

工艺参数对大尺寸 K465 镍基母合金锭中心缩孔的影响

严志¹ 王树森² 邹伟¹ 程陆凡³ 卢厚辰³ 仇凤江³

(1.中国航发航空科技股份有限公司;

2.中国人民解放军海军装备部驻沈阳地区军事代表局驻鞍山地区军事代表室;3.中国科学院金属研究所)

摘要 分析了大尺寸 K465 镍基母合金锭产生中心缩孔的原因,通过设计正交试验,采用 ProCAST 软件对浇注温度、浇注速率、模具温度等工艺参数对铸锭缩孔的影响程度进行了模拟计算,研究了大尺寸 K465 镍基高温合金母合金锭中心缩孔的影响因素。结果表明,合金锭由外至内的晶粒分布为细小等轴晶、横向柱状晶、粗大等轴晶,当横向凝固速率过快时容易导致枝晶搭桥,阻碍上部液相向下补缩,是产生中心缩孔的主要原因。通过数值模拟计算发现,中心缩孔主要受浇注温度影响较大,对浇注速率的敏感性较小。最优浇注工艺如下:浇注温度为 1 420 ℃、浇注时间为 20 s、模具温度为 700 ℃,可大幅降低合金锭的中心缩孔尺寸。

关键词 镍基高温合金;大尺寸铸锭;中心缩孔;ProCAST 模拟;浇注工艺

中图分类号 TG244;TG146.15

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Processing Parameters on Shrinkage Cavities in Large-scale K465 Nickel-based Master Alloy Ingot

Yan Zhi¹, Wang Shusen², Zou Wei¹, Cheng Lufan³, Lu Houchen³, Zhang Fengjiang³

(1. AECC Aero Science and Technology Co. Ltd.; 2. Anshan Military Representative Office of Shenyang Military Representative Bureau, Naval Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The origination for shrinkage cavity defects forming in large-scale K465 master alloy ingot was analyzed. By designing orthogonal experiment, the effect of pouring temperature, pouring rate and mold temperature on the shrinkage cavity defects in the ingot was simulated to investigate the influence factor of shrinkage cavity defects forming in K465 master alloy ingot. The results indicate that the grain distribution from outside to inside is fine equiaxed grains, transverse columnar grains and thick equiaxed grains, respectively. When the horizontal solidification rate is excessive, the dendrites bridge is easily to occur, and hinder upper liquid phase feeding downward, which is the main reason for shrinkage cavity defects. According to the numerical simulation, the occurrence of shrinkage cavity defects is greatly affected by pouring temperature, and insensitive to the pouring rate. The optimal pouring process is pouring temperature of 1 420 ℃, filling time of 20 s and pre-heating temperature of 700 ℃, where the size of shrinkage cavity defects in the alloy ingot can be significantly reduced.

Key Words: Nickel-based Superalloy, Lage-scale Ingot, Shrinkage Cavity Defects, ProCAST Simulation, Pouring Process

镍基高温合金具有优异的高温抗氧化、耐腐蚀性能,并且兼具高温组织及性能稳定性,因而被广泛应用于制造极端环境下工作的热端部件^[1-3]。其中,K465 镍基合金是典型的高 W 高温合金,通过增加 W 含量,可提高合金及 γ' 相的固溶强化水平^[4-6],进而提高高温下的组织稳定性及力学性能,适用于制备在 1 000 ℃以下

长期服役工作的涡轮叶片,加之其成本较低,因而具有较大的开发潜力。

由于 K465 镍基合金中含有较高的 W(9.5%~11.0%),以及共晶组成元素 Al、Ti(总含量为 7.1%~8.9%),因此合金的凝固区间较宽(约为 130 ℃),导致凝固期间会产生较大体积分数的残余液相。合金凝固

收稿日期:2022-05-30;修改稿收到日期:2022-06-25

第一作者简介:严志,男,1988 年出生,工程师,成都(610503),E-mail: 279236831@qq.com

通信作者:仇凤江,男,1984 年出生,工程师,沈阳(110016),E-mail: zhangfj@imr.ac.cn

引用格式:严志,王树森,邹伟,等. 工艺参数对大尺寸 K465 镍基母合金锭中心缩孔的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):410-414.

YAN Z, WANG S S, ZOU W, et al. Influence of processing parameters on shrinkage cavities in large-scale K465 nickel-based master alloy ingot[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):410-414.

