

# 薄板试样定向凝固枝晶竞争生长

杨泽南<sup>1</sup>, 张 朕<sup>2</sup>, 郭春文<sup>3</sup>, 潘 昊<sup>4</sup>, 王 祯<sup>1</sup>, 张 强<sup>1</sup>, 黄朝晖<sup>1</sup>, 王志军<sup>4</sup>

(1. 中国航发 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

(2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(3. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450002)

(4. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 深入理解高温合金定向凝固杂晶演化具有重要的科学和工程意义, 其中枝晶竞争生长是揭示晶界演化与淘汰的关键环节。定向凝固双晶竞争生长的实验研究证实了传统尖端过冷度理论的局限性, 定量相场模拟的研究获得了大量统计规律, 促进了人们对定向凝固双晶竞争生长的理解。本研究在薄板状试样的定向凝固过程中, 同时获得了大量的不同取向竞争生长的枝晶, 通过拼接金相显微组织同时获得多个晶界的取向演化规律。结果表明, 枝晶列竞争生长主要通过晶界两侧不同取向一次枝晶臂及二次枝晶臂的交互作用实现。在汇聚生长过程中, 择优枝晶一次臂阻挡非择优枝晶, 并且择优枝晶自身无法形成三次臂, 导致晶界方向沿择优枝晶生长方向。发散生长过程中, 处于温度梯度方向一侧时, 两列枝晶的竞争生长方式以非择优枝晶新生三次臂为主, 晶界以沿择优枝晶方向生长为主; 当两列枝晶处于温度梯度不同侧时, 两列枝晶均有三次臂新生的概率, 其晶界在两列枝晶取向之间。实验统计结果给出了晶界随两列竞争生长枝晶的取向的变化规律, 与定量相场模拟结果吻合。商业软件 ProCAST 的 CAFE 计算晶粒定向竞争生长晶界演化统计结果与实验结果存在较大偏差, 其主要原因是 CAFE 仅给出晶粒尺度的轮廓信息, 未考虑溶质扩散及二次臂的竞争。本研究获得的薄板状试样枝晶竞争生长的统计规律, 对认识高温合金定向凝固过程中晶界取向的演化具有重要的意义, 对柱状晶叶片的制备具有指导意义。

**关键词:** 定向凝固; 竞争生长; 晶界取向

**中图法分类号:** TG21; TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2021)04-1247-07

高性能涡轮叶片及导向叶片在提升发动机效率方面起着举足轻重的作用。定向凝固是制备高性能涡轮叶片的唯一手段。高温合金的定向凝固在各国学者几十年的不懈努力下, 取得了一系列重要的突破。其中, 选晶过程及枝晶列的一次间距选择规律已经得到了深入透彻的认识<sup>[1-6]</sup>, 成功用于指导单晶涡轮叶片的生产工艺。然而单晶制备过程中, 仍然存在重要的挑战, 例如单晶叶片的缺陷严重制约了叶片的成品率, 其中杂晶是主要的缺陷之一<sup>[7-9]</sup>。杂晶的产生将在叶片的定向凝固过程中形成柱状枝晶列竞争生长。定向凝固枝晶列的竞争生长对认识单晶涡轮叶片的杂晶缺陷形貌及演化过程具有重要的意义<sup>[10]</sup>。单晶制备过程选晶阶段的竞争淘汰生长也决定了后续叶片的成形质量。

定向凝固过程中不同取向枝晶的竞争生长很早就引起了人们的关注, 但相关理论问题仍然未彻底阐明。

1959 年, Walton 和 Chalmers 提出的尖端过冷度诱导的阻挡模型<sup>[11]</sup>一度被人们接受, 并应用于商业铸造软件 ProCAST 的 CAFE 模块。然而, 随着定量实验研究的进展, 人们逐渐发现尖端过冷度诱导的阻挡模型无法与实验完全吻合<sup>[12-15]</sup>, 尖端过冷度机制受到了挑战。为了深入解释枝晶竞争生长的内在机制, 不同团队相继开展了定量模拟研究<sup>[16-25]</sup>, 揭示了枝晶列晶界间的溶质相互作用以及晶界二次臂、三次臂的生长对枝晶列竞争生长的影响机制。随着对定向凝固枝晶竞争生长的理论认识不断深入, 人们希望能够找到与工艺相关的参量将理论与生产结合起来。晶界取向选择成为重要的候选对象, 其不仅决定枝晶的淘汰速率, 也影响叶片的最终性能。因此, 预测晶界取向选择与枝晶竞争生长的定量关系成为目前枝晶生长研究的关键问题。

