

浇注速度及锭模加热温度对高温合金 感应锭缩孔的影响研究

唐平梅¹, 周 扬², 白晶斐¹, 门正兴¹, 高 曦¹, 张献光³

(1. 成都航空职业技术大学, 四川 成都 610021; 2. 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 610300; 3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 高温合金感应锭存在大尺寸缩孔缺陷, 会显著影响感应锭成材率、后续重熔工序的运行稳定性, 以及产品质量。采用数值仿真模拟分析了浇注速度、锭模加热温度这两种典型工艺参数对感应锭缩孔深度的影响。结果表明: 感应锭缩孔深度并未随浇注速度的增加呈现规律性变化。由于调整浇注速度未能改变感应锭凝固过程纵向温度分布规律及凝固顺序, 因此无法通过该工艺参数的优化显著减小感应锭缩孔深度。采用锭模加热可以减小锭模与感应锭凝固过程纵向方向上的温差, 在一定程度上改善了感应锭纵向凝固向着顺序凝固反方向发展的趋势, 采用锭模加热可以显著减小感应锭缩孔深度。

关键词: 高温合金; 感应锭; 浇注速度; 锭模温度; 缩孔

中图分类号: TF775, TF133

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0143-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.017

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on the effects of pouring speed and mold heating temperature on shrinkage cavity of superalloy induction ingot

TANG Pingmei¹, ZHOU Yang², BAI Jingfei¹, MEN Zhengxing¹, GAO Xi¹, ZHANG Xianguang³

(1. Chengdu Aviation Vocational and Technical University, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. Chengdu Advanced Metal Materials Industrial Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, Sichuan, China; 3. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Large-scale shrinkage cavity defects exist in superalloy induction ingots, which significantly affect the yield of the induction ingots, the operational stability of the subsequent remelting processes and the product quality. This paper analyzes the effects of two typical process parameters, namely pouring speed and mold heating temperature, on the depth of shrinkage cavities in induction ingots through numerical simulation. The results indicate that the depth of shrinkage cavities in induction ingots does not change regularly with increasing pouring speed. Since adjusting the pouring speed fails to alter the longitudinal temperature distribution and solidification sequence of the induction ingot during solidification. It is impossible to significantly reduce the depth of shrinkage cavities through optimization of this process parameter. Using mold heating can reduce the temperature difference of the mold and the induction ingot in the longitudinal direction during solidification, which to some extent improves the trend of longitudinal solidification of the induction ingot towards the opposite direction of sequential solidification. Using mold heating can significantly reduce the depth of shrinkage cavities in induction ingots.

Key words: superalloy; induction ingot; pouring speed; ingot mold temperature; shrinkage cavity

收稿日期: 2026-05-28; 修回日期: 2026-06-25; 接受日期: 2026-07-01

作者简介: 唐平梅, 1991 年出生, 女, 四川绵竹人, 博士, 高级工程师, 长期从事变形高温合金制备研究工作, E-mail: Tpingmei@163.com。

0 引言

高温合金也被称作超合金,其主要以铁、镍、钴作为基体材料,可在 600 ℃ 以上高温环境并承受载荷的条件下长期服役。该材料兼备出色的高温强度、抗蠕变能力、抗氧化与耐腐蚀性能,且内部组织状态稳定,已被广泛应用于化工、能源及航空航天等领域^[1-4]。当前真空感应冶炼已成为高品质高温合金主流的一次冶炼工艺^[5]。但在实际生产现场,在真空感应冶炼的浇注阶段获得的感应锭常出现大尺寸缩孔缺陷^[6-7]。该缺陷会造成感应锭切头量增加,成材率降低,还会引起后续电渣重熔等二次冶炼过程出现剧烈波动,影响最终产品质量及合格率^[8-10]。

如何减小高温合金感应锭的缩孔尺寸,现已成为业内研究的一重点方向。文献 [11] 针对镍基高温合金感应锭浇注过程开展数值模拟研究,结果表明:感应锭凝固阶段呈现上部温度低,下部温度高的温度分布,致使感应锭端部出现大尺寸缩孔,并且调整浇注温度也无法有效地改善缩孔问题。王建武等^[12]借助数值仿真分析发现,热顶高度与预热温度会对感应锭缩孔深度产生影响。张亨年^[13-14]通过研究指出,对于大型高温合金感应锭采用冒口可以减轻缩孔缺陷。但需注意的是高温合金对纯净度要求极高,采用保温冒口会增大合金液被污染的风险,因此生产现场一般希望在控制合金液纯净度条件下尽可能减小感应锭缩孔尺寸。整体看来,尽管目前一些研究学者对铸锭缩孔形成原因及参数设计对缩孔的影响进行了探究^[15-20]。然而,现有研究尚未深入探讨在无冒口条件下,典型浇注工艺参数如浇注速度、锭模加热温度对铸锭缩孔的影响。在浇注过程中,这两个参数对铸件及铸模质量至关重要。研究表明,浇注速度过低易导致冷隔或浇不足等缺陷,而浇注速度过高则可能引发飞溅并损伤铸模壁面^[21]。同时,铸模表面温度也被证实会对铸件质量造成影响^[22]。作为现场可调控的关键参数,浇注速度和锭模加热温度的调整对感应锭缩孔改善效果尚不明确。鉴于此,研究采用数值仿真分析无冒口条件下浇注速度与锭模加热温度对感应锭缩孔深度的影响。通过研究阐明这两种典型工艺参数与感应锭凝固温度场、缩孔缺陷之间的内在关系,为高品质高温合金真空感应冶炼浇注工艺的优化设计提供理论支撑。

