

Al-Mg-Sc 合金的再结晶^①

潘青林 尹志民 高拥政 张永红 左铁镛

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘要 采用硬度、金相和透射电镜等分析测试手段研究了一种 Al-Mg-Sc 合金的再结晶温度和再结晶形核机制。结果表明: 合金的再结晶起始温度为 375 °C, 终了温度为 520 °C; 合金再结晶温度高的原因是细小弥散的 Al₃Sc 质点对位错和亚晶界的钉扎作用; 合金的再结晶形核机制为亚晶合并和亚晶长大的双重作用。

关键词 Al-Mg-Sc 合金 再结晶 钎 形核

中图法分类号 TG111.7

含 Sc 铝合金具有高的强度和韧性, 良好的耐热性、耐蚀性和可焊性, 是航天航空、核能和舰船等国防军工尖端领域用新型轻合金结构材料^[1-3]。国外自 60 年代中期就开始了研究^[4], 迄今为止已研制开发出多种牌号的含钎铝合金, 其中主要包括 Al-Mg-Sc、Al-Zr-Mg-Sc 和 Al-Mg-Li-Sc 系^[3, 5]。

从结果来看, 对 Al-Mg-Sc 系合金的研究主要还是集中在合金的成分、组织和性能三者关系方面^[6-8], 但对合金的再结晶行为即再结晶的温度和形核机制未做探讨。本文采用硬度法和金相法测定了合金的再结晶温度, 利用透射电镜观察分析了合金的再结晶形核机制, 探讨了第二相粒子对合金再结晶行为的影响。

1 材料制备与实验方法

以纯铝(99.7%)、纯镁(99.92%)和 Al-Sc(3.22%)中间合金为原料, 采用铸锭冶金法制备出实验用 Al-Mg-Sc 合金铸锭, 其实际成分(%)为: Mg 4.57, Sc 0.23, Fe+Si<0.28, 余为 Al。合金铸锭经 470 °C 均匀化退火 13 h, 然后经热轧(450 °C, 变形量 80%)、冷轧(变形量

45%)至 2.5 mm 板材。冷轧态试样在箱式电阻炉中于不同温度(250~580 °C)退火 1 h, 用 HV-10A 型低负荷硬度计测量试样的硬度, 金相样品经氟硼酸水溶液电解抛光复膜后在 POLYVER-MET 型光学显微镜下用偏光观察, 透射电镜样品经机械减薄后采用 30% 硝酸甲醇溶液在 25 V, -25 °C 的条件下双喷穿孔而成, 显微组织观察在 H-800 透射电镜上进行。

2 实验结果

2.1 合金再结晶温度的测定

采用硬度法和金相法相结合, 确定了合金的再结晶温度。图 1 为合金冷轧态试样的退火温度与硬度的关系曲线。由图确定, 合金的起始再结晶温度为 375 °C, 终了再结晶温度为 520 °C, 这与金相显微组织观察的结果相一致。

2.2 合金的金相组织

图 2(a)~(d)分别为冷轧态合金以及冷轧态合金于 375 °C, 470 °C 和 520 °C 退火 1 h 后的金相显微组织。由图可以看出: 冷轧态合金的晶粒沿轧向被拉长压扁, 为典型的纤维组织(图 2(a)), 经 375 °C 退火 1 h 后合金开始发生

① 国家自然科学基金资助项目 59671003 收稿日期: 1997-06-03; 修回日期: 1997-10-14
潘青林, 男, 34 岁, 博士生, 副教授

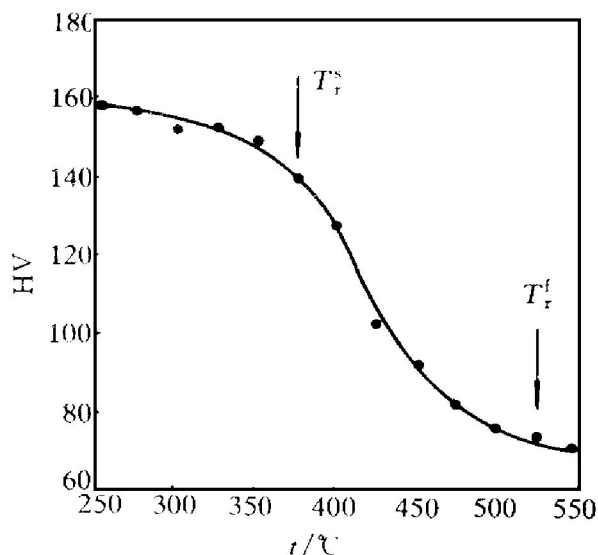


图1 合金的硬度与退火温度的关系

Fig. 1 Hardness vs annealing temperature curve of Al-Mg-Sc alloy

再结晶(图 2(b)), 随退火温度的升高, 合金的再结晶程度增大, 470 °C 时为部分再结晶组织(图 2(c)), 当温度升至 520 °C 时合金的纤维状组织完全消失, 已发生完全再结晶, 为细小的等轴晶(图 2(d))。

