

微量氮对 DD33 单晶高温合金雀斑形成倾向的影响

姜卫国^{1, 2}, 韩东宇³, 李相伟⁴, 董琳^{1, 2}, 李凯文³, 肖久寒³, 卢玉章³, 李强^{1, 2}

(1. 潍坊科技学院, 山东寿光 262700; 2. 潍坊市先进动力系统用热端材料及单晶部件制备重点实验室, 山东寿光 262700;

3. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016; 4. 东莞材料基因高等理工研究院, 广东东莞 523808)

摘要: 通过扫描电镜、能谱及差示扫描量热仪等手段研究了不同氮含量 (0.000 2%与 0.005%) 对 DD33 单晶高温合金中雀斑缺陷的影响。利用 ProCAST 与 JMatPro 分别模拟了铸件糊状区的形状与熔体流体粘度。结果表明: 随氮含量的提高, 合金凝固温度区间减小, 枝晶间共晶体积分数减少, 一次枝晶间距及糊状区流体粘度增大; 粘度增加使糊状区热溶质对流强度及枝晶间液体径向补缩流动变弱, 最终导致定向凝固过程中雀斑形成倾向降低。

关键词: 单晶高温合金; 显微孔洞; 糊状区; 粘度; 雀斑缺陷

雀斑是单晶高温合金铸件中产生的严重铸造缺陷, 严重损害合金性能, 增加铸件制备成本, 铸件在使用过程中还可能存在一定的安全隐患^[1-4]。

研究表明, 雀斑形成与凝固过程中元素的偏析密切相关^[5-9]。随着单晶高温合金性能的提高, W 和 Re 的含量不断提高, 偏析程度增大, 导致糊状区密度的差别更大, 形成雀斑的几率更大^[9-11]。因此, 控制雀斑形成是单晶高温合金铸件中的热点问题之一。

一般, 提高定向凝固过程中的温度梯度可明显抑制雀斑的形成^[12]。高抽拉速率条件下, 糊状区厚度变小, 枝晶对热溶质对流阻挡作用增强^[4]。高冷却速率条件下, 温度梯度得到提高^[13], 细化枝晶降低了热溶质对流强度, 这可减轻雀斑的形成倾向。

单晶铸件几何形状同样影响雀斑缺陷的形成^[1, 4, 14-17], 粗大的铸件、铸件的厚大部位或传热条件较差的铸件内侧散热困难, 难以形成较大的凝固速率和获得较高的温度梯度, 从而容易导致雀斑缺陷的形成。

单晶高温合金成分控制是控制雀斑形成最有效的手段。合金中加入一定的 Ta 元素可降低 W 和 Re 的偏析并降低糊状区的密度差别, 这有利于抑制雀斑的形成, 但也导致合金成本的提高^[9]。研究发现, 单晶合金中加入微量 C ($400 \times 10^{-6} \sim 1\ 000 \times 10^{-6}$) 形成的网状碳化物可以降低枝晶间的对流程度, 这可有效抑制雀斑的产生^[3, 8, 18], 但 C 的添加会降低合金的持久性能, 合金中 C 含量为 320×10^{-6} 时, 其持久性能甚至下降一半^[19]。当含 C (500×10^{-6}) 合金中加入微量 B 元素时, 可降低凝固缺陷形成倾向, 加入 $2 \times 10^{-6} \sim 23 \times 10^{-6}$ 的 N 时, 合金中析出的碳化物从草书体转为块状^[20], 而块状碳化物并不能减轻枝晶间的对流强度, 反而导致小角度晶界、取向偏离及条纹晶等缺陷数量增加^[18]。

由此可见, 添加微量 C 或 C+B 控制雀斑形成缺陷是有效的, 添加微量 C+N 反而促进缺陷形成, 但是 N 的作用尚不清楚。N 元素在高温合金中很难完全去除, 特别是在高温环境下, 合金中含 N 量可能更高, 甚至超过 0.01%^[21-22], 明晰不同含量 N 对单晶高温合金中雀斑缺陷形成倾向的影响变得十分必要。

作者简介:

姜卫国 (1968-), 男, 教授, 博士, 研究方向为单晶高温合金叶片制备工艺及凝固缺陷控制。E-mail: jwg@wfust.edu.cn

中图分类号: TG21
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)04-0375-07

基金项目:

国家自然科学基金项目 (51674235)。

收稿日期:

