

微量元素 Sc 对工业纯铝再结晶的影响^①

张迎晖

(南方冶金学院材料工程系, 赣州 341000)

孝云祯 马宏声

(东北大学金属压力加工系, 沈阳 110006)

摘 要 对一种含钪 0.246% 的工业纯铝冷轧 70% 后进行了再结晶研究, 测定了材料在各种温度下保温 1h, 水淬后的硬度及电导率值, 参照 X 射线衍射的结果, 发现材料的再结晶起始温度为 380 °C, 終了温度为 450 °C。TEM 研究表明, 弥散分布的 ScAl_3 相对位错的钉扎作用是材料再结晶温度高的原因; 再结晶过程为亚晶聚合形核机制。

关键词 Sc 工业纯铝 再结晶 亚晶聚合

分类号 TG111.7

钪的加入所产生的铝及其合金综合性能的大幅度改善已引起国际材料界的广泛重视。铝基合金在相同的摩尔分数基准下, L_{12} 型有序结构的 ScAl_3 相是最具潜力的强化相, 该沉淀相在稳定亚结构过程中有很大的影响^[1]。通过钪对铝及其合金再结晶温度影响的研究^[2], 认为微量钪能大幅度提高铝及其合金的再结晶温度。这意味着铝-钪合金具有高的热稳定性, 因而在开发航天、航空用高强、高韧、耐热合金方面有着极大的潜力。再结晶过程的关键问题——形核机制, 则未见报导。

本研究测定了一种含 Sc 工业纯铝的再结晶起始、終了温度, 测试了再结晶过程中合金电导率的变化情况, 分析了再结晶的形核机制及材料再结晶温度提高的原因。

1 实验方法及结果

1.1 实验过程

所研究试样的成分(质量分数, %)为: Fe 0.232, Si 0.058, Sc 0.246, 余量 Al。铸锭经 550 °C, 20 h 均匀化退火后, 冷却, 再经 500 °C, 1 h 加热保温后热轧, 总加工率为 72%。对冷轧 70% 后的试样于各种温度下置于

马福炉中保温 1h, 出炉后随即水淬, 固定高温组织。为防止其它应力对试样的影响, 水淬后的试样先用 FOR7501 型涡流电导仪测量电导率, 随后用 HVA-5 型低负荷硬度计测量硬度。再结晶组织的 X 射线检查在 YPT-70K1 型 X 射线结构分析仪上进行, 电镜试样按常规电解双喷法制备, 组织观察在 EM400T 透射电镜上进行。

1.2 再结晶温度及电导率的测定

硬度法测定的试样再结晶起始温度为 380 °C, 終了温度为 450 °C(见图 1), X 射线衍射结果与此吻合。图 2(a), (b) 分别是材料于 380, 450 °C 保温 1h 后水淬试样的 X 射线衍射谱, 这同硬度法确定的温度一致。

