● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5197

大尺寸变截面 ZTA15 钛合金铸件铸造工艺模拟仿真研究

张林嘉[1,2],周 瑜[3],罗 婷[1],李金山[1,3]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室,陕西 西安 710072;2. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室,贵州 贵阳 550081;3. 西北工业大学重庆科创中心,重庆 401135)

摘 要:大尺寸薄壁变截面 ZTA15 钛合金铸件在航空发动机异形、变截面喷管部件中具有广泛应用前景,但其铸造过程易受壁厚参数影响,导致充型不匀、温度分布失衡及凝固缺陷等问题。基于此,采用 ProCAST 软件对不同壁厚条件下 ZTA15 钛合金铸件的浇注充型过程、温度场、速度场及凝固过程进行数值模拟仿真研究。结果表明,2.0 mm 薄壁铸件充型速度过快,易形成涡流和气孔;8.0 mm 厚壁铸件凝固时间延长,增加缩孔风险;3.5 mm 壁厚下铸件的温度场分布均匀,凝固序列合理,温降首先从米字型横浇道和第一层加强筋开始,后期大平面薄壁表面冷却加速。所有壁厚铸件内部均存在缩松缩孔,主要集中于中心浇道与米字型横浇道的连接处及加强筋椭圆短轴壁厚区域,这些缺陷源于局部冷却速率差异,导致热应力集中。大平面薄壁表面不存在明显孤立液相区,表明优化浇注速度和时间可有效抑制缺陷。

关键词:ZTA15 钛合金;精密熔模铸造;大尺寸变截面;缩孔缺陷

中图分类号:TG249.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2025)11-1097-10

Simulation Study on the Casting Process of Large-scale Variable-section ZTA15 Titanium Alloy Castings

ZHANG Linjia[1,2], ZHOU Yu[3], LUO Ting[1], LI Jinshan[1,3]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Military Representative Office of Guangzhou Bureau of Naval Equipment Department in Guiyang, Guiyang 550081, China; 3. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: Large-scale thin-walled variable-section ZTA15 titanium alloy castings hold significant application potential in the manufacture of complex, variable-section nozzle components for aeroengines. However, the casting process is highly sensitive to wall thickness parameters, leading to issues such as uneven mold filling, imbalanced temperature distributions, and solidification defects. ProCAST software was employed to conduct numerical simulations of the pouring and filling process, temperature field, velocity field, and solidification behavior of ZTA15 titanium alloy castings with different wall thicknesses (i.e., 2.0, 3.5, and 8.0 mm). The results reveal that the 2.0 mm thick-walled castings exhibit excessive filling velocity, resulting in vortex and porosity defects. The 8.0 mm thick-walled castings experience prolonged solidification time, increasing the risk of shrinkage cavities. In contrast, the 3.5 mm wall thickness yields a uniform temperature field and a reasonable solidification sequence, with initial cooling occurring at the cross-shaped runner and the first layer of reinforcing ribs, followed by accelerated cooling of the large flat thin-walled surface in the later stages. Shrinkage porosity and cavities are observed across all wall thicknesses, primarily concentrated at the junction of the central sprue and the cross-shaped runner, as well as in the thicker regions near the reinforcing ribs. These defects are attributed to localized variations in cooling rates, leading to thermal stress concentration. No significant isolated liquid phase regions are found on the large flat thin-walled surfaces, indicating that optimizing the pouring velocity and time can effectively mitigate defects.

Key words: ZTA15 titanium alloy; investment casting; large-scale variable-section; shrinkage porosity defect

收稿日期:2025-09-09

基金项目:国家科技重大专项(2024ZD0608100);国家自然科学基金(52401198);陕西省秦创原引用高层次创新创业人才项目(OCYRCXM-2022-239)

作者简介:张林嘉,1983 年生,硕士生,工程师.研究方向为航空材料先进制造技术.Email:83273076@qq.com

通信作者:罗 婷,1990 年生,博士,教授.研究方向为钛合金及其成形技术.Email:t.luo@nwpu.edu.cn

引用格式:张林嘉,周瑜,罗婷,李金山.大尺寸变截面 ZTA15 钛合金铸件铸造工艺模拟仿真研究[J].铸造技术,2025,46(11):1097-1106.

ZHANG L J, ZHOU Y, LUO T, LI J S. Simulation study on the casting process of large-scale variable-section ZTA15 titanium alloy castings[J]. Foundry Technology, 2025, 46(11): 1097-1106.

中国知网 https://www.cnki.net

钛合金作为一种高性能结构材料，以其优异的强度–质量比、耐腐蚀性和高温性能，在航空航天领域得到了广泛应用[1-2]。特别是在航空发动机部件中，钛合金铸件被用于制造异形、变截面喷管等关键部件，这些部件需要承受极端的工作环境，包括高温、高压和复杂应力状态[3-4]。随着航空发动机向更高推重比和更长寿命方向发展，对钛合金铸件的尺寸精度、薄壁结构和变截面设计的复杂性提出了更高要求[5-6]。大尺寸薄壁变截面钛合金铸件在浇注和凝固过程中容易出现充型不完整、温度场分布不均、速度场紊乱以及凝固缺陷等问题，这些问题直接影响铸件的力学性能和服役可靠性。因此，通过数值模拟方法优化铸造工艺已成为研究热点[7]。

航空发动机异形、变截面喷管部件是钛合金铸件典型应用之一。这些部件通常具有非均匀壁厚设计，以实现轻量化并优化气流动力学性能。然而，在铸造过程中，变截面结构会导致熔体充型路径复杂，容易形成死区或过早凝固，导致铸件内部缺陷增多。根据相关研究，钛合金铸件在航空领域的应用占比已超过 30%，但薄壁铸件的合格率仍低于 70%，主要原因是凝固过程中的热–力耦合效应未得到充分控制[8-9]。为解决这些问题，数值模拟技术被引入铸造工艺研究中[10]。ProCAST 软件作为专业的铸造模拟工具，能够模拟熔体流动、热传输、凝固相变和应力分布，帮助预测缺陷位置并优化工艺参数，如浇注温度、冷却速率和浇注系统设计。ZTA15 钛合金(Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V)是一种近 α 相钛合金，具有良好的焊接性、热稳定性和机械性能，特别适用于航空发动机喷管部件的制造[11-12]。ZTA15 钛合金的铸造过程涉及精密成型技术，但由于钛合金的高反应活性、熔点高和流动性差，在大尺寸薄壁变截面铸件中，壁厚参数的差异会显著影响充型过程、温度场、速度场和凝固行为。例如，壁厚过薄可能导致熔体流动速度过快，引起涡流和气孔缺陷；壁厚过厚则可能造成凝固时间延长，增加热应力和缩松风险[4]。传统试验方法成本高、周期长，且难以实时观察内部流动和热传输过程，因此，采用有限元模拟软件进行工艺优化已成为有效研究手段[13]。