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 中国航发产学研合作项目 (HFZL2018CX022); 航材院益材基金项目 (KJ53200134)

作者简介: 杨泽南, 男, 1990 年生, 博士, 中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095, E-mail: mcbyby1234567@sina.com

由于二次臂、三次臂生长的随机性，晶界取向在不同的实验过程中也具有一定的随机性。由于实验研究的挑战性，晶界取向的规律相当长的一段时间内未能得到揭示。人们通过定量相场大量模拟计算获得了晶界取向选择的统计规律，并总结了相应的经验公式<sup>[19,20]</sup>。目前枝晶竞争生长的实验研究主要通过籽晶法获得不同取向的双晶竞争生长，从而研究晶界的演化<sup>[13,14]</sup>。对于给定枝晶取向的双晶竞争生长，晶界选择的随机性也使得实验结果存在一定分散度。因此，采用传统的实验方式对定向凝固双晶竞争生长晶界取向的实验验证工作量巨大。本实验在准二维薄板状试样中激冷触发大量随机取向的晶粒。在经历初期的淘汰过程后，形成大量双晶晶界，最终获得了薄板状试样晶粒竞争生长及晶界选择的统计性规律，实验研究结果与相场模拟一致。商业软件的 CAFE 模块获得的晶粒竞争生长与实验结果存在一定偏差。

### 1 实验

实验选用 Ni<sub>3</sub>Al 基 IC10 高温合金。模组采用直径为 200 mm 的底盘，在其边缘均匀分布 8 个长 40 mm，高 100 mm，厚 2 mm 的板状试样，实验在高温梯度定向凝固炉内完成，抽拉过程中采用圆形封严挡板，可获得约 40 °C/cm 的高温梯度。定向凝固过程中控制炉内加热器温度为 1500 °C，抽拉速率为 5 mm/min，炉内真空压强不大于 1 Pa。将切除浇道的板状试样置于 FeCl<sub>3</sub>-HCl 腐蚀液中浸泡 1~2 min，可获得清晰的板状试样表面宏观晶粒形态。其后按标准金相制样流程操作，采用 LEICA-DM4M 型金相显微镜观察其微观枝晶形态与相邻晶粒竞争生长关系，并采用图像拼接功能与其宏观晶粒形态相对应。元胞自动机晶粒竞争模拟采用商业铸造软件 ProCAST 的 CAFE 模块，相关参数参考实验参数设置。

### 2 结果与讨论

图 1a 为薄板试样定向凝固后侧面的宏观形貌，试样宽度为 4 cm，厚度为 0.5 cm。可以看到多个晶粒在凝固初始阶段产生。在之后的定向凝固过程中，一部分晶粒很快地被其它晶粒淘汰而停止生长。采用 CAFE 对试板进行晶粒竞争生长模拟，结果如图 1b 所示，其结果在形貌上与实验结果一致。图 1c 显示 CAFE 模拟不同高度的横截面图。从图中可以看出，晶粒在初期被大量淘汰，后期仅存在几个晶粒。从横截面上也可以看出，晶粒淘汰在三维方向上发生，侧面的晶粒可以反映一定的淘汰信息，其晶粒个数与横截面内晶粒个数处于同一量级。因此，薄试样定向凝固的侧面枝晶竞争生长可以反映整体的晶粒淘汰情形。

图 2 进一步给出了试样上部区域枝晶列竞争生长顶部横截面以及侧面的金相微观组织演化图。从图 2a 中顶部横截面可以看出，即使在薄板试样中，枝晶竞争仍然以三维方式存在。从对称的十字状枝晶横截面可以看出，枝晶的<100>方向与热流方向较为接近。图 2b 中侧面信息显示具有相同颜色和生长方向的枝晶构成一个晶粒，可以看出明显的枝晶列生长方向与晶界方向。从侧面可以清晰地看到柱状晶的生长方向。结果表明，不同的柱状晶取向存在差别，相邻的两个晶粒之间形成明显的晶界（GB），晶界取向则反映了晶粒的淘汰倾向以及淘汰的快慢程度。在薄板试样中，枝晶尖端<100>方向与热流方向存在一定角度，该角度在薄板试样侧面的投影即为图 2b 中枝晶竞争生长的形态。

