

液相对流对定向凝固胞/枝晶间距的影响*

王贤斌 林鑫[†] 王理林 宇红雷 王猛 黄卫东

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

(2012年9月25日收到; 2012年11月16日收到修改稿)

采用类金属透明模型合金丁二腈-1.8 wt%丙酮 (SCN-1.8 wt%Ace) 合金, 研究了平行于生长界面前沿的液相对流对定向凝固胞/枝晶生长行为及胞/枝晶间距的影响. 对于胞晶生长, 在液相对流作用下, 其尖端将会出现分岔, 使得胞晶间距减小, 并且液相对流流速越大, 胞晶尖端分岔越明显, 胞晶组织越细小, 胞晶间距越小. 至于枝晶生长, 其生长行为与胞晶不同. 当抽拉速度较小时, 液相对流作用下枝晶两侧三次臂的生长速度将会超过枝晶尖端生长速度, 形成新的枝晶列, 使得枝晶一次间距减小, 并且液相对流流速越大枝晶一次间距越小; 当抽拉速度较大时, 液相对流作用下迎流侧二次臂生长发达, 且会抑制上游枝晶生长, 使得枝晶一次间距增大, 并且液相对流越强枝晶一次间距越大.

关键词: 定向凝固, 胞晶间距, 枝晶间距, 液相对流

PACS: 81.30.Fb, 81.10.Aj, 44.27.+g

DOI: 10.7498/aps.62.078102

1 引言

胞晶和枝晶是定向凝固过程中普遍存在的两种典型的单相合金生长形态^[1,2], 其形态和特征尺度, 如一次间距, 二次间距和尖端半径等, 对材料的力学性能具有重要的影响. 至今, 已经有很多研究者对定向凝固胞/枝晶一次间距进行了研究, 并提出相应的模型^[3-15], 如 Hunt 模型^[11]、KF 模型^[12]、Trivedi 模型^[13]、Hunt-Lu 数值模型^[14]以及 Lin-Huang 数值模型^[15]. 但是这些研究大多是基于纯扩散条件进行分析, 而在实际凝固过程中, 液相对流一般是不可避免的, 并且液相对流还会影响固液界面前沿的温度场和溶质场, 进而影响胞晶和枝晶的生长形态. 近年来, 对流对凝固过程的影响已经引起很多研究者的关注. 刘山等^[16]考察了对流对胞晶和枝晶生长影响, 发现流动使得胞晶间距减小, 但是却使得枝晶一次间距增大. Trivedi 等^[17]却发现对流使得枝晶一次间距减小, 并提高了胞枝转变临界速度. Spinelli 等^[18]随后的研究中也发现枝晶间对流会使得枝晶一次间距减小. 最近,

孙东科^[19]等通过数值模拟方法研究对流对枝晶生长的影响, 发现对流使热量和溶质从上游传输到下游, 从而加速上游枝晶的生长. 石玉峰^[20]等通过数值模拟方法研究对流对枝晶尖端生长速度的影响, 发现对流使得枝晶迎流侧生长加速, 且对流使枝晶间溶质富集减少, 出现枝晶一次臂湮没和分枝的现象. 王建元等^[21,22]考察了对流对胞晶和枝晶生长影响, 发现胞晶间距随流速的增大而减小, 且对流作用下胞晶尖端易出现分岔, 同时, 对流使得枝晶间距增大. 可以看到, 虽然目前对流对胞晶和枝晶生长影响的相关研究已经取得了初步的进展, 但是目前的研究结果还存在一定分歧, 并且大部分研究者的重点集中在对比流动条件下和纯扩散条件下的胞/枝晶生长行为, 而在对流强度对凝固组织形态影响方面的研究较为缺乏. 基于此, 本文采用类金属透明模型合金——SCN-1.8wt%Ace 合金, 考察了固液界面前沿液相对流的流速对胞晶和枝晶生长行为的影响, 并探讨了液相对流对胞晶间距和枝晶一次间距影响的本质原因, 以期完善流动条件下的胞/枝晶生长理论, 进而为指导生产实践奠定基础.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB610402) 和国家自然科学基金 (批准号: 50971102, 50901061) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail:

2 实验方法

实验采用的 SCN-1.8wt% Ace 合金是由纯度大于 99.99% 的丁二腈和纯度大于 99.5% 的丙酮在氩气气氛的手套箱中配制而成. 实验在自制的 Bridgman 水平定向凝固系统中进行如图 1 所示. 该系统主要由 Jackson-Hunt 温度梯度平台、流动驱动系统、显微观察图像采集系统组成. 试样盒厚度为 0.15 mm. 采用精度优于 0.1 K 的恒温水浴来控制热端和冷端温度. 界面前沿的对流由放置于试样盒中的磁力驱动叶片产生, 进而在固液界面前沿形成垂直于生长方向且流速可调的流动, 并采用

失踪粒子测定界面前沿的流动流速. 组织形态采用 Nikon AZ100 显微镜进行实时观察, 通过 CoolSnap 高分辨率 CCD 实时拍摄. 实验开始前, 通过选晶在试样盒中形成一个 $\langle 100 \rangle$ 晶向平行于温度梯度方向的单晶, 每次实验开始时都从此试样盒的同一个起点出发来保证实验初始条件的一致性. 在考察对流流速对胞枝晶生长的实验时, 在启动抽拉系统启动的同时同步施加对流, 并作为计时零点记作 $t = 0$ s. 每次实验结束后都保证将试样盒退回到同一起点处, 并将试样盒放置于 Jackson-Hunt 温度梯度平台保温 4 h 进行合金均匀化, 之后再继续进行下一组实验.

