

引用格式: 王迪, 刘明亮, 何林, 等. K4169 高温合金反重力铸造薄壁机匣非线性充型设计与实验研究 [J]. 航空材料学报, 2025, 45(5): 171-182.

WANG Di, LIU Mingliang, HE Lin, et al. Nonlinear filling design and experimental study on thin-walled casings by counter-gravity casting of K4169 superalloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(5): 171-182.

## K4169 高温合金反重力铸造薄壁机匣非线性充型设计与实验研究

王迪<sup>1,2</sup>, 刘明亮<sup>1\*</sup>, 何林<sup>1\*</sup>, 隋大山<sup>3</sup>, 李九霄<sup>4</sup>, 董安平<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 上海交通大学塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030; 4. 上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 以 K4169 高温合金热端机匣为研究对象, 针对传统高温合金反重力铸造线性充型过程出现的液体飞溅、振荡、卷气等缺陷, 考虑到机匣铸件的复杂变截面结构, 通过水力学模拟实验探索加压速度对变截面的充型影响, 得到对于变截面结构, 加压速度越小, 液体充型越平稳。利用正交实验确定机匣模型最优充型工艺参数, 即浇注温度为 1460 °C, 型壳温度为 900 °C, 平均加压速度为 4 kPa/s。根据机匣模型结构设计线性与非线性充型压力曲线, 对两种充型方式进行数值模拟及实验研究。结果表明: 两种充型工艺相比, 在同样的充型时间内, 非线性充型平均浇口速度比线性充型下降 16.77%, 且非线性充型浇口速度更加平稳, 非线性充型机匣薄壁区域整体缺陷低于线性充型。线性充型机匣不同区域出现大量裂纹缺陷, 总体缺陷占比较高; 而非线性充型机匣没有出现裂纹缺陷, 只有少数微孔洞。无损检测结果也表明非线性充型机匣铸件缺陷更少, 说明非线性充型工艺有效减少机匣铸件的缺陷种类和数量。

**关键词:** 反重力铸造; 高温合金; 变截面; 水力学模拟实验; 数值模拟

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000082

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000082

中图分类号: TG249.5; TG245; V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)05-0171-12

### Nonlinear filling design and experimental study on thin-walled casings by counter-gravity casting of K4169 superalloy

WANG Di<sup>1,2</sup>, LIU Mingliang<sup>1\*</sup>, HE Lin<sup>1\*</sup>, SUI Dashan<sup>3</sup>, LI Jiuxiao<sup>4</sup>, DONG Anping<sup>1</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Institute of Forming Technology & Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Based on the hot-ended casing of K4169 superalloy as the research object, aiming at the defects such as liquid splashing, oscillation and entrained air in the linear filling process of traditional superalloy counter-gravity casting, particularly, considering the complex variable cross-section structure of the casing castings, the work explores the influence of pressurization speed on filling of such structure through hydraulic simulation experiments. The results reveal that for the variable cross-section structure, a lower pressurization speed leads to more stable liquid filling. Orthogonal experiments are conducted to ascertain the optimal filling process parameter of the casing model such as a pouring temperature of 1460 °C, a shell temperature of 900 °C and an average pressurization speed of 4 kPa/s. Based on the casing model's structure, linear and nonlinear filling pressure curves are designed, and both numerical simulations and experimental studies are performed to compare two filling methods. When comparing two filling processes with the

same filling time, the nonlinear filling exhibits a 16.77% decrease in average gate speed compared to the linear filling, resulting in a more stable filling process and production of fewer overall defects in the thin wall areas of the casing. Casings filled using the linear method exhibit numerous crack defects across various regions, leading to a relatively high overall defect rate. In contrast, casings filled using the nonlinear method devoid of crack defects and contain only a few micro-pores. Non-destructive testing results also support the notion that casing castings filled by the nonlinear method have fewer defects, which validates that the nonlinear filling effectively reduces the type and quantity of defects in casing castings.

**Key words:** counter-gravity casting; superalloy; variable cross-section structure; hydraulic simulation experiment; numerical simulation

镍基高温合金常用作航空发动机热端部件制造材料,在航空发动机零部件中,约1/4材料选用镍基高温合金<sup>[1]</sup>。镍基高温合金具有良好的抗氧化性、耐腐蚀性、稳定性和可靠性,广泛应用于航空航天领域<sup>[2-5]</sup>。K4169合金是目前最常用的高温合金,该合金属于铁镍合金,在650℃以下具有优异的高温性能<sup>[6]</sup>,化学成分与美国Inconel 718合金相近。反重力铸造是一种金属液逆重力方向流动充型的铸造工艺,相对于传统的重力铸造具有一定优势,通过压力控制充型减少铸件缺陷,获得更高力学性能,通常采用这种工艺制备大型薄壁一体化复杂铸件<sup>[7-10]</sup>。

近年来,反重力铸造轻合金工艺较为成熟,而高温合金金属液温度较高、黏度较大,控压充型一直是不易解决的难题。随着大型薄壁铸件一体化理论提出,铸件轮廓尺寸越来越复杂,变截面越来越多<sup>[11-12]</sup>,导致浇注难度增加,利用传统的反重力充型工艺无法保证铸件质量。国内外学者对轻质合金相关问题展开研究,他们认为,型壳的几何特征、充型压力和浇注温度是影响反重力充型能力的主要原因<sup>[13-15]</sup>。Sanitas等<sup>[13]</sup>研究低压铸造铝合金中变截面对填充行为的影响,Wu等<sup>[14]</sup>研究不同浇注面积对反重力镁合金充型的影响,Bedel等<sup>[15]</sup>研究变截面形状对充型的影响。由于金属液温度较高,增加高温金属液充型工艺的难度,因此很多学者主要依靠模拟、间接实验或者高能同步辐射光源对金属液充型行为进行研究分析<sup>[16]</sup>。Hu等<sup>[17]</sup>研究浇注面积对真空吸铸中铝合金熔体填充模式和速度的影响,Yu等<sup>[18]</sup>通过设计不同的浇注系统变截面研究液体流动行为并利用ProCAST软件进行模拟验证,这些研究均表明充型振荡与型腔的截面变化存在一定联系<sup>[19-21]</sup>。徐杨<sup>[22]</sup>研究反重力充型截面对充型速度的影响,发现截面由大变小的同时,充型速度由小变大,此过程易发生卷气现象。刘闪光<sup>[23]</sup>研究型腔复杂结构对反重力充型过程浇

口速度的变化,利用水模拟实验探索不同变截面结构对浇口速度的变化规律。上海交通大学调压精铸团队<sup>[7,9]</sup>研究变截面结构对反重力充型的影响,推导加压速度与充型速度的关系,利用不同变截面模型探索充型规律,发现不同壁厚与截面比结构对充型影响极大。尽管如此,反重力非线性充型研究并不多,目前在工业上,利用反重力非线性充型制备高温合金铸件极为少见。

在前期数值模拟研究基础上,本工作基于K4169高温合金机匣模型充型行为进行研究。首先利用水力学模拟实验探索反重力加压速度对变截面结构的影响,设计正交实验确定机匣模型模拟与浇注实验的最优工艺参数,结合工艺参数和加压速度对变截面结构的影响规律,设计线性与非线性充型加压曲线。最后利用数值模拟及实验结果对比分析两种不同充型方式铸件缺陷,从而验证非线性充型工艺对机匣铸件的优势。

## 1 实验设计与方法

### 1.1 正交实验设计

影响铸件质量的因素主要包括金属液温度、型壳温度和加压速度,在线性充型基础上利用正交实验探索3种因素对充型过程的影响。依据传统的重力铸造可知,一般工程上金属液的浇注温度是在合金的液相线温度基础上增加100~300℃,本实验所用K4169合金的液相线温度为1360℃,在此基础上合金浇注温度设定为1460、1560℃和1660℃。型壳温度会直接影响铸件性能,温度过高,铸件冷却较慢会导致铸件表面晶粒粗大,温度过低会导致薄壁铸件处冷却较快,产生冷隔、气孔等缺陷,本工作将型壳温度设定为900、1000℃和1100℃。

在反重力铸造中,充型时间是工艺过程的关键,一般工业级金属液的充型速度在50~100 mm/s

范围内最为稳定,结合模拟的铸型高度为 500 mm,浇注时间设定为 5、7 s 和 10 s,反重力充型压力  $P$  (单位为 kPa) 由式(1)计算得出:

$$P = \frac{\rho h K}{10.2} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为合金液密度,液态镍基高温合金密度为  $7.8 \text{ g/cm}^3$ ;  $h$  为充型高度;  $K$  为充型过程阻力系数,其值与金属液黏度和铸型型腔复杂程度有关,一般为  $1 \sim 1.5$ ,阻力小时取下限,阻力大时取上限。本工作使用的型壳高度为 50 cm,  $K$  为 1。通过式(1)计算得出,充型压力为 38.24 kPa,为保证型壳充型完全,选取充型压力为 40 kPa。根据型壳高度计算理想充型时间为  $5 \sim 10 \text{ s}$ ,所以加压速度设定为 4、6 kPa/s 和 8 kPa/s,图 1 为反重力铸造 3 种不同加压速度的充型曲线。本实验将合金浇注温度、型壳温度和加压速度 3 个工艺参数作为正交实验的 3 个因素,采用浇注过程浇口处平均浇口速度作为优化指标<sup>[24]</sup>,对正交实验结果进行分析。

### 1.2 有限元数值模拟

本工作采用航发热端机匣连带浇注系统有限元模型,如图 2 所示,该模型结构复杂,存在大量薄壁区域,利用传统重力浇注工艺难以成形。采用

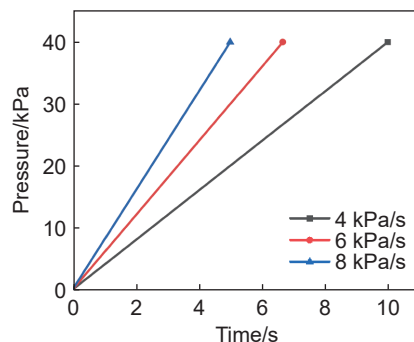


图 1 反重力铸造不同加压速度线性充型曲线

Fig. 1 Linear filling curves of counter-gravity casting with different pressure rates

SolidWorks 三维软件建立模型并输出 STEP 格式文件,导入 ProCAST 软件的 Mesh 模块进行处理。经过检查面联通问题、混合体重叠和模型体交叉并将修复后的模型在 Mesh 模块中进行网格划分,本工作中网格单元尺寸为 4 mm,最终获得面网格 71324 个,然后进行面网格检查及修复,如图 2(a)所示。在 Shelling 功能区选取浇口位置,型壳厚度设置为 10 mm,生成型壳如图 2(b)所示。检查网格无误后生成体网格,总共生成体网格 812449 个,如图 2(c)所示,检查体网格无误后进入 Cast 模块。

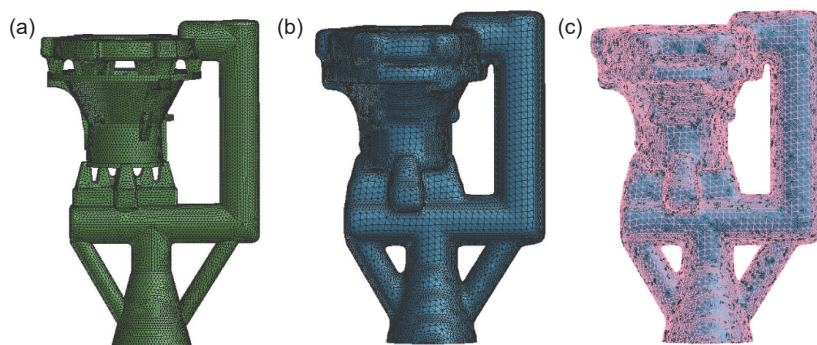


图 2 反重力铸造有限元模型 (a)面网格;(b)型壳生成;(c)体网格

Fig. 2 Finite element model of counter-gravity casting (a)surface mesh; (b)shell formation; (c)volume grid

在 Cast 模块中模拟参数设定,选择反重力铸造模块浇注,合金材料选择自建库中 K4169 合金,型壳材料选择 Silica Sand,换热类型选择不同材料类型,铸件与型壳界面间热交换系数设为 IN738-Mullite,型壳外表面边界条件设为空冷  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,充型压力设为 40 kPa,合金浇注温度、型壳预热温度和充型时间参数均由正交实验结果确定。

### 1.3 水力学模拟实验方法

水力学模拟装置是通过亚克力板自主搭建的,通过透明升液管连接模型与坩埚,压力通过气控机进行控制,采用水与示踪粒子混合液作为充型液

体。示踪粒子采用直径为  $10 \sim 30 \text{ }\mu\text{m}$  的空心玻璃珠,根据相似理论通过示踪粒子进行黏度配比,满足黏性不可压非定常流动雷诺相似公式(2)<sup>[23]</sup>:

$$Re_a = Re_w \quad (2)$$

式中:  $Re_a$  和  $Re_w$  分别为合金和水介质的雷诺数。水模拟中水的黏度  $\mu_w$  通过式(3)计算:

$$\mu_w = \mu_a \cdot \frac{\rho_w}{\rho_a} \quad (3)$$

式中:  $\mu_a$  为合金液体的黏度;  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和合金的密度。为了更接近实际充型时间,充型加压速度分别设为 0.5、0.8 kPa/s 和 1 kPa/s,采用截面比

为 1:5 的变截面模型, 通过粒子图像测速技术 (particle image velocimeter, PIV) 进行测量。高速相机拍摄速度为 10 帧/s, 将拍摄的图片导入处理软件中对示踪粒子进行标注, 通过示踪粒子的运动轨迹可以计算出某一区域的水流速度。本工作拍摄的区域为升液管上端, 此位置可以代表充型浇口速度。

#### 1.4 实验测试方法

在模拟结果基础上, 对本工作模型进行反重力铸造线性和非线性两次不同工艺浇注实验, 使用反重力铸造真空感应炉进行充型实验, 型壳焙烧温度和金属液充型温度由正交实验结果确定, 型壳焙烧保温 1 h, 合金精炼 0.5 h, 使用氩气作为充型气体。

对反重力铸造线性和非线性充型的铸件进行实验分析, 使用线切割对机匣铸件进行取样镶嵌, 利用自动磨抛机依次使用 400、800、1200 目和 2000 目砂纸打磨试样, 依次使用  $3\ \mu\text{m}$  和  $0.05\ \mu\text{m}$

二氧化硅抛光液抛光试样。通过金相显微镜统计两种工艺下特殊区域的铸件缺陷, 利用无损检测技术分析铸件整体缺陷。为了突出反重力非线性铸造工艺的优势, 使用 VEGA3 型扫描电镜的电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 技术对非线性充型工艺铸件不同区域进行晶粒尺寸分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 加压速度对变截面的影响

反重力充型是一个连续的过程, 在不考虑模型复杂程度时, 浇口处充型速度是一个衰减振荡的过程。图 3 是利用高速相机拍摄的升液管处示踪粒子随时间变化的轨迹, 捕捉某一个示踪粒子的运动轨迹计算位移, 再根据位移时间计算运动速度, 本工作选取中间某一示踪粒子, 通过标记法统计分析速度。

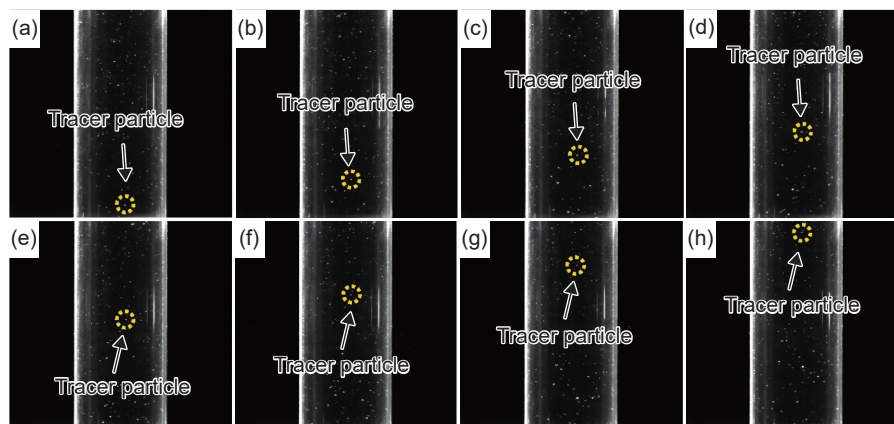


图 3 高速相机拍摄升液管处示踪粒子随时间运动轨迹 (a)0.0625 s; (b)0.1250 s; (c)0.1875 s; (d)0.2500 s; (e)0.3125 s; (f)0.3750 s; (g)0.4375 s; (h)0.500 s

Fig. 3 Trajectory of the tracer particle in the riser over time recorded by the high-speed camera (a)0.0625 s; (b)0.1250 s; (c)0.1875 s; (d)0.2500 s; (e)0.3125 s; (f)0.3750 s; (g)0.4375 s; (h)0.500 s

图 4(a) 是利用 PIV 技术测得的充型加压速度分别为 0.5、0.8 kPa/s 和 1 kPa/s 时升液管处浇口速度的变化趋势。从图中可以看出, 浇口速度进入升液管后呈现衰减振荡的趋势, 周期振幅越来越小最后趋于平稳, 加压速度越快, 振动周期越小, 整体浇口速度越快, 充型时间越短。当水流进入变截面后, 浇口速度迅速加快, 但充型加速度越来越慢。可以看出加压速度为 0.5 kPa/s 时, 在充型 7 s 后, 浇口速度逐渐趋于平稳, 而加压速度分别为 0.8 kPa/s 和 1 kPa/s 时, 浇口速度持续加快, 在浇口速度平稳前液体已经达到模型顶端。由图 4(b) 可以看出, 加压速度为 1 kPa/s 时, 出现较为复杂的填充顺序, 液体由升液管进入变截面后, 首先通过射流区顺序

填充, 然后通过主涡流区和前涡流区反向填充, 在变截面结构中这种填充方式会造成液体卷气和飞溅, 增加铸件缺陷产生的可能性。加压速度为 0.5 kPa/s 时, 填充主要依靠射流区的顺序填充, 减少充型缺陷产生。从水力学模拟结果可以看出, 对于变截面模型来说, 加压速度越快, 充型模式越复杂。

### 2.2 正交实验结果分析

将浇口平均速度作为正交实验的指标, 通过线性充型方式采用三水平因素正交实验, 结果如表 1 所示, 根据正交实验结果计算得出方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 结果如表 2 所示。对于加压速度, 从  $F$  检验结果分析可知, 显著性

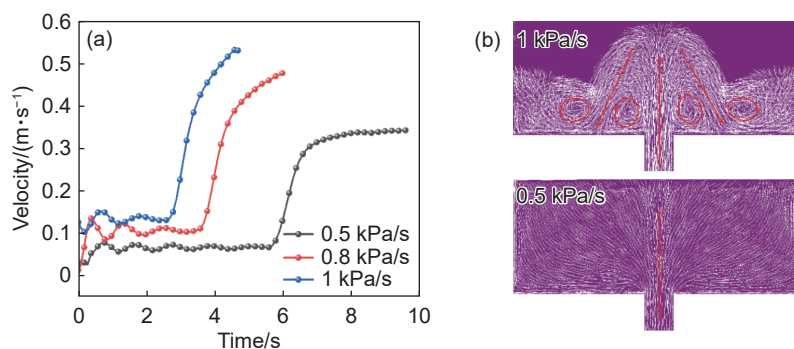


图4 不同充型加压速度升液管处浇口速度变化趋势(a)和填充顺序(b)

Fig. 4 Changing trends of gate velocity at the riser (a) and filling order (b) with different filling pressure rates

$P$  值为 0.04, 可以认为加压速度是浇口平均速度的主要影响因素。探索工艺参数是在反重力线性充型的前提下进行的, 在压力为 40 kPa 不变的前提下, 根据表 1 正交实验结果可以确定接近理想水平工艺参数为: 浇注温度 1460 °C, 型壳温度 900 °C, 平均加压速度 4 kPa/s, 此时测得平均浇口速度为 155 mm/s。

### 2.3 反重力充型压力曲线设计

结合 2.1 节中加压速度对变截面的影响, 加压速度越大, 液体填充越复杂, 为了保证液体充型稳定性, 在充型过程中, 加压速度应该越来越慢。根据机匣模型的结构将模型分为 4 个区域, 如图 5 所示, 根据正交实验结果, 在充型压力为 40 kPa 时, 设定充型时间为 10 s, 线性压力曲线如图 5(b) 所示。在模型中, 除了区域 3 是铸件本体, 其他区域均为浇注系统, 该模型的浇注系统在充型时金属液流动起到缓冲作用。在反重力铸造充型过程中, 依据加压速度的变化频率随着时间越来越小, 区域 1 连接升液管, 金属液在升液管中充型速度是最快的, 所以设定区域 1 的加压速度最大, 结合该区域的高度, 设定加压速度为 6 kPa/s。区域 2 在充型时起到缓冲作用, 在该区域减小加压速度, 设定为 4 kPa/s。前面设计的正交实验已经进行多次模拟充型, 金属液完成区域 3 薄壁充型时, 此时右侧浇注系统金属液已经流动到最高点, 将对左侧上方进

表 1 反重力铸造线性充型工艺参数正交实验结果  
Table 1 Orthogonal test results of counter-gravity casting linear filling process parameters

Filling No.	Filling temperature/ °C	Shell temperature/ °C	Pressure rate/ (kPa · s <sup>-1</sup> )	Average gate rate/ (mm · s <sup>-1</sup> )
1	1460	900	4	155
2	1460	1000	6	165
3	1460	1100	8	182
4	1560	900	6	172
5	1560	1000	8	186
6	1560	1100	4	162
7	1660	900	8	188
8	1660	1000	4	172
9	1660	1100	6	172

行补充, 此时区域 3 已经充型完成, 区域 4 的加压速度应该是整个充型过程最慢的, 设置为 2 kPa/s。根据充型时间为 10 s, 最后设定区域 3 的加压速度为 3 kPa/s。非线性充型压力曲线如图 5(b) 所示, 相对于线性充型压力曲线, 在总时间和压力不变的情况下, 改变中间过程加压速度。

### 2.4 数值模拟结果分析

#### 2.4.1 速度场模拟结果

利用线性与非线性充型两种加压方式对机匣模型进行模拟, 结果如图 6 所示。从图中可以看出

表 2 正交实验方差分析结果  
Table 2 ANOVA results of orthogonal tests

Item	Sum of squares of deviations, $S_j$	Degree of freedom, $f_j$	Mean sum of squares, $V_j$	Mean square, $F$	Significance level, $P$
Filling temperature	152	2	76	4.653	0.177
Shell temperature	12.667	2	6.333	0.388	0.721
Pressure rate	788.667	2	394.333	24.143	0.04
Error	32.667	2	16.333		

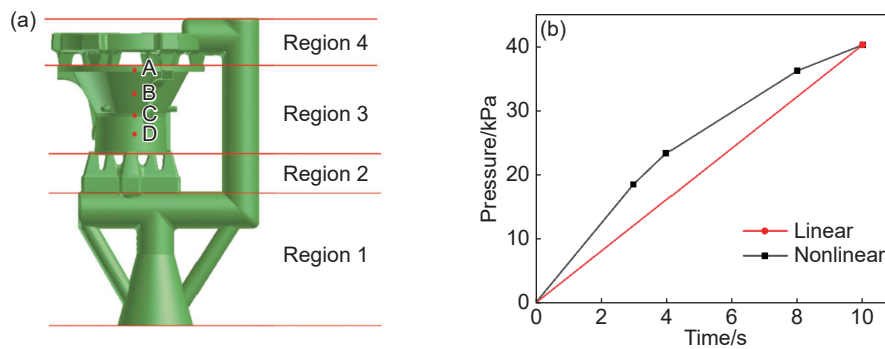


图5 机匣模型划分示意图(a)和反重力充型压力曲线(b)

Fig. 5 Casing model division diagram (a) and pressure curves of counter-gravity filling (b)

金属液流动到铸件之前,非线性充型速度更大,因为最初的加压速度较快。金属液流动从铸件底部到顶部的过程,非线性充型速度整体慢于线性充型,在线性充型 9.05 s 和非线性充型 7.57 s 时速度场图片对比更加明显。在此过程也可以发现,浇注系统充型速度整体快于铸件内充型速度,主要原因是铸件的壁厚较薄,铸件内充型阻力高于浇注系统。在铸件完成充型后,最上面的十字浇注系统几乎完全是由右侧浇注进行补充的,此时铸件已经开始凝固,浇道缝隙随之变小。从图中的时间来看,非线性充型时间要短,在铸件充型阶段减慢加压速度,提高金属液流动稳定性,整体时间变短,更能体现出非线性充型的优异性。

在反重力铸造过程中,浇口速度可以很好地反映金属液流动的射流程度,通过数值模拟测得两种充型方式浇口速度的变化曲线,如图 7 所示。线性充型平均浇口速度为 0.155 m/s,而非线性充型平均

浇口速度为 0.129 m/s,相比线性充型平均浇口速度降低 16.77%,这也验证了速度场的变化趋势,说明非线性加压充型速度整体更慢。从图 5(b)可知,4~8 s 是铸件充型过程,图 7 中线性充型浇口速度变化幅度较大,说明金属液流动到变截面较大区域,最后加压速度保持不变造成浇口速度变化极不稳定。同样,非线性充型浇口速度呈周期振荡变化,且周期变化均匀,浇口速度变化幅度也没有线性充型大,说明在此过程中金属液流动更稳定。以上分析结果可以说明,非线性充型有效提高充型过程金属液流动的稳定性。

#### 2.4.2 凝固场模拟结果

凝固场变化数值模拟结果如图 8 所示,综合分析可知凝固区域主要在铸件处,当金属液完成铸件充型时,可以看出在非线性充型 7.88 s 时铸件上半部分已经开始凝固,相比线性充型 9.05 s 凝固更早。这是由于非线性充型此阶段加压速度相对较

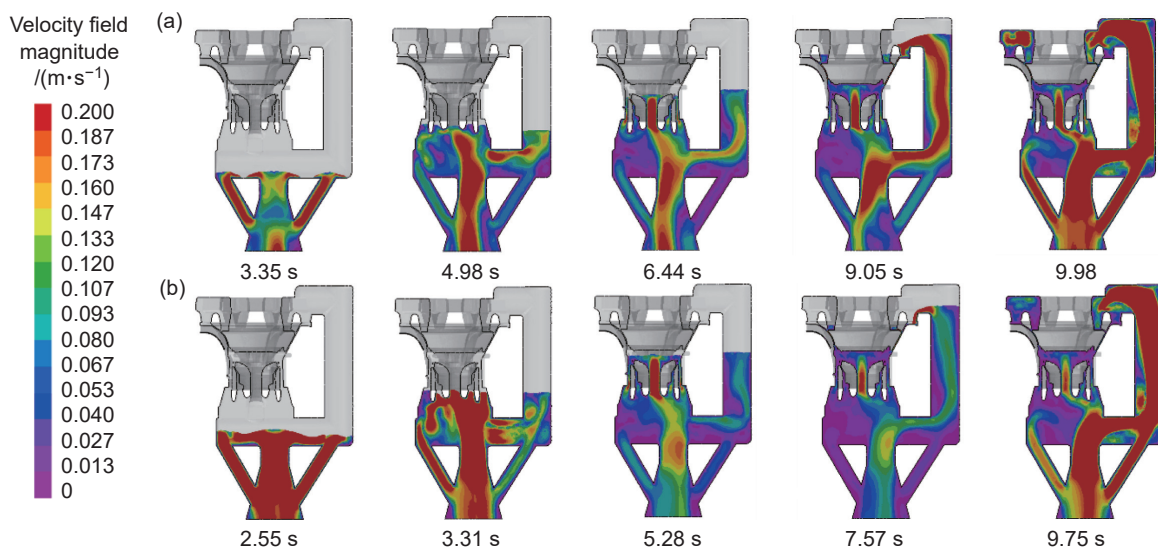


图6 反重力铸造线性(a)和非线性(b)充型速度场模拟结果

Fig. 6 Simulation results of velocity field in counter-gravity casting linear (a) and nonlinear (b) filling

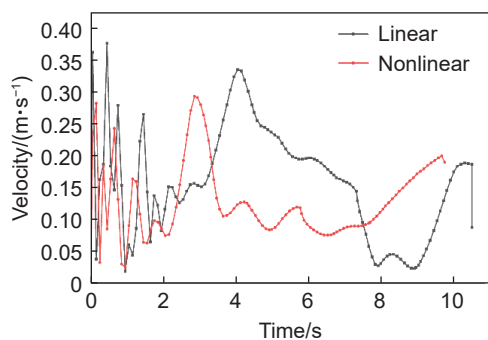


图 7 反重力铸造线性和非线性充型浇口速度变化趋势  
Fig. 7 Change trends of gate velocity in counter-gravity casting linear and nonlinear filling

小, 金属液流动更稳定, 没有太大波动, 凝固效率更高, 铸件晶粒尺寸也更小。两种充型方式在充型 40 s 左右同时出现, 铸件上半部分相比下半部分凝固时间更短, 首先因为铸件本身的结构问题, 上半部分壁厚更薄, 所以凝固更快; 其次因为反重力铸造铸件在凝固过程型底的温度一直高于型顶, 而且浇口处连接升液管, 周围环境温度相对更高。由图 8 可知, 在充型 9 min 左右, 铸件外表面完全凝固, 浇注系统大部分还没有完全凝固, 说明该浇注系统设计的合理性。从整体凝固情况来看, 凝固顺序属于自上而下, 符合反重力铸造凝固。

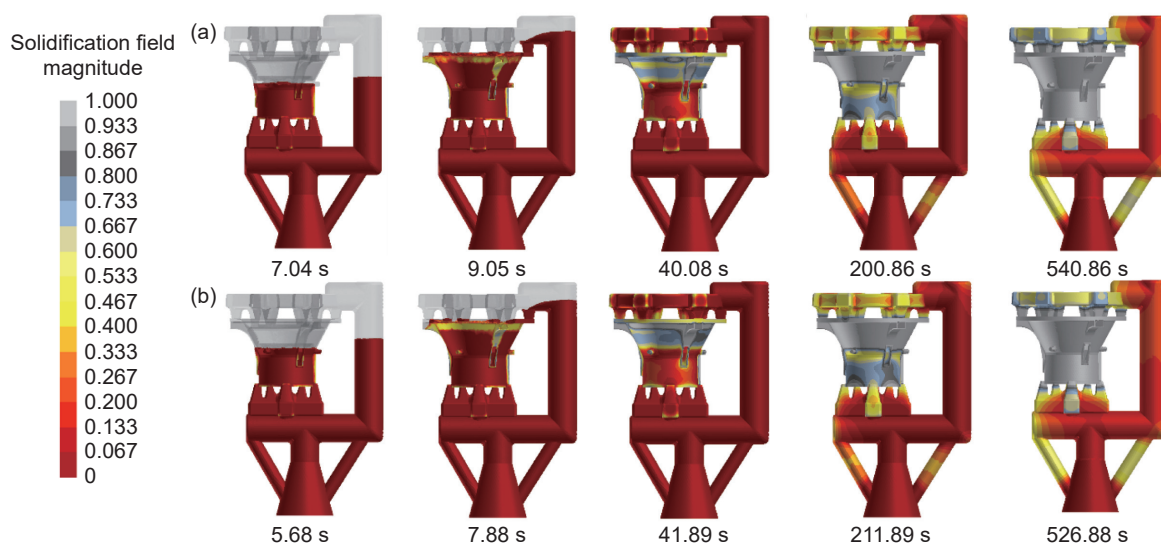


图 8 反重力铸造线性(a)和非线性(b)充型凝固场模拟结果  
Fig. 8 Simulation results of solidification field in counter-gravity casting linear(a) and nonlinear(b) filling

为了更准确地分析铸件不同位置的温度与凝固情况, 在铸件 4 个不同位置取测温点, 如图 5(a) 所示。图 9 是 A、B、C 和 D 4 个位置温度随时间变化曲线, 可以看出 A 和 B 点相比 C 和 D 点降温速度更快, 且 B 点在 600 °C 之前温度一直低于其他 3 个点, 因为 B 点壁厚较薄, A 点降温较快主要是自上而下凝固顺序导致的。可以发现从浇注温度到 1000 °C 之间, 4 段曲线均有细微波动情况, 这是由于型壳与金属液间有一定温差, 此过程金属液与型壳在平衡温度到 1000 °C 左右时, 两者温度几乎接近, 之后也不会存在温度波动的情况。

合金晶粒尺寸大小决定力学性能, 晶粒尺寸较大降低材料韧塑性, 晶粒尺寸较小会降低材料蠕变和断裂韧性<sup>[25-26]</sup>。为了方便统计晶粒尺寸, 利用 EBSD 技术对非线性充型铸件不同区域进行分析, Orientation Imaging Microscopy(OIM)后处理软件统计不同区域平均晶粒尺寸结果如表 3 所示,

图 10 为铸件不同位置 EBSD 结果。可以看出, 铸件晶粒分布比较均匀致密, 相比传统铸造薄壁铸件, 反重力铸造更具优势, 铸件薄壁处凝固速度更快, 在晶增压力和壳增压力的保压下, 铸件组织更致密, 晶粒尺寸更小, 力学性能更高。由表 3 可知,

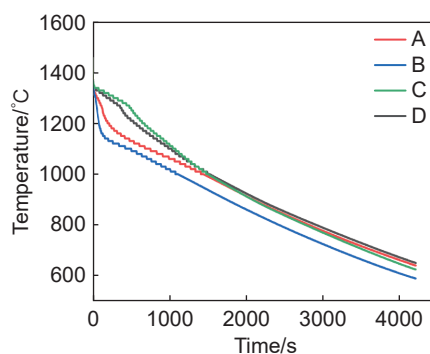


图 9 铸件不同位置温度随时间变化曲线  
Fig. 9 Change curves of temperature with time at different positions of casting

A、B、C 和 D 区域平均晶粒尺寸分别为 156.755、142.46、183.887  $\mu\text{m}$  和 179.386  $\mu\text{m}$ ，晶粒尺寸由小到大顺序为  $B < A < D < C$ 。不同区域冷却速率由快到慢顺序为  $B > A > D > C$ ，符合冷却速率越快，晶粒尺寸越小。从 4 个区域 EBSD 结果(图 10)分析可知，B 区域晶粒尺寸更均匀，尺寸为 150  $\mu\text{m}$  左右的晶粒数量最多，这是由于在金属液充型过程中，此处薄壁是通过上下双向通道进行充型，下薄壁先凝固，金属液流动通道变小，产生双向压力，同时也体

表 3 不同区域晶粒尺寸  
Table 3 Grain sizes in different regions

Region	Average grain size/ $\mu\text{m}$
A	156.755
B	142.460
C	183.887
D	179.386

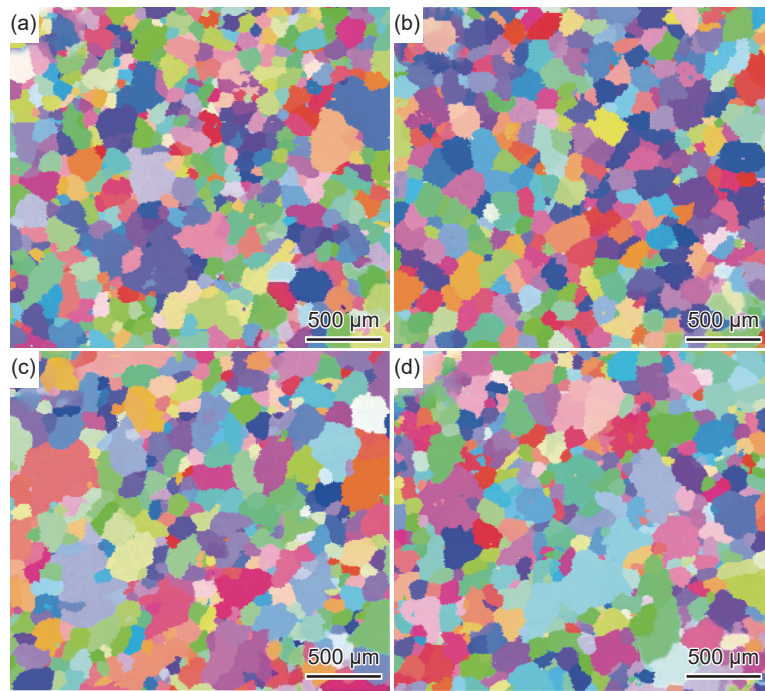


图 10 不同区域 EBSD 结果 (a)A; (b)B; (c)C; (d)D

Fig. 10 EBSD results in different regions (a)A; (b)B; (c)C; (d)D

现出该浇注系统的优势。

### 2.4.3 铸件缺陷预测结果

Niyama 判据最早是用来预测钢铸件疏松缩孔的计算方法<sup>[27-28]</sup>，按照式(4)计算<sup>[29-30]</sup>：

$$N_y = \frac{G}{\sqrt{R}} < K \quad (4)$$

式中： $N_y$  为 Niyama 值； $G$  为温度梯度； $R$  为冷却速率； $K$  为临界值，其值与浇注材料有关，一般轻合金材料取值小于 0.5，钢铁合金材料取值大于 1，本工作采用高温合金，选用 ProCAST 软件  $K$  的默认值 1 进行计算。该判据认为若  $N_y$  小于  $K$ ，则该区域会出现疏松缩孔缺陷。

图 11 是利用 Niyama 判据对铸件不同区域缺陷的分析结果。从图中可以看出，两种充型方式铸件缺陷相差不大，局部位置非线性充型铸件缺陷

更少。可以看出，4 个区域  $N_y$  值均超过临界值，数值由小到大顺序均为： $B < D < C < A$ 。从数值来看，非线性充型铸件  $N_y$  值均小于线性充型。从前面的温

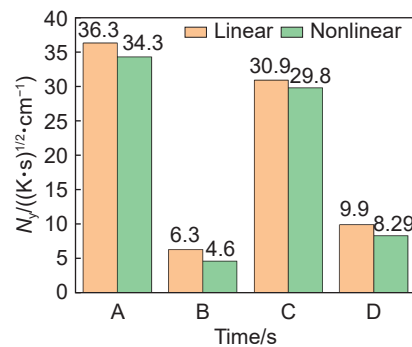


图 11 Niyama 判据对线性和非线性充型铸件不同区域缺陷分析

Fig. 11 Defect analysis of different regions of castings with linear and nonlinear filling by Niyama criterion

度分析可知,4个区域降温速率由大到小顺序为 $B>A>D>C$ ,可以看出除了A区域,其他3个区域都是降温速率越快, $N_v$ 值越小。A区域相对其他3个区域比较特殊,根据式(4),A区域连接浇注系统,温度梯度 $G$ 相对偏大,导致 $N_v$ 值偏大。

## 2.5 实验结果分析

### 2.5.1 铸件显微缺陷分析

铸造过程中金属液流动情况直接影响铸件缺陷,图12(a-1)~(a-4)是反重力铸造线性充型铸件不同区域缺陷统计。结合图5(a)中4个不同区域的位置标记,对两种充型方式铸造的机匣铸件分别进行4个区域的缺陷分析。从图中可以看出,A区域的缺陷占比最大,此区域为铸件上端圆环处,连

接浇注系统易产生缺陷。C区域的缺陷相对B和D区域偏大,此区域属于铸件变截面处,充型过程中金属液飞溅易造成裂纹缺陷。B和D区域的缺陷相对较小,两个区域均处于铸件环面上,金属液流动性更好,由此可知不同区域的缺陷严重程度取决于薄壁铸件结构。图12(b-1)~(b-4)是反重力铸造非线性充型铸件不同区域的缺陷统计,可以看出非线性工艺充型铸件整体缺陷远低于线性充型,这与前面的模拟结果相互印证。分析可知,非线性充型铸件每个区域的缺陷均为微孔洞,而非裂纹缺陷,说明充型过程中,液体流动较为平稳,几乎不出现液体飞溅情况,微孔洞主要是由于液体充型过程中卷气造成的。

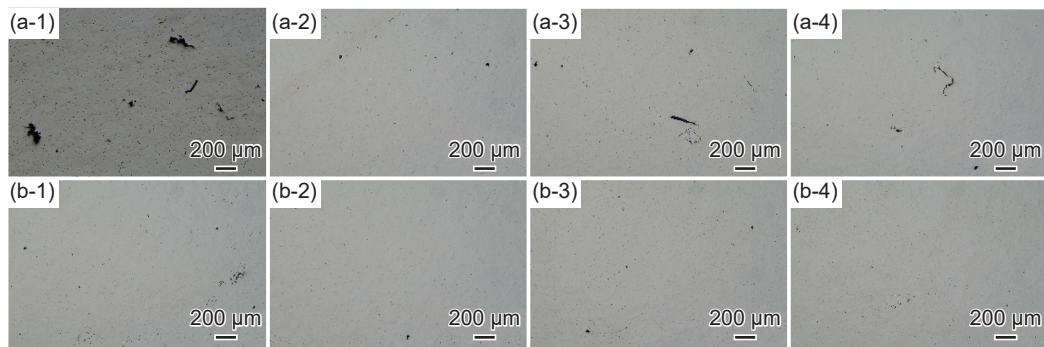


图12 反重力铸造线性(a)和非线性(b)充型铸件不同区域的缺陷统计 (1)A;(2)B;(3)C;(4)D

Fig. 12 Defect statistics in different regions of counter-gravity casting with linear(a) and nonlinear(b) filling (1)A;(2)B;(3)C;(4)D

### 2.5.2 无损检测结果分析

图13(a-1)和(a-2)为线性充型铸件缺陷的检测结果,从图13(a-1)可以看出铸件的中上环部位均出现少量疏松缺陷,最外层的上环部位出现明显裂纹,此处充型顺序主要是由上到下,环形处金属液流动较慢,出现两个不同充型方向,导致裂纹产生。图13(a-2)是铸件最下端位置出现与环形相切方向的裂纹,线性充型速度变化幅度较大,金属液会出现飞溅情况,第一层金属液最先与型壳内壁接触凝固,第二层金属液会在先凝固的金属液基础上进行二次凝固,最后导致金属液出现分层情况。线性充型铸件缺陷与温度也有很大关系,冷却速率过快、凝固环境不均匀等因素会影响缺陷产生。图13(b-1)和(b-2)为非线性充型铸件缺陷的检测结果,与线性充型相比,铸件中上环部位的疏松缺陷明显减少,裂纹缺陷消失。由数值模拟分析可知,非线性充型平均浇口速度偏慢,但充型效率较高,通过对比两种充型方式的缺陷检测结果也验证了非线性充型的优势和实验的正确性。

## 3 结论

(1)不同加压速度对变截面模型充型浇口速度影响很大,由浇口速度的变化规律及流场变化可知,加压速度越快,液体填充方式越复杂,充型越不平稳;加压速度越慢,液体填充方式越简单,液体振荡越小,充型越平稳。

(2)对于机匣模型,浇注温度为1460℃,型壳温度为900℃,平均加压速度为4 kPa/s是最优工艺参数。通过分析机匣模型结构设计线性与非线性充型加压曲线,并对两种充型方式的机匣模型进行数值模拟,发现非线性充型平均浇口速度相比线性充型降低16.77%,说明液体充型振动幅度更小,流动更平稳。缺陷预测结果同样表明,非线性充型机匣缺陷更少,可以认为非线性充型抑制液体飞溅、振荡等现象。

(3)对两种充型方式浇注的机匣铸件进行缺陷分析统计,从缺陷种类及数量来看,线性充型的铸件出现卷气引起的大孔洞和液体飞溅引起的裂纹;

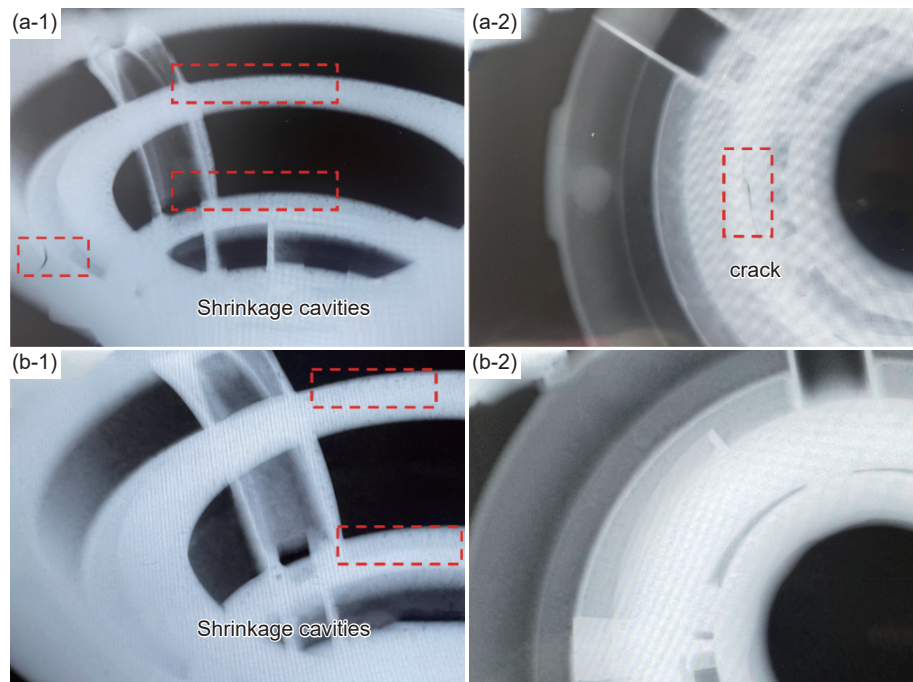


图13 线性(a)和非线性(b)充型铸件不同区域缺陷检测结果 (1)中上环部位;(2)最下端部位

Fig. 13 Casting defect detection results in different regions of casting with linear(a) and nonlinear(b) filling (1) upper and middle circular region; (2) bottom region

而非线性充型铸件整体缺陷远低于线性充型,仅有少量微孔洞出现。无损检测实验也得出同样结果,与数值模拟结果相互印证,说明非线性充型可以减少缺陷种类和数量。

#### 参考文献:

- [1] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. *金属学报*, 2022, 58(4): 412-427.  
SUN B D, WANG J, KANG M D, et al. Investment casting technology and development trend of superalloy ultra limit components[J]. *Acta Metallica Sinica*, 2022, 58(4): 412-427.
- [2] 祝国梁, 孔德成, 周文哲, 等. 选区激光熔化  $\gamma'$  相强化镍基高温合金裂纹形成机理与抗裂纹设计研究进展[J]. *金属学报*, 2023, 59(1): 16-30.  
ZHU G L, KONG D C, ZHOU W Z, et al. Research progress on crack formation mechanism and cracking-free design of  $\gamma'$  phase strengthened nickel-based superalloys fabricated by selective laser melting[J]. *Acta Metallica Sinica*, 2023, 59(1): 16-30.
- [3] WANG R, YANG D, WANG W, et al. Tool wear in nickel-based superalloy machining: an overview[J]. *Processes*, 2022, 10(11): 2380.
- [4] SUI D, SHAN Y, WANG D, et al. Elastic-viscoplastic constitutive equations of K439B superalloy and thermal stress simulation during casting process[J]. *China Foundry*, 2023, 20(5): 403-413.
- [5] 姜海瑞, 杜云玲, 孙士杰, 等. 镍基高温合金氢脆行为研究进展[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2025, 38(1): 1-15.  
JIANG H R, DU Y L, SUN S J, et al. Review on hydrogen embrittlement behavior of Ni-based superalloys[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2025, 38(1): 1-15.
- [6] LI X, CHEN B, XING W, et al. Microstructure and solidification characteristics and segregation behavior of superalloy K4169[C]//Chinese Materials Conference. Singapore: Springer Singapore, 2017: 587-598.
- [7] 隋大山, 麻晋源, 许圆, 等. 镍基高温合金反重力铸造压力曲线设计与验证[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(2): 143-150.  
SUI D S, MA J U, XU Y, et al. Design and verification of pressure curve for anti-gravity casting of nickel-based superalloys[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(2): 143-150.
- [8] DU D, AN J, DONG A, et al. A review of the progress and challenges of counter-gravity casting[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2025, 216: 1-26.
- [9] 王迪, 隋大山, 李九霄, 等. 镍基高温合金调压铸造非线性压力曲线设计与验证[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(9): 141-151.  
WANG D, SUI D S, LI J X, et al. Design and verification of nonlinear pressure curve for pressure regulation casting of nickel based super-alloy[J]. *Journal of Net-shape Forming Engineering*, 2023, 15(9): 141-151.
- [10] 欧仁侠, 张华磊, 陈洪斌. 反重力金属铸造设备控制系

- 统设计[J]. 中国金属通报, 2017(11): 119-120.
- OU R X, ZHANG H L, CHEN H B. Design of control system for anti-gravity metal casting equipment[J]. *China Metal Bulletin*, 2017(11): 119-120.
- [11] 陈家万, 曹铁山, 胡叶兵, 等. 涡轮叶片用合金材料的薄壁效应研究进展[J]. *材料工程*, 2025, 53(6): 52-61.
- CHEN J W, CAO T S, HU Y B, et al. Research progress in thin-wall effect of alloy materials for turbine blades[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(6): 52-61.
- [12] 聂金成, 谌黎明, 叶洁云, 等. 大型铸钢支架铸造工艺数值模拟与优化设计[J]. *铸造技术*, 2019, 40(11): 1178-1182.
- NIE J C, CHEN L M, YE J Y, et al. Numerical simulation and optimal design of casting process for large cast steel brackets[J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(11): 1178-1182.
- [13] SANITAS A, BEDEL M, EL MANSORI M. Experimental and numerical study of section restriction effects on filling behavior in low-pressure aluminum casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 254: 124-134.
- [14] WU H B, FAN Z T, HUANG N Y, et al. Critical gate area of Mg alloy in counter-gravity EPC[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2004(6): 65-66.
- [15] BEDEL M, SANITAS A, EI MANSORI M. Geometrical effects on filling dynamics in low pressure casting of light alloys[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 45: 194-207.
- [16] TANG Y, WU Y, ZHANG Y, et al. Intermittent nucleation and periodic growth of grains under thermo-solutal convection during directional solidification of Al-Cu alloy[J]. *Acta Materialia*, 2021, 212: 116861.
- [17] HU J, JIANG C C, NG H K, et al. An allelotype study of primary and corresponding recurrent glioblastoma multi-forme[J]. *Chinese Journal of Medical Genetics*, 2003, 20(1): 56-58.
- [18] YU H, XIONG B W, YAN Q S, et al. Effects of gating system on the flow behaviors during vacuum counter pressure casting thin wall aluminum alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 129: 189-193.
- [19] LIU S G, CAO F Y, ZHAO X Y, et al. Numerical simulation of dynamic process under low pressure casting based on two phase flow[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, 727: 358-361.
- [20] VISWANATH A, MANU M V, SAVITHRI S, et al. Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244: 320-330.
- [21] ZENG J, GU P, ZOU Y, et al. Simulation of mold filling under counter gravity for A356 alloy and A356/SiC<sub>p</sub> composite[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1/2): 130-133.
- [22] 徐杨. 铸件结构与反重力铸造液面加压工艺参数作用规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- XU Y. Study on the relationship between casting structures and pressurization parameter of counter gravity casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [23] 刘闪光. 反重力铸造充型过程的水力学特征和氧化膜卷入机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LIU S G. Hydrodynamics of mold filling and entrainment of oxide film in counter-gravity casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [24] YANG B, SUN H, WANG A, et al. The influence of brain tissue material parameters on the response of dynamic characteristics based on finite element model[J]. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 2019, 19(8): 1940058.
- [25] 严青松, 余欢, 芦刚, 等. 结晶压力对真空差压铸造铝合金二次枝晶间距的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(5): 1194-1199.
- YAN Q S, YU H, LU G, et al. Effect of crystallization pressure on secondary dendrite arm spacing of vacuum counter-pressure casting aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(5): 1194-1199.
- [26] 张峰, 游小刚, 谭毅, 等. 熔体过热处理对 FG4096 镍基高温合金纯净化行为及凝固组织的影响[J]. *机械工程材料*, 2022, 46(11): 9-19.
- ZHANG F, YOU X G, TAN Y, et al. Effect of melt overheating treatment on pure purification behavior and solidification microstructure of FG4096 nickel-based superalloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2022, 46(11): 9-19.
- [27] 刘金虎, 纪志军, 李峰, 等. 基于 ProCAST 的高 Nb-TiAl 合金叶轮熔模铸造[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(2): 61-71.
- LIU J H, JI Z J, LI F, et al. Optimization of high Nb-TiAl alloy impeller investment casting based on ProCAST software[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(2): 61-71.
- [28] 杨行, 郭莹, 林相, 等. 机床底座 ProCAST 数值模拟及铸造工艺优化[J]. *兵器材料科学与工程*, 2021, 44(6): 6-9.
- YANG X, GUO Y, LIN X, et al. ProCAST numerical simulation and casting process optimization of machine tool base[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2021, 44(6): 6-9.
- [29] 康茂东, 王俊, 高海燕, 等. 应用无量纲 Niyama 判据优化大型薄壁铸件浇冒系统[J]. *铸造技术*, 2017, 38(7):

1635-1639.

KANG M D, WANG J, GAO H Y, et al. Optimization of pouring and riser system for large-scale thin-wall castings based on dimensionless criterion Niyama[J]. Foundry Technology, 2017, 38(7): 1635-1639.

- [30] 李荣德, 张子慧, 向青春, 等. Niyama 判据预测大型铸钢件旋回破碎机横梁缩孔缩松缺陷[J]. 铸造技术, 2015, 36(5): 1196-1200.

LI R D, ZHANG Z H, XIANG Q C, et al. Prediction of shrinkage and porosity of crossbeam used for large scale steel casting gyratory crusher by Niyama criterion[J]. Foundry Technology, 2015, 36(5): 1196-1200.

收稿日期: 2025-05-08; 录用日期: 2025-06-17

基金项目: 新材料重大专项项目资助(2024ZD0600400); 上海市优秀学术/技术带头人项目(22XD1434900); 人工智能促进科研范式改革、赋能学科跃升计划项目

通讯作者: 刘明亮(1996—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高温合金调压精密铸造, 联系地址: 上海市东川路 800 号(200240), E-mail: [lm113210@sjtu.edu.cn](mailto:lm113210@sjtu.edu.cn); 何林(1991—), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为高性能合金精密铸造与氧化, 联系地址: 上海市东川路 800 号(200240), E-mail: [hejucen@sjtu.edu.cn](mailto:hejucen@sjtu.edu.cn)

(本文责编: 陈 卉)