

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5277

Al-Sn 合金定向凝固过程中的枝晶取向演变

陈忠伟¹, 孙艺菲¹, 安 博¹, 孙兆康¹, 汪泽瑾², 曾 毅², 牛虎明², 姜万明²

(1. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 陕西有色榆林新材料集团有限责任公司, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 铝基体中溶解度较低的 Sn 元素, 在含量变化下会引发枝晶取向演变。本研究利用 OM 与 EBSD, 对不同成分 Al-Sn 合金定向凝固过程中的枝晶取向演变进行分析, 试样纵截面的宏观组织呈现出单一典型的规则柱状晶、扇状组织或两者共存的特征。不同截面的 EBSD 晶粒重构图及其对应的极图可揭示枝晶实际生长方向。结果表明, 低 Sn 含量 Al-Sn 合金的定向凝固微观组织中不存在孪生枝晶, 仅存在柱状晶; 而当 Sn 含量达到 4%(质量分数)时, 发生两种关键转变: 部分枝晶的晶体生长方向由 $\langle 100 \rangle$ 转变为 $\langle 110 \rangle$, 并开始形成以 $\{111\}$ 面为孪晶界的孪生枝晶。柱状晶宏观生长方向与温度梯度方向平行, 而孪生枝晶虽保持 $\langle 110 \rangle$ 晶体学取向, 但其宏观生长方向偏离温度梯度。结果表明枝晶取向演变与界面能各向异性的变化相关, 在合适的凝固条件下, Sn 含量超过临界阈值, 会通过改变界面能各向异性, 同时导致枝晶生长模式与择优生长方向的变化。

关键词: Al-Sn 合金; 枝晶取向; 定向凝固; EBSD

中图分类号: TG146.2+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)09-1010-09

Dendrite Orientation Evolution in the Unidirectional Solidification of Al-Sn Alloys

CHEN Zhongwei¹, SUN Yifei¹, AN Bo¹, SUN Zhaokang¹, WANG Zejin²,
ZENG Yi², NIU Huming², JIANG Wanming²

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Shaanxi Nonferrous Yulin New Materials Group Co., Ltd., Yulin 719000, China)

Abstract: The presence of tin, which has a low solubility in an aluminium matrix, can affect the evolution of dendrite growth with different contents. The evolution of the dendrite orientation during the unidirectional solidification of Al-Sn alloys with different contents is investigated by optical metallography (OM) and electron back-scatter diffraction (EBSD). The macrostructure of the longitudinal section of the sample exhibits a single typical fan-like structure, regular columnar grains or both. The EBSD grain reconstruction maps and corresponding poles of different sections can demonstrate the actual dendrite growth directions. The results show that only columnar grains but no twinned dendrites are present in the directional solidification microstructures of low-tin-content Al-Sn alloys. When the Sn content reaches 4 wt.%, the preferred growth direction of some dendrites changes from $\langle 100 \rangle$ to $\langle 110 \rangle$, and twinned dendrites with $\{111\}$ as the twin boundary starts to form. The macroscopic growth direction of the columnar crystals is parallel to the temperature gradient, whereas the twinned dendrites, despite maintaining the $\langle 110 \rangle$ crystallographic orientation, have a macroscopic growth direction that deviates from the temperature gradient. The results indicate that the evolution of the dendrite orientation is related to the change in the anisotropy of the interfacial energy. Under suitable solidification conditions, when the Sn content exceeds the critical threshold, it can simultaneously cause changes in the growth pattern of dendrites and the preferred growth direction by altering the anisotropy of the interfacial energy.

Key words: Al-Sn alloys; dendrite orientation; unidirectional solidification; EBSD

Al-Sn 合金以其优异的摩擦学性能与力学性能著称, 在工程应用中具有重要价值, 尤其适用于内

燃机活塞与气缸套等部件^[1]。从基础研究角度看, 该体系亦表现出独特意义: Sn 作为体心四方(BCT)结

收稿日期: 2025-12-15

基金项目: 陕西省重点研发计划(2025QCY-KXJ-151, 2025QY-GJHX-18)

作者简介: 陈忠伟, 1970 年生, 博士, 教授, 研究方向为铝合金组织表征与性能调控。Email: chzw@nwpu.edu.cn

引用格式: 陈忠伟, 孙艺菲, 安博, 孙兆康, 汪泽瑾, 曾毅, 牛虎明, 姜万明. Al-Sn 合金定向凝固过程中的枝晶取向演变[J]. 铸造技术, 2026, 47(9): 1010-1018.

CHEN Z W, SUN Y F, AN B, SUN Z K, WANG Z J, ZENG Y, NIU H M, JIANG W M. Dendrite orientation evolution in the unidirectional solidification of Al-Sn alloys[J]. Foundry Technology, 2026, 47(9): 1010-1018.

构元素,在添加量极高(可达 97.6%,质量分数)时仍能使铝基体保持面心立方(FCC)结构。由于 Sn 在铝中的固溶度极限极低,低于 0.09%Sn(质量分数),即 0.02%Sn(原子分数),其在凝固过程中表现出强烈的偏析倾向。对于亚共晶 Al-Sn 合金,凝固过程中首先形成 FCC 结构的枝晶;当成分超过共晶点时,BCT 结构的富 Sn 枝晶开始生长^[2]。这一特性使得 Al-Sn 合金成为探究溶质对枝晶生长行为影响的理想模型体系。

枝晶是合金凝固过程中常见的微观组织,包含规则枝晶和孪生枝晶的微观凝固组织生长行为直接影响材料的力学性能^[3]。其中孪生枝晶(亦称羽毛状晶粒)是铝合金半连续铸造微观组织中的常见结构。该结构最早由 Herenguel 发现,并在过去 60 余年中作为损害铸件力学性能与均匀性的缺陷被持续研究^[4]。已有研究结果中最令人关注的特征在于孪生枝晶呈现的对称性特征^[5-9]。孪生枝晶的片层被交替的波状边界与平直边界分隔;其主干中心被孪晶面(即平直界面,称为共格{111}面)所分割,而两侧的二次枝晶臂则通过波状界面(称为非共格{111}面)与相邻枝晶连接^[10]。Henry 等^[11]系统综述了孪生枝晶形成的必要条件,其中最具代表性的因素如下:首先,在合金元素方面,纯铝中未观察到羽毛状晶粒,但在多种铝合金中,如 Al-Fe、Al-Ti、Al-Zn 及 Al-Mg 合金等可以观察到羽毛状晶粒。然而,由于大多数体系为多组分系统,合金元素的具体影响机制尚难阐明^[7,12-13]。其次,在凝固条件方面,当达到高温梯度与高凝固速度时(如温度梯度 $G \approx 100 \text{ K/cm}$,等温面移动速度 $v_T \approx 1 \text{ mm/s}$),孪生枝晶会形成^[14-15]。此外,对流对孪生枝晶形成的影响也有研究^[16-17],但其在熔体中的具体作用机制尚未明确。此外,浇注和搅拌引发的对流会促进孪生枝晶的形成^[8]。

