

切向流动作用下的胞晶定向生长机理研究*

王建元[†] 翟薇 金克新 陈长乐

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

(2010年11月18日收到; 2010年12月1日收到修改稿)

实时观测了切向流动作用下 SCN-0.2% Salol 透明合金的定向胞晶生长过程, 研究了切向流动作用对胞晶间距调整的作用机理. 实验发现, 切向流动使得胞晶阵列发生顺流偏转, 并且稳态平均间距随流速的增高而减小. 分析表明, 这主要是由于流动作用导致胞端失稳波长减小而引起. 施加切向流动使得胞晶间距的调整过程中的分裂机理多样化. 顶端分裂由均匀分岔转变为多枝分岔和不对称分岔; 同时, 胞晶迎流侧容易产生分枝, 且分枝生长方向在流动作用下转变为与胞晶主干方向相同. 胞晶的淘汰机理由静态条件下的弱势生长胞晶被相邻两侧胞晶淘汰转变为切向流动作用下的上游生长占优势胞晶淘汰下游弱势胞晶.

关键词: 切向流动, 定向胞晶生长, 间距调整

PACS: 81.10.Fq, 81.30.Fb

1. 引言

胞晶是合金凝固过程中最常见的单相生长微观组织形态之一. 在过去的几十年里, 胞晶生长的实验和理论研究引起了众多研究者的广泛关注^[1-6]. 早期的研究主要致力于描述单个胞晶生长时的尖端半径随温度梯度和抽拉速度的变化规律, 比较成功的理论模型有 Invanstov 模型^[7]、最小过冷度理论^[8]和临界稳定性理论^[9]. 然而, 在合金的凝固过程中, 胞晶通常是以集合阵列的形式生长的, 阵列中的各个胞晶能够在生长过程中相互影响而发生胞晶淘汰或分裂的现象. 这使得后期的研究者更多关注于胞晶生长阵列过程中的集合行为, 其成熟的理论模型有 Hunt 模型^[10], Kurz-Fisher 模型^[11]和 Trivedi 模型^[12]. 但是, 上述模型均没有考虑到熔体中的对流对胞晶生长界面可能存在的影响. 实际上, 合金熔体中的对流是不可避免的存在, 它可能改变生长界面前沿的溶质场和温度场, 对柱状晶各微观尺度特征选择起到重要的作用. 如刘山^[13]和毛应俊^[14]等人均发现胞晶阵列在液相对流作用下均发生顺流偏转, Zhang 等^[15]发现柱状晶在流动下趋向来流方向偏转. 但是, 到目前为止, 对于流动作

用下的胞晶阵列生长特征尚缺乏深入系统的实验和理论研究. 本文采用 SCN-0.2% Salol 透明模型合金为研究对象, 对切向流动下该合金定向胞晶生长过程中的非稳态间距调整过程及稳态生长特征进行了实时观测, 并基于实验结果揭示了切向流动作用下的胞晶间距调整机理.

2. 实验方法

实验在自行设计的实验系统内进行, 系统结构如图 1 所示. 该系统由定向凝固装置、液相流动发生装置及观测录像装置三部分组成. 样品室为水平放置的光学石英玻璃盒, 其长度为 80.0 mm, 宽度 24.0 mm, 厚度为 0.5 mm. 由于样品室垂直方向上的厚度很小, 所以样品近似为二维生长. 样品抽拉速度的变化通过变频器控制交流同步电机实现. 利用精度为 0.01 K 的 MC300 型 PID 温度控制仪对平台热端进行控制, 而冷端温度则利用冰水混合物使温度保持在 273 K. 液相流动由外部旋转磁场驱动样品液相中的叶片实现, 流速则由固液界面处示踪粒子的迁移速度测定.

实验选取 SCN-0.2 wt% Salol 合金样品为研究对象, 样品由高纯 SCN (99.99%) 和高纯 Salol

* 国家自然科学基金 (批准号: 50702046, 61078057) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号 NPU-FFR-JC200821, 201048, 2008KJ02031) 资助的课题.

