

# Al-8Fe-3Ti 急冷合金的组织稳定性\*\*\*

汤亚力 沈宁福 张东捷 石广新 刘晓芳 袁 新

(郑州工学院材料研究中心)

**摘 要:** 本文研究了Al-8Fe-3Ti急冷合金中的亚稳相结构及合金在退火过程中组织和性能的变化。结果表明: 合金中存在AlmFe、Al<sub>6</sub>Fe及“V”相, 另外还有一种新发现的富Ti相。合金具有较高的热稳定性。

**关键词:** 快速凝固, Al-8Fe-3Ti合金, 热稳定性

**中图分类号:** TG113

通过快速凝固技术可以得到大大超过平衡固溶极限的过饱和 Al 合金, 这为开发沉淀强化高温高强 Al 合金开辟了新的途径。在 Al 中加入的元素通常为过渡族或稀土元素, 这些元素具有 (1) 液态溶解度高, (2) 固态溶解度低, (3) 固态扩散系数小这些特点, 所以经快速凝固及后期热处理过程, 合金组织中具有大量细小弥散金属化合物, 它们不仅起沉淀强化的作用, 且其热稳定性较高, 能使合金在 573K 甚至更高温度下保持其强度<sup>[1]</sup>。已进行过研究的高温 Al-Fe 合金系有 Al-Fe-(Re, Ni, Mo, Cr, Mn, Co, V 等)<sup>[2]</sup>, 而 Al-Fe-Ti 系急冷合金的组织结构特征及热稳定性的研究报导极少。Ti 是铝合金中常见元素, 但 Ti 含量过高, 会产生粗大针状 Al<sub>3</sub>Ti 相, 而急冷 Al 合金中可固溶 5Wt%Ti。Ti 的加入会使合金液相线有所提高, 增大了熔体的过冷倾向, 只要提供足够的冷速以抑制 Al<sub>3</sub>Ti 的析出及其作为非均质形核中心的过程, 合金较二元 Al-Fe 合金应有更大的过冷能力, 组织的偏析程度亦会降低<sup>[3]</sup>。另外, 固溶在铝中的 Ti 能与其中的空位或空位团发生强烈的交互作用, 从而有效地降低铝合金中元素的扩散能力, 稳定铝合金的组织, 提高再结晶温度及热稳定性<sup>[4]</sup>。对 Al-5Wt%Si-1Wt%Ti 急冷合金在 400℃ 退火过程的研究<sup>[5]</sup>表明钛元素的加入对合金保持急冷组织的能力有较大贡献, 含钛铝合金的热稳定性是较好的。作者在 Al-Fe 合金中加入一定量的 Ti, 并进行一定温度的热处理, 来研究其对 Al 合金急冷组织尤其是对合金热稳定性的影响。

\* 本研究由国家高技术项目及省自然科学基金资助

\* \* 收稿日期: 1993-08-16

[illegible]

细胞, 靠近细胞膜处聚集形成核并继续增大, 有非膜细胞核的(细胞核)结构, 细胞核, 细胞核微组织。

Al<sub>6</sub>Fe 和 Al<sub>3</sub>Fe。形核中心为“V”相。另外在条带中心铸态组织中还存在面心立方的富 Ti 亚稳相, 经会聚束电子衍射测定其空间群为  $Fm\bar{3}m$ , 点阵常数为  $a=0.426\text{nm}$ 。

合金经 300℃, 5 小时退火后, 其中心部位组织特征如图 3 所示, 基本保持了铸态组织, 只是在胞晶间有非常细小的沉淀析出。

条带经 450℃, 5 小时退火大部分胞晶区铸态组织基本消失, 在  $\alpha$ -Al 基体上弥散 0.2—0.5 $\mu\text{m}$  大小的园形或针状第二相 (图 4)。而某些粗胞晶区还可以看到铸态组织轮廓, 只是晶间偏析变为 Al<sub>3</sub>Fe 并有所长大, 断开。在图 5 中可看到: 原来的初生相 (Al<sub>6</sub>Fe, “V”相) 变为长园形或不规则形状的 Al<sub>3</sub>Fe; 值得注意的是铸态组织中的富 Ti 相依然存在 (图 5 箭头所示)。图 6 为经 500℃ 退火的组织情况, 出现了大的针状及块状 Al<sub>3</sub>Fe 相。图 7 为时效—温度、硬度关系曲线, 可以看到: 经 5 小时退火合金硬度值在 200℃ 有一峰值, 到 300℃, 硬度保持铸态值, 温度高于 300℃, 硬度值下降很快。

### 3 讨论

在本实验的快凝条件下, 将界面传热系数定为  $h=10^5\text{W/MK}$  较为合适, 这时判据  $Bi=h\cdot d/Kl^{(6)}=10^5\cdot 100\times 10^6/0.92\times 10^2=0.108$ 。

其中  $d$  为条带厚度,  $Kl$  为导热系数, 由于  $0.015 < Bi < 32$ , 故凝固属于接近牛顿冷却的中间冷却方式, 这时的初始冷却速度可由下式得到:

$$(dT/dt)_{t=0} = -(h/Cl\cdot d)(T_0-T_b) = [10^5(1273-293)]/(2.67\times 10^6\times 10^6\times 10^{-4}) = 3.67\times 10^5(\text{K/s})$$