由于三维竞争生长分析非常复杂，考虑到图 2a 显示枝晶生长与热流方向偏差相对较小，因此，针对枝晶竞争生长在二维薄板侧面的投影对枝晶的竞争生长及晶界进行准二维的分析。在定向凝固过程中，由

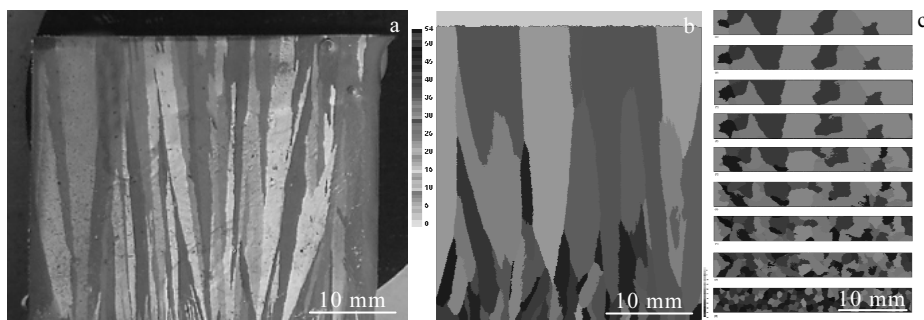


图 1 薄板试样定向凝固晶粒竞争生长的实验侧面, CAFE 侧面, CAFE 不同高度横截面

Fig.1 Macro images of dendritic grain competitive growth: (a) vertical section from experiment, (b) vertical section from CAFE simulation, and (c) cross sections at different heights in CAFE simulation

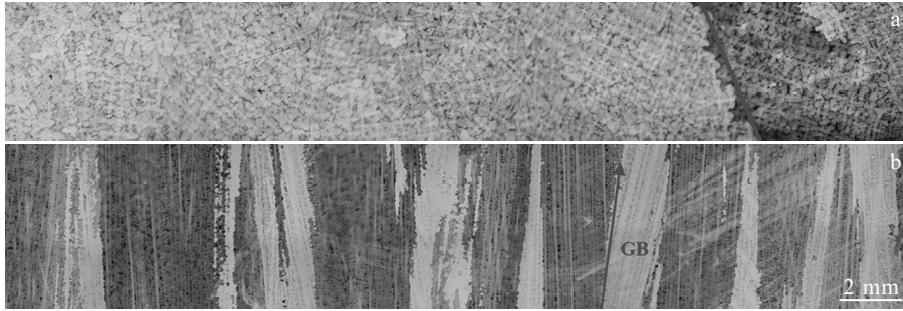


图 2 薄板试样中顶端区域枝晶列竞争生长的横截面和纵截面的微观组织拼接图

Fig.2 Microstructures of dendritic grain competition growth within a stitching picture in the top region:

(a) cross section of the dendrite areas and (b) vertical section of the dendrite areas

于相邻两晶粒具有不同的生长取向，二者之间发生了竞争生长关系，示意图如图 3 所示。双晶之间的竞争生长关系主要可以分为发散生长和汇聚生长。而发散或者汇聚双晶在横向的偏转方向可能相同，即  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} > 0$ ；双晶的横向偏转方向也可能不相同，即  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} \leq 0$ 。在发散晶界处，晶粒可以通过分枝行为产生新的一次枝晶来占据晶界空间；在汇聚晶界处，竞争生长则由一次枝晶生长被阻挡的方式来完成。晶界处枝晶的竞争生长行为决定了晶界取向，而晶界取向可以直接用来表征晶粒的淘汰倾向。

定向凝固过程中枝晶列的竞争生长随枝晶的晶体取向有不同的形式。图 3 给出了所有的竞争生长方式，

主要分为汇聚生长和发散生长。定义竞争生长的两列枝晶中  $\langle 001 \rangle$  取向与热流方向最为接近的为择优枝晶，另一个为非择优枝晶。其中  $\theta_{FO}$  为择优枝晶与热流方向的夹角， $\theta_{UO}$  为非择优枝晶与热流方向的夹角，枝晶  $\langle 001 \rangle$  方向与热流方向一致时， $\theta_{FO} = 0$ ；枝晶向右偏，夹角为正值；枝晶向左偏，夹角为负值。汇聚生长中两列枝晶相向生长，分为择优枝晶沿着热流方向， $\theta_{FO} \times \theta_{UO} > 0$  和  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} < 0$  3 种情况；发散生长同样有类似的 3 种情况。两列枝晶相邻时的晶界生长方向与枝晶的择优方向之间的关系是重点关注的对象。