从图 1 中电导率的变化曲线上也可以发现, 对应于电导率的剧升、剧降处, 分别为再结晶的起始温度和終了温度。

1.3 微观组织观察

图 3 显示热轧后试样中析出相 ScAl_3 的形貌, 图 4 显示试样再结晶过程的组织变化。

2 分析与讨论

2.1 析出相对再结晶的影响

① 收稿日期: 1996-11-14; 修回日期: 1997-01-26 张迎晖, 女, 28 岁, 讲师, 硕士

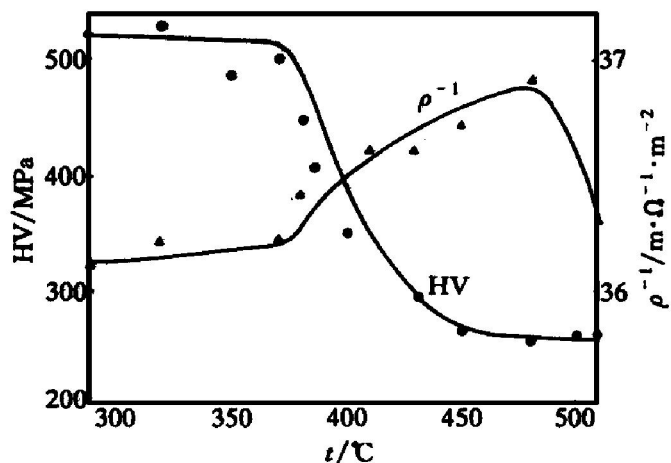


图1 硬度及电导率与温度的关系曲线

Fig. 1 Curves of hardness and conductance ratio vs temperature

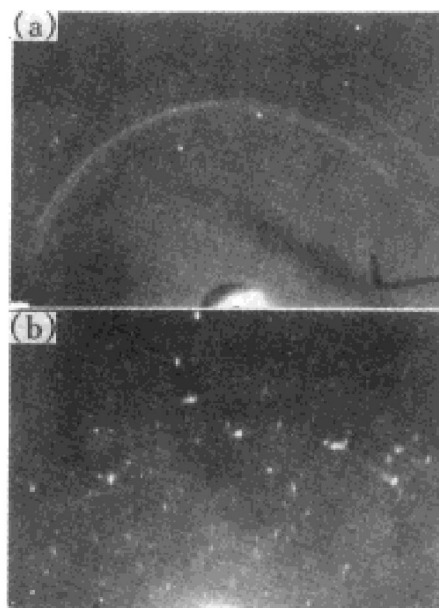


图2 试样的X射线衍射谱

Fig. 2 X-ray diffraction patterns

(a) $-380\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h; (b) $-450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h

工业纯铝的再结晶起始温度为 $190\sim 235\text{ }^{\circ}\text{C}$, 终了温度则在 $260\sim 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间^[3]。从本研究结果看出, 微量钪的加入使工业纯铝的再结晶起始温度和终了温度大幅度提高。组织观察表明, ScAl_3 相的析出对再结晶温度的提高起了决定性的作用。

大量观察表明, 在加热及热轧过程中, ScAl_3 相以细小形态弥散析出, 且分布间距小, 对位错具有强烈的钉扎作用, 进而能稳定亚组织; 在再结晶形核前的回复过程中, 位错运动

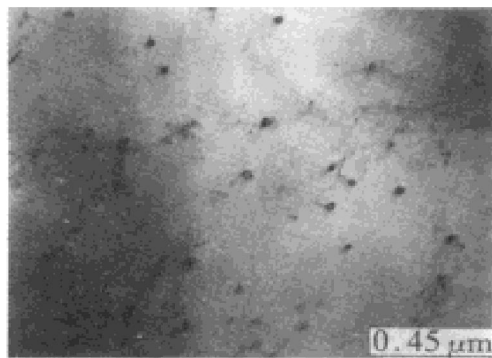


图3 试样热轧后的析出相

Fig. 3 Precipitates after hot rolling

受阻, 从而直接延迟了再结晶形核。稳定的亚组织又使得再结晶核心的进一步长大受阻, 直到足够的温度使细小析出相球化长大, 从而减弱对位错的钉扎作用, 再结晶过程完全结束。细小、弥散分布的 ScAl_3 质点对位错的钉扎作用是工业纯铝再结晶温度高的原因。

2.2 再结晶过程电导率的变化

从电导率变化曲线上看, 在再结晶开始之前的回复阶段, 电导率变化不大; 进入再结晶阶段后, 电导率迅速上升; 在再结晶结束后, 电导率又呈下降趋势。电导率的变化反映了加热过程中材料内部点缺陷(如空位、间隙原子)的变化情况^[4]。加热使空位迁移至晶界(或金属表面), 由于它们与间隙原子重新结合, 或与位错交互作用, 使点缺陷浓度大大减少, 表现在电导率明显上升; 在较高温度加热形成钪的固溶, 随后水淬造成钪的部分固溶强化, 又使电导率下降。

2.3 再结晶的形核机制

金属及合金的再结晶形核有晶界凸出机制^[5]、亚晶聚合机制^[6]及亚晶长大机制^[7]。我们认为本研究的含Sc工业纯铝的再结晶形核机制为亚晶聚合机制。

热轧态试样经冷轧变形 70% 后, 材料中位错的交滑移形成大量位错胞(图 4(a)), 在随后的加热过程中, 胞状组织经过形成平直界面的亚晶界及相邻亚晶的聚合、亚晶界消失两个阶段后, 转变成再结晶核心。从图 4(b) 看, 冷轧试样经 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h 后, 在某些区域已开始

