DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5060

基于 ProCAST 的 TC18 钛合金泵体真空凝壳铸造工艺仿真研究

谭　聪,赵　杰,何宇航,董英杰,邓洪宇,滕凤远,王镜钢,罗渝琨
(攀枝花航友新材料科技有限公司,四川 攀枝花 617000)

摘　要:基于 ProCAST 有限元仿真平台,开展了 TC18 钛合金泵体真空凝壳铸造工艺优化研究。通过构建合金牛顿流体本构模型,量化分析了 TC18 与 TC4 钛合金的流变特性差异,确定 TC18 优化浇注温度为 1 770 ℃。建立了泵体三维流–固耦合模型,并系统对比传统顶注式与改进底注式浇注系统的熔体充型行为及凝固特征。结果表明,优化浇注系统后有效抑制了金属液紊流(流速降幅达 38.6%),促使缩松缩孔体积分数降低 74.3%;同时二次枝晶间距缩减 21.4%,关键部位抗拉强度提升 15.5%。X 射线探伤与拉伸试验验证了模拟结果的可靠性。

关键词:TC18 钛合金;真空凝壳铸造;数值模拟;枝晶生长;缺陷控制

中图分类号: TG249.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)05-0491-08

Simulation of the TC18 Titanium Alloy Pump Vacuum Condensing Shell Casting Process via ProCAST

TAN Cong, ZHAO Jie, HE Yuhang, DONG Yingjie, DENG Hongyu,
TENG Fengyuan, WANG Jinggang, LUO Yukun
(Panzhihua Hangyou New Material Technology Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

Abstract: On the basis of the ProCAST finite element simulation platform, the TC18 titanium alloy pump vacuum condensing shell casting process was optimized. The difference in rheological properties between the TC18 and TC4 titanium alloys was quantitatively analysed by constructing a Newtonian fluid constitutive model, and the optimal pouring temperature of TC18 was determined to be 1 770 ℃. A three-dimensional fluid-solid coupling model of the pump body was established, and the filling behavior and solidification characteristics of the melt were systematically compared between the traditional top pouring system and the improved bottom pouring system. The results show that the turbulent flow of liquid metal (the flow rate decreases by 38.6%) is effectively restrained after the pouring system is optimized, and the volume fraction of shrinkage porosity is reduced by 74.3%. Moreover, the secondary dendrite spacing is reduced by 21.4%, and the tensile strength of key parts is increased by 15.5%. The reliability of the simulation results is verified via X-ray flaw detection and tensile tests.

Key words: TC18 titanium alloy; vacuum shell casting; numerical simulation; dendrite growth; defect control

TC18(Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe)作为近 β 型钛合金，其 $\sigma_b \geqslant 1\,100$ MPa 的高强韧性特征使之成为航空液压系统关键承力部件的优选材料[1]。基于近净成形需求，真空凝壳铸造技术因其表面精度高、残余应力低等特点，已成为制备复杂钛合金构件的主流工艺[2]。然而,TC18 合金中 β 稳定元素的高配比导致其液相线上移,相比 TC4 合金存在更大凝固区间,加剧了缩松、夹渣等铸造缺陷形成的风险[3-5]。

铸造模拟仿真作为工艺优化的技术手段，已被证实可精确预测 90%以上的宏观缺陷分布[6]。现有研究中,Liao 等[7]通过 ProCAST 平台实现了齿轮箱铸件孔隙率预测,误差低于 5%。王彦鹏等[8]通过设置冒口和离心铸造缓解钛合金泵体的缩松问题。然

收稿日期:2025-04-08
基金项目:攀枝花市省级定向财力转移支付科技项目(22ZYZF-GG-04)
作者简介:谭　聪,1995 年生,硕士,中级工程师.主要从事钛及钛合金熔炼、铸造、塑性成型方面的工作.Email: 1392054911@qq.com
通信作者:赵　杰,1982 年生,高级工程师.主要从事材料科学与工程专业方面的工作.Email: 29694112@qq.com
引用格式:谭聪,赵杰,何宇航,董英杰,邓洪宇,滕凤远,王镜钢,罗渝琨.基于 ProCAST 的 TC18 钛合金泵体真空凝壳铸造工艺仿真研究[J].铸造技术,2025,46(5):491-498.
TAN C, ZHAO J, HE Y H, DONG Y J, DENG H Y, TENG F Y, WANG J G, LUO Y K. Simulation of the TC18 titanium alloy pump vacuum condensing shell casting process via ProCAST[J]. Foundry Technology, 2025, 46(5): 491-498.