期间,当发生液→固转变的枝晶骨架搭桥时会阻碍上部液相向下补缩,同时,枝晶间的残余液相凝固产生体积收缩与合金固相冷却收缩的共同作用下,将导致合金锭内部形成中心缩孔^[7]。K465 母合金锭多为 $\phi(75\sim90)$ mm,高 600~1 200 mm 的圆锭,为保证生产效率,浇注速率通常较快,锭模中的合金液无法由下至上的顺序凝固,导致横向枝晶搭桥更容易发生,进而增加了中心缩孔的产生。在后续定量切取使用时,当切割路径恰好穿过中心缩孔区域时,容易导致切割期间产生的夹杂物进入缩孔区域,使铸件由于夹杂物引起的报废率大幅提高,由此可见,改善母合金锭的冶金品质,减小甚至消除合金锭中心缩孔,对提高高温合金的纯净度具有重要意义。

本研究拟通过分析大尺寸 K465 镍基高温合金母合金锭的凝固行为,设计正交试验,并采用数值模拟对不同工艺参数对 K465 镍基母合金锭中心缩孔的影响规律进行分析,进而优化合金锭浇注工艺,改善母合金锭的冶金品质,旨在为大尺寸高温合金母合金锭的制备工艺提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

K465 镍基高温合金成分见表 1。母合金锭尺寸为 $\phi85\text{ mm}\times1\,000\text{ mm}$,合金锭冒口尺寸为 $\phi45\text{ mm}\times150\text{ mm}$,位于合金锭顶部。

表 1 K465 镍基高温合金成分

Tab.1 Chemical composition of K465 nickel-based superalloy %									
wt%									
C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	B	Ni
0.16	9.0	10.0	10.0	1.5	5.7	2.4	1.0	0.02	余量

1.2 ProCAST 模拟试验及参数设置

用 ProCAST 模拟软件对 K465 镍基高温合金锭的浇注过程进行数值模拟,从而获得不同工艺参数下的中心缩孔分布,观察合金锭的温度场分析以及合金锭中心缩孔的形成过程,以及各工艺参数的主要影响机理。K465 镍基高温合金母合金锭三维实体模型见图 1。

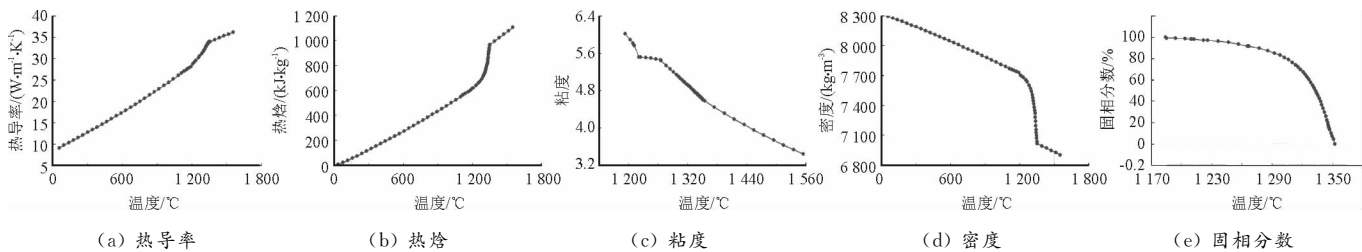


图 3 K465 合金热物性参数与温度的关系

Fig.3 Relationship between thermophysical parameters of K465 alloy and temperatures

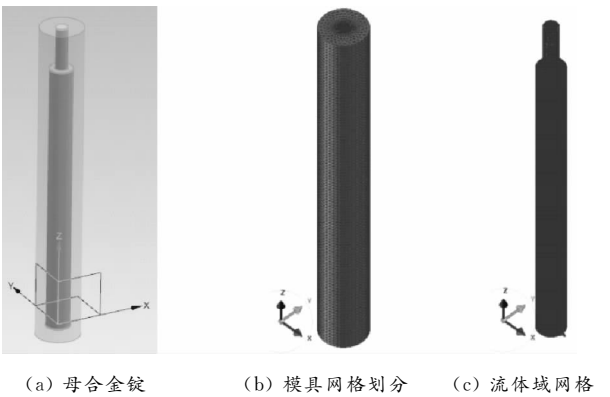


图 1 K465 镍基高温合金锭铸造模拟几何模型

Fig.1 Simulation geometry model of master alloy ingot of K465 nickel-based superalloy

