

# 快速凝固 Al-Fe 合金的显微组织及其对性能的影响\*

汤亚力 沈宁福

(郑州工学院材料研究中心)

**摘要:** 本文用分析电子显微术(AEM)和力学性能测试研究了快速凝固热强合金 Al-Fe-(Ce, Ti, Zr)的显微组织及其对高温性能的影响。首先分析了急冷条带的凝固过程动力学及凝固速度对胞晶内部溶质分布的影响,之后对急冷条带及热挤合金的退火过程与弥散相分布对合金高温性能的作用进行了研究。分析结果表明:影响合金凝固过程的主要是初始过冷度和凝固速率;胞晶内溶质元素固溶量随凝固速度增大而升高。合金高温性能主要同弥散相的结构及分布有关。

**关键词:** 快速凝固, 热强合金, 显微组织。

**中图分类号:** TG113

耐热型高强铝合金是快速凝固铝合金中最具吸引力的合金,同钛合金相比,它具有较低的密度及相对低的造价,其高温性能也具有很强的竞争力,所以高温高强铝合金在航空、航天、机械、交通、能源等一些有特殊要求的工业领域中有着广泛的用途和替代价值,例如它在 121℃-343℃ 温度范围内的强度显著优于现有铝合金,在航空工业中,如果它能替代现有钛合金,在飞机骨架上可以节省 5-14% 的重量,用在飞机引擎上可以节省 7-14% 的重量。而且价格只是钛合金的 10-50%。铸造铝合金的使用温度为 121℃-177℃,它显然不能适应未来高速航天器的要求,目前美国洛克希德,波音等大航空公司正致力于开发重量轻,热强性好的铝合金,其中 Al-8Fe-4Ce 及 Al-8Fe-2Mo 等合金系展现了较好的高温性能。本文研究了快凝条带及用自制装置制出的粉粒经冷压、热挤等工艺得到的棒材的显微组织与性能的关系。

## 1 实验方法

急冷条带由单辊旋转铸法制得,合金成分分别为(a) Al-8Fe(重量百分比,下同), (a) Al-8Fe, (b) Al-8Fe-1Ti, (c) Al-8Fe-3Ti, d) Al-8Fe-4Ce, (e) Al-8Fe-4Ce-

\* 本文系国家科委国家高技术资助项目

收稿日期: 1992-09-06.

1Ti, (f) Al-8Fe-4Ce-3Ti, 急冷颗粒由旋转叶片法得到, 成分分别为 Al<sub>18</sub>Fe<sub>4</sub>Ce<sub>1</sub>Ti<sub>1</sub>Zr 和 Al<sub>18</sub>Fe<sub>4</sub>Ce<sub>2</sub>Si<sub>1</sub>Ti<sub>1</sub>Zr 颗粒大小平均为 40 μm, 颗粒经清洗, 干燥, 冷压和热挤(16:1, 25:1 挤压比, 440℃) 成为棒材作分析用。合金显微组织分析工作在附有能谱(LINK-AN10000) 的 JEM-2000FX 分析电镜上进行, 用显微硬度计测定了合金硬度与退火温度和时间的关系, 并测试了合金的室温及高温下的拉伸强度和延伸率。

## 2 实验结果及分析

在电镜(TEM)分析中发现: 急冷条带中皆有两种不同的区域, 即微胞晶区 (Zone A) 和胞晶区 (Zone B), 其胞晶尺寸分别为 50nm 左右和 500nm 左右, 分别对应于较高和较低的凝固速度。并相应地由内部传热和外部传热两种方式控制生长, 图 1 为

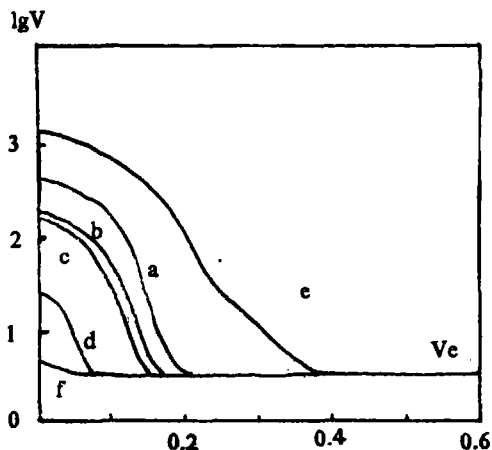
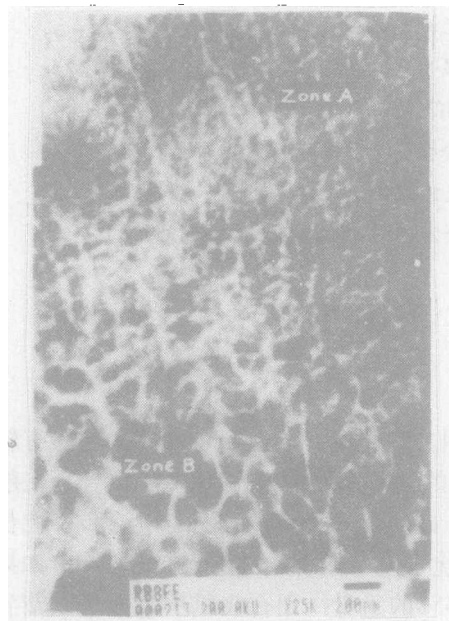


