● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4194

电子束逐层浇注高温合金充型及凝固过程数值模拟

宁莉丹[1,2],谭 毅[1,2],李鹏廷[1,2],温书涛[3]

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024;2. 辽宁省载能束冶金与先进材料制备重点实验室,辽宁 大连 116024;3. 扬州大学 机械工程学院,江苏 扬州 225127)

摘 要:电子束熔炼已成为制备高温合金铸锭的关键技术,其凝固组织直接决定着铸造质量以及后续开坯锻造的性能。对铸锭凝固过程中组织的形成进行系统、详细分析,具有现实和重要意义。考虑到实验成本高、难度大,本文基于ProCAST软件建立了高温合金制备充型与凝固过程数学模型,以预测电子束熔炼条件下逐层充型与凝固过程中温度场、流场及凝固结构演变,模拟了不同浇注速度下(0.5、1.0、1.5、2.0和4.0 kg/s)铸造直径220 mm高温合金铸锭的温度场、流场及凝固组织,探讨了温度场、流速及凝固组织随浇注速度的变化规律。结果表明,镍基高温合金铸锭逐层浇注过程中,铸锭顶部合金温度高,底部合金温度低,实现了从底部到顶部的顺序凝固。随着浇注速度的增大,温度梯度明显增大,上层合金熔体对下层合金温度变化影响变小,即温度回升幅度减小。在中心区域,热量积聚更为显著,可能导致铸锭内部产生较大的热应力和缺陷。浇注速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大。随着浇注速度增加,监测点的流体速度变化呈现出更为明显的波动现象,特别是在靠近浇注入口的区域,浇注速度越大,合金液的冲击深度越大。浇注速度显著影响了凝固过程中晶粒的生长行为与取向分布。较低的浇注速度有利于柱状晶的形成,晶粒尺寸较大且取向较为有序;而较高的浇注速度则促使中心区域晶粒细化,晶粒取向更加杂乱。

关键词:电子束;数值模拟;逐层浇注;高温合金;浇注速度

中图分类号:TF134 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)01-0018-11

Numerical Simulation of the Filling and Solidification Process of Superalloy by Electron Beam Layer Casting

NING Lidan[1,2], TAN Yi[1,2], LI Pengting[1,2], WEN Shutao[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Key Laboratory for Energy Beam Metallurgy and Advanced Materials Preparation of Liaoning Province, Dalian 116024, China; 3. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Electron beam melting has become a key technology for the preparation of superalloy ingots, and its solidification structure directly affects the casting quality as well as the performance of subsequent billet forging. It is practical and important to carry out a systematic and detailed analysis of the structure formation during the solidification of the ingot. Considering the high cost and difficulty of experimental research, a mathematical model of the filling and solidification process of superalloy preparation was established via ProCAST software to predict the evolution of the temperature field, flow field, and solidification structure during the layer-by-layer filling and solidification process under the conditions of electron beam melting. This paper simulated the temperature field, flow field, and solidification microstructure of a casting superalloy ingot with a diameter of 220 mm under different pouring speeds (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 4.0 kg/s). It then explored the change rules of the temperature field, flow velocity, and solidification structure in relation to the pouring speed. The results show that during the layer casting process of nickel-based superalloy

收稿日期:2024-10-09

基金项目:国家重点研发计划(2019YFA0705300)

作者简介:宁莉丹,1992年生,博士生.研究方向为电子束熔炼数值模拟研究.Email: nld@mail.dlut.edu.cn

通信作者:谭 毅,1961年生,博士,教授.研究方向为载能束冶金制备超纯净高均质高温合金研究.Email: lnsolar@dlut.edu.cn

引用格式:宁莉丹,谭毅,李鹏廷,温书涛.电子束逐层浇注高温合金充型及凝固过程数值模拟[J].铸造技术,2025,46(1):18-28.

NING L D, TAN Y, LI P T, WEN S T. Numerical simulation of the filling and solidification process of superalloy by electron beam layer casting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 18-28.

中国知网 https://www.cnki.net

ingots, the temperature at the top of the ingot is high, whereas the temperature at the bottom is low, which results in sequential solidification from the bottom to the top. As the pouring speed increases, the temperature gradient increases significantly, and the influence of the upper layer alloy melt on the temperature change in the lower layer alloy decreases; that is, the temperature rise decreases. In the center region, heat accumulation is more significant, which may lead to greater thermal stresses and defects inside the ingot. Changes in the pouring speed have a greater influence on the maximum speed of melt flow and melt level fluctuations. With increasing pouring speed, the fluid velocity change at the monitoring points clearly fluctuates, especially in the area near the pouring inlet. The greater the pouring speed is, the greater the impact depth of the alloy liquid. The pouring speed significantly affects the grain growth behavior and orientation distribution during solidification. A lower pouring speed is conducive to the formation of columnar crystals with larger grain sizes and more ordered orientations, whereas a higher pouring speed promotes grain refinement of the center region and more disordered grain orientations.

Key words: electron beam; numerical simulation; layer casting; superalloy; pouring speed

镍基高温合金因其优异的高温强度、抗氧化性和抗腐蚀性，成为关键工业领域不可或缺的材料，尤其是在航空航天、能源等领域[1-2]。GH4068 合金是近年来发展的一种新型镍钴基变形高温合金，该合金是在 U720Li 合金成分基础上进行调整，提高 Co 和 Ti 含量，其承温能力较 U720Li 合金提高了 30 ℃以上，是我国下一代航空发动机用涡轮盘的优选材料[1]。当前，大多数高温合金通常采用真空感应熔炼作为一次熔炼，再经过真空自耗重熔或电渣重熔进行二次或三次熔炼[3]。在一次熔炼中，合金液经过浇注得到的铸锭常出现缩孔、缩松缺陷，严重影响了二次冶炼过程稳定性、铸锭成材率及最终产品质量，制约了优质镍基高温合金的制造和发展[4]。

近年来，电子束技术在制备超纯净高均质高温合金方面发挥着重要作用[5-8]。利用电子束技术能够有效提高高温合金纯净度，减少夹杂物含量，从而提高高温合金的使用性能[9]。在传统铸造工艺制备的铸锭中存在明显的顶部正偏析和底部负偏析，而层状铸造工艺制备的铸锭成分分布更加均匀，说明层状铸造工艺具有改善铸锭宏观偏析的作用[10-11]。层状铸造是将金属液分为多个小包间歇浇注，控制各浇包由下到上逐层进行凝固，减小凝固过程中金属液的流动区域，进而抑制流动速率，同时可增加各层金属液的局部凝固速率，有效减少铸锭宏观偏析，达到均质化的目的[11]。电子束逐层浇注是一种金属浇注工艺，熔融金属仅通过重力的作用从坩埚转移到模具中。该技术主要包括 3 个主要步骤：金属液熔化、充型和凝固。由于电子束熔炼的高真空度、浇注条件多样性和高温合金浇注的高温特性，常规实验方法很难测得温度分布及熔体流速等。对于凝固组织来说，采用实验方法进行研究虽然具有直观性和可操作性，但费时、费力且成本较高。提高产品质量和降低成本是各个行业的共同目标，而利用数值模拟技术是实现这一目标的有效途径之一[12-13]，投入较少的成本就可以对温度场和凝固组织进行有效预测。因此数值模拟成为研究电子束熔炼高温合金浇注过程物理机制的有效方法之一，已被广泛用于铸造过程中温度场、凝固、偏析和微观结构演变[14-15]，使铸造从不可见发展到可见。

本研究主要针对高温合金原料，使用 ProCAST 有限元软件，基于凝固传热模型对电子束逐层浇注高温合金充型及凝固过程温度场和流场进行了数值分析。研究浇注速度对高温合金铸锭凝固过程温度场、流场、固相分数及凝固组织的影响规律，对电子束逐层浇注工艺进行数值模拟预测，来初步验证电子束逐层浇注工艺的可行性和有效性。

1　实验和模型描述

1.1　实验方法

实验材料为中国科学院金属所提供的 GH4068 合金，主要成分如表 1 所示[16]。图 1 为电子束浇注制备高温合金铸锭实验装置示意图。该装置包括电子枪及配套电控系统、真空系统、冷却系统、熔炼室和控制系统等。实验前，将原料使用电火花线切割切成小块，对原料表面进行打磨以减少污渍和氧化层对制备过程的影响，并用酒精进行超声清洗，持续 15 min，将清洗后的原料置于烘干箱中干燥 1~2 h 后置于熔炼坩埚中，关闭炉门，抽真空至 3×10^{-3} Pa。通

表1 GH4068合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the GH4068 superalloy

(**mass fraction/%**)

Element	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al+Ti	C+Zr+B
Composition	Bal.	13~15	20~26	1.1~1.3	2.4~2.8	7.72~8.40	0.04~0.11

中国知网　https://www.cnki.net

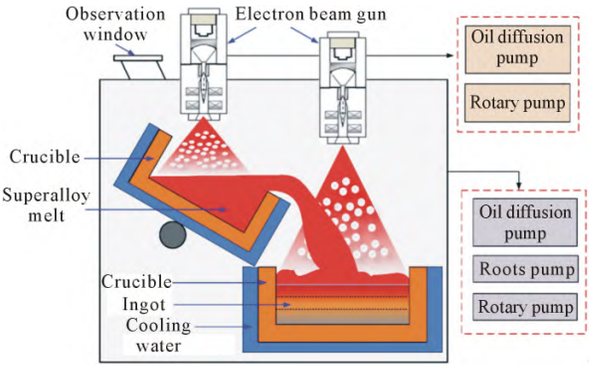


图 1 电子束浇注制备高温合金铸锭实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup for the preparation of superalloy ingots by electron beam layer casting

过控制电子束束斑的扫描花样，对合金原料均匀且连续扫描，确保坩埚内的合金原料完全熔化。待合金完全熔化后，按照图 2 所示的逐层浇注工艺进行充型、冷却、凝固。

电子束逐层浇注过程相关工艺参数之间的关系可以通过式(1~3)计算获得：

$$N=\frac{M}{M_S} \tag{1}$$

$$M_S=V_M\times t_S \tag{2}$$

$$t=N\times t_S+(N-1)\times t_i \tag{3}$$

式中，N 为浇注次数；M 为总浇注质量；M_S 为单次浇注质量；V_M 为质量流速；t 为铸锭充型凝固总时间；t_S 为单次浇注时间；t_i 为每次浇注间隔时间。

浇注铸锭的总质量约为 30 kg，逐层浇注工艺参数如表 2 所示。其中 Serial 1 是 1 次浇注制备 30 kg 铸锭，Serials 2~6 是 3 次浇注制备 30 kg 高温合金铸锭，每次浇注 10 kg，用于研究浇注速度的影响。

1.2 网格划分

采用 UG 软件建立坩埚及铸锭的三维几何模型，铸锭直径为 220 mm，坩埚有效高度为 150 mm，壁厚 50 mm。将建立好的几何模型导入 ProCAST，利用 Mesh 模块进行网格划分，铸锭部分网格尺寸为 3 mm，坩埚部分网格尺寸为 8 mm，总网格数为1 620 223，其中面网格数为 62 792，体网格数为 1 557 431，如图 3 所示。

1.3 控制方程

铸锭凝固成形时三维宏观温度场热传导控制方程为[17]：

$$\nabla\cdot(\lambda(T)\nabla T)+\dot{q}=\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} \tag{4}$$

式中，$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{i}+\frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{j}+\frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{k}$，$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{k}$ 分别为 3 个坐标轴的单位矢量；ρ，λ，c_p 分别为材料的密度、导热系数及比热，3 者均为温度的函数；t 为传热时间；$\dot{q}$ 为内热源(凝固潜热)，当温度处于固液两相区时[18]，内热源可通过下式计算获得：

$$\dot{q}=\rho L\frac{\partial f_S}{\partial t} \tag{5}$$

式中，f_S 为高温合金的固相率；L 为凝固潜热。当温度高于液相线温度或低于固相线温度时，$\dot{q}=0$，凝固潜热是连接宏微观现象，进行宏微观耦合模拟的纽带，潜热的释放直接由微观范畴的晶粒形核、生长确定，同时枝晶生长释放的结晶潜热会反馈到温

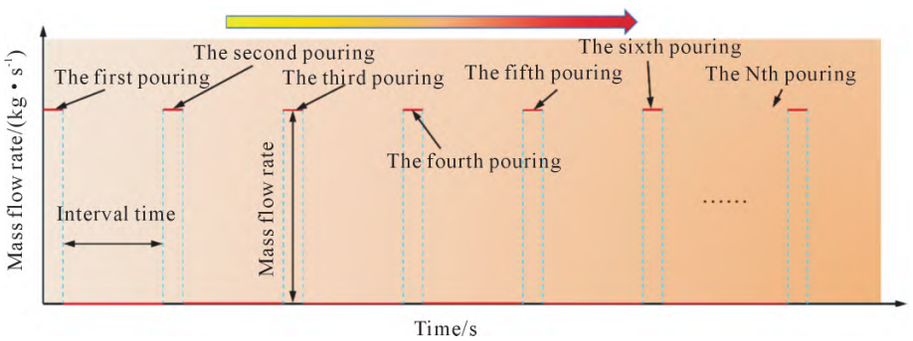


图 2 电子束逐层浇注实验工艺

Fig.2 Experimental process for electron beam layer casting

表 2 高温合金逐层浇注主要工艺参数

Tab.2 Main process parameters of layer-by-layer casting for the superalloy used in the simulation

Serial	Pouring temperature/℃	Mass flow rate/(kg·s^{-1})	Single pouring mass/kg	Casting interval/min	Number of layer casting
1	1 688	1.0	30	0	1
2	1 688	0.5	10	5	3
3	1 688	1.0	10	5	3
4	1 688	1.5	10	5	3
5	1 688	2.0	10	5	3
6	1 688	4.0	10	5	3

中国知网 https://www.cnki.net

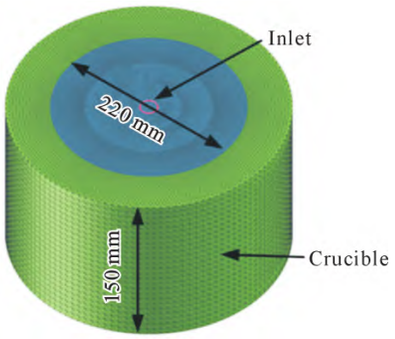


图 3 网格模型
Fig.3 Mesh model

度场计算中，在本模型中对结晶潜热的处理采用热焓法[19]。高温合金铸锭凝固结构模拟参数设置如表 3。

表3 高温合金铸锭凝固结构模拟参数
Tab.3 Parameters for simulating the solidification structure of superalloy ingots

Parameter	Value
Liquidus temperature/℃	1 353
Solidus temperature/℃	1 309
Gibbs-Thompson coefficient	2×10^{-7}
$\Delta T_{s,max}$/K	5
$\Delta T_{s,\sigma}$/K	1
$n_{s,max}$/K	1×10^{7}
$\Delta T_{v,max}$/K	20
$\Delta T_{v,\sigma}$/K	1
$n_{v,max}$/K	2×10^{12}
a_1	0
a_2	1.23×10^{-6}

除了高温合金铸锭，在凝固过程中结晶器也发生了复杂的、不稳定的热传递，结晶器的热量传输过程采用非稳态导热偏微分方程表示：

$$\nabla\cdot(\lambda_M\nabla T_M)=\rho_M c_{pM}\frac{\partial T_M}{\partial t} \tag{6}$$

式中，下标 M 代表结晶器，c_{pM} 为结晶器的定压比热，也是温度的函数。

假设液体金属是不可压缩牛顿流体。高温合金铸锭在凝固过程中除了有热量传递外还伴随着流体流动，期间涉及能量、质量和动量传输现象。连续性方程可表示为[20]：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{7}$$

动量守恒方程(Navier-Stokes equation)数学表达式如下[20]：

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho V\Phi)=\nabla\cdot(\mu\nabla\Phi)+S_u-\nabla P \tag{8}$$

式中，Φ 为速度分量；t 为时间；V 为速度矢量；μ 为动力黏度；S_u 为动量源项；P 为压力。

1.4 材料参数及边界条件

在本研究中，结晶器材料为铜，金属液体为GH4068合金。根据化学成分(表 1)，由 ProCAST 软件计算得到的材料性能参数如图 4 所示。

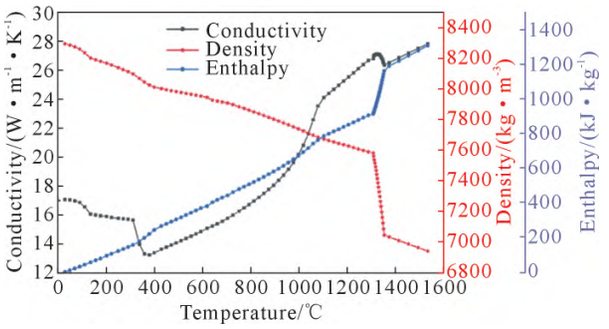


图 4 随温度变化的 GH4068 合金热物性参数
Fig.4 Temperature-dependent thermophysical parameters of the GH4068 alloy

求解上述模型，除了需要几何模型外，还必须设定初始条件和边界条件。Zhao[21]在研究电子束冷床炉熔铸 TC4 铸锭的数学模型时指出，在凝固过程中，结晶器上方的电子束输入能量与液面上表面辐射的能量几乎保持平衡，因此电子束的能量输入只是维持液面温度恒定。由此可知，高温合金液在结晶器内开始凝固的温度等同于熔体滴入结晶器的温度，称为浇注温度，该温度可以通过调节电子束枪的功率来控制。

凝固过程主要涉及 3 种传热方式：不同材料间热传导、热辐射和热对流[22]。为了简化理论处理，假设忽略对流传热，辐射等同于周围环境与结晶器外部凝固铸锭之间的热传导。

结晶器和冷却水之间的换热则通过下式表示：

$$-\lambda_M\boldsymbol{n}\cdot\nabla T_M=h_0(T_M-T_0) \tag{9}$$

式中，h_0 为换热系数，其值为 5 000 W/(m²·K)；T_M 和 T_0 分别为坩埚和冷却水的温度，其中冷却水的温度为 288 K。

高温合金圆锭和结晶器之间的换热表示为：

$$-\boldsymbol{n}\cdot(\lambda\nabla T-\lambda_M\nabla T_M)=h_t(T-T_M) \tag{10}$$

式中，T 为高温合金圆锭的温度；h_t 为圆锭与水冷结晶器换热系数，其值为 500 W/(m²·K)。

2 计算结果及讨论

2.1 充型及凝固过程分析

一次浇注制备 30 kg 高温合金铸锭温度场及固相分数分布如图 5 所示。不同颜色代表不同温度，浇注速度为 1 kg/s，浇注温度为 1 688 ℃。在充型阶段初期(图 5a)，合金液在结晶器底部逐渐铺开，浇注 3 s 后液面波动较为厉害，在浇口正下方熔体液面受冲击影响较大，但随着结晶器内熔体增加，液面

中国知网　https://www.cnki.net

逐渐趋于稳定。在充型过程中，合金液浇入到水冷铜坩埚内，充型速度较快，水冷铜坩埚来不及冷却熔体，靠近坩埚底部的熔体将会是新浇入的熔体，温度分布呈现红色。而远离坩埚底部的熔体在坩埚侧壁的冷却作用下，温度降低。充型完成后，熔体流动速度减小，形成了底部温度低、顶部温度高的温度分布。在凝固过程中(图 5a 和 b)，合金液与水冷结晶器接触，换热速度较快，形成了由底部至顶部、边缘向中心冷却的顺序凝固方式。

为了更好地了解电子束一次浇注过程中熔体内部的传热及流动行为，观察了铸锭 *YOZ* 截面的温度场、流速及凝固组织，结果如图 6 所示。图 6a 为高温合金液在充型过程中的温度分布。初始阶段，合金液浇入凝固坩埚内，沿坩埚底部逐渐铺开。随着充型持续进行，合金液浇注位置液面凹陷，最后液面近似水平(t=30 s)，整个浇注过程浇注时间较短，温度几乎不变。从图 6b 所示熔体流场分布可以看出，在合金液浇注流正下方熔体流速较大，之后熔体向四周扩散。随着充型进行，流速逐渐降低，并且熔体扩散形成环流，起到了熔体搅拌的作用。图 6c 为铸锭凝固组织的演变，由于充型时间较短，铸锭在充型过程中几乎不凝固。充型完成后，合金液在水冷铜坩埚的作用下逐渐凝固，最先在坩埚底部形成大量细小的等轴晶。这是由于在高温合金凝固过程中，水冷铜坩埚强烈的冷却效果使熔体在凝固时产生较大的过冷现象，从而导致异质形核随机发生在与熔体接触的底部和侧壁。接着，位于合金液固液界面前沿的晶粒沿着与热流相反的方向生长，部分晶粒逐渐转变为柱状晶并继续长大。在铸锭初始凝固阶段，底部的冷却强度大于侧壁，因而垂直于水冷铜坩埚底部的柱状晶占主导地位。随着浇注的进行，铸坯下部的热阻逐渐增加，导致垂直于水冷铜坩埚底部的柱状晶生长速度减慢。随着液面高度上升，合金液通过结晶器内壁的散热逐渐占据主导地位，使晶粒方向发生改变[23]。

在电子束逐层浇注过程中，浇注温度为 1 688 ℃，浇注速度为 1 kg/s，浇注时间为 10 s，浇注间隔为 5 min，浇注 3 次。铸锭逐层充型及凝固过程温度分布及固相分数动态演变如图 7 所示，图中不同颜色代表不同的等温线。观察图 7 可知，在充型阶段初期，合金液与坩埚接触时间较短，合金液逐渐铺开，随着充型过程的进行，合金液在结晶器的作用下开始冷却，形成了底部温度低、顶部温度高的分布。第 1 次充型过程中(t=0~10 s)，合金液面波动较为剧烈。待充型结束后，合金液面逐渐趋于平稳。在凝固过程中，合金与结晶器之间存在热交换，合金温度由外部向内部、底部向顶部逐渐升高(图 7a)。当再次浇注合金液，合金熔体液面较第 1 次浇注时平稳。完全凝固后，铸锭顶部浇口正下方温度较高，这是因为在浇注过程中，铸锭底面和侧面在水冷结晶器的作用下冷速较快，在铸锭最后凝固的区域容易产生缩孔缩松缺陷。由此可知，需要改善铸锭的冷却条件，使铸锭由底部向顶部逐渐凝固，通过控制凝固方向，遵循顺序凝固原则，能够建立良好的补缩条件，从而有效减少铸件中的缩孔和缩松缺陷[4]。

逐层浇注过程中铸锭的固相分数如图 7b 所示。

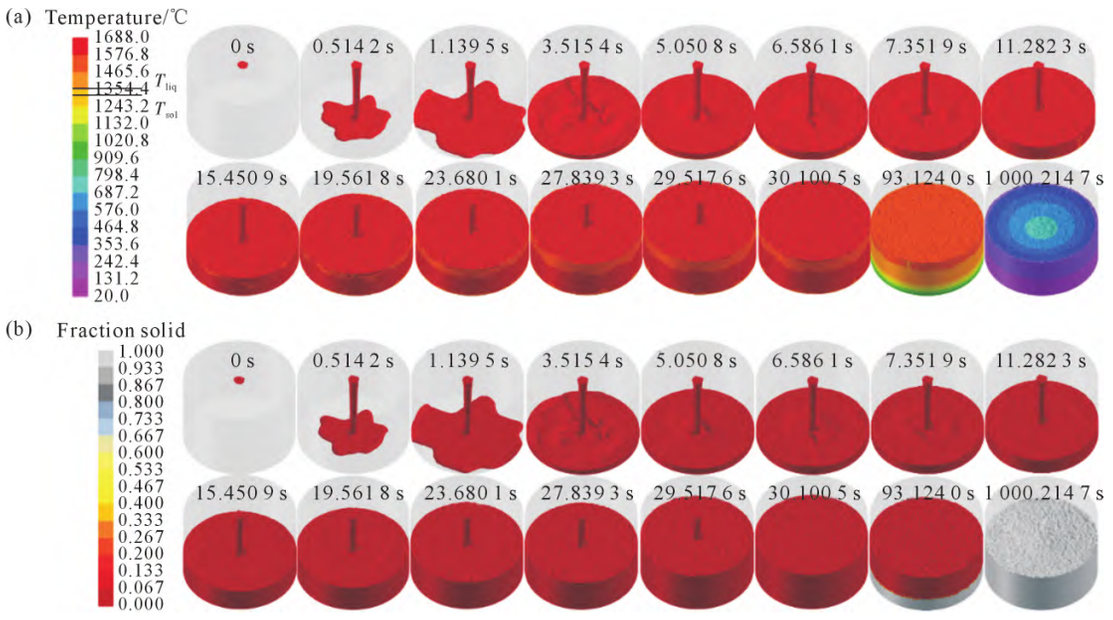


图 5 一次浇注制备 30 kg 高温合金铸锭温度场及固相分数分布：(a) 温度场；(b) 固相分数

Fig.5 Distributions of the temperature field and solid fraction of a 30 kg superalloy ingot prepared via once casting: (a) temperature field; (b) solid fraction

中国知网 https://www.cnki.net

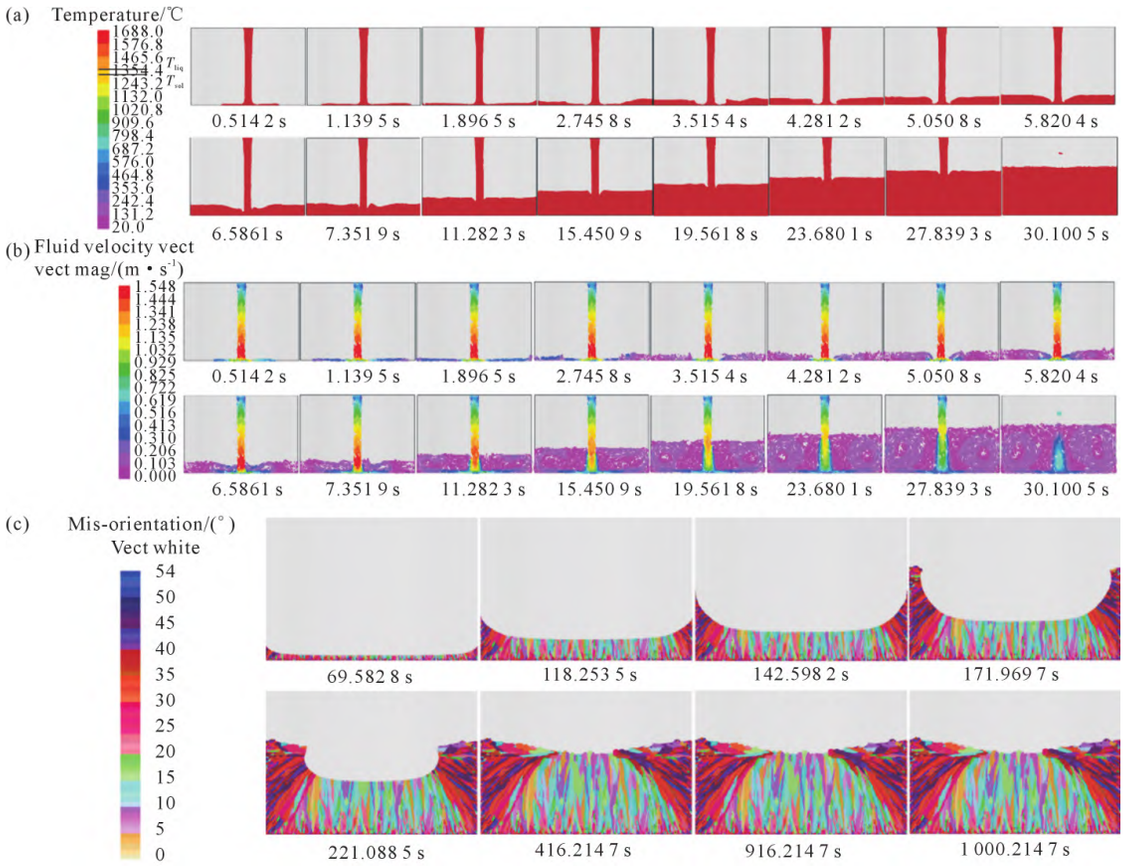


图 6 浇注过程中 *YOZ* 截面的温度场、流场及凝固组织分布：(a) 温度场；(b) 流场；(c) 凝固组织

Fig.6 Temperature field, fluid velocity and solidification structure distribution of the *YOZ* section during the casting process: (a) temperature field; (b) fluid velocity; (c) solidification structure

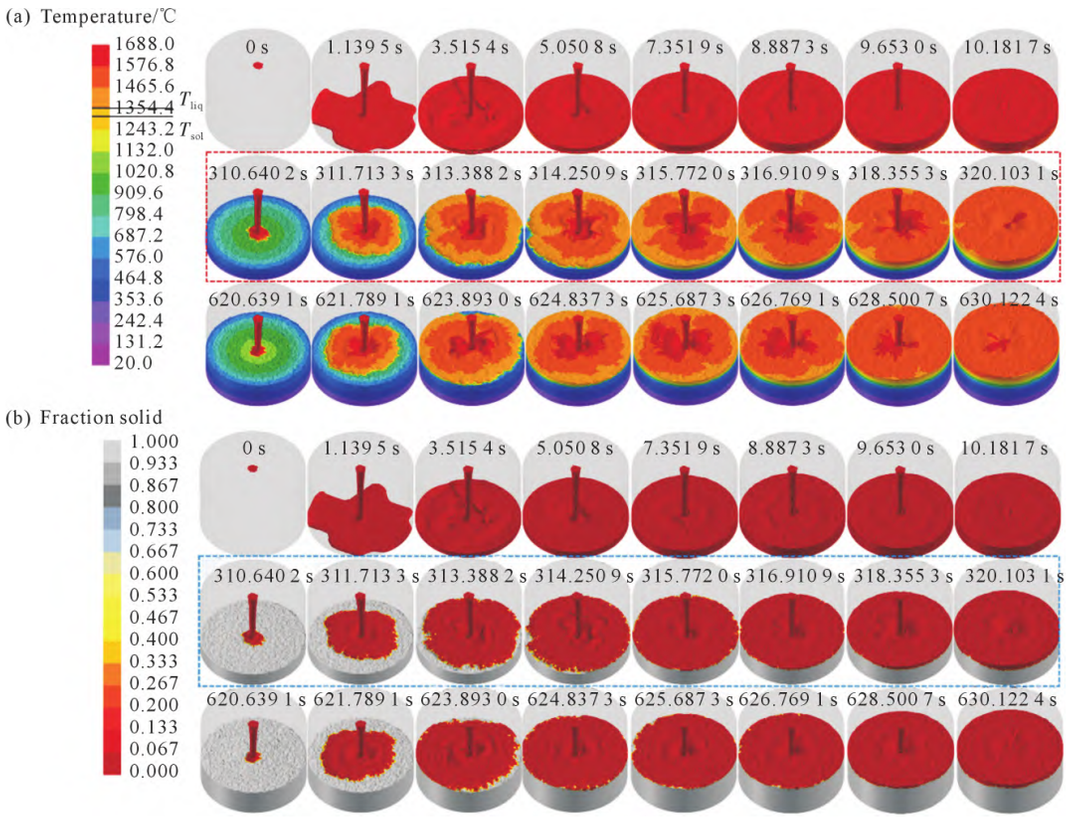


图 7 逐层浇注过程铸锭的温度场及固相分数分布：(a) 温度场；(b) 固相分数

Fig.7 Distributions of the temperature field and solid fraction of the ingot during the layer casting process: (a) temperature field; (b) solid fraction

中国知网　https://www.cnki.net

由图可知，初次充型时间较短，合金的固相分数几乎为 0。在凝固过程中，下部合金凝固后，新浇入的合金可以进行很好地补缩。在纵向方向上，可实现由底部至顶部的顺序凝固。此外，进行多次浇注，浇注液体一方面会进行补缩，另一方面会对第 1 层凝固后的铸锭有同步热处理的作用，在铸锭顶端呈现一个浅的“V”形界面。而在感应锭浇注过程中，在纵向方向上，铸锭未能实现从底部到顶部的顺序凝固，当合金完全凝固后，铸锭顶端产生了一个明显的深“V”形缩孔[24]。因此采用逐层浇注高温合金的方式可减少“V”形缩孔的深度。

图 8 显示了浇注第 2 层时沿 *YOZ* 截面的温度场及固相分数分布，详细揭示了浇注过程中液态金属的传热及凝固行为。由图 8a 可以看出。液态金属在浇注后的温度扩散趋势。当熔融金属浇入第 1 层铸锭表面后，中心区域温度迅速升高。随着时间的推移，热量自中心向外扩散，边缘区域温度下降较快，尤其在靠近坩埚壁的区域，由于坩埚的强制冷却作用，温度梯度较为明显，表现为颜色的快速过渡。图 8b 为浇注第 2 层时沿 *YOZ* 截面的固相分数分布，可以看出红色部分为液相，灰色部分为固相，介于二者之间的区域是糊状区。糊状区是从液态向固态过渡的关键阶段，在图中主要以黄色色带显示，该区域的固相分数介于 0.4~0.6 之间，表明此处存在固相和液相的共存。在凝固过程中，糊状区的大小和分布会直接影响到材料的微观组织和最终的力学性能。由图 8a 和 b 可知，第 2 层合金熔体对第 1 层铸锭热传导影响显著。高温液态金属对下层材料进行了二次加热，温度梯度和固相分数发生了显著变化。这种热累积效应需要在实际多层浇注过程中得到有效控制，以避免不均匀的凝固和由此产生的潜在缺陷。在合金液浇注的正下方，熔池深度较深，一方面是因为合金液浇注过程中对底层的热传导；另一方面是因为浇注位置位于铸锭心部，结晶器对其冷却作用较弱。

2.2 浇注速度对温度场的影响

坯料内部质量的稳定性并不总是随着浇注速度的增加而恶化，存在一个最佳浇注速度。同时，浇注速度会通过改变合金液在铸坯中的对流波动来影响传热波动，最终导致柱状晶等轴晶转变位置和中心质量沿浇注方向波动[25]。

不同浇注速度下充型完成后 *YOZ* 截面温度及速度分布如图 9 所示，不同颜色代表不同的温度，白色箭头代表速度矢量。由图 9 可知，一次浇注过程中，充型时间很短，熔体来不及冷却，呈现红色。3 次浇注过程中，当浇注完成后，中心区域温度较高，而边缘区域由于与模具壁直接接触，冷却较快，形成明显的温度梯度。此外，随着浇注速度增大，温度梯度明显增大，尤其在中心区域，热量积聚更为显著，可能导致铸件内部产生较大的热应力和缺陷。较小的

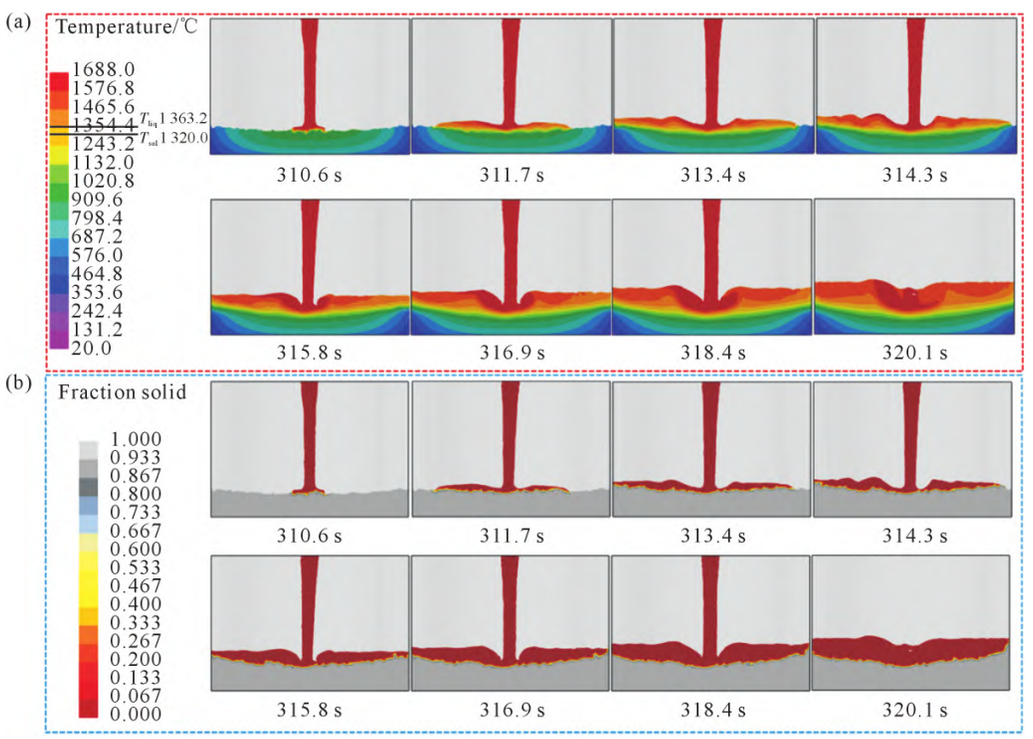


图 8 浇注第 2 层时沿 *YOZ* 截面的温度场及固相分数分布：(a) 温度场；(b) 固相分数

Fig.8 Distributions of the temperature field and solid fraction along the *YOZ* cross-section during casting of the second layer: (a) temperature field; (b) solid fraction

中国知网 https://www.cnki.net

浇注速度有助于避免产生内应力或热裂纹，但可能导致熔池不稳定。

不同浇注速度下各监测点温度随时间变化曲线如图 10 所示。监测点的坐标分别为(0, 0, 20) (0, 0, 40) (0, 0, 60) (0, 55, 20) (0, 55, 40) (0, 55, 60)，坐标原点在铸锭底部的中心。图 10a 显示浇注温度为 1 688 ℃时，一次浇注过程中各监测点温度随时间变化的曲线。可以看出，铸锭各监测点的温度总体上呈下降趋势，位于铸锭底部的监测点(0, 0, 20)和(0, 55, 20)的温度较低。在凝固初期，位于同一水平面的温度基本一致，但随着凝固持续，靠近侧壁的温度要低于铸锭中心线处的温度。由此得出在凝固过程中，铸锭各部分按照从底部到顶部、由边缘向中心的顺序进行凝固。图 10b~f 所示为当浇注温度为 1 688 ℃时，每次浇注 10 kg，不同浇注速度下各监测点的温度随时间变化曲线。可以发现，在凝固过程中，各监测点的温度呈下降趋势。但是在第 2 次和第 3 次浇注时，监测点的温度出现了不同程度回升，说明在浇注过程中，合金熔体对底部铸锭有热传导的作用，致使底部温度升高。随着浇注速度增大，监测点在浇注过程中温度回升幅度降低，并且中轴线上监测点的温度回升幅度要大于 0.5R 处监测点的温度回升幅度。

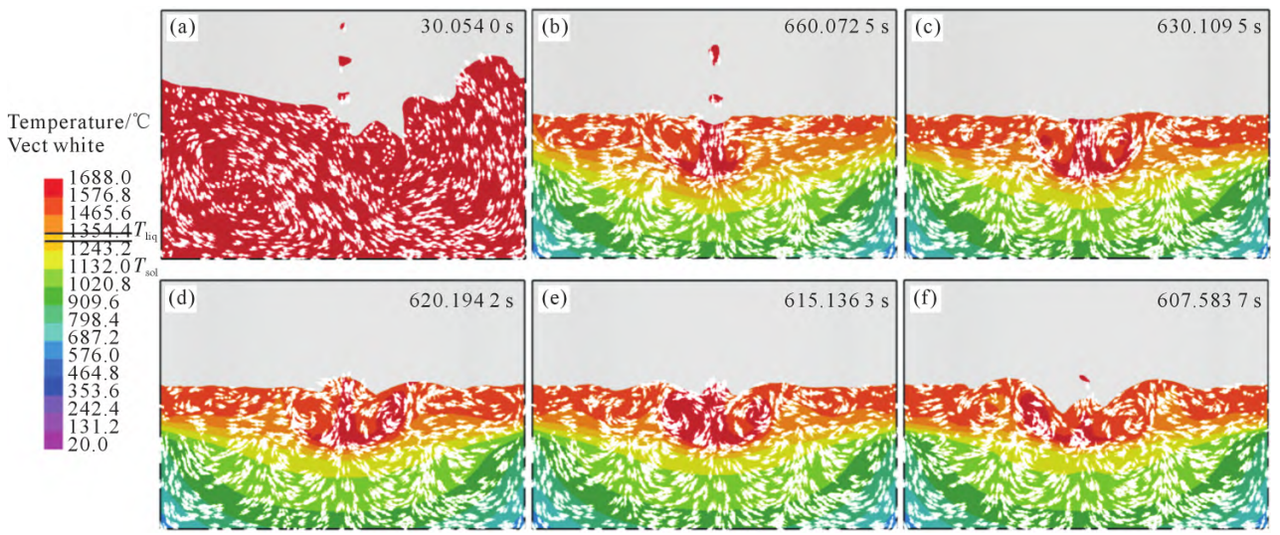


图 9　不同浇注速度下充型完成后 *YOZ* 截面温度及速度分布：(a) 1 kg/s (一次浇注 30 kg)；(b) 0.5 kg/s；(c) 1 kg/s；(d) 1.5 kg/s；(e) 2 kg/s；(f) 4 kg/s

Fig.9　Temperature and velocity distributions of the *YOZ* section after mold filling at different casting speeds: (a) 1 kg/s (once casting 30 kg); (b) 0.5 kg/s; (c) 1 kg/s; (d) 1.5 kg/s; (e) 2 kg/s; (f) 4 kg/s

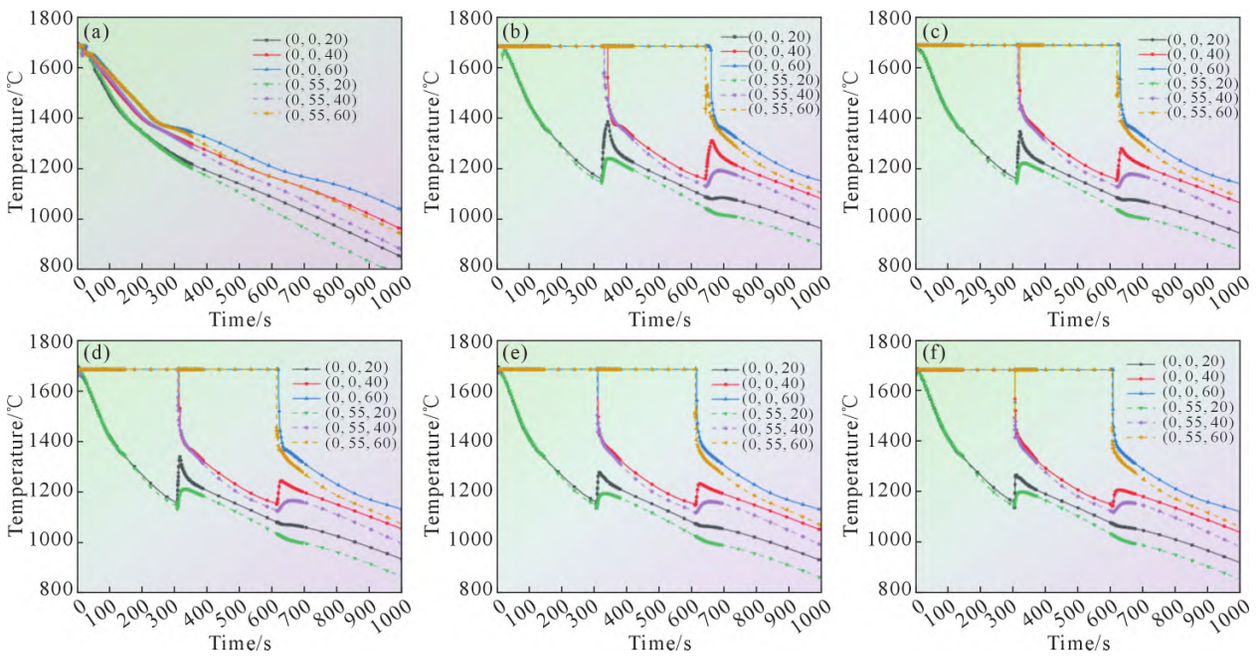


图 10　不同浇注速度下各监测点温度随时间变化曲线：(a) 1 kg/s (一次浇注 30 kg)；(b) 0.5 kg/s；(c) 1 kg/s；(d) 1.5 kg/s；(e) 2 kg/s；(f) 4 kg/s

Fig.10　Variation in the temperature at each monitoring point with time at different pouring speeds: (a) 1 kg/s (once casting 30 kg); (b) 0.5 kg/s; (c) 1 kg/s; (d) 1.5 kg/s; (e) 2 kg/s; (f) 4 kg/s

中国知网　https://www.cnki.net

2.3 浇注速度对熔体流速分布的影响

合金液在水冷铜坩埚内的流动行为直接影响铸坯的质量，合理的工艺条件是高效铸造及无缺陷铸坯生产的有力保障。当浇注温度为 1 688 ℃时，不同浇注速度下各监测点的熔体流速随时间变化如图 11 所示。可以看到，浇注速度增加，熔体流速峰值逐渐升高，浇注速度对流场的变化有直接影响。低速浇注(图 11b)时，监测点的流速相对较低，速度曲线呈现较为缓慢的下降趋势，说明熔融金属在充型过程中流动较为平稳，填充时间较长。而高速浇注(图 11f)时，熔体流速迅速达到峰值并快速下降，说明熔融金属以更高的速度填充坩埚，但流动过程较为剧烈，速度波动明显。此外，随着浇注速度的增加，监测点的流体速度变化呈现出更为明显的波动现象，特别是在靠近浇注入口的区域，浇注速度越大，合金液的冲击深度越大。当速度增大时，在结晶器底部形成大面积的涡旋(图 9)，在熔体系统中，涡旋的形成主要是由温度梯度、热源及重力作用共同驱动。高温区域的熔体密度较低而上浮，低温区域的熔体密度较高而下沉，产生的自然对流及加热效应共同作用，在熔体中形成循环流动，最终产生涡旋，高速流动导致的湍流可能引发液面波动和气孔形成，进而影响铸件质量。浇注速度越大，凝固越慢，坯壳厚度越小[26]。

2.4 浇注速度对凝固组织的影响

浇注速度对凝固组织的影响直接关系到最终产品的性能与质量。图 12 展示了不同浇注速度下*YOZ*截面凝固组织的演变情况，可以观察到，晶粒结构在不同浇注速度下发生了显著变化。随着浇注速度的增加，晶粒尺寸逐渐减小，晶粒的取向分布也随之改变。图 12b 显示了 0.5 kg/s 浇注速度下的凝固组织，具有较为显著的柱状晶结构，晶粒尺寸较大且延展方向较为一致。这表明在较低的浇注速度下，热流方向与凝固前沿的取向关系较为稳定，导致晶粒沿着热流方向生长，形成柱状晶。此时，晶粒的错配角度较小，晶粒取向较为均匀。据统计，*YOZ* 截面的晶粒数为 4 417。当浇注速度为 1 kg/s 时(图 12c)，*YOZ* 整个截面晶粒数减少为 3 099。虽然柱状晶结构仍然存在，但黑色椭圆形区域晶粒的尺寸明显减小，且取向变得更加复杂，表明浇注速度的增加导致了更大的温度梯度，从而形成多取向的晶粒结构。此外，晶粒的错配角度开始增大，逐渐向高错配角度的颜色过渡。在更高的浇注速度下(图 12d~f)，晶粒数分别为 2 931, 2 956, 3 350。在图 12f 黄色标柱区域，晶粒结构仍然表现出粗大的柱状晶特征，这与较低浇注速度条件下的边缘区域相似。黑色椭圆形标注区域晶粒结构变得细小，颜色变化更加密集且不均匀，这种密集的颜色变化表明错配角度和晶粒取向的变化较为剧烈，反映了晶粒在高浇注速度下形成的复杂结构。此时，由于快速冷却导致的温度梯度增大，晶粒生长受到更大限制，晶粒无法形成稳定的柱状结构，取而代之的是更加均匀、细小且取向复杂的晶粒。这种高浇注速度下的组织演变不仅加快了凝固速度，还提高了组织的均匀性和致密性。图 12 的结

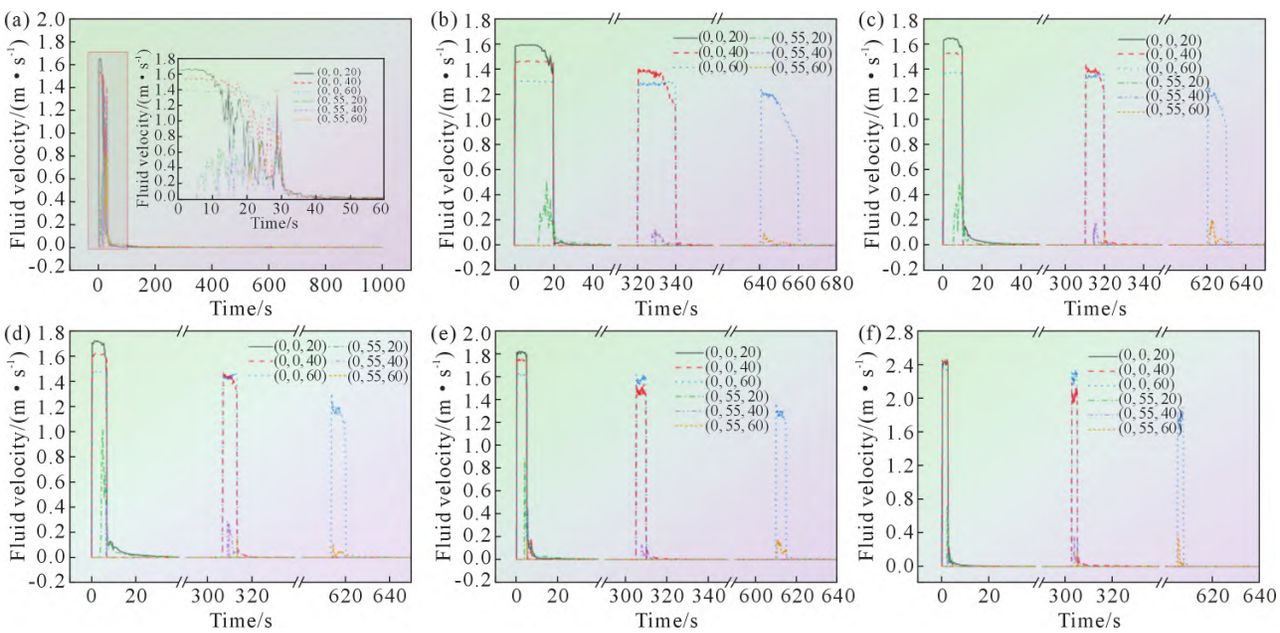


图 11 不同浇注速度监测点速度随时间变化曲线：(a) 1 kg/s (一次浇注 30 kg)；(b) 0.5 kg/s；(c) 1 kg/s；(d) 1.5 kg/s；(e) 2 kg/s；(f) 4 kg/s

Fig.11 Variations in velocity at each monitoring point with time at different pouring speeds: (a) 1 kg/s (once casting); (b) 0.5 kg/s; (c) 1 kg/s; (d) 1.5 kg/s; (e) 2 kg/s; (f) 4 kg/s

中国知网 https://www.cnki.net

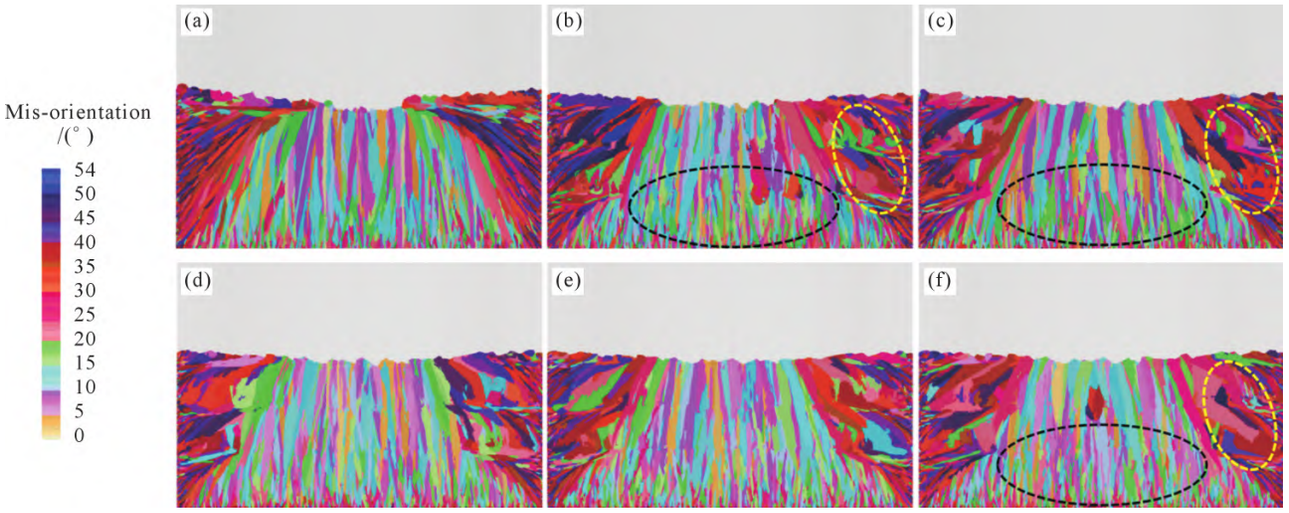


图 12 不同浇注速度下 *YOZ* 截面凝固组织演变：(a) 1 kg/s (一次浇注 30 kg)；(b) 0.5 kg/s；(c) 1 kg/s；(d) 1.5 kg/s；(e) 2 kg/s；(f) 4 kg/s

Fig.12 Solidification structure evolution of the *YOZ* section at different pouring speeds: (a) 1 kg/s (once casting 30 kg); (b) 0.5 kg/s; (c) 1 kg/s; (d) 1.5 kg/s; (e) 2 kg/s; (f) 4 kg/s

果表明，浇注速度显著影响了凝固过程中晶粒的生长行为与取向分布。较低的浇注速度有利于柱状晶的形成，晶粒数量多、尺寸较大且取向较为有序；较高的浇注速度则促使中心区域晶粒细化，错配角度增加，晶粒取向更加杂乱，晶粒数量略有回升。然而不同浇注速度下晶粒数量的变化趋势与成核和生长平衡有关，具体结果还可能受其他参数影响。

3 结论

(1)镍基高温合金电子束逐层浇注过程中，不同浇注速度下对铸锭纵向温度分布几乎没有影响。但随着浇注速度的增大，温度梯度明显增大，尤其在中心区域，热量积聚更为显著，可能导致铸件内部产生较大的热应力和缺陷。较小的浇注速度有助于避免产生内应力或者热裂纹，但可能导致熔池不稳定。

(2)浇注速度对熔体流动的最大速度及合金液面波动有显著影响。随浇注速度增加，监测点流体速度变化呈现出更为明显的波动现象，特别是在靠近浇注入口的区域，浇注速度越大，合金液的冲击深度越大。当速度增大时，靠近结晶器底部的熔体内部形成大面积涡旋，高速流动导致的湍流可能引发液面波动和气孔形成，进而影响铸件质量。

(3)浇注速度显著影响了凝固过程中晶粒的生长行为与取向分布。较低的浇注速度有利于柱状晶的形成，晶粒尺寸较大且取向较为有序，而较高的浇注速度则促使中心区域晶粒细化，晶粒取向更加杂乱。

参考文献：

[1] ZHUANG X P, TAN Y, ZHAO L H, YOU X G, LI P T, CUI C Y. Microsegregation of a new Ni-Co-based superalloy prepared through electron beam smelting and its homogenization treatment [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5422-5430.

[2] 严志，王树森，邹伟，程陆凡，卢厚辰，仉凤江. 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, CHENG L F, LU H C, ZHANG F J. 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.

[3] 庄辛鹏. 电子束精炼制备 GH4068 合金凝固偏析及高温变形行为研究[D]. 大连：大连理工大学，2022.
ZHUANG X P. Solidification segregation and hot deformation behavior of GH4068 alloy prepared by electron beam smelting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[4] 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 P M, ZHOU Y, JIANG D B. Numerical simulation on pouring process of nickel base superalloy induction ingot[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(4): 127-133, 141.

[5] DONG G Y, YOU X G, DONG L Y, YILITI Y, XU Z H, ZHOU H J, WANG Y N, TAN Y. The inclusion removal behavior during electron beam smelting of DD98M alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 4297-4305.

[6] DONG G Y, YILITI Y, LIU X Y, YOU X G, HAN W J, DONG L Y, CHANG K, ZHOU H J, LI P T, WANG Y N. Mechanisms for removing impurities in a single crystal superalloy by electron beam drip melting[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 28: 2008-2020.

[7] CUI H Y, TAN Y, BAI R S, LI Y, ZHUANG X P, CHEN Z A, YOU X G, LI P T, CUI C Y. Microsegregation of a new Ni-Co-based superalloy prepared by electron beam smelting layered solidification technology and its homogenization behavior[J]. Materials Characterization, 2022, 184: 111668.

中国知网 https://www.cnki.net

[8] WANG Y L, TAN Y, LI X N, YOU X G, ZHAO J Q, LI M, BAI R S, LI P T. Microstructures and homogenization behavior of a nickel-based superalloy used for 850 ℃ turbine disc prepared by electron beam smelting layered solidification[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 168119.

[9] 谭毅,游小刚,李佳艳,石爽. 电子束技术在高温合金中的应用[J]. 材料工程,2015, 43(12): 101-112.
TAN Y, YOU X G, LI J Y, SHI S. Application of electron beam technology in superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(12): 101-112.

[10] 任凤丽. 基于层状铸造方法的铸锭宏观偏析实验与模拟研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
REN F L. Experimental and numerical research on the macrosegregation of ingot using layer casting method[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[11] 李军,王军格,任凤丽,葛鸿浩,胡侨丹,夏明许,李建国. 基于成分均匀化的层状铸造方法的实验与模拟研究[J]. 金属学报, 2018, 54(1): 118-128.
LI J, WANG J G, REN F L, GE H H, HU Q D, XIA M X, LI J G. Experimental and numerical simulation study on layer casting method for composition homogeneity on ingot casting[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(1): 118-128.

[12] VISWANATH A, MANU M V, SAVITHRI S, PILLAI U T S. Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244: 320-330.

[13] INGLE P D, NARKHEDE B E. A literature survey of methods to study and analyze the gating system design for its effect on casting quality[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 5421-5429.

[14] LU S L, XIAO F R, GUO Z H, WANG L J, LI H Y, LIAO B. Numerical simulation of multilayered multiple metal cast rolls in compound casting process[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 518-528.

[15] REN F L, LI J, GE H H, CAI D X, HU Q D, LI J G. A comprehensive study of layer casting process by a four-phase filling-solidification model[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116737.

[16] CUI H Y, TAN Y, NING L D, BAI R S, YOU X G, CUI C Y, LI P T. Microstructure control and hot cracking behavior of the new Ni-Co based superalloy prepared by electron beam smelting layered solidification technology [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 175: 55-71.

[17] KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of solidification: fourth revised edition[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1998.

[18] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
HU H Q. Fundamentals of metal solidification[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2000.

[19] DUGGIRALA A, KALVETTUKARAN P, ACHERJEE B, MITRA S. Numerical simulation of the temperature field, weld profile, and weld pool dynamics in laser welding of aluminium alloy[J]. Optik, 2021, 247: 167990.

[20] LU S L, XIAO F R, ZHANG S J, MAO Y W, LIAO B. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 512-521.

[21] ZHAO X H. Mathematical modeling of electron beam cold hearth casting of titanium alloy ingots[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2006.

[22] KOU H C, ZHANG Y J, LI P F, ZHONG H, HU R, LI J S, ZHOU L. Numerical simulation of titanium alloy ingot solidification structure during var process based on three-dimensional cafe method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1537-1542.

[23] 胡艳. 工艺参数对多晶硅连铸坯温度、应力和凝固组织的影响[D]. 大连:大连理工大学,2022.
HU Y. Influence of process parameters on temperature, stress and solidification structure of multi-crystalline silicon continuous casting billet[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[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]. 中国冶金,2022, 32(4): 63-69, 76.
WANG J W, XU Z Q, YANG S F. Effect of hot top design on shrinkage porosity of nickel-based superalloy ingots[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 63-69, 76.

[25] GUO D W, ZENG Z H, PENG Z Q, GUO K H. Effect of casting speed on cet position fluctuation along the casting direction in continuous casting billets[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54: 450-464.

[26] 姚海,崔小朝,禹海燕. 铝板坯充型过程流场与温度场的耦合数值模拟[J]. 冶金能源,2008, 27(4): 23-26.
YAO H, CUI X C, YU H Y. The coupled numerical simulation of flow field and temperature field in the process of mold filling for aluminum slab[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2008, 27(4): 23-26.

中国知网 https://www.cnki.net