2.3 合金的透射电子显微组织

图 3 为合金的透射电镜照片。图 3(a) 为冷轧态合金的组织, 可见大量的位错缠结, 晶粒为细小的等轴亚晶。图 3(b) ~ (e) 为合金在再结晶起始温度 375 °C 保温 1 h 后的晶粒组织, 从这些图中可以观察到细小弥散的 Al_3Sc 粒子在亚晶内部和亚晶界上析出, 并且与基体共格(图 3(f))。粒子对位错和亚晶界具有钉扎作用(图 3(b), (c)), 再结晶形核过程中亚晶发生合并(图 3(d)) 和长大(图 3(e))。

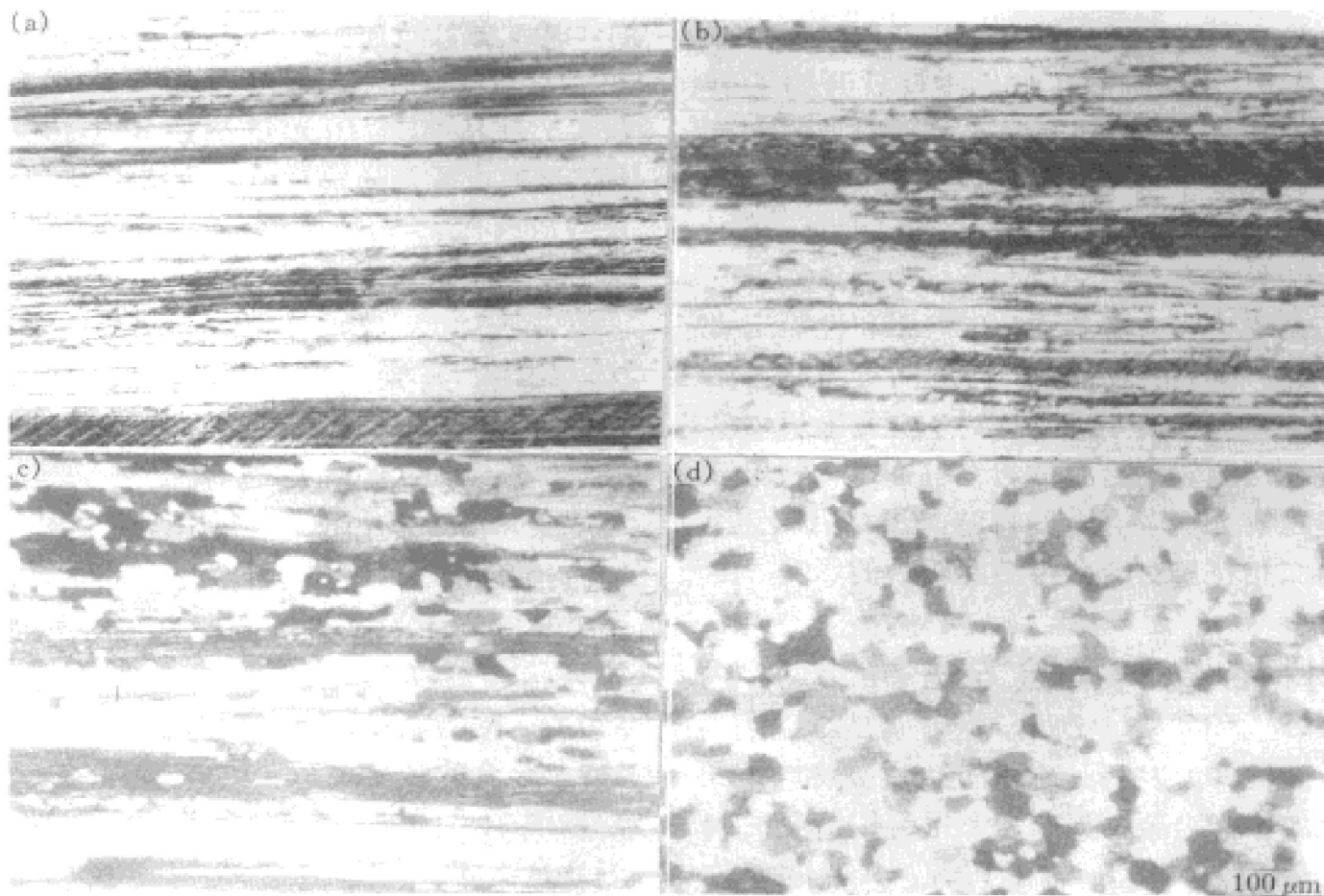


图2 合金的金相显微组织

Fig. 2 Optical micrographs of Al-Mg-Sc alloy

(a) —Cold rolled condition; (b) —Annealed 60 min at 375 °C;
(c) —Annealed 60 min at 470 °C; (d) —Annealed 60 min at 520 °C