[†] E-mail: wangjy@nwpu.edu.cn

(99.99%) 熔配而成. 实验过程中, 通过控制热端温度来精确调整界面处的宏观温度梯度, 保证施加流动前后界面附近的温度梯度与静态作用下相同, 均为 $G = 3.2 \text{ K/mm}$. 抽拉速度 V 范围为 $1.0\text{--}6.0 \mu\text{m/s}$, 流速 U 范围为 $0\text{--}11.3 \text{ mm/s}$, 以保证在实验过程中该合金凝固界面始终以胞晶形态生长. 整个实验过程由具有录像功能的 OLYMPUS-CKX41 型相衬显微镜对固液界面中央的切向流动区域进行实时观察与记录.

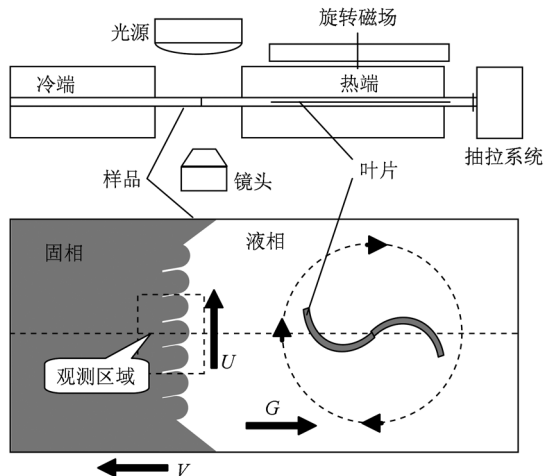


图1 实验装置示意图

3. 结果与分析

3.1. 非稳态——稳态生长过程

实验对不同流速和抽拉速度下的 SCN-0.2% Salol 合金的定向胞晶生长过程进行了系统研究. 无论是在静态还是在切向流动条件下, 当定速生长开始后, 固液界面都是首先从平界面开始, 直至失稳而逐渐演化成稳定的胞状晶阵列, 如图 2 中插图所示. 初始的胞晶阵列形成后, 会经历一个非稳态的间距调整过程. 对于胞晶间距过大的局部区域, 通过胞晶分裂增加晶粒数目而使胞晶间距减小; 而对于间距较小的区域, 胞晶之间会发生淘汰生长, 使得该处间距趋于增大, 最终界面形成具有稳定间距的胞晶阵列. 在施加切向流动和无流动(静态)条件下, 界面均经历了一个从非稳态到稳态生长的调整转变过程. 对不同条件下从界面开始失稳到稳态胞晶阵列形成的演化时间 t 进行了统计, 结果如图 2 所示. 可以看出, 静态以及流动条件下, 演化时间均

随着抽拉速度的增大而减小. 抽拉速度 V 较小时, 切向流动作用显著缩短演化时间, 由静态下的 420 s 缩短到 200 s 左右. 较高抽拉速度下, 由于静态下的演化速度已经很快, 切向流动仅使演化时间小幅度减小. 总体说来, 切向流动能够加速胞晶间距的选择过程, 提高胞晶间距的调整效率.

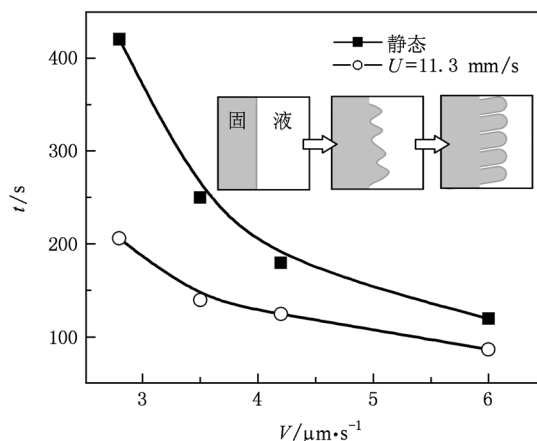


图2 不同生长条件下界面从失稳到演化为稳态胞晶阵列所需时间

3.2. 稳态胞晶间距的变化

图 3(a) 和 (b) 所示的是静态和流速 $U = 9.6 \text{ mm/s}$ 时在相同抽拉速度 ($V = 6.0 \mu\text{m/s}$) 下稳态胞晶阵列的生长形态. 对比看出, 切向流动条件下, 胞晶生长发生明显顺流偏, 并且流动下的胞晶间距相对静态下有所减小. 图 3(c) 统计了不同流速和抽拉速度下的 SCN-0.2% Salol 样品的胞晶间距, 每种条件下的间距均为中央相邻多个胞的平均值. 无论

