

液态金属冷却工艺下籽晶成分 对单晶生长的影响

黄亚奇¹, 张爱民², 张金³, 郑伟¹, 申健¹, 王栋¹, 谢光¹, 卢玉章¹

(1. 中国科学院金属研究所高温结构材料研究部, 辽宁沈阳 110023; 2. 成都和泓科技股份有限公司, 四川成都 610100;

3. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

作者简介:

黄亚奇(1992-), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为单晶高温合金设计与制备工艺优化。电话: 18640393472, E-mail: yqhuang15s@imr.ac.cn

通讯作者:

卢玉章, 男, 研究员, 博士研究生。E-mail: yzlu@imr.ac.cn

中图分类号: TG132.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

12-1652-07

基金项目:

国家重点研发计划项目(2021YFB3702900、2021YFA1600603和2022YFB3705000); 哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室项目(JCKYS2022603C008); 辽宁省科学技术计划(2022JH2/101300226); 国家自然科学基金项目(52271042、U2141206和U2241283); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-C-IV-001-001); 国家科技重大专项项目(P2021-AB-IV-001-002、J2019-IV-0006-0074和J2019-VI-0010-0124)。

收稿日期:

2023-10-23 收到初稿,

2023-11-17 收到修订稿。

摘要: 利用单晶高温合金SX1、SX2分别作为籽晶和铸造材料, 进行了LMC工艺下籽晶法控制单晶高温合金晶体取向的浇注试验和数值模拟, 并对籽晶和铸件进行了解剖分析。结果表明: 当籽晶和铸造材料为同一成分时, 可以获得完整的单晶铸件, 并且籽晶与单晶铸件取向一致。当籽晶和铸造材料为不同成分时, 如果籽晶的液相线高于铸造材料的液相线, 则获得完整的单晶铸件, 并且籽晶与单晶铸件取向一致; 反之, 如果铸造材料的液相线高于籽晶的液相线, 则会在籽晶重熔界面处产生大量的杂晶形核, 并在纵向温度梯度下长大为定向柱晶, 无法获得完整的单晶铸件。数值模拟结果表明这可能是由于合金浇注后, 在抽拉过程中, 上部铸造材料由于液相线较高, 在籽晶重熔界面处优先凝固, 导致重新形核, 形成定向柱晶。因此, 在利用籽晶法进行单晶铸件取向控制时应当保证籽晶的液相线等于或者高于铸造材料的液相线, 才能获得完整的单晶组织, 并精确控制取向。

关键词: 液态金属冷却; 单晶高温合金; 取向控制; 籽晶法

单晶高温合金主要用于制造航空发动机、燃气轮机热端涡轮叶片, 其承温能力是提升发动机性能、效率和可靠性的关键技术指标^[1]。由于单晶高温合金各向异性, 单晶的一次取向偏离叶片应力轴角度过大时, 会严重影响单晶叶片的蠕变寿命^[2-4]。单晶高温合金<001>取向具有最优的综合力学性能, 工程应用中一般将单晶的一次取向与叶片应力轴的偏离夹角控制在12°~15°以内^[5-7]。另外, 叶片特定部位树枝晶的二次取向<010>与叶片表面气膜孔的位置关系也会显著影响单晶叶片的疲劳性能^[8]。因此, 为了提高单晶叶片的服役性能, 需要严格控制单晶叶片的晶体取向。

单晶晶体的取向控制方法通常有两种: 螺旋选晶法和籽晶法。螺旋选晶法是在铸件底部增加选晶器, 在起晶段先形成大量接近<001>取向的定向晶粒, 确保足够数量、取向偏离<001>较小的晶粒进入螺旋选晶段^[9], 螺旋选晶段阻挡了大部分晶粒向上生长, 最终只有一个晶粒离开螺旋段, 通过枝晶扩展形成最终的单晶组织。利用螺旋选晶法制备的单晶叶片, 由于进入螺旋选晶段晶粒取向的随机性, 根据统计其取向偏离>15°的报废叶片比例接近10%^[10]。另外, 螺旋选晶法获得的单晶合金, 其<001>取向平行或接近平行于定向凝固方向, 但<010>和<100>方向随机形成, 无法控制。

籽晶法是指在模壳底部安装特定取向的籽晶, 浇注后籽晶发生部分熔化, 晶体沿着与籽晶相同的取向生长获得单晶的方法。采用籽晶法可以获得三维取向可控的单晶, 是控制单晶取向的有效方法。尤其是对液态金属冷却(Liquid Metal Cooling, LMC)定向凝固工艺来说, 由于存在低熔点冷却介质(Sn或者Al), 很难采用传统的水冷铜结晶器, 其激冷盘的冷却效果往往低于高速凝固法(High Rate Solidification, HRS)工艺, 因此采用籽晶法可以显著提高LMC工艺的取向合格率。

国外已经在单晶叶片的制备中广泛采用籽晶进行取向控制^[10], 近年来, 国内科

研和生产单位也开始了籽晶法制备单晶叶片的研究。

由于籽晶法工艺复杂,在籽晶回熔区与模壳相接触的位置容易形成杂晶,而且隔热挡板参数、浇注温度、保温炉温度和冷却底盘的冷却效率等定向凝固工艺参数都会影响籽晶的回熔,导致籽晶引晶的失败^[11-12]。胡松松等研究了籽晶回熔区组织特征和温度场演变过程,分析了回熔区杂晶形成的影响因素和机制^[11-13]。除了凝固工艺,籽晶成分对引晶效果也有重要影响。针对籽晶表面的氧化问题,学者提出了用抗氧化合金作为籽晶来制备单晶铸件^[14]。马德新等研究认为抗氧化性能的高低对于异质籽晶材料的选取并不重要,重要的是籽晶材料的密度不能小于铸造合金^[15]。目前关于

籽晶成分和铸件成分的差异对籽晶法引晶影响的研究较少,相关机理并不完全清楚。

作者利用单晶高温合金SX1和SX2分别作为籽晶以及铸件材料,结合试验和数值模拟研究了籽晶的回熔界面形态以及晶粒外延生长行为,并对生长机理进行分析。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为某一代单晶合金SX1和某二代单晶高温合金SX2,两种合金的名义成分如表1所示。

表1 试验中所用单晶高温合金的名义成分
Table 1 Elemental composition of the single crystal superalloy used in the experiment $w_B/\%$

项目	Cr	Co	Mo	W	Ta	Re	Al	Nb	Ti	Ni
SX1	5	9	1	12	0	0	6	1.4	1.1	余量
SX2	2.5	9	1.5	6	8	2	6	0	0.2	余量

1.2 试验方法

为了便于观察树枝晶的重熔以及扩展,首先利用高速凝固法制备SX1和SX2两种单晶试棒,该工艺制备的单晶试棒较LMC工艺制备的单晶试棒具有更大的一次枝晶间距(primary dendritic arm spacing, PDAS)。利用线切割将制备的单晶试棒切割成长度为25 mm的圆柱作为籽晶,以保证熔体浇注前籽晶已发生明显的回熔。籽晶四周进行机械抛光,获得直径为16 mm的籽晶。按照正常的涂挂工艺制备浇注用的圆柱形试棒型壳,每组型壳包含6支试棒,长度为220 mm,直径为16 mm。制备的型壳经过焙烧、清洗后,进行充分干燥。

利用25 kg液态金属冷却定向凝固设备(ZGD-25),进行单晶试棒的定向凝固试验。冶炼前,将制备好的籽晶从型壳底部放入型壳内部,保持籽晶与试棒的紧密配合,籽晶底部与型壳底部平齐,处于同一水平面上。为保证试验条件的一致性,在每组型壳的试棒内间隔放入3个SX1和3个SX2的籽晶。将带有籽晶的型壳放置在LMC设备激冷盘上并固定。LMC定向凝固工艺采用上区加热温度1 500 °C,下区加热温度1 520 °C,该温度设定可以保证两种籽晶都可以部分熔化。浇注温度1 550 °C,浇注合金后静置10 min,型壳与合金的温度相同后,按照9 mm/min的拉速进行抽拉。分别利用SX1和SX2两种合金各进行两组浇注试验。浇注后对单晶铸件进行宏观腐蚀,观察表面晶粒。然后将籽晶沿着中心线进行纵剖,并且从籽晶底部开始,在10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、

60 mm、100 mm和200 mm处进行横剖。将样品研磨和抛光并清洗,使用硫酸铜腐蚀试剂进行腐蚀,利用金相显微镜(Optical Microscope, OM)观察籽晶、回熔界面以及浇注合金内部的树枝晶演化行为。在籽晶底部和单晶试棒的顶部切取晶体取向测试样品,经过磨抛、电解腐蚀,利用电子背散射衍射(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD)技术进行取向测定。利用ProCAST进行籽晶法单晶铸件凝固过程的数值模拟,观察温度场和固相率的演化情况。边界条件的设置方案按照文献[16]进行。

2 结果与分析

2.1 试验结果

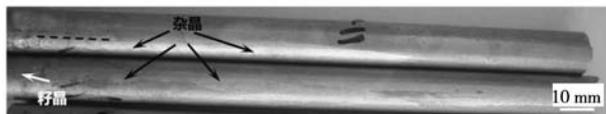
通过对定向凝固后的单晶试棒进行宏观腐蚀发现,并非所有试验组都能引晶成功(表2)。当浇注合金为SX1时,不论籽晶的成分是SX1还是SX2,经过定向凝固后,试棒都为单晶组织(典型结果如图1a所示);当浇注合金为SX2时,籽晶的成分是SX1的试棒表面为大量的杂晶(典型结果如图1b所示),即引晶

表2 单晶试棒宏观晶粒结果
Table 2 Results of the macrostructure of the single crystal bars

籽晶 合金	浇注合金	
	SX1	SX2
SX1	单晶	杂晶
SX2	单晶	单晶



(a) 浇注合金为SX1且籽晶成分为SX1



(b) 浇注合金为SX2且籽晶成分为SX1

图1 单晶试棒宏观晶粒

Fig. 1 The macrostructures of the single crystal bars

失败，而籽晶成分为SX2的试棒表面仍然为单晶组织。

为了进一步观察籽晶回熔界面的树枝晶形态以及籽晶内部的树枝晶演化，对单晶试棒沿着如图1a所示的中心线进行纵剖，纵剖高度为40 mm。

籽晶成分和浇注合金成分均为SX1的单晶试棒，其纵剖界面如图2所示。

从图2中树枝晶的形态可以看出，在籽晶的25 mm 高度范围内，呈现出3个明显不同的区域：S区，高度

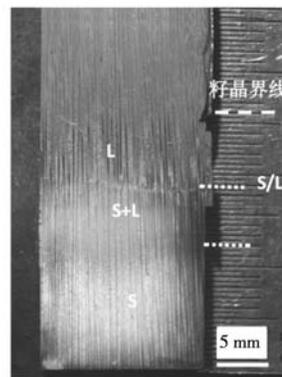
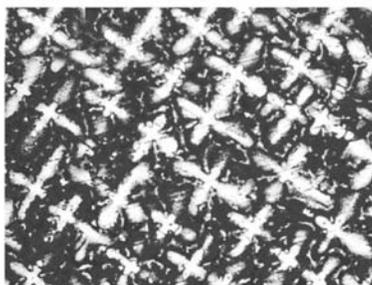


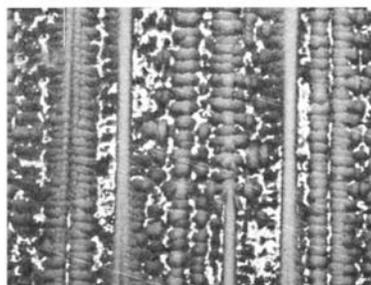
图2 籽晶成分和浇注合金成分均为SX1的单晶试棒籽晶纵剖

Fig. 2 The microstructures of the seed along the longitudinal direction, when the seeds and components were SX1

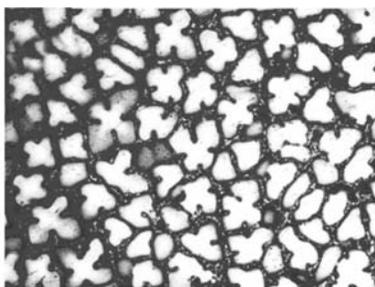
约为12 mm，是籽晶最下部未熔化的固相区，该区域底部与LMC工艺的激冷盘相接触，温度较低，处于合金SX1的固相线以下，在定向凝固的加热过程中未出现熔化现象，保持了原有树枝晶的形态；横向以及纵向树枝晶如图3a所示；S+L区，高度约为7 mm，位于籽



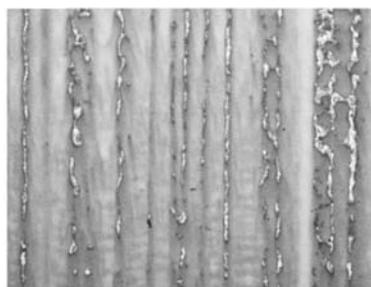
(a1) S区 (横向组织)



(a2) S区 (纵向组织)



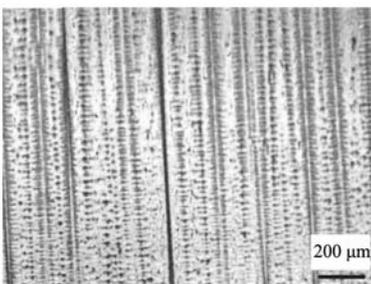
(b1) S+L区 (横向组织)



(b2) S+L区 (纵向组织)



(c) L区 (横向组织)



(c2) L区 (纵向组织)

图3 籽晶不同部位的树枝晶形貌

Fig. 3 The morphologies of the dendrites in the seed

晶未熔化部位的上部，在籽晶的保温过程中处于糊状区，树枝晶的形貌逐渐消失，二次枝晶变得短粗；横向以及纵向树枝晶如图3b所示；L区，高度约为6 mm，位于籽晶的最顶端，该部分在加热的过程熔化为液体，在后续的抽拉过程中，重新生长为树枝晶，一次枝晶间距明显变小，且枝晶干变细小，但是三次树枝晶发达；横向以及纵向树枝晶形态如图3c所示。

S/L处是原始籽晶熔化后重新生长的界面，树枝晶形貌如图4所示，可以看出该界面上部的树枝晶数量明显增多，界面处的树枝晶呈现几种典型的特点：①部分树枝晶取向发生偏离，但是这种取向偏离的树枝晶并未长大；②一次树枝晶发生分叉；③三次树枝晶扩展长大。

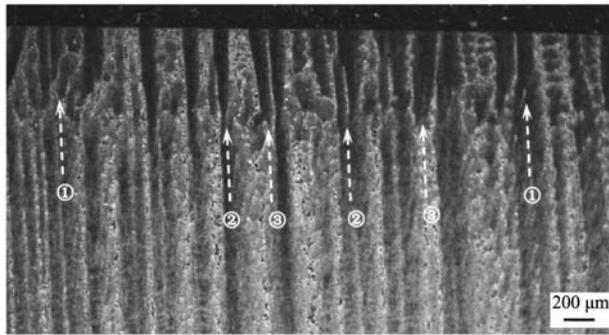


图4 S/L界面处的树枝晶形貌
Fig. 4 The morphologies of the dendrites in the seed at the S/L interface

从籽晶底部10 mm位置（籽晶的S区，保持籽晶原始树枝晶形貌）开始统计的单晶试棒PDAS结果如图5所示，由于籽晶为HRS工艺制备，PDAS为360 μm左右，但是在后续树枝晶的生长过程中，树枝晶并未延续籽晶的一次枝晶间距，而是进一步细化，40 mm高度以上平均PDAS稳定在200 μm左右。

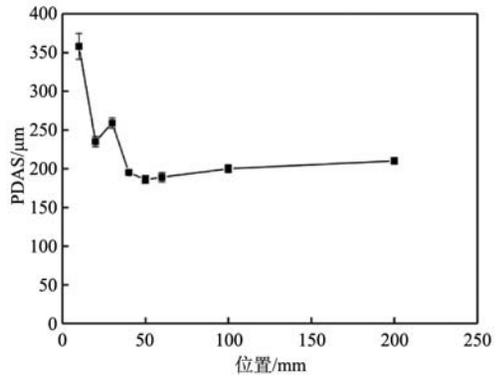


图5 单晶试棒的PDAS统计
Fig. 5 The distribution of PDAS for single crystal bars

利用EBSD测试的籽晶以及单晶试棒的取向分布如图6所示，可以看出单晶试棒的取向继承了籽晶的晶体取向，两者基本一致。

在籽晶为SX2，后浇注合金为SX1、SX2的单晶试棒中也观察到了类似上述树枝晶的分区以及不同分区树枝晶的形貌，单晶试棒的取向也继承了籽晶的晶体

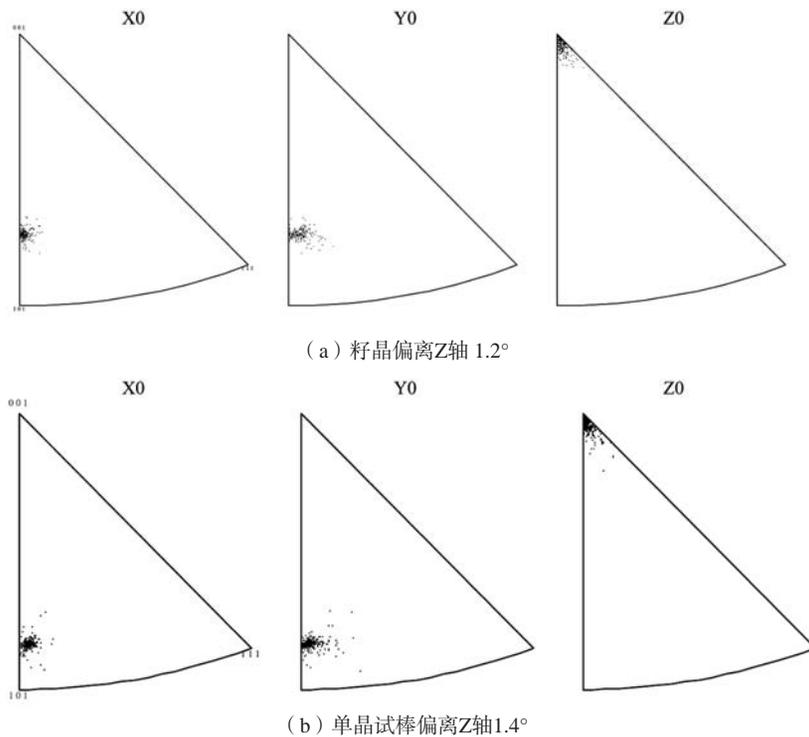


图6 晶体取向测试结果
Fig. 6 The result of the orientation test

取向。

但是对籽晶为SX1，后浇注合金为SX2的单晶试棒的籽晶部位进行纵剖，发现籽晶重熔界面处，存在大

量的定向柱晶，后浇注的合金并没有延续籽晶内部树枝晶的生长，如图7所示。这导致宏观腐蚀后的试棒表面观察到了大量的柱晶。

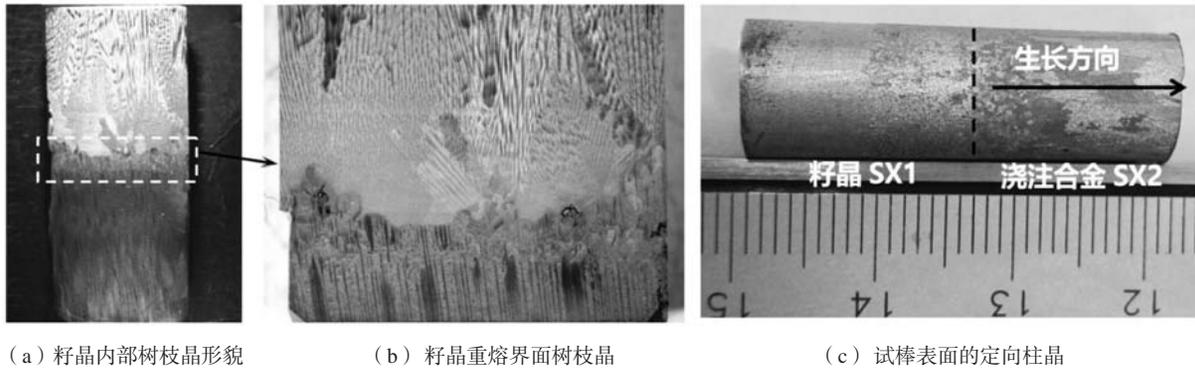


图7 籽晶为SX1，后浇注合金为SX2的单晶试棒

Fig. 7 The single crystal bar with SX1 seed and SX2 component

2.2 讨论与分析

2.2.1 籽晶与浇注合金同质组合

对于这种组合，学者们进行了大量的研究^[16-18]，由于籽晶与浇注合金的成分相同，只要合理控制保温炉温度和籽晶的高度，抑制籽晶回熔界面和籽晶周围的杂晶，就很容易得到完整的单晶试棒。后浇注合金的PDAS也会继承籽晶的PDAS，表现出PDAS选择的相关性^[18-20]。但是在本试验中，为了便于观察树枝晶的扩展，籽晶选择了HRS工艺制备，单晶试棒的浇注试验则采用了LMC工艺。在后续铸件抽拉过程中，由于LMC工艺大的温度梯度，籽晶的S+L区呈现出平界面特征，定向凝固开始后由于界面失稳导致重新形成枝晶，新晶体的PDAS由凝固参数（温度梯度和凝固速率）决定，与籽晶的原始一次枝晶间距无关。在LMC高的温度梯度作用下，树枝晶通过扩展、分叉的方式不断细化，最终到达稳态，得到了较原始籽晶更为细小的树枝晶组织，如图4和图5所示。Hallensleben等的研究也表明在籽晶回熔的界面处会产生大量的新树枝晶^[19]，这些树枝晶中取向偏离大的树枝晶被逐渐淘汰，从籽晶原始树枝晶中通过分叉、三次枝晶扩展等方式出现的新树枝晶，其取向与籽晶树枝晶一致，则会存活下来，在高的温度梯度下，变成细化的树枝晶组织。

2.2.2 籽晶与浇注合金异质组合

籽晶与浇注合金异质组合中，籽晶为SX2、浇注合金为SX1的组合得到了完整的单晶试棒，而籽晶为SX1、浇注合金为SX2的组合却引晶失败，产生大量的等轴晶。马德新等认为籽晶的密度小、浇注合金的密度大，密度差造成液体中呈现出下轻上重的非稳状

态，导致对流的产生，被熔断和冲断的枝晶碎臂有的滞留在籽晶的枝晶之间，这可能是产生杂乱晶粒产生的原因^[15]。马德新的研究中，仅是在籽晶的重熔界面处产生了少量的杂晶，大部分树枝晶仍然延续了籽晶的树枝晶生长，但是本文中籽晶回熔界面处的杂晶形貌明显异于上述研究。通过数值模拟发现，浇注合金的液相线显著高于籽晶的液相线是导致本研究中杂晶出现的一个重要原因，如图8所示。研究中所用的SX2合金的液相线为1381℃，而SX1合金的液相线为1345℃。SX2的液相线显著高于SX1合金的液相线。图8a为合金SX2浇注完成，静置10 min以后，定向抽拉刚刚开始时合金的凝固状态，此时定向凝固刚刚开始。随着抽拉的进行，抽拉时间为120 s时，成分为SX1的籽晶，按照自下而上的顺序不断凝固。随着籽晶原始界面与浇注的SX2合金的界面逐渐进入动态隔热层（图中黑色曲线为动态隔热层的位置，动态隔热层下部为冷却介质Sn），该处的SX2合金也产生了凝固的现象。随着抽拉的进行，籽晶固相率不断增加的同时，上部SX2合金的固相率也不断增加。上述现象的出现是由于在底部籽

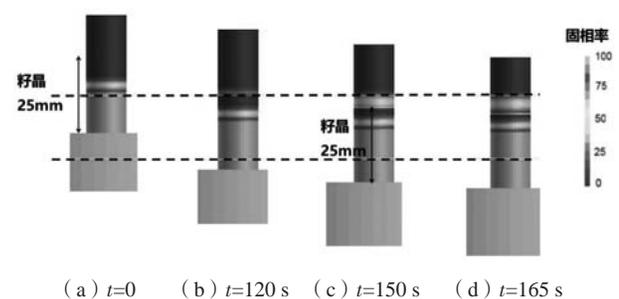


图8 籽晶为SX1、浇注合金为SX2的单晶铸件抽拉过程的固相率
Fig. 8 Solid fraction of the single crystal bar with SX1 seed and SX2 component during the withdrawal process

晶树枝晶没有生长到籽晶回熔界面位置时,上部的SX2合金已经产生了熔体内部的形核,先于籽晶凝固,并出现了定向生长的现象。

计算了浇注的SX2合金位于SX1籽晶以上1 mm位置的点(ID=7 201)的温度演化结果,如图9所示。可以看出当抽拉时间为120 s时,该点的温度为1 378 °C,已经低于SX2合金的液相线(1 381 °C),开始出现凝固现象。而籽晶上端的温度仍然高于其液相线,处于液相状态(图8)。随着凝固的进行,该点温度不断降低,当抽拉时间为150 s和165 s时,分别为1 368 °C和1 362 °C(图9c和图9d),固相率不断增加。而此时籽晶上端的温度虽然也出现了降低,但是仍然高于其液相线,处于液相状态(图8)。

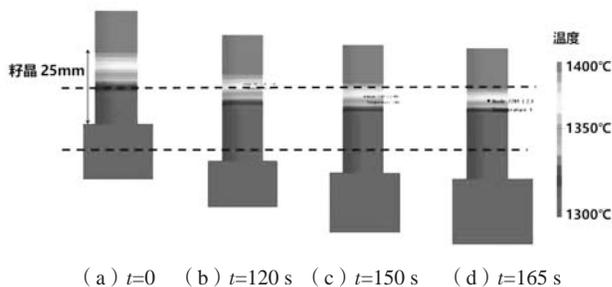


图9 籽晶为SX1、浇注合金为SX2的单晶铸件抽拉过程的温度场
Fig. 9 Thermal field of the single crystal bar with SX1 seed and SX2 component during the withdrawal process

在籽晶为SX2,后浇注合金为SX1的组合中,由于合金SX1的液相线低于SX2合金的液相线,当凝固前沿到达两者之间的界面时,SX1合金则未出现先行凝固的现象,仍然为顺序凝固,最终可以获得完整的单晶试棒,如图10所示。

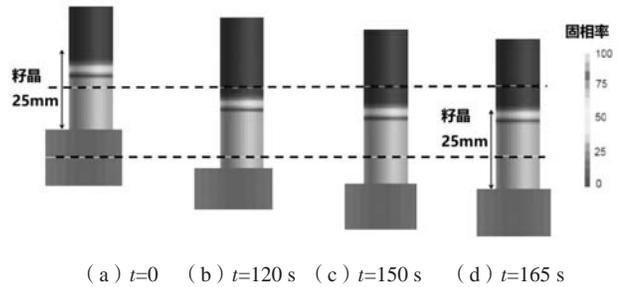


图10 籽晶为SX2、浇注合金为SX1的单晶铸件抽拉过程的温度场
Fig. 10 Thermal field of the single crystal bar with SX2 seed and SX1 component during the withdrawal process

但是需要指出的是,由于SX2籽晶比SX1籽晶有更高的液相线温度,因此为了保证两种籽晶在合金浇注之前都能熔化一定高度,必须合理地调整冷却底盘的位置,使籽晶部位的温度足够高,保证两种籽晶的充分熔化。

3 结论

(1) 当籽晶和铸造材料为同一成分时,可以获得完整的单晶铸件,并且籽晶与单晶铸件取向一致。

(2) 由于LMC工艺高的温度梯度,利用HRS工艺制备的PDAS粗大的籽晶,仍然可以使单晶铸件获得PDAS约200 μm的细小树枝晶组织。

(3) 当籽晶和铸造材料为不同成分时,如果籽晶的液相线等于或者高于铸造材料的液相线,则获得完整的单晶铸件,并且籽晶与单晶铸件取向一致;反之,则无法获得完整的单晶铸件。

(4) 后浇注合金液相线较高,在籽晶回熔界面处优先凝固,导致重新形核,是产生定向柱晶、导致引晶失败的一个重要原因。

参考文献:

- [1] 张健,王莉,王栋,等.镍基单晶高温合金的研发进展[J].金属学报,2019,55(9):1077-1094.
- [2] 申健,卢玉章,郑伟,等.DD26镍基单晶高温合金的高温持久性能各向异性[J].沈阳工业大学学报,2014,36(1):28-33.
- [3] 岳珠峰,吕震宙,杨治国,等.晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响[J].航空动力学报,2003,18(4):477-480.
- [4] 窦学铮,蒋立武,宋尽霞,等.镍基单晶高温合金力学性能各向异性的研究进展[J].材料导报,2022,36(24):21040222-1-15.
- [5] ZHU X, WANG F, MA D, et al. Development of a high-efficiency Z-form selector for single crystal blades and corresponding grain selection mechanism[J]. Materials, 2019, 12(5): DOI 10.3390/ma12050780.
- [6] 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.
- [7] MENG X B, LI J G, JIN T, 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.
- [8] ZHOU Z J, WANG L, WANG D, et al. Effect of secondary orientation on room temperature tensile behaviors of Ni-base single crystal superalloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 659(6): 130-142.
- [9] 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[J].金属学报,2013,49(12):1508-1531.
- [10] REED R C. The superalloys fundamentals and applications[M]. London: Cambridge University Press, 2006.

- [11] 胡松松. 第三代镍基单晶高温合金晶体取向及杂晶控制研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- [12] YANG W C, HU S S, HUO M, et al. Orientation controlling of Ni-based single-crystal superalloy by a novel method: grain selection assisted by un-melted reused seed [J]. *Journal of Materials Research & Technology*, 2019, 8 (1): 1347–1352.
- [13] HU S S, LIU L, YANG W C, et al. Inhibition of stray grains at melt-back region for re-using seed to prepare Ni-based single crystal superalloys [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2019, 29 (5): 582–586.
- [14] FORD D A, HILL A D. Single crystal seed alloy: US6740176B2 [P]. 2004-05–25.
- [15] 马德新, 赵运兴, 徐维台, 等. 高温合金籽晶材料对单晶外延生长的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33 (2): 445–454.
- [16] HUANG Y Q, SHEN J, WANG D, et al. Evolution of sliver defect in Ni-based single crystal superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51 (12): 6364–6372.
- [17] HUANG W D, GENG X G, ZHOU Y H, et al. Primary spacing selection of constrained dendritic growth [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1993, 134 (1–2): 105–115.
- [18] 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): 1225–1231.
- [19] HALLENSLEBEN P, SCHAAR H, THOME P, et al. On the evolution of cast microstructures during processing of single crystal Ni-base superalloys using a Bridgman seed technique [J]. *Materials Design*, 2017, 128 (8): 98–111.
- [20] 刘晓功, 饶洋, 刘培元, 等. 温度梯度对籽晶法制备镍基单晶高温合金DD6凝固组织的影响 [J]. *铸造*, 2022, 71 (4): 415–419.

Effect of Seed Composition on Single Crystal Growth During LMC Process

HUANG Ya-qi¹, ZHANG Ai-min², ZHANG Jin³, ZHENG Wei¹, SHEN Jian¹, WANG Dong¹, XIE Guang¹, LU Yu-zhang¹

(1. Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110023, Liaoning, China; 2. Chengdu Hehong Technology Company Limited, Chengdu 610100, Sichuan, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Liquid Metal Cooling (LMC) directionally solidified (DS) experiment and numerical simulation were conducted based on seed method using single-crystal superalloy (SX) SX1 and SX2 as materials. The seeds and castings were cut to observe the microstructure of the dendrites. It was found that the complete SX casting can be achieved with the same orientation between casting and seed when the same materials were used in casting and seed. In case of different composition between seed and casting, the complete SX casting can also be obtained with preferred <001> orientation if the liquidus of seed was higher than that of casting. Otherwise DS structure would be found from stray grain formed at meltback interface of seed, which indicated that SX growth was failed. The numerical simulation results show that casting material with higher liquidus than that of seed can solidify preferentially from meltback interface and DS structure formed subsequently during withdrawing. Therefore, it is necessary for orientation control to ensure that the liquidus line of seed is equal to or higher than that of casting during seed method.

Key words:

liquid metal cooling; single-crystal superalloy; orientation controlling; seed method