

文章编号: 1000-6893(2001) 04-0382-03

## 定向凝固时热溶质对流对 Al/AlLi 共晶生长形态稳定性的影响

彭德林, 安阁英

(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

### EFFECT OF THERMOSOLUTAL CONVECTION ON MORPHOLOGICAL STABILITY OF Al/AlLi EUTECTIC DURING DIRECTIONAL SOLIDIFICATION

PENG De-lin, AN Ge-ying

(School of Materials Sciences and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘 要:** 在垂直向上定向凝固条件下, 研究了热溶质对流对二元亚共晶 Al-Li 合金 Al/AlLi 共晶生长形态稳定性的影响。结果表明, 晶体生长初期, 热溶质对流较微弱, 对界面形态稳定性无明显的影响, 晶体以完全的 Al/AlLi 共晶方式生长。当热溶质对流较强烈时, 对界面形态稳定性产生严重的影响。平面界面失稳破开时, 单相状晶领先生长。在单相状晶之间以 Al/AlLi 共晶方式生长。获得了二元亚共晶 Al-Li 合金共晶的稳定性生长条件。

**关键词:** 热溶质对流; Al/AlLi 共晶; 形态稳定性; 共晶生长; 定向凝固

中图分类号: V252 文献标识码: A

**Abstract:** The effects of thermosolutal convection on morphological stability were studied during Al/AlLi eutectic growth subjected to vertically upward directional solidification of two hypoeutectic Al-Li alloys. It is shown that thermosolutal convection was weak and was not enough to induce morphological instability of interface at the initial stage. The crystal structure was perfect Al/AlLi eutectic. When thermosolutal convection was strong, the plane interface broke down and grew into single phase cells ahead of the interface. Eutectic phases formed between single phase cells. And, the requirement for stability of eutectic growth in two hypoeutectic Al-Li alloys was also established.

**Key words:** thermosolutal convection; Al/AlLi eutectic; morphological stability; eutectic growth; directional solidification

定向凝固时, 熔体中热溶质对流的存在, 一直受到极大的关注<sup>[1-4]</sup>。对流能够对材料的组织和性能有显著的影响, 尤其是可显著改变固—液界面的形态稳定性<sup>[5]</sup>。对二元合金垂直向上定向凝固线性稳定性分析预测了热溶质对流和形态非稳定性的发生<sup>[6]</sup>。当晶体生长条件一定时, 存在足够大量的溶质浓度的固—液界面形态不稳定。在垂直向上定向凝固过程中, 如果固—液界面前被排斥出的溶质比溶剂轻, 或者优先结合的溶质比溶剂重。这样, 在垂直方向上产生的大量溶质浓度梯度高于某临界值时, 将引起自然或有浮力的对流。通常称为双重扩散对流或热溶质对流。

凝固包括许多物理因素相互作用的复杂过程。结晶潜热通过固—液界面从固相向液相传导, 在固—液界面处建立起温度边界层。如果液相中含有溶质, 于是在固—液界面处发生溶质的择优

排斥或结合。当溶质在固相中的溶解度比在液相中小, 在界面处将排斥出溶质。这种被排斥出的溶质通过固—液界面从固相向液相中扩散, 在固—液界面附近建立起浓度边界层。温度边界层和浓度边界层与界面形态稳定性都有直接关系。

在对 Al-Li 合金共晶复合材料的定向生长时发现<sup>[7]</sup>, 固—液界面前热溶质极不稳定。为此, 对二元亚共晶 Al-Li 合金定向凝固时热溶质对流对共晶生长形态稳定性影响进行了研究。

### 1 实验方法

选用高纯铝(99.999%)和高纯锂(99.99%)配制合金。合金在高纯氩气和熔剂(LiCl+LiF)保护下熔炼, 铸型及坩埚均为高纯石墨材料制成。预制铸锭尺寸直径为 6mm, 长度为 100mm。铸锭经过 8h 均匀化处理。配制后的合金成分(质量分数, 下同)如表 1。

表 1 合金成分表

Table 1 The composition of the alloy

铸锭号	1	2	3	4	5
Li/ %	6.51	6.72	6.94	7.01	7.2
铸锭号	6	7	8	9	10
Li/ %	7.41	7.64	7.81	7.90	8.05

在重力条件下, 使用垂直向上定向凝固装置, 实验在系统抽真空后充入高纯氩气保护下进行。晶体生长速度为  $0.01 \sim 100 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 以液态 Ga-In 合金及恒温循环水作冷却系统, 最高温度梯度为  $200\text{K} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。通过快淬系统保留界面形态。金相试样取样时, 与生长方向平行剖面观察纵向形貌, 与生长方向垂直剖面观察横向形貌。

## 2 实验结果及讨论

图 1 是 Al-7.2%Li (质量分数) 合金, 在温度梯度  $G_L = 178\text{K} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 生长速度  $R = 2.5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  定向凝固典型的 Al/AlLi 共晶组织形貌。从图

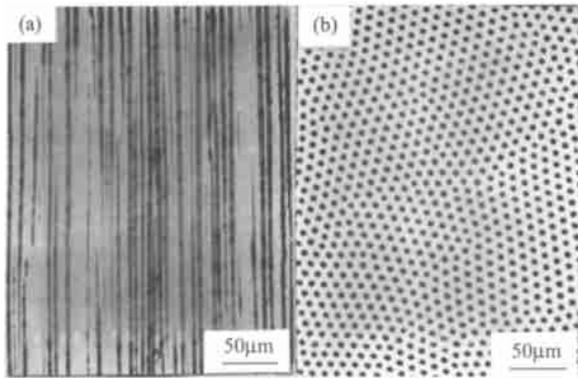


图 1 Al/AlLi 共晶组织形貌 (Al-7.2%Li)  
(a) 垂直方向; (b) 横向

$$G_L = 178\text{K} \cdot \text{cm}^{-1}; R = 2.5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fig. 1 Morphologies of Al/AlLi eutectic structure

(a) vertical direction; (b) transvers direction

$$G_L = 178\text{K} \cdot \text{cm}^{-1}; R = 2.5 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

1 中可见,  $\beta$ 相 (AlLi, 黑色) 在垂直方向 (晶体生长方向) 是连续的棒状结构。并且, 在水平方向呈规则分布。这个结果表明, 适当地偏离共晶成分 (共晶点, Li 质量分数为 8.2%) 仍可得到完全的共晶结构。实验发现, 适当的控制生长条件可在很大范围内改变成分并保持一个平面状固—液界面。如果界面能够保持稳定的平面前沿形状, 就可以得到共晶结构。成分离开共晶较远, 要求有较大的  $G_L/R$  值, 才能得到共晶结构。Al-Li 合金定向凝固中, 晶体生长初期, 热溶质对流是微弱的, 不能引起固—液界面形态的非稳定性。在本文研究条

件下, 二元亚共晶 Al-Li 合金形态稳定性条件为

$$6.5 \times 10^5 \text{K} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1} < G_L/R <$$

$$11 \times 10^5 \text{K} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$$

式中:  $G_L$  是固—液界面前液相中的温度梯度;  $R$  是晶体生长速度。

图 2 是二元亚共晶 Al-Li 合金定向凝固时平面前沿的稳定性。由图 2 可知, 当合金中含 Li 质量百分数小于 7.0% 时, 与理论计算值相近的  $G_L/R$  值得不到平的固—液界面形态及完全共晶组织, 得到的是单相胞晶和共晶组织。当合金中含 Li 质量百分数大于 7.0% 时, 与理论计算相近的  $G_L/R$  值能够得到平面状固—液界面, 并获得完全的共晶组织。理论计算与实验结果基本吻合。然而, 当  $G_L/R$  达到某一临界值时, 由于热溶质的不稳定性, 固—液界面形态非稳定性将发生, 且这个临界值随着合金中 Li 含量的增加而减小。

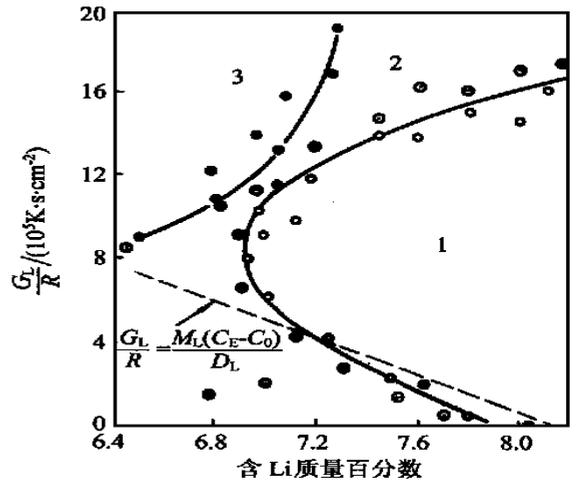


图 2 二元 Al-Li 合金定向凝固时平面前沿的稳定性

1- 共晶; 2- 单相胞晶+ 共晶; 3- 平面单相

Fig. 2 Plane front stability during directional solidification of binary Al-Li alloys

1- eutectic; 2- single phase cell+ eutectic;

3- planar single phase

在晶体生长过程中, 当 Li 在固—液界面前优先排斥, 并不断向前方扩散时, 固—液界面附近处液体的密度随着温度和高度的增加而减小。所以, 在固—液界面处液体的密度比整体熔体的密度轻。当排斥出的 Li 使溶质浓度达到某一临界值时, 流体发生非稳定性对流, 这种由温度梯度和浓度梯度引起的流体流动为热溶质对流。当热溶质对流微弱, 不能引起固—液界面的非稳定性时, 在适合的生长条件下, 晶体以 Al/AlLi 共晶方式生长。在垂直方向上  $\beta$ 相 (AlLi) 呈短棒 (针状) 结构, 在水平方向上  $\beta$ 相呈波形排列 (图 3)。当热溶质

对流足够强,固—液界面不能维持平面前沿时,平面界面将破开。并且发生单相胞晶超前从界面生长(图4)。虽然开始破开阶段两相界面可能有局部扰动,但只有单相胞状晶可以发展到等温界面前很远的距离。当在固—液界面前沿形成单相胞

状晶时,将发生溶质再分配。液体中的溶质浓度随着离开共晶前沿的距离增加而降低。共晶前沿处液相成分正是共晶成分,所以在单相胞状晶之间晶体以共晶方式生长,其晶体结构如图5所示。

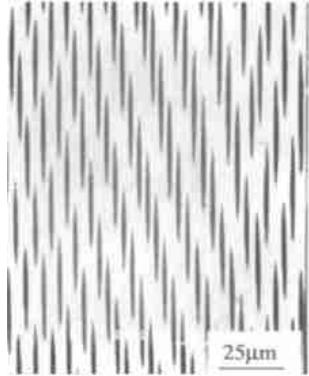


图3 热溶质对流的 Al/AlLi 共晶组织形貌

$G_L = 155K \cdot cm^{-1}; R = 2.5\mu m \cdot s^{-1}$

Fig. 3 Morphologies of Al/AlLi eutectic structure of thermosolutal convection



图4 单相胞晶超前生长界面形态  $G_L = 155K \cdot cm^{-1}; R = 2.5\mu m \cdot s^{-1}$

Fig. 4 Morphologies of nonplanar interface of single cell leading growth

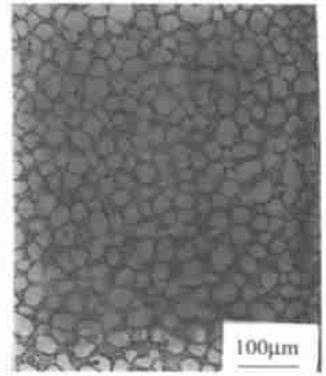


图5 单相胞晶(或枝晶)+ Al/AlLi 共晶组织(横向)

$G_L = 120K \cdot cm^{-1}; R = 1.2\mu m \cdot s^{-1}$

Fig. 5 Single cells (or dendrites) + Al/AlLi eutectic structure (transverse direction)

参 考 文 献

[ 1 ] Ma N, Walker J S. A parametric study of segregation effects during vertical Bridgman crystal growth with an axial magnetic field[ J]. J Crystal Growth, 2000, 208: 757 - 771.

[ 2 ] Odell S P, Ding G L, Tewari S N. Cell/dendrite distribution in directionally solidified hypoeutectic Pb-Sb alloys[ J]. Metall Mater Trans A, 1999, 30A, 2159- 2165.

[ 3 ] Ojha Ding S N, Lu G, et al. Macrosegregation caused by thermosolutal convection during directional solidification of Pb-Sb alloys[ J]. Metall Mater Trans A, 1999, 30A: 2167- 2171.

[ 4 ] Tewari S N, Shah R. Macrosegregation during dendritic

arrayed growth of hypoeutectic Pb-Sn alloys: Influence of primary arm spacing and mushy zone length[ J]. Metall Trans A, 1992, 27A: 1353- 1362 .

[ 5 ] Schaefer R J, Coriell S R. Convection-induced distortion of a solid-liquid interface[ J]. Metall Trans A, 1984, 15A: 2109- 2115.

[ 6 ] Davis S H, Schulze T P. Effects of flow on morphological stability during directional solidification[ J]. Metall Mater Trans A, 1996, 2A: 583- 593.

[ 7 ] 彭德林, 闵光辉, 安阁英, 等. 二元 Al-Li 合金共晶复合材料的定向生长[ J]. 金属学报, 1996, 32(9): 993- 997.

作者简介:



彭德林(1953-) 男,黑龙江人,高级工程师。研究方向:金属凝固及合金材料。