中国知网　https://www.cnki.net

而，Tao 等[9]通过大型钛合金薄壁套管的研究，发现离心铸造相对于重力铸造在减少缩松缩孔缺陷方面没有明显优势。马静等[10]通过引入石墨冷铁和调整工艺参数，提高了泵体铸造质量。但针对 TC18 泵体的多相流–凝固耦合专属模型仍待完善。

鉴于 TC18 成分复杂且流动性较 TC4 差，本文采用 ProCAST 模拟 TC4 和 TC18 在重力铸造条件下的流动性，确定 TC18 的最佳浇注温度。分析 TC18 泵体充型、凝固行为及缺陷形成机理，并通过宏观耦合模拟研究微观组织对 TC18 力学性能的影响，提出并验证优化工艺。

1 实验材料与方法

图 1 为 TC18 泵体的三维模型，在此基础上设计加工石墨模具用于真空壳型重力铸造。TC18 的化学成分见表 1。使用 ProCAST 模拟材料性能和铸造过程，通过优化浇注温度和浇注系统设计来实现减少缩松缺陷的目的。

1.1 TC18 钛合金流动性能改善

采用 ProCAST 对 TC18 的黏度进行计算，并与 TC4 比较，如图 2a 所示。相同温度下，TC18 的黏度较大，流动性不如 TC4[11]。因此，可以通过优化 TC18 的浇注温度来改善其流动性，并据此设计优化工艺方案，如表 2 所示。建立环形流动模型(图 2b)，模拟 TC18 合金的流动性。该模型的截面尺寸为20 mm×20 mm，最大运行长度为 1 960 mm。在室温空冷条件下，进行不同浇注温度的重力铸造模拟。

1.2 浇注系统的优化设计

分别建立 2 种不同浇注系统的泵体三维模型，如图 3 所示。图 3a 展示了传统浇注系统，金属液通过主浇道进入模具，铸件上未设置冒口；图 3b 则在传统模型基础上增设了冒口，主要设置在铸件大平面及厚大部位。为了减小湍流，将浇注系统改为底注式，以实现金属液自下而上的稳定流动。

1.3 铸造过程的数值模型

将金属液视为不可压缩的黏性流体，其充型过

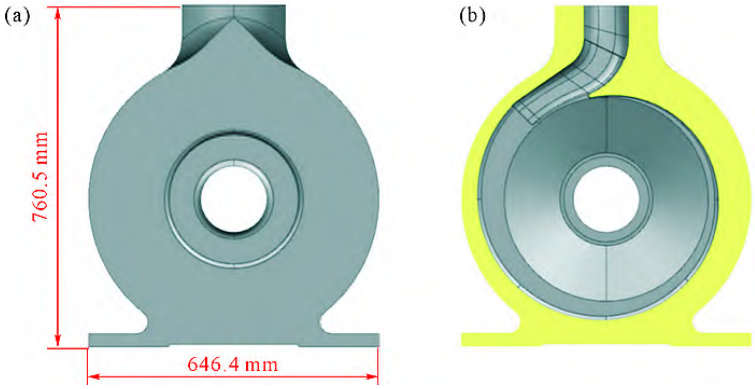

图 1 泵体铸件示意图：(a) 三维图；(b) 剖面图
Fig.1 Schematic diagram for the casting of the pump body: (a) three-dimensional diagram of the pump body; (b) profile of the pump body

表1 铸件化学成分
Tab.1 Chemical composition of the casting

(mass fraction/%)

Ti	Al	Si	V	Cr	Zr	Mo	Fe	C	H	O	N
Margin	4.4-5.7	0.15	4.0~5.5	0.5~1.5	≤0.3	4.0~5.5	0.5~1.5	≤0.08	≤0.015	≤0.18	≤0.05

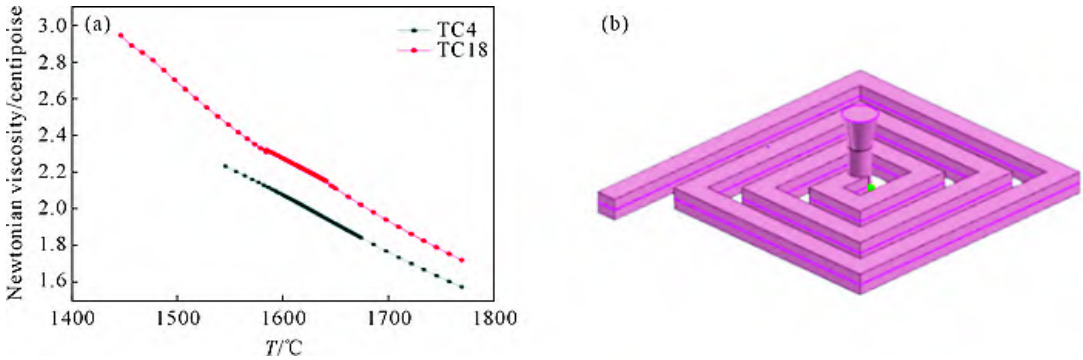

图 2 合金黏度特性及流动模型：(a) TC4、TC18 牛顿黏度特性；(b) 合金流动模型
Fig.2 Viscosity characteristics and flow model of the alloy: (a) Newton viscosity characteristics of TC4 and TC18; (b) alloy flow model

