

# 百吨级钢锭底注工艺参数优化的数值模拟研究

崔家骏<sup>1, 2</sup>, 胡小强<sup>1, 2</sup>, 袁麟<sup>1, 2</sup>, 王意平<sup>3</sup>, 穆鸿敏<sup>3</sup>, 刘航航<sup>1, 2</sup>, 李殿中<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁沈阳 110016;

2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110016;

3. 太原重工股份有限公司, 山西太原 030024)

**摘要:** 本研究在不同浇注工艺参数下, 对百吨级钢锭底注生产过程进行了数值模拟, 预测了钢锭内形成的缩孔缩松缺陷。研究表明, 凝固后期钢锭中心形成狭长液相区, 补缩难度增大, 易形成轴线缩孔缩松缺陷。当浇注温度优化为1 536~1 540 °C时, 可显著改善轴线缩孔缩松情况, 并获得浅碟状小范围的冒口缩孔, 从而降低钢锭切头率; 将锭身浇注时间控制为20 min, 可维持良好的补缩平衡; 把模具预热温度提升至250 °C, 能通过降低模具热容量来增强冒口保温与补缩效果。优化后的底注工艺方案兼顾了质量控制与生产效益, 且已经过生产试验验证。

**关键词:** 百吨级钢锭; 底注工艺; 缩孔缩松; 浇注温度; 参数优化; 数值模拟

**中图分类号:** TF771; TG244; TF111.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0520-08

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0070

## Numerical Simulation Study on Bottom-Pouring Process Parameter Optimization for Hundred-Ton Class Steel Ingot

CUI Jia-jun<sup>1, 2</sup>, HU Xiao-qiang<sup>1, 2</sup>, YUAN Lin<sup>1, 2</sup>, WANG Yi-ping<sup>3</sup>, MU Hong-min<sup>3</sup>,  
LIU Hang-hang<sup>1, 2</sup>, LI Dian-zhong<sup>1, 2</sup>

(1. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, Liaoning, China; 3. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China)

**Abstract:** In this study, the bottom pouring production processes of hundred-ton class steel ingots under different casting process parameters have been numerically simulated, and the shrinkage cavity and porosity defects formed within the ingots have been predicted. The results show that a narrow liquid phase region forms at the center of the ingot in the late solidification stage, which increases the difficulty of feeding and tends to cause axial shrinkage cavity and porosity defects. When the casting temperature is optimized to 1 536-1 540 °C, the axial shrinkage cavity and porosity can be significantly improved, and small-scale shallow dish-shaped shrinkage cavities in the riser can be obtained, thereby reducing the ingot head cutting rate. Controlling the ingot body casting time to 20 minutes can maintain a good feeding balance. Raising the mold preheating temperature to 250 °C can enhance the insulation and feeding effects of the riser by reducing the mold heat capacity. The optimized bottom pouring process scheme takes into account both quality control and production efficiency, and has been verified by production tests.

**Key words:** hundred-ton class steel ingot; bottom pouring process; shrinkage cavity and shrinkage porosity; pouring temperature; parameter optimization; numerical simulation

大型特种合金钢锭作为核电压力容器、大型火电 部质量直接决定最终锻件的性能与可靠性<sup>[1-2]</sup>。目前, 转子和船用曲轴等大型锻件制造所必需的坯料, 其内 高质量大型钢锭的稳定生产仍是我国装备制造业发展

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (52504429); 太原市“揭榜挂帅”项目 (2024TYJB0105); 中国博士后科学基金面上项目 (2024M763341); 中科院战略先导专项 (XDA0390100); 辽宁省科技重大专项 (2024JH1/11700020)。

**收稿日期:** 2026-01-13 收到初稿, 2026-01-29 收到修订稿。

**作者简介:** 崔家骏 (1997-), 男, 助理研究员一级, 博士, 主要研究方向为大型特种合金钢锭冶铸工艺优化的应用基础研究。E-mail: cuijj@imr.ac.cn

**通信作者:** 胡小强, 男, 研究员, 博士生导师。E-mail: xqhu@imr.ac.cn

**引用格式:** 崔家骏, 胡小强, 袁麟, 等. 百吨级钢锭底注工艺参数优化的数值模拟研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (5): 520-527.

CUI Jiajun, HU Xiaoqiang, YUAN Lin, et al. Numerical simulation study on bottom-pouring process parameter optimization for hundred-ton class steel ingot [J]. Foundry, 2026, 75 (5): 520-527.

面临的重要问题，其根本难点在于如何最大限度地抑制成分偏析、缩孔缩松等固有冶金缺陷<sup>[3-5]</sup>。由于钢锭凝固过程伴随着复杂的传热、传质及相变，对其进行有效预测并据此通过工艺参数优化实现精准调控，是解决上述难题、提升大锻件成材率与质量稳定性的关键所在<sup>[6-7]</sup>。

长期以来，大型锻件用钢锭制备主要采用双真空顶注工艺。该方法可显著降低钢液中氧化夹杂和气体含量，但存在设备投资大、工序复杂和生产周期长等显著问题。相比之下，大气底注工艺因其独特优势在大型钢锭生产中展现出巨大潜力。底注过程中钢液面上升平稳、飞溅少，有利于气体和夹杂物的上浮排出，从而有效提升钢锭表面质量和内部纯净度<sup>[8]</sup>。此外，底注法可实现多支钢锭同时浇注，生产效率高，是降低大型锻件生产成本的重要途径<sup>[9]</sup>。近年来，有部分学者针对钢锭底注工艺开展研究。葡瑞等<sup>[10]</sup>预测了底注1浇2工艺生产的35 t钢锭中缩孔缩松的位置及尺寸，结果表明该锭型设计合理，冒口补缩良好。赵亚雄等<sup>[11]</sup>采用大气底注工艺生产汽轮机机组用30Cr1Mo1V转子钢锭，结合优化保护浇注等控制措施，显著提高了生产效率并有效降低生产成本。李越等<sup>[12]</sup>的研究表明，通过其提出的底注转子钢锭模设计依据与参数选取方法，可有效降低冒口占比，从而提高钢锭利用率。

尽管底注工艺在中小规格钢锭生产中已较为成熟，但其应用于最典型的百吨级大钢锭制备时，仍面

临一系列关键问题。当前，国内尚未实现百吨级底注钢锭的规模化生产，且相关的系统性研究基础薄弱，尤其缺乏对其浇注工艺参数的优化研究。由于试验成本高昂，且内部过程难以直接观测，本课题以百吨级底注钢锭为研究对象，利用ProCAST软件对钢锭充型及凝固过程进行数值模拟，系统研究浇注温度、浇注速度及模具预热温度对缩孔缩松缺陷的影响，进而获得最优浇注参数组合，以期支持我国超大型铸锻件的高质量生产。

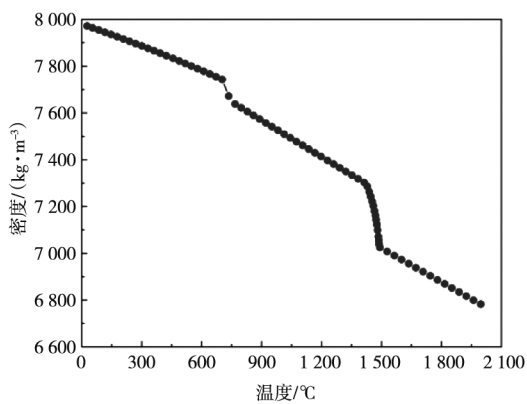
## 1 钢锭充型与凝固数值模拟

### 1.1 模型建立及网格划分

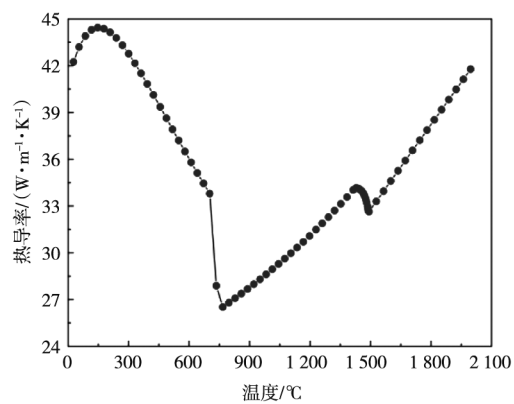
钢锭材质选用S50C钢种，其化学成分如表1所示。同时，采用“电弧炉+LF精炼+VD处理”工艺冶炼109 t钢锭。S50C的密度、热导率等主要热物性参数如图1所示。其固、液相线温度分别为1 424 °C和1 488 °C，均根据其化学成分由ProCAST软件计算得出；铸型材料相关参数直接调用自软件内置的材料数据库<sup>[13]</sup>。

表1 S50C钢主要化学成分  
Tab. 1 Main chemical composition of S50C steel

w <sub>B</sub> / %					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0.49	0.70	0.25	0.008	0.001	余量



(a) S50C钢密度随温度的变化



(b) S50C钢热导率随温度的变化

图1 S50C钢的主要物性参数

Fig. 1 Main physical parameters of S50C steel

采用SolidWorks软件构建钢锭、冒口与浇注系统等三维模型，随后将几何文件导入ProCAST软件中进行网格划分，如图2所示。其中，钢锭模和底盘的网格尺寸为100 mm，钢锭、绝热板和发热剂区域网格均设为50 mm，浇注系统的网格尺寸依据其最小内浇道直径（60 mm）设为30 mm，以精确解析区域内流动。最

终，所生成的面网格总数为69 152个，体网格总数为1 025 030个。

### 1.2 边界条件及参数设置

数值模拟所采用的边界条件与初始温度设定如下：由于绝热板保温效果较好，钢锭与绝热板间界面

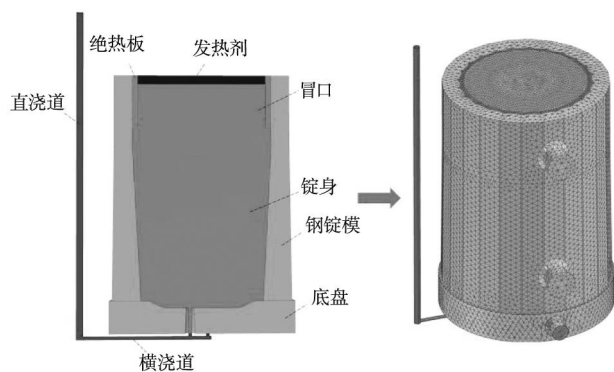


图2 三维模型及网格划分

Fig. 2 3D model and mesh generation

换热系数设为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；钢锭模与绝热板间换热系数设为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。钢液上表面由于发热剂的作用，换热系数设置为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[14]</sup>。底盘与钢锭、钢锭模间界面换热系数均设为 $200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，钢液与钢锭模间换热系数设置为一个随温度变化的经验值<sup>[15]</sup>，如图3所示。钢锭模外壁和底盘外壁设为空冷，除钢锭和锭模外，其他材料的初始温度均设为室温。

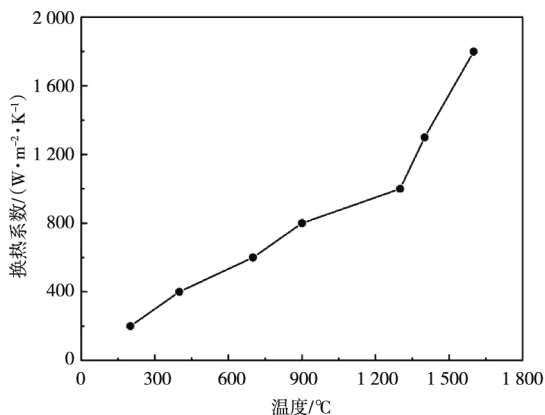


图3 钢液与锭模间界面换热系数变化

Fig. 3 Variation of heat transfer coefficient at the ingot-mold interface

利用软件中的Cast模块进行数值模拟参数设置，主要设置如下：

(1) 钢液浇注温度。浇注温度是调控凝固过程与钢锭质量的核心工艺参数。适宜的浇注温度不仅能细化钢锭凝固组织，还能有效降低钢锭模热冲击，从而延长模具使用寿命<sup>[16-17]</sup>。企业现行的浇注温度为 $1533 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在此基础上，拟进行四组不同浇注温度的对比模拟，所设置的浇注温度分别为 $1528 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1533 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1538 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1543 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 浇注速度。适宜的浇注速度能确保钢液平稳充型，减少卷气和氧化夹渣，同时优化凝固前沿温度梯度，提升钢锭内部致密性<sup>[18]</sup>。为保证冒口的补缩能力，将冒口浇注时间固定为 $11 \text{ min}$ 不变，调整锭身浇注

时间为 $18 \text{ min}$ 、 $20 \text{ min}$ 、 $22 \text{ min}$ 和 $24 \text{ min}$ ，进行四组数值模拟对比分析。

(3) 模具预热温度。模具预热温度是控制钢锭与模具间换热的关键参数。选择 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 四个水平的模具温度进行对比分析。

### 1.3 试验组方案设计

采用控制单一变量法进行数值模拟试验<sup>[19]</sup>，重点探究百吨级底注钢锭充型及凝固过程中，浇注温度、浇注速度（锭身浇注时间）与模具预热温度对缩孔疏松缺陷的影响规律。具体的数值模拟方案见表2。

表2 数值模拟方案

Tab. 2 Numerical simulation schemes

试验组	浇注温度/ $^\circ\text{C}$	锭身浇注时间/ $\text{min}$	模具预热温度/ $^\circ\text{C}$
1	1 528	20	250
2	1 533	20	250
3	1 538	20	250
4	1 543	20	250
5	1 538	18	250
6	1 538	22	250
7	1 538	24	250
8	1 538	20	150
9	1 538	20	200
10	1 538	20	300

## 2 数值模拟结果分析

### 2.1 钢锭充型及凝固过程温度场分析

图4所示为浇注温度 $1538 \text{ }^\circ\text{C}$ 、锭身浇注时间 $20 \text{ min}$ 、模具预热温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，钢锭充型及凝固过程中的温度场变化。图4(a)为锭身充型至50%，此时液面较为平稳且处于锭身中部，液面以上的未充型区温度维持在较低水平；图4(b)对应锭身充型完成，此时锭身温度分布较为均匀；图4(c)代表钢锭充型过程结束，随着锭模冷却作用逐渐增强，钢锭侧壁开始出现明显温降。充型完成后，钢液呈现横向由外向内、纵向自下向上的顺序凝固特征。由于锭模与钢液初始温差较大，凝固前期（图4(d)）钢锭侧壁和底部的温度梯度较大；随着凝固前沿持续向锭心扩展，进入锭身主体凝固阶段（图4(e)和4(f)），凝固壳的形成显著增加了系统热阻，从而延缓了内部钢液向外的散热速率。凝固末期（图4(g)）由于热冒口对钢锭的补缩作用，凝固进程放缓，整体温度梯度趋于平缓。

图5为浇注温度 $1538 \text{ }^\circ\text{C}$ 、锭身浇注时间 $20 \text{ min}$ 、

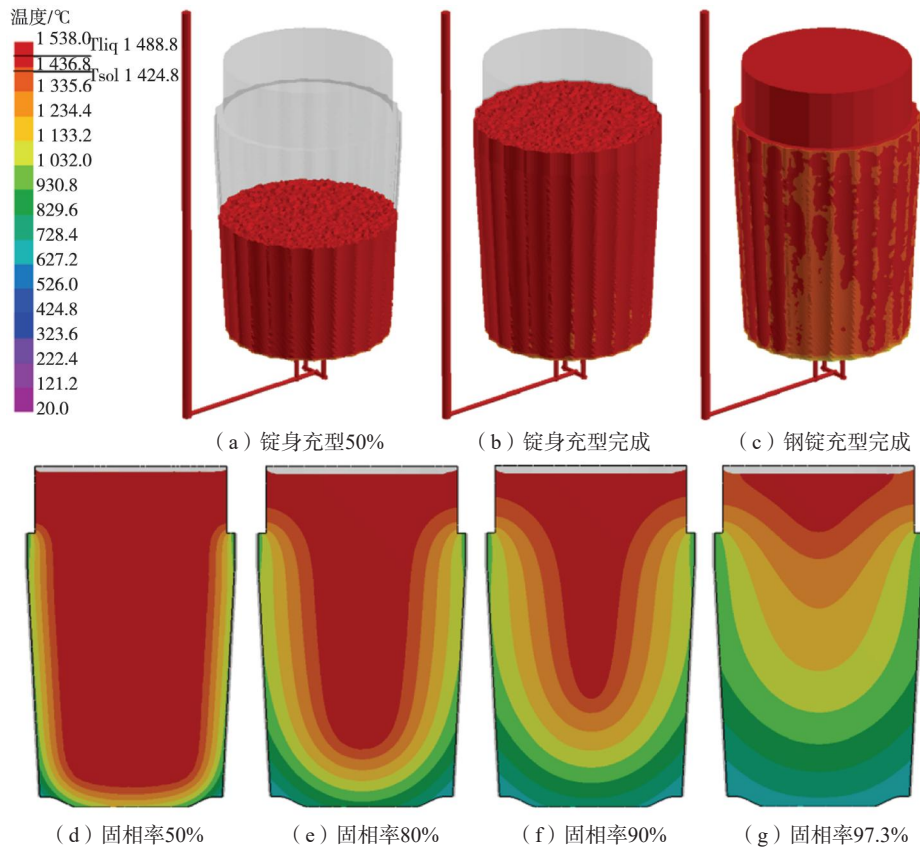


图4 方案3充型和凝固过程中的温度场变化

Fig. 4 Evolution of the temperature fields during the mold filling and solidification processes for scheme 3

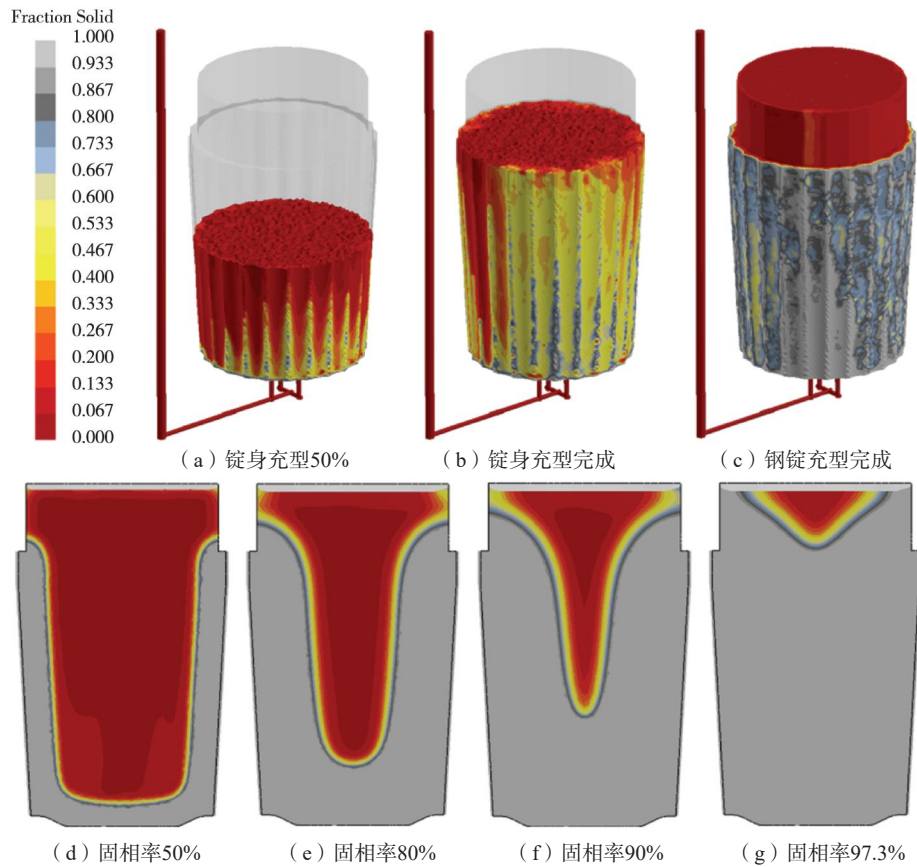


图5 方案3充型和凝固过程中的固相率场变化

Fig. 5 Evolution of the solid fraction fields during the mold filling and solidification processes for scheme 3

模具预热温度 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,钢锭充型及凝固过程中的固相率场变化。在钢锭充型阶段(图5(a)-(c)),液面平稳上涨,侧壁凝固壳逐渐形成。凝固前中期(图5(d)和5(e))的凝固前沿形态平滑,热冒口的补缩通道保持通畅;凝固后期(图5(f))钢锭中心形成狭长液相区,钢液流动性减弱,补缩阻力显著增加,易出现轴线缩孔缩松缺陷;凝固末期(图5(g))中心残余液相区大幅收缩,此时锭身已完全凝固。此外,可以发现凝固收缩导致冒口上表面持续缓慢下降,最终形成一次缩孔。

## 2.2 钢锭缩孔缩松缺陷分布

采用Niyama判据预测钢锭的缩孔缩松缺陷<sup>[20]</sup>,认为当该判据小于 $25.0\text{ (K}\cdot\text{s)}^{0.5}/\text{cm}$ 这一临界值时,区域将产生缩孔缩松缺陷<sup>[10, 15]</sup>。图6所示为 $1\ 528\text{ }^{\circ}\text{C}$ (方案1)、 $1\ 533\text{ }^{\circ}\text{C}$ (方案2)、 $1\ 538\text{ }^{\circ}\text{C}$ (方案3)、 $1\ 543\text{ }^{\circ}\text{C}$ (方案4)四种浇注温度下钢锭内的Niyama判据分布。可以发现, $1\ 528\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冒口区域存在明显的集中缩孔,锭身轴线缩孔缩松区较为狭长,同时区域内Niyama判据值相对较低。当浇注温度提高到 $1\ 533\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,轴线缩孔缩松程度有明显改善,而冒口处集中缩

孔程度加剧。这是因为冒口的补缩效率显著提升,轴线上缩孔缩松缺陷有效转移至冒口。当浇注温度为 $1\ 538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以发现一次缩孔形态更为规整,且由于凝固前沿温度梯度更加平缓,冒口内金属液能够高效持续地补偿整个铸锭的凝固收缩。因此,在进一步改善轴线缩孔缩松的同时,避免了冒口内深而集中的缩孔出现,而是仅形成浅碟状的小范围缩孔,大幅降低钢锭切头率。当浇注温度达到 $1\ 543\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,轴线与冒口内的缩孔缩松缺陷均出现一定程度加剧,这是因为过量的热输入极大增加了系统的液态收缩总量,使补缩效率显著下降。综上,可以确定 $1\ 538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为该工艺下的最优浇注温度。

图7所示为 $18\text{ min}$ (方案5)、 $20\text{ min}$ (方案3)、 $22\text{ min}$ (方案6)、 $24\text{ min}$ (方案7)四种锭身浇注时间下钢锭内的Niyama判据分布。可以发现,锭身浇注时间为 $18\text{ min}$ 和 $20\text{ min}$ 时,一次缩孔形态较为规整,冒口区域均形成浅碟状的小范围缩孔,且 $20\text{ min}$ 时轴线缩孔缺陷程度明显好于 $18\text{ min}$ 。当浇注时间延长至 $22\text{ min}$ ,冒口内开始出现集中缩孔,同时轴线上的缩孔缩松缺陷显著加剧。锭身浇注时间为 $24\text{ min}$ 时,轴线上低判据区范围进一步扩大,且判据值整体更低,缺陷风险持

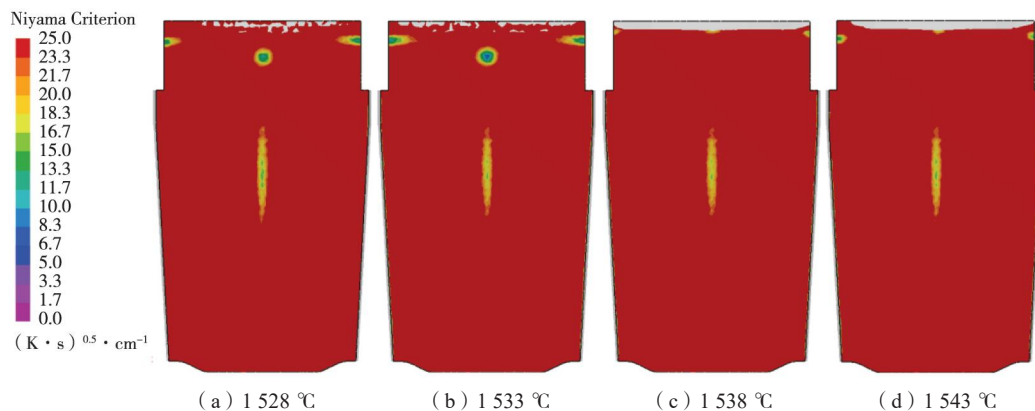


图6 不同浇注温度下的Niyama判据对比

Fig. 6 Comparison of the Niyama criterion under different pouring temperatures

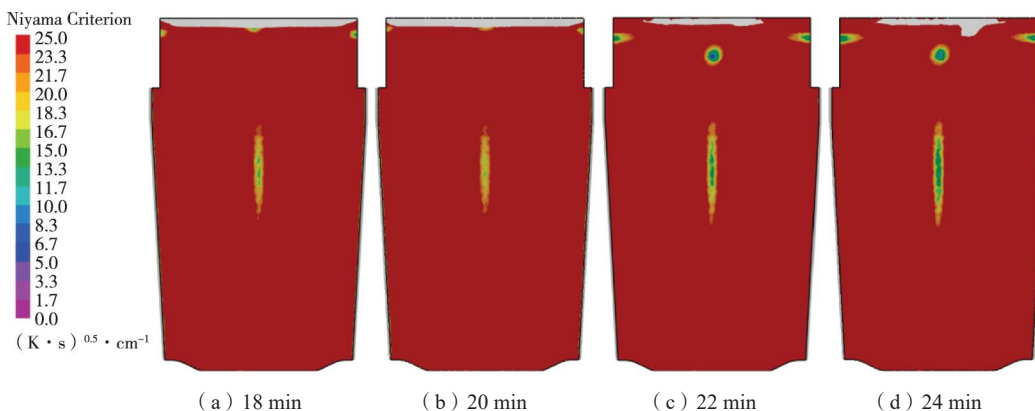


图7 不同锭身浇注时间下的Niyama判据对比

Fig. 7 Comparison of the Niyama criterion under different pouring times for ingot body

续升高。这主要归因于过长的浇注时间会增大充型过程中各位置处热量散失差异,降低凝固同步性,弱化冒口与锭身的补缩匹配,从而提升缺陷风险。因此,将锭身浇注时间设为20 min能够有效控制该工艺下钢锭的轴线缩孔缩松缺陷。

图8为150 ℃(方案8)、200 ℃(方案9)、250 ℃(方案3)、300 ℃(方案10)四种模具预热温度下的Niyama判据分布。对比各图可以发现,相较于其他工艺参数,模具预热温度对缩孔缩松缺陷的影响相对有限。150 ℃预热时,模具与钢液初始温差较大,轴线上

低判据值区域相对更大,对应缩孔缩松缺陷更严重。当预热温度提高至200 ℃和250 ℃,模具热容量显著降低,冒口保温与补缩效果得到强化,钢锭轴线缩孔缩松缺陷因而有所改善。此外,采用250 ℃预热相较于200 ℃可进一步降低钢锭切头率;300 ℃预热时,其判据分布与250 ℃下无明显差异。从工艺节能性角度考量,250 ℃与300 ℃的缺陷程度相近,但250 ℃可减少预热能耗,因此250 ℃是该工艺下的最优模具预热温度。

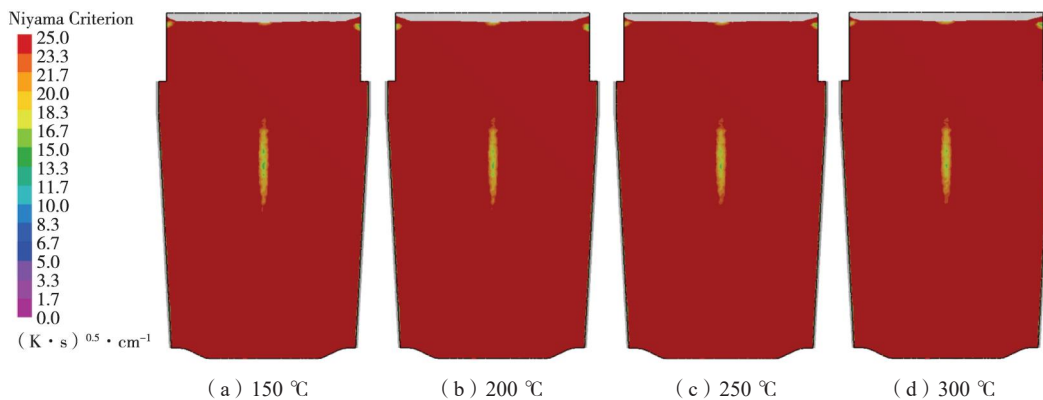


图8 不同模具预热温度下的Niyama判据对比

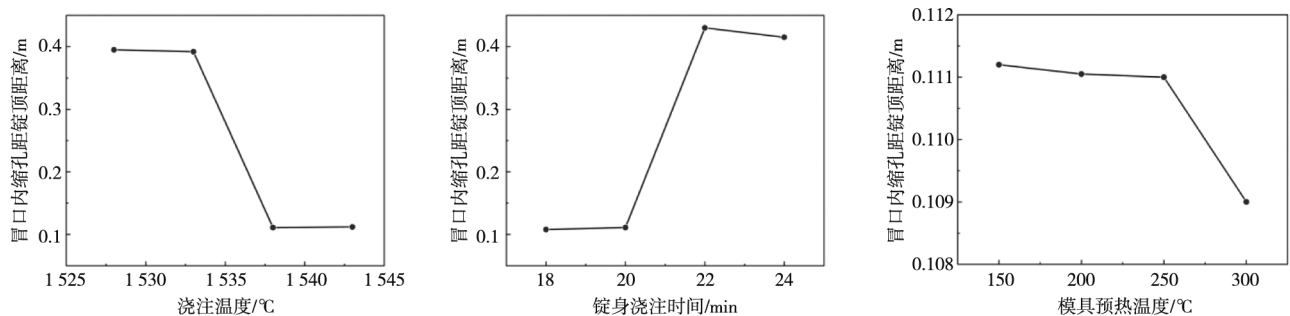
Fig. 8 Comparison of the Niyama criterion under different mold preheating temperatures

### 2.3 百吨级底注钢锭铸造工艺优化

冒口内缩孔距钢锭顶部距离越大,表明其越靠近锭身。这不仅增加了缺陷侵入锭身的风险,而且大幅提高了钢锭切头率。图9所示为该距离随各工艺参数的变化情况,其中随浇注温度的变化规律为:在1 528~1 533 ℃区间内保持稳定,温度继续升高,距离骤减,之后则基本保持不变。锭身浇注时间为18~20 min时,该距离变化不大,随浇注时间进一步延长而开始骤增,缩孔缩松缺陷风险与切头率显著提升。模具预热温度在150~250 ℃内,该距离呈缓慢减小趋势,超过

250 ℃后则随预热温度升高明显下降。

图10所示为锭身纵剖面轴线缩孔缩松区面积随参数的变化规律。浇注温度在1 528~1 533 ℃区间内,缺陷面积随温度升高显著减小,但随着温度继续升高,其变化趋于平缓。锭身浇注时间在18~20 min内,缺陷面积维持在较低水平,一旦浇注时间超过20 min,缺陷面积将随浇注时间增加而快速增大,这表明过长的浇注时间会破坏补缩平衡并加剧缺陷。相比之下,模具预热温度对缺陷面积的影响程度弱于前两者。在150~200 ℃内,该面积随预热温度的升高而下降,200 ℃后存在小幅回升,并在250 ℃后达到稳定。



(a) 缩孔距锭顶距离随浇注温度的变化

(b) 缩孔距锭顶距离随锭身浇注时间的变化

(c) 缩孔距锭顶距离随模具预热温度的变化

图9 冒口内缩孔距钢锭顶部距离随各参数的变化

Fig. 9 Variation of the distance between the shrinkage cavity in the riser and the ingot top with different process parameters

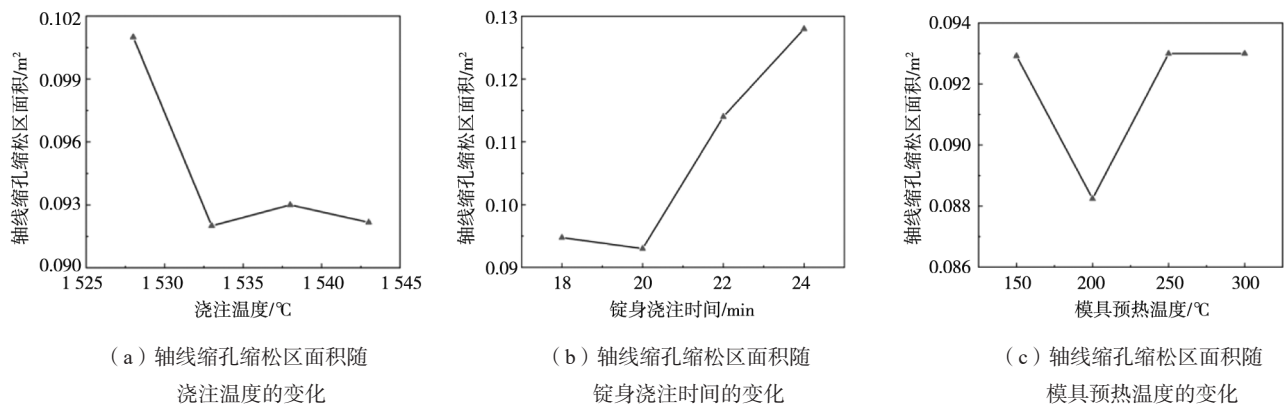


图10 锭身纵剖面轴线缩孔缩松区面积随各参数的变化

Fig. 10 Variation of area of the shrinkage porosity zone along the axis on the longitudinal section of the ingot body with different process parameters

基于上述结果与图6至图8分析,本研究确定的最优工艺参数组合为:浇注温度1 538 °C、锭身浇注时间20 min和模具预热温度250 °C。该组合可在有效控制钢锭缩孔缩松缺陷的同时,降低切头率及工序能耗,是兼顾质量与效益的最佳方案。

### 3 工业生产验证

利用所确定的最佳工艺方案(即方案3)进行生产

试验,浇注过程中钢液面情况如图11所示。可以观察到,整个浇注过程中钢液面保持平稳上升,证明所制定浇注工艺参数具有合理性。对锻件进行超声波探伤检验,发现缺陷的当量尺寸普遍在 $\Phi 1.6$  mm以下,符合锻件内部质量的GB/T 6402—2008标准的3级标准要求。这表明,采用优化底注工艺生产的钢锭,其内部缩孔缩松程度较轻,能够通过锻造基本消除,与数值模拟结果吻合较好。

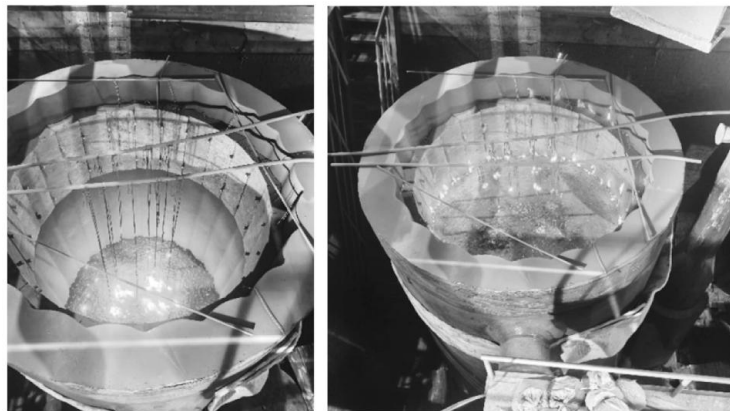


图11 实际浇注过程中钢液面情况

Fig. 11 Conditions of the molten steel surfaces during actual pouring process

### 4 结论

(1) 凝固后期,钢锭中心形成狭长液相区,补缩难度加大,易出现轴线缩孔、缩松缺陷。凝固收缩导致冒口上表面持续缓慢下降,最终形成一次缩孔。

(2) 浇注温度为1 538 °C时,轴线缩孔、缩松缺陷得到显著改善,且冒口内仅形成浅碟状小范围缩孔,钢锭切头率大幅降低。浇注时间超过20 min会极大

降低凝固同步性,从而破坏补缩平衡并加剧缺陷。随着模具预热温度的提高,其热容量显著降低,冒口保温与补缩效果得到强化,轴线缩孔、缩松缺陷将有所改善。

(3) 兼顾质量控制与生产效益,该型钢锭底注最佳工艺方案为:浇注温度1 538 °C、锭身浇注时间20 min、模具预热温度250 °C。经生产试验验证,该方案参数设计合理,可显著提升钢锭质量。

## 参考文献:

- [1] 兰鹏, 李鹏善, 刘春秀, 等. 基于凝固数值模拟的13t扁锭结构设计及优化 [J]. 中国冶金, 2014, 24 ( 10 ): 22-31.
- [2] 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.
- [3] 余占扬, 张慧, 干勇, 等. 钢锭铸造过程中宏观偏析的研究进展 [J]. 中国冶金, 2021, 31 ( 5 ): 6-11.
- [4] 沈厚发, 陈康欣, 柳百成. 钢锭铸造过程宏观偏析数值模拟 [J]. 金属学报, 2018, 54 ( 2 ): 151-160.
- [5] 谢敬佩. 我国铸钢技术发展现状及趋势 [J]. 铸造, 2022, 71 ( 4 ): 395-402.
- [6] AHMADI H, DEHGHAN S, RANJBAR H. Enhancement of upsetting technology for minimizing internal defects in heavy ingot casting: simulation, optimization, and experimental validation [J]. International Journal of Material Forming, 2025, 18 ( 21 ): 1-26.
- [7] HU W, ZHOU Q Y, CHEN W, et al. Numerical simulation on the fluid flow, air entrainment, heat transfer, and solidification during top pouring and cooling of a 303 ton heavy ingot [J]. Steel Research International, 2023, 94: 2200709.
- [8] 张鸣一, 杨吉春, 贾晓斌, 等. 纯铜的真空熔铸工艺与优化研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 ( 6 ): 920-924.
- [9] 胡建东, 李金良, 高建军. 大气下注钢锭浇注工艺改进研究 [J]. 大型铸锻件, 2015 ( 4 ): 41-42.
- [10] 蔺瑞, 周冬. 35 t钢锭下注1浇2模拟研究 [J]. 一重技术, 2024 ( 4 ): 29-32.
- [11] 赵亚雄, 樊应剑. 大气下注生产30Cr1Mo1V转子钢锭的实践 [J]. 大型铸锻件, 2024 ( 3 ): 5-9.
- [12] 李越, 王意平, 陈培红. 下注转子钢锭模的设计与研究 [J]. 山西冶金, 2020, 43 ( 4 ): 63-64.
- [13] 韩少丽, 李尚平, 刘天宇, 等. JG4247合金涡轮后机匣铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2023, 72 ( 7 ): 884-890.
- [14] 马占彪. 大型钢锭凝固过程及缺陷的数值模拟与优化 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [15] 王佳琪. 百吨级钢锭缩孔缩松预测与工艺优化 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2012.
- [16] WANG Y X, WU G H, ZHANG L, et al. Effect of pouring and mold temperatures on fluidity and hot tearing behavior of cast Al-Li-Cu-Mg-Sc-Zr-Ti alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35: 669-683.
- [17] 郝春来, 李振, 赫丽杰, 等. 浇注工艺对AlSi9Cu3合金凝固组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 ( 6 ): 688-694.
- [18] HE Z Y, ZHU H C, LI H B, et al. Evolution of dendrite structure and shrinkage porosity in 30Cr15Mo1N ingot with pouring rate [J]. Steel Research International, 2024, 95: 2300672.
- [19] 姜巨福, 孔令波, 黄敏杰, 等. 6082铝合金汽车法兰挤压铸造数值模拟及试验验证 [J]. 铸造, 2024, 73 ( 3 ): 313-320.
- [20] ZHAO L, LIU Z Q, ZHANG Y Q, et al. Effect of pouring and preheating temperature on shrinkage cavity and porosity defects of nickel-based cast superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2025, 56: 1316-1333.