1 模型描述

采用 ProCAST 仿真软件对真空感应锭的浇注过程进行数值仿真建模和分析,合金熔体在充型、

凝固阶段涉及流体流动及传热现象。为了便于计算,对模型做以下简化与假设:①液态金属是不可压缩的牛顿流体;②忽略溶质对流现象。基于以上简化与假设,研究所采用的质量、动量及能量守恒方程^[23]计算,如式 (1)~(3) 所示。

$$\nabla \cdot (\vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \mu \nabla^2 \vec{V} - \nabla P + \rho g \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (3)$$

式中, ∇ 为梯度算子, $\vec{V}$ 是速度矢量, m/s; ρ 是流体密度, kg/m³; t 为时间, s; g 是重力加速度, m/s²; μ 是动力学粘度, Pa·s; P 是压力, Pa; k 为导热系数, W/(m·K); T 为温度, K; C_p 为比热容, J/(kg·K); $\dot{Q}$ 代表内热源源项。

为有效简化模型,构建了四分之一对称几何模型,如图 1 所示。模型中,对称面施加对称约束条件,液态高温合金由入口端注入锭模,入口温度设定为实际浇注温度,重力加速度取值为 9.8 m/s²。锭模与底砖初始温度均设置为 25 ℃,铸锭与锭模间的界面换热系数随温度变化,铸锭、锭模同底砖之间的界面换热系数都设置为 300 W/(m²·K)^[12],铸锭上表面及锭模外周侧壁与环境之间施加对流边界条件,对流换热系数设定为 100 W/(m²·K)。模拟研究用核心工艺参数如表 1 所示。

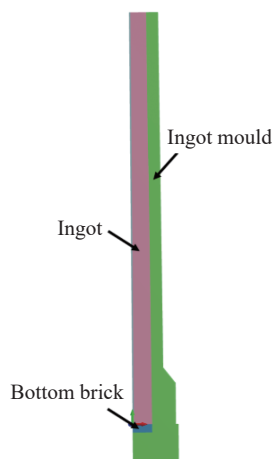


图 1 几何模型示意

Fig. 1 The schematic diagram of geometric model

表 1 模拟采用的主要工艺参数

Table 1 Main process parameters used in the simulation

Pouring temperature/℃	Inlet diameter/mm	Ingot mold temperature/℃
1 450	27、32、37	25、300、400、500

模拟研究中,浇注感应锭所采用的合金包括 GH4141、GH4202 及 GH4710。这些合金的固相线

与液相线温度均通过试验测量获得,黏度、密度等参数则由 ProCAST 内置热力学计算软件计算得到。对于热熔与导热系数,1 100 ℃ 及以下温度区间的数据由试验测定,1 100 ℃ 以上温度区间的数据则借助热力学软件计算获取,模拟采用的各合金典型热物性参数如图 2 所示。另外,锭模材质采用铸铁,其主要热物性参数来自 ProCAST 软件自带材

料库。研究建立的锭型尺寸为 $\Phi 360\text{ mm} \times 4\text{ 000 mm}$ ($\Phi 360\text{ mm}$ 锭型),底砖厚度为 80 mm。以四面体网格进行计算区域的离散化处理,合金入口区域网格单元尺寸为 4 mm,其余区域最大网格单元尺寸为 15 mm。求解过程采用 ProCAST 默认求解器,初始时间步长设为 0.001 s,充型阶段最大时间步长为 0.1 s,凝固阶段最大时间步长为 1 s。

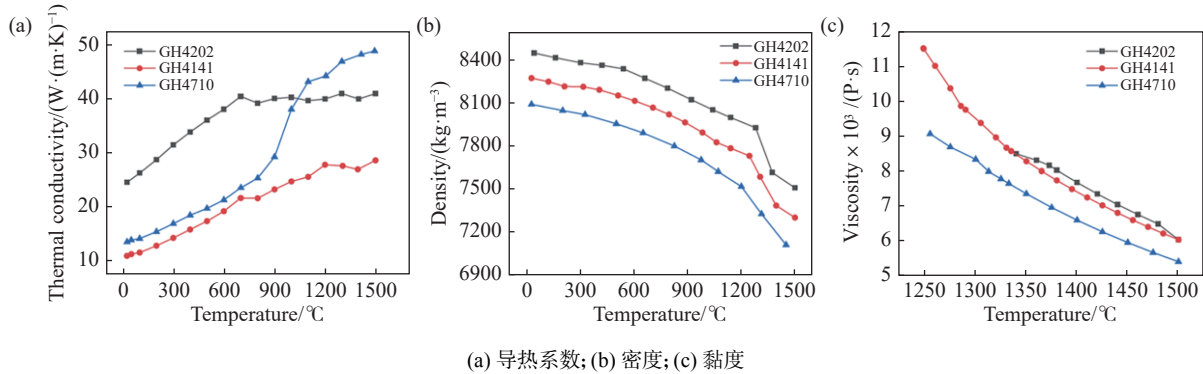


图 2 不同合金典型热物性参数

Fig. 2 Typical thermophysical properties of different alloys

如图 3(a)所示,王建武等人^[12]对 $\Phi 350\text{ mm} \times 3\text{ 200 mm}$ ($\Phi 350\text{ mm}$ 锭型)镍基高温合金真空感应锭进行了解剖分析,获得的铸锭缩孔形貌为深“V”形,缩孔深度约达到了铸锭长度的 1/2。图 3(b)为模拟预测的 $\Phi 360\text{ mm} \times 4\text{ 000 mm}$ ($\Phi 360\text{ mm}$ 锭型)镍基高温合金感应锭缩孔情况,可知模拟预测所获得的缩孔形貌也呈深“V”形,缩孔深度也约为铸锭长度的 1/2。整体看来,模拟预测的缩孔形貌与试验解剖所得缩孔形貌较为吻合,说明模拟研究结果具有一定的合理性。

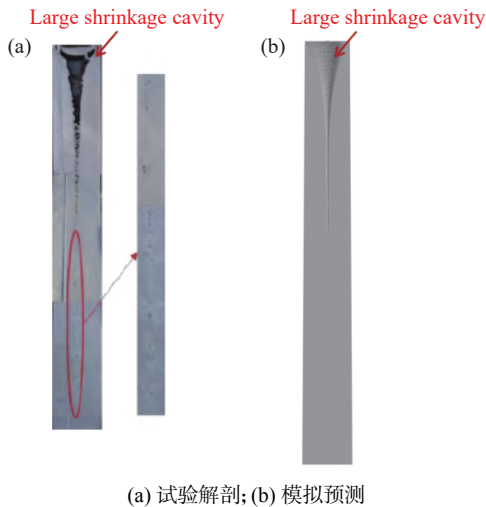


图 3 试验解剖的^[12]与模拟预测的缩孔形貌

Fig. 3 Shrinkage cavity morphology obtained from experimental dissection and simulated prediction

2 计算结果与讨论

2.1 浇注速度对感应锭缩孔的影响

研究采用的水口直径分别为 27、32、37 mm,对应的浇注速度分别为 1.96、2.44、3.21 kg/s。在浇注温度为 1 450 ℃ 时,不同浇注速度下 $\Phi 360\text{ mm}$ 锭型 GH4141 合金感应锭凝固过程,当合金固相率达到 96.5% 时的温度分布如图 4 所示。分析发现,无论浇注速度如何变化,感应锭纵向均呈现上部温度低、下部温度高(箭头标记位置)的特征。可见,浇注速度的调整并未改变感应锭纵向的温度分布特征。

在探究浇注速度对感应锭凝固温度分布的影响规律后,进一步分析了不同浇注速度下的合金温度演化行为。分析选择的合金监测点位于点 1、2、3 (图 5),不同浇注速度下各监测点合金温度随时间变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,不同浇注速度下,感应锭冷却凝固过程中,在其纵向方向上各个监测点合金的温度都随着时间的增加而降低。在冷却凝固的初始阶段,不同浇注速度下,各监测点合金的温度差异较小,而随着冷却凝固的进行,在液相线温度及固相线温度范围,感应锭下部监测点 3 的合金温度逐渐高于中部及上部监测点 2 及点 1 的合金温度,且中部附近监测点 2 的合金温度也逐渐高于上部监测点 1 的合金温度。这表明浇注速度变化不会影响感应锭纵向凝固次序,不同浇注速度下,铸锭上