中国知网 https://www.cnki.net

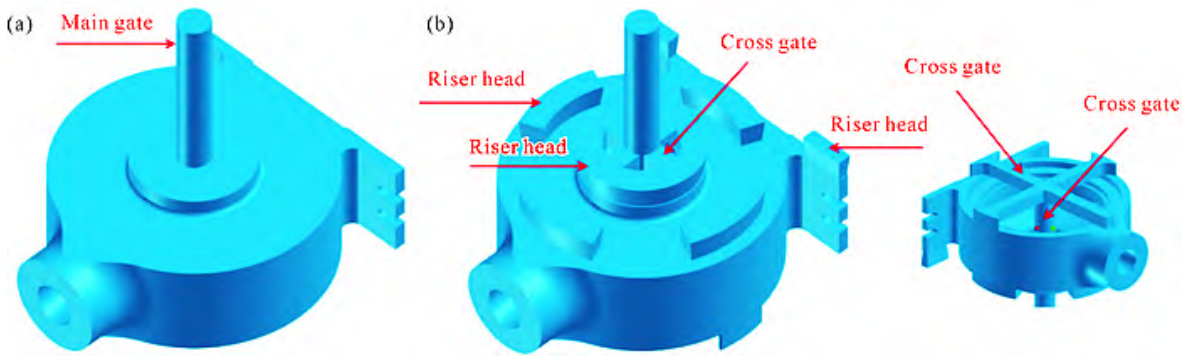

图 3　两种不同浇注系统的泵体模型：(a) 传统设计；(b) 优化设计

Fig.3　Pump body models of two different pouring systems: (a) traditional design; (b) design optimization

表 2 浇注温度优化工艺方案设计

Tab.2 Casting temperature optimization process design

Alloy type	Solid phase line/℃	Liquid phase line/℃	ΔT/℃	Pouring temperature/℃
TC4	1 536	1 666	130	1 700
TC18	1 439	1 650	211	1 700
				1 770
				1 840

程遵循连续性方程[12]：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial \nu}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中，u, ν, w 分别表示流体速度在 x, y, z 方向上的分量。

凝固过程中需考虑结晶潜热，因此采用焓法来计算结晶潜热[13]：

$$H_m=H_0+\int_{T_0}^{T}C_p\mathrm{d}T+(1-f_S)L \tag{2}$$

式中，H_m 为热焓；H_0 为基准温度时的热焓；C_p 为定压比热容；T_0 为基准温度；f_S 为固相体积分数；L 为熔化潜热。

考虑宏-微观耦合模拟，需建立枝晶尖端生长动力学模型，用异质成核模型描述[14-15]：

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}(\Delta T)}=\frac{n_{max}}{\sqrt{2\pi}\,\Delta T_\sigma}e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T-\Delta T}{\Delta T_\sigma}\right)^2\right]} \tag{3}$$

$$N(\Delta T)=\int_0^{\Delta T}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}(\Delta T)}\mathrm{d}(\Delta T) \tag{4}$$

式中，$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}(\Delta T)}$表示非均匀形核时晶粒密度随过冷度的变化；$n$ 为形核密度；n_{max} 为最大形核密度；$\mathrm{d}(\Delta T)$ 为单位过冷度；ΔT 为平均过冷度；ΔT_σ 为过冷度标准方差。

1.4　边界及初始条件的设置

铸件与石墨模具间换热系数为 500 W/(m²·k)[16]，采用自然空冷，环境温度为 30 ℃，真空度为 0.9 Pa，辐射发射率 ε=0.85。浇口横截面积约 5 024 mm²，实际充型时间约 5 s，流体质量流量为 53.58 kg/s，并计算体积和密度，其计算公式如下[17]：

$$\text{Mass}=\text{Volume}\left[\frac{\text{Full limit}(\%)}{100}\right]\text{Density}[F(t)] \tag{5}$$

2　实验结果及讨论

2.1　流动性能的模拟验证

图 4 的模拟数据表明，凝固结束时，充型长度受合金类型与浇注温度的影响而呈现显著差异。具体而言，TC4 合金展现出较优的流动特性，而同等温度条件下，TC18 合金的流动性能则明显受限。

为优化 TC18 的流动性能，本研究系统性地在 1 700、1 770 及 1 840 ℃ 3 个浇注温度点进行了模拟分析。结果显示，随着浇注温度的升高，TC18 的流动性能呈现先增后减的非线性变化趋势，并在 1 770 ℃时达到峰值，与 TC4 在 1 700 ℃时的流动性能相当。基于此，后续模拟研究将统一采用 1 770 ℃作为 TC18 的标准初始浇注温度，以保障其最佳的流动性能。

2.2　铸件充型凝固过程的模拟结果

泵体充型过程的温度场如图 5 所示，对比了不同浇注系统下的充型动态。在传统浇注工艺中，金属液经主浇道直接注入模具型腔，在充型时间分别为 0.6 和 2.0 s 时，其充型速度分别达到 1.43 和 0.89 m/s。由于此工艺下金属液迅速抵达泵体下端面，引起严重的飞溅和紊流现象，显著增加了卷气和氧化夹渣的风险。此外，由于泵体内腔壁厚较薄，充液不均匀问题凸显，极易在该区域形成缩松和缩孔缺陷。

相比之下，优化后的浇注系统展现了显著的优势。在该系统中，金属液首先沿主浇道流入泵体下端面，随后通过横浇道实现自下而上的反重力充填。此过程中，充型速度平稳，分别为 0.88 和 0.59 m/s，有效避免了明显的紊流和飞溅现象，实现了型腔的均匀充填。

泵体大平面处冒口的设置是为了优化凝固过程，实现缺陷的有效转移[18]。如图 6 所示的凝固场对

中国知网　https://www.cnki.net

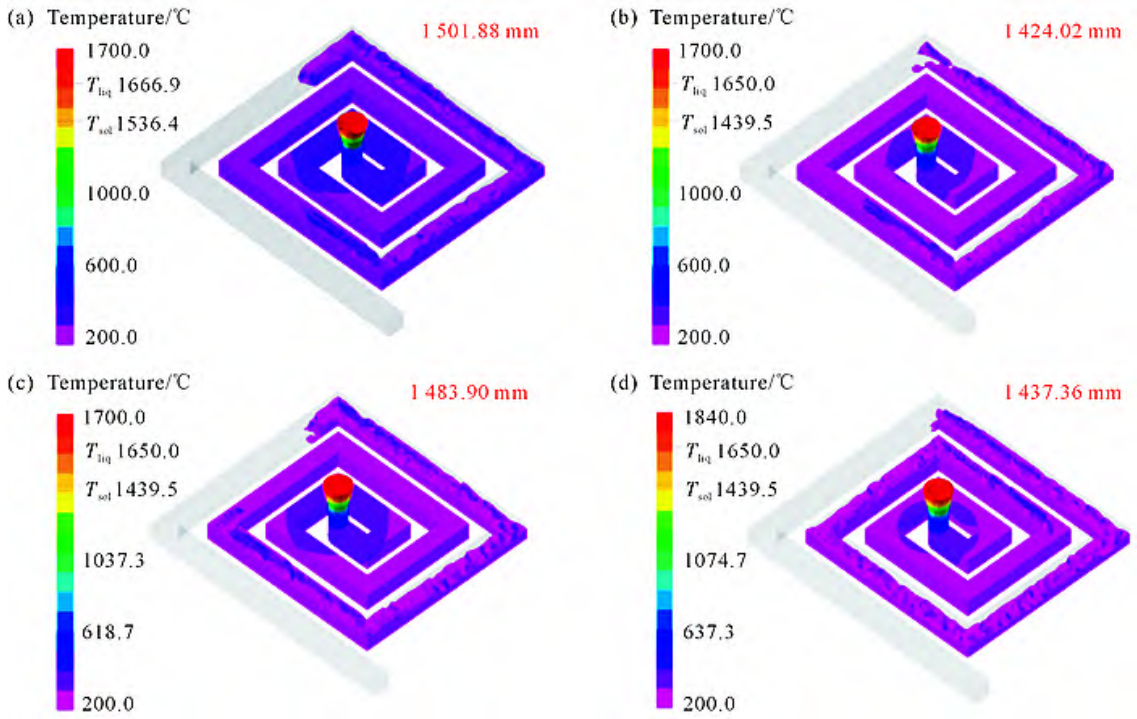

图 4 金属液流动性能模拟结果:(a) TC4-1 700 ℃; (b) TC18-1 700 ℃; (c) TC18-1 770 ℃; (d) TC18-1 840 ℃

Fig.4 Simulation results of the metal fluid flow performance: (a) TC4-1 700 ℃; (b) TC18-1 700 ℃; (c) TC18-1 770 ℃; (d) TC18-1 840 ℃

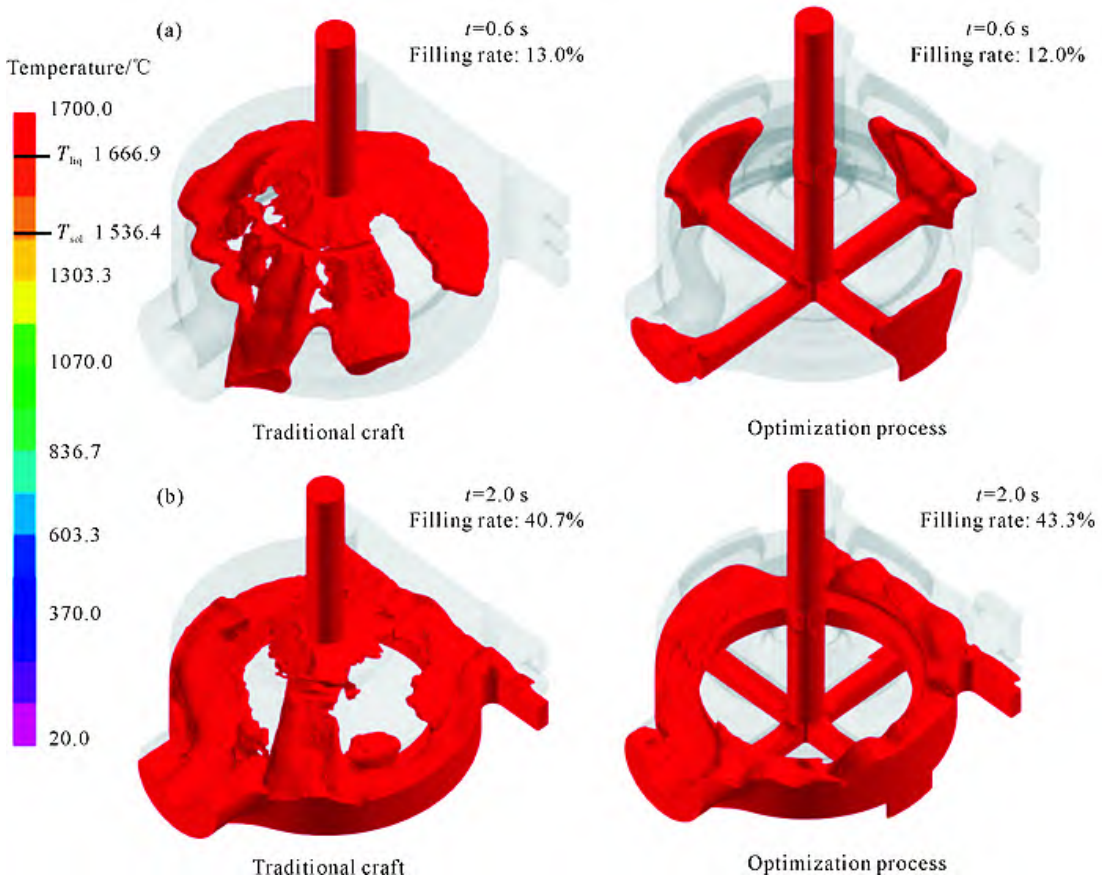

图 5 不同浇注系统的充型温度场对比:(a) 0.6 s; (b) 2.0 s

Fig.5 Comparison of the filling temperature fields of different pouring systems: (a) 0.6 s; (b) 2.0 s

比分析表明,通过优化浇注系统并增设冒口,泵体大平面处的热节得到了显著减小,尤其是下端厚大部位的热节改善效果尤为明显。然而,增设冒口后,热节向冒口处的转移幅度较小,补缩效果尚未达到理想状态,冒口设计仍有待进一步优化。

此外,从凝固时间的对比中可以清晰观察到,泵

中国知网 https://www.cnki.net

体厚大部位的冷却速度较周围区域缓慢。但在优化浇注系统后，厚结处的凝固时间有所缩短,“热岛”面积得到了有效缩减,进一步证实了优化措施的有效性。

2.3 铸件缺陷的对比分析

在传统浇注工艺中,金属液在充型阶段表现出明显的湍流特性，进而导致泵体内腔充液不均,加剧了该区域缩松和缩孔形成的风险,对铸件质量造成不利影响。

如图 8a 所示,缺陷主要分布在泵体大平面厚大部位及其内腔,与充型凝固过程的分析及缺陷模拟结果相吻合。优化浇注系统后,充型过程趋于平稳,泵体内腔缺陷显著减少，缺陷主要集中于泵体大平面，部分缺陷转移至冒口内，缩孔体积减少约74.3%,验证了新浇注系统的有效性。然而,冒口设计仍需进一步优化，以实现缺陷向冒口内的最大化转移,进而最小化铸件缺陷。

2.4 铸件性能的对比分析

二次枝晶间距(secondary dendrite arm spacing, SDAS)对铸件屈服强度和弹性模量有显著影响[19-20]。为此，本研究模拟了不同浇注系统下 SDAS 的大小及分布情况,如图 9 所示。截面分析表明,在传统浇注方案中,铸件内部 SDAS 较大,这可能是由于充型不平稳导致的局部冷却条件变化，进而形成热点或

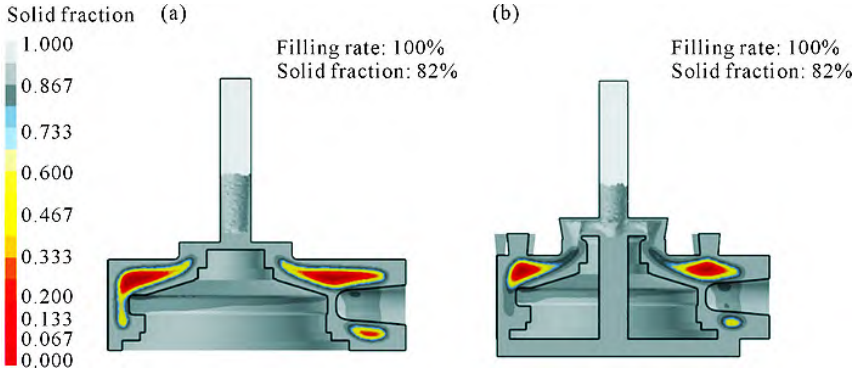

图 6 固相率 82%的凝固场对比:(a) 传统浇注系统;(b) 优化浇注系统

Fig.6 Comparison of solidification fields with an 82% solid fraction: (a) traditional pouring system; (b) optimized pouring system

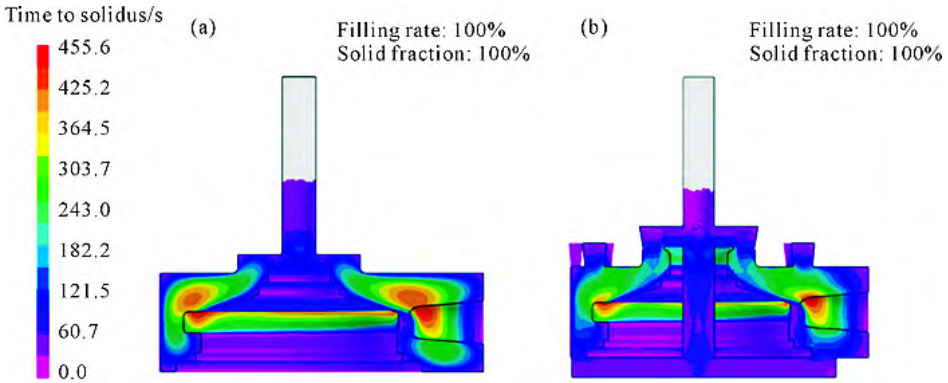

图 7 凝固时间对比:(a) 传统浇注系统;(b) 优化浇注系统

Fig.7 Comparison of solidification time: (a) traditional pouring system; (b) optimized pouring system

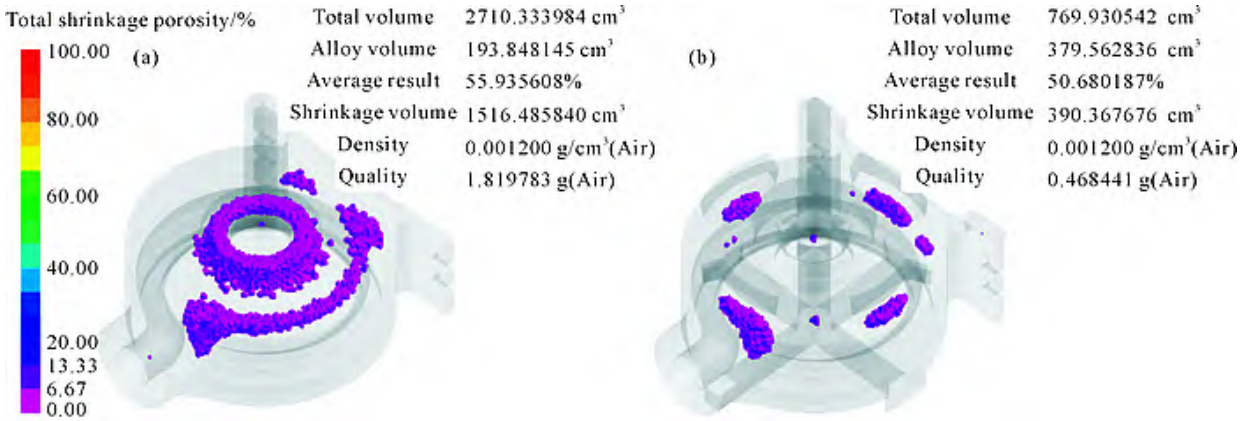

图 8 缺陷对比:(a) 传统浇注系统;(b) 优化浇注系统

Fig.8 Defect comparison diagram: (a) traditional pouring system; (b) optimized pouring system

中国知网　https://www.cnki.net

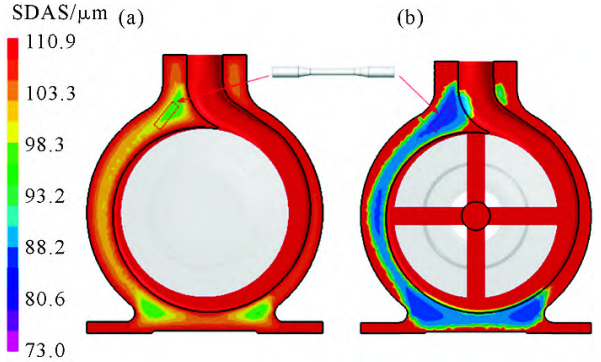

图 9 SDAS 对比:(a) 传统浇注系统;(b) 优化浇注系统
Fig.9 Comparison of the SDAS: (a) traditional pouring system; (b) optimized pouring system

冷区,影响了枝晶的正常生长。此外,湍流引起的气体卷入和杂质分布也是影响 SDAS 值的不可忽视因素。模拟结果显示,传统方案中的充型不平稳性对 SDAS 的大小和分布产生了显著影响。鉴于较小的枝晶间距有利于提升铸件力学性能,本研究对泵体关键部位进行了取样拉伸测试,结果如图 10 所示,验证了模拟结果的准确性。优化浇注工艺后,试样的抗拉强度提升了 15.5%,屈服强度增加了约 20.5%,伸长率提高了约 25%,进一步证实了优化措施的有效性。

2.5 铸件质量分析

通过对比传统与优化工艺下的浇注实验,旨在

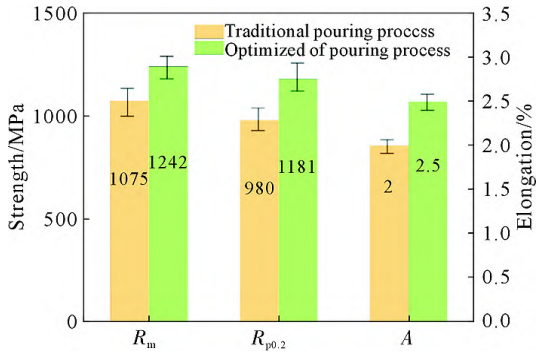

图 10 力学性能对比
Fig.10 Comparison of mechanical properties

验证仿真模拟的可行性与准确性。结果表明,泵体成形完整,表面质量无明显缺陷。为进一步评估铸件内部质量,采用 X 射线进行了观察,结果如图 11 所示。传统浇注工艺下,铸件内部存在较多气孔及缩松缩孔;而优化工艺显著提升了铸件内部质量,较大气孔消失,缩松缩孔数量大幅减少。X 射线探伤结果与模拟分析吻合,有效证实了仿真模拟的准确性和优化工艺的可行性。

3 结论

(1)采用 ProCAST 确定了 TC18 合金的最佳浇注温度为 1 770 ℃,在此温度下,其流动性等同于 TC4 合金在 1 700 ℃时的水平。

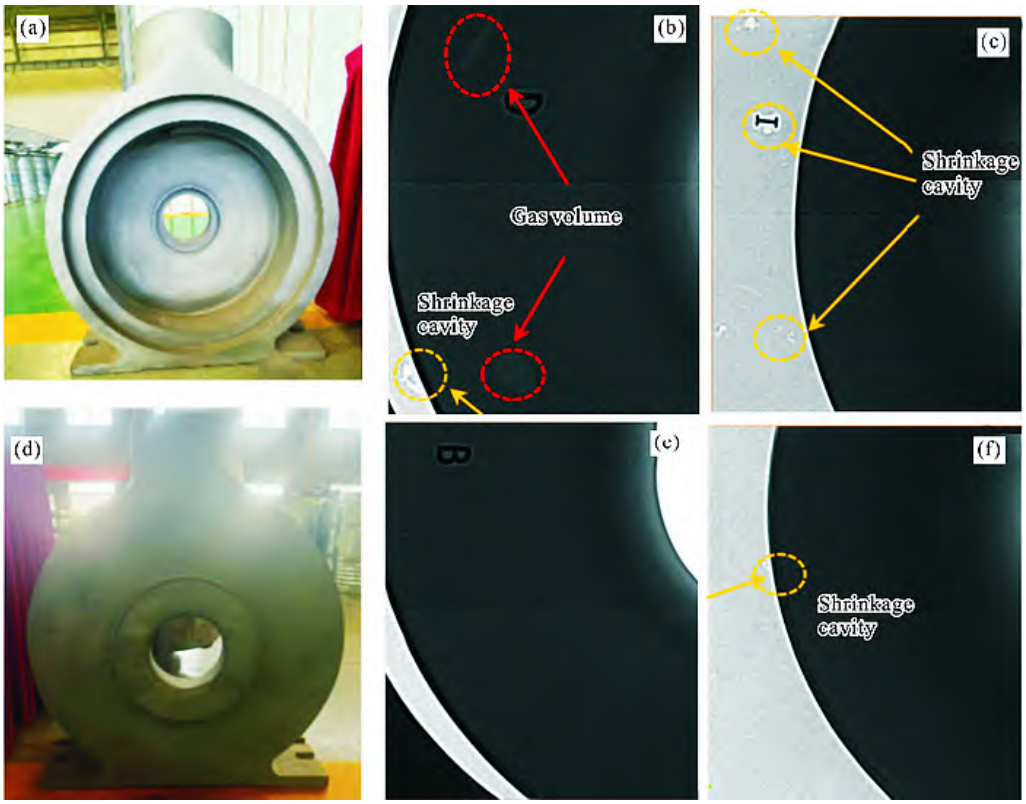

图 11 泵体铸件及 X 探伤检测:(a~c) 传统工艺;(d~f) 优化工艺
Fig.11 Pump body casting and X flaw detection diagram: (a~c) traditional process; (d~f) optimized process

中国知网 https://www.cnki.net

(2)构建了 TC18 泵体的三维模型，并对其浇注成形过程进行了仿真模拟。通过与传统浇注工艺的对比分析，提出了一种优化浇注工艺方案。该方案显著提升了充型过程的平稳性，使铸件缺陷率降低了约 74.3%，并细化了铸件的二次枝晶间距。

(3)通过实验验证和 X 射线检测，确认了仿真模拟的准确性以及优化工艺在提升铸件质量和力学性能方面的有效性。

参考文献：

[1] 任晓龙，陈宇，张胜，杨晶，王涛，赵宁. 航空用超大规格 TC18 钛合金棒材的制备及组织性能研究[J]. 钛工业进展，2024, 41(3): 14-18.
REN X L, CHEN J, ZHANG S, YANG J, WANG T, ZHAO N. Study on preparation, microstructure and mechanical properties of oversized TC18 titanium alloy bar for aviation[J]. Titanium Industry Progress, 2024, 41(3): 14-18.

[2] 颜孟奇，吴泽浩，佟健博，黄利军，黄驿胜. TC18 钛合金大尺寸 β 晶粒制备及典型织构对性能的影响[J/OL]. 金属学报，2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1139.TG.20240523.1117.002.html.
YAN M Q, WU Z H, TONG J B, HUANG L J, HUANG Y S. Preparation of large-sized β grains and effect of typical textures on properties of TC18 titanium alloy[J/OL]. Acta Metallurgica Sinica, 2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1139.TG.20240523.1117.002.html.

[3] 宋静思，张强，孙冕，侯景岳，张哲魁. 真空冷坩埚感应凝壳炉的发展趋势分析[J]. 真空，2024, 61(6): 61-66.
SONG J S, ZHANG Q, SUN M, HOU J Y, ZHANG Z K. Analysis of the development trend of vacuum cold crucible induction skull furnace[J]. Vacuum, 2024, 61(6): 61-66.

[4] 李瑞锋，张智鑫，唐斌，何书林，李金山. TC18 钛合金大规格棒材热变形行为研究进展[J]. 铸造技术，2024, 45(4): 316-327.
LI R F, ZHANG Z X, TANG B, HE S L, LI J S. Research progress on the thermal deformation behav ior of TC18 titanium alloy large-size bars[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 316-327.

[5] 董月. 近 β 型钛合金 TC18 热加工显微组织演化研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2024.
DONG Y. Study on microstructure evolution of near β type titanium alloy TC18 during hot processing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.

[6] 宋青竹，鄂东梅，王玲玲，乔忠路，张哲魁，孙足来. 真空电弧炉及凝壳炉的控制技术进展[J]. 真空，2022, 59(6): 1-9.
SONG Q Z, E D M, WANG L L, QIAO Z L, ZHANG Z K, SUN Z L. Progress in the control technology of vacuum arc remelting furnace and vacuum arc skull casting furnace[J]. Vacuum, 2022, 59(6): 1-9.

[7] 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, 40(10): 588-595.

[8] 王彦鹏，伞晶超，姚谦，孔祥卓. 钛合金泵体石墨型铸造工艺优化[J]. 铸造，2014, 63(8): 828-830.
WANG Y P, SAN J C, YAO Q, KONG X Z. Centrifugal casting process optimization of graphite mould for titanium alloy pump[J]. Foundry, 2014, 63(8): 828-830.

[9] 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: 520-528.

[10] 马静，王林春，张元光，崔新鹏，李峰. 某钛合金泵体特种砂型铸造工艺分析及优化[J]. 铸造，2024, 73(9): 1304-1310.
MA J, WANG L C, ZHANG Y G, CUI X P, LI F. Analysis and optimization of special sand casting process for a titanium alloy pump body[J]. Foundry, 2024, 73(9): 1304-1310.

[11] LI H, WANG B G, YANG J S, LIU X P, ZHANG J Y, YE R Q. Corrosion behavior of TC18 ti tanium alloy with different initial microstructures in salt spray[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 1619-1628.

[12] WANG C J, WANG H Y, CHEN G, ZHU Q, CUI L J, ZHANG P, DONG A P. New constitutive model for the size effect on flow stress based on the energy conservation law[J]. Materials, 2020, 13(11): 2617.

[13] 陈峥. 大铸锭凝固过程的模拟研究[D]. 上海：上海大学，2021.
CHEN Z. Simulation research on the heavy ingot solidification process[D]. Shanghai: Shanghai University, 2021.

[14] 温巨文，朱立光，张元杰，杨改彦. 基于 CAFE 法对连铸坯凝固组织模拟及影响因素研究[J]. 铸造技术，2017, 38(11): 2683-2686.
WEN J W, ZHU L G, ZHANG Y J, YANG G Y. Solidification microstructure simulation and influencing factors of continuous casting billets based on CAFE method[J]. Foundry Technology, 2017, 38(11): 2683-2686.

[15] ZHANG S Y, LI J S, KOU H C, YANG J R, YANG G, WANG J. Numerical modeling and experiment of counter-gravity casting for titanium alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85: 1877-1885.

[16] 孙冰，杨光，李渤渤，乔海滨，孙宏喆，王非. 薄壁框型钛合金铸件熔模铸造数值模拟及验证[J]. 铸造技术，2024, 45(10): 925-931.
SUN B, YANG G, LI B B, QIAO H B, SUN H Z, WANG F. Numerical simulation and verification of investment casting for thin-walled frame titanium alloy castings[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 925-931.

[17] PRAYOGA B T, DHARMASTITI R, AKBAR F, SUYITNO. Microstructural characterization, defect and hardness of titanium femoral knee joint produced using vertical centrifugal investment casting[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32, 149-156.

[18] 李峰，崔新鹏，南海. 基于 ProCAST 某环形钛合金铸件工艺分析及优化[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(12): 1469-1471.
LI F, CUI X P, NAN H. Simulation analysis and optimization of a ring-shaped titanium alloy castings based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12): 1469-1471.

[19] HE Y H, LIU J G, YU X H, LU D H, LIU S X. Performance enhancing of large aluminum alloy wheels through coupled solidification-fatigue stress simulation[J/OL]. International Journal of Metalcasting, 2025. https://doi.org/10.1007/s40962-024-

中国知网　https://www.cnki.net

01505-3.

[20] 徐宁,姜敏,王豪,钟华军,王康豪,王新华. 真空电弧重熔GH4061凝固过程的数值模拟 [J/OL]. 金属世界,2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1417.TG.20241210.1417.002.html.
XU N, JIANG M, WANG H, ZHONG H J, WANG K H, WANG X H. Numerical simulation of solidification process of vacuum arc remelting GH4061 [J/OL]. Metal World, 2025. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1417.TG.20241210.1417.002.html.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网 https://www.cnki.net