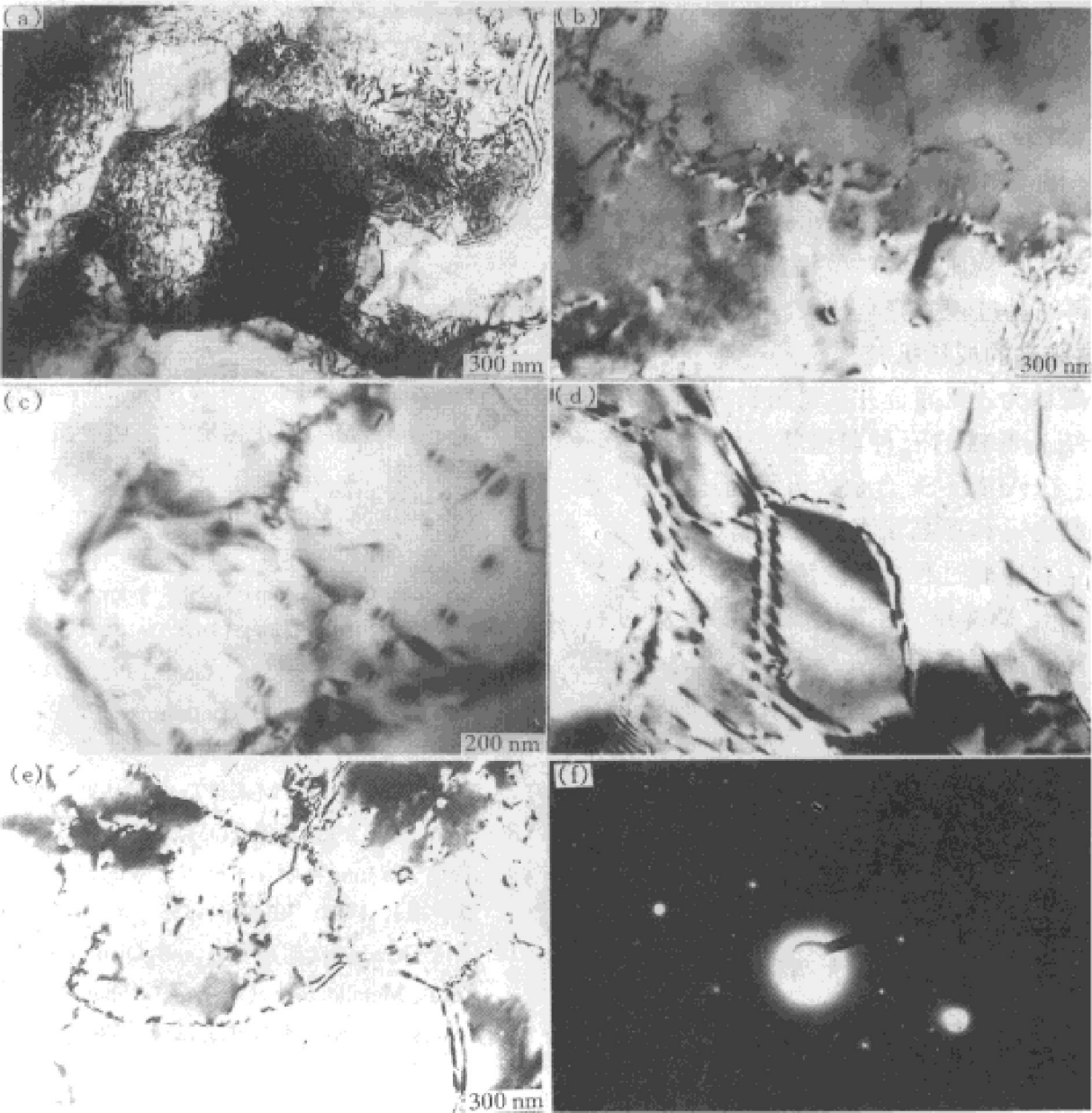


图 3 合金的透射电子显微照片

Fig. 3 TEM micrographs of Al-Mg-Sc alloy

(a) —Cold rolled condition; (b) ~ (e) —Annealed 60 min at 375 °C;
(f) —[110] oriented electron diffraction pattern Al₃Sc particles in Fig. 3(c)

3 分析与讨论

3.1 Al₃Sc 质点的作用

铝合金的再结晶起始温度一般都在 300 °C 左右。实验结果表明：添加微量的 Sc 能使 Al-Mg 合金的再结晶起始和终了温度大幅度提高，再结晶行为受到抑制，这是 Sc 由于在合金中生成细小弥散的 Al₃Sc 质点对位错和亚晶界

的强烈钉扎起了决定性作用。TEM 观察发现：冷轧后合金试样在明场和暗场下均未有明显的析出相，选区衍射发现存在微弱的斑点，对应的是共格的 Al₃Sc 相，可认为合金在凝固过程中固溶于铝中的 Sc 在热轧前的加热及热轧过程中以细小的形态析出于铝基体之上^[9]，在冷轧时，它们与位错缠结在一起，明场和暗场下均难以区分开来。合金冷轧后于不同温度下退

火保温时, Al_3Sc 相以微小的形态在亚晶内和亚晶界上析出, 且弥散分布, 对位错和亚晶界具有强烈的钉扎作用, 从而能稳定亚组织, 在再结晶形核前的回复过程中, 位错运动受阻, 延迟了再结晶形核的开始, 而稳定的亚组织又使得再结晶核心的进一步长大受阻, 直到有足够的高温使细小的析出相 Al_3Sc 聚集长大, 质点间距变大, 从而减少对位错和亚晶界的钉扎作用, 再结晶过程才完全结束。

3.2 再结晶的成核机制

一般认为: 亚晶合并、亚晶长大和晶界凸出是再结晶形核的三种典型机制^[10]。作者研究表明: 在 Al-Mg-Sc 合金的再结晶过程中, 存在着亚晶合并和亚晶长大双重机制。

合金在冷轧过程中, 位错发生交滑移, 产生大量的位错缠结, 在冷变形后的退火过程中, 回复使过剩位错消失, 逐渐转化为亚晶, 在开始再结晶时发现在试样的某些区域亚晶界正在合并, 见图 3(d), 一组亚晶粒的公共边界上两列位错发生反应后合二为一, 这可以认为是亚晶合并形核机制在起作用, 而图 3(e) 中一组亚晶粒的公共边界发生合并的同时, 已有部分边界成为大角度晶界, 这表明该区域的形核过程是亚晶合并与亚晶长大两种机制在同时起作用。之后大的亚晶吸收更多的位错, 相邻亚

晶位向差增大, 小角度晶界逐渐转化成大角度晶界, 而大角度晶界具有更高的迁移率, 可以迅速移动, 清除其移动的路程中存在的位错, 而在其后留下无畸变的完全再结晶组织, 完成整个再结晶过程。

REFERENCES

- 1 Lin Zhaoji(林肇琦). *Materials Review*(材料导报), 1992, (3): 10.
- 2 Yin Zhimin(尹志民) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 1997, 7(4): 78.
- 3 International Conference of Scandium, Abstracts of Reports, Moscow: 1994: 10, 18–19.
- 4 Каумкин О П, Терехова В Т и др. *Изв АН СССР Металлы*, 1965, (4): 176.
- 5 Елагин В Н и др. *Металлург*, 1992, (1): 24.
- 6 Kaygorodova L I and Domashnikov V P. *Phys Met Metall*, 1989, 68(4): 160.
- 7 Sawtell R R *et al.* *Metall Trans*, 1990, 21A: 421.
- 8 Дриц М Е и др. *Металлург*, 1985, (4): 48.
- 9 Jiang Xiaojun(蒋晓军) *et al.* *Acta Metall Sinica*(金属学报), 1994, 30(8): A355.
- 10 Hu Genxiang(胡赓祥) and Qian Miaogen(钱苗根). *Metallography*(金属学). Shanghai: Shanghai Press Science and Technology, 1980: 317.

RECRYSTALLIZATION OF Al-Mg-Sc ALLOY

Pan Qinglin, Yin Zhimin, Gao Yongzheng, Zhang Yonghong and Zuo Tieyong

Department of Materials Science and Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT The recrystallizing temperature and nucleation mechanism of an Al-Mg-Sc alloy have been studied by hardness measurement, optical microscope and transmission electron microscope. The results show that the starting temperature point is 375 °C while the ending temperature point is 520 °C in the recrystallization of the alloy. The increase in recrystallizing temperature is caused by the pinning effect of highly dispersed Al_3Sc precipitates on dislocation and subgrain boundary. The recrystallizing process presents itself the nucleation mechanism of the alloy involving not only the subgrain coalescence but also the subgrain growth.

Key words Al-Mg-Sc alloy recrystallization scandium nucleation

(编辑 朱忠国)