部始终先凝固,而下部后凝固。同时,以上结果也说明改变浇注速度未减少铸锭内部的热节位置,调整浇注速度可能难以显著减轻感应锭内部小尺寸缩松问题。

图7为不同浇注速度下GH4141合金感应锭头部(浇口端)的缩孔深度。可以发现,随着浇注速度从1.96 kg/s增加到2.44 kg/s时,感应锭缩孔深度从1 420 mm增加到了1 756 mm;而当浇注速度从2.44 kg/s增加到3.21 kg/s时,感应锭缩孔深度从1 756 mm减小到了1 598 mm。可见,感应锭的缩孔深度未随着浇注速度的增加而出现规律性的变化。研究接着剖析了这一现象的产生缘由。图8为充型结束阶段不同浇注速度对应的锭模温度。观察可知,随着浇注速度的增加,上部锭模(黑色虚线方框内部)的温度随之减小,较低的上部锭模温度将不利于感应锭上部合金液的补缩,会增大其缩孔尺寸。另外,研究从锭模上部到下部依次选取了监测点4到点7作为特征点(图8),分析了合金液浇注充型结束时锭模上部监测点4与下部点7的温差。如图9所示,研究发现,随着浇注速度从1.96 kg/s增加到3.21 kg/s,锭模上部监测点4与下部点7的温差从405℃减小到了292℃。锭模纵向温差的减

小使得感应锭纵向温差相应地减小,在一定程度上缓解了铸锭上部温度高,下部温度低的分布特征,有利于合金液的补缩,减小缩孔尺寸。在上述两方面的综合作用下,感应锭的缩孔深度可能未随着浇注速度的增加而出现规律性的变化。

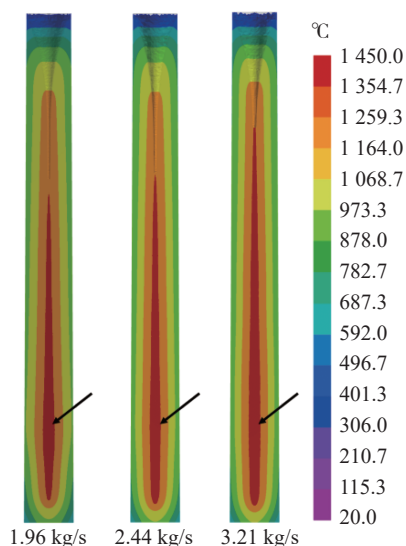


图4 不同浇注速度下感应锭凝固时的温度分布
Fig. 4 Temperature distribution during the solidification of induction ingots under different pouring speeds



图5 监测点位置示意
Fig. 5 Schematic diagram of monitoring points

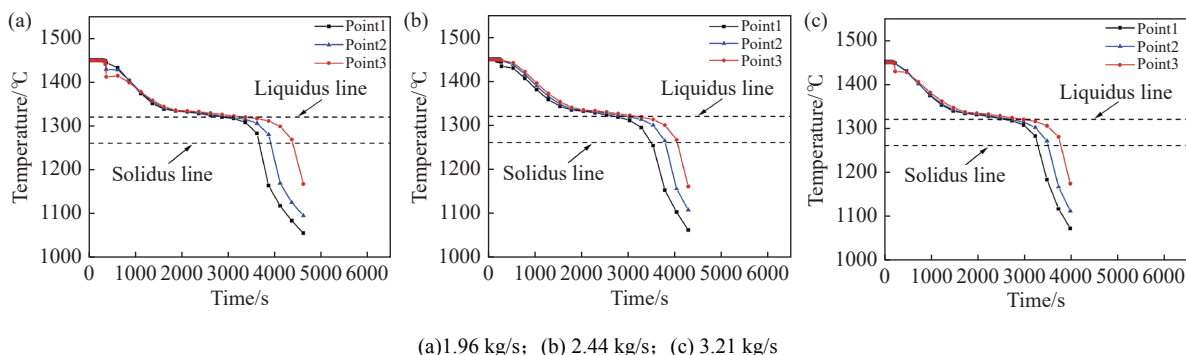


图6 不同浇注速度下各监测点合金温度随时间变化曲线
Fig. 6 The curve of temperature versus time of monitoring points under different pouring speeds

在水口直径分别为27、32 mm及37 mm时,即不同浇注速度下,不同牌号高温合金感应锭(Ø360 mm锭型)的缩孔深度如图10所示。由图10可知,不同浇注速度下,GH4141、GH4202及GH4710合金感应锭的缩孔深度都未出现规律性的变化,说明浇注速度的变化对缩孔的影响较为复杂。同时发现,随着水口直径增大,浇注速度的增加,GH4141合金

感应锭缩孔深度最大变化幅度为23.6%, GH4202合金感应锭缩孔深度最大变化幅度为11.3%, GH4710合金感应锭缩孔深度最大变化幅度为13.4%。由此可知,改变浇注速度后不同牌号高温合金感应锭的缩孔深度变化幅度小于25%。由铸件形成相关理论可知,浇注过程中应控制铸件温度分布,使铸件温度呈现沿底部至浇口方向逐级上升

的趋势,有利于铸件在纵向实现顺序凝固,建立良好的补缩条件,减小缩孔尺寸^[24]。结合图4及图6的分析结果可知,在高温合金感应锭浇注过程中,改变浇注速度未改变感应锭在纵向方向上的温度分布规律及凝固顺序,使得感应锭纵向实现顺序凝固,因此仅调整浇注速度,并不能有效减小缩孔深度。

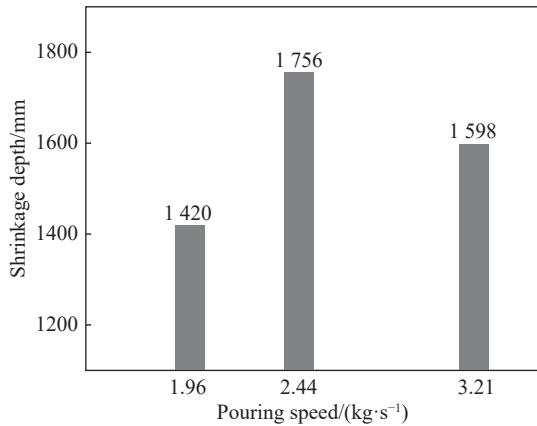


图7 感应锭端部缩孔深度随浇注速度的变化

Fig. 7 Change in shrinkage cavity depth at the end of induction ingot with the pouring speed

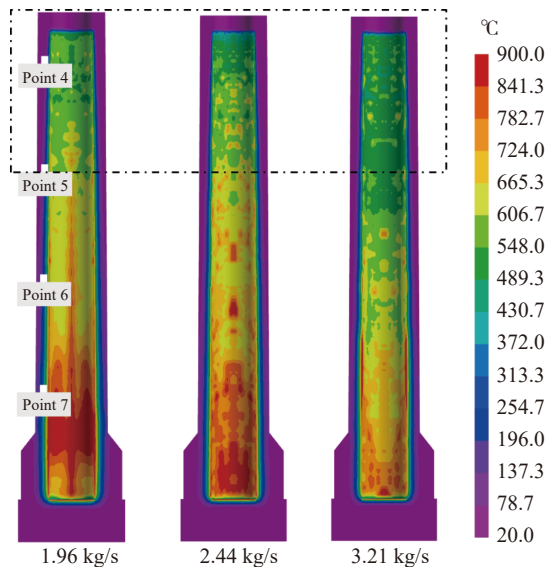


图8 不同浇注速度下浇注充型结束锭模的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of the ingot mold at the end of pouring and filling under different pouring speeds

2.2 锭模加热温度对感应锭缩孔的影响

图11显示了不同锭模温度下凝固过程锭模及感应锭温度分布。由图11可知,在不同锭模温度下,浇注充型结束后,感应锭温度较高。相对于锭模温度为25℃(锭模未加热),当锭模加热温度为400℃时,锭模整体温度较高,且在纵向方向上,锭模下部的高温区域与上部低温区域的温差较小。在感应锭凝固过程,当固相分数达到83%及100%时,相对

于锭模温度为25℃,当锭模加热温度为400℃时,锭模与感应锭纵向温度分布差异都较小。当合金液固相分数达到100%时,在锭模温度为25℃条件下,感应锭的缩孔深度达到了1420 mm,在锭模加热温度为400℃条件下,感应锭的缩孔深度则为789 mm。相对于锭模未加热,采用锭模加热后感应锭缩孔深度减小44.4%,说明使用锭模加热显著减小了感应锭缩孔深度。

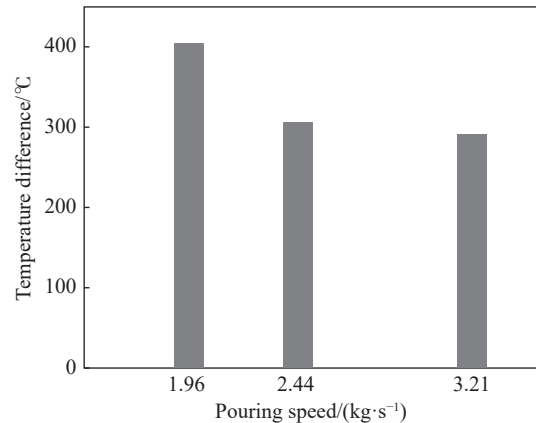


图9 不同浇注速度下锭模温差

Fig. 9 Temperature difference of the ingot mold under different pouring speeds

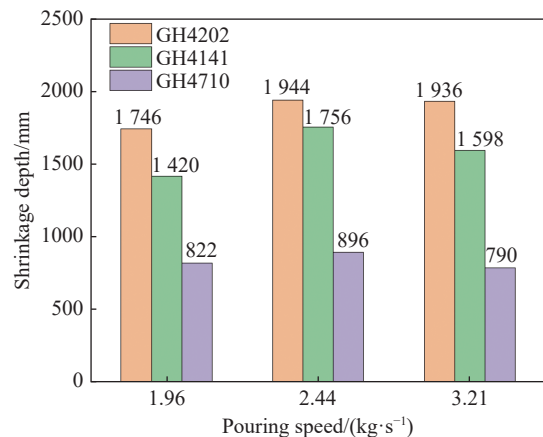


图10 不同浇注速度下不同牌号高温合金感应锭的缩孔深度

Fig. 10 Shrinkage cavity depth of induction ingots of different grades of superalloy under different pouring speeds

出现以上现象的原因在于,未采用锭模加热时,感应锭浇注过程中,锭模下方与合金液接触时间长,温度高,而锭模上部与合金液接触时间短,温度低。浇注冲型结束后,锭模纵向温度分布与感应锭在纵向实现顺序凝固的温度分布相反,其影响感应锭凝固时的温度分布,导致感应锭纵向凝固向着顺序凝固的反方向发展,使得感应锭缩孔深度大。而使用锭模加热后,在浇注冲型结束后,加热的锭模纵向温差小,其减轻了锭模温度对感应锭凝固过程的影响,

减小了感应锭凝固过程纵向方向上的温差,在一定程度上改善了感应锭纵向凝固向着顺序凝固反方向

发展的趋势,因此采用锭模加热可以明显减小感应锭的缩孔深度。

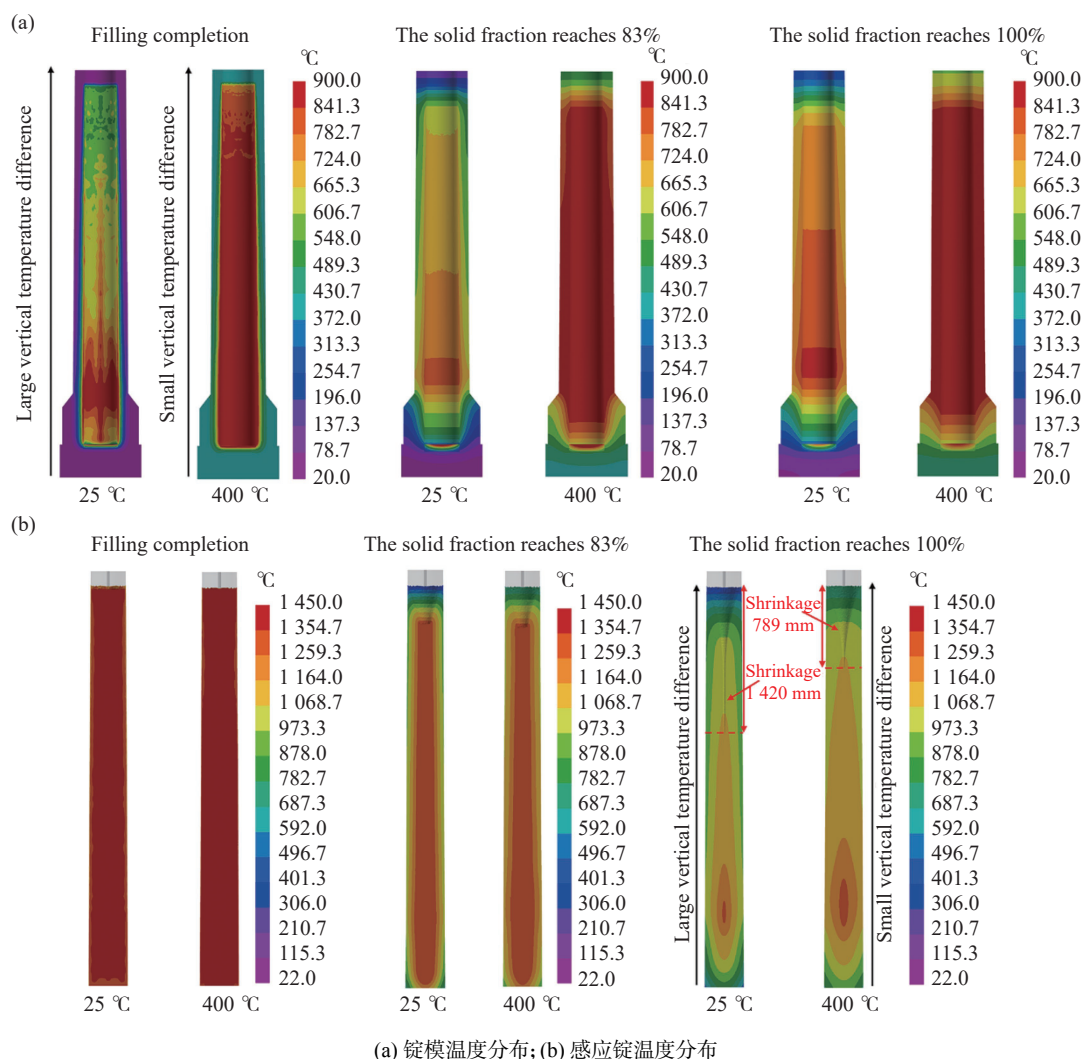


图 11 不同锭模温度下凝固过程锭模及感应锭温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of the ingot mold and induction ingot during the solidification process at different ingot mold temperatures

进一步地,研究分析了不同锭模温度对 GH4141、GH4202、GH4710 合金感应锭缩孔的影响。由图 12 可知,对于 GH4141 合金,随着锭模温度从 25 °C 增大到 500 °C,感应锭缩孔深度从 1 420 mm 逐渐减小到了 761 mm,减小 46.4%。对于 GH4202 合金,随着锭模温度从 25 °C 增大到 500 °C,感应锭缩孔深度从 1 746 mm 逐渐减小到了 1 236 mm,减小 29.2%。对于 GH4710 合金,随着锭模温度从 25 °C 增大到 500 °C,感应锭缩孔深度从 822 mm 逐渐减小到了 526 mm,减小 36%。综上发现,对于不同牌号高温合金,提高锭模温度,感应锭缩孔深度减小量大于 25%,即采用锭模加热都能改善感应锭缩孔问题,且锭模加热温度越高,感应锭缩孔深度减小效果越明显。

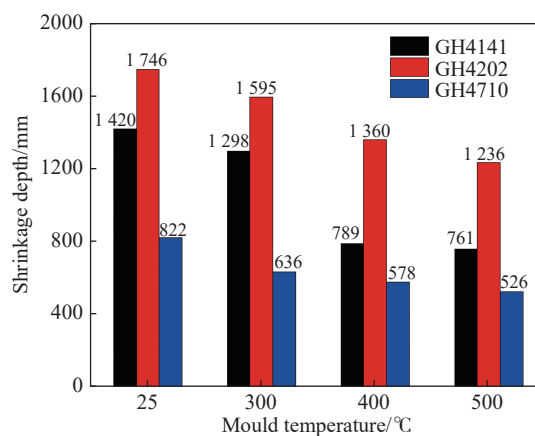


图 12 不同锭模温度下不同牌号合金的感应锭缩孔深度

Fig. 12 Induction ingot shrinkage cavity depth of different grades of alloys at different ingot mold temperatures

但需要注意的是,随着锭模加热温度的增高,加热成本增大,锭模也容易出现翘曲变形等问题,影响锭模的使用寿命,因此锭模加热温度的选择需要兼顾感应锭缩孔改善效果、加热成本及锭模寿命等多个因素。

3 结论

1) 感应锭浇注过程中,随着浇注速度的增加,一方面锭模与感应锭在纵向方向上的温差减小,在一定程度上缓解了感应锭上部温度高,下部温度低的分布特征,有利于合金液的补缩;另一方面上部锭模的温度降低,对于感应锭上部合金液的补缩不利。在这两方面的综合作用下,感应锭缩孔深度可能不会随着浇注速度的改变而出现规律性的变化。

2) 浇注速度的调整不会改变感应锭纵向温度分布与凝固顺序,无法使感应锭在纵向方向上实现从底部到顶部(浇口端)的顺序凝固。改变浇注速度后不同牌号高温合金感应锭的缩孔深度变化小于25%,通过优化浇注速度不能显著减小感应锭的缩孔深度。

3) 使用锭模加热可减小感应锭凝固过程纵向方向上的温差,能在一定程度上改善感应锭纵向凝固向着顺序凝固反方向发展的趋势。随着锭模温度从25℃增大到500℃,GH4141合金感应锭缩孔深度减小46.4%,GH4202合金感应锭缩孔深度减小29.2%,GH4710合金感应锭缩孔深度减小36%。采用锭模加热可较为明显地减轻感应锭的缩孔深度。

参考文献

- [1] Gialanella S, Malandrucolo A. Aerospace alloys[M]. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [2] 朱兴,江河,董建新,等.高合金化难变形高温合金GH4975热裂敏感性研究[J].稀有金属材料与工程,2026,55(1): 203-212.
Zhu Xing, Jiang He, Dong Jianxin, et al. Hot cracking sensitivity of difficult-to-deform superalloy GH4975 with high alloying[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2026, 55(1): 203-212.
- [3] 郭建亭.高温合金材料学.下册,高温合金材料与工程应用[M].北京:科学出版社,2010.
Guo Jianting. Materials science and engineering for superalloy(Volume 2), Superalloy Materials and Engineering Applications[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] Akande I G, Oluwale O O, Fayomi O S I, et al. Overview of mechanical, microstructural, oxidation properties and high-temperature applications of superalloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 2222-2231.
- [5] 任帅,吕少敏,谢兴飞,等.变形高温合金成分调控与冶金制备技术研究[J].铸造,2025,74(7): 868-879.
Ren Shuai, Lü Shaomin, Xie Xingfei, et al. Research on the regulation of the composition and metallurgical preparation technology of deformed superalloys[J]. Foundry, 2025, 74(7): 868-879.
- [6] Zhang Hengnian, Li Shu, Li Xin, et al. A simulation method for predicting shrinkage cavity and cracking tendency in waspaloy vacuum induction melting ingot[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(15): 15980-15990.
- [7] 贾雷.高合金化GH4151合金裂纹形成机理及控制研究[D].北京:北京科技大学,2024.
Jia Lei. Study on the mechanism and control of cracking in highly alloyed GH4151[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.
- [8] Wang Zixing, Li Qing, Wang Lei. Numerical simulation of the influence of electrode shrinkage cavity on ESR process of IN718 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(12): 3579-3589.
- [9] 石骁.电渣重熔大型IN718镍基合金感应锭凝固和偏析行为基础研究[D].北京:北京科技大学,2019.
Shi Xiao. Fundamental study on the solidification and segregation behaviors of large-sized as-cast IN718 electrosag remelting ingots[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [10] 姜彩伟,刘建民,胡显军.真空感应炉冶炼铁铬铝合金铸锭常见缺陷成因分析及改善措施[J].真空,2019,56(2): 74-77.
Jiang Caiwei, Liu Jianmin, Hu Xianjun. Cause analysis and improvement measures of common defects in Fe-Cr-Al alloy ingots smelted by VIM furnace[J]. Vacuum, 2019, 56(2): 74-77.
- [11] 唐平梅,周扬,姜东滨.镍基高温合金感应锭浇注过程的数值模拟研究[J].钢铁钒钛,2022,43(4): 127-133, 141.
Tang Pingmei, Zhou Yang, Jiang Dongbin. Numerical simulation on pouring process of nickel base superalloy induction ingot[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(4): 127-133, 141.
- [12] 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].中国冶金,2022,32(4): 63-69, 76.
Wang Jianwu, Xu Zhiqiang, Yang Shufeng. Effect of hot top design on shrinkage porosity of nickel-based superalloy

- ingots[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 63-69, 76.
- [13] 张亨年, 李澍, 江河, 等. 大型 GH4738 合金真空感应熔炼铸锭凝固与缩孔研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2026, 49(1): 1-8.
Zhang Hengnian, Li Shu, Jiang He, et al. Study on solidification behavior and shrinkage control of large-scale GH4738 alloy vacuum induction melting ingot[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2026, 49(1): 1-8.
- [14] 张亨年, 赵展, 李澍, 等. 大锭型 GH4169 合金铸锭真空感应熔炼凝固过程及缩孔控制[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(7): 2287-2297.
Zhang Hengnian, Zhao Zhan, Li Shu, et al. Solidification process and shrinkage control of large-scale GH4169 alloy vacuum induction melting ingot[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(7): 2287-2297.
- [15] Ghodrati N, Loucif A, Morin J B, et al. Modeling of the influence of hot top design on microporosity and shrinkage cavity in large-size cast steel ingots[C]//8th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 2022: 239-244.
- [16] 元俊杰. 大型钢锭凝固过程的数值模拟与实验装置研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Yuan Junjie. Numerical simulation in heavy ingot solidification and the study of experimental apparatus[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [17] 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.
Cheng Jianqiang, Hu Xianjun, Gu Ye, et al. Application of exothermic insulated riser in superalloy vacuum casting[J]. Foundry Technology, 2016, 37(1): 110-113.
- [18] 黄婷, 李京社, 唐海燕, 等. 铸锭凝固过程缩孔缺陷的数值模拟[J]. 铸造, 2013, 62(7): 633-636, 640.
Huang Ting, Li Jingshe, Tang Haiyan, et al. Numerical simulation research of the shrinkage defects in ingot casting[J]. Foundry, 2013, 62(7): 633-636, 640.
- [19] 高晨, 张立峰, 李崇巍, 等. 真空条件下锭模参数对铁镍合金缩孔分布的影响[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(7): 887-894.
Gao Chen, Zhang Lifeng, Li Chongwei, et al. Effect of molding parameters on porosity distribution in Fe-Ni alloy ingots under vacuum circumstance[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(7): 887-894.
- [20] Kermanpur A, Eskandari M, Purmohamad H, et al. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1096-1104.
- [21] 仇春荔, 陶盼, 廖恒成, 等. 浇注速度对铸件充型过程流场影响的数值模拟[J]. 铸造, 2007(11): 1190-1194.
Qiu Chunli, Tao Pan, Liao Hengcheng, et al. Numerical simulation on influence of pouring velocity on flow field of casting during mold-filling[J]. Foundry, 2007(11): 1190-1194.
- [22] 刘国军, 赵俊学, 唐雯聃, 等. 钢锭模表面温度与内部质量对应关系研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(7): 1692-1696, 1700.
Liu Guojun, Zhao Junxue, Tang Wendan, et al. Relationship between ingot mould surface temperature and internal quality[J]. Foundry Technology, 2017, 38(7): 1692-1696, 1700.
- [23] Wang J Q, Fu P X, Liu H W, et al. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot[J]. Materials & Design, 2012, 35: 446-456.
- [24] 李庆春. 铸件形成理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
Li Qingchun. Theoretical basis of casting formation[M]. Beijing: China Machine Press, 1982.

编辑 邓淑惠