在金属合金凝固过程中,枝晶取向演变(dendrite orientation transition, DOT)是一个普遍存在且备受关注的现象^[18]。研究者已提出若干影响因素,如固液界面能、界面附着动力学、晶体弹性模量及热导率等^[18-22]。枝晶择优生长模型最早由 Weinberg 与 Chalmers^[23]提出,他们指出枝晶择优生长方向应沿着低能界面方向,这些界面通常对应于密排面。对于 FCC 晶体,{111}面为低能面,对应的生长方向为 $\langle 100 \rangle$ 。基于此模型,可预测不同晶体结构的枝晶生长方向:体心立方(BCC)晶体为 $\langle 100 \rangle$,BCT 晶体为 $\langle 110 \rangle$,六方密排(HCP)晶体为 $\langle 10\text{-}10 \rangle$ ^[24]。尽管大多数实验都验证了枝晶生长方向基于晶体结构,但在其他凝固组织中仍出现了一些不同的生长方向。Gonzales 与

Rappaz^[22]的研究指出,随着 Zn 含量变化,Al-Zn 合金定向凝固微观组织发生从 $\langle 100 \rangle$ 到 $\langle 110 \rangle$ 的枝晶取向演变。当 Zn 含量低于 25%(质量分数,下同)时,枝晶取向保持为 $\langle 100 \rangle$;当 Zn 含量高于 60%时,枝晶取向保持在 $\langle 110 \rangle$;当 Zn 含量从 25%增加至 60%,取向则在 $\langle 100 \rangle$ 至 $\langle 110 \rangle$ 之间变化,例如出现 $\langle 410 \rangle$ 、 $\langle 210 \rangle$ 及 $\langle 320 \rangle$ 等方向。针对这一现象,Rappaz 等^[25]基于界面性质的各向异性提出了更具普适性的枝晶生长方向判据,该判据综合考虑界面的界面能与原子附着动力学的各向异性。研究表明,在低速凝固条件下,界面能的各向异性对枝晶生长方向起主导作用;在快速凝固条件下,界面原子附着动力学的各向异性则变得更重要。目前针对界面能各向异性已建立多种模型,包括二维模型与三维模型^[10],其中三维模型能够解释如 Al-Zn 合金、Al-Mg 合金等枝晶取向随成分变化而发生演变的现象,证实低速凝固条件下溶质通过改变界面能各向异性驱动取向演变的机制。近期研究进一步揭示了快速凝固条件下取向选择的动力学本质。Sahoo 等^[26]对 Al-10Si 合金的研究建立了从 $\langle 100 \rangle$ 到亚稳 $\langle 320 \rangle$ 枝晶取向演变的定量动力学框架,证实在快速凝固条件下,界面控制机制从界面能主导转变为界面动力学主导,枝晶为维持生长效率而选择亚稳取向。该研究指出,取向演变是快速凝固的晶体学标志,其发生与界面附着动力学密切相关,而非名义成分改变界面能。

现有大量关于铝合金凝固过程中枝晶取向演变的研究,其中多数关注溶质元素固溶度较高的合金体系,如 Zn、Mg 等^[19,27-28]。相比之下,对于低固溶度溶质可能引发的独特界面现象,目前仍缺乏深入探索。近期 Xu 等^[29]对三元 Al-Sn-Cu 合金的研究揭示了 Sn 在凝固过程中的偏析行为。在重力铸造条件下,铸件上表面存在严重的负偏析,下表面呈现正偏析;在挤压铸造条件下,Sn 的分布更加均匀,偏析现象得到改善。Sn 的分布不均匀性主要源于其凝固过程中的偏析倾向。Seredyński 等^[30]进行的多尺度模拟研究进一步揭示,溶质再分布与枝晶间熔体流动的耦合是导致宏观偏析及局部溶质富集通道形成的关键机制。上述偏析行为首先发生在固液界面这一微观尺度上,界面溶质富集可能通过改变界面原子构型与键合状态,进而影响界面性质的各向异性,而后者正是决定枝晶择优生长方向的关键因素^[25]。本研究旨在通过定向凝固(directional solidification, DS)实验,探究铝基体中低固溶度溶质(Sn)含量的变化是否及如何引发 Al-Sn 合金中枝晶取向的演变。

1 实验材料与方法

研究用 Al-Sn 合金使用纯金属原料(纯度 99.95%) 在电阻炉中制备。为便于比较,共制备了 5 种不同成分的亚共晶 Al-Sn 合金(Sn 含量分别为 0.1%、1.0%、4.0%、8.0%及 20.0%),其共晶点可达 97.6%。实验所用样品均通过定向凝固技术制备。定向凝固设备示意图如图 1 所示。炉体内部电热丝电阻元件由隔热材料包裹,该设计可抑制热量向四周扩散,从而在凝固过程中实现热量的单向传导。炉底设置的喷射水冷系统提供了较高的温度梯度。在实验过程中,将合金加热到其熔点以上 70 °C,保温静置 10 min,而后关闭加热电源,喷水冷却。待炉膛及铸锭冷却至室温后,取出样品。

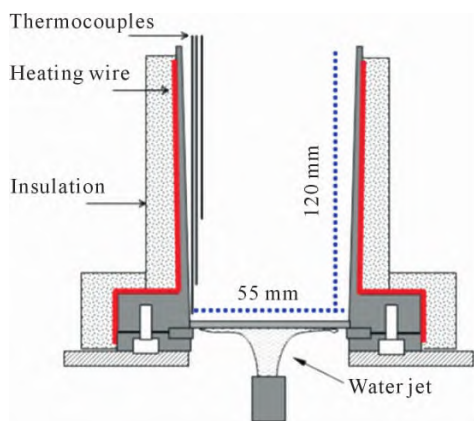


图 1 定向凝固设备示意图

Fig.1 Sketch map of the directional solidification equipment

利用光学显微镜(OM)对不同成分铝合金的宏观组织进行表征。金相试样通过机械抛光制备,依次使用 80#、240#、600#、1000# 及 2000# 砂纸进行打磨,随后使用浓度为 4%氢氟酸溶液化学腐蚀 10~30 s,以显露宏观组织。使用 C130 真彩色共聚焦显微镜进行金相观察。