2022-04-28 收到初稿,
2022-07-16 收到修订稿。

1 试验材料及方法

试验用合金为第三代镍基单晶高温合金DD33，其名义成分为Cr2.5，Co9.0，W6.0，Mo1.5，Re4.0，Al6.0，Ti0.2，Ta8.0，Hf0.1，C0.01，余量为Ni（质量分数，%）。N元素在合金熔炼过程中以CrN中间合金方式加入，采用高速凝固工艺（HRS）制备了单晶板铸件，每个成分合金铸件各6件，铸件空间位置及具体尺寸见图1。为减少浇注压头的影响，采用定量熔体浇注，保证所有铸件高度一致。合金浇注温度1 520 ℃，保温炉温度1 500 ℃，为清晰观察雀斑缺陷，抽拉速率选低速率为1 mm/min，定向凝固结束后，采用化学分析方法测得铸件合金中N含量分别为0.000 2%（质量分数，下同）和0.005%。

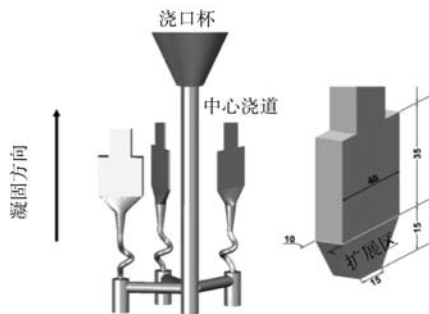


图1 铸件空间位置及尺寸示意图

Fig. 1 Schematic of spatial position and size of castings

单晶板宏观组织腐蚀剂为盐酸（75% Vol.）+双氧水（25% Vol.），腐蚀后观察雀斑组织并测量雀斑长度，统计其平均长度值。在单晶板铸件同一高度并垂直于定向凝固[001]方向，采用电火花线切割切取试样，用于组织观察及凝固范围测试。使用Zeiss Stem508体视显微镜和INSPECT F50场发射扫描电子显微镜（SEM）分别观察雀斑缺陷形貌及合金铸态枝晶组织，使用软件Image Tool和Image Pro Plus分别对铸态合金的一次枝晶间距及合金的微孔体积分数与共晶体积分数进行统计，至少选取5个视场进行测量，计算平均值并作为统计结果。其中，一次枝晶间距的计算公式为：

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{S}{N}} = \sqrt{\frac{1}{n_1}} \quad (1)$$

式中： λ_1 为一次枝晶间距； S 为视场所包含的面积； N 为视场内所包含的枝晶数； n_1 为单位面积内的枝晶数。

合金凝固温度区间采用差示扫描量热仪（DSC）测量，升温速度为10 K/min，最高温度为1 450 ℃，然后随炉冷却。

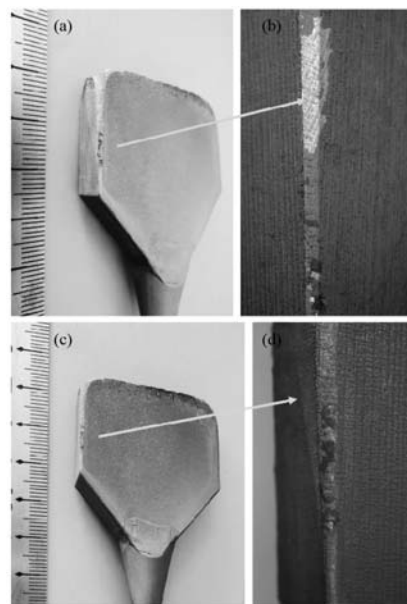
采用ProCAST软件模拟不同含氮合金的定向凝固过程，模拟热参数见参考文献[4]。同时，利用JMatPro软件模拟计算两种不同含N量合金在糊状区温度附近的粘度变化情况。

2 结果与讨论

2.1 不同氮含量合金组织特征及凝固模拟

单晶铸件中雀斑分布具有一定的棱角效应，通常分布于棱角位置。图2为不同氮含量单晶铸件宏观形貌，所有铸件在面向直浇道方向的棱角处都有雀斑缺陷形成。图3为统计的雀斑缺陷平均长度，含氮0.005%合金铸件中雀斑平均长度为10 mm，而含氮0.000 2%合金铸件中平均雀斑长度为18 mm。可见，高氮含量铸件中雀斑倾向明显减轻。

低倍组织观察发现，两种合金中的铸态孔洞存在明显差别。图4为不同合金中的铸态微孔形貌及分布情况，可以看出，低氮合金中微孔尺寸相对较小，见图4a、b，微孔体积分数只有0.02%，高氮合金中孔的尺寸较大且分布范围广，统计的微孔体积分数范围为0.08%~0.12%，见图4c、d。