图1 Al-8wt% / Fe 快凝条带中胞晶组织 图2 快凝合金条带的退火—硬度曲线

Al-8Fe 合金中这两种类型区域的 TEM 照片。在 Al-8Fe 合金中的胞晶间偏析多为 Al<sub>6</sub>Fe 化合物, 而 α-Al 的形核中心常为 Al<sub>6</sub>Fe 和一种成分接近 Al<sub>3</sub>Fe 的体心立方“V”相。电子衍射分析表明“V”相是一有序立方相, 点阵常数  $a=0.296\text{nm}$ 。在研究中用能谱逐点分析了不同尺寸胞晶内部的溶质含量, 并发现随着凝固速度的增加(即胞晶尺寸减少), 胞晶内部固溶的铁元素也不断增加; 在  $3.93\text{cm/s}$  的生长速度下, 胞晶间距大于特征扩散距离 ( $D/V$ ) 的十倍, 而在  $394.94\text{cm/s}$  生长速度下, 胞晶间距大于  $D/V$  的八十三倍, 说明在高的生长速度下, 溶质元素不易扩散, 溶质截留的程度较高。在 Al-8Fe-1Ti 合金中发现, 1% 的 Ti 基本上固溶在 α-Al 基体中, 在某共晶区的 α-Al (011) 位向, 发现了 Fe 原子在 Al 中有序排列的现象, 这同急冷速度很高 ( $>10^5\text{K/s}$ ) 有关。在 Al-8Fe-3Ti 合金中存在一种富 Ti 相, 会聚束电子衍射 (CBED) 分析表明, 此相为一面心立方无序相, 其空间群为  $Fm\bar{3}m$ , 点阵常数  $a=0.426\text{nm}$ , 并且在  $450^\circ\text{C}$  退火 5 小时后仍然保持稳定,

该相可能是  $Ti_3Al$  的一种亚稳相。Al-8Fe-4ce 及 Al-8Fe-4ce-1Ti, Al-8Fe-4ce-3Ti 中的初生相除了  $Al_6Fe$ 、 $Al_3Fe$  以外, 还有 Al-Fe-Ce 三元相, 这些三元相的出现表明 Ce 的加入有利于消除  $Al_3Fe$  相, 而且它们本身具有的弥散强化作用对合金热强性有良好作用。

对快凝条带的凝固动力学分析表明 (图 2), 快凝条带大都是以较大的过冷度和以很高的生长速度开始凝固的。计算表明合金元素对合金结晶潜热的影响较小, 而它们主要影响合金凝固过程的动力学特征。Ce 的加入能  $Al_3Fe$  相形核而形成 Al-8Fe-4ce-1Ti 三元相, 它对合金的过冷度无太大贡献; Ti 含量达到 3wt% 时, 可以形成一种富 Ti 相, 它起到非均质形核中心的作用; 而 Ce 与 Ti 联合作用于 Al-Fe 合金可以增大其初始过冷度 (1wt% / Ti 时)。

本文分析了条带的硬度与退火温度的关系, 结果表明: 合金元素的加入都能提高合金硬度, 而急冷条带 Al-8Fe-4ce-1Ti 不仅具有较高的硬度, 且其在退火后保持室温强度的能力最强 (图 3 所示)。