利用扫描电子显微镜(SEM)及能谱仪(EDS)对 Al-Sn 合金的微观组织及微区成分进行表征。SEM 试样制备流程与 OM 相似,但采用 Keller 试剂腐蚀 3~15 s 以显现微观组织。为去除试样表面的微小变形层,用于电子背散射衍射(EBSD)测试的试样需进行电化学抛光处理:在由体积分数 72%乙醇、8%高氯酸和 20%甘油组成的电解液中,以 15 V 电压抛光 20 s。

实验使用 ZEISS-SUPRA55 场发射枪扫描电子显微镜(FEG-SEM)观察凝固微观组织;配备 Nordlys CCD 相机的蔡司场发射扫描电镜(由 HKL Channel 5 软件控制)用于 EBSD 数据采集,工作电压为 20 kV。

2 实验结果及讨论

图 2 展示了定向凝固条件下几种 Al-Sn 合金(a-Al-0.1%Sn,b-Al-1%Sn,c-Al-4%Sn,d-Al-8%Sn,e-Al-20%Sn)纵截面的宏观组织。低 Sn 含量合金(Al-0.1%Sn 与 Al-1%Sn)呈现完全的柱状晶结构(图 2a 和 b),而较高 Sn 含量合金(Al-4%Sn、Al-8%Sn 及 Al-20%Sn)则表现为底部柱状晶粒、上部区域存在羽毛状晶粒

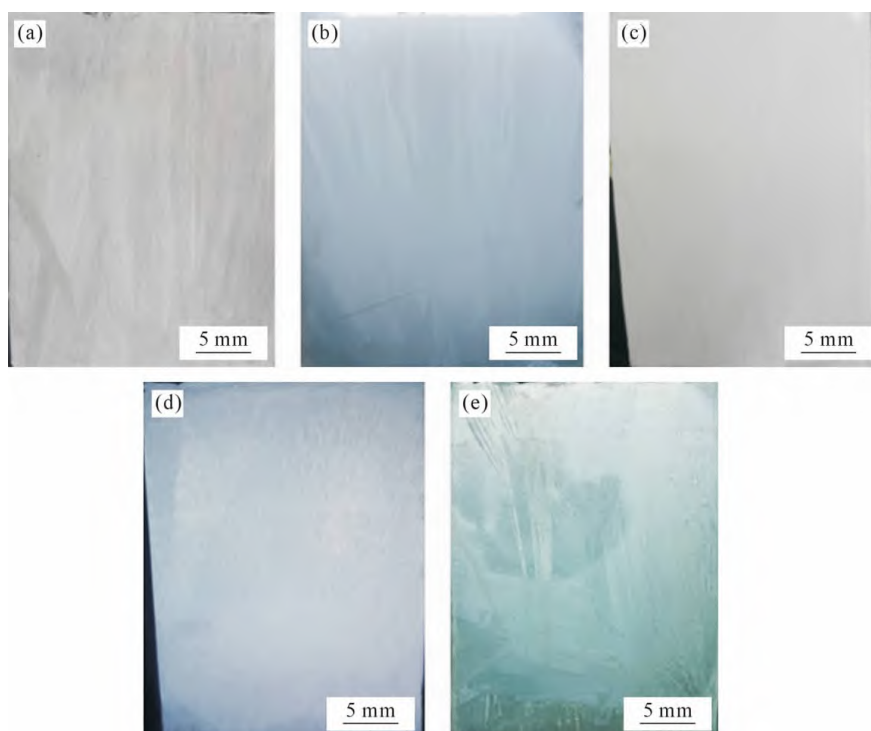


图 2 定向凝固合金纵向截面宏观结构:(a) Al-0.1%Sn;(b) Al-1%Sn;(c) Al-4%Sn;(d) Al-8%Sn;(e) Al-20%Sn

Fig.2 Macrostructure of the longitudinal section in DS alloys: (a) Al-0.1 wt.% Sn; (b) Al-1 wt.% Sn; (c) Al-4 wt.% Sn; (d) Al-8 wt.% Sn; (e) Al-20 wt.% Sn

(孪生枝晶)的混合组织(图 2c~e)。

从宏观角度观察,Sn 含量对孪生枝晶的形成具有显著影响。具体而言,在定向凝固条件下,低 Sn 含量 Al-Sn 合金中未出现羽毛状晶粒,随 Sn 含量增加,羽毛状晶粒逐渐开始形成。这种宏观形貌随溶质含量增加而转变的现象,符合凝固前沿形貌不稳定性的经典理论^[4,31]。此外,有必要进一步研究 Sn 对 Al-Sn 合金定向凝固微观组织的影响,包括柱状晶取向的演变以及孪生枝晶的生长。

图 3 和 4 分别展示了定向凝固 Al-0.1%Sn 与 Al-1%Sn 合金的宏观组织,以及铸件不同区域(从底部到顶部)对应的 EBSD 晶粒重构图与极图。可以看出,Al-0.1%Sn 与 Al-1%Sn 合金在宏观和微观上具有相似的定向凝固结构,即均由完全的柱状晶组成,且柱状晶粒择优生长方向均为常见的 $\langle 100 \rangle$ 方向。在铸件底部,凝固期间热流方向无序,导致晶粒晶体学取向混乱,如图 3a 和图 4a 所示。随着后续凝固进行,热流变为单一方向,从而产生单一的晶粒晶体学取向^[32],如图 3b 和 c 及图 4b 和 c 所示。极图表明,晶粒生长方向与热流方向平行,这意味着择优晶体学取向为 $\langle 100 \rangle$ 方向。显然,当 Sn 浓度低于 4% 时,未观察到枝晶取向演变。这是由于 Al 的固液界面能各向异性弱于 Sn,在低 Sn 浓度下不会发生