其中  $T_0$  为液态合金初始温度,  $T_b$  为衬底温度,  $Cl$  为合金液态热容, 在如此高的冷却速度下, 液态合金是在很大的过冷及很高的生长速度下开始凝固的, 在  $\alpha$ -Al 中有较高的 Fe 及 Ti 固溶度, 而且出现了与平衡凝固不同的亚稳相, 图 8 为 Al-Fe 稳定和亚稳相平衡图<sup>(7)</sup>, 图中标出了延伸的固液相线及  $T_0$  线 (固液相自由能相等, 合金过冷到  $T_0$  温度以下可能会发生完全的溶质截留现象)。Al<sub>3</sub>Fe、Al<sub>6</sub>Fe、Al<sub>3</sub>Fe 的其晶晶温度分别为 928K、922K 和 838K, 从急冷组织分布和相图上可知随冷却速度 (过冷) 提高, 初生相形成的次序为 Al<sub>3</sub>Fe→Al<sub>6</sub>Fe→Al<sub>3</sub>Fe, 所以在较大的过冷下, Al<sub>3</sub>Fe 很容易被抑制。“V”相具有同 Al<sub>3</sub>Fe 相同的成分, 从组织分布来看形成它的过冷介于 Al<sub>3</sub>Fe 和 Al<sub>6</sub>Fe 之间, 这种体心立方结构的亚稳相未见报导。另外富 Ti 相在 Al-Fe-Ti 三元相图上也未见, 这是一种新的亚稳三元相。

通过快速凝固, 基本体  $\alpha$ -Al 处于过饱和状态, 且在快凝过程中形成的亚稳相具有较高的能量, 故在一定温度退火之后, 基体中过饱和的 Fe、Ti 会发生沉淀析出, 亚稳相会发生向稳定相的转化。在 300℃ 时效时 Fe、Ti 原子的扩散很慢, 这时只能看到晶界偏析相有所变化, 析出一些极小的颗粒, 在这个温度下, 铸态组织基本保持。在 450℃ 时效, 由于原子的扩散能力增强, 基体中 Fe、Ti 原子析出, 晶界亚稳偏析物向平衡相转变。图 2 中的颗粒经能谱测定均为 Al<sub>3</sub>Fe 相。

富 Ti 相经 450℃ 退火仍未发生变化, 原因是 (1) Ti 和固态扩散系数很低; (2) 时效温度还未达到此相的相变温度。同时作者认为, 通过控制工艺参数及成分, 若能形成弥散

的尺寸较小的富 Ti 相, 会对合金的热稳定性有更好的作用。

从组织上看 Ti 起到了细化晶粒的作用, 而急冷工艺出消除了 Al<sub>3</sub>FeTi 针状相, Ti 的化合物的热稳定性也较高。从时效温度—硬度曲线也可以看出: 在 200℃ 温度有一峰值这是因为在该温度下铸态组织基本不变而较小弥散相析出成为主要过程, 它们起到了强化作用。在 300℃ 时, 铸态组织变化很少, 强度在这时同室温接近。而在 300℃ 之后, 由于针状 Al<sub>3</sub>Fe 的析出与长大造成了硬度值急剧下降。

## 4 结论

4.1 在快速凝固 Al-8.8Wt%Fe-3.0Wt%Ti 合金中存在细胞晶及粗胞晶两种不同的组织形态; 晶界偏析分别为 Al<sub>16</sub>Fe 和 Al<sub>6</sub>Fe, 初生相有 Al<sub>6</sub>Fe, Al<sub>16</sub>Fe 及体心立方“V”相( $a=3.0\text{nm}$ )和面心立方三元富钛相( $a=0.426\text{nm}$ )。

4.2 经 300℃ 退火, 其铸态组织没有明显变化, 而经 450℃ 热处理后, 发生了晶界偏析的相变及长大, 初生相也转变为平衡相 Al<sub>3</sub>Fe; 富 Ti 相在此温度下仍然稳定。

4.3 硬度值在 300℃ 时仍保持稳定。

## 参 考 文 献

- 1 吴越等. 材料科学进展. Vol.3No.6 Dec.89 (505)
- 2 W.M.Griffith et al. High-Strength Powder Metallurgy Aluminium Alloys Aime 1982 PF209
- 3 邵国胜. 郑州工学院硕士论文. 1988. 12 pp69
- 4 M.Dogawa Phys. Lett. Vol. 121. 1966(4)pp395
- 5 全兴存. 郑州工学院硕士论文. 1988.6
- 6 沈宁福. 河南省第二届材料科学交流会论文集. 1989.9
- 7 J.L.MURRAY Met. Res. Soc. Symp. Proe. Vol 19. 1983. pp258

## Microstructure stability of Rapidly solidified Al-8Fe-3Ti Alloy

Tang Yali Shen Ningfu etc.

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** This paper studied the metastable structure, microstructure evolution during annealing and mechanical properties of a rapidly solidified Al-8Fe-3Ti alloys. It can be concluded that there existed Al<sub>16</sub>Fe, Al<sub>6</sub>Fe, “V” and a Ti-rich metastable phases, meanwhile this alloys expressed high thermal stability.

**Keywords:** rapid solidification, Al-8Fe-3Ti alloy, thermal stability