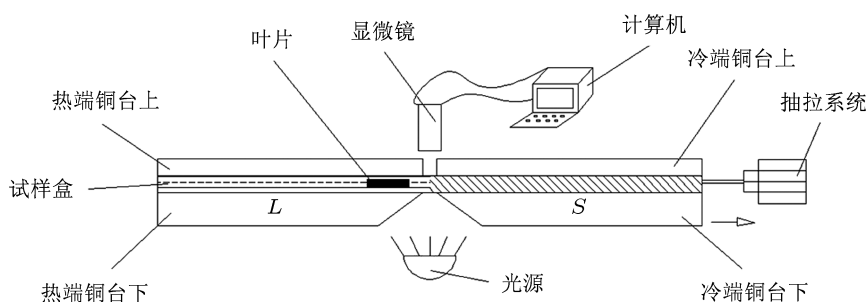


图1 带切向流动系统的定向凝固系统示意图

3 实验结果与讨论

3.1 流动对胞晶生长的影响

由于透明合金 SCN-1.8wt% Ace 在温度梯度 $G_T = 6$ K/mm 条件下形成胞晶的抽拉速度范围比较狭窄, 作者在前期的考察中, 发现该温度梯度下, 实际的胞晶抽拉速度范围大约为 0.34—

1.08 $\mu\text{m/s}$. 因此在研究中选取靠近抽拉速度下限 ($v = 0.43$ $\mu\text{m/s}$) 和抽拉速度上限 ($v = 0.92$ $\mu\text{m/s}$) 两个典型速度. 图 2 对比了抽拉速度 $v = 0.43$ $\mu\text{m/s}$ 下, 对流对平界面失稳后的浅胞形貌的影响. 其中, 图 2(a) 无强制液相对流作用, 图 2(b) 存在液相对流, 液相平均流速 $\bar{u}_1 = 14.3$ $\mu\text{m/s}$. 由图 2 可见, 与无强制液相对流相比较, 液相对流作用下部分大间距胞晶尖端出现了分岔, 胞晶间距明显细化.

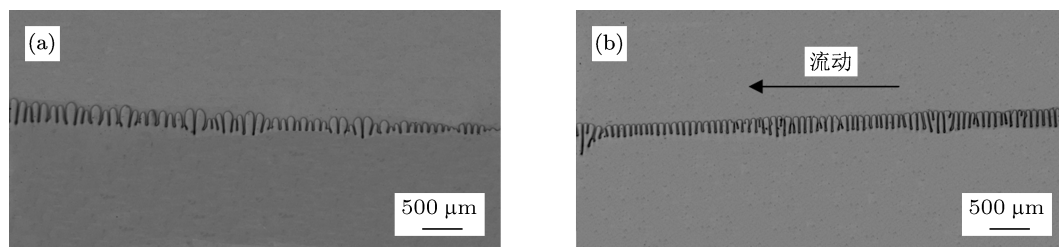


图2 对流对浅胞生长的影响 $v = 0.43$ $\mu\text{m/s}$, $G_T = 6$ K/mm, $t = 100$ min (a) 无强制对流; (b) 强制对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3$ $\mu\text{m/s}$

随着抽拉的继续进行, 浅胞组织逐渐演化为深胞组织. 图 3 显示了抽拉速度 $v = 0.43$ $\mu\text{m/s}$ 下对流对深胞晶生长形貌的影响. 其中图 3(a) 为无强制液

相对流作用, 图 3(b), (c), (d) 的液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3$ $\mu\text{m/s}$, $\bar{u}_2 = 28.9$ $\mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7$ $\mu\text{m/s}$. 可以发现, 在液相对流作用下, 胞晶尖端同样会出现

尖端分岔, 以致胞晶明显细化. 流速较低时, 尖端分岔的频次较高, 胞晶尖端几乎始终处于周期性分岔状态, 随着对流流速增大, 尖端分岔的频次明显降低. 图 4 显示了抽拉速度 $v = 0.92 \mu\text{m/s}$ 下对流对胞晶生长形貌的影响. 其中, 图 4(a) 为无强制液相对流作用, 图 4(b), (c), (d) 的液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$. 可以看到, 与图 3 的规律基本相同. 总体上看, 胞晶间距随着对流流速的增大逐渐减小.

Hunt 和 Lu^[14] 通过采用数值自洽模型, 分析胞晶之间溶质扩散场的相互作用, 给出了胞晶间距分布范围下限的数值拟合结果

$$\lambda = 4.09k^{-0.335} \left(\frac{\Gamma}{mC_0(k-1)} \right)^{0.41} \left(\frac{D}{V} \right)^{0.59}, \quad (1)$$

其中, λ 是胞晶间距, k 是溶质分配系数, Γ 是 Gibbs Thomson 系数, m 是液相线斜率, C_0 是合金成分, D 是溶质扩散系数, V 是抽拉速度.

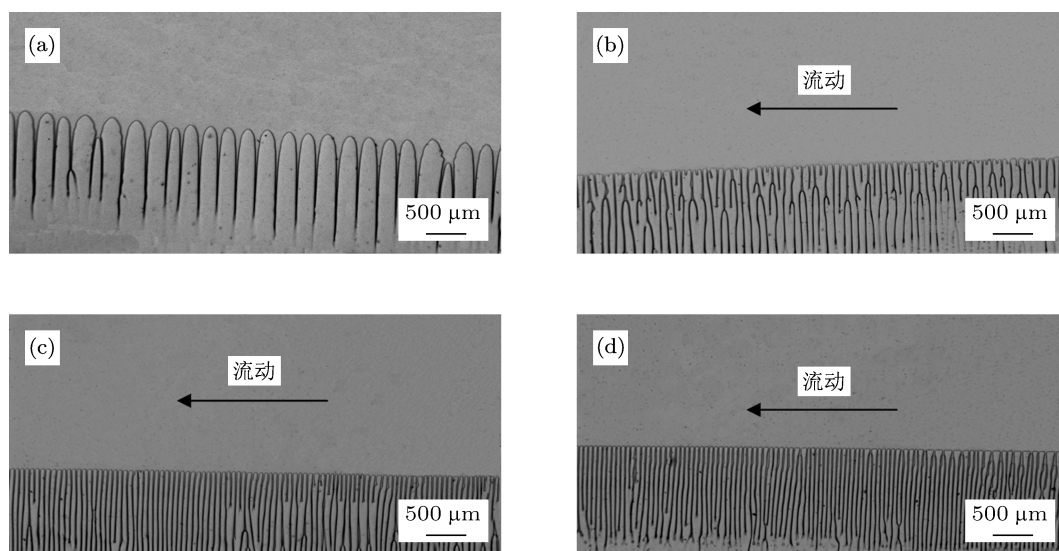


图 3 流动对胞晶生长的影响 $v = 0.43 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$, $t = 220 \text{ min}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

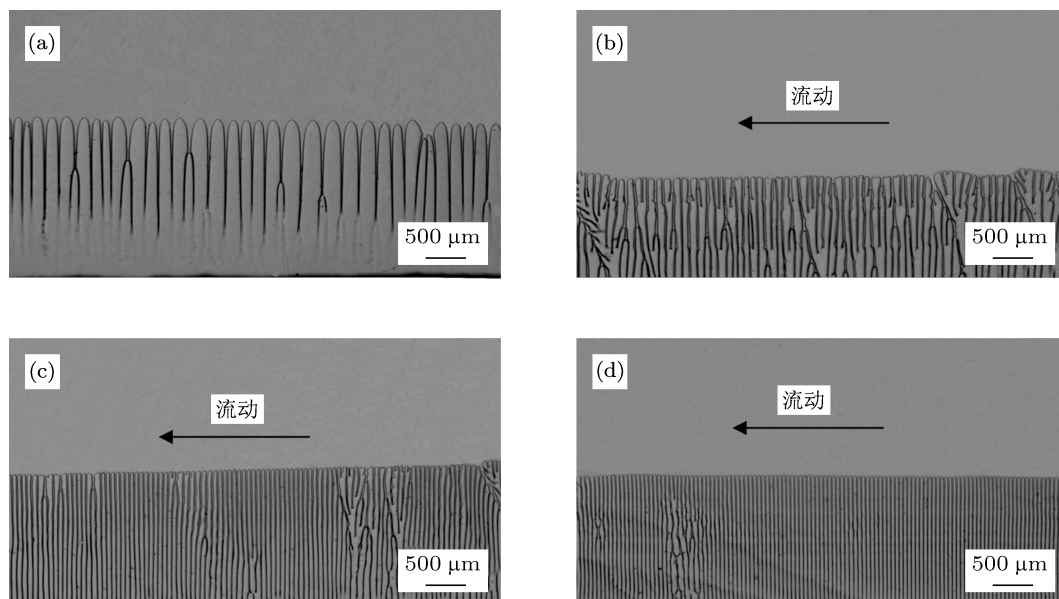


图 4 流动对胞晶生长的影响 $v = 0.92 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

图 5 显示的是纯扩散和强制液相对流情况下抽拉速度与胞晶间距关系. 从图中可以看出, 在纯扩散条件下, 胞晶间距随着抽拉速度的增大而减小, 并且与 Hunt-Lu 模型趋势相同. 由于 Hunt-Lu 数值模型给出的是胞晶间距下限, 因此实验所得胞晶间距要比理论胞晶间距偏大. 然而, 在强制对流作用下胞晶间距要比纯扩散条件下的胞晶间距要小, 且明显低于 Hunt-Lu 理论模型的值.

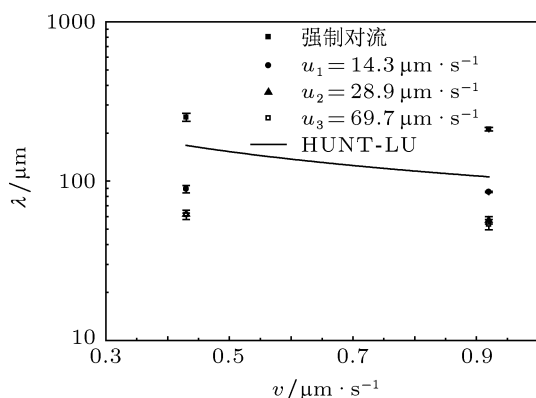


图 5 强制液相对流对胞晶间距的影响

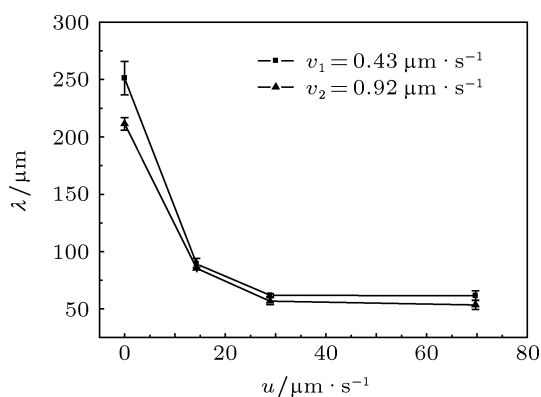


图 6 不同抽拉速度下液相流速对胞晶间距的影响

图 6 显示的是不同抽拉速度下流速与胞晶间距的关系. 从图中可以看出, 强制液相对流流速越大胞晶间距越小. 更值得注意的是, 在强制液相对流作用下, 由抽拉速度导致的胞晶间距差异会减小, 即当流速达到一定时, 胞晶间距逐渐趋于一个定值.

固液界面前沿在液相对流的作用下, 界面前沿会形成溶质和温度边界层, 使得界面前沿的温度梯度和浓度梯度增大, 但是热扩散系数比溶质扩散系数一般高三个数量级, 因此, 对流对浓度梯度的影响更为显著, 导致胞晶尖端随着浓度梯度的增大, 稳定性有所减弱; 同时, 对流的作用也增强了界面

前沿的扰动. 由于胞晶尖端总体曲率较小, 因此, 界面能对胞晶尖端的稳定性本身就较弱. 这样, 对于平界面和粗胞晶, 一方面, 对流使浓度梯度增大以及界面扰动增强, 另一方面, 界面演化的空间尺度较大, 且界面的曲率较小, 界面能的稳定性作用较弱, 有利于平界面扰动的发展和胞晶尖端的分岔, 使得浅胞晶和粗胞晶快速细化, 特别是温度梯度增大, 胞晶间距也会减小. 同时, 因为流速较低时, 对流本身的波动频率较低, 容易与胞晶尖端界面失稳扰动波长出现耦合, 因而使得胞晶尖端出现周期性分岔. 随着对流流速的增大, 温度梯度/浓度梯度增大同时扰动也在进一步增强, 因此, 胞晶间距逐渐减小. 另外, 当对流流速继续增大时, 温度梯度的稳定化作用逐渐提高, 同时胞晶间距的减小, 也使得胞晶尖端曲率逐渐增大, 尖端的界面能稳定作用增强, 分岔逐渐困难, 导致胞晶尖端经过初始分岔后, 快速地趋于稳定. 同时, 分岔后胞晶尖端界面稳定性的增强, 也使得进一步提高对流流速后, 对流对胞晶间距的影响逐渐减弱, 胞晶间距趋于稳定. 另外, 从图 3(b) 可以看到, 当流速较低时, 胞晶尖端分岔通常总有一个分支的生长会被抑制而使另一分支优先生长, 并且从统计上看, 迎流侧分支被抑制的概率略大, 相信这与迎流侧容易造成溶质富集有关. 而随着流速的增大, 胞晶尖端分岔逐渐稳定, 分岔后的分支皆可得到充分生长, 如图 3(c), (d) 所示. 这主要是由于当流速较低时, 胞晶间距减小较少, 这样, 初始胞晶分岔后的生长空间不足以供两个分支共同生长, 进而导致某一分支受外界影响略有领先时, 其排出的溶质将抑制另一分支的生长; 同时, 由于间距的横向调整速度较慢, 导致该分支充分生长后, 间距还是过大, 只能继续在对流的作用下进一步发生分支, 进而形成周期性分支行为; 而当流速较大时, 胞晶间距显著减小, 这使得初始胞晶分岔后, 不同分支皆有充足的空间继续生长. 王建元等^[21]在考察流动对胞晶生长影响时, 观察到流动条件下胞晶尖端出现分岔胞晶间距减小, 这与本文实验结果一致.

3.2 流动对枝晶间距的影响

图 7 显示了在较低抽拉速度 ($v = 3.47 \mu\text{m/s}$) 下强制液相对流流速对定向凝固枝晶形貌的影响. 其中, 图 7(a) 是无强制对流条件下枝晶生长形貌, 图 7(b), (c), (d) 为不同液相对流流速作用下的枝晶生长形貌, 液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$,

$\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$. 从图中可以看出, 相对无强制液相对流, 在强制液相对流作用下, 枝晶尖端形貌发生了变化, 枝晶一次间距有明显的减小, 并且随着对流流速的增大, 枝晶一次间距逐渐减小. 图 8 显示的是较低抽拉速度 ($v = 4.43 \mu\text{m/s}$)

下强制液相对流对枝晶生长形貌的影响, 图 8(a) 是无强制对流条件下枝晶生长形貌, 图 8(b), (c), (d) 为不同液相对流流速作用下的枝晶生长形貌, 液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$. 可以看出, 与图 7 的规律基本相同.

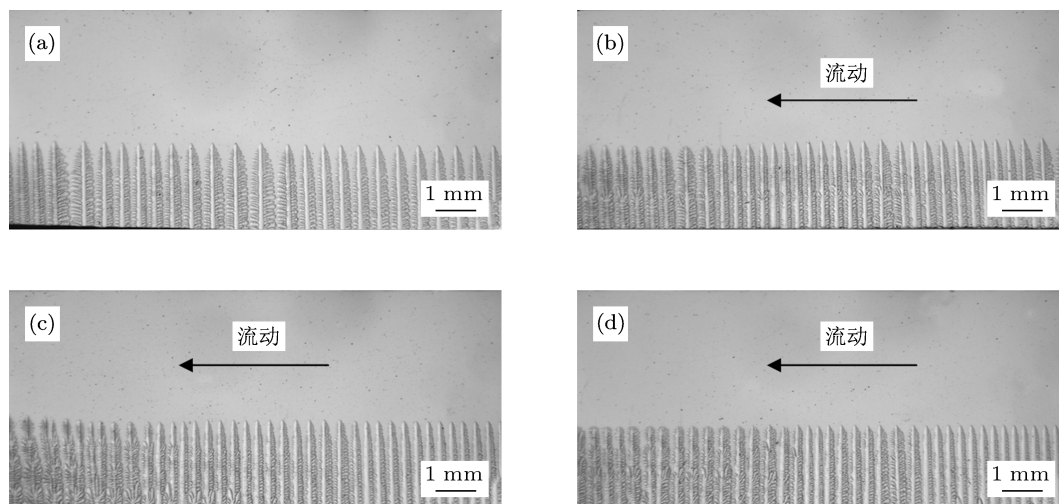


图 7 抽拉速度较小时不同流速下枝晶生长形貌 $v = 3.47 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

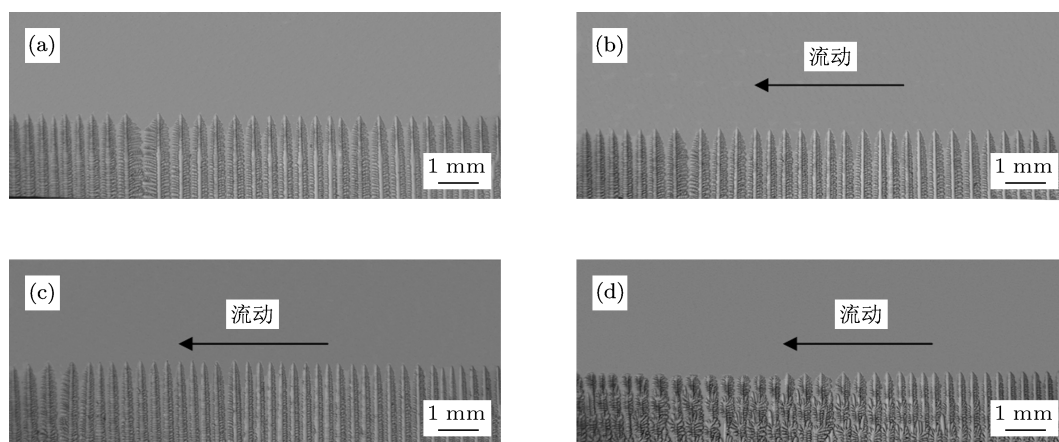


图 8 抽拉速度较小时不同流速下枝晶生长形貌 $v = 4.43 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

图 9 显示了在较高的抽拉速度 ($v = 13.3 \mu\text{m/s}$) 下, 强制液相对流对枝晶生长形貌的影响. 其中, 图 9(a) 为无强制液相对流条件下枝晶生长形貌, 图 9(b), (c), (d) 分别为不同液相对流流速作用下的枝晶生长形貌, 液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$. 从图中可以看出, 与较低抽拉速度相反, 强制液相对流使得枝晶迎流侧二次臂生长更为发达, 枝晶一次间距相比无强制液

相对流的情况有所增大, 并且随着强制液相对流流速的增大, 枝晶一次间距呈增大趋势. 图 10 显示的是较高的抽拉速度 ($v = 26.61 \mu\text{m/s}$) 下对流对枝晶生长形貌的影响, 图 10(a) 为无强制液相对流条件下枝晶生长形貌, 图 10(b), (c), (d) 分别为不同液相对流流速作用下的枝晶生长形貌, 液相平均流速分别为 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$, $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$. 可以看出, 与图 9 的基本规律相似.

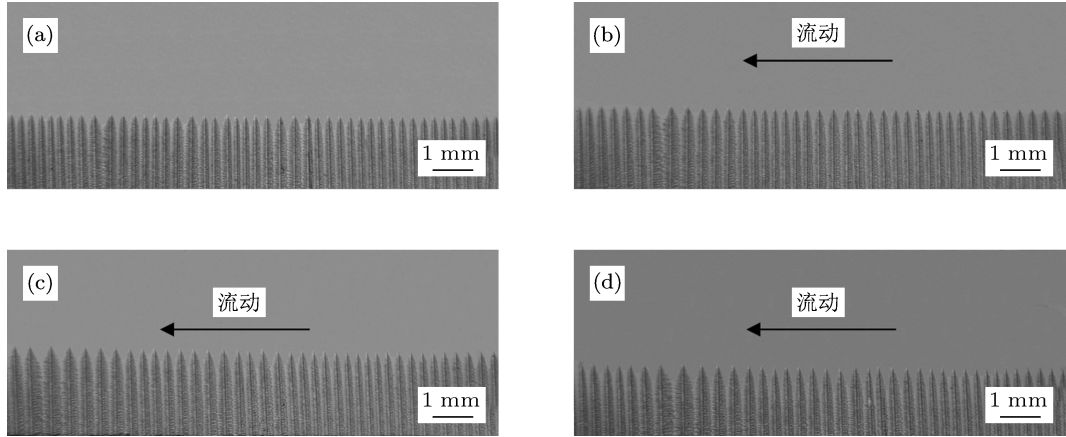


图9 抽拉速度较大时不同流速下枝晶生长形貌 $v = 13.3 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

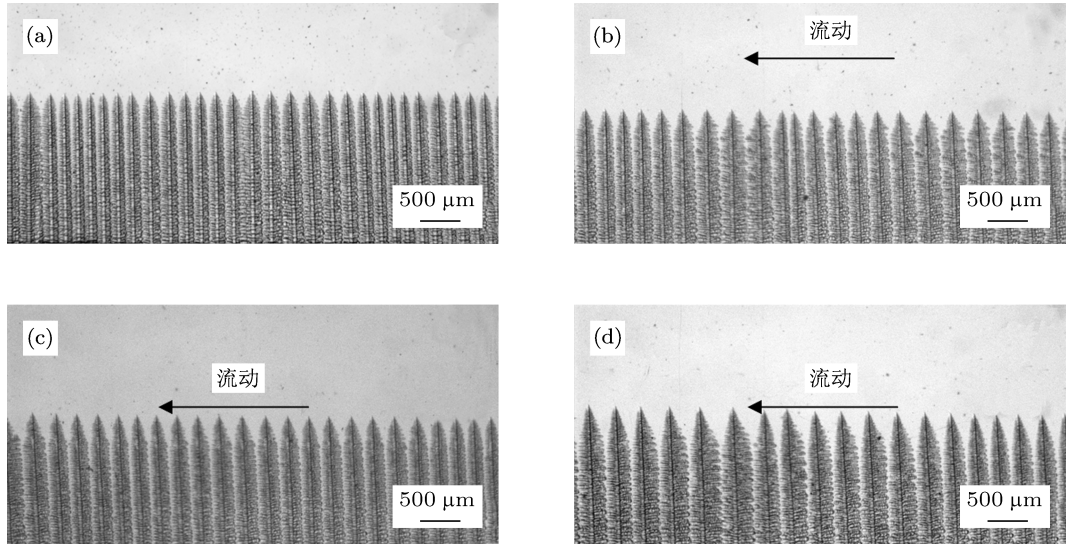


图10 抽拉速度较大时不同流速下枝晶生长形貌 $v = 26.61 \mu\text{m/s}$, $G_T = 6 \text{ K/mm}$ (a) 无强制对流; (b) 对流流速 $\bar{u}_1 = 14.3 \mu\text{m/s}$; (c) 对流流速 $\bar{u}_2 = 28.9 \mu\text{m/s}$; (d) 对流流速 $\bar{u}_3 = 69.7 \mu\text{m/s}$

从以上实验结果中可以看出, 在不同抽拉速度下, 对流对枝晶一次间距的影响不同. 在抽拉速度较小时, 液相对流使得枝晶一次间距减小, 且对流流速越大枝晶间距越小; 而在抽拉速度较大时, 液相对流使得枝晶一次间距增大, 且对流流速越大枝晶间距越大.

Hunt-Lu^[14] 根据数值自洽模型分析了枝晶之间溶质扩散场的相互作用, 提出枝晶一次间距范围下限的数值模型:

$$\lambda = \frac{0.07998 \Gamma k V'^{(a-0.75)} (V' - G')^{0.75} G'^{-0.6028}}{\Delta T'}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= -1.131 - 0.1555 \log_{10}(G') \\ &\quad - 0.7589 \times 10^{-2} [\log_{10}(G')]^2, \\ V' &= \frac{V \Gamma k}{D \Delta T}, \\ G' &= \frac{G \Gamma k}{\Delta T^2}, \\ \Delta T' &= \frac{m_l C_0 (k-1) k}{k}, \end{aligned}$$

而 λ 是枝晶一次间距, Γ 是 Gibbs-Thomson 系数, k 是溶质分配系数, G 是温度梯度, ΔT 是过冷度, V 是抽拉速度, D 是溶质扩散系数, m_l 是液相线斜率, C_0 是合金成分.

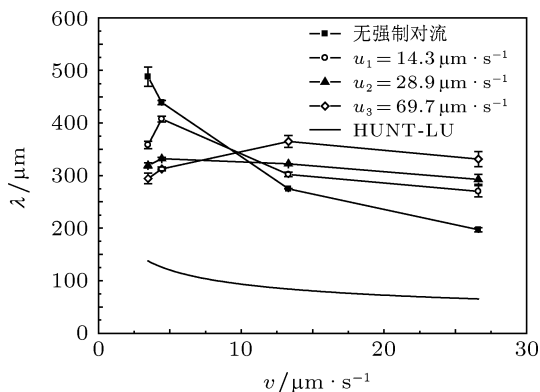


图 11 对流作用下枝晶一次间距与理论模型比较

图 11 给出了不同流速下枝晶一次间距随抽拉速度的变化关系并与纯扩散下的理论模型相比较. 从图中可以看到, 在无强制液相对流时, 实验所得枝晶间距与抽拉速度的关系趋势与 Hunt-Lu 模型一致, 都是随着抽拉速度的增加枝晶一次间距逐渐减小. 而当存在强制液相对流时, 枝晶一次间距随着抽拉速度的增大, 先达到一个极大值, 随后又逐渐减小, 并且随着强制液相对流的施加, 枝晶一次间距随抽拉速度的变化趋势明显变缓, 这与纯扩散条件下实验值与理论模型中枝晶一次间距随抽拉速度的趋势有较大的差别. 还可以看到, 在抽拉速度较小时, 施加强制对流使得枝晶一次间距明显的减小, 但是随着流速或抽拉速度的增大, 对流对枝晶一次间距的减小程度减弱, 当抽拉速度超过一定值时, 对流使得枝晶一次间距增大. 另外, 强制对流作用下实验所得的枝晶一次间距均在 Hunt-Lu 模型上侧.

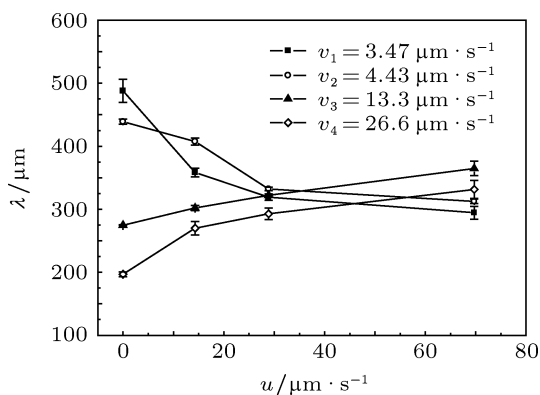


图 12 不同抽拉速度下枝晶间距与流速的关系

图 12 给出了不同抽拉速度下枝晶间距与流速之间的关系, 图中可以看出在抽拉速度较小时, 随

着流速的增加, 枝晶一次间距减小; 在抽拉速度较大时, 随着流速的增加, 枝晶一次间距增大. 更值得注意的是, 在无强制对流时, 不同抽拉速度对应的枝晶一次间距有非常大的差异, 而当存在强制液相对流时, 由抽拉速度产生的枝晶一次间距差异减小, 并且最终会使得枝晶一次间距稳定在一个范围.

为了明晰较低抽拉速度下液相对流对枝晶一次间距的作用机理, 图 13 进一步给出了在较低抽拉速度下形成的稳定枝晶列随着液相对流的施加, 其形貌的演化过程. 其中图 13(a) 为未施加强制液相对流时的枝晶生长形貌. 待该枝晶列达到稳态后, 施加强制液相对流. 图 13(b)—(e) 显示了强制液相对流施加后枝晶形貌的演化过程. 可以看到, 在未施加强制液相对流作用时, 较低抽拉速度所对应的枝晶一次间距较大, 枝晶间的液相分数也较大. 这样, 当引入液相对流后, 不仅在枝晶尖端前沿存在液相对流, 同时, 由于液相对流所导致的流体压强降低, 也使得在枝晶间存在向界面前沿的液相对流. 枝晶间的液相对流将枝晶两侧的溶质带到枝晶尖端前沿, 使得枝晶间的溶质富集降低, 枝晶间两侧相对的枝晶二次臂和三次臂的生长速度都得到了加快, 而枝晶尖端由于溶质富集, 尖端的生长速度逐步减小并逐步钝化, 如图 13(b) 所示. 当枝晶间的溶质富集进一步降低, 而枝晶尖端的溶质富集进一步加重. 一方面, 枝晶两侧的二次臂向三次臂的分支逐渐加快, 同时三次臂逐渐生长超过尖端时, 形成新的枝晶主干; 另一方面, 钝化的枝晶尖端由于曲率减小所导致的界面能稳定性作用的减弱, 也像前一节所观察的胞晶尖端一样, 开始逐渐分岔, 这两方面的因素使得枝晶一次间距急剧减小, 如图 13(c), (d) 所示. 最终形成的类胞状的退化枝晶形态, 如图 13(e) 所示. 这实际也意味着强制液相对流提高了胞枝转变的临界速度. 孙东科^[19]和石玉峰^[20]等通过数值模拟方法研究对流对枝晶尖端生长速度的影响时, 发现对流使得枝晶间溶质富集减少, 出现枝晶一次臂湮没和分枝的现象, 与本文一致. 另外, 对于低速枝晶, 其枝晶间距较大, 三次臂有较充足的发展空间, 同时, 横向浓度梯度应该低于纵向, 因此, 二次臂生长不容易抑制三次臂形成主干, 使得枝晶一次间距减小. 但是由于枝晶尖端的稳定性要比胞晶强, 而且分岔不会像胞晶那么严重, 因此枝晶间距会减小但没有低于 Hunt-Lu 模型的枝晶间距下限. 而较大抽拉速度对应的枝晶一次间距较小, 枝晶间的液相分数也较小. 这样, 枝晶间的液

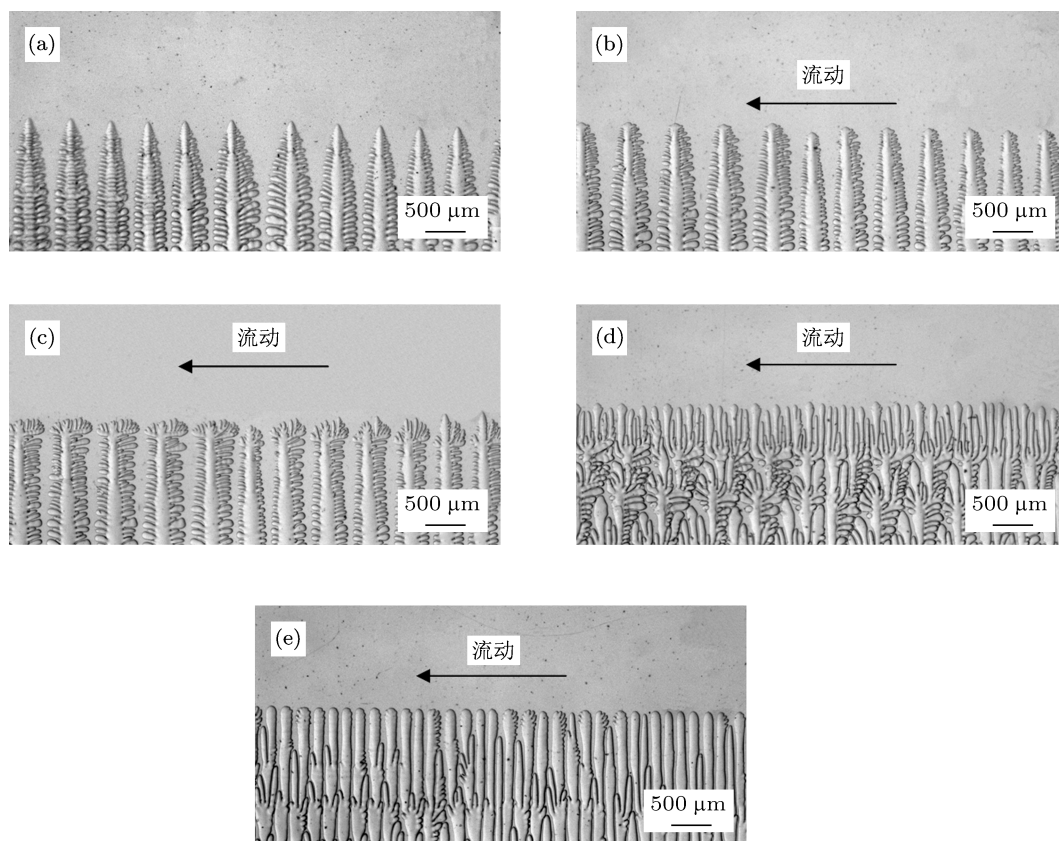


图 13 强制对流对低速枝晶演化的影响 $v = 1.18 \mu\text{m/s}$, $\bar{u} = 28.9 \mu\text{m/s}$ (a) 无强制对流枝晶组织; (b) 施加强制对流 80 s; (c) 施加强制对流 200 s; (d) 施加强制对流 1100 s; (e) 施加强制对流 2100 s

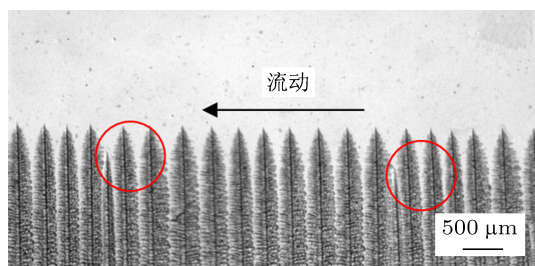


图 14 强制对流对高速枝晶演化的影响 $v = 26.61 \mu\text{m/s}$, $\bar{u} = 28.9 \mu\text{m/s}$

相对流相对较弱, 而且枝晶尖端前沿富集减弱, 枝晶尖端比较稳定. 并且由于枝晶间对流的作用较弱, 纵向的浓度梯度也较小, 三次臂的生长受到二次臂的抑制, 但是枝晶尖端前沿的液相对流会将枝晶迎流侧溶质带到背流侧, 使得其迎流侧二次臂生长速度加大, 进而抑制其上游枝晶主干的生长, 最终使得枝晶一次间距变大, 如图 14 所示. 刘山^[16]和王建元等^[22]考察流动对透明合金枝晶生长影响时, 发现液相对流使得枝晶一次间距增大, 这与本文在抽拉速度较大时所得结果一致, 相信这与其所采用的较大抽拉速度有关. Trivedi 等^[17]在研究 Al-Cu

合金定向凝固时发现流动使得枝晶一次间距减小并提高了胞枝转变临界速度, 随后 Spinelli 等^[18]研究 Al-Cu 合金定向凝固过程中枝晶间流动对枝晶一次间距的影响时, 发现枝晶间的流动会减小枝晶一次间距, 与本文在抽拉速度较小时所得结果一致.