对 K465 镍基合金母合金锭的流体域以及模具进行网格划分,网格形状为四面体,并自由划分。通过前期网格无关性验证发现,网格数为 3 015 270,浇口直径为 20 mm 时,浇注时间在 10~40 s 内,其束流平稳,满足铸造分析的基本要求,见图 2。

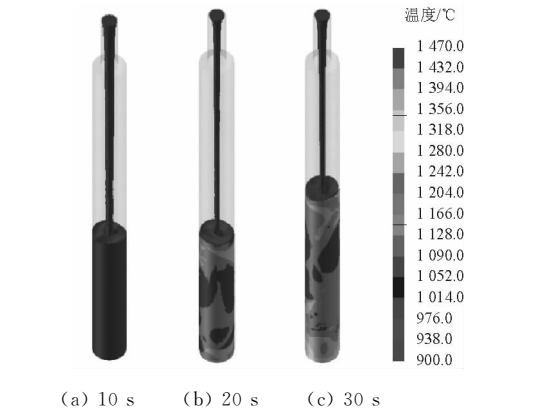


图 2 浇口直径为 20 mm 不同浇注时间内平稳束流场模拟

Fig.2 Simulation of steady beam flow field for different total pouring time with gate diameter of 20 mm

通过 ProCAST 软件中的 Material Database 模块计算出合金在凝固时热导率、热焓、粘度、密度、固相分数等物性参数与温度的关系,见图 3。

根据合金的物性参数设置计算模型的边界条件,流体与模具之间的传热系数为 2 000 W/(m²·℃),浇注

温度为 1 400~1 440 ℃,浇注时间为 10~30 s,冒口尺寸为 $\phi 45\text{ mm}\times 160\text{ mm}$,模具温度为 600~700 ℃,重力加速度为 9.8 m/s^2 。

1.3 正交试验设计

通过设计 $L_9(3^3)$ 正交试验对结果进行正交分析,研究不同工艺参数对母合金锭凝固行为及中心缩孔的影响程度,见表 2。

表 2 $L_9(3^3)$ 正交试验

Tab.2 Grouping of $L_9(3^3)$ orthogonal experiment			
因素方案	浇注温度/℃	浇注时间/s	模具温度/℃
1	1 400	10	600
2	1 400	20	650
3	1 400	30	700
4	1 420	10	700
5	1 420	20	600
6	1 420	30	650
7	1 440	10	650
8	1 440	20	700
9	1 440	30	600

1.4 显微组织观察及表征

用线切割切取中心缩孔附近的合金锭截面切片,将试样研磨抛光后,采用体积分数为 5% 的盐酸+95% 的乙醇的腐蚀液进行电解腐蚀,使用 FEI Quanta X50 扫描电镜进行背散射试验 (EBSD),分析合金锭截面晶粒分布,使用 LEICA DM4M 光学显微镜进行观察,研究大尺寸合金锭的凝固行为以及中心缩孔的形成原因。