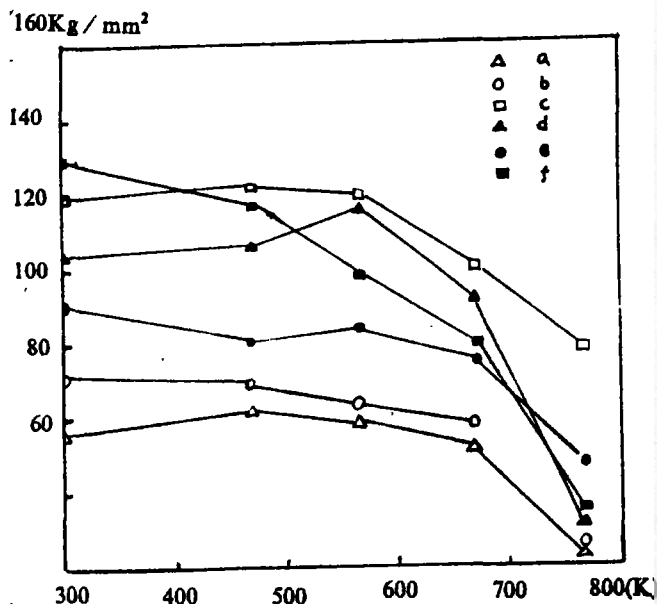


图3 快凝合金的凝固过程

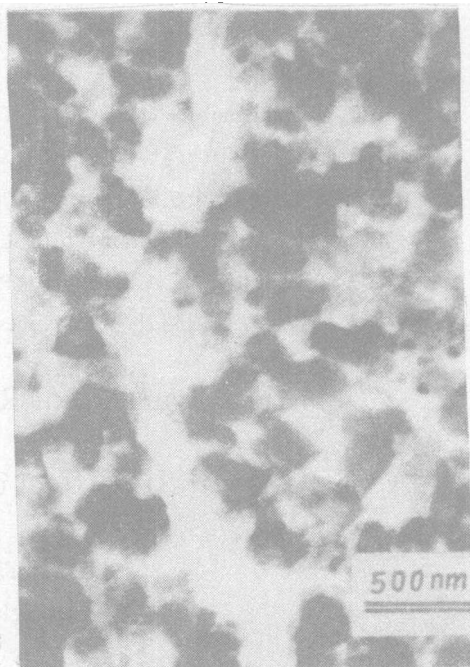


图4 A18Fe4Ce1Ti1Zr(25: 1)合金热挤态组织

从热挤合金的金相组织来看, 颗粒之间的结合较好; 而从其硬度与退火温度、时间关系曲线来看, 合金 A18Fe4Ce1Ti1Zr(挤压比 25: 1)在 400℃ 以下保持室温硬度的能力比较强。经过测试合金的室温及高温拉伸强度及延伸率, 可以发现, 随测试温度的提高强度不断下降, 这是由于弥散相不断粗化长大的结果。由于在合金中存在大量弥散相 (图 4), 所以热挤合金具有较高的强度如合金 A18Fe4Ce1Ti1Zr(挤压比 25: 1)在 300℃ 时的强度接近 300MPa。

本文还测定了弥散相体积分数对合金高温强度的影响。并证明弥散相颗粒尺寸及间距的减少, 以及大的弥散相体积分数均利于合金保持其高温强度。

### 3 结 论

3.1 Al-8Fe-(Ce, Ti, Si, Zr)系合金通过快速凝固可以形成较细的晶粒及大量的弥散相, 这些弥散相相对稳定基体, 提高合金热能力起了很大的作用。

3.2 合金元素的加入对合金结晶潜热的影响不超过 6%; 而影响凝固动力学过程主要是快凝动力学条件; Ce 和 Ti 的联合作用可以增大合金的初始过冷度。

3.3 热挤合金在 300℃ 时的强度接近 300MPa, 延伸率为 5%。基本达到了本实验所订指标, 为今后进一步深入研究打入了基础, 同时说明本实验的工艺手段是可行而且有效的。

3.4 从电镜 (TEM) 观察结果来看, 弥散相尺寸越小, 相间距离越小, 弥散相体积分数越大, 它们抗粗化的能力越强, 则其对有效地保持合金的高温强度的贡献亦越大。

### 参 考 文 献

- (1) S.I.langenbeck et al.ASTM STP 890 Philadelphia 1986(410)
- (2) W.E.Quist et al,ASTM STP 890 Philadelphia 1986(7)
- (3) 沈宁福.合金快速凝固过程剖析.铸造 1990.2
- (4) L.F.Mondolf:Butter Worths London-Boston,1976
- (5) B.F.Buxton,T.A.Eades, et al,Phil.Trans.R.Soc.lond,A281,1976(171)
- (6) 汤亚力,邵国胜,沈宁福.J.chinese EM Soc,Vol,20(3)27

## Microstructure of Rapidly Solidified Al-Fe Alloy and It's Effect on Mechanical Properties

Tang Yali ShenNingfu  
(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** An analytical electron microscopy and mechanical properties measurments study were conducted to examine the ralation between the microstructure of RS Al-Fe alloys and their elevated temperature mechanical properties. The solidification process of melt spun ribbons and the effect of growth rates on the microsegregation profiles in  $\alpha$ -Al cells were investigated.Finally annealing behaviors of RS ribbons and extrusions were examined, and the effects of dispersive phases distribution on high temperature mechanical properties of extrusions were also discussed.

**Keywords:** rapid solisification, high temperature alloy, microstructure.