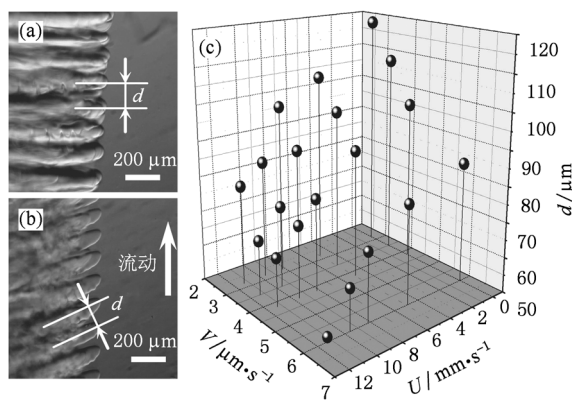


图3 胞晶阵列生长特征 (a) $V = 6.0 \mu\text{m/s}$, 静态; (b) $V = 6.0 \mu\text{m/s}$, $U = 9.6 \text{ mm/s}$; (c) 不同流速和抽拉速度下的稳态胞晶间距 d

是在静态条件还是切向流动作用下,胞晶间距均随着抽拉速度的增加而减小;而在同一抽拉速度下,随着流速的提高,胞晶间距呈逐渐减小趋势.由此可见,切向流动不仅能够加速胞晶间距的调整过程,还能够减小稳态胞晶间距.

3.3. 切向流动作用下的胞晶分裂机理

切向流动下胞晶间距的减小归因于流动对于胞晶阵列非稳态调整过程中的作用.实验中实时观察了有无切向流动作用下的胞晶间距调整过程.静态条件下,胞晶局域间距过大时,通过顶端分裂减小间距.具体表现为胞晶尖端发生凹陷和分岔,演化成两个子胞晶.初始的分岔状态具有随机性,而经过一定的演化时间后,两个子胞晶具有平均的长势,最终该处的胞晶间距减小.对切向流动作用下的胞晶间距调整过程进行实时观测表明,当局域胞晶间距过大时,胞晶间距的调整存在更加复杂地分岔机理.

3.3.1. 胞晶尖端的多枝分裂和不对称分裂

实验发现,在较低流速下,胞晶尖端分裂的显著特征是出现了多枝分裂.图4(a)和(b)给出了 $U = 8.2 \mu\text{m/s}$ 时胞晶通过尖端分裂调整间距的过程.从图中可以看出,该胞晶分裂过程具有如下特征:大部分胞晶晶粒一次分裂成三个长势几乎均等的子胞,只有少数胞晶晶粒分裂为两个子胞.随着时间的推移,它们逐渐演化成尖端狭窄的瘦长胞晶阵列,胞晶间距减小.总结发现,胞晶尖端的多支分裂不同于静态条件下的双支分裂,是流速 $U \leq 8.2$

mm/s 时胞晶分裂的共性特征.

在更高的流速下,胞晶尖端分裂形势出现了新的特征.图4(c)和(d)是较高流速 ($U = 11.3 \text{ mm/s}$) 时胞晶间距的调整过程.可以看出,初始阵列中的每个胞晶均再次分裂成两个子胞晶.但是,分裂成的子胞晶生长表现出严重的不对称性,迎流侧的子胞长势明显弱于背流侧,其尖端宽度仅有背流侧的1/2.随着时间的推移,新的子胞晶阵列中胞端半径呈现出由大到小的周期性变化趋势,分裂后的胞晶间距比原先显著减小.

胞端的分裂也是一个“失稳”过程,分裂出的子胞个数与对应生长条件下胞晶尖端失稳波长密切相关.统计了 $V = 4.2 \mu\text{m/s}$ 时不同流速下的界面失稳的平均波长 λ_s ,如图5所示.切向流动条件下,失稳波长远小于静态条件下,并且随着流速的增长不断下降.由此可见,切向流动作用能够减小胞晶尖端失稳的扰动波长.失稳波长的减小是引发胞晶尖端的多枝分裂的最根本原因.在较高的流速下,出现不对称分裂的主要原因,是强流动下,邻胞之间的相互作用造成的.由于胞晶排列紧密,上游胞晶释放的结晶潜热以及排出的溶质对下游胞晶的迎流侧的生长起到了抑制作用.这就使得迎流侧的分枝较小,而背流侧的长势较强.

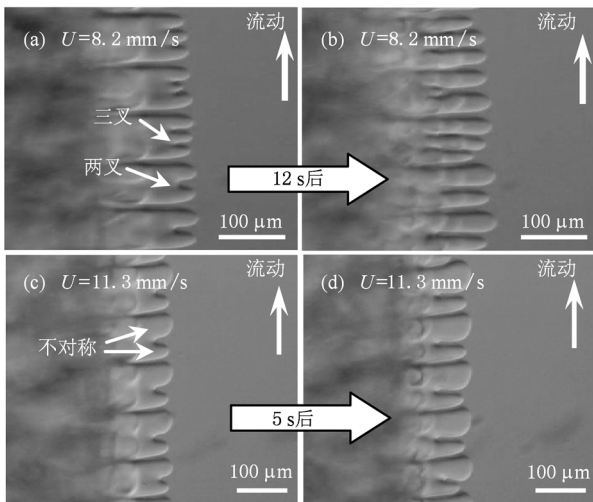


图4 胞晶分裂过程 (a),(b) $U = 8.2 \text{ mm/s}$, $V = 4.2 \mu\text{m/s}$; (c),(d) $U = 11.3 \text{ mm/s}$, $V = 3.5 \mu\text{m/s}$

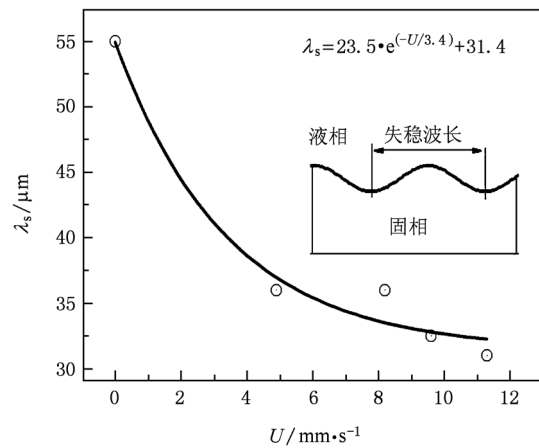


图5 $V = 4.2 \mu\text{m/s}$ 时不同流速下的平均失稳波长

3.3.2. 迎流侧二次分枝的扭转生长

除了以上所述的多样化的顶端分岔机理,切向流动还能够通过另外一种机理缩小胞晶间距.如图6所示,在切向流动作用下,流动能够使生长占优势的胞晶迎流侧面失稳,形成一些侧向凸起或分枝.随着相邻胞晶的生长,这些侧向凸起受到生长空间的限制而不可能再横向生长.另一方面,胞晶生长

是主要受热扩散控制的过程,而此时在平行于主轴即热梯度的方向上还有剩余的生长空间,所以,胞晶侧向分枝生长方向发生转变,由原来的垂直于一次主轴的方向转变为趋于平行于主轴的方向. 扭转之后的侧枝生长逐渐与周围的晶粒平齐而成为新的胞晶晶粒,胞晶间距也随之减小. 在不同切向流速的实验中均出现了这一现象. 需要指出的是,侧向分枝的出现依赖于生长过程中的相邻胞晶的随机差异,只有在上游胞晶生长优势相对相邻下游胞晶更为突出的情况,才有可能产生侧向分枝. 所以,二次分枝转向机理相对于顶端多枝和不对称分裂,出现的机会相对较少.

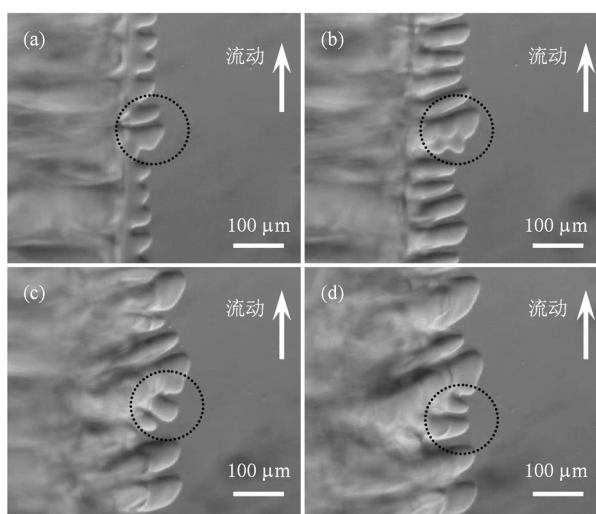


图6 在 $U = 4.9 \text{ mm/s}$, $V = 6.0 \text{ } \mu\text{m/s}$ 时的迎流侧失稳过程 (a) $t = 0 \text{ s}$; (b) $t = 14 \text{ s}$; (c) $t = 38 \text{ s}$; (d) $t = 57 \text{ s}$

由上述分析可知,切向流动作用下,胞晶分裂机理发生如下变化:1)胞晶由均匀分岔转变为多支分岔和不对称分岔;2)胞晶迎流侧发生分枝,并且分枝生长方向转变为与原胞晶生长方向相同.

3.4. 胞晶淘汰机理

静态条件下,当局部胞晶间距过小时,胞晶阵列内部将会产生竞争生长,其结果是部分弱势胞晶被淘汰,从而胞晶间距变大. 如图7(a)和(b)所示,静态条件下,生长处于弱势的胞晶A受到两侧生长占优势的胞晶B和C的排挤,导致胞晶A的生长空间逐渐被B和C同时占据,最终胞晶A消失,胞晶局域的间距增大.

施加切向流动后,胞晶的淘汰过程发生了变

化,如图7(c)和(d)所示. 首先,胞晶阵列中的各个胞晶均发生了不同程度的顺流偏转. 长势强的胞晶受到流动更强的作用,端部生长空间充裕,所以发生的偏转较大,而弱势胞晶偏转程度较小. 当相邻两胞晶的生长差异较大时,弱势胞晶的生长空间被上游已经发生偏转的晶粒所占据,以致于其不能继续生长而最终被淘汰. 由此可见,流动作用下的胞晶淘汰过程,主要是受到上游优势胞晶的排挤,而不是受到两侧晶粒的同时排挤.

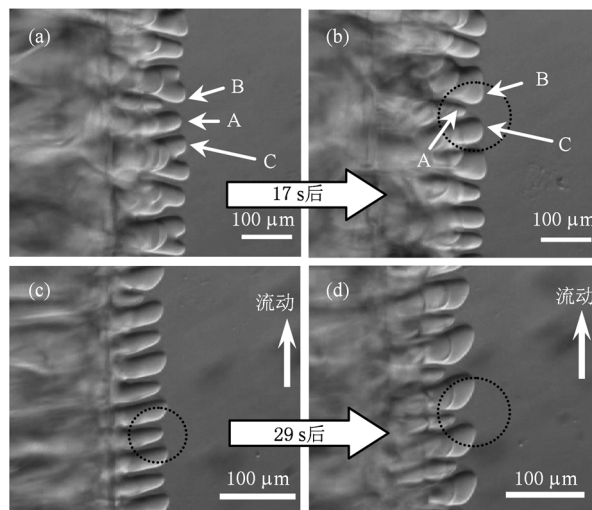


图7 $V = 4.2 \text{ } \mu\text{m/s}$ 时的胞晶淘汰过程 (a),(b)静态条件下; (c),(d)流速 $U = 4.9 \text{ mm/s}$

4. 结 论

本文研究了切向流动作用下 SCN-0.2% Salol 合金的胞晶间距调整机理,主要得到以下结论:

1. 切向流动作用能够加速稳态胞晶阵列形成之前的非稳态间距调整过程,并且稳态平均间距随流速的增高而减小. 这主要是由于流动能够导致胞端失稳波长的减小而引起的.
2. 切向流动使得间距调整过程中的胞晶分裂机理呈现多样化:主要表现为:1)胞晶尖端分裂由均匀双枝分岔转变为多枝分岔和不对称分岔;2)使胞晶迎流侧容易产生分枝,且分枝生长方向在流动作用下转变为与胞晶主干生长方向相同.
3. 胞晶的淘汰机制由静态条件下的弱势生长胞晶被相邻两侧胞晶淘汰转变为切向流动作用下的上游生长占优势胞晶淘汰下游弱势胞晶.

- [1] Verhoven J 1971 *Metall. Trans.* **2** 2673
- [2] Billia B, Jamgotchian H, Trivedi R 1990 *J. Crystal Growth* **106** 410
- [3] Georgelin M, Pocheau A 2004 *J. Crystal Growth* **268** 272
- [4] Zhai W, Wang N, Wei B B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2353 (in Chinese) [翟薇、王楠、魏炳波 2007 物理学报 **56** 2353]
- [5] Xing H, Wang J Y, Chen C L, Jin K X, Shen Z F 2010 *Scripta Materialia* **63** 1228
- [6] 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]
- [7] Ivantsov G P 1947 *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **558** 567
- [8] Trivedi R 1970 *Acta Metall.* **18** 287
- [9] Mullins W W, Sekerka R F 1964 *J. App. Phys.* **35** 444
- [10] Hunt J D 1979 *Solidification and Casting of Metals, The Metals Society*, London, p3
- [11] Kurz W, Fisher D 1981 *Acta Metall.* **29** 11
- [12] Trivedi R 1984 *Metall. Trans.* **15** A 977
- [13] Liu S, Lu D Y, Huang T, Zhou Y H 1993 *Acta Metallurgica Sinica* **29** A 148 (in Chinese) [刘山、鲁德洋、黄韬、周尧和 1993 金属学报 **29** A 148]
- [14] Mao Y J, Liu J, Zhou Y H 1997 *Journal of Synthetic Crystals* **26** 47 (in Chinese) [毛应俊、刘建、周尧和 1997 人工晶体学报 **26** 47]
- [15] Zhang M, Maxworth T 2002 *J. Fluid. Mesh.* **470** 247

The mechanism of directional cellular growth with shear flow*

Wang Jian-Yuan[†] Zhai Wei Jin Ke-Xin Chen Chang-Le

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 18 November 2010; revised manuscript received 1 December 2010)

Abstract

The directional cellular growth of SCN-0.2% Salol transparent alloy in the presence of shear flow at the liquid-solid interface is in-situ observed, and the cellular spacing adjusting mechanism is carefully investigated. It is found that the cellular array deflects forward the incoming flow direction, and the stable cellular spacing decreases with the increase of the flow rate. This is due mainly to the reducing destabilization wavelength caused by shear flow. Instead of the double symmetric splitting mode under static condition, the splitting mechanism of cellular growth exhibits multiplicity, which is characterized mainly by (i) multi-splitting and asymmetric splitting, and (ii) secondary branches appearing on the upstream side whose growth direction subsequently shifts to ward the direction paralleled to the trunk to form new cells. Meanwhile, the selected mechanism transits from the weak cells eliminated by the relatively strong ones on both sides during static solidification to the growth of weak cells on the downstream side suppressed by the stronger cells at the upstream side when shear flow is applied.

Keywords: shear flow, directional cellular growth, spacing adjustment

PACS: 81.10.Fq, 81.30.Fb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50702046 and 61078057), and the of NPU Foundation for Fundamental Research (Grant Nos. NPU-FFR-JC200821, 201048 and 2008KJ02031).

[†] E-mail: wangjy@nwpu.edu.cn