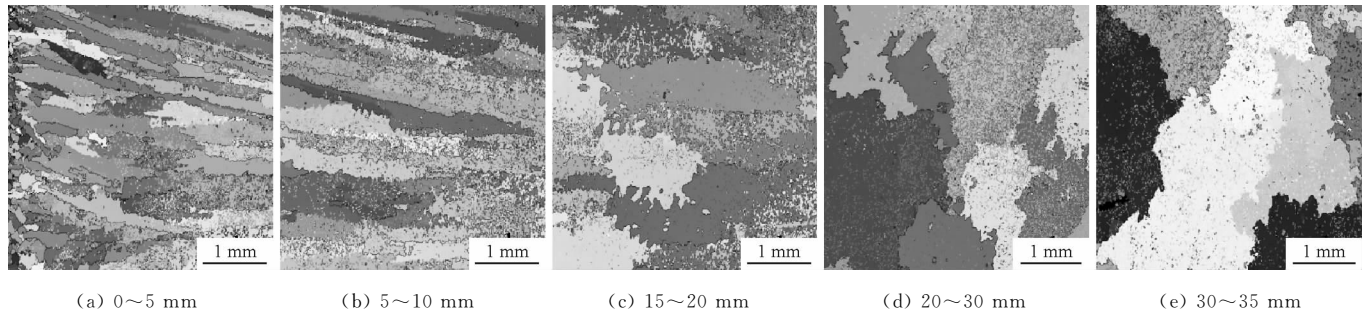


图 5 距铸锭边缘不同区域 EBSD 形貌

Fig.5 EBSD morphologies of different regions from the edge of ingot

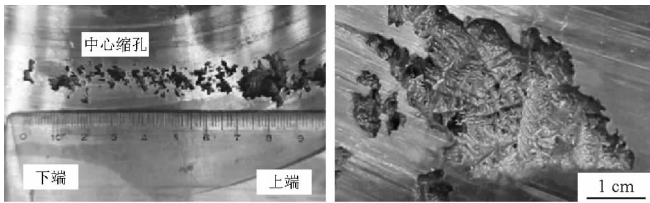
且可根据晶粒形态推断出合金的凝固行为:当合金熔体浇注模具后,由于模具温度相对较低,因此与内壁接触的熔体可快速凝固形成细等轴晶,见图 5a;随后在温度梯度的作用下,外侧的细小等轴晶可作为形核质点,促进合金熔体由外向内以柱状晶形式凝固,见图 5a、图 5b;在外侧合金熔体凝固期间,释放的大量结晶潜热将导致内部熔体温度升高,并降低其凝固速率,因此,合金锭中心区域主要以等轴晶形式凝固,并且越靠近芯部,晶粒尺寸越大,见图 5c~图 5e。

K465 合金锭成分中含有较多难熔元素 W,也含有

2 试验结果及讨论

2.1 中心缩孔产生原因研究

K465 合金锭中心缩孔形貌见图 4。从图 4a 看出,合金锭中心缩孔分布不连续;对该区域进行放大观察(见图 4b),可以看到,缩孔内部存在较为明显的树枝晶。分析认为,这是由于该区域凝固期间液相体积分数不足,导致一次、二次枝晶凝固收缩后液相无法充分补缩枝晶间区域,导致凝固结束后该区域出现二次缩孔。



(a) 宏观形貌 (b) 局部放大

图 4 K465 合金锭中心缩孔纵剖面形貌

Fig.4 Longitudinal section morphologies of center shrinkage cavities in K465 nickel-based superalloy ingot

对 K465 合金锭中心缩孔所在横截面区域进行 EBSD 分析,见图 5。可以看出,合金由外至内的晶粒分布为:细小等轴晶(见图 5a)→柱状晶(见图 5a、图 5b)→等轴晶(见图 5c、图 5d)→粗大等轴晶(见图 5e)。分析认为,合金不同位置的晶粒形态与其凝固顺序有关,并

较多的共晶形成元素 Al、Ti,这使得其凝固区间较宽,在凝固过程中会产生较大体积分数的残余液相,不易形成自下而上的顺序凝固趋势。当浇注工艺不合理时会使其产生缩孔,熔体凝固速率过快时,导致铸锭中心部位来不及得到液相补缩,形成缩孔;熔体凝固速率过慢时,导致先凝固的枝晶之间开始出现搭桥接触,形成骨架状网格,晶间液相补缩流动困难。随着凝固进行,固态枝晶体积收缩小于液相的体积收缩致,枝晶尖端将会露出,从而形成树枝晶形貌,并使铸锭中心产生缩孔。因此设计合理的浇注工艺对改善中心缩孔具有积极意

义。

2.2 ProCAST 模拟试验

2.2.1 正交试验模拟结果分析

铸造过程中缩孔率是铸件出现缩孔和缩松等缺陷概率的重要指标。根据不同工艺参数下,正交试验结果中缩孔率的反馈来选取最优浇注工艺,表 3 为 K465 合金浇注工艺参数正交试验模拟结果。

表 3 K465 镍基合金浇注工艺参数正交试验模拟结果
Tab.3 Orthogonal experimental simulation results of pouring process parameters for K465 nickel-based superalloy

浇注温度/℃	浇注时间/s	模具温度/℃	缩孔体积/mm ³	缩孔概率/%
1 400	10	600	1 420.5	63.4
1 400	20	650	1 327.2	55.7
1 400	30	700	1 003.9	45.9
1 420	10	700	1 040.1	46.3
1 420	20	600	879.3	38.9
1 420	30	650	1 119.2	44.5
1 440	10	650	1 802.6	68.6
1 440	20	700	1 710.7	66.0
1 440	30	600	2 380.3	94.6

表 4 与表 5 为各工艺参数下对应缩孔体积与缩孔最大概率。根据均值的变化可以分析出该参数对缩孔体积与缩孔概率的影响规律,极值为均值中的最大值减去最小值,分析出该参数对缩孔体积与缩孔概率的影响。

