

面向重力铸造的 EasyCAST 软件开发与验证

李志豪¹ 潘 玥^{1,2} 侯 华^{1,2} 赵宇宏^{1,3,4}

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 教育部共建铝镁合金材料研发应用协同创新中心, 新材料智能铸造先进成型山西省重点实验室, 太原 030051; 2. 太原科技大学材料科学与工程学院, 太原 030024; 3. 北京科技大学北京材料基因工程高精尖创新中心, 北京 100083; 4. 辽宁材料实验室智能技术研究所, 沈阳 110004)

摘要 围绕铝合金重力铸造充型过程, 基于自主开发的 EasyCAST 铸造工艺优化平台, 开展了三维瞬态流动-传热耦合数值模拟研究。采用 VOF 多相流模型追踪金属液-空气界面变化, 结合标准 $k-\epsilon$ 湍流模型描述高速充型过程中的湍流效应, 并通过共轭传热模型实现铸件-模具-砂型之间的耦合热交换, 利用经典基准块充型试验对数学模型进行了验证。结果表明, 模拟能准确再现金属液前沿形态, 与 X 射线试验观测结果一致。以 ZL101 铝合金 Y 形铸件为对象, 开展网格无关性验证, 确认了模拟结果稳定性。并通过与 JSCAST、ProCAST 软件进行对比, 系统分析了充型熔体流动形态、温度分布及飞溅行为的一致性。模拟结果表明, EasyCAST 软件能有效捕捉高速射流冲击、壁面附着及气液界面演变等关键物理现象, 温度场预测也与其他商业软件结果高度一致。

关键词 重力铸造; 数值模拟; EasyCAST; 多相流

中图分类号 TG21; TP311; O242; TG249.3

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250468

Development and Validation of EasyCAST Software for Gravity Casting

LI Zhihao¹, PAN Yue^{1,2}, HOU Hua^{1,2}, ZHAO Yuhong^{1,3,4}

(1. School of Materials Science and Engineering, MOE jointly Collaborative Innovation Center for High-performance Al/Mg Based Materials, Shanxi Key Laboratory of Intelligent Casting and Advanced Forming for New Materials, North University of China, Taiyuan 030051; 2. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Materials Genome Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 4. Institute of Materials Intelligent Technology, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110004)

Abstract: Regarding the filling process of aluminum alloy gravity casting, a three-dimensional transient flow-heat transfer coupled numerical simulations was carried out based on self-developed EasyCAST casting process optimization platform. VOF multiphase flow model was employed to trace variations in molten metal-air interface, and standard $k-\epsilon$ turbulence model was utilized to describe turbulent effects during high-speed filling. Coupled heat transfer between casting, die, and sand mold was achieved through a conjugate heat transfer model. The mathematical model was validated by classical benchmark block filling experiments. The results indicate that molten metal front morphology is accurately reproduced, which is consistent with X-ray experimental results. Further mesh independence verification was conducted on Y-shaped casting of ZL101 aluminum alloy, confirming the stability of simulation results. Systematic comparisons with commercial software JSCAST and ProCAST demonstrate consistency in melt flow patterns, temperature distributions, and spatter behavior during filling. Simulation results reveal that EasyCAST software effectively captures key physical phenomena such as high-speed jet impact, wall adhesion, and gas-liquid interface evolution. Temperature field predictions also exhibit high consistency with those from other commercial software.

Key Words: Gravity Casting, Numerical Simulation, EasyCAST, Multiphase Flow

重力铸造因其设备简单、成本较低、适于生产复杂结构件等特点, 在汽车发动机缸体、航空航天结构件、

高端装备壳体等关键领域广泛应用^[1-2]。然而, 其充型过程是一个涉及自由表面流动、湍流、瞬态传热、凝固

收稿日期: 2025-12-19; 修订日期: 2026-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U23A20628; U25A20286); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目(202301050201004)

第一作者: 李志豪, 男, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2414757446@qq.com

引用格式: 李志豪, 潘玥, 侯华, 等. 面向重力铸造的 EasyCAST 软件开发与验证[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 686-693.

LI Z H, PAN Y, HOU H, et al. Development and validation of EasyCAST software for gravity casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 686-693.

相变以及气-液-固多相相互作用的复杂物理过程。此过程中的流动不稳定、卷气、氧化夹杂及不均匀冷却等现象是铸件产生气孔、缩松、冷隔等缺陷的主要原因,直接影响产品的力学性能与服役可靠性^[3-4]。值得注意的是,铸件的力学性能不仅受宏观缺陷影响,也与其微观组织特征密切相关。因此,深入理解并精确预测从宏观充型到微观组织的全过程,是优化工艺、提升铸件综合性能的核心。随着计算流体动力学(CFD)、数值传热学、相场法、第一性原理计算以及机器学习等数值与数据驱动方法的飞速发展,多尺度模拟与智能设计已成为研究铸造过程、揭示物理机理、预测组织与性能的强大工具^[5-6]。宏观尺度上,体积分数法(Volume of fluid, VOF)和水平集法能有效追踪自由界面^[7-8]。标准 $k-\epsilon$ 模型广泛用于湍流模拟^[9],共轭传热(Conjugate heat transfer, CHT)模型则用于精确描述复杂热交换^[10]。在微观尺度,相场法作为连接原子与宏观尺度的关键手段,能够统一描述热力学与动力学并耦合多元物理场,可有效模拟枝晶生长至固态相变等组织演变^[11-12]。相关工作涵盖其统一建模思想的澄清与前沿应用综述^[13],以及在揭示超轻镁合金强化机制^[14]与 BCC 结构 Mg-Li-Al 合金相变序列^[15]等方面的具体应用。此外,面向性能的机器学习为材料设计与工艺优化提供了新途径^[16]。这些工具能够在无物理试错的条件下,显著缩短研发周期、降低生产成本。在国际上,很多成熟的商用铸造模拟软件已形成完善体系并成功应用^[17-18]。然而,依赖国外商业软件存在技术壁垒高、定制化开发难等问题。国内的 EasyCAST、华铸 CAE 等在理论模型改进、并行计算加速等方面也取得了显著进展^[19-20]。开发具有自主知识产权且经过严格验证的高精度铸造模拟软件,对于保障我国高端铸造工艺自主可控、实现智能制造具有重要意义。

自 20 世纪 90 年代起即自主开发集成化实用化 EasyCAST 铸造工艺优化系统^[21-24],在核心算法、工程验证及软件实现方面做了大量工作^[25-31]。近年来,研究进一步向智能化系统与深度多物理场耦合方向拓展,在集成机器学习优化工艺、耦合宏微观模拟等方面取得了一系列进展^[32-34]。同时,相场法微观组织模拟模块也与宏观模块相耦合,取得了应用性进展^[35-37]。尽管已取得较多结果,但在针对高速重力铸造初期瞬态过程的模拟中,如何平衡模型精度与计算效率,如何准确模拟金属液冲击飞溅、卷气与动态铺展的耦合行为,以及如何有效验证自主开发软件与成熟商业软件及试验数据的一致性,仍是当前面临的实际挑战与重要研究方向。

为此,本研究基于自主开发的 EasyCAST 求解器,构建了一个集 VOF 多相流模型、标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及

共轭传热模型于一体的三维瞬态耦合数值模型。首先,通过公认的铝合金基准试验,验证模型在模拟充型自由表面演变和气团行为方面的准确性。进而,以典型 ZL101 铝合金 Y 形铸件为对象,开展网格无关性研究以确保计算结果的可靠性。最后,将 EasyCAST 在高速充型初期的流场与温度场模拟结果,与广泛使用的商用软件 JSCAST、ProCAST 进行定量对比与定性分析。本研究旨在全面评估自主软件在模拟复杂重力铸造过程方面的能力,验证其核心物理模型的可靠性,并为将其应用于实际工程问题的工艺优化与缺陷预测提供参考。

1 数值模拟基本模型

1.1 两相流控制方程(Eulerian 模型)

(1) 体积分数方程。将多相流描述为相互渗透的连续介质,引入了相体积分数的概念,用 α_q 表示。体积分数代表每相占据的空间,并且每相分别满足质量和动量守恒定律。

相 q 的体积 V_q 定义为

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (1)$$

其中

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

式中, V 为计算域的总体积; V_q 为相 q 在计算域中所占据的体积; α_q 为 q 相的体积分数,定义为该相在局部控制体积内所占的比例,取值范围为 $[0, 1]$ 。

(2) 连续性方程(每相)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p \neq q} (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (3)$$

式中, t 为时间; ρ_q 、 $\vec{v}_q$ 和 S_q 分别为相 q 的密度、速度矢量和质量源项(如由于化学反应或添加物质产生的质量); $\dot{m}_{pq}$ (或者 $\dot{m}_{qp}$) 为描述从第 $p(q)$ 相到第 $q(p)$ 相的质量传递; ∇ 为拉普拉斯算子。

(3) 动量方程(每相)

$$\frac{\partial}{\partial t}[\alpha_q \rho_q \vec{v}_q] + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_q \tau_q) + \alpha_q \rho_q \vec{g} + M_q \quad (4)$$

式中, τ_q 为第 q 相的应力-应变张量。

$$\tau_q = \mu_{\text{eff},q} \left[\nabla \vec{v}_q + (\nabla \vec{v}_q)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}_q) I \right] \quad (5)$$

M_q 为相间动量交换项:

$$M_q = M_{\text{lift},q} + M_{\text{drag},q} + M_{\text{vm},q} \quad (6)$$

式中, ∇p 为压力梯度; $\vec{g}$ 为重力加速度矢量; $\mu_{\text{eff},q}$ 为相 q 的湍流黏度; $M_{\text{lift},q}$ 为升力, 由相间速度梯度产生。 $M_{\text{drag},q}$ 为曳力 [$M_{\text{drag},q} = K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q)$], 相间阻力的主要部分。 $M_{\text{vm},q}$ 为虚拟质量力 (SchillerNaumann 模型), 当一相相对于另一相加速时产生; K_{pq} 为界面动量交换系数。

(4) 能量方程 (每相)

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q h_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = \nabla \cdot (\alpha_q k_{\text{eff},q} \nabla T_q) + Q_{pq} + S_{h,q} \quad (7)$$

式中, h_q , $k_{\text{eff},q}$ 和 T_q 分别为相 q 的比焓、有效导热系数和温度; Q_{pq} 为两相之间的热交换强度; $S_{h,q}$ 为相 q 的能量源项 (如由于化学反应放热/吸热等)。

1.2 固体区域方程

固体区域仅求解热传导方程:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + S_{h,s} \quad (8)$$

式中, ρ_s , $c_{p,s}$, T_s , k_s 和 $S_{h,s}$ 分别为固体相的密度、比热容、温度、导热系数和固体内部热源。

1.3 多区域耦合机制

流体-固体交界面满足温度连续性与热通量守恒。

温度连续性方程:

$$T_f = T_s \quad (9)$$

式中, T_f 和 T_s 分别为流体和固体的温度。

热通量守恒方程:

$$\kappa_f \frac{dT_f}{dn} = -\kappa_s \frac{dT_s}{dn} \quad (10)$$

式中, n 为垂直于边界的方向; κ_f 和 κ_s 分别为流体和固体的导热系数, 通过 turbulentTemperatureCoupled-BaffleMixed 边界条件实现。

对于流体和固体间的耦合, 用前一次迭代所得的固体温度定义流体的温度边界条件, 求解流体方程, 此后应用上一次迭代所得的流体温度定义固体的温度边界条件, 并求解固体方程, 迭代一直执行到最终收敛。

1.4 湍流模型 (RANS)

在使用 EasyCAST 求解器模拟铝合金熔液砂型重力铸造过程中, 选用标准 k - ϵ 湍流模型主要基于其在高雷诺数、工业尺度复杂流动中的鲁棒性、计算效率与广泛验证性: 该模型能够有效捕捉浇注阶段熔融铝合金在砂型型腔内高速流动产生的强湍流特性 (高雷诺数), 其涡黏性假设在充分发展湍流区具有合理精度; 相较于更复杂的模型 (如 LES 或 k - ω), k - ϵ 模型计算成本显著降低, 这对于耦合多区域 (液态金属-凝固层-固

态铸件-砂型) 传热、相变及多相相互作用的大规模瞬态模拟具有关键实用性优势, 并已在众多工业铸造湍流模拟案例中展现出可靠的工程预测能力。

标准 k - ϵ 两方程模型的控制方程为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{c_2 \rho \epsilon^2}{k} \quad (12)$$

式中, ρ , t , k 和 ϵ 分别为流体的密度、时间、湍流脉动动能和湍流耗散率; $\bar{u}_i$ 为流体平均速度矢量在 i 方向的分量; x_i 为空间坐标; μ_t 为湍流黏度, 由湍流模型计算得到; σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数; σ_ϵ 为 ϵ 方程的湍流普朗特数; c_1 , c_2 为模型经验常数。

$$\epsilon = C_D k^{\frac{3}{2}} / l \quad (13)$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (14)$$

式中, l 为湍流长度尺度, 表征大涡的典型尺寸; C_D 通常是一个接近于 1 的常数; c_μ 为经验常数。各个参数取值, $c_1 = 1.44$, $c_2 = 1.92$, $c_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

2 数值模拟结果

2.1 自由表面模型试验验证

2.1.1 模型参数设置

此铝合金基准件试验是由 Campbell 等设计, 铸件本体为一平板, 其几何尺寸为 200 mm × 100 mm × 10 mm。铸造工艺采用底注式不封闭浇注系统, 铸型材料为树脂砂, 铸件及浇注系统的几何形状及尺寸见图 1。试验过程中, 采用 X 射线成像技术记录金属液自由表面形貌随时间的变化。试验观测数据来源于文献 [38] 中提供的铝合金充型过程 X 射线影像序列。浇注合金采用质量分数为 99.999% 的纯铝, 计算过程中所需设置的参数见表 1。通过与高精度 X 射线影像对比来确认准确性, 此方式比软件间对比更直接、可靠。考虑到充型过程持续时间短, 即使充型过程中发生了糊状区转变, 温度变化对热物性参数影响不大。因此, 为了保证计算效率, 模拟计算尽量采用恒定物性参数。

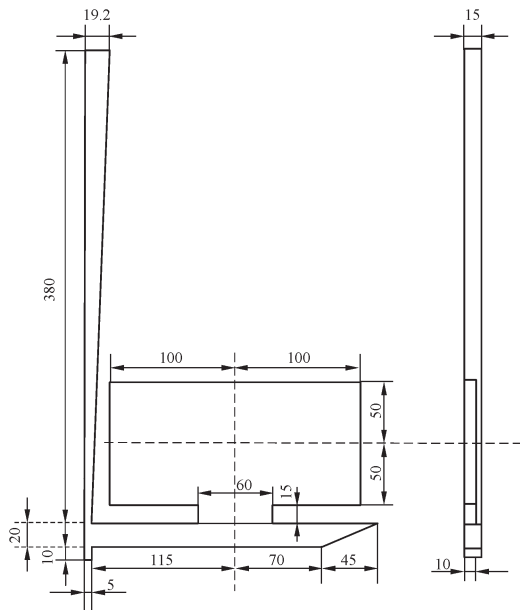


图1 铸件及浇注系统的几何形状及尺寸

Fig.1 Geometric shapes and dimensions of castings and gating systems

表1 计算过程中所需设置的参数

Tab.1 Parameters setting during calculation process

铝液密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	铝液黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	空气黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	空气-铝液表面张力系数/($\text{N}\cdot\text{m}$)	重力加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	进口速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	浇注温度/ $^{\circ}\text{C}$
2 385	1	3.1×10^{-3}	1×10^{-5}	0.871	{0,0, -9.8}	{0,0, -0.31}	720

2.1.2 气-液两相充型形态的模型验证

数值模拟采用非结构化六面体网格对整个计算域进行离散,网格总数为147 576,并对内浇道、型腔拐角等流动梯度较大区域进行了局部加密,最小网格尺寸为1.5 mm,最大网格尺寸为3.7 mm。图2为充型过程中多个时刻金属液形态的试验观测与数值模拟结果对比。可以看出,在充型至1.55 s时(见图2a和图2b),铝液已抵达内浇道,其右端前沿界面显著隆起,同时在横浇道左端形成较大规模的封闭气团,试验与模拟结果吻合良好。在绕至1.75 s时(见图2c和图2d),铝液已在平板底端面基本铺展,并于中部偏右区域形成明显波峰。此时,模拟结果显示横浇道左端仍存在较大封闭气团,而试验中该处气体残留较少。该差异可能源于模拟未考虑气体向砂型内部的渗透作用,且实际砂型表面粗糙度有助于气体沿型壁逸出。随着充型进行至2.45 s(见图2e和图2f)与3.20 s(见图2g和图2h),铝液的充填高度在试验与模拟中趋于一致。整体而言,两者在充型全过程的表现具有较好的一致性,从而验证了所采用物理模型与数值方法在模拟气-液两相充型过程中的准确性与可靠性。

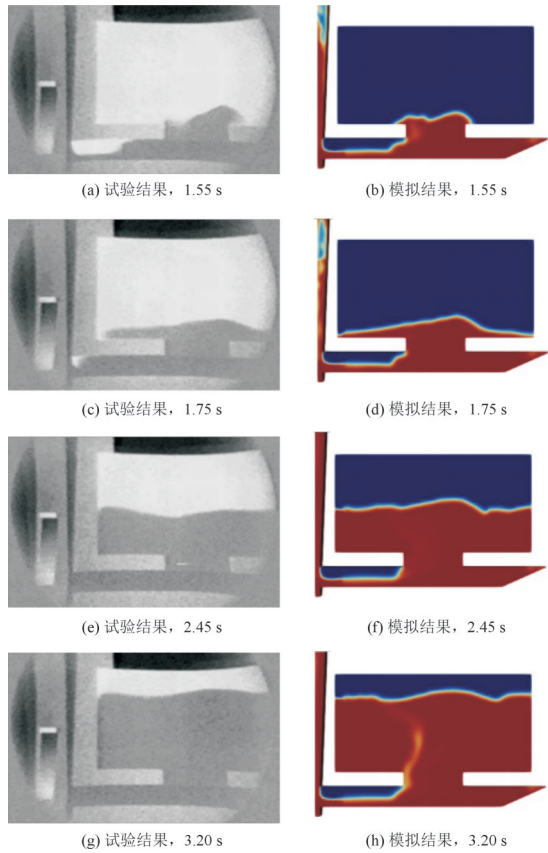


图2 不同时刻的铝合金基准件充型过程试验和模拟结果对比

Fig.2 Experimental and simulation results of filling process for aluminum alloy reference parts at different moments

2.2 速度场与温度场的数值模拟对比分析

2.2.1 模型参数设置与网格无关性验证

在基于经典基准试验验证了EasyCAST核心模型准确性的基础上,进一步以Y形铸件为对象,开展网格无关性研究,并将EasyCAST的模拟结果与成熟商业软件JSCAST、ProCAST进行横向对比,以评估其在复杂几何条件下的工程适用性及结果的一致性。研究对象为ZL101铝合金,其具有优良的铸造流动性、气密性和中等的力学性能,广泛应用于薄壁和复杂结构件。图3为Y形块示意图,铸件的尺寸为180 mm×46 mm×114 mm,ZL101铝合金的化学成分见表2。

模拟的准确性高度依赖于材料物理参数的精确性。本研究中,ZL101铝合金和H13钢材料的主要热物

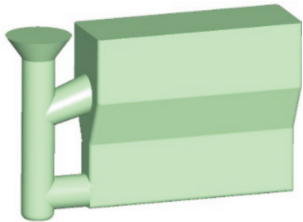


图3 Y形块示意图

Fig.3 Schematic diagram of Y-block

表 2 ZL101 铝合金化学成分
Tab.2 Chemical composition of ZL101 aluminum alloy %

w_B					
Si	Mg	Fe	Zn	Mn	Al
6.5~7.5	0.25~0.45	≤0.20	≤0.10	≤0.10	余量

理参数设置见表 3 和表 4。铸件充型初始温度为 973 K, 室内空气温度和周围环境温度均设置为 300 K, 模具预热温度为 473 K。

表 3 ZL101 铝合金的热物理性能

Tab.3 Thermophysical properties of ZL101 aluminum alloy					
密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	液相线温 度 $T_f/^\circ\text{C}$	固相线温 度 $T_s/^\circ\text{C}$	潜热 $L_f/$ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)	比热容 $c_p/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率 $\kappa/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
2 483.0	568	517	4.89×105	1 185.0	71.2

表 4 模具材料 H13 的热物理性能

Tab.4 Thermophysical properties of H13 die		
密度 $\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $c_{p,s}/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热导率 $k_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
7 800.0	544.0	27.2

为确保数值计算结果与网格尺度无关并优化计算资源配置,对基准模型进行了网格无关性验证。通过构建 4 种不同尺寸的计算网格,系统评估了不同尺寸网格对结果的影响,具体网格参数见表 5。

表 5 用于无关性验证的网格参数

Tab.5 Grid parameters for irrelevance validation		
序号	网格尺寸/mm	网格数
1	1.4	261 091
2	1.6	219 548
3	1.8	153 779
4	2.0	129 083

在相同的物理模型和边界条件下,对 3 种不同尺寸网格进行了填充过程的模拟。选择填充时间和浇口系统内部充型 0.4 s 处的速度大小作为比较的关键指标。在进行数值模拟时,网格尺寸的选择对计算结果具有重要影响。网格越细通常精度越高,但计算成本也随之增加,而网格过粗则可能导致关键物理场描述不准确。因此,进行网格无关性验证的目的在于确认计算结果不依赖于网格尺寸,从而找到既能保证计算精度又具备较高计算效率的网格划分方案。无论是小铸件还是大型复杂铸件,都需要通过这一验证来确保模拟结果的稳定性和可靠性。表 6 为网格无关性验证结果。可以看出,随着网格尺寸增加,充型速度略有增加,但充型时间的变化相对较小。充型时间的偏差在 0.6%~1.2% 之间,而充型速度的偏差在 2.7%~8.1% 之间。这些结果表明,网格尺寸的变化对数值结果的影响在可接受范围内,从而验证了计算结果的网格无关性。因此,可以认为本研究中使用的中等网格(网格尺寸为 1.6 mm)在保证计算精度的同时,能够有效地优化计算资源的使用。

表 6 网格无关性验证结果

Tab.6 Grid-independent verification results				
序号	充型时间/s	偏差/%	充型速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	偏差/%
1	5.45	—	1.10	—
2	5.40	0.9	1.18	7.3
3	5.48	0.6	1.13	2.7
4	5.38	1.2	1.19	8.1

2.2.2 边界条件与数值求解方法

为准确模拟重力铸造过程中熔体的自然流动与传热行为,在 EasyCAST 模拟中设置了以下边界条件。在浇注系统入口,采用表面法向固定速度(surfaceNormalFixedValue)条件,设定入口速度为 0.077 m/s,方向沿入口表面法向。该边界直接给定入口流速,真实反映重力充型过程中浇口处金属液的注入状态,并允许入口压力在求解过程中自由发展,适用于流速已知、压力未知的入口场景。在排气口位置,压力场设置为零梯度(zeroGradient)条件,允许出口处压力与相邻内部单元保持一致,自然满足局部压力平衡,同时配合总压(Total Pressure)出口条件,在考虑动压影响下实现质量守恒,避免因回流导致计算不稳定,适用于重力铸造中顶部排气与溢流的模拟需求。为耦合速度与压力场,压力方程中使用固定通量压力(Fixed Flux Pressure)格式,该格式基于速度边界自动修正压力方程,确保在给定速度入口条件下压力场求解的协调性与稳定性。在铸件与模具的所有壁面处,均施加无滑移(No-slip)边界条件,并配合相应的壁面函数处理近壁湍流效应。该条件确保流体在壁面处的相对速度为 0,准确描述黏性流体与固体壁面间的相互作用,符合重力铸造过程中金属液与模具接触的物理实际。

为保障重力铸造模拟的精度与计算稳定性,本研究基于物理场特性选用了针对性的数值离散化方案,具体设置见表 7。时间导数采用一阶隐式欧拉格式进行离散,该方案具有一阶精度、有界性和完全隐式性。该方法在应用于非正交网格和耦合湍流模型时表现出强稳定性。梯度项(Grad Schemes)采用默认的点单元最小二乘法,确保在复杂几何结构中实现高精度梯度重建。散度项(div Schemes)则针对不同物理场采用专用离散方案:对流动量项 $\text{div}(\rho\phi, U)$ 采用 vanLeerV 方案,在强梯度流场中有效平衡稳定性与分辨率。对于相分数 α ,采用 vanLeer 方案 $[\text{div}(\phi, \alpha)]$ 与二阶线性方案 $[\text{div}(\phi_{\text{irb}}, \alpha)]$ 的组合。湍动能(k)及其耗散率(ϵ)均采用一阶迎风方案离散,优先保障对流主导区域的稳定性。动量方程中的湍流耗散项采用二阶高斯线性方案处理,以精确解析应力分布。拉普拉斯项与默认插值方案同样采用二阶线性离散化。拉普拉

斯方案结合未修正的法向梯度处理,在具有中等非正交性的网格上实现了计算效率与精度的平衡。

表 7 VOF 模型中应用的离散化方案

Tab.7 Discretization scheme applied in VOF model

设置类别	变量	数值格式
时间项	默认	欧拉格式
梯度项	默认	最小二乘法
	动量项	范里尔 V 格式
	相分数通量	范里尔格式
对流项	压力项	线性格式
	湍流动能通量	迎风格式
	湍流耗散率通量	迎风格式
拉普拉斯项	默认	线性无修正格式
插值格式	默认	线性插值

2.2.3 流场速度分布特征对比与机理分析

图 4 为在填充初期熔体的流动形态与温度分布。可以看出,3 种软件模拟的流场速度演化趋势总体一致,均准确反映了高速充填的基本物理过程。在流道阶段,模拟结果均显示熔体速度自入口向出口逐渐增加(见图 4a、图 4d、图 4g),符合流体在恒定截面流道中

加速流动的规律。在充填型腔的关键阶段,模拟结果共同捕捉到熔体在型腔左侧壁面处的“溅射”现象及伴随的高速区。然而,在速度分布的细节上存在可察差异:JSCAST 与 ProCAST 的结果显示,该区域速度梯度较大,存在明显的高速集中现象(图 4b、图 4c 及图 4e、图 4f),其中 ProCAST 模拟的速度集中效应更为显著。EasyCAST 的模拟则显示该区域速度分布相对均匀(图 4h、图 4i)。这些差异可能源于各软件对流体动力方程离散格式、自由表面处理模型或湍流模型的不同算法与参数设置。ProCAST 可能采用了更为激进的格式或模型,从而强化了局部流动的惯性效应,而 EasyCAST 的处理方式可能使速度场在空间上更为平滑。尽管如此,三者均成功预测了冲击区域的高速度本质,这对评估熔体对型腔的冲击作用及预测卷气至关重要。型腔填充中后期,各模拟结果均显示速度分布趋于整体均匀,但在角落、边缘等几何突变处仍存在残留速度梯度,这与流动分离和摩擦阻力效应相符。

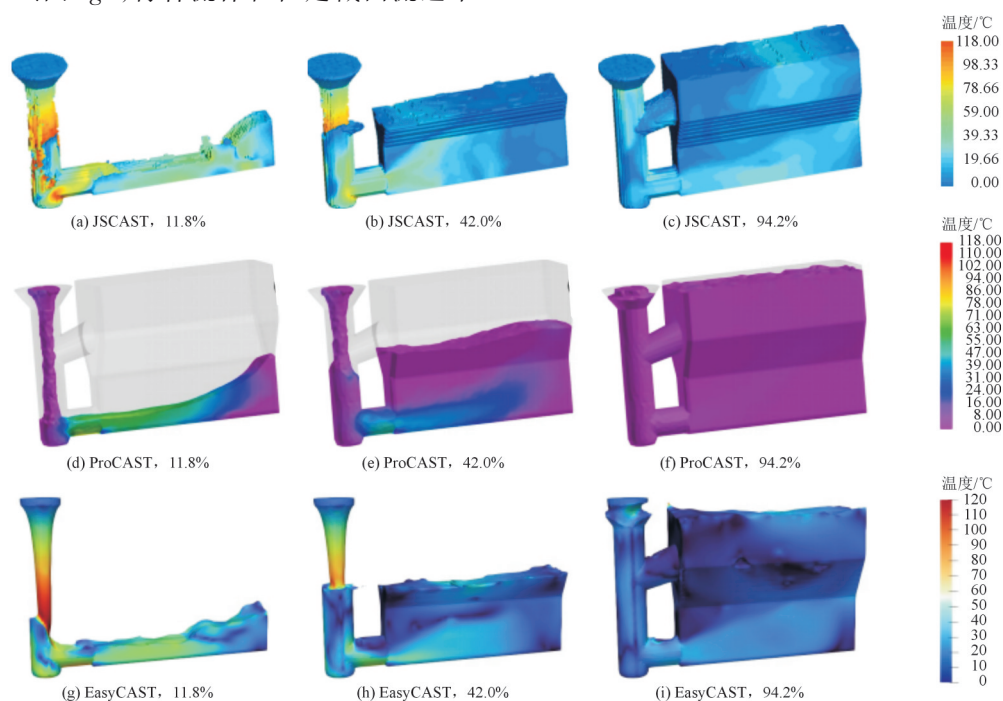


图 4 不同充型时刻的 Y 型件充型过程及速度结果

Fig.4 Filling process and velocity results for Y-type components at different filling moments

2.2.4 温度场分布特征与热流耦合效应

图 5 为在填充初期熔体的流动形态与温度分布。可以看出,熔体在流道中温度分布均匀(见图 5a、图 5d 和图 5g),进入型腔后,与低温模具接触的熔体前沿发生急剧冷却,温度迅速下降(见图 5b、图 5c、图 5e、图 5f、图 5h 和图 5i)。模拟清晰地显示,高温区始终局限于后续流入的熔体主流区,而模具整体温升有限,仅近表面

区域存在温度梯度。将温度场与速度场结合分析,可清晰看到热-流耦合效应:高速流动的熔体将热量快速运输至型腔远端,但同时因其与模具接触面积大、传热剧烈,该区域也最先降温并可能启动凝固。这种高速填充伴随前沿快速冷却的模式,是高速铸造易产生冷隔等缺陷的根本原因。3 种软件均能再现这一关键物理机制,验证了其耦合计算模型的可靠性。

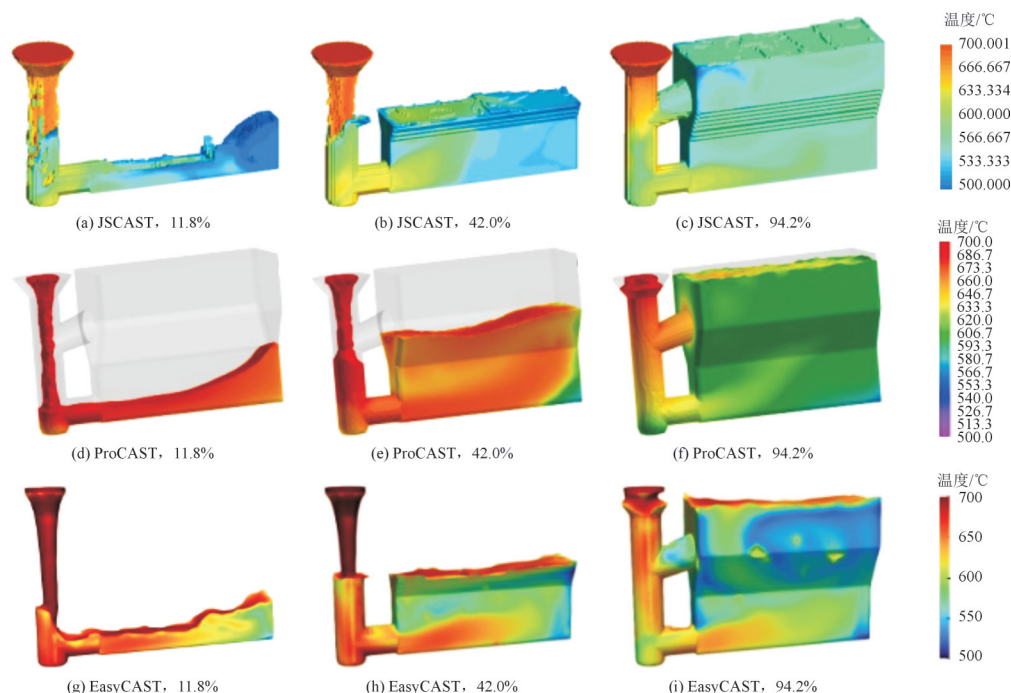


图5 不同充型时刻的Y型件充型过程及温度结果

Fig.5 Filling process and temperature results for Y-shaped components at different filling moments

3 讨论

3.1 充型流动速度场比较分析

与JSCAST、ProCAST等商业软件的对比从工程实用角度验证了EasyCAST的可靠性。三者在充型过程的核心物理现象预测上表现出显著一致性。三者均准确捕捉到流道内加速流动、型腔入口处射流冲击与飞溅以及熔体前沿剧烈冷却。这种跨软件的一致性是基于共同遵循的质量、动量和能量守恒定律,侧面印证了数值模拟作为揭示铸造过程物理本质工具的有效性。在流场速度分布的局部细节上,尤其是在冲击区域的速度梯度与集中程度方面,三者呈现出可察差异。这种差异更多反映了各软件底层数值核心的特点,包括但不限于:对流项离散格式差异(如一阶迎风、二阶格式或高阶格式)对数值耗散的影响;自由表面重构算法的不同对界面附近动量传递的刻画;湍流模型实现细节或近壁处理方式的细微差别等。ProCAST表现出更尖锐的速度集中,可能源于其算法对惯性效应的强化,而EasyCAST相对平滑的速度场,可能意味着其采用了更具数值稳定性的格式,这在保证计算鲁棒性方面是一个优势。

3.2 热-流耦合温度场比较分析

温度场模拟结果在3款软件间的高度一致,是本研究另一个重要发现,其共同揭示了一个对重力铸造质量至关重要的热-流耦合机制。高速充填的金属液在

将热量快速输送到型腔远端的同时,其前沿与冷模接触的界面发生极其剧烈的热交换,导致该区域温度骤降。流场与温度场的叠加分析清晰指出,型腔左侧壁的冲击区域是工艺风险的焦点,此处同时承受着高能冲击和高热流失的双重挑战。通过优化浇注系统(如改变内浇道形状、位置或增设缓冲结构)来平稳引导金属液,降低冲击速度,或通过调整模具预热温度、采用局部保温或激冷措施来调制该区域的冷却速率,从而在保证充型完整性的同时,减少缺陷产生。

4 结论

(1)基于自主研发的EasyCAST铸造工艺优化平台,建立了适用于铝合金重力铸造过程的三维瞬态流动-传热耦合数值模型。该模型集成VOF多相流界面追踪、标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及共轭传热耦合方法,能够准确模拟金属液充型过程中的自由表面演变、湍流效应及铸件-模具之间的复杂热交换行为。通过经典铝合金基准块充型试验的验证,模拟结果与X射线观测数据吻合良好,证明了所采用物理模型与数值方法的准确性。

(2)针对ZL101铝合金Y形铸件开展了网格无关性验证,确认了数值结果的稳定性。进一步与商用软件JSCAST、ProCAST的对比分析表明,EasyCAST在充型流场形态、温度分布及飞溅行为等关键物理场的预测上与其他软件具有高度一致性,尤其在高速射流冲击、壁面附着及气液界面演变等现象的捕捉方面表

现出良好的工程适用性。软件在局部流场细节上的差异主要源于数值格式与界面处理算法的不同,不影响其对铸造缺陷形成机制的总体判断。需要注意的是,软件间的一致性数值可靠性的必要非充分条件,其工程应用的绝对准确性仍需未来结合具体铸件的浇注试验进行标定。

参 考 文 献

- [1] 亓昌, 杨孟欣, 于晨, 等. 金属空心球复合材料重力铸造工艺研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(5): 420-428.
- [2] 宋永雷. 铝合金大型薄壁平板件反重力铸造技术要点探讨[J]. 世界有色金属, 2024(15): 28-30.
- [3] 符继麟, 苏小平, 陈川川. 汽车铝合金制动器安装底板重力铸造工艺优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48(21): 72-75.
- [4] GUO Z J, LIU D R, FENG Y C, et al. Numerical simulation and analysis of flow-choking mechanism for misrun defects of thin-walled Al-7Si-0.5Mg alloy in gravity sand casting[J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19(6): 3 469-3 489.
- [5] LI H Q, ZHAO Y H, SONG Z, et al. Serrated grain boundary modulation inhibits nano cracks propagation in pure magnesium: A phase field crystal and quasi in-situ EBSD study[J]. Acta Materialia, 2025, 301: 121 573.
- [6] CHENG P, ZHAO Y H, LU R P, et al. Effect of Ti addition on the microstructure and mechanical properties of cast Mg-Gd-Y-Zn alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A708: 482-491.
- [7] XIA H T, LI Q L, CHEN S, et al. Modeling of multiphase flow, bubble, and slag entrapment in slab continuous casting[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(5): 53 325.
- [8] 黄伟明, 唐玉龙, 宁林祥, 等. MAC方法及其在铸造充型模拟中的应用[J]. 铸造技术, 2020, 41(10): 930-934.
- [9] 徐超, 韩雨哲. 压气机叶轮低压铸造数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(1): 122-126.
- [10] 陈钦隆, 朱殿璞, 吕伟领. 基于热流固耦合的无油螺杆压缩机流场数值模拟方法[J]. 粘接, 2025, 52(7): 133-135.
- [11] CHEN L Q, ZHAO Y H. From classical thermodynamics to phase-field method [J]. Progress in Materials Science, 2022, 124: 100 868.
- [12] ZHAO Y H. Integrated unified phase-field modeling (UPFM)[J]. Materials Genome Engineering Advances, 2024, 2(2): e44.
- [13] ZHAO Y H, XING H, ZHANG L J, et al. Development of phase-field modeling in materials science in China: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica- English Letters, 2023, 36(11): 1 749-1 775.
- [14] XIN T Z, ZHAO Y H, MAHJOUR R, et al. Ultrahigh specific strength in a magnesium alloy strengthened by spinodal decomposition[J]. Science Advances, 2021, 7(23): 3 039.
- [15] XIN T Z, TANG S, JI F, et al. Phase transformations in an ultra-light BCC Mg alloy during anisothermal ageing[J]. Acta Materialia, 2022, 239: 118 248.
- [16] PEI X L, PEI J Q, HOU H, et al. Optimizing casting process using a combination of small data machine learning and phase-field simulations[J]. npj Computational Materials, 2025, 11(1): 27.
- [17] KHAN M A A, SHEIKH A K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, B230(10): 1 799-1 817.
- [18] 高黎明, 陈琦, 万斌, 等. 钛合金铸造的研究进展与挑战[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 377-390.
- [19] 宋迎晨, 计效园, 沈旭, 等. 基于华铸CAE的铸造充型过程卷气缺陷定量预测研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(3): 86-95.
- [20] 王忠. 镁合金低压铸造缩孔缩松预测技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [21] 靳玉春, 赵宇宏, 侯华. 材料成型过程数值模拟[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2004.
- [22] 侯华, 赵宇宏, 徐宏, 等. 铸造工艺图及工艺卡片计算机辅助设计[J]. 华北工学院学报, 1999(4): 305-309.
- [23] 赵宇宏, 程军, 徐宏, 等. 铸钢件凝固过程热应力场数值模拟研究[J]. 华北工学院学报, 1998(4): 26-28.
- [24] 侯华, 靳玉春, 赵宇宏等. 液态成型工艺及CAD[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [25] 王忠, 赵宇宏, 牛晓峰, 等. 基于ADI分数步长法的铸件温度场数值模拟[J]. 铸造, 2010, 59(5): 491-494.
- [26] 牛晓峰, 梁伟, 赵宇宏, 等. VTK显示技术在铸造模拟软件中的应用[J]. 铸造技术, 2010, 31(9): 1 241-1 244.
- [27] HOU H, ZHAO Y H, ZHAO Y H. Prediction method of shrinkage cavity and shrinkage porosity in solidification process under low-pressure casting[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2012, 9(9): 1 447-1 452.
- [28] 杨伟明, 赵宇宏, 侯华, 等. 一种新的基于FDM/FEM挤压铸造温度场计算模型[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(1): 25-28.
- [29] 赵宇宏, 牛晓峰, 侯华. 基于FDM/FEM的镁合金挤压铸造温度场数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(5): 1-4.
- [30] 李静怡, 赵宇宏, 陈利文, 等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 588-592.
- [31] 佟乐乐, 郝大庆, 侯华, 等. 一种轮毂件充型凝固过程及组织缺陷预测研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(1): 59-62.
- [32] DUAN Z Q, CHEN W P, PEI X L, et al. A multimodal data-driven design of low pressure die casting gating system for aluminum alloy cabin [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 2 723-2 736.
- [33] ZHANG X L, HOU H, PEI X L, et al. Designing the counter pressure casting gating system for a large thin-walled cabin by machine learning[J]. China Foundry, 2025, 22(4): 395-406.
- [34] PEI X L, HOU H, CHEN L W, et al. Deep learning retrieval of 3D casting models combined with professional knowledge for process reuse[J]. China Foundry, 2025.
- [35] ZHAO Y H. Understanding and design of metallic alloys guided by phase-field simulations[J]. NPJ Computational Materials, 2023, 9(1): 94.
- [36] 赵宇宏. 凝固时效组织相场法研究: 合金从材料到铸件相场模拟及EPhase软件设计[M]. 北京: 科学出版社, 2025.
- [37] ZHAO Y H, XIN T Z, TANG S, et al. Applications of unified phase-field methods to designing microstructures and mechanical properties of alloys[J]. MRS Bulletin, 2024, 49(6): 613-625.
- [38] SIRRELL B, HOLLIDAY M, CAMPBELL J. The benchmark test [C]//7th Conference on Modeling of Casting Welding and Solidification. UK: London, 1995.

(编辑: 张正贺)