(a)、(b) 0.000 2%；(c)、(d) 0.005%

图2 单晶高温合金铸件雀斑缺陷

Fig. 2 Freckle defects of the single crystal superalloy castings

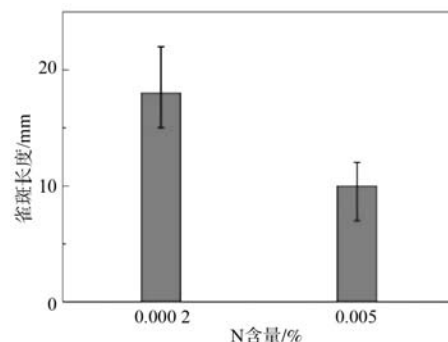


图3 不同含氮量单晶高温合金铸件的雀斑长度

Fig. 3 Freckle lengths of the single crystal superalloy castings with different nitrogen contents

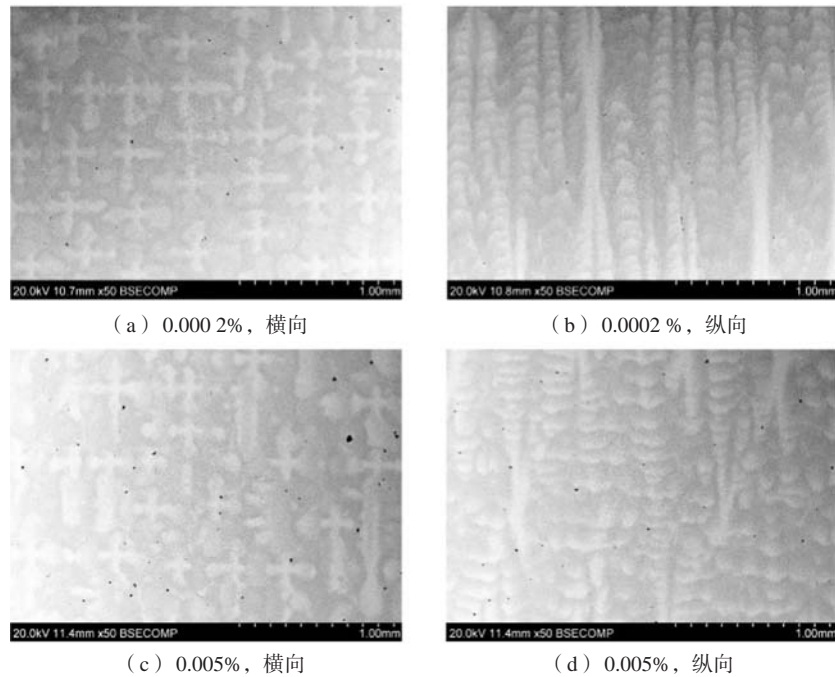


图4 不同氮含量单晶高温合金铸态下微孔形貌

Fig. 4 Morphologies of the micro-porosity in the as-cast state of the single crystal superalloys with different nitrogen contents

在试样横、纵截面观察了不同合金铸件中的枝晶及共晶组织。图5为不同含氮量合金横截面铸态枝晶组织，可以看出，高氮含量合金中一次枝晶粗大，其二次枝晶发达，一次枝晶间距统计结果为 $(516 \pm 12) \mu\text{m}$ ，而低氮含量合金一次枝晶间距为 $(462 \pm 8) \mu\text{m}$ 。共晶作为枝晶间最后凝固的部分，其含量可以反映偏析的程度。由于存在枝晶偏析，凝固过程中枝晶间液相富

集Al、Ta等元素，当枝晶间液相达到共晶成分点时，发生 $L \rightarrow \gamma + \gamma'$ 共晶转变。枝晶间残余液相越多，偏析越严重，共晶含量也越高。定量金相统计结果显示，低氮含量单晶合金中为2.6%~3.5%，高氮合金铸态下的共晶含量为1.58%~1.87%，氮含量增加明显降低了合金中的共晶体积分数。图6为不同含氮量合金纵截面铸态枝晶组织，高氮合金中的孔洞多分布于枝晶间或靠近