枝晶取向转变。

图 5 展示了定向凝固 Al-4%Sn 合金的宏观组织、铸件不同区域(从底部到顶部)对应的 EBSD 晶粒重构图及极图。从图中可以观察到,铸件底部出现柱状晶粒,而上部区域则为羽毛状晶粒。柱状晶区域表现为规则枝晶,如位置 a 所示(图 5a)。相比之下,扇状区域为孪生枝晶,如位置 c 所示(图 5c)。图 5a 中的 EBSD 晶粒重构图及其对应极图表明,柱状晶的择优晶体学生长方向为 $\langle 100 \rangle$,这与 Al-0.1%Sn 和 Al-1%Sn 合金的情况相似。

图 6 为定向凝固 Al-4%Sn 合金的孪生枝晶 SEM 图像及其对应的极图,该结果与图 5c 的 EBSD 晶粒重构图相关联。极图中存在两种不同颜色的点(绿色与紫色),代表不同的晶粒的晶体学取向。 $\{111\}$ 极图中可见一对绿色与紫色重合点(红圈标注),表明这两个具有不同晶体学取向的晶粒拥有共同的 $\{111\}$ 面。此外, $\{110\}$ 极图中由蓝圈标注的三对重合点,意味着两个不同晶体学取向的枝晶具有三个共同的 $\langle 110 \rangle$ 生长方向。点到极图中心的连线可表征枝晶的生长方向。因此,通过红线与绿线分别标定了 $\{110\}$ 极图中点至中心的连线方向与枝晶臂方向。对比 SEM 图像与 $\{110\}$ 极图可见, $\{110\}$ 极图中的红绿线条分别与 SEM 图中的线条平行。显然,绿线代表

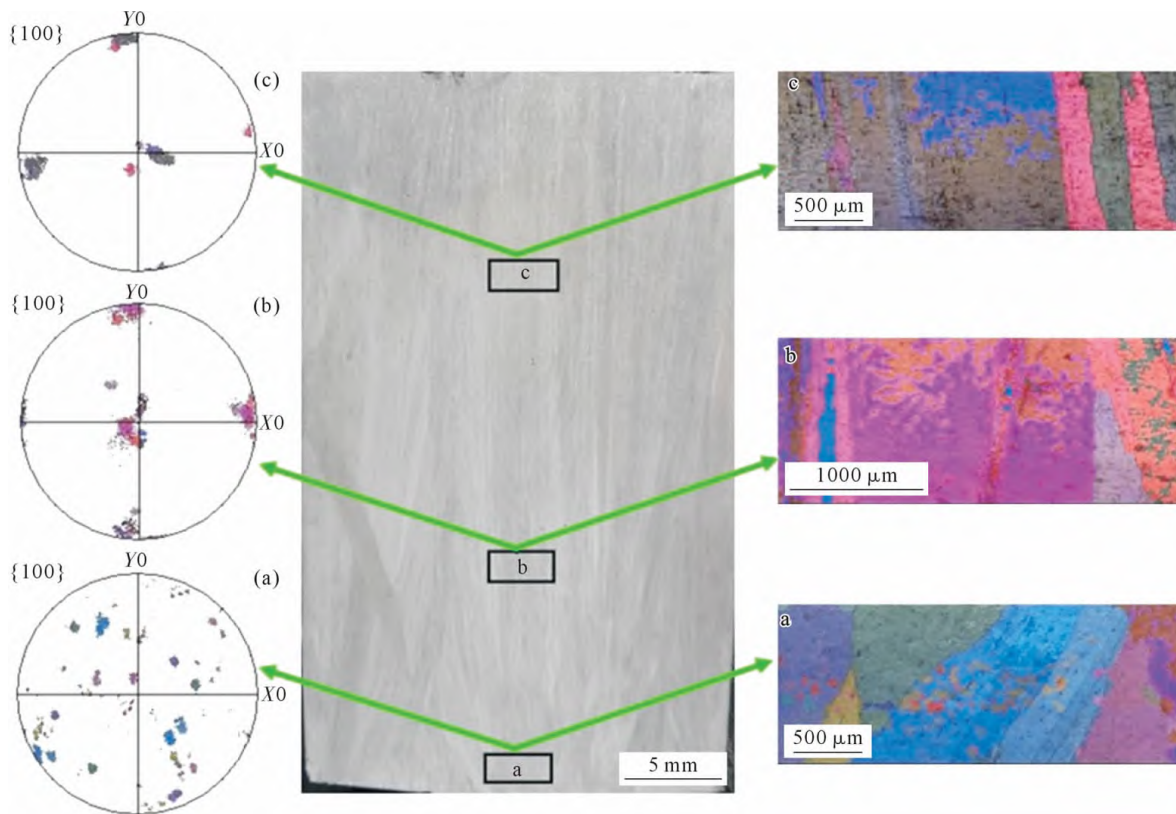


图 3 定向凝固 Al-0.1%Sn 合金纵向截面不同凝固区域宏观结构及对应极图和 EBSD 重建图:(a) 底部区域;(b) 中部区域;(c) 顶部区域

Fig.3 Macrostructure, corresponding pole figure and EBSD reconstruction map at different solidification regions of the longitudinal section in directionally solidified Al-0.1 wt.% Sn alloy: (a) bottom region; (b) middle region; (c) top region

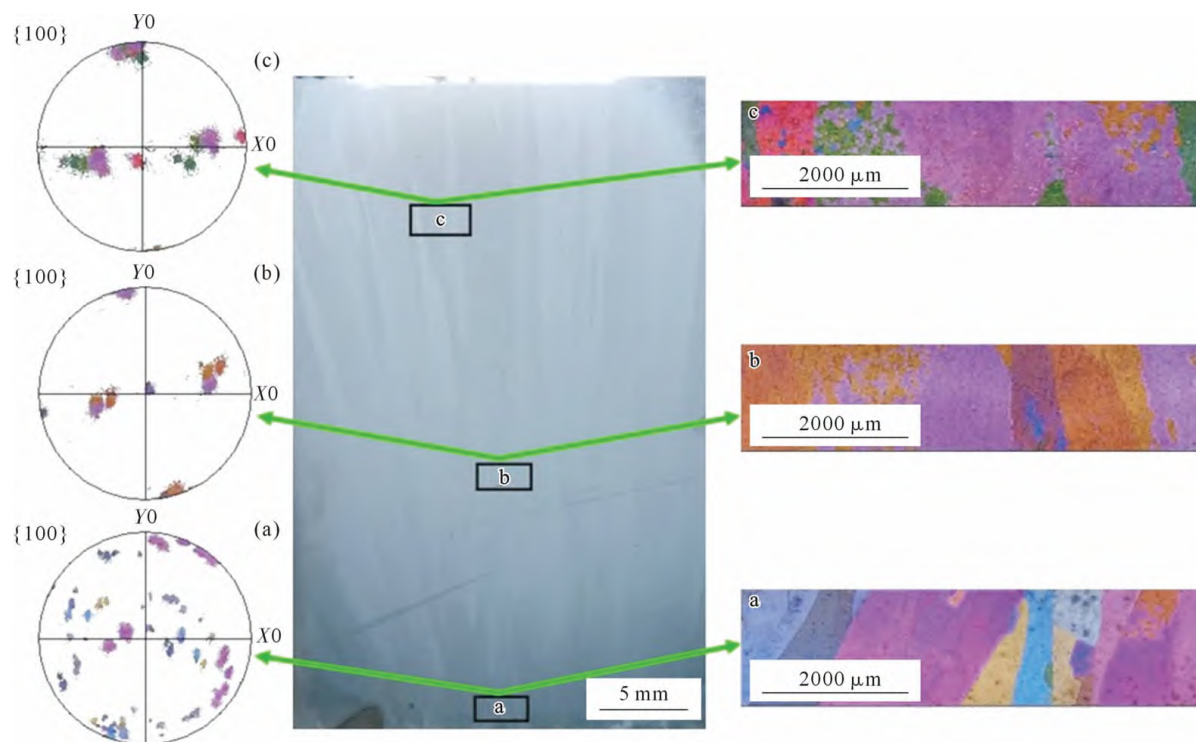


图4 定向凝固 Al-1%Sn 合金纵向截面不同凝固区域宏观结构及对应极图和 EBSD 重建图:(a) 底部区域;(b) 中部区域;(c) 顶部区域

Fig.4 Macrostructure, corresponding pole figure and EBSD reconstruction map at different solidification regions of the longitudinal section in directionally solidified Al-1 wt.% Sn alloy: (a) bottom region; (b) middle region; (c) top region

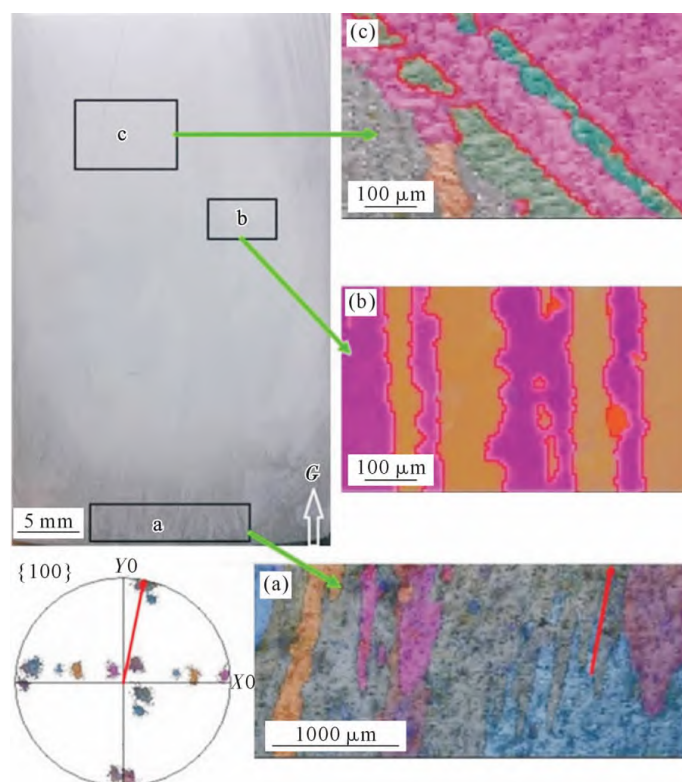


图5 定向凝固 Al-4%Sn 合金纵截面不同区域的宏观组织与 EBSD 重构图(极图对应 a 区域):(a) 底部区域;(b) 中部区域;(c) 顶部区域

Fig.5 Macrostructure and EBSD reconstruction maps at different regions of the longitudinal section in directionally solidified Al-4 wt.% Sn alloy (pole figure corresponds to region a): (a) bottom region; (b) middle region; (c) top region

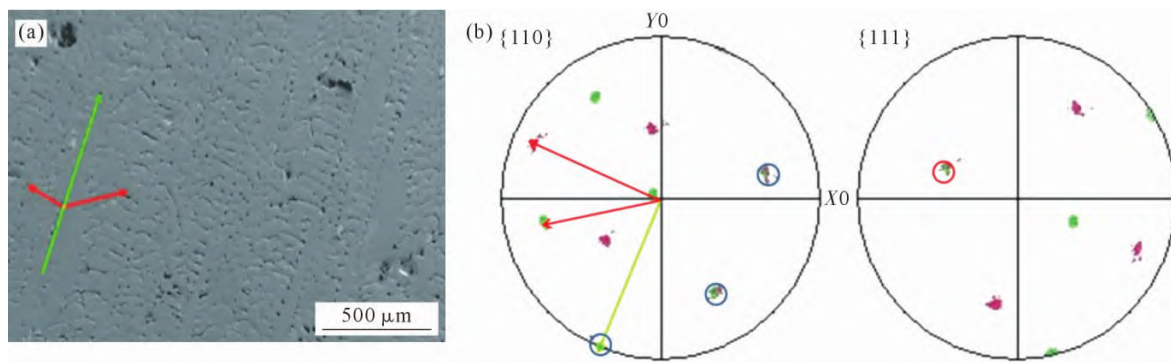


图6 定向凝固 Al-4%Sn 合金孪生枝晶结构:(a) 孪生枝晶结构;(b) 极图

Fig.6 Directionally solidified Al-4 wt.% Sn alloy: (a) twinned dendrite microstructure; (b) corresponding pole figures

孪生枝晶主干方向,红色线条代表孪生枝晶二次臂方向,这表明孪生枝晶主干与二次臂的生长方向均为 $\langle 110 \rangle$ 。

如图7所示,定向凝固 Al-8%Sn 合金的宏观组织显示,其定向凝固结构由柱状晶与孪生枝晶共同组成。柱状晶的取向垂直于铸件底部试样的横截

面。其他区域则被具有不同倾斜角度的扇状区域所分割,尤其在图7b和c处。根据EBSD晶粒重构图及其对应的反极图(图7a),柱状晶区域的晶体学取向着色表明,绿色晶粒更靠近 $\langle 110 \rangle$ 取向。尽管红色晶粒代表 $\langle 100 \rangle$ 择优晶体学方向,但柱状晶的择优晶体学生长方向为 $\langle 110 \rangle$,这与定向凝固Al-4%Sn

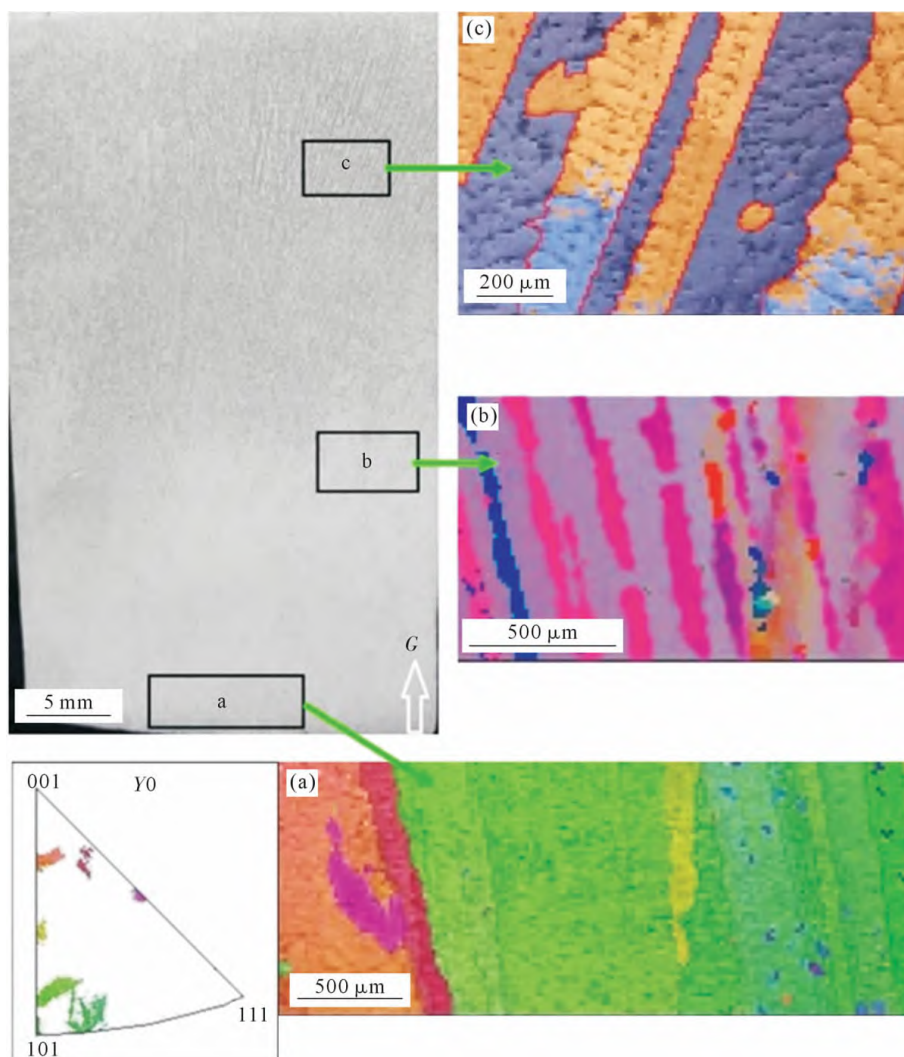


图7 定向凝固 Al-8%Sn 合金纵截面不同区域的宏观组织与EBSD重构图(反极图对应a区域):(a)底部区域;(b)中部区域;(c)顶部区域

Fig.7 Macrostructure and EBSD reconstruction maps at different regions of the longitudinal section in directionally solidified Al-8 wt.% Sn alloy (IPF corresponds to region a): (a) bottom region; (b) middle region; (c) top region

合金的 $\langle 100 \rangle$ 取向不同。观察到随 Sn 含量增加择优晶体学生长方向从 $\langle 100 \rangle$ 向 $\langle 110 \rangle$ 取向的转变,这与界面能各向异性的理论模型相符^[9]。这一发现进一步得到了 Al-Sn 合金原子结构计算研究的支持^[33],该研究为溶质诱导的界面改性提供了见解。另一方面,在图 7b 和 c 所示的孪生枝晶(扇状)区域,反极图清晰地显示出两种特定晶体学取向的晶粒交替排列,形成规则的层状结构,这些层状结构被交替的波状与平直边界所分隔。

图 8 所示的定向凝固 Al-20%Sn 合金纵截面宏

观组织表明,整个纵截面分布着多个具有不同倾斜角度的扇状区域(图 8b~d),其分布呈现无序状态。这一现象表明,孪生枝晶的生长方向可能并非沿着温度梯度方向,而是随着 Sn 含量的增加变得紊乱。图 8a 的 EBSD 晶粒重构图及其对应极图显示,柱状晶的择优晶体学生长方向仍为 $\langle 110 \rangle$,且与温度梯度方向平行。相反,图 8c 显示孪生枝晶的生长方向为 $\langle 110 \rangle$,其与温度梯度方向偏离约 30° 。

综合以上分析,定向凝固 Al-Sn 合金的枝晶取向演变总结于表 1。结果表明,低 Sn 含量 Al-Sn 合

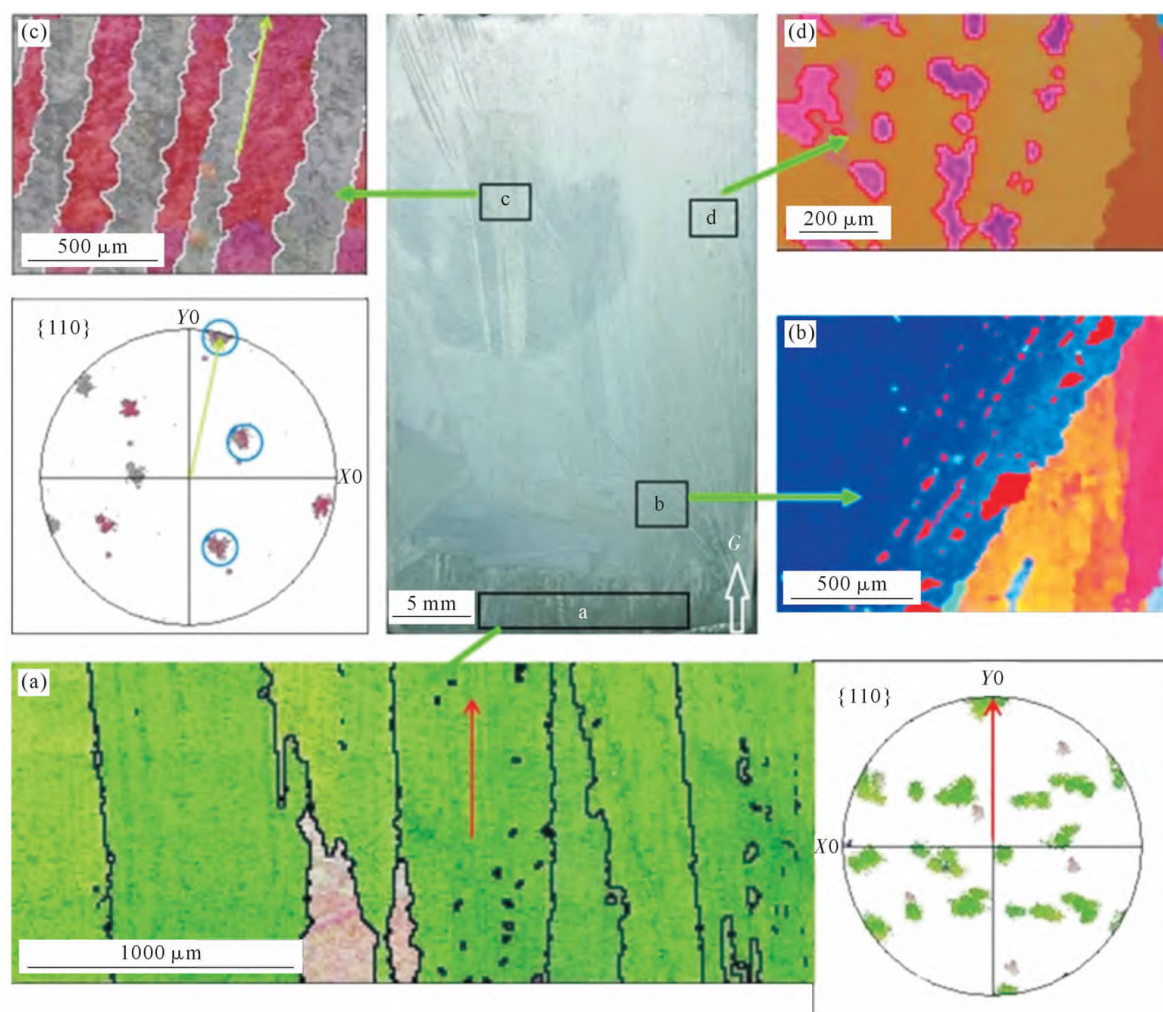


图 8 定向凝固 Al-20%Sn 合金纵截面不同区域的宏观组织与 EBSD 重构图(极图对应 a、c 区域):(a) 底部区域;(b) 中部区域;(c, d) 顶部区域

Fig.8 Macrostructure and EBSD reconstruction maps at different regions of the longitudinal section in directionally solidified Al-20 wt.% Sn alloy (the pole figure corresponds to regions a and c): (a) bottom region; (b) middle region; (c, d) top region

表 1 定向凝固 Al-Sn 合金的凝固微观结构组成及生长方向

Tab.1 Composition of the solidification microstructure and growth direction of directionally solidified Al-Sn alloys

Microstructure and growth direction	Al-0.1 wt.% Sn	Al-1 wt.% Sn	Al-4 wt.% Sn	Al-8 wt.% Sn	Al-20 wt.% Sn
Twinned dendrites	No	No	Yes	Yes	Yes
Growth direction of twinned dendrites	-	-	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$
Growth direction of columnar grains	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 100 \rangle$ $\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$

金中仅存在柱状晶而无孪生枝晶,而高 Sn 含量 Al-Sn 合金中则出现孪生枝晶。对于孪生枝晶,其两侧枝晶共享一个共格{111}面,且孪生枝晶主干与二次臂的生长方向不随 Sn 含量变化而改变,始终沿<110>方向延伸。而柱状晶的生长方向则随 Sn 含量增加从<100>转变为<110>。实验结果表明,基于固液界面能各向异性变化而引发的从<100>到<110>的枝晶取向演变,在 Al-Sn 合金体系中是可能实现的。

3 结论

(1)研究发现,当 Sn 含量低于 4%时,Al-Sn 合金定向凝固组织由规则的<100>取向柱状晶构成,未出现孪生枝晶。其物理机制在于,低浓度 Sn 对铝基体固液界面能各向异性的调制作用较弱,界面性质仍由 Al 基体主导,因此枝晶维持<100>择优生长方向,且生长方向与热流保持一致。

(2)当 Sn 含量达到约 4%的临界值时,凝固组织发生两种演变:柱状枝晶的择优生长方向由<100>转变为<110>;开始形成以共格{111}面为孪晶界的孪生枝晶。这两个现象源于统一的物理机制:临界浓度的 Sn 在固液界面的富集,改变了界面能的各向异性强度与对称性。这既使得<110>方向在能量上优于<100>方向,也降低了{111}面形成共格孪晶界的能垒,从而协同触发了柱状晶取向转变与孪晶形核。

(3)随着 Sn 含量增加,孪生枝晶的晶体学取向虽保持为<110>,但其宏观簇团的生长方向开始呈现出与温度梯度偏离且趋于复杂化的特征。当 Sn 含量达到 4%时,孪生枝晶区呈现扇状形貌,表明其宏观生长方向开始偏离单一的轴向热流。当 Sn 含量进一步增加($\geq 8\%$),多个扇状区域以不同角度倾斜,宏观取向分布呈现明显的随机性与无序化。

为了揭示 Sn 原子在固液界面的行为,后续工作可结合第一性原理计算或相场模拟,定量研究 Sn 对 Al 界面能各向异性的影响;利用原位观察技术追踪孪生枝晶的形核与生长过程,以明确其宏观取向紊乱的动态起源。

参考文献:

- [1] FORRESTER P G. Bearing materials[J]. Metallurgical Reviews, 1960, 5(1): 507-549.
- [2] PERRONE A, ZOCCO A, DE ROSA H, ZIMMERMANN R, BERSANI M. Al-Sn thin films deposited by pulsed laser ablation[J]. Materials Science and Engineering: C, 2002, 22(2): 465-468.
- [3] ASTA M, BECKERMANN C, KARMA A, KURZ W, NAPOLITANO R, PLAPP M, PURDY G, RAPPAZ M, TRIVEDI R. Solid-

- ification microstructures and solid-state parallels: Recent developments, future directions[J]. Acta Materialia, 2009, 57(4): 941-971.
- [4] HÉRENGUEL J. Analyse d'une texture de solidification du type basaltique[J]. Revue de Métallurgie, 1949, 46(5): 309-314.
- [5] LAST H R, SANDERS T H, GONSALVES J M. Stability of microstructures in chill-cast aluminum alloys containing twinned columnar growth structures[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21: 557-565.
- [6] HENRY S, RAPPAZ M, JARRY P. <110> dendrite growth in aluminum feathery grains[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29: 2807-2817.
- [7] HENRY S, RAPPAZ M. Twinned feathery grains and related morphologies in aluminum alloys[J]. Materials Science Forum, 2000, 329-330: 65-72.
- [8] HENRY S, GRUEN G U, RAPPAZ M. Influence of convection on feathery grain formation in aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35: 2495-2501.
- [9] SALGADO-ORDORICA M A, RAPPAZ M. Twinned dendrite growth in binary aluminum alloys[J]. Acta Materialia, 2008, 56(19): 5708-5718.
- [10] SUNSERI E H. Dendrite orientation in aluminum magnesium alloys[D]. Ames: Iowa State University, 2009.
- [11] HENRY S. Etude de la germination et de la croissance maclées dans les alliages d'aluminium[D]. Lausanne: Institute of Materials, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999.
- [12] STEFANESCU D M, RUXANDA R. Solidification structures of aluminum alloys[M]//VANDER VOORT G F. ASM Handbook-Volume 9 Metallography and Microstructures. Ohio: ASM International, 2004: 107-115.
- [13] MORRIS R L, CARRUTHERS J R, PLUMTREE A, WINEGARD W C. Growth twinning in aluminum alloys[J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1966, 236: 1286-1291.
- [14] SALGADO-ORDORICA M A, VALLOTON J, RAPPAZ M. Study of twinned dendrite growth stability[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(4): 367-370.
- [15] ANADA H, FUNAKI K, NAKASHIMA Y, SAWABU H, TADA S. Formation of feathery crystals depending on the solidifying conditions in Al-Mg alloys[J]. Journal of Japan Institute of Light Metal, 1986, 36(9): 562-570.
- [16] SPEAR R E, CRAIG R T, HOWIE C R. Influence of metal flow on the grain morphology in continuously cast aluminum[J]. JOM, 1971, 23: 42-45.
- [17] ZHANG Y J, ZHOU J X, YIN Y J, JI X Y, SHEN X, GUO Z. Study on the solutal convection during dendrite growth of superalloy under directional solidification condition[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 3916-3927.
- [18] KURZ W, FISHER D J, RAPPAZ M. Fundamentals of solidification[M]. Zurich: Trans Tech Publications Ltd: 2023.
- [19] ZHAO Y H, LIU K X, HOU H, CHEN L Q. Role of interfacial energy anisotropy in dendrite orientation in Al-Zn alloys: A phase field study[J]. Materials & Design, 2022, 216: 110555.
- [20] WANG L, HOYT J J, WANG N, PROVATAS N, SINCLAIR C W. Controlling solid-liquid interfacial energy anisotropy through the isotropic liquid[J]. Nature Communications, 2020, 11: 724.

- [21] SWAMY A, DOLCE D, CHOUDHURY P. Atomistic insight into dendrite growth orientation transition in Al-Cu alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107404.
- [22] GONZALES F, RAPPAZ M. Dendrite growth directions in aluminum-zinc alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37: 2797-2806.
- [23] CHALMERS B. Principles of solidification[M]//LOW W, SCHIEBER M. Applied Solid State Physics. New York: Springer New York, 1970: 161-170.
- [24] LEE D N, KIM K H, LEE Y G, CHOI C H. Factors determining crystal orientation of dendritic growth during solidification[J]. Materials Chemistry and Physics, 1997, 47(2-3): 154-158.
- [25] HAXHIMALI T, KARMA A, GONZALES F, RAPPAZ M. Orientation selection in dendritic evolution[J]. Nature Materials, 2006, 5: 660-664.
- [26] SAHOO A, BOGNO A A, VALLOTON J, HENEIN H. Interface-kinetics-driven $\langle 100 \rangle$ to $\langle 320 \rangle$ dendrite orientation transition and dendrite-to-cellular transition in rapidly solidified Al-10Si-0.4Sc[J]. Journal of Crystal Growth, 2026, 683: 128552.
- [27] SHUAI S S, LIN X, DONG Y H, HOU L, LIAO H L, WANG J, REN Z M. Three dimensional dendritic morphology and orientation transition induced by high static magnetic field in directionally solidified Al-10 wt.% Zn alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(8): 1587-1592.
- [28] KURTULDU G, JARRY P, RAPPAZ M. Influence of minor Cr-additions to the growth of columnar dendrites in Al-Zn alloys: Influence of icosahedral short range order in the liquid [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 279-288.
- [29] XU M, YIN Y G, LI C M, DUAN C C. A comparative study on Sn macrosegregation behavior of ternary Al-Sn-Cu alloys prepared by gravity casting and squeeze casting[J]. China Foundry, 2023, 20: 63-70.
- [30] SEREDYŃSKI M, BANASZEK J. Coupled enthalpy-porosity and front tracking approach to modeling chemical inhomogeneity in solidifying metal alloys[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 173: 121221.
- [31] FLEMINGS M C. Solidification processing[J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5: 2121-2134.
- [32] OLIVEIRA R, COSTA T A, DIAS M, KONNO C, CHEUNG N, GARCIA A. Transition from high cooling rate cells to dendrites in directionally solidified Al-Sn-(Pb) alloys[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101490.
- [33] PADHI P, ANAND S K, KAR D, GHOSH S, PANIGRAHI S C. Modeling structure of Al-Sn alloy [J]. Materials Science Forum, 2006, 519-521: 1519-1524.

(责任编辑:杨浩雪)