近年来针对钛合金铸造的模拟研究取得了显著进展。早期的研究聚焦于钛合金的铸造过程，探讨了模具材料与熔体的界面反应对铸件表面质量的影响。Li 等[14]通过实验和模拟分析了 ZTA15 钛合金与 $CaZrO_3$ 模具的界面反应，发现粉液比和黏结剂类型会影响反应层厚度，反应层厚度控制在 80 μm 以内可显著提高铸件表面光洁度。在大型 ZTA15 钛合金铸件中，界面反应被证明是导致氧化夹杂的主要原因，模拟结果显示，提高模具预热温度可减少反应程度[15]。在铸造工艺模拟方面，有限元模拟已被广泛用于钛合金薄壁部件的优化。Liao 等[16]建立了一个低成本钛合金齿轮箱的投资铸造模型，使用 ProCAST 模拟充型和凝固过程，结果表明优化浇注系统可使减少缩孔缺陷 20%。Zhu 等[4]针对 TiAl 合金薄壁壳体铸造，采用数值模拟优化浇注工艺，发现熔体填充能力差是薄壁区域缺陷的主要诱因，通过调整壁厚参数可改善凝固序列。此外，刘天翼等[17]模拟研究了氧含量对 ZTA15 钛合金微观结构和力学性的影响，氧含量从 0.08%增加到 0.2%时，合金抗拉强度提高但塑性下降，氧元素能促进 α 相稳定化。

然而，现有研究多针对常规钛合金或小型铸件，对大尺寸薄壁变截面 ZTA15 钛合金的模拟较少，尤其是不同壁厚参数对充型过程、温度场、速度场和凝固过程的综合影响缺乏系统分析。传统模拟往往忽略变截面引起的流动非均匀性，导致预测精度不足[18]。此外，航空发动机喷管部件的异形设计增加了模拟复杂度，需要考虑多物理场耦合效应，如流体动力学和热传导的交互[19]。例如，在离心铸造模拟中，钛结构部件的薄壁区域易出现速度场紊乱，ProCAST 模拟显示旋转速度优化可改善熔体分布，但这些研究未深入探讨壁厚变异对凝固时间和缺陷形成的定量关系[20]。

本研究通过 ProCAST 软件模拟大尺寸薄壁变截面 ZTA15 钛合金铸件的铸造工艺，针对不同壁厚参数条件下，包括 2.0、3.5 和 8.0 mm 壁厚，椭圆变截面筒体铸件浇注充型过程、温度场、速度场和凝固过程的变化规律。模拟模型基于实际航空喷管部件设计，考虑铸造工艺参数，包括浇注温度、冷却速率及浇注系统(中心浇道与米字型横浇道)，旨在揭示壁厚参数对铸造工艺的影响机制，并优化缺陷预测。通过模拟优化，为 ZTA15 钛合金铸造工艺提供理论基础，推动航空发动机部件的轻量化设计，并揭示壁厚参数与铸造缺陷的内在耦合机制，降低试验成本，提高铸件合格率，最终为现场试验和生产提供指导。

1 铸件材料及模拟方法

1.1 铸件材料与结构

椭圆变截面筒体钛合金精密铸件选用 ZTA15 钛合金，通过 3D 打印制备 SLA 蜡模模型，经过组树、制壳和熔炼浇注获得轮廓尺寸 1 000 mm×500 mm 的变截面、椭圆形筒体结构铸件，局部壁厚 4 mm，铸件经过热等静压(930 ℃, 130 MPa, 2 h)去除内部缩

中国知网 https://www.cnki.net

孔、疏松，随后进行去应力退火处理(730 ℃，2 h)，最终获得的完整铸件如图 1a 所示。铸件同炉批浇注附铸试棒测试化学成分见表 1。

采用不同颜色对铸件进行分区，以窄椭圆端为上端，其中浅黄色 A 区表示靠上端的壁面，B 区为靠下端壁面，D 区表示横向加强筋水平面，C 区表示加强筋壁面，如图 1b 所示。

1.2 铸造过程数值模型

在 ProCAST 有限元软件平台建立铸件浇注过程三维仿真模拟模型，以凝固动力学模型为核心，考虑相变潜热释放对温度梯度的影响，基于完整的 Navier-Stokes 方程进行流体–传热耦合计算，构建的多物理场控制方程如下。

模型的热量输入来自合金液降温过程放热量，在热传导控制方程中引入钛合金凝固过程结晶潜热变量，模壳材料在浇注过程中不发生相变，因此不考虑相变潜热。热传导控制方程为：

$$\rho C_p=\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\nabla^2 T+\rho L_f\frac{\partial f_s}{\partial t} \tag{1}$$

式中，ρ 为合金密度；C_p 为合金等压热容；T 为温度；t 为时间；λ 为热导率；L_f 为结晶潜热；f_s 为固相率。

模壳热传导主要是在真空炉室中模壳与真空环境发生直接热辐射，重力浇注底部采用槽钢作为耐热材料支撑模壳，与铸件本体不接触，与底部浇道保持线接触，热辐射不做考虑。而铸件未采用陶瓷或石墨型芯，因此模壳仅考虑真空辐射，控制方程为：

$$q_i^{\text{out}}=\eta_i\sigma T_i^4 \tag{2}$$

式中，q_i 为第 i 个表面的辐射率；η 为发射率；σ 为 Stefan-Boltzman 常数。

Navier-Stokes 流体流动方程中的连续性方程、动量方程和能量方程分别为：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla(\rho v)=0 \tag{3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+v\cdot\nabla v\right)=\rho f-\nabla p+\mu\nabla^2 v \tag{4}$$

$$\rho\left(\frac{\partial E}{\partial t}\right)+p\nabla\cdot v=\tau:\nabla v+\nabla\cdot(k\nabla T) \tag{5}$$

式中，ρ 为合金密度；v 为流速；t 为时间；f 为单位体积密度流体所受外力；E 为内能；p 为压力；τ 为黏性应力张量，$\mu\nabla^2 v$ 为黏滞力。

凝固动力学模型中的宏观收缩方程和细观缩孔方程分别为：

$$V=V_0(1-\varepsilon_s-\varepsilon_l-\varepsilon_t) \tag{6}$$

$$\rho_g(1-\varepsilon_p)=(1-\varepsilon_p)\rho_s+\varepsilon_p\rho_l \tag{7}$$

式中，V_0 为浇注时液态金属体积；V 为凝固后体积；ε_s 为固相收缩率；ε_l 为液态收缩率；ε_t 为相变收缩率；ρ_g 为等效平均密度；ρ_s 为固相密度；ρ_l 为液相密度；ε_p 为液相体积分数。

根据 ZTA15 钛合金的化学成分获得合金的热物性参数。其中，ZTA15 钛合金热导率和 Y_2O_3 陶瓷型壳热导率如图 2 所示。设置热传导和流动边界条件，对应的 ZTA15 钛合金密度、黏度及结晶潜热、固相率随温度变化曲线分别如图 3 和 4 所示。以上热物性参数均随温度呈非线性关系，在 1 450~1 690 ℃范围合金进入液固两相共存的糊状区，其中热导率增速加快，密度快速从 4.5×10^3 kg/m^3 下降至 3.9×10^3 kg/m^3。黏度下降约 40%。固相率在约 1 580 ℃快速降低，同时结晶潜热快速释放，固液转变加快。

对于大尺寸、薄壁、复杂结构钛合金精密铸件，

表 1 铸件化学成分

Tab.1 Chemical composition of the casting

(mass fraction/%)

Element	Al	V	Mo	Zr	Ti	Fe	Si	C	N	H	O
Content	6.60	2.32	1.84	2.36	Bal.	0.14	0.32	0.008	0.005	0.001	0.11

