

镍基高温合金感应锭浇注过程的数值模拟研究

唐平梅^{1,2}, 周 扬^{1,2}, 姜东滨³

(1. 成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司, 四川 成都 610303; 2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用 ProCAST 软件对镍基高温合金感应锭的浇注过程进行了数值模拟研究, 分析了铸锭充型与凝固过程温度场、固相率等的变化特征及其对铸锭缩孔的影响, 探讨了铸锭缩孔随浇注温度的变化规律。结果表明, 镍基高温合金感应锭凝固过程中, 在铸锭纵向方向上, 铸锭上部合金温度低, 下部合金温度高, 铸锭未实现从底部到顶部(浇口)的顺序凝固, 铸锭端部的“V”形一次缩孔较深。在充型阶段, 浇注温度的变化对合金流动的最大速度及合金液面波动的影响较小; 在凝固阶段, 降低浇注温度减小了铸锭下部的高温区域, 能在一定程度上减小铸锭端部的一次缩孔深度, 但由于其未能使铸锭在纵向方向上实现顺序凝固, 因此降低浇注温度并不能显著减小铸锭端部的一次缩孔深度。另外, 浇注温度的变化对铸锭内部缩孔的影响较小。

关键词: 镍基高温合金; 铸锭; 数值模拟; 浇注温度; 缩孔缩松

中图分类号: TF775, TF133

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)04-0127-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.04.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Numerical simulation on pouring process of nickel base superalloy induction ingot

Tang Pingmei^{1,2}, Zhou Yang^{1,2}, Jiang Dongbin³

(1. Chengdu Institute of Advanced Metallic Material Technology and Industry Co., Ltd., Chengdu 610303, Sichuan, China; 2. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the numerical simulation on pouring process of nickel base superalloy induction ingot had been carried out by using ProCAST software. The change characteristics of temperature field and solid fraction during the filling and solidification process of ingot and their influence on ingot shrinkage porosity had been studied. Moreover, the change rule of ingot shrinkage porosity with pouring temperature had been investigated in detail. The results show that the temperature of the upper ingot is lower than that of the lower ingot along the longitudinal direction of ingot during solidification process, and sequential solidification does not occur in the ingot, thus the V-shaped primary shrinkage porosity of the ingot is deep. In the filling stage, the change of pouring temperature has little effect on the maximum flow speed and level fluctuation of alloy. In the solidification stage, lowering pouring temperature can reduce the high-temperature area at the lower part of the ingot and the primary shrink-

收稿日期: 2022-04-06

作者简介: 唐平梅(1991—), 女, 四川绵竹人, 博士, 工程师, 主要研究方向为高温合金冶炼, E-mail: Tpingmei@163.com。

age depth at the end of the ingot to a certain extent. Nevertheless, changing pouring temperature can not make the ingot achieve sequential solidification in the longitudinal direction, consequently, lowering the pouring temperature can not significantly reduce the primary shrinkage porosity at the end of the ingot. Moreover, the change of pouring temperature has little effect on the small shrinkage porosity in the ingot.

Key words: nickel base superalloy, ingot casting, numerical simulation, pouring temperature, shrinkage porosity

0 引言

镍基高温合金具有良好的高温强度、抗氧化能力和优异的抗疲劳性能,其在航空、航天、石油、化工等领域获得了广泛应用^[1-3]。当前大多数高品质镍基高温合金都采用真空感应熔炼 (Vacuum Induction Melting, VIM) 作为一次冶炼,再经过自耗重熔 (Vacuum Arc Remelting, VAR)、电渣重熔 (Electroslag Remelting, ESR) 进行二次或三次冶炼^[4-5]。在首端真空感应熔炼工艺中,合金液经过浇注得到的感应锭常出现缩孔缩松缺陷,严重影响了二次冶炼过程稳定性、铸锭成材率以及最终产品质量,制约了优质镍基高温合金的制造和发展^[6-8]。

如何减轻镍基高温合金感应锭的缩孔缩松已受到了广泛关注。目前,一些研究已对合金成分^[9]、浇注工艺^[10]、冒口^[11]、热顶^[12] 等对感应锭缩孔缩松的影响进行了分析和探讨,但其并没有关注铸锭充型与凝固过程的热行为特征及典型浇注工艺参数,如浇注温度、浇注速度等对其的影响。本质上,铸锭缩孔缩松的形成与浇注过程中的热量、质量和动量的传输行为密切相关,为有效地减少和改善铸锭缩孔缩松,需深入了解浇注过程的复杂物理机制。由于高温合金浇注的高温特性和浇注条件的多样性使得试验研究难度较大,数值模拟现成为了研究铸件充型与凝固过程物理机制的一种有效手段^[13-14]。笔者采用数值模拟对镍基高温合金感应锭充型与凝固过程温度场与流场展开分析,通过研究揭示铸锭充型与凝固过程温度场、流场、合金固相率等的变化特征及其对缩孔缩松的影响,明确铸锭缩孔缩松随

浇注温度的变化规律。通过以上研究可深入认识铸锭浇注过程的物理机制,为减轻镍基高温合金感应锭缩孔缩松、提升产品质量奠定理论基础,也能为工艺参数的设计与优化提供理论指导。

1 数学模型描述

1.1 控制方程与边界条件

高温合金浇注过程是将真空感应炉内高温熔融状态的合金液浇到锭模中,通过充型和凝固过程获得所需形状铸锭的热成型过程。充型与凝固过程涉及到流体的流动和传热,通常流体流动及传热遵循三大守恒定律,即质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律。本研究采用的质量、动量及能量守恒方程来自于参考文献 [15]。为了减少计算量,研究采用了四分之一的对称模型,因此对对称面设置了对称边界条件。在计算模型中,液态高温合金以入口边界条件流入锭模,入口温度为浇注温度,锭模与底砖的初始温度为 20 ℃。另外,铸锭与锭模之间的边界换热系数被认为是温度的函数,其来自于参考文献 [12],锭模与底砖的边界换热系数则设置为 200 W/(m²·K)。

1.2 参数选取

模拟研究中,锭模材质为铸铁,底砖材质为耐火材料,镍合金的主要化学成分如表 1 所示,这些材料的热物性参数由 ProCAST 软件内置的材料数据库提供,其中镍合金的主要热物性参数随温度的变化如图 1 所示。另外,模拟采用的主要工艺参数如表 2 所示。

表 1 镍合金的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of nickel alloys

Al	C	Cr	Fe	Mo	Nb	Ti	Ni	%
0.5	0.02	18.3	18.9	3	5	0.97	余量	

1.3 网格划分和数值求解

如图 2 所示,研究建立的铸锭尺寸为 Ø360 mm × 4 000 mm,锭模高度为 4 000 mm,底砖厚度为

80 mm。研究采用四面体网格对计算区域进行离散化处理,在权衡计算精度和计算量后,确定合金入口及其周围区域划分单元尺寸为 4 mm,其余区域划

分的最大单元尺寸为 15 mm,划分后的四面体网格数量为 513 051 个。另外,模拟采用 ProCAST 默认

的求解器,模型的求解结果将在后续内容进行分析和讨论。

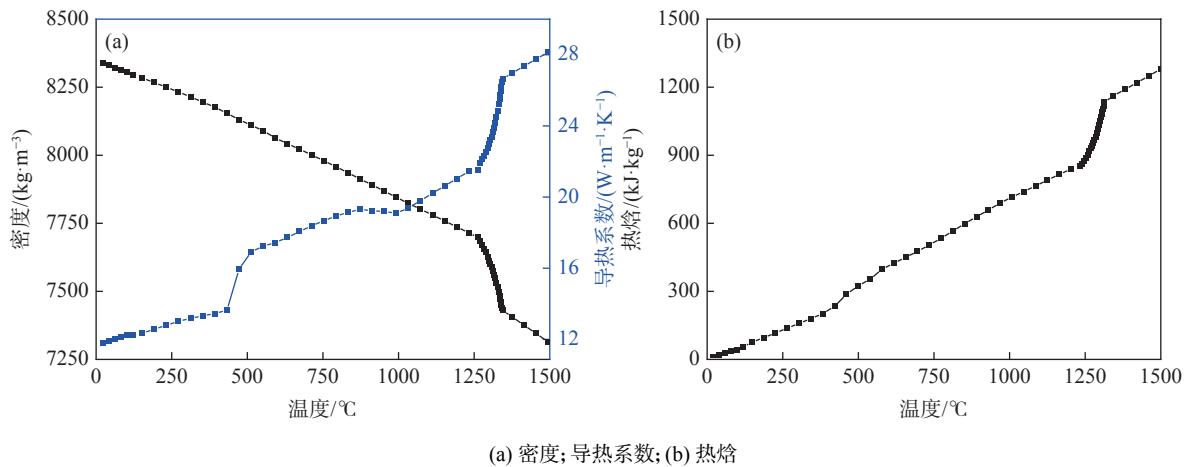


图 1 镍合金主要热物性参数随温度的变化

Fig. 1 The change of main thermophysical parameters of nickel superalloy with temperature

表 2 模拟采用的主要工艺参数

Table 2 The main process parameters used in the simulation

浇注温度/°C	入口直径/mm	入口速度/(kg·s ⁻¹)
1 400, 1 450, 1 500	27	1.96

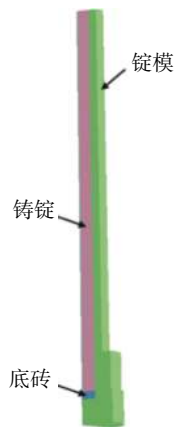


图 2 几何模型示意

Fig. 2 The schematic diagram of geometric model

2 计算结果与讨论

2.1 充型与凝固过程分析

充型过程是铸件成型非常重要的阶段,对铸件的最终质量起着决定性的作用,许多铸造缺陷,如浇不足、冷隔、卷气、层流、紊流、飞溅乃至缩孔缩松等都与充型过程密切相关^[16],因此很有必要对铸锭的充型过程进行分析。

在浇注温度为 1 450 °C 时,铸锭充型及凝固过

程不同时刻的温度分布如图 3 所示。由图 3 可知,在充型初期 ($t=18$ s),由于合金与锭模的作用时间较短,合金的热量未能及时传递到锭模,使锭模温度明显升高;而随着充型的进行,下部锭模与合金的作用时间增加,下部锭模的温度逐渐增大;充型结束后,锭模的温度从下到上逐渐降低。另外注意到,充型初期合金液面波动较为剧烈,而随着充型的进行,合金液面逐渐趋于平稳,充型过程未发现欠浇或充不满等不良现象。

观察温度分布可知,凝固过程中合金与锭模之间仍存在热交换,锭模温度逐渐增大,而合金温度由内部到外部逐渐降低。凝固过程中 ($t=2\ 573$ s 至 $t=3\ 053$ s),铸锭下部合金的温度高,而铸锭上部合金的温度低,完全凝固后 ($t=3\ 693$ s),铸锭下部中心部位合金温度最高。这是因为锭模的温度分布影响着合金的冷却凝固,相对于上部锭模,下部锭模的温度较高,其延缓了铸锭下部合金的凝固。在铸造过程中,铸件厚大部位和最后凝固的部分通常是容易产生缩孔缩松的地方,这说明要避免感应锭出现缩孔缩松缺陷,则需要改善铸锭下部的冷却条件,使得铸锭下部的合金能够快速凝固。

由铸件形成理论基础^[17]可知,在铸件凝固过程中控制铸件的凝固方向,使之符合“顺序凝固原则”,可使铸件在凝固过程中建立良好的补缩条件,从而可以有效减小铸件的缩孔缩松缺陷。如图 4 所示,顺序凝固的原则就是在铸件纵向方向上,从铸件底部到顶部(浇口)温度逐渐增加,存在一个递增的温度梯度,铸件各部分可按照铸件从底部到顶部的顺

序依次进行凝固,凝固过程中冷却凝固合金可以得到高温合金液的不不断补缩。从图3可知,在给定的

工艺条件下,在铸锭纵向方向上,铸锭凝固时的温度分布和铸件实现顺序凝固的温度分布相反。

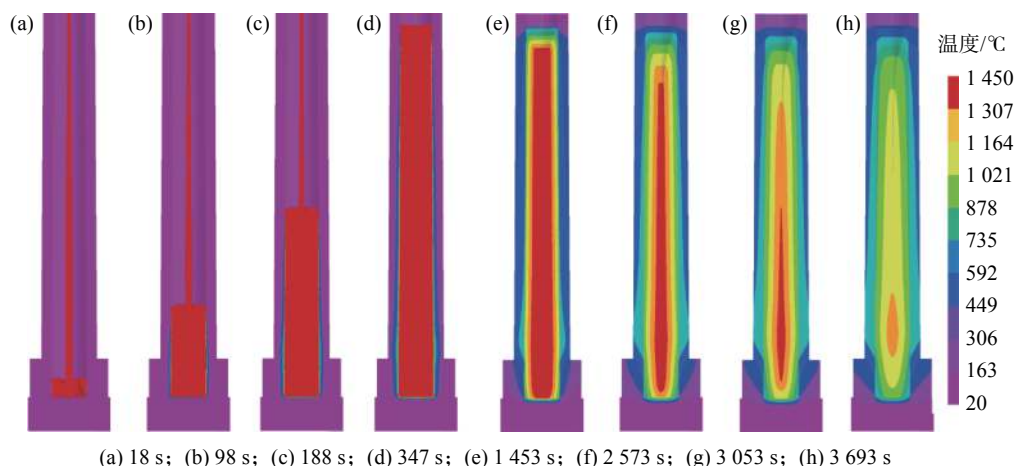


图3 充型与凝固过程不同时刻合金与锭模的温度分布

Fig. 3 The temperature distribution of alloy and mold at different times during filling and solidification process

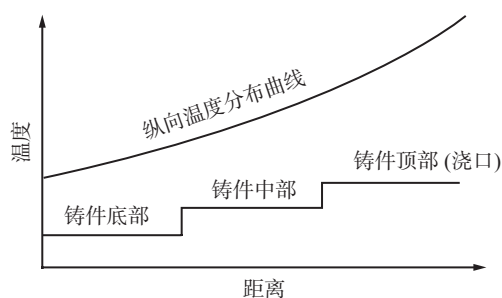


图4 顺序凝固示意

Fig. 4 Schematic diagram of sequential solidification

充型与凝固过程不同时刻合金的固相率如图5所示。由图5(a)、(b)可知,充型及充型结束时,凝固合金的数量较少。这是因为一般高温合金感应锭浇注的过热度高(约100~150℃)^[18],浇注时间较短,在此条件下合金的温度高,固相率少。从图5(c)至

图5(e)可知,凝固过程中,铸锭上部合金先凝固,下部合金后凝固,上部合金未能起到良好的补缩作用。如图5(f)所示,由于在纵向方向上,铸锭未实现从铸锭底部到顶部的顺序凝固,因此合金完全凝固后,铸锭端部产生了一个明显的深“V”形一次缩孔(黑色箭头标记)。王建武等人^[12]对镍基高温合金感应锭进行了解剖,获得的铸锭纵剖面如图6所示。可以发现,铸锭端部也呈现出了一个深“V”形一次缩孔,这与模拟结果较为吻合,说明本模拟研究结果具有一定的合理性。Wang等人^[19]研究表明,深“V”形缩孔的形成将导致粗大柱状晶组织的产生,严重影响合金液从顶部向下部的补缩,在此期间,缩孔下方会形成严重的收缩孔隙。可见,减小铸锭端部深“V”形一次缩孔对提高感应锭致密度具有重要作用。

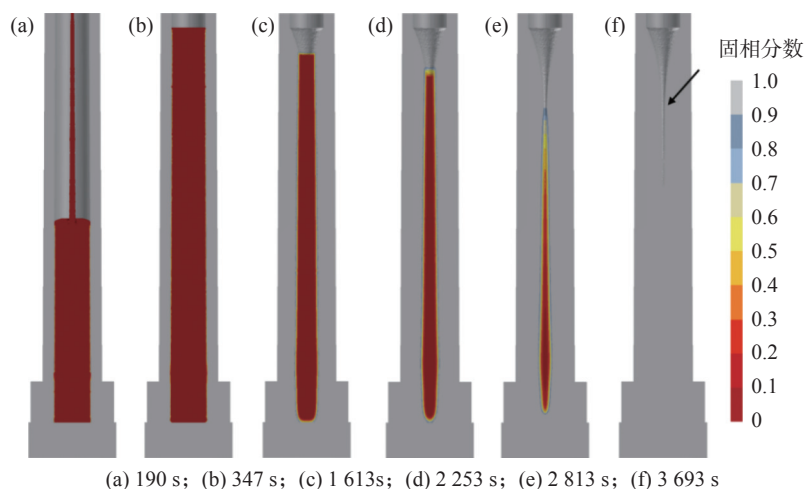


图5 充型与凝固过程不同时刻合金的固相率

Fig. 5 The solid fraction of alloy at different times during filling and solidification process

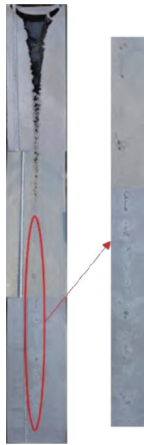
图6 镍基高温合金感应锭的缩孔缩松^[12]

Fig. 6 The shrinkage porosity of nickel base superalloy induction ingot

一般铸件缩孔的形成受诸多因素的影响,包括铸型材料,铸件合金材料,浇注工艺及浇注现场环境等,其中工艺的影响最大^[7]。在众多工艺参数中,浇注温度是一种重要的可控浇注参数,因此分析完铸锭充型与凝固过程的特征后,接着探讨了浇注温度对浇注过程温度场、流场、固相率及缩孔缩松的影响。

2.2 浇注温度的影响

在充型过程中,当合金的填充率达到 55% 时,不同浇注温度下合金的流动速度分布云图如图 7 所示。由图 7 可见,不同浇注温度下,铸锭的充型过程比较平稳,遵循顺序充型的原则,未出现浇不足的现象。随着浇注温度的增加,充型合金下方的速度分布具有一定差异,但上方的速度分布、合金流动的最大速度值及合金液面波动的差异较小。由此可以认为,在充型阶段,浇注温度的变化对合金流动的最大速度及合金液面波动的影响较小。另外,当合金的填充率达到 55% 时,随着浇注温度从 1 400 °C 增加到 1 500 °C,合金固相率从 8.4% 减小到了 4.8%,说明提高浇注温度减小了合金的固相率。

不同浇注温度下,合金凝固过程中 ($t=2\ 657\text{ s}$) 的温度分布及固相率如图 8 所示。一方面观察到,不同浇注温度下,在铸锭纵向方向上,铸锭下部合金温度高,上部合金温度低 (图 8(a)),说明浇注温度的变化并未改变铸锭在纵向方向上的温度分布规律,进而也未能改变铸锭在纵向方向上的凝固顺序。不同浇注温度下,铸锭在纵向方向上仍是铸锭上部合金先凝固,而下部合金后凝固 (图 8(b))。另一方面,从黑色方框区域可知 (图 8(a)),当浇注温度从 1 400

°C 增加到 1 500 °C 时,铸锭上部合金的温度分布差异较小,而铸锭下部合金的高温区域逐渐增大 (黑色箭头标记区域),其延缓了铸锭下部合金的凝固,不利于铸锭在纵向方向上实现顺序凝固。

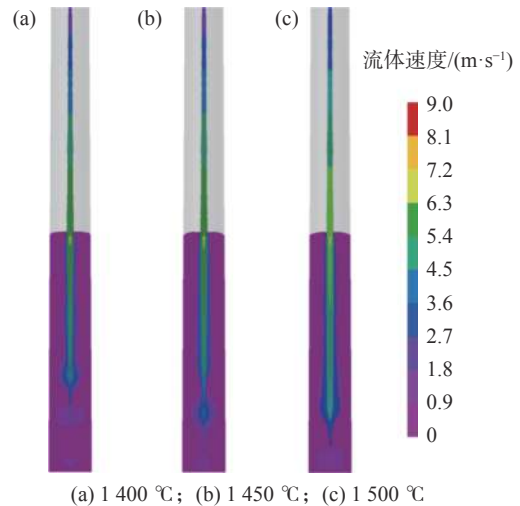
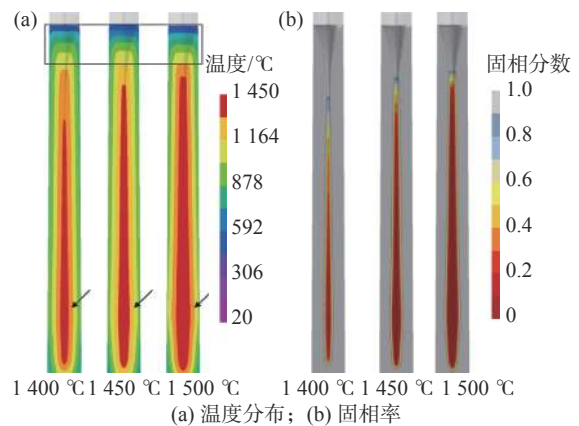


图7 合金填充率达到 55% 时,不同浇注温度下合金的速度分布云图

Fig. 7 The contour of alloy velocity distribution under different pouring temperature as filling rate reaches 55%

图8 不同浇注温度下合金凝固时 ($t=2\ 657\text{ s}$) 的温度分布及固相率Fig. 8 Temperature distribution and solid fraction of alloy during solidification process ($t=2\ 657\text{ s}$) under different pouring temperature

分析完温度分布特征,接着分析了温度演化特征。分析温度演化特征时,选取的监测点如图 9 所示。图 10(a) 显示了当浇注温度为 1 400 °C 时,各监测点的温度随时间变化曲线。可以发现,铸锭凝固时各监测点的温度整体呈现出降低的趋势。在凝固初期,位于铸锭下部监测点 1 的温度较低,而随着凝固的进行,监测点 1 的温度逐渐高于监测点 2 与点 3 的温度。另外,在凝固初期,位于铸锭中部附近

的监测点2与点3的温度基本一致,但随着凝固的持续,位于下部的监测点2的温度慢慢高于上部的监测点3。这些结果直观反映了在凝固过程中,铸锭各部位并未按照铸件从底部到顶部的顺序进行凝固,铸锭下部的监测点1与中部的监测点2位置是热节点位置,通常在热节点位置处铸件容易出现缩孔缩松缺陷,因此在铸锭凝固过程中应该避免铸锭中部与下部位置出现热节点。由图10(a)至图10(c)可知,不同浇注温度下,在铸锭凝固过程中,监测

点1的温度逐渐高于监测点2与点3,监测点2的温度也逐渐高于了监测点3,这些结果表明,改变浇注温度并未减少铸锭内部的热节点,进而改变浇注温度可能不会显著减小铸锭内部的缩孔缩松。



图9 铸锭纵向方向上监测点的示意
Fig. 9 Schematic diagram of monitoring points along the longitudinal direction of ingot

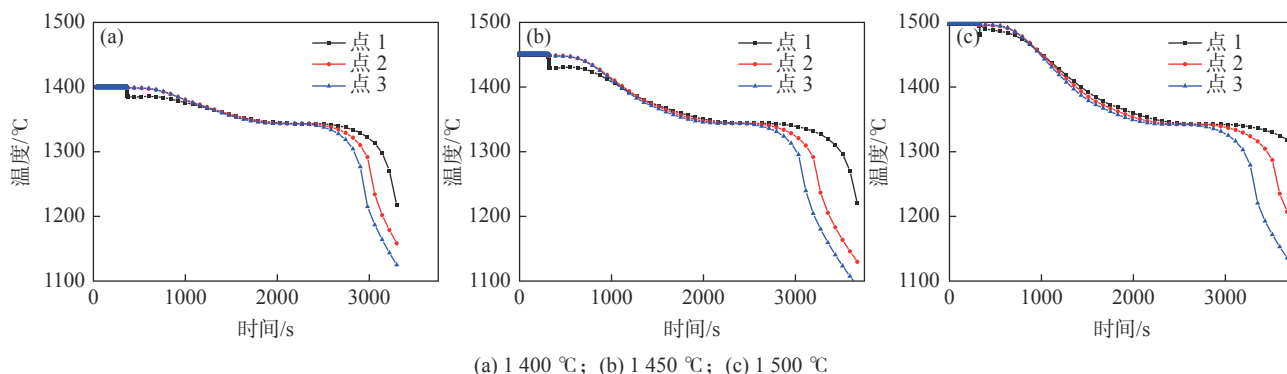


图10 不同浇注温度下各监测点的温度随时间变化曲线
Fig. 10 The curve of temperature versus time of monitoring points under different pouring temperature

观察可知,随着浇注温度从1500 °C降低到1450、1400 °C,铸锭端部深“V”形一次缩孔深度从1588 mm减小到了1530、1508 mm,说明适当降低浇注温度可以减小铸锭的一次缩孔深度。这是因为一方面降低浇注温度减小了铸锭下部合金的高温区域;另一方面,降低浇注温度后合金液的液态收缩量减少,有利于补缩。文献[10]也指出降低浇注温度可以减少CoCrMo和K418合金感应锭缩孔缺陷,这与本模拟研究结果较为一致。值得注意的是,由图8与图10可知,浇注温度的变化并未改变铸锭在纵向方向上的温度分布规律,进而不会改变铸锭在纵向方向上的凝固顺序,因此降低浇注温度并不能显著减小铸锭端部的深“V”形一次缩孔深度。

笔者采用Niyama判据来分析铸锭内部的微小孔隙情况。Niyama判据认为当 $G/\dot{T}^{0.5}$ 小于某一临界值时会形成微小孔隙,其中G和 $\dot{T}$ 分别为温度梯度和冷却速度^[20]。依据文献[21],本文采用 $Niyama \leq 8 (K \cdot s)^{0.5}/cm$ 这一判定标准进行微小孔隙的分析。图11反映了Niyama值随浇注温度变化的变化,可以看到,不同浇注温度下,铸锭内部微小的缩松基本贯穿了整个铸锭,改变浇注温度并未显著减少铸锭内部的缩松。图6反映了镍基合金感应锭内部微小

缩松的情况。可以看到,在一次缩孔下方,铸锭内部微小的缩松几乎贯穿了整个铸锭,铸锭内部的缩松缺陷较为显著,这与本模拟研究结果较为一致。

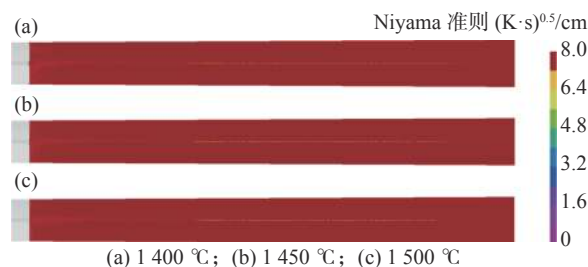


图11 不同浇注温度下的Niyama值
Fig. 11 The Niyama value at different pouring temperature

3 结论

1) 镍基高温合金感应锭充型过程中,随着充型时间的增加,合金液面逐渐趋于平稳。感应锭凝固过程中,在铸锭纵向方向上,铸锭上部合金温度低,先凝固,下部合金温度高,后凝固。由于铸锭凝固时的温度分布与铸件实现顺序凝固的温度分布相反,铸锭并未实现从底部到顶部(浇口)的顺序凝固,因此铸锭端部“V”形一次缩孔较深。

2) 在充型阶段,浇注温度的变化对合金流动的最大速度及合金液面波动的影响较小;在凝固阶段,浇注温度的变化并未改变铸锭在纵向方向上的温度分布规律,不同浇注温度下铸锭温度分布仍是下部温度高,上部温度低。另外,改变浇注温度也未显著减少铸锭内部的热节点。

3) 随着浇注温度从 1 500 ℃ 降低到 1 400 ℃,

铸锭下部的高温区域逐渐减小,铸锭端部深“V”形一次缩孔深度从 1 588 mm 减小到了 1 508 mm。降低浇注温度能在一定程度上减小一次缩孔深度,但由于其未能使铸锭在纵向方向上实现凝固顺序,因此降低浇注温度不能显著减小铸锭端部的一次缩孔深度。另外,浇注温度的变化对铸锭内部缩松的影响较小。

参考文献

- [1] Guo Jianting. Materials science and engineering for superalloy (Superalloy materials and engineering applications)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
(郭建亭. 高温合金材料学(高温合金材料与工程应用) [M]. 北京: 科学出版社, 2010.)
- [2] Geng L, Na Y S, Park N K. Oxidation behavior of alloy 718 at a high temperature[J]. Materials & Design, 2007, 28(3): 978–981.
- [3] Jiang Shichuan, Zhang Jian, He Yunhua, *et al.* Microstructure evolution and processing maps of GH4169 during deformation[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2): 161–166.
(蒋世川, 张健, 何云华, 等. GH4169 合金高温变形显微组织演变及热加工图[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(2): 161–166.)
- [4] Duan Shengchao. Fundamental study on the controlling loss of alloying elements of large IN718 electroslag remelting ingots[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
(段生朝. 电渣重熔大型IN718镍基合金铸锭合金元素氧化控制的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.)
- [5] Mitchell A. Recent developments in specialty melting processes[J]. Materials Technology, 1994, 9(9-10): 201–206.
- [6] Shi Xiao. Fundamental study on the solidification and segregation behavior of large-sized as-cast IN718 electroslag remelting ingots[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
(石骁. 电渣重熔大型IN718镍基合金铸锭凝固和偏析行为基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.)
- [7] Ling Yun. A dynamic pressure-based method to predict casting shrinkage cavities during solidification process under multi-force fields and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
(凌云. 多力场作用下铸件凝固过程基于动态压强的缩孔预测方法及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.)
- [8] Hardin R A, Beckermann C. Effect of porosity on deformation, damage, and fracture of cast steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(12): 5316–5332.
- [9] Liu Keli, Wang Junsheng, Guo Yuelin, *et al.* Research progress on numerical simulation and control methods of hole defects in nickel base single crystal superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(16): 75–85.
(刘可立, 王俊升, 郭跃岭, 等. 镍基单晶高温合金孔洞缺陷数值模拟与控制方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2020, 63(16): 75–85.)
- [10] Li Chao, Liu Jia, Yu Ang, *et al.* Study of vacuum induction melting process for superalloy[J]. Vacuum, 2016, 53(2): 37–41.
(李超, 刘佳, 于昂, 等. 铸造高温合金真空感应熔炼过程的研究[J]. 真空, 2016, 53(2): 37–41.)
- [11] Cheng Jianqiang, Hu Xianjun, Gu Hua, *et al.* Application of exothermic insulated riser in superalloy vacuum casting[J]. Foundry Technology, 2016, 37(1): 110–113.
(成建强, 胡显军, 顾晔, 等. 发热保温冒口在高温合金真空浇注中的应用[J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 110–113.)
- [12] Wang Jianwu, Xu Zhiqiang, Yang Shufeng, *et al.* Effect of hot top design on the shrinkage porosity of nickel-based superalloy ingots[J/OL]. China Metallurgy, 1-9[2022-04-24].
(王建武, 徐志强, 杨树峰. 热顶设计对镍基高温合金铸锭收缩孔隙的影响[J/OL]. 中国冶金: 1-9[2022-04-24])
- [13] Zhou Jianxin. Current status and development trend of casting numerical simulation technology[J]. Foundry, 2012, 61(10): 1105–1115.
(周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造, 2012, 61(10): 1105–1115.)
- [14] Khalajzadeh V, Beckermann C. Simulation of shrinkage porosity formation during alloy solidification[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(5): 2239–2254.
- [15] Chen Zheng. Simulation research on the heavy ingot solidification process[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
(陈峥. 大铸锭凝固过程的模拟研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.)