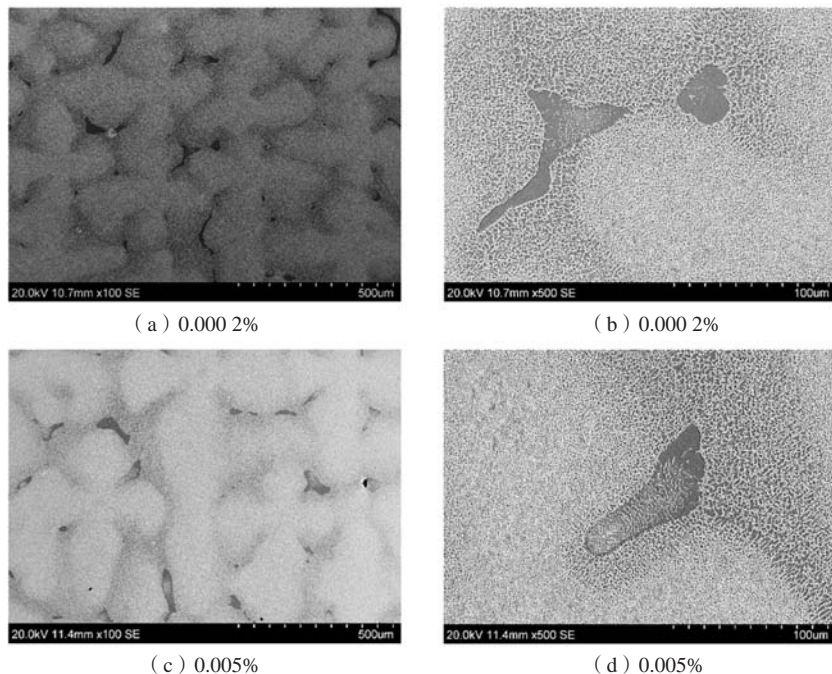


图5 合金横截面铸态枝晶组织

Fig. 5 As-cast dendrite micrographs in the as-cast state at transverse section of different alloys

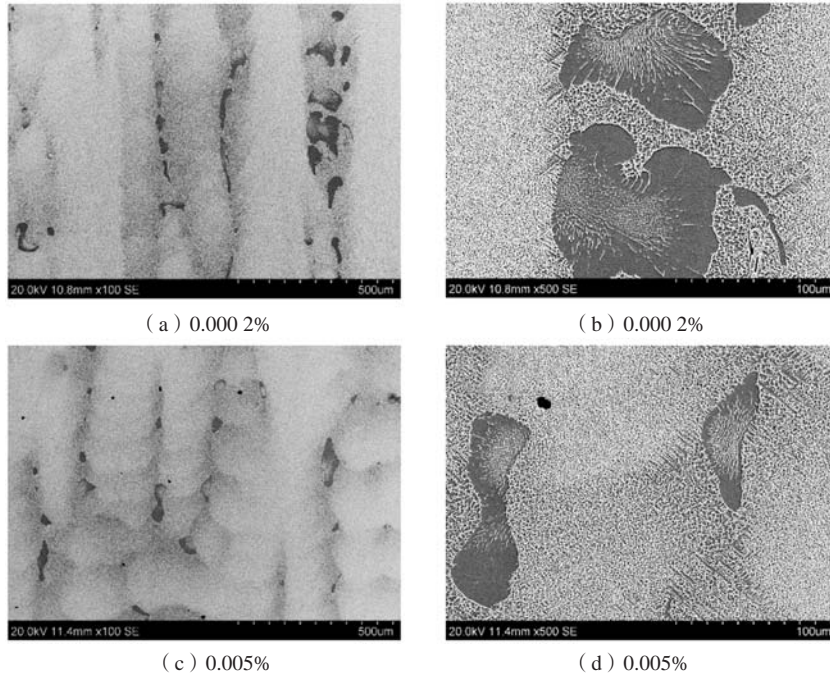


图6 合金纵向截面铸态枝晶组织

Fig. 6 Dendrite micrograph in the as-cast state at longitudinal section of different alloy

共晶；同时，共晶尺寸明显小于低氮合金。

微量N元素的添加影响合金的固/液温度及凝固区间大小，图7为不同氮含量合金的凝固温度区间DSC测试结果。合金中氮含量为0.000 2%时，其液相线温度为1 375.6 ℃，固相线温度为1 341.4 ℃，凝固温度区间为34.2 ℃；合金中氮含量为0.005%时，其液相线温度为1 371.5 ℃，固相线温度为1 340.5 ℃，凝固温度区间为31 ℃。

图8a为铸件顶部自由界面形貌，从铸件顶部可以清楚看出，枝晶间补缩的流线痕迹，见箭头所指位置。枝晶间液体补缩流动方向从炉壁指向中心直浇道方向。不同氮含量单晶合金定向凝固糊状区模拟结果见图8b，模拟结果表明，两者糊状区形状差别不大，糊状区厚度基本相同，靠近直浇道位置部分先凝固，

而远离部分后凝固，后凝固区域对先凝固区域进行补缩，由于控制了铸件高度，可以清晰观察到凝固补缩形成的液体流线，模拟结果与试验结果基本一致。

图9a为不同氮含量合金在凝固糊状区附近的粘度随温度变化模拟结果。可以看出，粘度随温度升高明显降低，但不同含氮量合金的趋势却存在一定差别，含氮0.005%合金降低趋势更明显。图9b为图9a中黑色方框内的局部放大图，可见，不同氮含量合金的粘度