表 4 缩孔积分体积的分析
Tab.4 Integral volume analysis of shrinkage cavity mm³

分析	浇注温度计算值	浇注时间计算值	模具温度计算值
总值 1	3 751.6	4 263.2	4 680.1
总值 2	3 038.6	3 917.2	4 249.0
总值 3	5 893.6	4 503.4	3 754.7
均值 1	1 250.5	1 421.1	1 560.0
均值 2	1 012.9	1 305.7	1 416.3
均值 3	1 964.5	1 501.1	1 251.6
最大值	1 964.5	1 501.1	1 560.0
最小值	1 012.9	1 305.7	1 251.6
极差 R	951.6	195.4	308.4

根据表 3 数据可知,以缩孔积分体积作为判据时,最优浇注温度为 1 420 ℃,浇注时间为 20 s,模具温度为 700 ℃;以缩孔最大概率作为判据时,最优工艺参数与以缩孔积分体积为判据时一致。并且浇注温度对缩孔积分体积与缩松概率影响最大,见表 5。

设定综合缩松量为缩孔体积与缩孔概率参数的乘积,其结果见表 6,影响规律见图 6。方案 1(Z₁)对应浇注温度为 1 400 ℃、浇注时间 10 s、模具温度为 600 ℃,方案 2(Z₂)对应浇注温度为 1 420 ℃、浇注时间 20 s、模具温度为 650 ℃,方案 3(Z₃)对应浇注温度 1 440 ℃、浇

注时间为 30 s、模具温度为 700 ℃。最终最优浇注温度为 1 420 ℃,浇注时间为 20 s,模具温度为 700 ℃。

表 5 缩孔最大概率的分析
Tab.5 Maximum probability analysis of shrinkage cavity %

分析	浇注温度计算值	浇注时间计算值	模具温度计算值
总值 1	165.0	178.3	196.9
总值 2	129.7	160.6	168.8
总值 3	229.2	185	158.2
均值 1	55.0	59.4	65.6
均值 2	43.2	53.5	56.3
均值 3	76.4	61.7	52.7
最大值	76.4	61.7	65.6
最小值	43.2	53.5	52.7
极值 R	33.2	8.2	12.9

表 6 综合缩松量的分析
Tab.6 Comprehensive shrinkage analysis mm³

方案	浇注温度计算值	浇注时间计算值	模具温度计算值
Z ₁	6 190.140	7 601.285	9 215.117
Z ₂	3 941.064	6 291.023	7 172.312
Z ₃	13 508.131	8 331.290	5 939.935

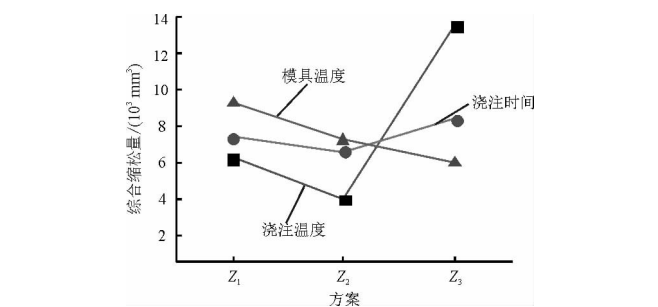


图 6 工艺参数对综合缩松量的影响
Fig.6 Influence of process parameters on comprehensive shrinkage

2.2.2 浇注工艺参数的影响

不同工艺下 K465 镍基合金锭的中心缩孔分布模拟分析见图 7。可以看出,在浇注温度为 1 420 ℃、浇注时间为 20 s、模具温度为 700 ℃时,高缩松区域出现在棒坯上端,对内部品质无影响。当浇注温度为 1 400 ℃

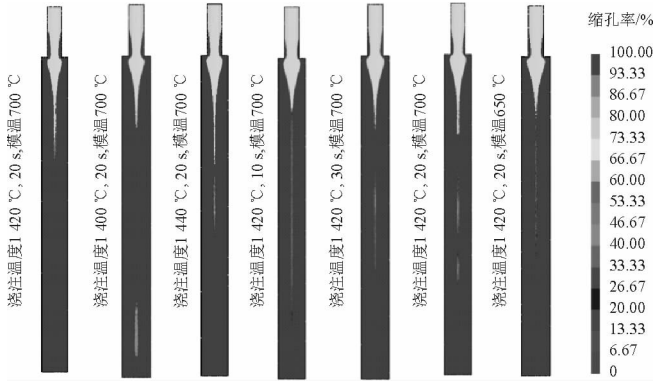


图 7 不同浇注工艺参数下缩孔率
Fig.7 Influence of pouring parameters on shrinkage rate

时,使得熔体快速凝固,下端补缩不及时,形成大缩孔。当浇注温度为 1 440 ℃时,过高的浇注温度导致熔体液相区向固相区的转变时间增加,熔体自周围向中心凝固,导致上端外表面一次缩孔收缩过大,并且二次缩孔位置更加靠向模具中心位置。