为了获得晶粒竞争过程的统计规律，统计了 4 次实验所得样品中的晶粒取向在侧面的投影及对应的晶

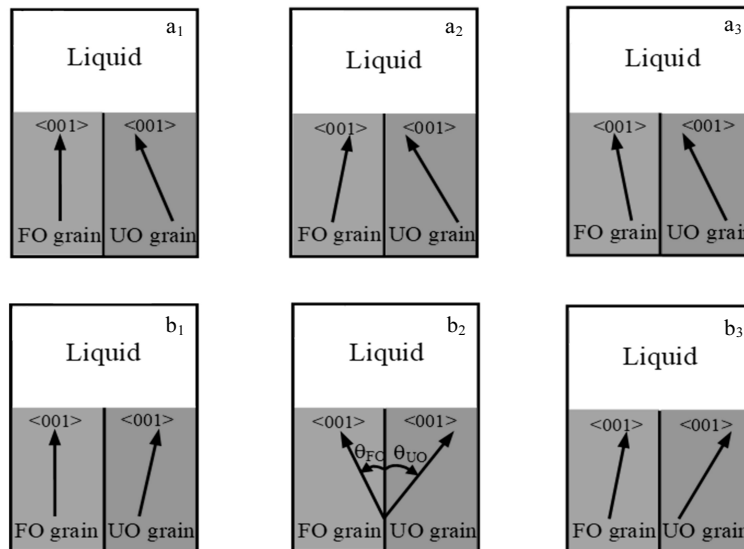


图 3 定向凝固双晶竞争生长晶粒晶体取向与竞争方式对应关系的示意图

Fig.3 Schematic of bicrystal competition growth and the notations of preferred and non-preferred crystalline orientation: (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>) converging

growth, (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>) divergent growth; (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>)  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} = 0$ , (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>)  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} < 0$ , (a<sub>3</sub>, b<sub>3</sub>)  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} > 0$

界取向在侧面的投影。前人实验<sup>[15]</sup>及模拟<sup>[19,20]</sup>研究中， $\theta_{FO} \times \theta_{UO} > 0$  与  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} \leq 0$  2 种不同条件下的发散双晶竞争生长结果遵循明显不同的淘汰规律，而这 2 种不同条件下的汇聚双晶竞争生长则没有明显的差异。因此，将汇聚双晶晶界， $\theta_{FO} \times \theta_{UO} > 0$  条件下的发散双晶晶界和  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} \leq 0$  条件下的发散双晶晶界分别描述，如图 4 所示。其中，左侧为典型的双晶竞争生长组织图，右侧为其所对应的晶界取向选择定量统计结果。由于实验结果中不同择优晶粒的枝晶生长方向基本上都不相同，而不同非择优晶粒的枝晶生长方向也都不相同，因此基于择优枝晶和非择优枝晶的倾斜程度差异  $|\theta_{UO}| - |\theta_{FO}|$  来衡量晶界的取向选择。而晶界取向可以用  $\theta_{GB} - \theta_{FO}$  来表征， $\theta_{GB} - \theta_{FO}$  为晶界偏离择优枝晶生长方向的角度，正值代表择优晶粒淘汰非择优晶

粒，负值代表非择优晶粒淘汰择优晶粒。对于  $\theta_{FO} \times \theta_{UO} \leq 0$  条件下的发散双晶晶界可以用  $|\theta_{GB} - \theta_{FO}| / |\theta_{UO} - \theta_{FO}|$  衡量晶界取向选择以及择优晶粒的竞争能力<sup>[20]</sup>，其代表择优晶粒占据双晶之间液相晶界空间的能力。

从图 4a 中的金相组织可以看出，汇聚生长过程中的晶界区域，择优枝晶 FO 生长过程中没有出现新的三次臂，非择优枝晶 UO 的一次臂在碰到择优枝晶的一次臂后被阻挡，停止生长。因此该竞争模式下，不同取向枝晶列间竞争生长主要以择优枝晶一次臂阻挡非择优枝晶一次臂实现，晶界将沿着择优枝晶主干方向形成。图 4a<sub>1</sub> 中统计了实验的结果并与前人实验和模拟结果做了比较。对于所有双晶角度差的汇聚竞争生长， $\theta_{GB} - \theta_{FO}$  数值基本都在 0 附近，统计结果与前