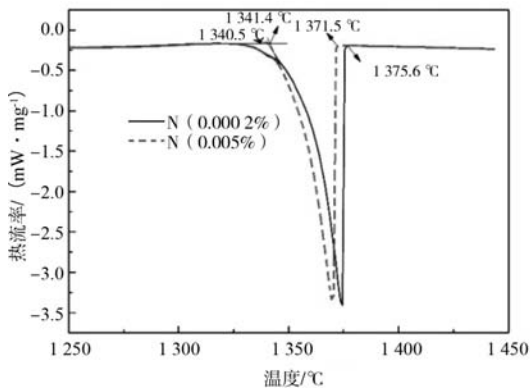


图7 不同氮含量合金的凝固温度区间

Fig. 7 Solidification temperature ranges of the alloys with different nitrogen contents

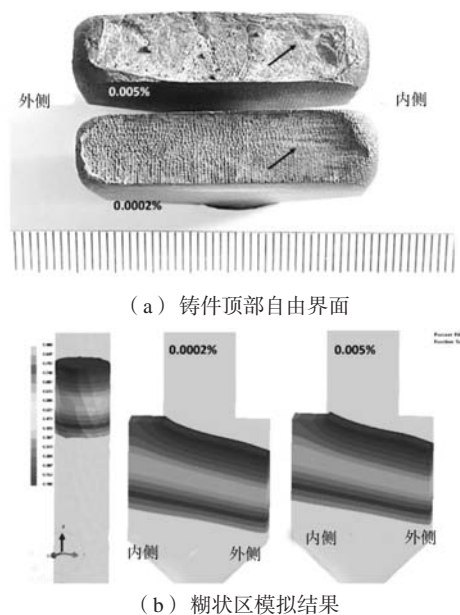


图8 铸件自由表面与糊状区模拟结果

Fig. 8 Simulation results of the free surface of the castings and the mushy zone

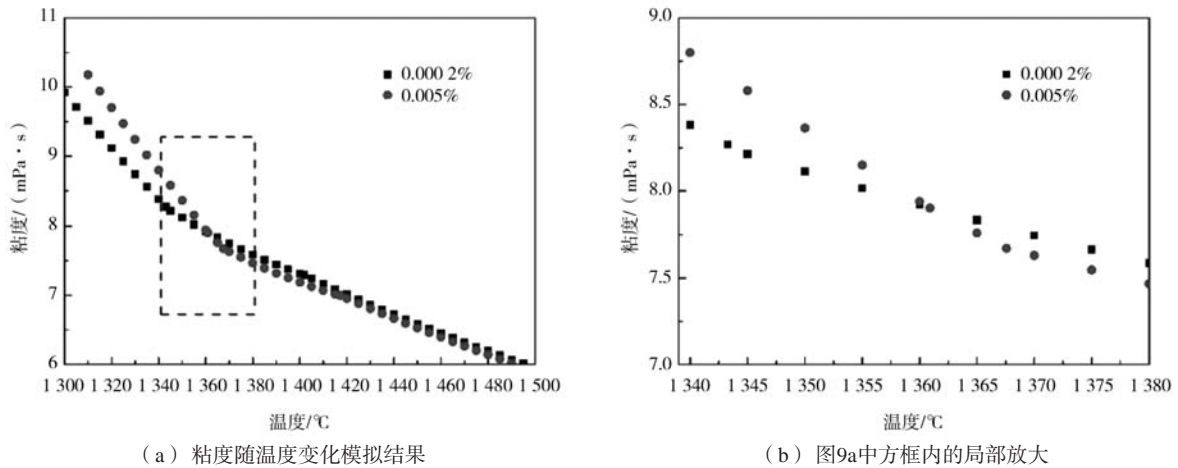


图9 不同温度下合金粘度

Fig. 9 Viscosity of the superalloys versus temperature

值在1 360 °C附近位置存在交叉点, 低于该温度时, 高氮含量合金粘度值明显高于低氮合金粘度值, 高于该温度时则相反, 但二者数值差别较小, 具体见图9b。

2.2 雀斑的形成机制及影响因素

两种不同氮含量合金铸件中雀斑缺陷都位于铸件的棱角处, 这与已有的研究结果是一致的^[2, 4]。定向凝固自由表面形状及模拟糊状区(图8)特征表明, 在定向凝固过程中, 在铸件的内侧, 即靠近直浇道的铸件棱角区域首先凝固, 枝晶偏析排出的溶质在棱角位置优先富集, 密度较低的富集溶质液体流向棱角上方熔体区域, 产生向上的热溶质对流。另一方面, 由于先凝固区域的收缩, 导致糊状区后凝固区域的枝晶间液体向糊状区先凝固区域补缩流动, 补缩流动的最明显证据就是同一水平截面上先凝固区域与后凝固区域共晶量的差别, 前期的工作表明, 这两个区域的共晶含量明显不同^[4, 23], 这两种不同方向上的综合作用导致铸件内侧棱角区域优先形成溶质对流通道的, 对流通道的热溶质对流可造成糊状区内枝晶的弯曲、重熔及折断等, 形成碎断枝晶, 最终在棱角位置形成雀斑。

定向凝固过程中, 两种氮含量合金中并没有发现碳化物及氮化物, 碳化物对枝晶间液体流动的阻碍作用可以不考虑, 因此, 雀斑影响因素只考虑一次枝晶间距、共晶体积分数、合金凝固温度范围、糊状区形状及流体流动速率的影响。

单晶高温合金铸态组织为典型的枝晶组织, 一次枝晶间距存在一个临界值^[24], 超过这个临界值, 铸件中就容易形成雀斑缺陷, 且随着枝晶间距增大, 雀斑形成倾向增加。高氮(0.005%)合金铸件枝晶间距为 $(516 \pm 12) \mu\text{m}$, 明显大于低氮合金(0.000 2%)的枝晶间距 $(462 \pm 8) \mu\text{m}$, 但其雀斑形成倾向却比较低, 这说明枝晶间距并不是决定雀斑形成倾向大小的主要因素。

通常, 单晶合金枝晶间共晶体积分数可反映出合金成分偏析程度的大小, 随偏析程度的提高, 共晶体积分数增加, 枝晶间热溶质对流容易产生且变得强烈^[10], 糊状区内枝晶更容易受到冲击产生破碎枝晶, 破碎枝晶在枝晶间倾斜、转动或受限长大, 进而形成雀斑缺陷。高氮合金凝固温度区间为31 °C, 而低氮合金的凝固温度区间为34.2 °C, 高氮合金中共晶体积分数仅为1.58%~1.87%, 小于低氮合金的共晶体积分数(2.6%~3.5%), 这说明高氮合金偏析程度弱于低氮合金, 其定向凝固过程中溶质对流强度可能会轻于低氮合金, 这可能是雀斑形成倾向降低的一个原因。

定向凝固过程中, 凝固糊状区压降与合金凝固收缩率、糊状区长度、定向凝固速度、枝晶长度、枝晶间距及粘度因素等相关, 基于Darcy定律的Flemings压降公式见式(2)^[25]:

$$\Delta P = 8\eta \frac{\beta}{1-\beta} \frac{L^2 V}{P \lambda^2} \quad (2)$$

式中: ΔP 为糊状区压降; η 为合金液的粘度; β 为凝固收缩率; L 为糊状区长度; V 为凝固速率; l 为糊状区枝晶长度; λ 为一次枝晶间距。

压降方向上的凝固速率保持不变, 两种合金铸件相同位置的糊状区长度及枝晶长度基本是一致的, 见图8。高氮合金(0.005%)一次枝晶间距为 $(516 \pm 12) \mu\text{m}$, 低氮合金(0.000 2%)的枝晶间距为 $(462 \pm 8) \mu\text{m}$ 。结合公式(2), 可以推出, 当合金液粘度不变的情况下, 高氮合金的糊状区压力降将小于低氮合金的压力降^[12], 其凝固组织中将出现更多的孔洞, 但实际情况却相反, 见图4。这说明只有粘度增大才会导致该结果的发生。模拟结果也表明, 两种合金的粘度具有明显的差异, 见图9。

定向凝固过程中, 糊状区的形状及长度基本恒定(图8)。因此, 根据DSC测得的不同合金的凝固范

围,当糊状区液相凝固分数 $f_L > 0.4$ 时,可推算出此时两种合金糊状区对应的凝固温度基本都在1 360 ℃左右,该温度正是粘度变化的转变点,见图9。糊状区上部位置位于该温度以上,两种合金的粘度基本相同,此时,糊状区内压降基本一致,但糊状区下部却位于该温度以下,即此时液相分数 $f_L < 0.4$ 时,合金的粘度值发生了变化,此时,高氮合金的粘度值明显大于低氮合金的粘度值,且随着温度的进一步下降,其差别更大。高的粘度导致其糊状区压降增大,致使高氮合金中孔洞数量明显大于低氮合金中的孔洞数量。这说明相对于低N含量,高N含量提高了糊状区下部的粘度。两种合金铸件自由表面状态也说明,随合金中N含量的提高,流体粘度增大,合金液流动能力变弱,自由表面流线变得不明显,见图8a。

定向凝固过程中,糊状区内枝晶间的液体流动速率包括压降方向上(定向凝固方向)的流动及径向方向上的补缩流动,这两个方向上的综合流动速率导致雀斑缺陷不同的形成倾向,定量计算综合流动速率比较困难,但是可以采用雷诺数(Ra)定性分析雀斑的形成倾向,雷诺数大,则雀斑形成倾向线性增强^[26],糊状区雷诺数 Ra 可采用式(3)计算^[27]:

$$Ra = \frac{gh\bar{K}}{av} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \quad (3)$$

式中: g 为重力常数; h 为糊状区高度; \bar{K} 为平均渗透

率; $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ 为密度反差; α 为液体热扩散系数; v 为液体粘度。

平均渗透率和一次枝晶间距有关,但两种合金的一次枝晶间距相差并不大,糊状区的高度 h 相同,热扩散系数 α 及密度反差 $\frac{\Delta\rho}{\rho_0}$ 都是一致的,因此存在明显差别的只有液体粘度 v 。前期工作表明,单晶中雀斑区域共晶含量明显高于其他区域^[23, 28],这说明枝晶间的补缩流动发生在糊状区凝固后期。因此,可以只考虑低于1 360 ℃的糊状区下部的粘度变化情况。此时,含氮0.005%合金的粘度明显高于含氮0.000 2%合金的粘度,且随温度的降低,粘度的差距逐渐变大。根据公式(3)可知,高氮合金枝晶间流体流动雷诺数低于低氮合金的雷诺数,这将导致其糊状区内热溶质对流通道的形成能力变弱,降低了雀斑缺陷的形成倾向。

3 结论

(1) 相对于低氮含量(0.000 2%),高氮含量(0.005%)单晶合金中雀斑形成倾向减弱;

(2) 相对于低氮含量(0.000 2%),糊状区内高粘度导致高氮含量(0.005%)单晶合金中微孔含量明显增多;

(3) 高氮含量(0.005%)单晶合金中,较高的流体粘度减弱了枝晶间液体流动速率,降低了雀斑形成倾向。

参考文献:

- [1] 马德新. 定向凝固的复杂形状高温合金铸件中的雀斑形成 [J]. 金属学报, 2016, 52(4): 426-436.
- [2] 马德新, 赵运兴, 徐维台, 等. 单晶高温合金异形铸件中的雀斑研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1345-1349.
- [3] 余竹煊, 刘林, 赵新宝, 等. 碳在镍基单晶高温合金中作用研究的进展 [J]. 铸造, 2009, 58(9): 918-924.
- [4] HAN D Y, JIANG W G, XIAO J H, et al. Investigation on freckle formation and evolution of single-crystal nickel-based superalloy specimens with different thicknesses and abrupt cross-section changes [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2019, 805: 218-228.
- [5] GU J P, BECKERMANN C, GIAMEI A F. Motion and remelting of dendrite fragments during directional solidification of a nickel-base superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28A: 1533-1542.
- [6] MA D, WU Q, BÜHRIG-POLACZEK A. Some new observations on freckle formation in directionally solidified superalloy components [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011, 43(2): 344-353.
- [7] AUBURTIN P, WANG T, COCKCROFT S L, et al. Freckle formation and freckle criterion in superalloy castings [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31B: 801-811.
- [8] TIN S, POLLPCK T M, MURPHY W. Stabilization of thermosolutal convective instabilities in Ni-based single-crystal superalloys-carbon additions and freckle formation [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001, 32A: 1743-1753.
- [9] TIN S, POLLOCK T M. Predicting freckle formation in single crystal Ni-base superalloys [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39: 7199-7205.
- [10] WANG F, MA D X, ZHANG J, et al. Investigation of segregation and density profiles in the mushy zone of CMSX-4 superalloys solidified during downward and upward directional solidification processes [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2015, 620: 24-30.
- [11] REED R C, TAO T, WARNKEN N. Alloys-by-design: application to nickel-based single crystal superalloys [J]. Acta Materialia, 2009, 57: 5898-5913.
- [12] 李相伟, 王莉, 刘心刚, 等. HRS和LMC工艺对第三代镍基单晶高温合金DD33中显微孔洞的影响 [J]. 材料研究学报, 2014, 28(9): 656-662.
- [13] 葛丙明, 刘林, 黄太文, 等. 液态金属冷却法在高温合金定向凝固中的应用 [J]. 铸造, 2009, 58(9): 910-917.
- [14] HONG J P, MA D X, WANG J, et al. Geometrical effect of freckle formation on directionally solidified superalloy CM247 LC components [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 648: 1076-1082.

- [15] LI Q D, SHEN J, QIN L, et al. Investigation on local cooling in reducing freckles for directionally solidified superalloy specimens with abruptly varying cross-sections [J]. *Materials Characterization*, 2017, 130: 139–148.
- [16] LI Q D, SHEN J, QIN L, et al. Investigation on freckles in directionally solidified CMSX-4 superalloy specimens with abrupt cross section variation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 691: 997–1004.
- [17] LI Q D, SHEN J, XIONG Y L, et al. Prediction of freckle formation in directionally solidified CMSX-4 superalloy [J]. *Materials Letters*, 2018, 228: 281–284.
- [18] CUTLER E R, WASSON A J, FUCHS G E. Effect of minor alloying additions on the solidification of single-crystal Ni-base superalloys [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, 311 (14) : 3753–3760.
- [19] WANG L, WANG D, LIU T, et al. Effect of minor carbon additions on the high-temperature creep behavior of a single-crystal nickel-based superalloy [J]. *Materials Characterization*, 2015, 104, : 81–85.
- [20] HUANG X B, ZHANG Y, HU Z Q. Effect of small amounts of nitrogen on properties of a Ni-based superalloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999, 30A: 1775–1761.
- [21] GUO X L, YU J B, LI X F, et al. Effect of nitrogen content on the microstructure and mechanical properties of a cast nickel-base superalloy [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2016, 45 (3) : 215–223.
- [22] MITCHELL A. Nitrogen in superalloys [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2005, 24 (2) : 101–109
- [23] XIAO J, JIANG W, HAN D, et al. Evolution of crystallographic orientation and microstructure in the triangular adapter of grain continuator of a 3rd-generation single crystal superalloy casting during directional solidification [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 898: 1–12.
- [24] SCHNEIDER M C, GU J P, BECKERMANN C, et al. Modeling of micro- and macrosegregation and freckle formation in single-crystal nickel-base superalloy directional solidification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1997, 28A: 1517–1531.
- [25] NICK A S, FREDRISSON H. On the relationship between inclusions and pores, part II: dendritic structure, pressure drop in the liquid and pore precipitation [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 790-791: 302–307.
- [26] BECKERMANN C, GU J P, BOETTINGER W J. Development of a freckle predictor via rayleigh number method for single-crystal nickel-base superalloy castings [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31A: 2545–2557.
- [27] HOBBS R A, TIN S, RAE C M F. A castability model based on elemental solid-liquid partitioning in advanced nickel-base single-crystal superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36A: 2761–2773.
- [28] HAN D Y, JIANG W G, XIAO J H, et al. Influence of geometric structure and feeding behavior of casting on freckle formation during directional solidification of a Ni-based single-crystal superalloy [J]. *Crystal Research and Technology*, 2021, 56 (5) : 1–11.

Effect of Trace Nitrogen on Formation Tendency of Freckle of a Single Crystal Superalloy DD33

JIANG Wei-guo^{1,2}, HAN Dong-yu³, LI Xiang-wei⁴, DONG Lin^{1,2}, LI Kai-wen³, XIAO Jiu-han³, LU Yu-zhang³, LI Qiang^{1,2}

(1. Weifang University of Science and Technology, Shouguang 262700, Shandong, China; 2. Weifang Key Laboratory of High-Temperature Materials and Single Crystal Components Fabrication Technology for Advanced Engine System, Shouguang 262700, Shandong, China; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 4. Centre of Excellence for Advanced Materials, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract:

The effects of different nitrogen contents (0.000 2% and 0.005%) on formation tendency of freckle of single crystal superalloy DD33 were investigated by scanning electron microscopy (SEM), electron dispersion spectroscopy (EDS) and differential scanning calorimetry (DSC) technology. ProCAST and JMatPro software were employed to simulate the mushy zone shape and the viscosity of melt liquid, respectively. The experimental results showed that the primary dendritic arm spacing and mushy zone fluidity viscosity increased with the increasing of the nitrogen content. On the contrary, the solidification temperature range and the volume fraction of interdendritic eutectic phases decreased with the increasing of the nitrogen content. The increasing of the fluidity viscosity weakened the intensity of the mushy zone thermal solution convection and the feeding flow of the interdendritic liquid along radical direction, resulting in the low formation tendency of the freckle during the directional solidification.

Key words:

single crystal superalloy; microporosity; mushy zone; viscosity; freckle