

定向凝固镍基单晶高温合金螺旋选晶过程显微组织与晶体的生长

徐 莽¹ 张相龙¹ 耿小奇¹ 刘国怀¹ 王 晔² 王昭东¹ 郭景杰³

(1.东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室; 2.哈尔滨理工大学材料科学与工程学院;
3.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用选晶法制备 DD4 单晶高温合金试棒,研究引晶段和选晶段显微组织演变及晶体竞争生长过程。结果表明,随着引晶段高度增加,一次枝晶间距增加,晶粒密度显著降低,<001>织构增强。引晶段高度在 20 mm 时,初始晶粒取向偏转角均小于 10°,且最终约有 35 个明显尺寸且取向良好的晶粒进入螺旋段。位于螺旋通道内侧的晶粒,在螺旋选晶过程中最容易被选出。在约 1/3 螺旋高度处实现了单晶的筛选过程,制备出<001>生长方向与铸件轴向约 8.9°偏差角的单晶体。

关键词 定向凝固;镍基单晶高温合金;螺旋选晶;竞争生长;晶粒取向

中图分类号 TG132.3⁺3 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure Characterization and Competitive Crystal Growth of Directional Solidified Nickel-based Single Crystal Superalloy during Spiral Grain Selector

Xu Mang¹, Zhang Xianglong¹, Geng Xiaoqi¹, Liu Guohuai¹, Wang Ye², Wang Zhaodong¹, Guo Jingjie³

(1.State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University;

2.School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology;

3.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology)

Abstract: The directionally solidified single crystal DD4 superalloy was prepared using the spiral grain selector. Microstructure evolution and grain competitive growth of the starter block and spiral part in spiral selector were analyzed. The results indicate that with the increase of the height of the starter block, the primary dendrite spacing is increased and the grain density is decreased significantly, and the texture of <001> is strengthened. The orientation deflection angle of the initial grains is less than 10° at the height of the starter block of 20 mm. Finally, about 35 grains with obvious size and good orientation can be entered into the spiral part. Grains located in the inner edge of spiral channel were dominant in the process of spiral selection and were the easiest to be selected. The single crystal screening process was realized at the 1/3 helix height of the spiral part, and the single crystal with the deviation angle of 8.9° was prepared.

Key Words: Directional Solidification, Ni-based Single Crystal Superalloy, Spiral Grain Selector, Crystal Competitive Growth, Grain Orientation

随着定向凝固技术的不断发展,镍基单晶高温合金由于其优异的高温强度和抗高温蠕变性能,目前广泛应用于先进航空发动机和工业燃气轮机的涡轮叶片材料^[1~4]。单晶高温合金由于消除了易引起晶间断裂的晶界,显著提高了高温结构部件的持久寿命、抗热疲劳

性能等^[5,6]。同时,晶体生长方向<001>取向平行于定向凝固叶片轴向方向具有最小的弹性模量,因而使叶片的抗高温蠕变强度明显提升^[7,8]。因此,获得严格的<001>取向的单一晶体是制备高质量单晶叶片的关键。

收稿日期:2021-01-13;修改稿收到日期:2021-02-09
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301201,2016YFB0300603);国家自然科学基金资助项目(52071065,51504060,51301140);中央高校基本科研业务费资助项目(N160713001)
第一作者简介:徐莽,男,1990 年出生,博士研究生,沈阳(110819),E-mail:xumang99@126.com
通信作者:刘国怀,男,1985 年出生,副教授,沈阳(110819),E-mail:liugh@ral.neu.edu.cn
引用格式:徐莽,张相龙,耿小奇,等. 定向凝固镍基单晶高温合金螺旋选晶过程显微组织与晶体的生长[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):831-836.
XU M, ZHANG X L, GENG X Q, et al. Microstructure characterization and competitive crystal growth of directional solidified nickel-based single crystal superalloy during spiral grain selector[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):831-836.