当浇注时间为 10 s 时,熔体快速填充至模具中,导致模具中的液相区范围较大,熔体凝固方式为完全的沿着模具壁面向棒材中心进行,致使最后的液相大部分残留于中心线区域,从而形成了高疏松条带区域。当浇注时间为 30 s 时,先浇注的金属液先凝固,残留液相区集中于固相区的上表面位置,当后浇注的金属液难以补充前端固相区的凝固所需时,在固相区中间位置将形成条带状疏松区域。

当模具温度低于 700 ℃时,先浇注的金属液先凝固,残留液相区集中于固相区前端中心位置,随着浇注进行,下端模具逐渐加热,上端模具的温度低于下端模具的温度,最终导致上端液相区的凝固速率高于下端液相区的凝固速率,进而形成了条带状高疏松区域。

2.2.3 浇注试验验证

采用试验与数值模拟相结合的方法对比铸造工艺参数优化前后,其结果见图 8。可见数值模拟预测缩孔率及其出现的位置与同等试验条件下结果一致,采用最优浇注工艺参数进行 K465 母合金锭浇注,铸件品质明显提高,疏松缺陷明显改善。

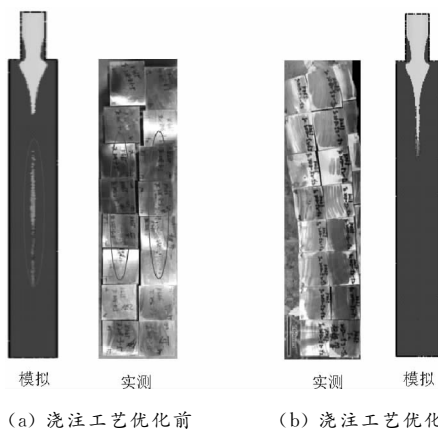


图 8 浇注工艺参数优化前后数值模拟与试验结果的对比
Fig.8 Comparison of numerical simulation and experimental results before and after optimization of pouring process parameters

3 结 论

(1)K465 镍基合金锭中心缩孔产生原因为不合理的浇注工艺使得合金在凝固过程中出现枝晶头部搭桥

接触,导致枝晶间液相补缩困难,且固相枝晶体积收缩小于液相体积收缩,最终出现缩孔。

(2)K465 镍基合金锭浇注温度较低会导致熔体快速凝固,下端补缩不及时,形成大缩孔;浇注时间过短会导致熔体液相区范围较大,熔体沿横向凝固,导致形成高疏松条带区域;模具温度过低时会导致残留液相区集中于固相区前端中心位置,随着浇注进行,最终导致上端液相区的凝固速率高于下端液相区的凝固速率,进而形成条带状高疏松区域。

(3)采用正交试验法对 K465 镍基合金锭进行数值模拟时,采用缩孔体积、缩孔概率和综合疏松量为判据,最优工艺参数是浇注温度为 1 420 ℃,浇注时间为 20 s,模具温度为 700 ℃。

参 考 文 献

- [1] 赵朋,杨树峰,杨曙磊,等. 镍基高温合金均质化冶炼研究进展[J]. 中国冶金, 2021, 31(4): 1-11.
- [2] 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): 1 077-1 094.
- [3] 张军,介子奇,黄太文,等. 镍基铸造高温合金等轴晶凝固成形技术的研究和进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1 145-1 159.
- [4] YANG J X, ZHENG Q, SUN X F, et al. Formation of μ phase during thermal exposure and its effect on the properties of K465 superalloy[J]. Scripta Materialia, 2006, 55(4): 331-334.
- [5] LI Q, XIN L, WANG X, et al. Morphology evolution of γ' phase in K465 nickel-base superalloy during laser forming repairing[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 022 301.
- [6] 郭小童,郑为为,肖程波,等.K465 高温合金短时超温后的显微组织退化及拉伸性能[J].材料工程, 2018, 46(10): 77-86.
- [7] WEN G H, HUANG Y F, TANG P, et al. Improvement of tundish shape and optimization of flow control devices for sequence casting heavy steel ingots[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(1): 15-20.

(编辑:刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |