

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5192

ZTi55 钛合金精密铸造油箱骨架模拟仿真与晶粒尺寸研究

张鹏飞^{1,2}, 张林嘉^{1,3}, 周 瑜⁴, 孙 峰⁴, 王 军^{1,4}, 李金山^{1,4}

(1.西北工业大学 凝固技术全国重点实验室, 陕西 西安 710072 2. 中国航发贵州黎阳航空发动机有限公司, 贵州 贵阳 550014 3. 海装广州局驻贵阳地区军事代表室, 贵州 贵阳 550081 4. 西北工业大学重庆科创中心, 重庆 401135)

摘 要: 高温钛合金油箱骨架是航天飞行器的关重件, 其结构复杂、壁厚变化大, 采用精密铸造工艺生产具有显著优势。为解决 ZTi55 高温钛合金铸造性能差的难题, 通过铸造模拟仿真油箱骨架中的筒形结构确定铸造工艺, 分析了铸件结构与模拟仿真温度场的关系, 并结合铸件解剖结果分析了模拟仿真铸件不同位置温度场与晶粒尺寸的对对应关系。模拟结果揭示了铸件不同位置在冷却凝固特性及晶粒尺寸上的显著关联, 最后充型的铸件弧面薄壁结构最先发生降温凝固, 晶粒尺寸最为细小, 约为 305 μm ; 最先充型的厚大壁厚位置降温速率最慢, 晶粒尺寸最为粗大, 超过 900 μm 。铸件壁厚与凝固特性、晶粒尺寸呈显著相关关系, 即壁厚越大, 铸件所需的凝固时间越长, 冷却速率相应越慢, 最终形成的晶粒尺寸也越粗大。

关键词: 钛合金; 精密铸造; 高温钛合金; 模拟仿真

中图分类号: TG146.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)09-0865-08

Numerical Simulation and Grain Size Investigation of the Precision-cast Fuel Tank Frame of ZTi55 Titanium Alloy

ZHANG Pengfei^{1,2}, ZHANG Linjia^{1,3}, ZHOU Yu⁴, SUN Feng⁴, WANG Jun^{1,4}, LI Jinshan^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. AECC Guizhou Liyang Aero Engine Co., Ltd., Guiyang 550014, China; 3. Naval Equipment Department, Guangzhou Bureau, Military Representative Office in Guiyang Area, Guiyang 550081, China; 4. Innovation Center NPU Chongqing, Chongqing 401135, China)

Abstract: As a key critical component of aerospace vehicles, high-temperature titanium alloy fuel tank frames have complex structures and significant variations in wall thickness, and this structural characteristic makes their fabrication via the precision casting process highly advantageous. To address the issue of the poor castability of ZTi55 high-temperature titanium alloys, the casting process was determined through a casting simulation conducted on the cylindrical structure of the fuel tank frame, and the relationship between the casting structure and the simulated temperature field was analysed. Furthermore, combined with the results of the casting dissection, the corresponding relationships between the simulated temperature field at different positions of the casting and the grain size were also analysed. The simulation results reveal significant correlations between the cooling and solidification characteristics and the grain size at different positions during casting. Specifically, the curved thin-walled structure of the casting that is filled last undergoes cooling and solidification first and results in the finest grain size, at approximately 305 μm , whereas the thick-walled section filled first has the slowest cooling rate and features the coarsest grain size, exceeding 900 μm . Additionally, the wall thickness of the casting is significantly correlated with its solidification characteristics and grain size, where the greater the wall thickness is, the longer the solidification time required for the casting, the lower the cooling rate, and the coarser the grain size that ultimately forms.

Key words: titanium alloy; precision casting; high-temperature titanium alloy; numerical simulation

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD0618600)

作者简介: 张鹏飞, 1984 年生, 研究员. 研究方向为航空航天材料先进制造技术. Email: pfzhang460@163.com

通信作者: 李金山, 1966 年生, 教授. 研究方向为航空航天高性能金属结构材料及其精确热成形技术. Email: ljsh@nwpu.edu.cn

引用格式: 张鹏飞, 张林嘉, 周瑜, 孙峰, 王军, 李金山. ZTi55 钛合金精密铸造油箱骨架模拟仿真与晶粒尺寸研究[J]. 铸造技术, 2025, 46(9): 865-872.

ZHANG P F, ZHANG L J, ZHOU Y, SUN F, WANG J, LI J S. Numerical simulation and grain size investigation of the precision-cast fuel tank frame of ZTi55 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(9): 865-872.

油箱骨架是航天飞行器的关键零部件,同时具备承力结构件与燃料储备容器功能。航天飞行器工作周期内长时间在大气环境下高速飞行,油箱骨架结构件也同时承受高温和高应力载荷,这对合金材料的耐高温性能和零部件结构稳定性都有很高的要求^[1-3]。钛合金是生产油箱骨架的首选材料,一般采用 TA15 钛合金,为适配航天飞行器飞行时间更长、飞行速率更快的发展趋势,需要采用耐高温性能更优异的 Ti55 合金^[4]。

钛合金油箱骨架是典型的大型、复杂、薄壁结构,若采用锻造+机械加工的钣金工艺生产,面临变形抗力大、机械加工困难等问题,材料利用率低、生产周期长、成本高^[5-6]。而钛合金精密铸造技术是一种近净成型技术,工艺成熟、成本低、精度高,是生产此类钛合金结构件的首选工艺^[7-8]。大型航空发动机机匣、涡轮叶片等已广泛采用此生产工艺。然而,钛合金精密铸造也存在一些亟待解决的问题,如材料完整充型困难^[9-13],尤其是近年来推广应用于航空航天铸件中的 ZTi55、ZTi60、ZTi65 等高温钛合金,其合金元素种类多、含量高,铸造性能较差、工艺不成熟,更容易出现晶粒粗化、欠铸等缺陷^[14]。研究发现,这些缺陷可以通过铸造模拟优化浇注系统和浇注工艺来解决^[15-16]。朱小平^[17]借助模拟仿真设计浇注系统,并开展工艺验证,获得了完整充型的典型钛合金铸件。数值模拟为精密铸造工艺研究提供了一种有效替代途径,能有效弥补传统试验依赖经验积累、前期投入成本高且研发周期长的局限。当前,该技术已被广泛应用于实际铸造工艺的开发环节,能够在实际试验前预测熔模铸造过程中的充型、凝固过程及缩孔、裂纹等常见缺陷的形成与分布特征^[18]。Karwiński 等^[19]利用 Flow3D 计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 软件对离心铸造过程进行分析,计算出金属液在模具内的流动速度范围,以及达到预设转速后模具内的金属液压力,获得离心力作用下钛合金熔液的速度场与压力场。Tao 等^[20]基于弱可压缩模型 (weakly compressible model, WCM) 和非均匀有限差分网格 (ununiformed finite difference mesh, UFDM) 自主开发专用软件,用于大尺寸薄壁钛合金机匣熔模铸造过程的数值模拟,确定了合理工艺窗口,预测了构件的充型行为、凝固规律及潜在缺陷,其中缩孔缺陷预测与 X 射线检测结果吻合度高,验证了模拟可靠性。

本研究以部分油箱骨架的筒形结构为研究对象,选用 ZTi55 钛合金作为合金材料,通过模拟铸造-浇注验证-铸件解剖获得工艺窗口,对比铸件浇

注模拟结果与实际铸件解剖不同位置的组织,建立冷却条件与铸造 ZTi55 合金组织之间的关系,指导铸造工艺设计。

1 实验材料与方法

1.1 铸件模型及材料

油箱骨架筒形结构三维模型如图 1a~c 所示,最大外径 410 mm,高 315 mm,最小壁厚 3 mm,最大壁厚与最小壁厚差达到 10 mm 以上,筒形结构底部存在回转结构,是典型的变壁厚复杂型腔结构件,这为精密铸造浇注系统设计与完整充型带来了很大挑战。为便于分析铸造模拟结果,本研究将筒形件按照不同位置结构差异分为如图 1c 所示的筒底部 A 区、筒壁 B 区、筒口 C 区 3 个区域。A 区特征为弧面+回转结构的复杂结构,弧面壁厚约为 5 mm,外筒壁厚约为 8 mm;B 区特征为简单的薄壁圆筒结构,平均壁厚约为 8 mm;C 区特征为简单的厚壁圆筒结构,最大壁厚约为 23 mm。

实验选用 ZTi55 合金,该合金成分由 Ti55 合金调整而来,是典型的多组元高温钛合金,材料热力学计算表明合金的液相线为 1 680.5 °C,固相线为 1 641.4 °C,β→α 相变点约 1 030 °C,具体成分如表 1 所示。

表1 ZTi55合金成分
Tab.1 Chemical composition of the ZTi55 alloy
(mass fraction/%)

Element	Al	Mo	Nb	Si	Sn	Ta	Zr	C	O
Content	5.7	0.7	0.72	0.16	2	0.5	3	0.05	0.06

1.2 铸造模拟方法

根据筒形铸件结构特点,设计了如图 1d 所示的底注式重力浇注系统模型,底部环形浇道可保证铸件不同位置同时充型,浇口位置高于铸件顶部 220 mm,可保证在浇注后期,金属液具有一定压力实现完整充型。采用 ProCAST 软件进行铸造模拟,型壳选用陶瓷型模壳,设置金属液温度为 1 730 °C,为增强金属液的流动性,减少铸件内部热裂倾向,模壳初始温度设置为 700 °C,浇注时间为 6.5 s。

1.3 铸造工艺流程

铸造工艺验证采用的主要工序为 3DP 制模-制壳-脱蜡焙烧-熔炼浇注-整理。3DP 制模材料为 PMMA 粉末,表面进行浸蜡处理;制壳材料为面层硅溶胶+氧化钪粉+氧化钪砂,背层材料为硅溶胶+透气性背层粉+铝矾土砂,层数为 10.5 层;模壳在脱蜡釜中脱蜡后进行焙烧,在 1 050 °C 下焙烧 2 h 后,随炉空冷至室温出炉;熔炼浇注采用模拟浇注工艺参数、重力浇注工艺,设备为 150 kg 真空自耗凝壳炉,

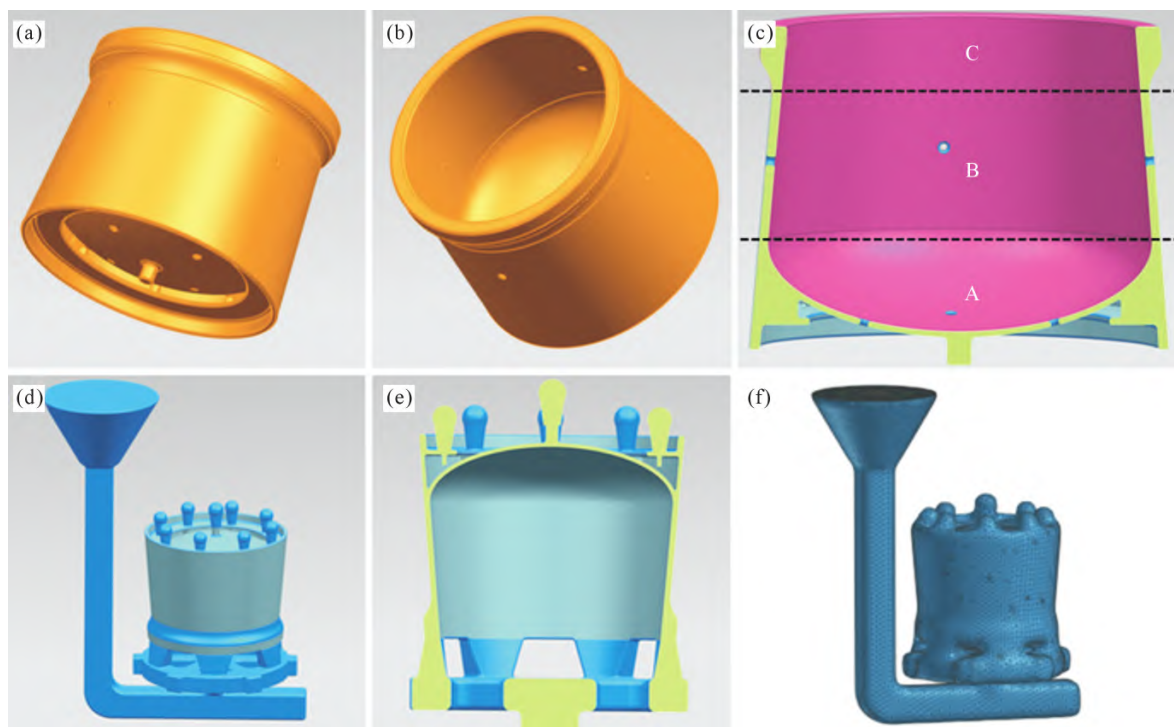


图1 铸件模型分析与浇注系统设计:(a~c) 油箱骨架筒形结构三维模型;(d~f) 底注式重力浇注系统模型
Fig.1 Analysis of the casting model and design of the gating system: (a~c) 3D models of the cylindrical structure for the oil tank framework; (d~f) models of the bottom-pour gravity gating system

型壳预热温度为 700°C , 坩埚翻转时间约为 6.5 s ; 浇注完成后, 模壳温度冷却至 800°C 时打开炉门出炉, 出炉后进行清壳-切割浇冒系统-吹砂-打磨-酸洗等一系列整理工序, 获得最终的铸件。

1.4 分析测试方法

对经过整理的筒形铸件 A、B、C 3 个不同结构区域(图 1c)进行等间距解剖取样, 分别取 3 个样品, 间距不小于 100 mm 。将取下的样品进行打磨-抛光-腐蚀后获得金相样品, 利用 Leica DMI8C 金相显微镜进行拍摄。采用 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=2:3:16$ 的混合腐蚀溶液, 腐蚀温度为室温, 时间约为 20 s 。

2 实验结果及讨论

2.1 模拟结果分析

2.1.1 充型模拟结果分析

如图 2 所示, 金属液从底部浇口进入铸件型腔, 从浇注系统底部向上充型, 沿筒壁型腔向上平稳顺利充型, 用时约 1.5 s 。这种快速平稳的充型有利于减少金属液交汇导致的紊流现象, 从而抑制气孔产生, 不容易引起欠铸问题。

2.1.2 温度场模拟结果分析-冷却曲线

如图 3 所示, 铸件充型后首先从最后充型的 A 区(筒形底部)开始凝固, 这是由于筒形底部弧面与其他位置相比更薄。接着, 壁厚更大的 B 区筒壁开始凝固, 最后凝固的区域是 C 区筒口位置, 该位置

属于厚大区域, 并且与更厚大的浇口相连, 冷却速率最慢。铸件从金属液完全充填到铸件完全凝固用时约 270 s 。

图 4 为铸件凝固过程的温度分布, 与凝固分数分布相对应, 降温速率最快的区域是相对壁厚最薄的 A 区, 大部分区域从液相温度到相变点以下用时约 120 s 。降温速率稍慢的是壁厚适中的 B 区, 从液相温度到相变点以下约用时 254 s ; 降温速率最慢的是厚大且与浇口相连的 C 区, 从液相温度到相变点以下用时超过 $1\ 160\text{ s}$ 。在钛合金固态相变过程中, 一般在相变点以上保温时间越长, β 晶粒越容易长大; 而降温速率越快, 越有利于 β 晶粒形核, 从而抑制 β 晶粒长大。

2.2 铸件解剖分析

图 5 为经 3DP 制模-制壳-脱蜡焙烧-熔炼浇注-整理工艺流程获得的油箱骨架筒形结构件。铸件完整充型, 表面质量好, 无浇不足或欠铸问题, 表明浇注系统及浇注工艺设计合理。

铸件经过解剖后获得了图 6~9 不同位置的金相组织, 所有组织均为典型的魏氏组织, 区别在于不同位置晶粒尺寸存在较大差异。图 6 是 A 区中与筒身相连区域不同位置的金相组织, 该区域晶粒尺寸相近, 平均晶粒尺寸约为 $534\text{ }\mu\text{m}$ 。图 7a~c 为 A 区弧面中不同位置的金相组织, 弧面中部薄壁晶粒尺寸较为细小, 约为 $305\text{ }\mu\text{m}$ 。图 7d 和 e 为弧面边缘厚壁

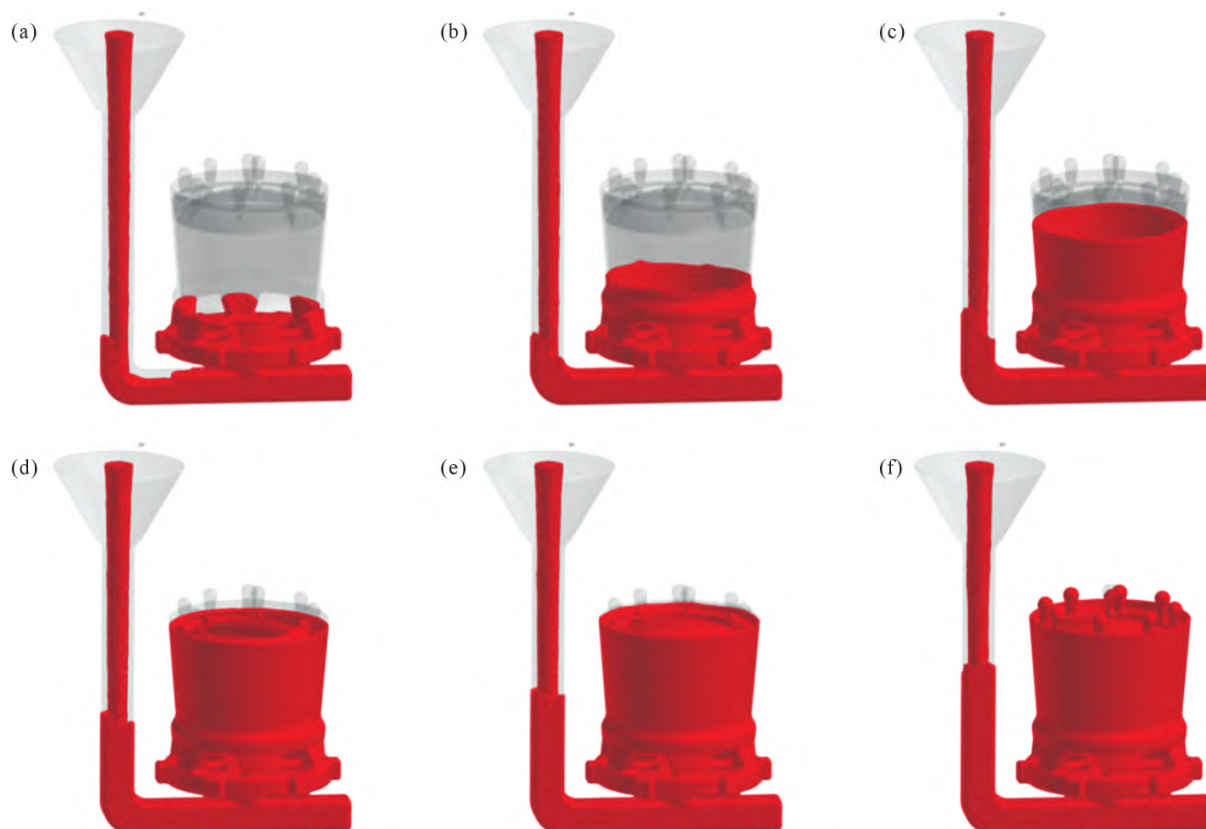


图2 浇注充型过程:(a) 2.5 s;(b) 3 s;(c) 3.5 s;(d) 3.6 s;(e) 3.8 s;(f) 4 s

Fig.2 Pouring and mold filling process: (a) 2.5 s; (b) 3 s; (c) 3.5 s; (d) 3.6 s; (e) 3.8 s; (f) 4 s

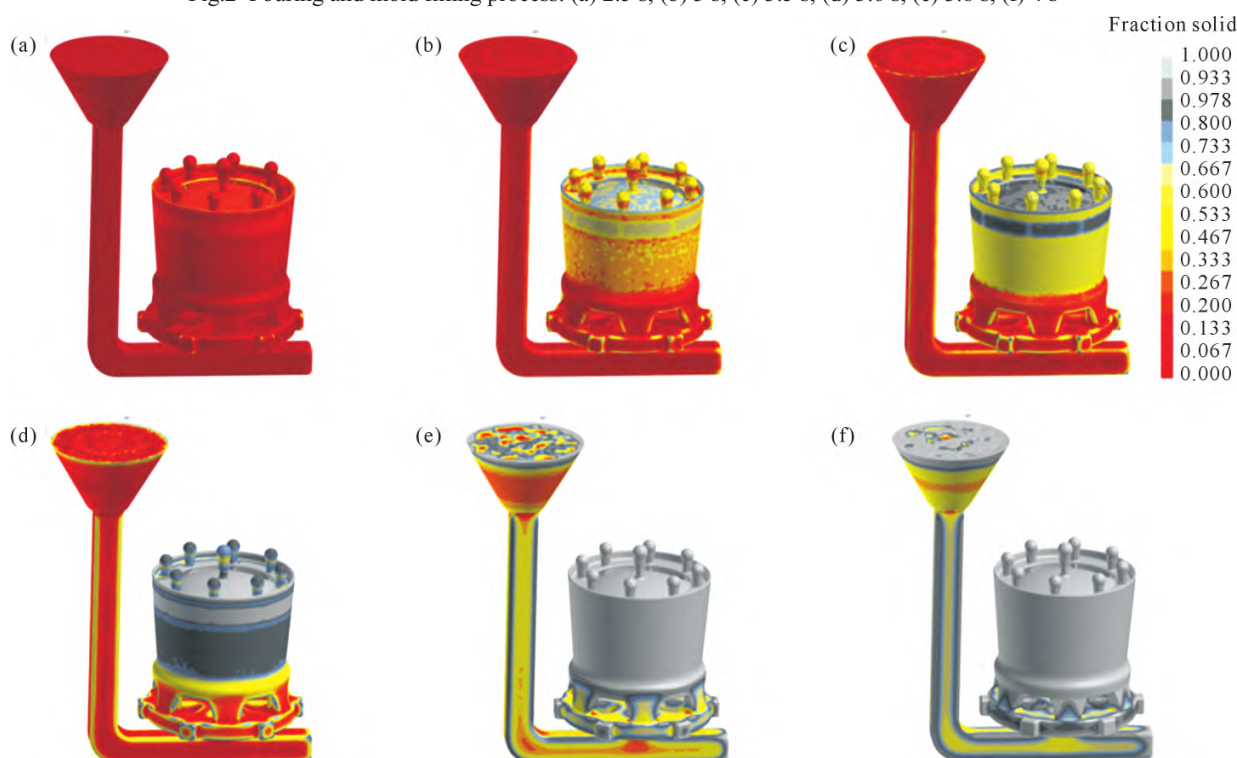


图3 浇注过程凝固分数分布图:(a) 9 s;(b) 17 s;(c) 24 s;(d) 43 s;(e) 146 s;(f) 274 s

Fig.3 Distribution diagrams of the solidification fraction during the pouring process: (a) 9 s; (b) 17 s; (c) 24 s; (d) 43 s; (e) 146 s; (f) 274 s

区域的金相组织,晶粒尺寸比弧面中部更为粗大,约为 $560\text{ }\mu\text{m}$ 。图8是B区筒身不同位置的金相组织,晶粒尺寸分布均匀,约为 $486\text{ }\mu\text{m}$ 。图9是C区

厚壁的金相组织,其中图9a~c是远离浇口位置的金相组织,图9d~f是连接浇口不同区域的金相组织,从图中可以看出,远离浇口与浇口位置的晶粒尺寸

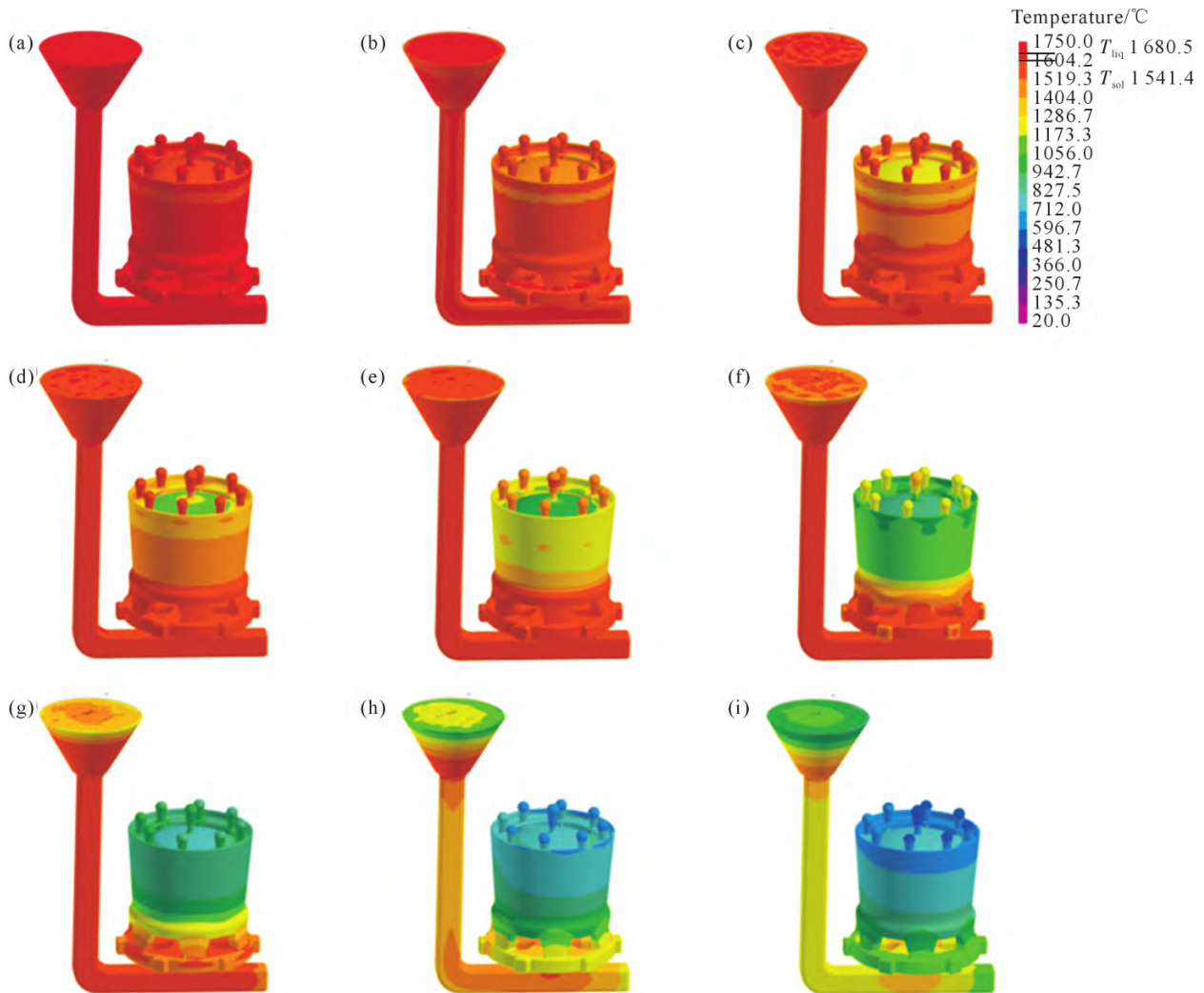


图4 凝固过程铸件温度分布:(a) 9 s;(b) 43 s;(c) 70 s;(d) 90 s;(e) 136 s;(f) 254 s;(g) 543 s;(h) 1 165 s;(i) 1 442 s

Fig.4 Temperature distribution diagrams of the castings during the solidification process: (a) 9 s; (b) 43 s; (c) 70 s; (d) 90 s; (e) 136 s; (f) 254 s; (g) 543 s; (h) 1 165 s; (i) 1 442 s



图5 整理后的油箱骨架筒形结构铸件

Fig.5 Finished cylindrical structural casting of the oil tank framework

均较为粗大,且差异较小,远离浇口的晶粒尺寸约为 $890\ \mu\text{m}$,靠近浇口的晶粒尺寸约为 $961\ \mu\text{m}$ 。

铸件不同位置的金相组织与模拟结果中凝固过程温度场分布情况相吻合。冷却速率最快的A区

中晶粒尺寸最为细小,其中冷速最快的弧面中心晶粒最为细小,相应的筒壁晶粒也较为细小。冷速最慢的C区晶粒尺寸最粗大,值得注意的是,连接浇口与远离浇口的位置晶粒尺寸差异较小,这可能是由于C区整体冷却速率较慢,冷却至相变点以下的时间接近,因此晶粒尺寸差异较小。B区冷却速率介于A区和C区之间,因此筒身的晶粒尺寸介于A区薄壁区与C区厚壁区之间,而且由于回转结构原因,冷却条件相同,B区不同位置的晶粒尺寸接近。

3 结论

(1)模拟结果表明,筒形铸件不同位置冷却速率具有显著差异,最后充型的薄壁区域最先冷却凝固,最先充型的厚壁区域最后冷却凝固。

(2)结合模拟仿真结果及解剖组织分析,最后充型的复杂结构区中薄壁弧面区域冷却速率最快,晶粒尺寸最细小,约为 $305\ \mu\text{m}$;最先充型的厚壁区域

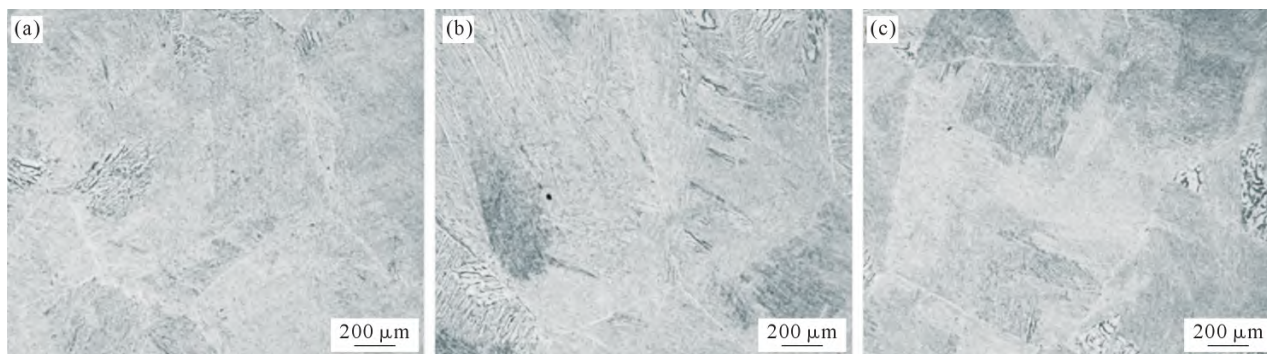


图 6 A 区中筒壁不同位置微观组织:(a~c) OM 照片

Fig.6 Microstructures at different positions of the cylinder wall in area A: (a~c) OM images

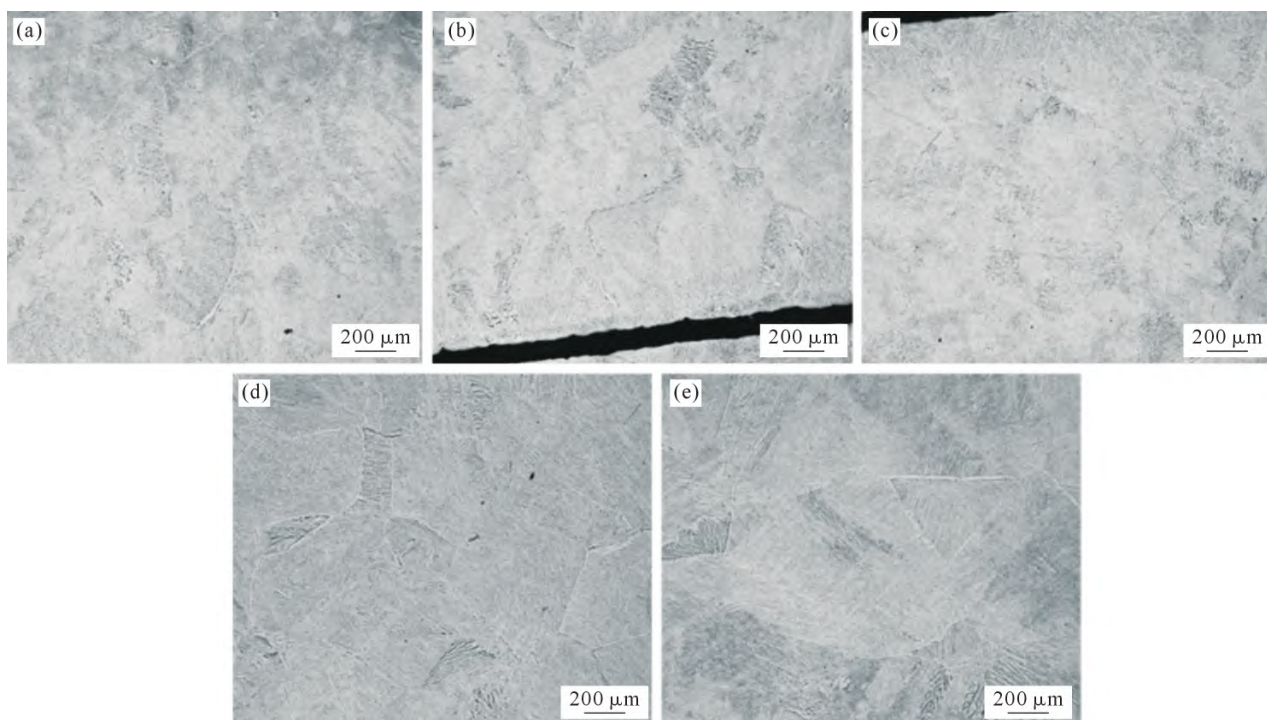


图 7 A 区中弧面不同位置微观组织:(a~c) 弧面薄壁中部;(d, e) 弧面边缘厚壁

Fig.7 Microstructures at different positions of the curved surface in area A: (a~c) middle part of the thin wall on the curved surface; (d, e) thick wall at the edge of the curved surface