4 结 论

本文采用透明合金 SCN-1.8wt% Ace, 研究了在温度梯度 $G_T = 6 \text{ K/mm}$ 下强制液相对流 (流速 $14.3\text{--}69.7 \mu\text{m/s}$) 对定向凝固过程中胞/枝晶间距的影响, 主要得出以下结论:

1. 在液相对流作用下, 胞晶尖端前沿的溶质场发生了变化, 造成胞晶尖端极易分岔且组织细化, 胞晶间距减小. 随着对流流速越大胞晶间距越小, 当流速加大到一定值时, 胞晶间距减小趋势减弱最终胞晶间距会趋于稳定.

2. 抽拉速度较低临近胞枝转变区时, 枝晶尖端前沿和枝晶间存在的液相对流使得枝晶尖端前沿以及枝晶尖端两侧的溶质场发生了变化, 使得枝晶尖端的生长速度减小并低于两侧三次臂的生长速

度, 最终枝晶一次间距减小, 在给定的流速范围内, 流速越大枝晶一次间距越小.

3. 抽拉速度较大时, 主要是枝晶尖端前沿液相对流改变了枝晶尖端前沿的溶质场使得枝晶二次

臂抑制上游枝晶生长枝晶一次间距增大, 并且在给定的流速范围内, 枝晶一次间距随着流速的增大而增大.

-
- [1] Kurz W, Fisher D J 1986 *Fundamentals of solidification* (3rd Edn.) (Switzerland: Trans Tech Publications Ltd) p23
 - [2] Billia B, Trivedi R 1993 *Handbook of crystal growth* (London: North-holland) p1007
 - [3] Eshelman M A, Seetharaman V, Trivedi R 1988 *Acta Metall.* **36** 1165
 - [4] Suk M J, Park Y M, Kim Y D 2007 *Scripta Mater.* **57** 985
 - [5] Kaya H, Cadirli E, Keslioglu K, Marasli N 2005 *J. Crstal. Growth* **276** 583
 - [6] Hansen G, Liu S, Lu S Z, Hellawell A 2002 *J. Cryst. Growth* **234** 731
 - [7] Laxmanan V 1998 *Scripta Mater.* **38** 1289
 - [8] Seetharaman V, Eshelman M A, Trivedi R 1988 *Acta Metall.* **30** 1175
 - [9] Gunduz M, Cadirli E 2002 *Mater. Sci. Eng. A* **327** 167
 - [10] Burden M H, Hunt J D 1974 *J. Cryst. Growth* **22** 99
 - [11] Hunt J D 1979 *Solidification and Casting of Metals* (London: Metals Society) p35
 - [12] Kurz W, Fisher D J 1981 *Acta Metall.* **29** 11
 - [13] Trivedi R 1984 *Metall. Trans. A* **15** 977
 - [14] Hunt J D, Lu S Z 1996 *Metall. Mater. Trans. A* **27** 611
 - [15] Lin X, Li Y M, Liu Z X, Li T, Huang W D 2001 *Sci. Techn. Adv. Mater.* **2** 293
 - [16] Liu S, Lu D Y, Huang T, Zhou Y H 1993 *Acta Metall Sin.* **29** 147 (in Chinese) [刘山, 鲁德洋, 黄韬, 周尧和 1993 金属学报 **29** 147]
 - [17] Trivedi R, Mazumder P, Tewari S N 2002 *J. Cryst. Growth* **222** 365
 - [18] Spinelli J E, Rosa D M, Ferreira I L 2004 *Mater. Sci. Eng. A* **383** 271
 - [19] Sun D K, Zhu M F, Yang C R, Pan S Y, Dai T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** S285 (in Chinese) [孙东科, 朱明芳, 杨朝蓉, 潘诗琰, 戴挺 2009 物理学报 **58** S285]
 - [20] Shi Y F, Xu Q Y, Liu B C 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 126101 (in Chinese) [石玉峰, 许庆彦, 柳百成 2011 物理学报 **60** 126101]
 - [21] Wang J Y, Zhai W, Jin K X, Chen C L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098106 (in Chinese) [王建元, 翟薇, 金克新, 陈长乐 2011 物理学报 **60** 098106]
 - [22] Wang J Y, Chen C L, Zhai W, Jin K X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6554 (in Chinese) [王建元, 陈长乐, 翟薇, 金克新 2009 物理学报 **58** 6554]

Influence of liquid flow on cellular and dendritic spacings*

Wang Xian-Bin Lin Xin[†]

Wang Li-Lin Yu Hong-Lei Wang Meng Huang Wei-Dong

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 25 September 2012; revised manuscript received 16 November 2012)

Abstract

The cellular and dendritic formations are two kinds of typical morphology in the solidification, and there are many theoretical models and experimental researches on them. Most models and researches are based on purely diffusive transport mechanism. However, convection effects are of importance in the evolution of cellular and dendritic growth. Since the metal materials are not transparency and the researches on microstructure only after quenching, it is difficult to observe the dynamic microstructure evolution in real time. In this paper, the effect of liquid flow on the cellular and dendritic growth was investigated by the in-situ observation of SCN-1.8 wt% Ace transparent alloy during the directional solidification under the liquid flow. The cellular tip splitting is found in the presence of liquid flow and the cellular microstructure is smaller after the cellular tip splitting. The cellular spacing decreases as the flow rate becomes larger, but the spacing will become steady ultimately. At high growth rate the dendritic spacing increases with the increase of the flow rate, because the upstream side branches, which are accelerated by liquid flow, will suppress adjacent branches. But, at low growth rate the dendritic spacing decreases with the increase of the flow rate, because the lateral branches will exceed the tip of dendrite to form new dendrite by liquid flow.

Keywords: directional solidification, cellular spacing, dendrite spacing, liquid flow

PACS: 81.30.Fb, 81.10.Aj, 44.27.+g

DOI: 10.7498/aps.62.078102

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011CB610402), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50971102, 50901061).

[†] Corresponding author. E-mail: