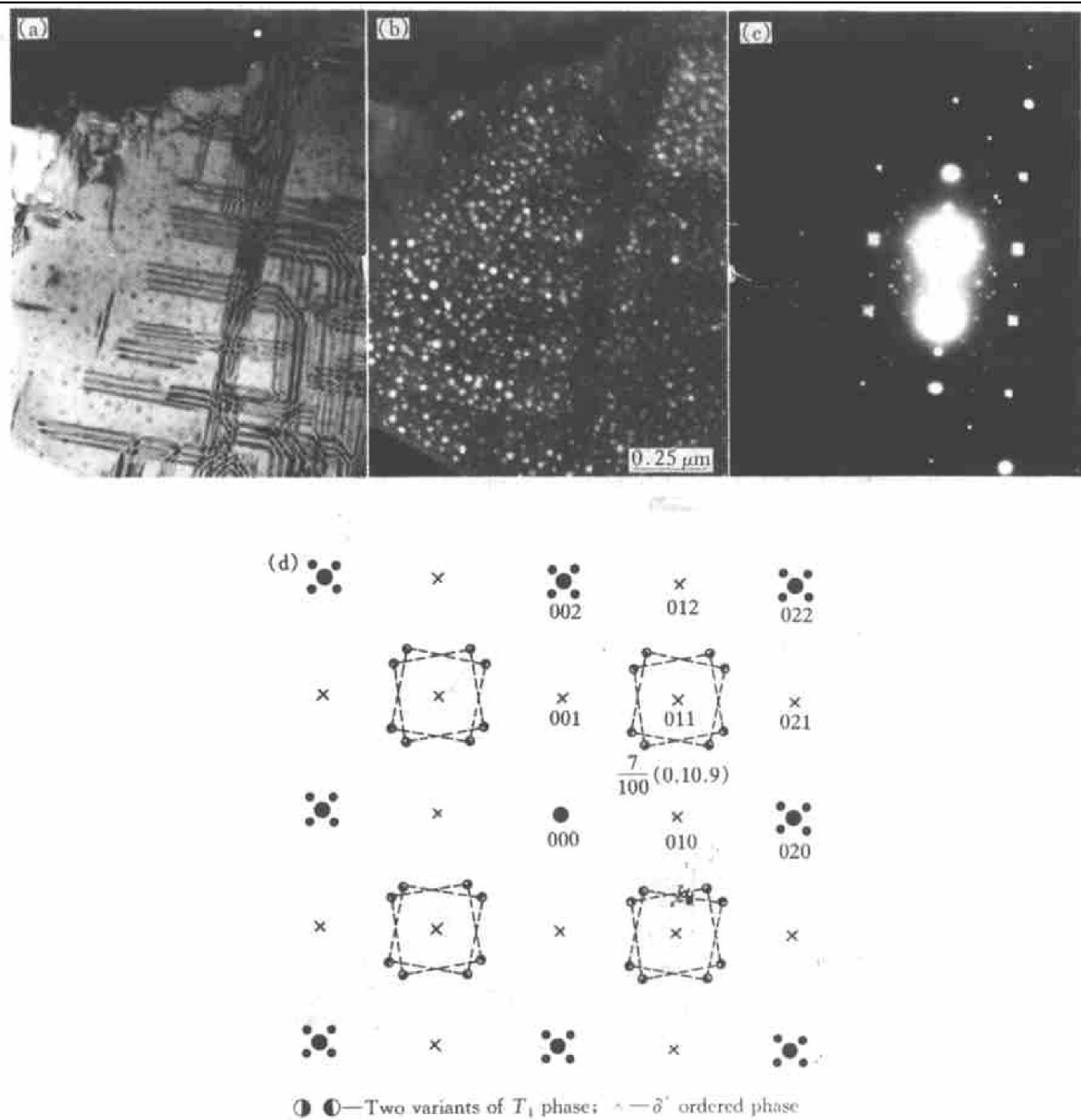


图 2 Al-Li-Cu-Zr 合金 463 K 时效 12 h 的组织形貌

Fig. 2 Morphologies of Al-Li-Cu-Zr alloy aged at 463 K for 12 h

(a) —Bright-field; (b) —Dark-field;

(c) —Diffraction pattern; (d) —Schematic of diffraction pattern of Fig. 2(c)

3 结论

Al-Li-Cu-Zr 合金时效过程中形成了层错

调制结构,其可能的原因是片状 T_1 相形核时必须首先形成形核层错。这与传统的认为铝合金层错能较高,不可能形成层错的理论相矛盾。

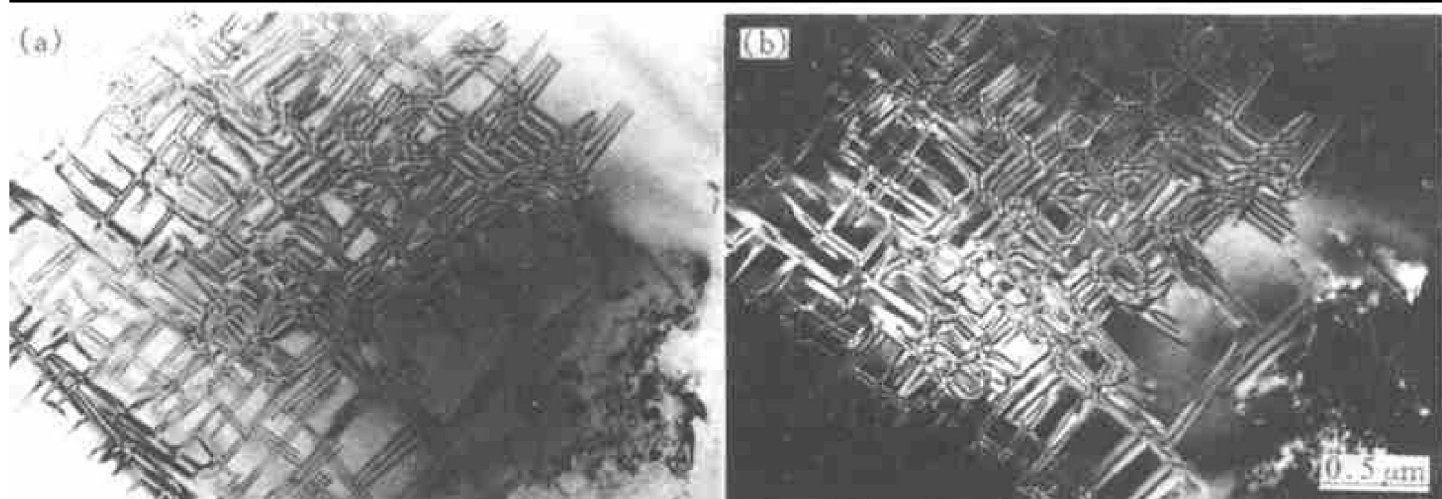


图3 463 K 时效 10 h 试样的 TEM 形貌

Fig. 3 TEM images of a foil aged at 463 K for 10 h

(a) —Bright-field;

(b) —Dark-field, performed with satellite spots along $\langle 110 \rangle$ orientation in Fig. 2(c)

REFERENCES

- 1 Sanders Jr T H and Starke Jr E A eds. Aluminum-Lithium Alloys. TMS-AIME, Warrendale, PA, 1981.
- 2 Sanders Jr T H and Starke Jr E A eds. Aluminum-Lithium Alloys II. TMS-AIME, Warrendale, PA, 1984.
- 3 Barker C, Gregson P J, Harris S J *et al* eds. Aluminum-Lithium III. London: Institute of Metal, 1986.
- 4 Champier G, Dubost B, Miannay D *et al* eds. Aluminum-Lithium IV. Paris: Society of Metallurgy of France, 1988.
- 5 Meng L and Zheng X L. Mater Sci Eng, 1997, A237: 109.
- 6 Cassada W A, Shiflet G J and Starke Jr E A. Script Metall Mater, 1987, 21: 387.
- 7 Barrett C S and Massalski T B. Structure of Metals. New York: McGraw-Hill, Inc, 1966.
- 8 Nicholson R B and Nutting J. Acta Metall, 1961, 4: 332.
- 9 Kuhlmann-Wilsdorf D. Phil Mag, 1958, 3: 125.
- 10 Howe J M, Aaronson H I and Gonsky R. Acta Metall, 1985, 33: 639.

A STACKING FAULT MODULATED STRUCTURE FORMED IN Al-Li-Cu-Zr ALLOY CONTAINING Ce

Wei Yinghui, Hu Lanqing, Lu Lu, Xu Bingshe and Huang Yuan

College of Materials Science and Engineering,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China

ABSTRACT A stacking fault modulated structure (SMS) formed in Al-2.6% Li-3.5% Cu-0.2% Zr-0.5% e alloy during aging was investigated with transmission electron microscope. It was concluded that the density of the SMS is increased with aged time prolonged, the SMS has given rise to formation of T_1 phase and there is no relationship between the SMS and δ' phase.

Key words Al-Li based alloy phase transformation stacking fault

(编辑 朱忠国)