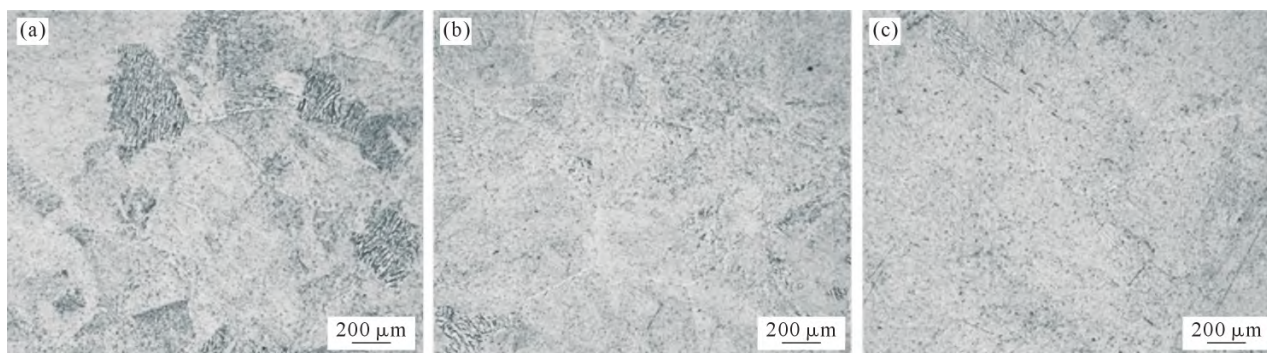


图 8 B 区筒身不同位置组织:(a~c) OM 照片

Fig.8 Microstructures at different positions of the cylinder body in area B: (a~c) OM images

冷却速率最慢,晶粒尺寸最粗大,超过 900 μm 。

(3)铸件不同位置呈现铸件壁厚越大,铸件凝固时间越长,冷却速率越慢,晶粒尺寸越粗大的规律。后续工艺优化可考虑在此晶粒粗大位置添加激冷装置。

参考文献:

- [1] ZHAO J, ZHANG Z Y, LIU S B, SHI K, BAO C L, NING Z S, YAN P, WANG L, LOU Y C. Elimination of misrun and gas hole defects of investment casting TiAl alloy turbocharger based on numerical simulation and experimental study[J]. China Foundry, 2020, 17: 29-34.

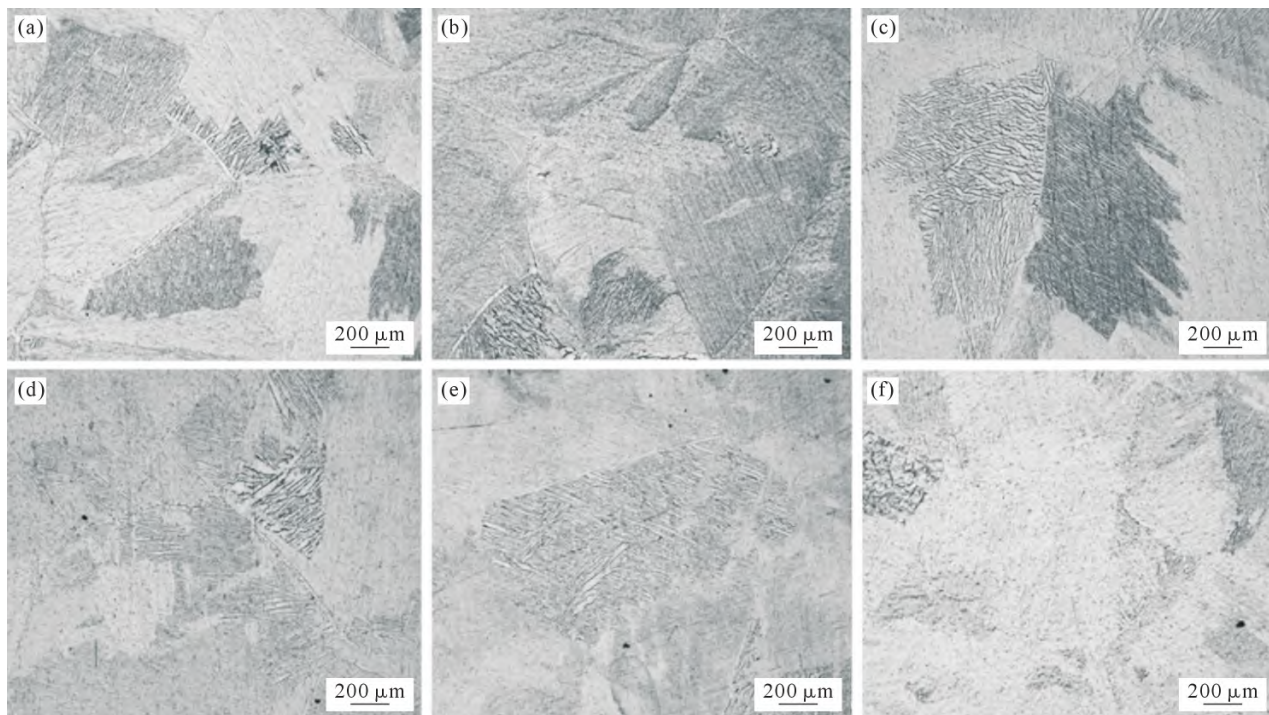


图9 C区中不同位置显微组织:(a~c) 远离浇口不同位置;(d~f) 连接浇口位置

Fig.9 Microstructures at different positions in area C: (a~c) different positions far from the gate; (d~f) positions connected to the gate