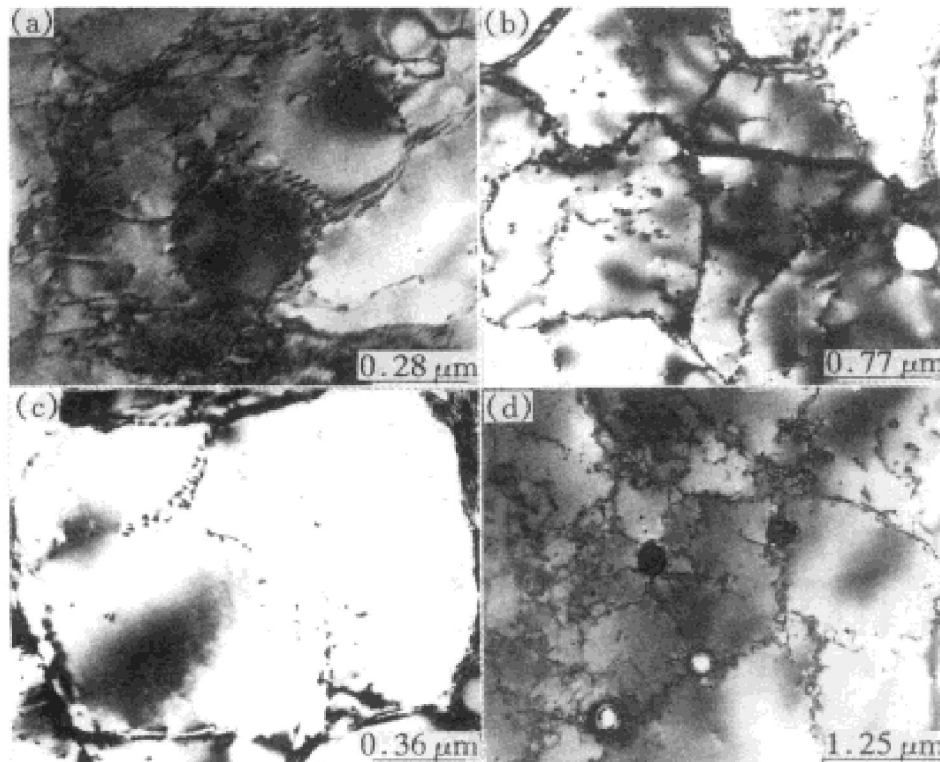


图 4 试样再结晶过程

Fig. 4 Recrystallization process

(a) —Cold rolling; (b) —380 °C, 1 h; (c) —380 °C, 1 h; (d) —450 °C, 1 h

通过亚晶界离解的亚晶聚合机制形核。在某些已成核的亚晶中, 其内部残存的位错也说明这些亚晶均是由聚合作用生成的(图 4(c))。再结晶结束后, 材料中的畸变组织转化成无畸变组织, 但在再结晶终了温度 450 °C 保温 1 h 试样中, 局部区域仍发现有被析出相钉扎的位错网络(图 4(d)), 这说明, 即使是在完全再结晶条件下, 材料内部微观区域仍存在着较严重的组织不均匀性。这也反映了 ScAl_3 质点对位错强烈的钉扎作用。

3 结论

(1) 所研究的含 Sc 工业纯铝再结晶起始温度为 380 °C, 再结晶终了温度为 450 °C。

(2) 弥散析出的 ScAl_3 对位错的强烈钉扎作用是所研究材料再结晶温度高的原因。

(3) 所研究材料的再结晶形核机制为亚晶

聚合机制。

REFERENCES

- 1 Ralphr Sawtell *et al.* Metal Trans A, 1990, 21A (2): 421.
- 2 Willey L A. US 3619181, 1971- 11- 09.
- 3 Editorial Staff of Metallographs. Metallographs of Deformable Aluminium Alloys(变形铝合金金相图谱). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1975: 40.
- 4 Cao Mingsheng(曹明盛). Basis of Physical Metallurgy(物理冶金基础). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 266- 268.
- 5 Baily J E and Hirsh P B. London: Proc Roy Soc, 1962, A267: 11.
- 6 Hu H. In: Himmel L ed, Recovery and Recrystallization of Metals. New York: Interscience, 1963: 311.
- 7 Cahn R W. Recrystallization: Grain Growth and Textures. London: ASM Metals Park, 1966: 99.

EFFECT OF TRACE Sc ON RECRYSTALLIZATION OF INDUSTRIAL PURE ALUMINUM

Zhang Yinghui

Department of Material Engineering,

Southern Institute of Metallurgy, Ganzhou 341000

Xiao Yunzhen and Ma Hongsheng

Department of Metal Working, Northeastern University, Shenyang 110006

ABSTRACT Recrystallization of a Sc-bearing industrial pure aluminum has been studied, and the samples have been rolled to 70 percent reduction after hot rolling. Hardness and conductivity were measured after annealing at various temperatures for 1 h and quenching. Referring to the result of X-ray diffraction, it was found that in recrystallization the starting point is 380 °C while the finishing point 450 °C. The increase in recrystallization temperature is caused by the nail-up effect of highly dispersed ScAl_3 precipitates on dislocation, and the recrystallization process presents itself a nucleation mechanism with subgrain coalescence by means of TEM.

Key words Sc industrial pure aluminum recrystallization subgrain coalescence

(编辑 彭超群)