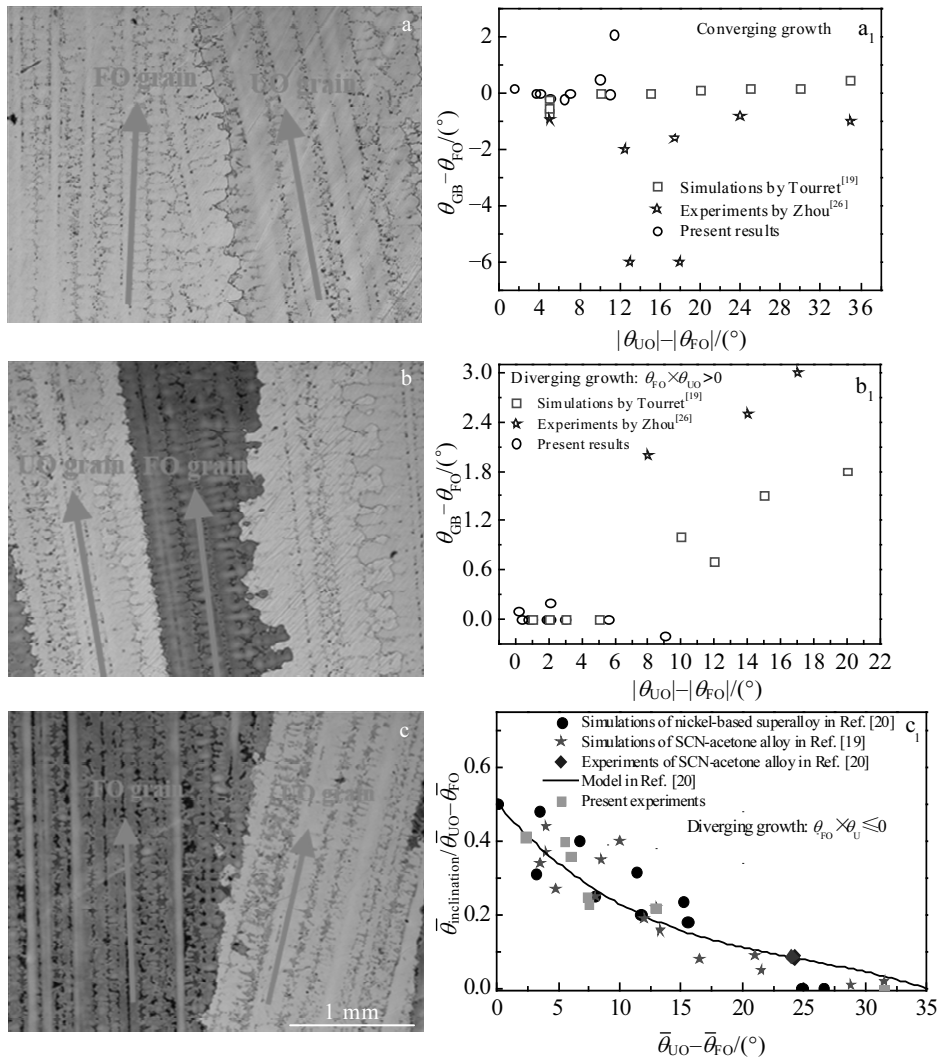


图 4 双晶汇聚生长，同侧双晶发散生长，异侧双晶发散生长的晶界取向选择与竞争晶粒晶体取向关系的显微组织和统计图

Fig.4 Selection of grain boundary direction within different competitive modes: (a~c) microstructures, (a<sub>1</sub>~c<sub>1</sub>) statistics results; (a, a<sub>1</sub>) the converging growth, (b, b<sub>1</sub>) the diverging growth in the same side, and (c, c<sub>1</sub>) the diverging growth in different sides

人的实验和模拟结果一致。说明晶界没有明显地偏离择优枝晶的生长方向，晶界处主要发生了择优枝晶阻挡淘汰非择优晶粒的行为。而择优枝晶通过生成新的一次臂淘汰非择优枝晶或者非择优枝晶淘汰择优枝晶都很难发生。根据 Walton-Chalmers 经典理论模型<sup>[11]</sup>，在汇聚晶界处发生的是择优枝晶阻挡非择优枝晶的生长。实验结果中竞争淘汰后试样上部枝晶列取向差较小，在此种情况下，非择优枝晶难以淘汰择优枝晶。值得注意的是，在薄板试样中，经历过枝晶淘汰后，晶界两侧的枝晶取向差都在 12° 以内。这表明取向差较大的两列枝晶已经在早期被淘汰。取向差小于 10° 的汇聚晶界相对稳定地沿择优枝晶取向生长，不容易被淘汰。

当发散双晶的倾斜方向相同时，晶界也是基本沿着择优枝晶的生长方向，如图 4b 的金相组织所示。该条件下发散晶界处只有非择优枝晶上产生了一次枝晶臂，而在择优枝晶上不能产生新的一次枝晶臂，这与模拟结果<sup>[19]</sup>基本一致。图 4b<sub>1</sub> 给出了实验统计结果，可以发现，同侧双晶的生长方向绝对值之差小于 10°。这表明，具有大角度取向差的相邻晶粒在枝晶生长竞争初始阶段已经发生了很快的淘汰行为，只有取向差较小的相邻晶粒才能够继续共同生长并继续发生竞争淘汰过程。

发散生长枝晶倾斜方向不同时，两列枝晶的取向差可以在大范围内存在。图 4c 的金相组织表明，当两列枝晶倾斜方向不同呈发散生长时，择优枝晶可以通过产生三次臂获得生长空间。双晶发散竞争生长的实验结果<sup>[26]</sup>多选择角度方向较大的构型，与模拟结果<sup>[19]</sup>基本一致。通过综合大量的不同体系中的实验以及模拟结果发现<sup>[19]</sup>，发散晶界处，二次臂生长方向越接近热流，其生长越快，越偏离热流，则越慢，2 个枝晶

的二次臂生长方向绝对值之差决定了二次臂之间的竞争生长。随着双晶枝晶生长方向差别变大，择优晶粒占据晶界空间的能力变小，当双晶生长方向差大于 30° 时，择优晶粒不能发展出新的一次枝晶臂来占据液相晶界空间。由于立方晶系中，二次枝晶臂基本上垂直于一次枝晶臂生长，2 个枝晶的二次臂生长方向绝对值之差与一次臂生长方向绝对值之差  $|\theta_{uo}| - |\theta_{fo}|$  相同。因此，在此条件下的发散晶界取向选择符合基于双晶生长方向绝对值之差的统一的演化规律<sup>[19]</sup>，薄板试样定向凝固实验结果与前人实验和模拟统计结果基本吻合。

考虑到商业铸造软件 ProCAST 的 CAFE 模块得到了广泛的应用，因此进一步采用该模块进行了多次模拟薄板试样定向凝固的过程，统计出试样中晶界在枝晶竞争生长过程中的演化情况。图 5 分别给出不同双晶竞争晶界取向的统计结果。对比图 4 和图 5 发现，CAFE 中晶界取向的选择与实验结果差异非常大。图 5a 中，在汇聚生长过程中，晶界取向总体与择优取向相差 10° 左右，然而实验结果中，晶体取向与择优取向基本一致。对于发散生长，同侧情况下，图 5b 显示晶界取向总体与择优取向的夹角随着枝晶间晶体取向差的增加逐渐减小，但仍相差 10° 左右；异侧情况下，图 5c 趋势与实验结果图 4c 一致，但无量纲角度差却大了 1 个量级。CAFE 模拟误差较大的原因一方面在于元胞捕获的生长模型带有随机性，另一方面其没有考虑到溶质的竞争作用，仅仅用尖端过冷度之差作为枝晶竞争的判据，无法反映枝晶竞争过程中溶质的交互作用。

综合定向凝固枝晶竞争生长的微观组织和晶界演化统计结果，可以发现枝晶的竞争与晶界两侧的枝晶择优取向差密切相关。从微观组织角度看，竞争生长主要通过枝晶一次臂的阻挡以及二次臂或三次臂的生

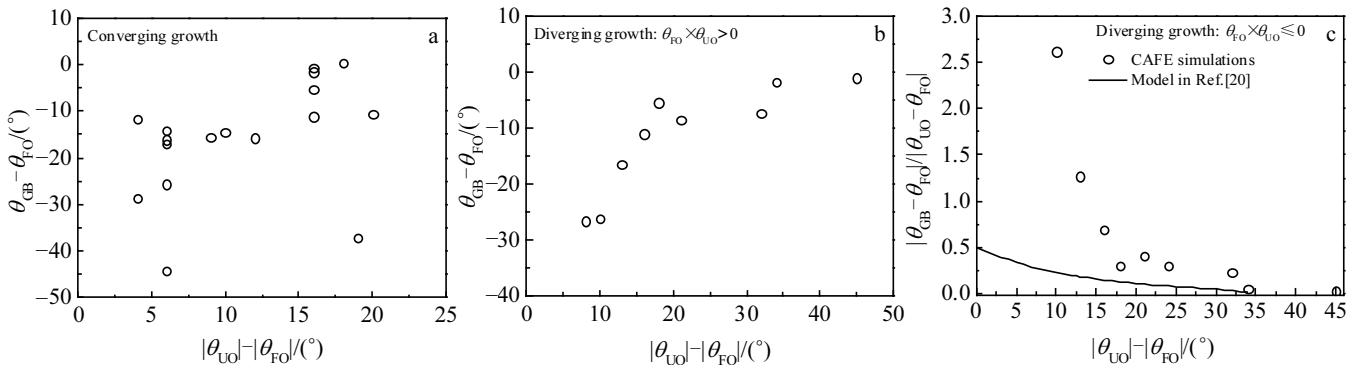


图 5 双晶汇聚生长，同侧双晶发散生长，异侧双晶发散生长的 CAFE 模拟的晶界取向选择统计图

Fig.5 Statistics results of selection of grain boundary direction within different competitive modes in CAFE simulation: (a) the converging growth, (b) the diverging growth in the same side, and (c) the diverging growth in different sides

长来完成。定向凝固过程枝晶生长已经得到了深入的研究, 倾斜生长以及二次臂的演化规律已经明确。然而, 两列枝晶列交汇处晶界区域的溶质扩散场非常复杂, 目前仍然没有相关理论, 只能通过定量相场模拟获得。因此, 不同类型晶界两侧枝晶的二次臂和三次臂生长仍然有待深入研究, 在此基础上揭示枝晶竞争生长的演化机理。

值得强调的是, 尽管薄板状试样定向凝固枝晶竞争过程中晶界取向与现有结果基本一致, 但其本质仍然是三维尺度上的竞争生长。枝晶沿 $\langle 100 \rangle$ 取向在面内的旋转角度对枝晶竞争生长也存在一定的影响, 需进一步研究, 例如图 2a 中晶界两侧十字花样的角度不同, 其枝晶竞争行为也将有所不同。薄板状试样厚度对竞争生长的影响也需要进一步探讨, 然而随着厚度的减小, 其二维效应将越来越明显。以目前实验统计结果来看, 薄板定向凝固中晶界取向选择的统计结果与二维实验和模拟研究基本一致。另一方面, 从顶面和侧面枝晶的生长形态上看, 薄板状试样在定向多晶叶片中可以作为引晶结构选出择优晶体取向与热流方向较为接近的枝晶。

### 3 结 论

1) 枝晶在初期的竞争生长期间, 淘汰大量的晶粒。在后期的生长过程中仅剩下少量择优取向与热流方向一致的枝晶。后期枝晶生长仍然存在明显的三维竞争生长特征。

2) 在汇聚生长以及同向枝晶发散竞争生长时, 晶界取向与择优枝晶的生长方向一致; 在不同取向双晶发散竞争生长时, 晶界取向取决于 2 个枝晶列的取向差。

3) 枝晶列竞争生长主要通过枝晶一次臂阻挡效应、二次臂以及三次臂的竞争生长实现。

4) 在定向凝固过程中, 试样的最终取向主要由择优的枝晶取向决定; 当两列枝晶取向差在  $10^\circ$  以内时, 淘汰过程将非常缓慢。

#### 参考文献 References

- [1] Ghmadh J, Debierre J M, Deschamps J *et al. Acta Materialia* [J], 2014, 74: 255
- [2] Deschamps J, Georgelin M, Pocheau A. *Physics Review E*[J], 2008, 78: 11 605
- [3] Xing H, Ankit K, Dong X L *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2018, 117: 1107
- [4] Xing H, Dong X L, Chen C L *et al. International Journal of Heat and Mass Transfer*[J], 2015, 90: 911
- [5] Kurz W, Fisher D J. *Fundamentals of Solidification*[M]. Aedermannsdorf: Trans Tech Publications, 1986
- [6] Kurz W, Fisher D J, Trivedi R. *International Materials Reviews* [J], 2018(1): 1
- [7] Souza N D, Jennings P A, Yang X L *et al. Metallurgical and Materials Transactions B*[J], 2005, 36(5): 657
- [8] Wang N, Liu L, Gao S *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 586: 220
- [9] Yan Y H, Liu J W, Jia Z H *et al. Materials Science Forum*[J], 2017, 878: 42
- [10] Wang Jincheng(王锦程), Guo Chunwen(郭春文), Li Junjie(李俊杰) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2018, 54(5): 657
- [11] Walton D, Chalmers B. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*[J], 1959, 215(3): 447
- [12] Zhou Y Z, Volek A, Green N R. *Acta Materialia*[J], 2008, 56(11): 2631
- [13] Yu H, Li J, Lin X *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2014, 402: 210
- [14] Hu Songsong(胡松松), Liu Lin(刘 林), Cui Weiqiang(崔伟强) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2016, 52(8): 897
- [15] Wagner A, Shollock B A, Mclean M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 374(1): 270
- [16] Li J, Wang Z, Wang Y *et al. Acta Materialia*[J], 2012, 60(4): 1478
- [17] Takaki T, Ohno M, Shimokawabe T *et al. Acta Materialia*[J], 2014, 81: 272
- [18] Tourret D, Karma A. *Acta Materialia*[J], 2015, 82: 64
- [19] Tourret D, Song Y, Clarke A J *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 122: 220
- [20] Guo C, Li J, Yu H *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 136: 148
- [21] Viardin A, Založnik M, Souhar Y *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 122: 386
- [22] Takaki T, Sakane S, Ohno M *et al. Materials*[J], 2018, 1: 104
- [23] Pineau A, Guillemot G, Tourret D *et al. Acta Materialia*[J], 2018, 155: 286
- [24] Guo C W, Li J J, Wang Z J *et al. Materials and Design*[J], 2018, 151: 141
- [25] Guo C, Li J, Wang Z *et al. Computational Materials Science* [J], 2020, 176: 109 531
- [26] Zhou Yiwei(周亦胃), Jin Tao(金 涛), Sun Xiaofeng(孙晓峰). *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2010, 46(11): 1327

## Competitive Growth of Dendrite Arrays in the Directional Solidification of a Thin Sheet Sample

Yang Zenan<sup>1</sup>, Zhang Zhen<sup>2</sup>, Guo Chunwen<sup>3</sup>, Pan Hao<sup>4</sup>, Wang Zhen<sup>1</sup>, Zhang Qiang<sup>1</sup>, Huang Chaohui<sup>1</sup>, Wang Zhijun<sup>4</sup>

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,

AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

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

**Abstract:** It is of great scientific and engineering significance to understand the misoriented grain evolution in the directional solidification of superalloys, where the competitive growth of dendrite arrays with different orientation is the key phenomenon to understand the grain boundary evolution and elimination of dendrite. The experimental bicrystal growth in directional solidification identified the drawback of the traditional tip undercooling criterion. Moreover, quantitative phase field simulations showed more details of the bicrystal competitive growth and enhanced our understanding. In this research, we proposed a sheet sample with multiple bicrystals configurations. The microstructures were observed in a stitching picture. The results indicate that the competitive growth of two dendritic arrays is directly related to the interaction of primary arms and secondary arms in the grain boundary region. In the converging growth, the primary arm of the favorably oriented dendrite block the primary arm growth of unfavorably oriented dendrite and the new primary arm of the favorably oriented dendrite can not overgrowth in the grain boundary region. Then the grain boundary forms mainly along the growth direction of favorably oriented dendrite. In divergent growth, when the two dendritic arrays are on the same side of thermal gradient direction, the grain boundary is still mainly along the growth direction of favorably oriented dendrite where the new primary arm of unfavorably oriented dendrite is more likely to form than that of favorably oriented dendrite. When the two dendritic arrays are on the different sides of thermal gradient direction, the new primary arms of the both dendritic arrays can generate and the grain boundary is between the growth direction of the two arrays. The competitive growth and the grain boundary selection of dozens of biocrystals have been summarized within several samples. The statistical results agree with the phase field simulation. However, the CAFE simulation results from the ProCAST can not predict the grain boundary evolution due to there is only a profile of grains related to tip undercooling without solute diffusion and competition of side branches in CAFE. The method proposed here can be used to obtain the statistic information of the competitive growth with a high throughput way, and the results are helpful to understand the misoriented grains in fabrication of single crystal blade.

**Key words:** directional solidification; competitive growth; grain boundary direction

---

Corresponding author: Wang Zhijun, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, E-mail: zhjwang@nwpu.edu.cn