螺旋选晶法是目前使用最广泛的单晶组织制备方法之一,直接决定了起始晶粒是否具备择优 $\langle 001 \rangle$ 取向的生长特征,其结构包括引晶段和螺旋段。引晶段主要是实现激冷区形核与晶体的竞争生长,确保一定数量的 $\langle 001 \rangle$ 择优取向与热流方向平行晶粒进入选晶段。而螺旋段的特殊结构对晶体的生长起到一定的限制,多个 $\langle 001 \rangle$ 择优取向晶粒经引晶段进入螺旋选晶通道后将继续进行竞争生长,最终只有一个晶粒进入型腔进而得到单晶体构成的铸件。

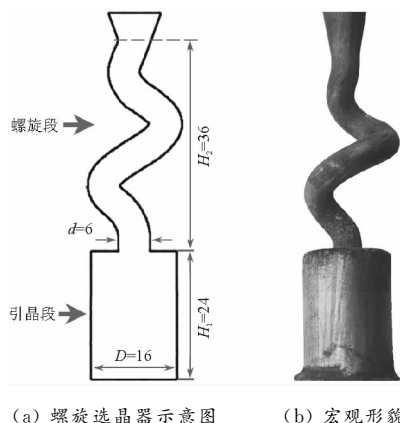
DD4 镍基单晶高温合金由于其良好的中高温性能,适合于制备实际使用温度在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 的涡轮转子和 $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ 左右的导向叶片及其他先进航空发动机高温部件^[9]。目前关于定向凝固 DD4 高温合金螺旋选晶过程组织演化与晶体生长的相关报道较少。定向凝固过程中凝固界面存在复杂的相变和微观组织演化过程,由于高温合金组元和凝固组织的复杂性以及螺旋选晶过程中温度场的不断变化,其选晶机理、取向控制等问题仍有待于进一步深入研究。在实际单晶制备过程中,晶体生长条件往往是复杂和多变的。螺旋选晶过程中取向偏差、杂晶等问题的出现与合金成分设计、定向凝固工艺参数及螺旋选晶器的几何形状和尺寸密切相关。凝固过程中制备工艺的显著影响晶粒的生长特征、溶质扩散过程以及晶粒间的竞争生长。引晶段和螺旋段内多晶体的组织演变及竞争生长将显著影响最终的选晶效果。因此,研究螺旋选晶过程中显微组织演化和晶粒的竞争生长,对于不断促进对选晶机制的理解,优化选晶器的结构设计,提高单晶叶片的成品率并获得高品质的单晶叶片具有积极意义。理解定向凝固晶粒的生长过程以及晶粒间竞争生长有利于定向凝固组织有效控制。

本课题以定向凝固镍基单晶高温合金为研究对象,采用 Bridgman 定向凝固炉制备单晶高温合金试棒。通过金相和 EBSD 对引晶段和选晶段显微组织演变及取向特征进行研究。分析晶体的竞争生长对螺旋选晶过程组织特征的影响,为定向凝固单晶高温合金的制备提供理论参考。

1 试验方案

试验采用 Bridgman 定向凝固单晶炉制备 DD4 单晶试样。定向凝固用母合金材料为 DD4 高温合金,其名义成分为 Ni-9Cr-7.5Co-6W-1.7Mo-3.8Al-4.5Ti-4.2Ta-0.5Nb(质量分数,%,下同)。母合金经砂纸打磨去除表面氧化层,然后放入丙酮中超声清洗,最后放入 CaO 坩埚中。定向凝固过程先对型壳进行预热,型壳

达到预热温度后,将熔化后的合金进行浇注。单晶炉上区温度为 $1\ 490\ ^\circ\text{C}$,下区温度为 $1\ 520\ ^\circ\text{C}$ 。熔体在型壳中静置 2 min 后以 $3\ \text{mm/min}$ 抽拉速度进行定向凝固试验。图 1 为螺旋选晶器结构示意图及宏观形貌。抽拉结束后,取出型壳并清理铸件。



(a) 螺旋选晶器示意图 (b) 宏观形貌

图 1 螺旋选晶器结构示意图及宏观形貌

Fig.1 Structure diagram and macroscopic morphology of spiral selector

利用线切割对定向凝固试样进行不同截面切割。切割试样经打磨、抛光后用腐蚀剂进行腐蚀处理。腐蚀液配比为 $2\ \text{g}\ \text{CuSO}_4 + 20\ \text{mL}\ \text{HCl} + 20\ \text{mL}\ \text{H}_2\text{O}$ 。使用 Olympus-GX-71 金相显微镜(OM)进行显微组织观察。利用带有电子背散射衍射(EBSD)装置的 Quantan-200 型扫描电镜(SEM)观察不同截面处晶粒分布及取向特征。EBSD 试样经机械抛光后,进行电解抛光。电解抛光液采用体积比为 $1:9$ 的 HClO_4 和 H_2O 混合液。利用 Channel 5 软件对 EBSD 数据进行处理与分析。使用 IPWIN 软件对枝晶间距和晶粒尺寸进行测量。采用 Procast 软件模拟螺旋段不同生长高度处横截面温度分布。

2 试验结果与讨论

2.1 引晶段显微组织演变及取向特征分析

图 2 为引晶段沿抽拉方向纵截面的宏观显微组织。可以看出,定向凝固高温合金引晶段显微组织均表现出明显的定向凝固晶体竞争生长规律,即存在明显的初始启动界面、过渡生长区及稳定生长区。在定向凝固初始阶段,凝固组织受激冷作用,大量等轴晶在水冷盘处形核,出现大量的发散生长的多取向的多晶体群,见图 2b。随着定向温度场的形成,在引晶段底部发生激烈的晶粒的竞争生长。部分生长方向与热流方向取向偏差角度较大的晶粒逐渐被淘汰,随后逐渐进入稳定生长区,见图 2c。随着引晶段生长高度的增加,受传热过程的影响,其晶粒的特征尺寸会发生变化。当竞争生长的

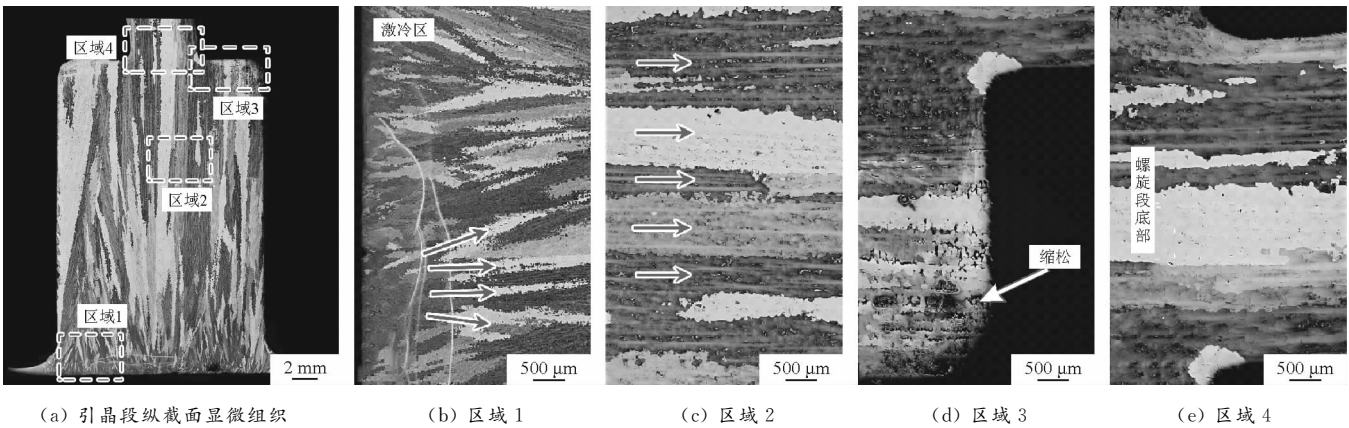


图 2 引晶段纵截面显微组织

Fig.2 Microstructure of longitudinal section of the starter block

晶体生长至引晶段顶部,位于中心位置的部分晶粒进入螺旋选晶器,将进行螺旋段的选晶过程,而其他位置的晶粒由于型壳的阻碍而停止生长,见图 2d 和图 2e。由于充型过程的影响,在引晶段顶部封闭的型壳处出现少许缩松。

图 3 为引晶段不同生长高度处横截面的微观组织。可以看出,随着生长高度增加,晶粒数量明显减少,枝晶间距逐渐增加。晶体的定向生长过程受温度梯度与过冷条件的影响,其特征尺寸发生了明显变化。在 $H=5$ mm 时,存在细小的二次枝晶。二次枝晶垂直于一次枝晶排列,随着生长高度增加,当生长高度为 10 mm 时,出现明显的二次枝晶且逐渐变长,二次枝晶的逐渐变长通常对应着一次枝晶间距的增加。图 4 为引晶段不同高度处一次枝晶间距(λ)和晶粒密度的变化。可以看出,在生长高度为 5 mm 时,一次枝晶间距为 $72\ \mu\text{m}$ 。随着竞争生长的进行,在生长高度为 20 mm 时,一次枝晶间距达到 $244\ \mu\text{m}$ 。合金在凝固时,枝晶生长形态与温度梯度 G_L 和凝固生长速率 R 有关^[10]。在定向凝固过程中,正的温度梯度主要由保温包加热区、水冷盘及

辐射散热来实现。在定向凝固初始阶段,水冷盘散热能力强,温度梯度降低明显。随着生长高度增加,散热效率逐渐降低,温度梯度的变化逐渐趋于稳定。定向凝固初期温度梯度 G_L 的逐渐降低将是导致一次枝晶间距逐渐增加的原因之一。然而,定向凝固过程晶体的生长经历复杂非稳态过程,晶体的竞争生长过程,熔体对流等因素也都将影响一次枝晶间距^[11]。此外,随着生长高度增加,晶粒密度先迅速下降随后缓慢下降最终趋于稳定。生长高度在 5 mm 以内时晶粒的密度急剧减少,当生长高度超过 10 mm 时,晶粒密度降低速率变缓。这主要是由于晶体竞争生长引起的。在 0~5 mm 范围内,初始生长区内激烈的竞争生长过程使晶粒密度的减小最迅速。在生长高度为 5~10 mm 时,一部分晶粒的竞争生长仍在进行,但此时晶粒的取向正逐渐得到优化,晶粒间的竞争生长逐渐变缓,晶粒数量降低趋势有所减缓。引晶段晶粒密度的变化可以直接体现晶体竞争生长的过程。晶粒密度的变化规律对于引晶段高度的设计具有一定的参考作用。张航等^[12]将引晶段晶粒密度随生长高度的变化曲线分为指数减小区、线性减小

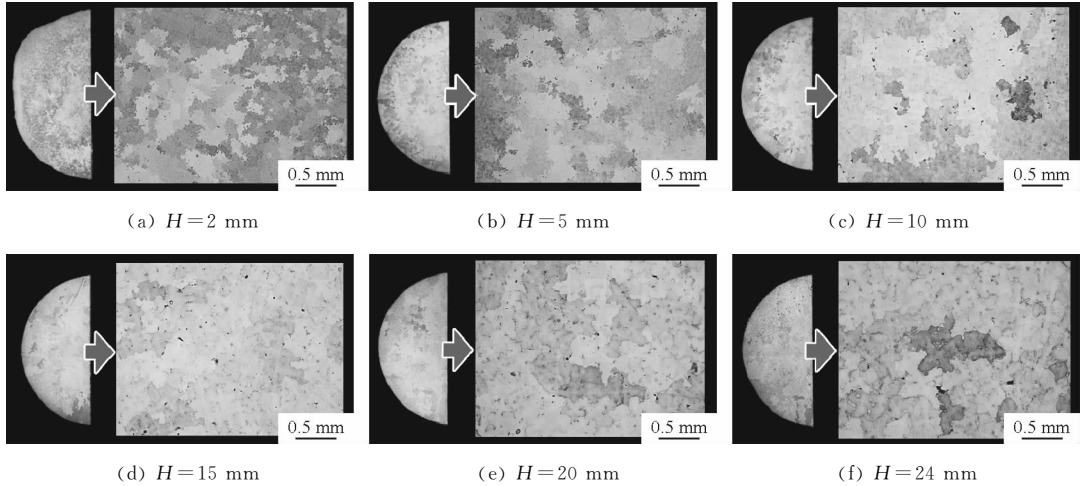


图 3 引晶段不同高度处横截面的显微组织

Fig.3 Microstructure of cross section at different heights of the starter block

区和稳定生长区。其通过模拟和试验发现引晶段高度小于 15 mm 以内为指数减小区,超过 40 mm 则进入稳定生长区。高斯峰等^[13]研究发现,晶粒数量在距离激冷板 5 mm 之内急剧减少,之后晶粒数量减少速度明显减慢且最终趋于稳定。本课题中,在生长高度为 10~15 mm 范围内属于指数减小区与线性减小区过渡区域,在超过 15 mm 高度以上逐渐进入线性减小区域。通常,引晶段高度的选择应该在晶粒密度的线性减小区,以保证一定数量的晶粒最终确定进入选晶段。但是,无论引晶段高度选择在线性减小区还是稳定生长区,前提必须是晶粒实现了充分的竞争生长,保证一定数量 $\langle 001 \rangle$ 取向与热流方向平行的晶粒进入选晶器。

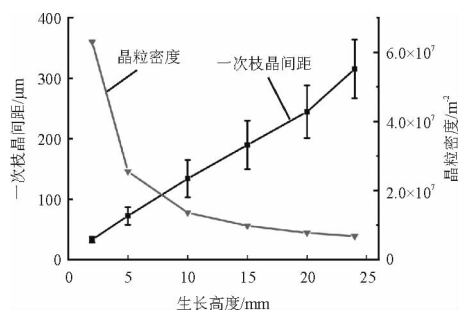


图 4 引晶段不同高度处一次枝晶间距和晶粒密度分布

Fig.4 The distribution of primary dendrite spacing and grain density at different heights in starter block

图 5 为引晶段不同高度处 EBSD 取向图及其对应极图(左下角)。引晶段底部激冷作用存在一定数量取向随机的晶粒,见图 5a。随着距引晶段底部距离的增加,生长方向与热流方向偏离角较小的晶粒保留,多个生长方向逐渐偏离 $\langle 001 \rangle$ 取向的晶粒迅速消失,整体表现出 $\langle 001 \rangle$ 取向织构明显增强。引晶段不同生长高度处各晶粒的取向偏转角度分布见图 6。可以看出,在引晶段底端 2 mm 处,晶粒取向偏转角小于 10° 的晶粒数量为 17.5%,取向偏转角大于 20° 的晶粒份数为 49%。随着生长高度的增加,取向偏转角小于 10° 的晶粒被保留,而大于 20° 的晶粒逐渐被淘汰。当生长高度超过 20 mm 以上时,引晶段内初始晶粒取向偏转角几乎都小于 10° 。目前工业上一般将叶片轴向和 $\langle 001 \rangle$ 夹角小于 10° 左右的叶片定为合格品。理论上,随着引晶段高度的增加,晶体取向逐渐优化。但是引晶段高度的进一步增加,取向优化作用逐渐减弱。此外,引晶段高度的增加还会导致其他问题。一方面,引晶段高度的增加可能会造成固液界面处温度梯度和等温线产生波动,这对于不同取向的晶粒的竞争生长产生影响^[14]。另一方面,过高的引晶段高度可能造成进入选晶段的晶粒数量较少,不能实现晶粒的优选过程。同时,引晶段高度的提高,会增加铸件的生产成本。因此,当引晶段

直径为 15 mm 时,引晶段高度应该保持在 20~30 mm^[15]。对于 CMSX-4 单晶铸件的生产过程中,其引晶段高度应该减小到 20 mm^[16]。对于 DD403 单晶合金的制备,引晶段的长度可以减小到 26 mm^[14]。GAO S F 等^[17]为了优化晶粒取向,引晶段的长度设为 35 mm。然而,在定向凝固过程中,抽拉速度、合金化学成分、浇注温度、型壳温度等都将影响晶体的生长和取向^[18]。因此,引晶段高度的确定需要从实际出发,根据凝固参数和实际的生长工艺来确定。引晶段高度在 20 mm 以上,可以实现晶粒的竞争生长。

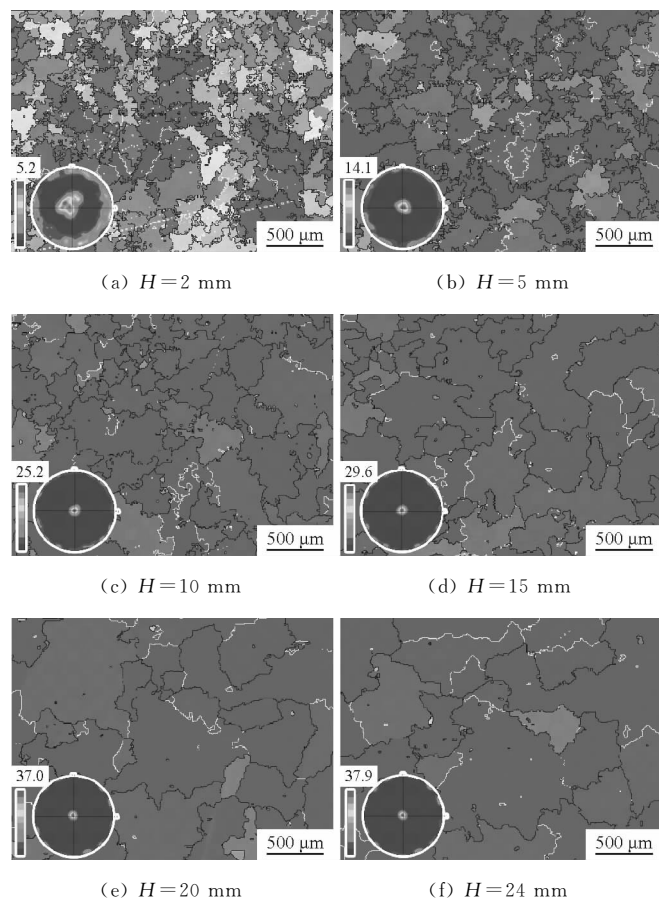


图 5 引晶段不同高度处 EBSD 取向图及对应 $\langle 001 \rangle$ 取向极图

Fig.5 EBSD orientation maps and corresponding $\langle 001 \rangle$ pole figure of the starter block at different heights

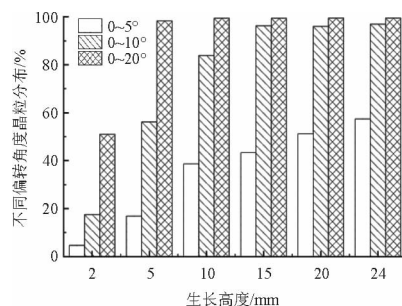


图 6 引晶段不同生长高度处晶粒取向偏转角度分布

Fig.6 Grain orientation distribution of the starter block at different heights

2.2 螺旋段选晶过程分析

螺旋段选晶过程主要通过进入引晶段的择优晶粒的竞争生长来实现的,空间几何尺寸的约束作用保证最终生长出单个晶粒,该过程的择优/择优晶粒和择优/非择优晶粒的生长对最终的选晶过程具有重要影响。为了研究选晶器螺旋段选晶过程中显微组织演化和晶体的竞争生长,对选晶器螺旋段不同高度截面处显微组织及对应的 EBSD 取向进行分析,见图 7。在经过引晶段晶粒的竞争生长后,位于引晶段中心处约有 35 个具有明显尺寸且取向良好的晶粒进入螺旋段底端,见图 7b。

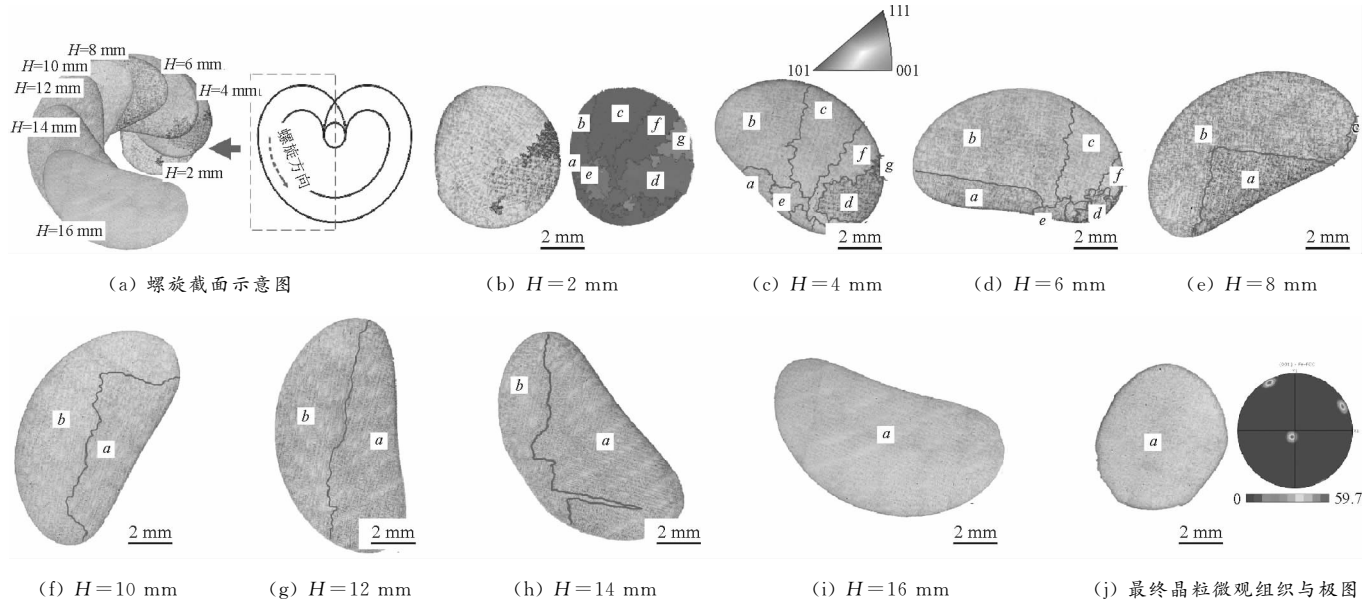


图 7 螺旋段不同生长高度处横截面显微组织及对应 EBSD 取向图

Fig.7 Microstructure and EBSD orientation maps of the spiral part at different heights

对于螺旋选晶器选晶过程,晶体在引晶段的生长过程中,竞争生长起到的选晶作用本身已经逐渐弱化。因此,在螺旋段选晶过程中,晶粒的竞争生长起到次要作用。在螺旋段选晶初期,由于晶粒数量较多,相邻晶粒枝晶臂的限制和螺旋通道的阻碍作用将占据主导地位。位于螺旋通道外侧的晶粒,其一次和二次枝晶的生长均受到限制而逐渐被淘汰。而位于螺旋段内侧前沿的晶粒,其二次枝晶具有足够的生长空间且随后发展成三次枝晶臂(成为新的一次枝晶臂)而继续生长。因此,促进螺旋段内晶粒水平方向二次枝晶的生长有利于螺旋选晶器内单晶体的实现。

此外,位于螺旋通道内侧的晶粒除了与其足够生长空间而具有生长优势外,还与螺旋段内温度分布有关。图 8 为螺旋段不同生长高度处横截面内温度梯度分布情况。可以看出,不同生长高度处横截面内温度梯度方向始终指向螺旋通道内侧。这主要是由于金属熔体与型壳之间传热能力的不同,导致螺旋段内热流始终沿着螺旋方向分布。在横截面表现出螺旋通道内侧具有较

和引晶段初始生长区变化相似,在螺旋段初始选晶阶段,同样发生着激烈的晶粒的筛选过程,晶粒数量快速减少。在螺旋段高度为 6 mm 位置处(见图 7d),晶粒数量减小至 7 个。通过对不同高度横截面处各个晶粒进行标定发现,引晶段进入螺旋段的晶粒中,位于螺旋通道内侧前沿的 *a*、*b* 和 *c* 3 个晶粒具有明显的生长优势,见图 7b~图 7e。随着进一步晶体的竞争生长,相对外侧的晶粒 *b* 和 *c* 被内侧的晶粒 *a* 淘汰,最终实现单晶的筛选过程。通过 EBSD 取向分析,晶粒 *a* 的 $\langle 001 \rangle$ 生长方向与铸件轴向的偏差角约为 8.9° 。

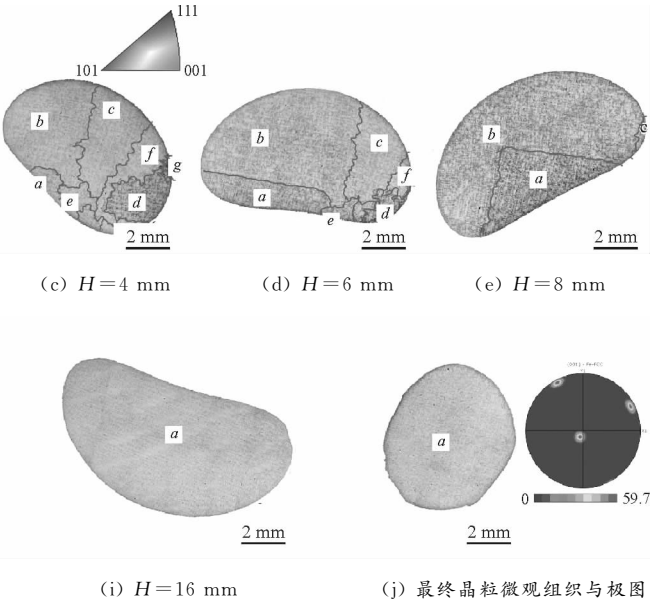


图 8 螺旋段不同生长高度处温度梯度分布

Fig.8 Temperature gradient distribution of the spiral part at different heights

随着选晶过程继续进行,晶粒数量明显减少,螺旋通道的阻碍作用导致最终生长出单晶体。图 9 为螺旋段内晶粒数量随生长高度的变化曲线。可以看出,用螺旋选晶器在约 1/3 螺旋高度处实现了单一晶粒的筛选

过程。通常,螺旋选晶器的选晶效率与螺旋段的几何参数有明显关系。通过增大螺径且降低螺距和初始角,促进晶粒二次枝晶臂水平方向的生长,在相同的高度上延长晶粒选择的路径,可以提高选晶器的选晶效率^[14,19]。

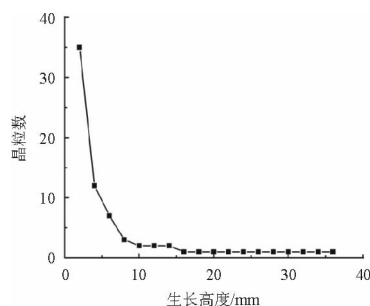


图9 螺旋段不同生长高度处的晶粒数量分布

Fig.9 Grain number distribution of the spiral part at different heights

3 结 论

(1)水冷盘激冷作用产生大量取向随机的晶粒使引晶段底部成为晶粒竞争生长的重要区域。随着引晶段高度增加,一次枝晶间距在引晶段顶部增加至 $310\ \mu\text{m}$; 同时晶粒密度降低,晶体的竞争生长逐渐减弱。

(2)随着引晶段高度增加, $\langle 001 \rangle$ 生长方向偏离热流方向的晶粒逐渐被淘汰,引晶段内 $\langle 001 \rangle$ 取向织构明显增强。当引晶段高度为 $20\ \text{mm}$ 时,引晶段内初始晶粒取向偏转角均小于 10° ,很好地实现晶粒的竞争生长,约有 35 个具有明显尺寸且取向良好的晶粒进入螺旋段。

(3)位于螺旋通道内侧前沿的晶粒,在选晶过程中占据优势。在螺旋段约 $1/3$ 螺旋高度处实现了单晶的筛选过程,单晶 $\langle 001 \rangle$ 生长方向与铸件轴向存在约 8.9° 的偏差角。

参 考 文 献

- [1] YIN B, XIE G, JIANG X W, et al. Microstructural instability of an experimental nickel-based single-crystal superalloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2020, 33(10): 1 433-1 441.
- [2] MENG X B, LU Q, ZHANG X L, et al. Mechanism of competitive growth during directional solidification of a nickel-base superalloy in a three-dimensional reference frame[J]. *Acta Materialia*, 2012, 60(9): 3 965-3 975.
- [3] YU H L, LI J, LIN X, et al. Anomalous overgrowth of converging dendrites during directional solidification[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 402(9): 210-214.
- [4] CHANG B, YANG S, LIU G, et al. Influences of cooling conditions on the liquation cracking in laser metal deposition of a directionally solidified superalloy[J]. *Metals*, 2020, 10(4): 466-474.
- [5] ZHANG X L, ZHOU Y Z, JIN T, et al. Effect of solidification rate

on grain structure evolution during directional solidification of a Ni-based superalloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2013, 29(9): 879-883.

- [6] WANG X M, HUI Y Z, HOU Y Y, et al. Direct investigation on high temperature tensile and creep behavior at different regions of directional solidified cast turbine blades[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 136(9): 103 068.
- [7] LI C H, WEI C, ZHANG R L, et al. Effects of directional solidification parameters and crystal selector on microstructure of single crystal of Ni-base superalloys[J]. *Journal of Central South University*, 2018, 25(1): 1-8.
- [8] TIAN S G, LI Q Y, SU Y, et al. Microstructure evolution and FEM analysis of a $[111]$ oriented single crystal nickel-based superalloy during tensile creep[J]. *Applied Physics*, 2015, A118(4): 1 407-1 417.
- [9] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [10] HUNT J D. *Solidification and Casting of Metals*[M]. London: The Metals Society, 1979.
- [11] 黄太文, 刘林, 张卫国, 等. 抽拉速率跃迁对定向凝固单晶高温合金 DD3 一次枝晶间距和微观偏析的影响[J]. *金属学报*, 2009, 45(10): 1 225-1 231.
- [12] 张航, 许庆彦, 孙长波, 等. 单晶高温合金螺旋选晶过程的数值模拟与实验研究: I. 引晶段[J]. *金属学报*, 2013, 49(12): 1 508-1 520.
- [13] 高斯峰, 刘林, 王柠, 等. 镍基单晶高温合金 DD3 制备过程中晶粒演化 and 选晶行为的 EBSD 研究[J]. *金属学报*, 2011, 47(10): 1 251-1 256.
- [14] MENG X B, LU Q, LI J G, et al. Modes of grain selection in spiral selector during directional solidification of nickel-base superalloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2012, 28(3): 214-220.
- [15] MENG X B, LI J G, TAO J, et al. Evolution of grain selection in spiral selector during directional solidification of nickel-base superalloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2011, 27(2): 118-126.
- [16] SEO S M, KIM I S, LEE J H, et al. Grain structure and texture evolutions during single crystal casting of the Ni-base superalloy CMSX-4[J]. *Metals & Materials International*, 2009, 15(3): 391-398.
- [17] GAO S F, LIU L, WANG N, et al. Grain selection during casting Ni-base, single-crystal superalloys with spiral grain selector[J]. *Metallurgical & Materials Transactions*, 2012, A43(10): 3 767-3 775.
- [18] ARDAKANI M G, D'SOUZA N, WAGNER A, et al. Competitive grain growth and texture evolution during directional solidification of superalloys[J]. *Superalloys*, 2000(10): 219-228.
- [19] 张航, 许庆彦, 孙长波, 等. 单晶高温合金螺旋选晶过程的数值模拟与实验研究: II. 螺旋段[J]. *金属学报*, 2013, 49(12): 1 521-1 531.

(编辑:刘晨辉)