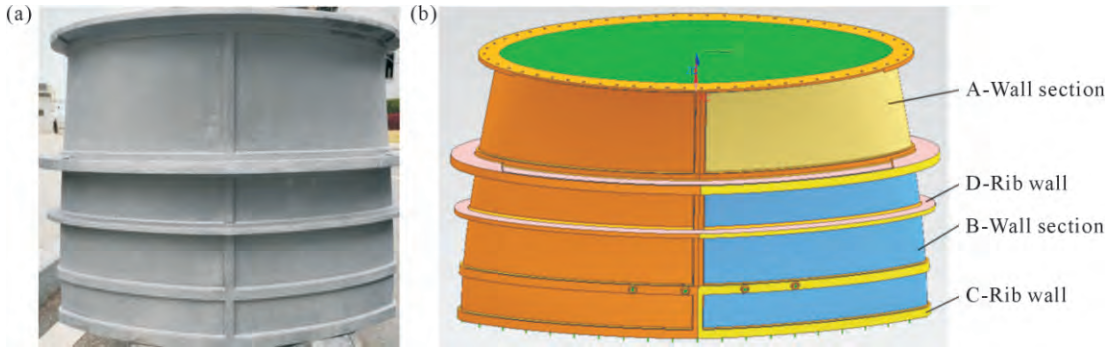


图 1 椭圆变截面筒体：(a) 铸件宏观照片；(b) 分区示意图

Fig.1 Elliptical variable-section cylindrical: (a) macroscopic photograph of the casting, (b) schematic diagram of the partitioned regions

中国知网 https://www.cnki.net

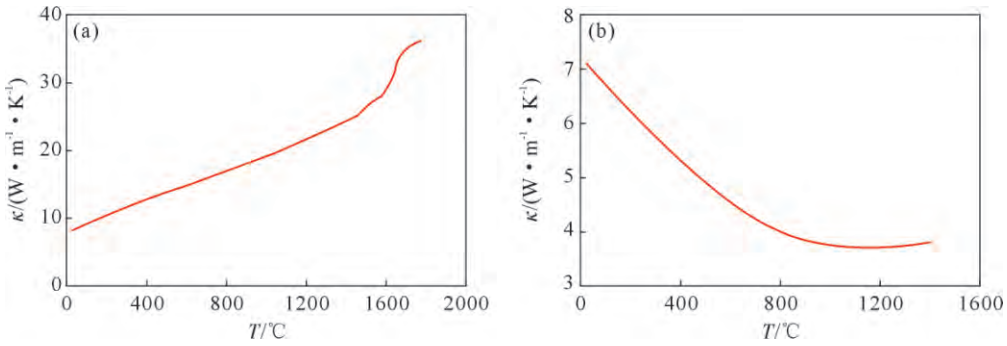


图 2 铸造钛合金及其型壳的热导率：(a) ZTA15 钛合金；(b) Y_2O_3 陶瓷型壳

Fig.2 Thermal conductivity of the cast titanium alloy and its mold shell: (a) ZTA15 titanium alloy; (b) Y_2O_3 ceramic shell

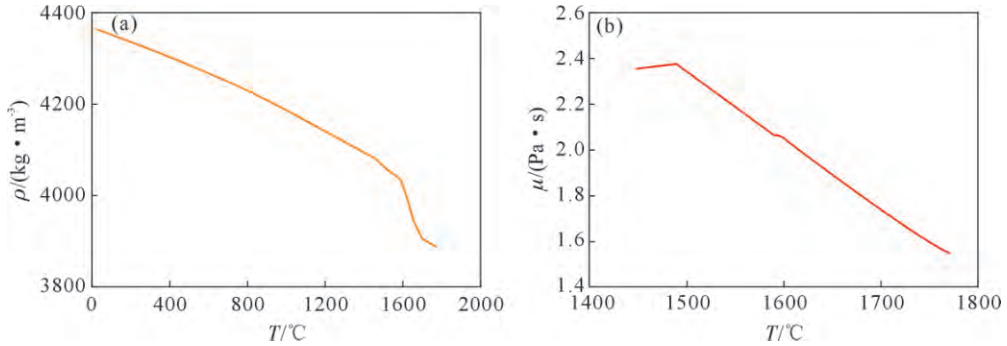


图 3 ZTA15 钛合金物理性能随温度的变化曲线：(a) 密度；(b) 黏度

Fig.3 Variation in the physical properties of the ZTA15 titanium alloy with respect to temperature: (a) density; (b) viscosity

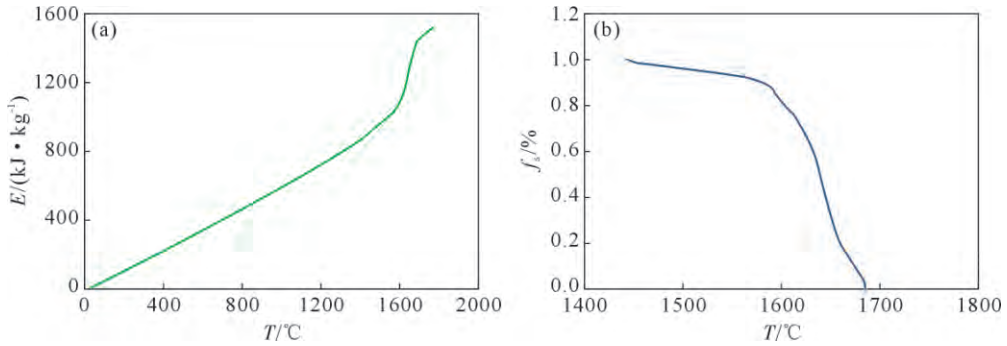


图 4 ZTA15 钛合金物理性能随温度的变化曲线：(a) 结晶潜热；(b) 固相率

Fig.4 Variation in the physical properties of the ZTA15 titanium alloy with respect to temperature: (a) crystallization enthalpy; (b) solid fraction

通常采用重力浇注可实现合金液经过分流、减速和反重力反向充型，能够有效减少合金液对型壳的冲击作用，可适当减薄模壳厚度，提高透气性和热导率，浇注时间较充足，有利于充分排渣、排气。另外，铸件内部温度场主要与热传导有关，流场影响较小，缩孔缩松形成规律稳定，经过充分迭代冒口结构设计，实现缩孔缩松全部提取至浇注系统内。因此，这里采用重力浇注工艺和与之匹配的“中心浇道+米字型横浇道”组成的浇注系统。依据铸件三维模型，结合实际陶瓷型壳厚度和热导率参数，建立陶瓷型壳模型，对铸件和三维模型进行网格划分，铸件整体完全被陶瓷型壳包裹。对模拟计算获得的温度场、固相率、凝固时间、缩孔及缩松出现概率、流场以及压力等数据进行分析。首先，对铸件本体和型壳的冷却过程进行模拟，研究铸件本体结构包括壁厚和 R 角等特征对缩孔、缩松缺陷的影响，总结铸件结构对凝固收缩缺陷的影响。在此基础上，通过调整铸件壁厚，对比分析了 2.0、3.5、8.0 mm 壁厚铸件整体浇注过程温度场、流场和缩孔缩松预测结果，总结壁厚对凝固收缩缺陷的影响。

2 铸件浇注过程模拟结果分析

对 3.5 mm 壁厚铸件本体和型壳的冷却过程进行模拟，研究铸件本体结构对浇注过程及凝固收缩缺陷的影响。3.5 mm 壁厚模型的分析云图如图 5 所示，其中青绿色区域对应的壁厚为 3.5 mm，壁厚对应模型的加强筋壁厚度保持不变。如图 5 中红色区域所示，加强筋最厚区域尺寸为 20 mm，最薄区域尺

中国知网 https://www.cnki.net

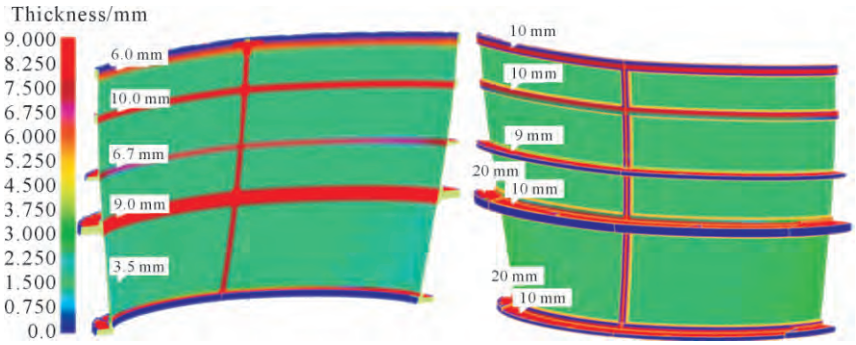


图 5　3.5 mm 壁厚模型分析云图

Fig.5　Contour plot of the simulation for the 3.5 mm wall-thickness model

寸为 6 mm。

铸件典型结构特征包括大平面薄壁、加强筋和壁面交接厚大区、加强筋厚壁区，分别对特征结构的温度场、温降温曲线和缩孔进行分析。根据凝固模拟规律，设计两侧辅助浇道，一方面对浇口合金液分流，进一步减缓壁面合金液进水速度，一方面对加强筋厚大位置和长轴两端补充合金液，保证整体充型平稳。

图 6 为 3.5 mm 壁厚铸件不同时刻的充型状态。在 t=3.0 s 时，金属液通过浇道从顶部进入铸件底部，然后在铸件底部交汇沿着内壁向铸件内部充型。在 t=9.0 s 时，铸件整体基本充型完毕，但铸件顶部的米字型浇道明显充型不足。在 t=15.0 s 时，金属液已完全充满腔体并开始冷却。从 15.0~35.0 s 的冷却过程可以看出，铸件上部壁面(B 壁面)的温度最先开始下降，其次是下部的壁面(A 壁面)的温度开始下降，而中心浇道和米字型横浇道的温降最慢。

图 7 为 3.5 mm 壁厚模型在铸件浇注过程的流速分布，从整体可以看出，流速最快的是中心浇道向米字型横浇道分流的区域，熔体被分流后流速有所下降。在 t=2.0 s 时，熔体刚从中心浇道流入型腔中，此时流入型腔的熔体在中心浇道的末端流速最快；在 t=4.0 s 时，熔体已经开始充型至第一层加强筋壁面，壁面中的熔体流速最慢。在 t=6.0 s 时，中心浇道的熔体流速有所下降，此时熔体充型至第二层加强筋壁面；在 t=8.0 s 时，熔体占整个型腔的 60.4%，中心浇道的熔体流速明显下降，流速主要分布在中心浇道。

图 8 为不同时刻的铸件凝固过程固相分数图。如图 8a 所示，铸件在充型过程中开始凝固，此时凝固部位位于铸件底部的米字型横浇道以及第一层加强筋壁面。当固相分数为 8.2%时，铸件底部的米字型横浇道以及第一层和第二层加强筋壁面均出现了孤立液相区(图 8b)。固相分数为 24.2%时，除了上述部位外，在铸件的中心浇道与米字型横浇道的连接处区域均出现了孤立液相区(图 8c)。固相分数为42.9%

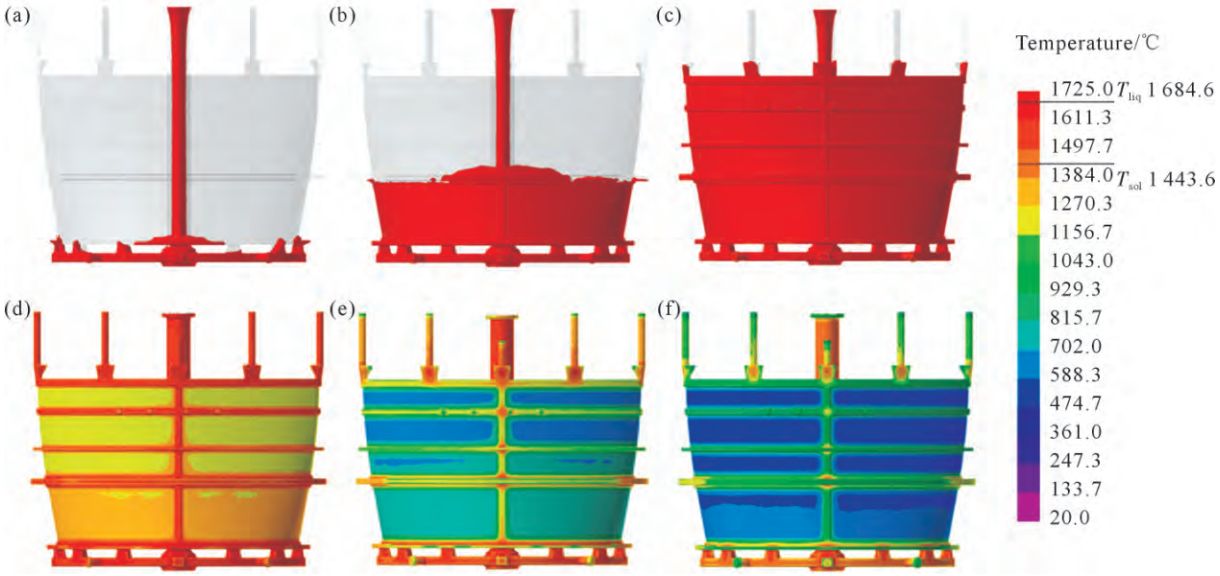


图 6　3.5 mm 壁厚模型铸件浇注过程温度场：(a) t=3.0 s; (b) t=6.0 s; (c) t=9.0 s; (d) t=15.0 s; (e) t=25.0 s; (f) t=35.0 s

Fig.6　Temperature field during the filling process of the casting with a 3.5 mm wall-thickness model: (a) t=3.0 s; (b) t=6.0 s; (c) t=9.0 s; (d) t=15.0 s; (e) t=25.0 s; (f) t=35.0 s

中国知网　https://www.cnki.net

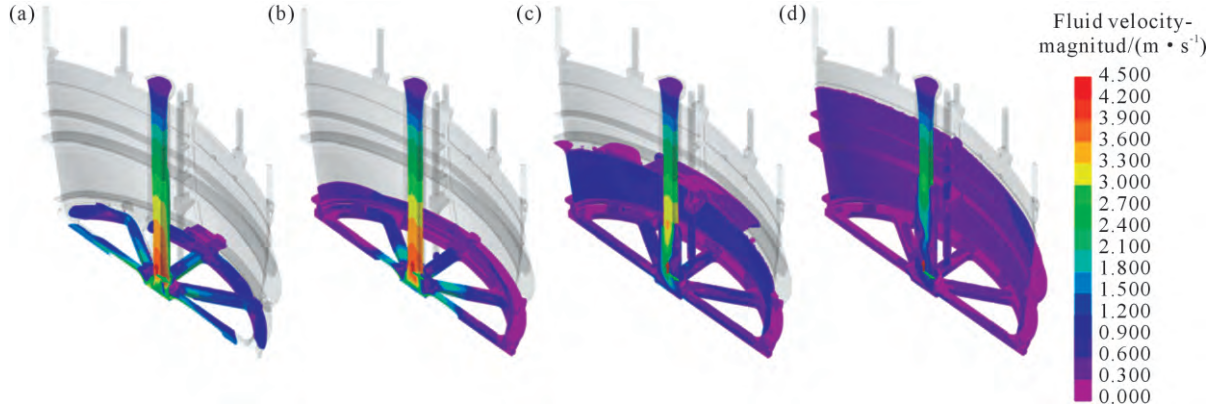


图 7 3.5 mm **壁厚模型铸件浇注过程的速度场**:(a) *t*=2.0 s; (b) *t*=4.0 s; (c) *t*=6.0 s; (d) *t*=8.0 s

Fig.7 Velocity field during the filling process of the casting with a 3.5 mm wall-thickness model: (a) *t*=2.0 s; (b) *t*=4.0 s; (c) *t*=6.0 s; (d) *t*=8.0 s

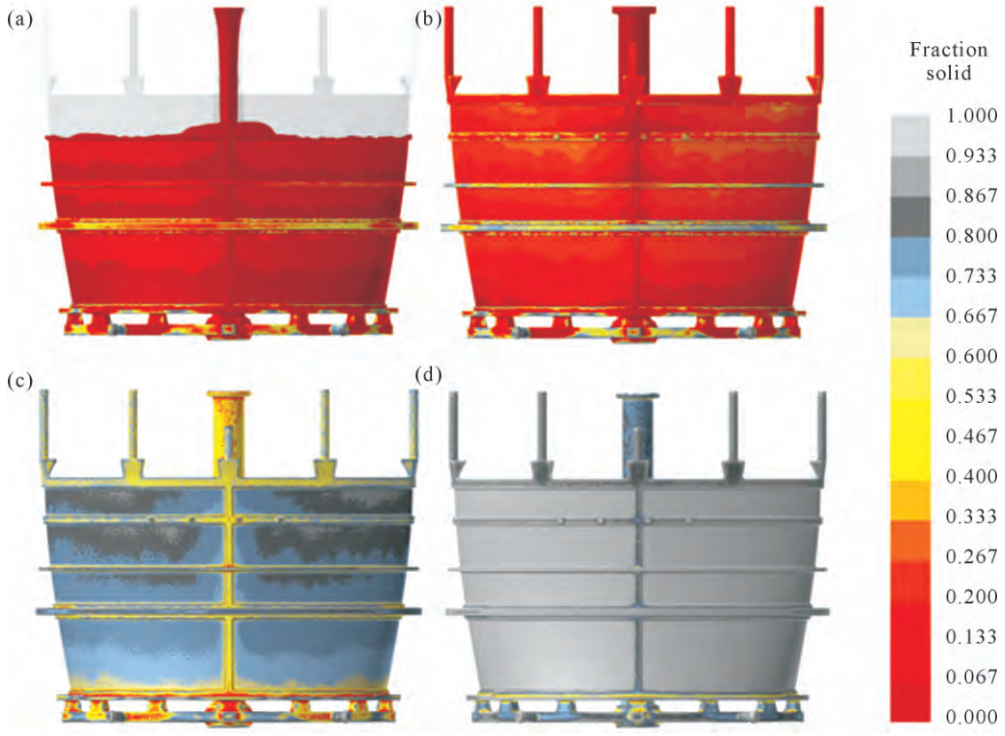


图 8 3.5 mm **壁厚模型铸件凝固过程固相分数**:(a) 4.0%; (b) 8.2%; (c) 24.2%; (d) 42.9%

Fig.8 Solid fraction evolution during the solidification process of the casting with a 3.5 mm wall-thickness model: (a) 4.0%; (b) 8.2%; (c) 24.2%; (d) 42.9%

时,铸件大部分部位已经完全凝固,金属液基本无流动性。最终在 186 s 时铸件凝固完成(图 8d)。

图 9 为 3.5 mm 壁厚模型铸件缩松缺陷模拟结果。结果表明,缩松缺陷在中心浇道与米字型横浇道的连接处出现大块缩松缺陷,在第一层椭圆加强筋的短轴处出现了连续缩松。结合铸件凝固过程分析可知,这是由于充型凝固时铸件不是顺序凝固,导致铸件下部分区域无法得到充足的补缩,在铸件浇道连接区域以及加强筋椭圆短轴的内部充型金属液较多冷却时间延长,而周围区域冷却较快形成了孤立液相区,继而阻断了该部分的补缩通道,导致后续液体补缩不足,最终产生缩松缺陷。

3 实验结果及讨论

3.1 壁厚对浇注过程温度场的影响

图 10 为不同壁厚铸件在浇注过程中及浇注后的温度分布。由图可知,在相同的浇筑时间下,2.0 mm 壁厚铸件浇注过程中铸件表面温度最先降低,而 8.0 mm 壁厚铸件表面的整体温度下降最慢。当固相分数为 21.3%~24.9%时,2.0 mm 壁厚铸件上部大尺寸薄壁面表面温度已降低至固相温度 1 560.6 ℃以下,且温度分布不均匀。3.5 mm 壁厚铸件表面温度均匀下降,表明该铸件在冷却阶段具有良好的热传导性能和均匀的温度下降速率,这对于保证铸件的

中国知网 https://www.cnki.net

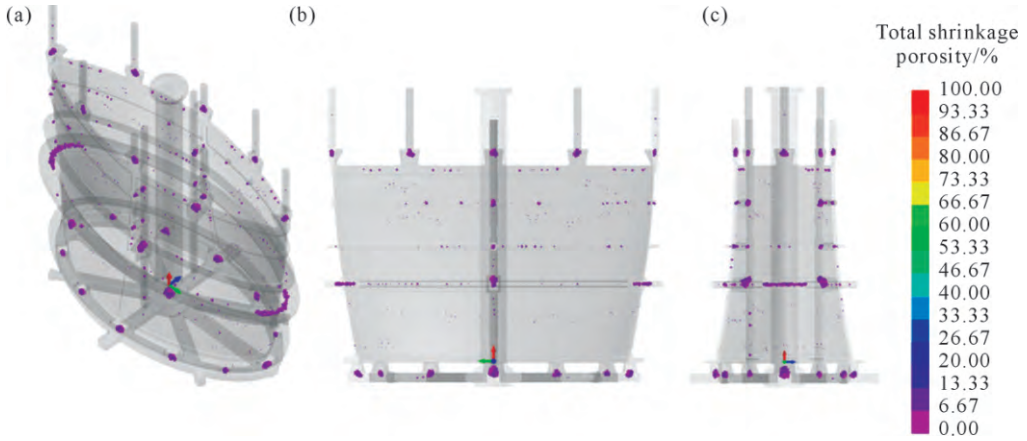


图 9　3.5 mm 壁厚模型铸件缩孔分布：(a) 3D 图；(b) *X*-*Y* 平面；(c) *X*-*Z* 平面

Fig.9　Shrinkage porosity distribution in the casting with a 3.5 mm wall-thickness model: (a) 3D view; (b) *X*-*Y* section; (c) *X*-*Z* section

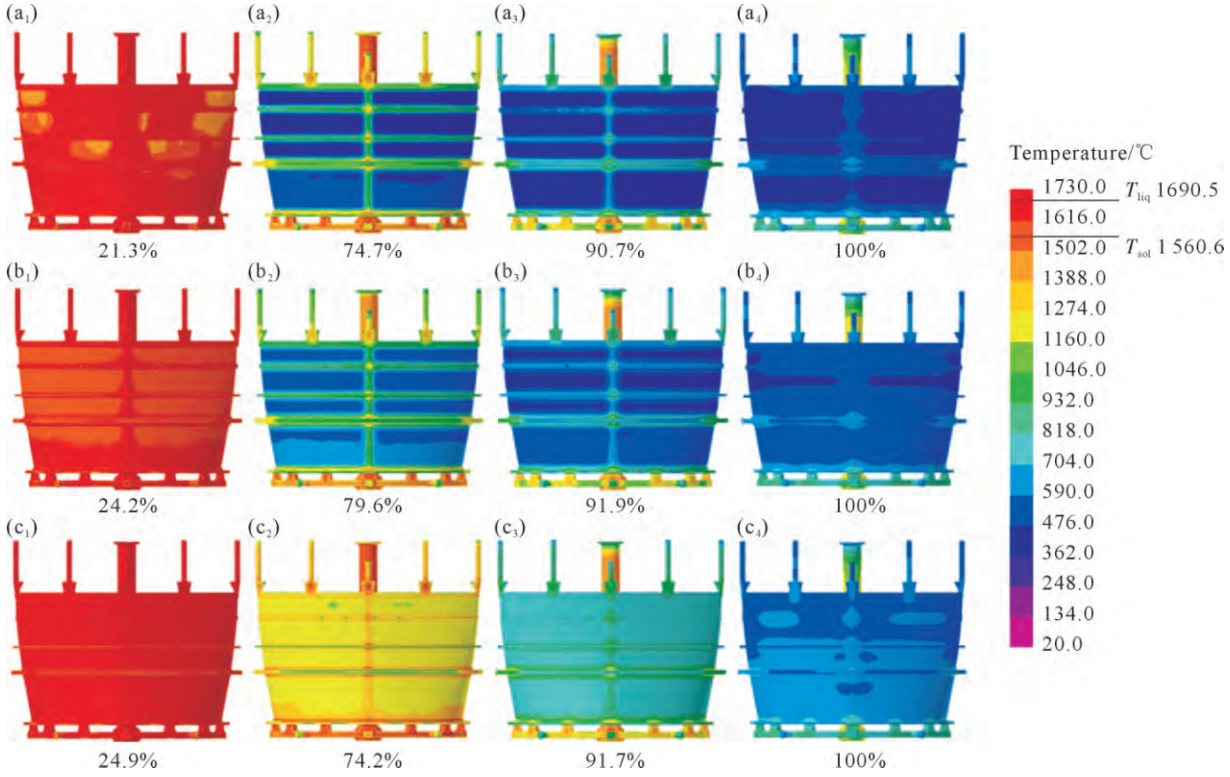


图 10　不同壁厚铸件在浇注过程及浇注后的温度分布：(a_1~a_4) 2.0 mm 壁厚；(b_1~b_4) 3.5 mm 壁厚；(c_1~c_4) 8.0 mm 壁厚；图中数字表示固相分数

Fig.10　Filling process and post-filling temperature distribution of castings with different wall thicknesses: (a_1~a_4) 2.0 mm wall thickness; (b_1~b_4) 3.5 mm wall thickness; (c_1~c_4) 8.0 mm wall thickness; the numbers in the figure indicate the fraction of solid

质量和性能至关重要。8.0 mm 铸件仅在加强筋壁面存在温度下降。当固相分数为 74.2%~79.6%时，2.0 和 3.5 mm 壁厚铸件大平面薄壁的温度已降低至 700 ℃，中心浇道及米字型横浇道以及加强筋壁面温度较高，在 800~1 300 ℃之间。此时 8.0 mm 壁厚铸件整体温度明显高于 2.0 和 3.5 mm 壁厚铸件，在 900~1 300 ℃之间。由此可知，壁厚增加会延长浇注过程中温度降低的阶段。当固相分数为 90.7%~91.9%时，3 种壁厚铸件的底部第 1 层加强筋壁面的温度均高于大尺寸薄壁面和上部第 2 层和第 3 层加强筋壁面，这是由于第 1 层加强筋壁面的厚度较厚，从而导致温度下降速率降低。当固相分数为 100%时，3 种壁厚铸件的中心浇道及底部米字型横浇道温度最高，2.0 和 3.5 mm 壁厚铸件的温度分布相比 8.0 mm 壁厚铸件更加均匀。

3.2　壁厚对浇注过程流场的影响

图 11 为不同壁厚铸件在浇注过程的流速分布，从整体可以看出，流速最快的是中心浇道以及向米字型横浇道分流的区域，金属液被分流后流速有所下降。当 t=2.0 s 时，金属液从中心浇道沿米字型横浇道流入型腔内部，此时流入型腔的熔体平均流速大约为 1.0 m/s。当 t=4.0 s 时，金属液已经充型至铸件

中国知网　https://www.cnki.net

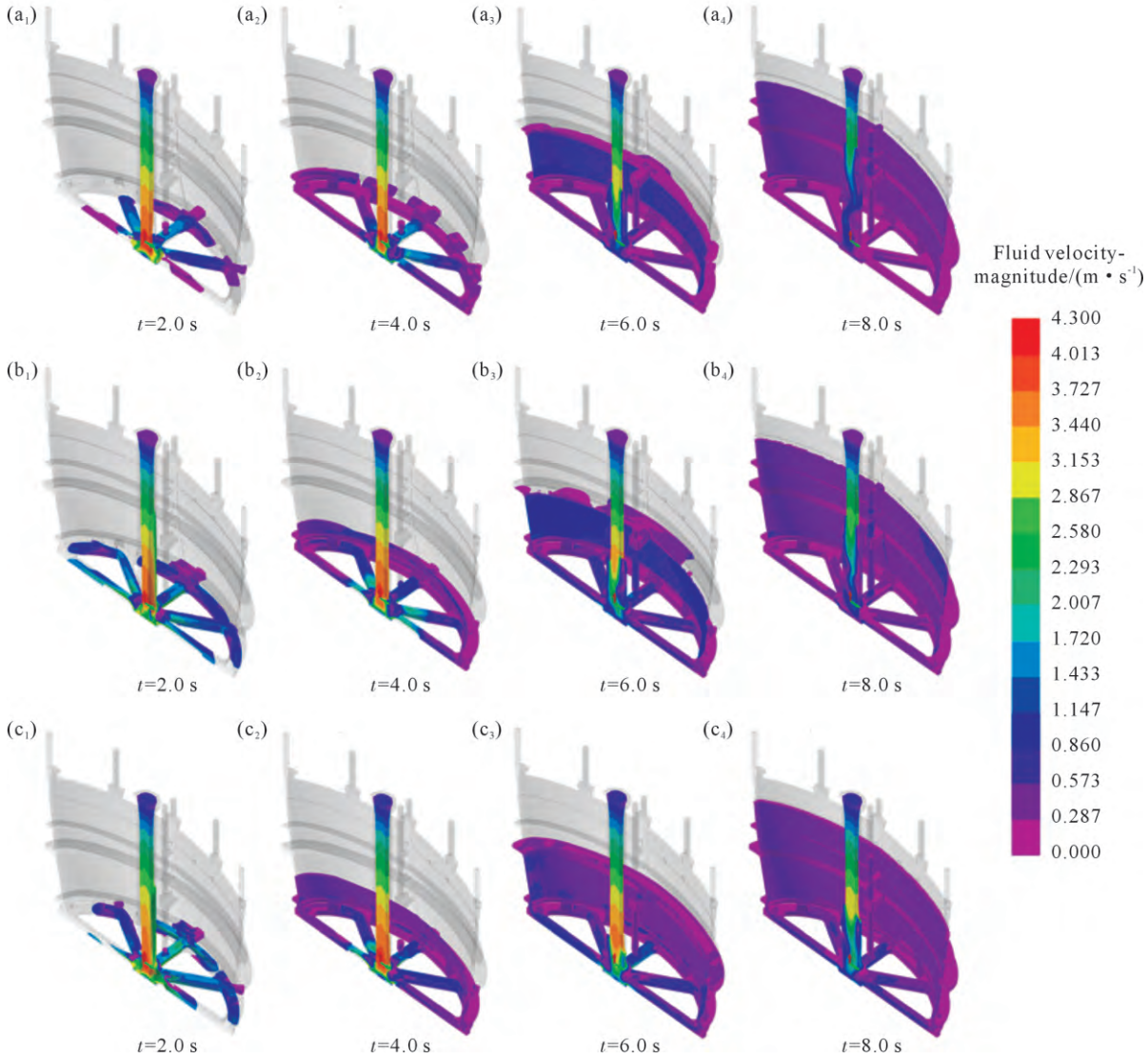


图 11 不同壁厚铸件在浇注过程 2.0~8.0 s 内的流速场：(a_1~a_4) 2.0 mm 壁厚；(b_1~b_4) 3.5 mm 壁厚；(c_1~c_4) 8.0 mm 壁厚

Fig.11 Velocity field during the filling process of castings with different wall thicknesses from 2.0 to 8.0 s: (a_1~a_4) 2.0 mm wall thickness; (b_1~b_4) 3.5 mm wall thickness; (c_1~c_4) 8 mm wall thickness

大平面薄壁中，在米字型横浇道中的熔体流速有所下降，大约为 0.5 m/s。对比可以看出，当 t=6.0 s 时，8.0 mm 壁厚铸件的熔体已经充满第一层加强筋，随着壁厚的增加，铸件中熔体的充型量占比更多。随着壁厚的减小，中心浇道的流速明显降低。当 t=8.0 s 时，3 种壁厚铸件模型的中心浇道的流速均降低至 3.0 m/s 以下，这表明随着浇注的进行，浇道的流速与铸件中熔体的充型量呈负相关关系。

3.3 壁厚对凝固过程与缺陷分布的影响

图 12 为不同壁厚铸件熔体凝固过程分析。当固相分数为 4.0%时，3 种壁厚铸件均未完全充型，此时铸件底部的米字型横浇道已经开始凝固，其中 3.5 mm 壁厚铸件的第一层加强筋壁面也有凝固趋势。当固相分数为 6.0%时，3 种壁厚铸件只有大平面薄壁的区域为液态，此时铸件的第 1 层加强筋壁面已经开始凝固。当固相分数为 8.2%时，3 种壁厚铸件几乎完成充型，2.0 mm 壁厚铸件充型量最低。当固相分数为 21.3%~24.9%时，3 种铸件的平面薄壁的区域固体占比为最高，只有加强筋和浇道连接处还存在液体。

图 13 为不同壁厚铸件的缩松缩孔缺陷出现位置。可以看出 3 种壁厚模型的缺陷集中分布在铸件底部中心浇道与米字型横浇道的连接区域以及第 1 层加强筋壁椭圆短轴区域。在铸件上部的加强筋区域也存在少量缺陷，对比可知，3.5 mm 壁厚铸件的缩松缩孔缺陷比 2.0 和 8.0 mm 壁厚铸件的缺陷少。结合模拟分析结果可知，这是由于在浇注凝固过程中，3.5 mm 壁厚铸件的最快完成铸件的充型过程，且凝固过程中温度下降速率较为均匀，从而有助于减少由于金属液流动不均或冷却不均所导致的缺陷。

中国知网 https://www.cnki.net

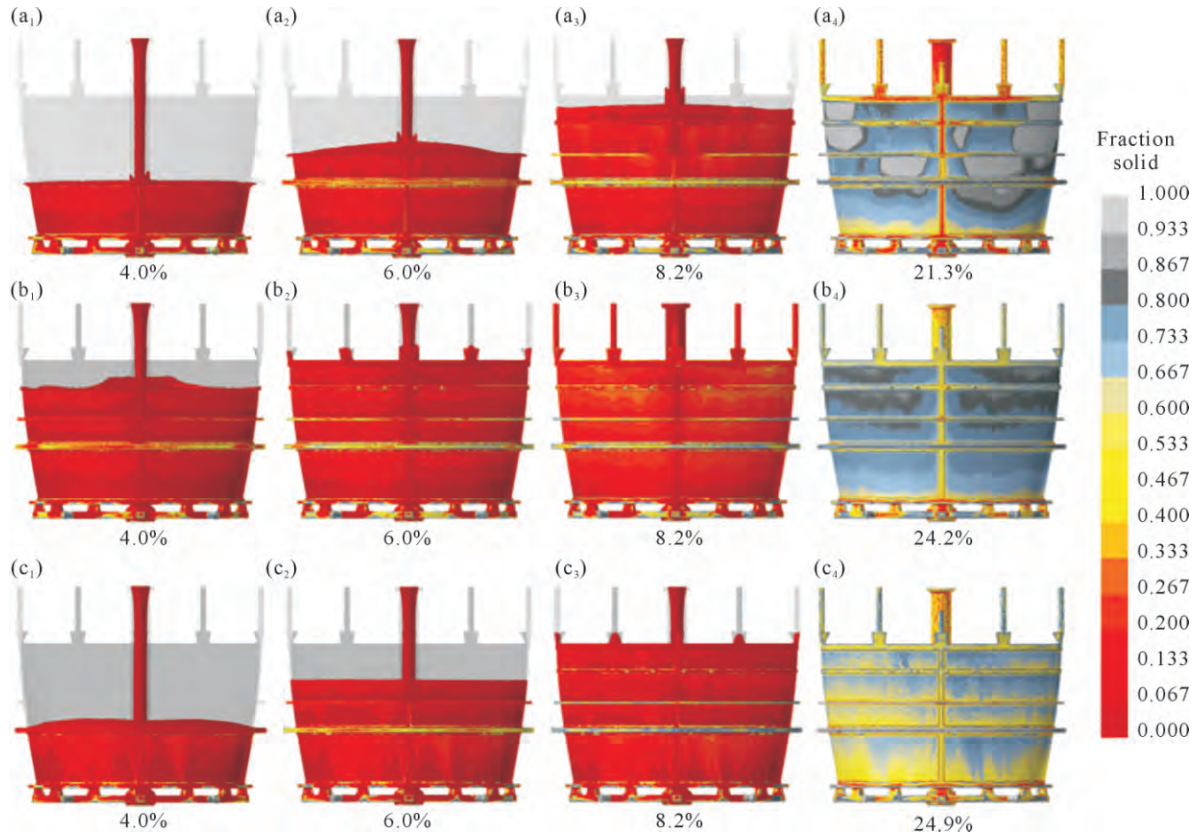


图 12　不同壁厚铸件的凝固过程:(a_1~a_4) 2.0 mm **壁厚**;(b_1~b_4) 3.5 mm **壁厚**;(c_1~c_4) 8.0 mm **壁厚**;**图中数字表示固相分数**

Fig.12　Solidification process of castings with different wall thicknesses: (a_1~a_4) 2.0 mm wall thickness; (b_1~b_4) 3.5 mm wall thickness; (c_1~c_4) 8.0 mm wall thickness; the numbers in the figure indicate the fraction of solid

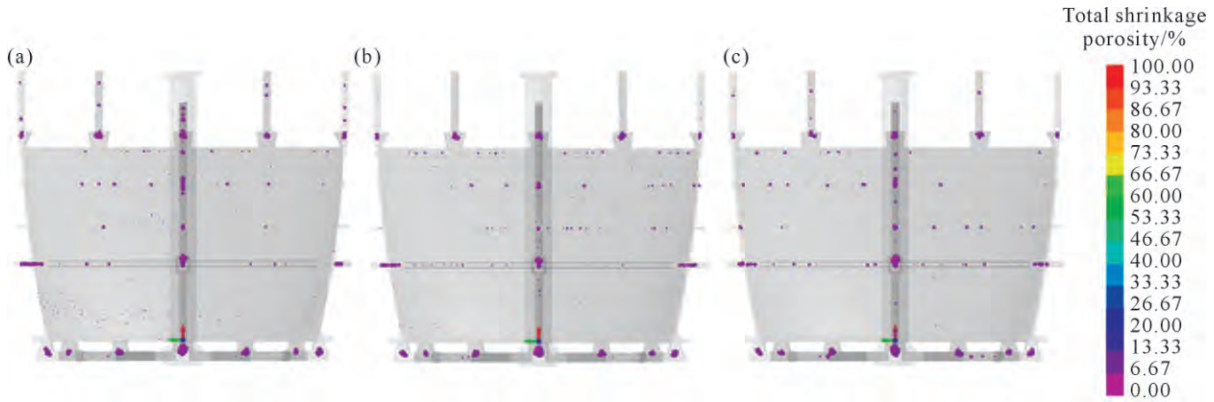


图 13　不同壁厚铸件的缩孔分布:(a) 2.0 mm **壁厚**;(b) 3.5 mm **壁厚**;(c) 8.0 mm **壁厚**

Fig.13　Distribution of shrinkage porosity in castings with different wall thicknesses: (a) 2.0 mm wall thickness; (b) 3.5 mm wall thickness; (c) 8.0 mm wall thickness

4　结论

(1)对 3.5 mm 壁厚大尺寸、薄壁 ZTA15 钛合金铸件进行了浇注模拟分析，从铸件的充型过程、温度场、速度场、凝固场预测了缩松缺陷的分布,集中缺陷主要出现在中心浇道和米字型横浇道的连接处及第一层加强筋壁椭圆短轴区域。

(2)对设计的 2.0、3.5 和 8.0 mm 壁厚铸件浇注系统进行了数值模拟对比分析,铸件浇注初期中心浇道的流速较快,沿着米字型横浇道向铸件内部逐渐降低。浇注初期米字型横浇道和第一层加强筋区域最先发生温度下降,然后在浇注后期大平面薄壁表面的温降最快。对比发现 3.5 mm 壁厚铸件的温度场分布较为均匀。

(3)在铸造过程中,不同壁厚铸件的内部均有缩松缩孔缺陷产生,尤其是在中心浇道和米字型横浇道的连接区域以及加强筋椭圆短轴内部。这些缺陷可能是由于浇道和加强筋区域冷却速率差与相邻的大平面薄壁表面冷却速率差较大所造成。此外,在大平面薄壁表面并未出现较明显的孤立液相区,表明合理的控制浇注速度和浇注时间对于获得高质量的铸件至关重要。

中国知网　https://www.cnki.net

参考文献：

[1] TSHEPHE T S, AKINWAMIDE S O, OLEVSKY E, OLUBAMBI P A. Additive manufacturing of titanium-based alloys - A review of methods, properties, challenges, and prospects[J]. Heliyon, 2022, 8(3): e09041.

[2] WILLIAMS J C, BOYER R R. Opportunities and issues in the application of titanium alloys for aerospace components[J]. Metals, 2020, 10(6): 705.

[3] TAO P, SHAO H, JI Z J, NAN H, XU Q Y. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(4): 520-528.

[4] ZHU X P, ZHU C L, LIN B S, WANG Z D. Research on optimization design of cast process for TiAl case casting[J]. Metals, 2022, 12 (11): 1954.

[5] LI W M, WANG S Q, YANG X, DUAN H B, WANG Y M, YANG Z. Research progress on fatigue damage and surface strengthening technology of titanium alloys for aerospace applications[J]. Metals, 2025, 15(2): 192.

[6] YU W H, LI J, LI H Y, SHI F L, WU G Q. Evolution of microstructure and mechanical properties in large-scaled complex titanium alloy castings during service based on quantitative abnormal microstructure analysis[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108460.

[7] LI F, HUANG H, ZONG X, WANG K H, LIU H, LIU X J, DING X F. Simulation study on directional solidification of titanium-aluminum alloy based on liquid metal cooling method[J]. Metals, 2025, 15(4): 366.

[8] NDUKWE A I. Review of recent findings on investment casting of titanium alloys[J]. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2022, 20(2): 99-108.

[9] CHENG Y F, WANG G, QIU Z G, ZHENG Z G, ZENG D C, TANG X, SHI R P, UDDAGIRI M, STEINBACH I. Multi-physics simulation of non-equilibrium solidification in Ti-Nb alloy during selective laser melting[J]. Acta Materialia, 2024, 272: 119923.

[10] XIN Y C, LIU Y, GAO L, FANG H Y, CHAI Z, SHAO J Z, GUO S H, YANG L, LU D, LI X M. The numerical simulation of element segregation control during the electron beam cold hearth melting process of large-sized Ti-6wt%Al-4wt%V titanium alloy slab[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 8671-8687.

[11] GOMEZ-GALLEGOS A, MANDAL P, GONZALEZ D, ZUELLI N, BLACKWELL P. Studies on titanium alloys for aerospace application[J]. Defect and Diffusion Forum, 2018, 385: 419-423.

[12] HUANG S, SUN B B, GUO S Q. Microstructure and property evaluation of TA15 titanium alloy fabricated by selective laser melting after heat treatment[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 144: 107422.

[13] LI F, YANG Z, GUO J B, LI Z, MA Z J, BAI L. Simulation and optimization of the casting process for a new commercial Al-4Cu-0.3Mg-0.25Mn-0.05Ag alloy cylinder head[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 38: 1355-1366.

[14] LI X Q, LIU S B, LIU T Y, WANG W L, QIU W C, LI H J, LI C Y, SHI K. Interface reaction of ZTA15 titanium alloy and $CaZrO_3$ during investment casting[J/OL]. International Journal of Metalcasting, 2025. https://doi.org/10.1007/s40962-025-01605-8.

[15] 刘鸿羽，柴皓，娄延春，金磊，赵军，刘时兵，倪嘉. ZTA15大型钛合金熔模精密铸件界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(3): 890-896.
LIU H Y, CHAI H, LOU Y C, JIN L, ZHAO J, LIU S B, NI J. Interface reaction of large size ZTA15 titanium alloy investment casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 890-896.

[16] LIAO Q, GE P, LU G X, SONG Y, YE W H, GAO J P, LUO X. Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(1): 4484762.

[17] 刘天翼，李重阳，于仓瑞，刘时兵，史昆，曲赫威. 氧含量对ZTA15钛合金显微组织和力学性能的影响[J]. 航空材料学报，2025, 45 (2): 66-72.
LIU T Y, LI C Y, YU C R, LIU S B, SHI K, QU H W. Effect of oxygen content on microstructure and mechanical properties of ZTA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(2): 66-72.

[18] LI J C, MENG X C, WAN L, HUANG Y X. Welding of high entropy alloys: Progresses, challenges and perspectives[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 293-331.

[19] LI Z X, LIU C M, XU T Q, JI L, WANG D H, LU J P, MA S Y, FAN H L. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 287-294.

[20] YU P, JI X Y, SUN T, ZHOU W H, LI W, XU Q, QIE X W, YIN Y J, SHEN X, ZHOU J X. Data-physics fusion-driven defect predictions for titanium alloy casing using neural network[J]. Materials, 2024, 17(10): 2226.

（责任编辑：杨浩雪）

中国知网 https://www.cnki.net