- [2] 谢华生,刘时兵,赵军,张志勇,包春玲. TiAl 合金精密成形技术发展现状及展望[J]. 精密成形工程, 2022, 14(1): 44-54.
XIE H S, LIU S B, ZHAO J, ZHANG Z Y, BAO C L. Development status and prospect of precision forming technology for TiAl alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(1): 44-54.
- [3] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 38-52.
FAN Z Z. Application status and development trend of investment casting in aerospace industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(9): 38-52.
- [4] 王清江,刘建荣,杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 1-26.
WANG Q J, LIU J R, YANG R. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 1-26.
- [5] 刘云超,李弘,刘珍君,孟泽炎,程永建,王凯. ZTi60 钛合金大型构件熔模精铸工艺及组织性能研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 994-1003.
LIU Y C, LI H, LIU Z J, MENG Z Y, CHENG Y J, WANG K. Study on the investment casting process, microstructure and mechanical properties of large-sized structural components in ZTi60 titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 994-1003.
- [6] 刘云超,李弘,刘珍君,孟泽炎,朱小平. ZTi55A 钛合金大型骨架熔模铸造及后处理工艺研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(12): 1160-1168.
LIU Y C, LI H, LIU Z J, MENG Z Y, ZHU X P. Study on the investment casting and posttreatment of a large skeleton in ZTi55A titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1160-1168.
- [7] CHEN K Y, KHOIRUDDIN S, LIN C F, HO M H, HUANG C F, LEE S C, CHAN C W, MARDIONO I, FUH Y K. Comparative evaluation of insulation cotton configurations on the investment casting quality of industrial valve parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134: 1179-1193.
- [8] SUZUKI K I. The high-quality precision casting of titanium alloys[J]. JOM, 1998, 50: 20-23.
- [9] 王迪,李九霄,董安平,隋大山,刘明亮,王旭彤,孙红飞,赵志伟. 熔模铸造型壳用材料研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 205-216.
WANG D, LI J X, DONG A P, SUI D S, LIU M L, WANG X T, SUN H F, ZHAO Z W. Research progress of materials for investment casting molding shells[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(4): 205-216.
- [10] DUAN B H, MAO L, LYU M R, YANG Y C, FENG Q S, LI H T, JI C C, LU X G, CHEN G Y, HOU X M, LI C H. Interface interaction during the preparation of TiAl-(Nb, V) quaternary intermetallic single crystals by directional solidification based on Y_2O_3 doped $BaZrO_3/Al_2O_3$ composite ceramic mold[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2023, 43(11): 5032-5043.
- [11] FASHU S, LOTOTSKYY M, DAVIDS M W, PICKERING L, LINKOV V, SUN T, TANG R H, XIAO F M, FURSIKOV P V, TARASOV B P. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108295.
- [12] CHEN G Y, GAO P Y, KANG J Y, LI B T, ALI W, QIN Z W, LU X G, LI C H. Improved stability of $BaZrO_3$ refractory with Y_2O_3 additive and its interaction with titanium melts[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 726: 403-409.
- [13] 常化强,孙冰,孙宏喆,穆晓辉,李渤渤,乔海滨. 涂层在钛合金金属型铸造中的应用研究[J]. 铸造工程, 2023, 47(4): 1-4.
CHANG H Q, SUN B, SUN H Z, MU X H, LI B B, QIAO H B. Application of coating technology on metal mold casting of titanium

- um alloy[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(4): 1-4.
- [14] 王冰, 相志磊, 周宗熠, 申高亮, 黄景存, 韩竟俞, 王安东, 陈子勇. 耐 600 °C 及以上高温钛合金研究进展[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(2): 42-50, 71.
- WANG B, XIANG Z L, ZHOU Z Y, SHEN G L, HUANG J C, HAN J Y, WANG A D, CHEN Z Y. Research status and prospect of titanium alloys resistant to high temperature of 600 °C and above[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(2): 42-50, 71.
- [15] 王晨旭, 丁鑫, 王新秀, 张永, 于忠军, 夏峰, 方虹泽, 陈瑞润. 立式离心浇注精密铸造技术研究进展[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 932-944.
- WANG C X, DING X, WANG X X, ZHANG Y, YU Z J, XIA F, FANG H Z, CHEN R R. Research progress in vertical centrifugal casting precision casting technology[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 932-944.
- [16] 樊洪智, 董红瑞, 赵天闻, 朱传志, 李勇, 梁永锋, 王红卫, 李小明. TiAl 合金叶片类构件成形工艺研究进展[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(8): 1-13.
- FAN H Z, DONG H R, ZHAO T W, ZHU C Z, LI Y, LIANG Y F, WANG H W, LI X Q. Research progress on forming process of TiAl alloy blade components[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(8): 1-13.
- [17] 朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- ZHU X P. Research on integral casting technology of large weight and high precision complex titanium alloy casing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [18] 王立召, 王琳, 王子阳, 刘鑫霞, 薄煜, 朱春雷. Y 型管熔模铸造数值模拟工艺研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(10): 981-987.
- WANG L Z, WANG L, WANG Z Y, LIU X X, BO Y, ZHU C L. Study on the numerical simulation technology of Y-tube investment casting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 981-987.
- [19] KARWIŃSKI A, LEŚNIEWSKI W, WIELICZKO P, MAŁYSZA M. Casting of titanium alloys in centrifugal induction furnaces[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2014, 59(1): 403-406.
- [20] 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.

(责任编辑: 李亚敏)