DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4175

高出品率超大型钛合金中介机匣数值模拟工艺研究

龙兴权,高晓慧,李鹏超,付志鹏
(贵州安吉航空精密铸造有限责任公司,贵州 安顺 561000)

摘　要:某超大型钛合金中介机匣铸件是某航空发动机中的关键部件,结构复杂,壁厚截面差值大,是目前航空发动机尺寸和质量最大的中介机匣铸件。传统单股进水工艺方案易导致机匣铸件支板、分流环及外环等多处形成汇流,充型困难,易产生飞溅、冷隔等铸造缺陷。利用 ProCAST 模拟软件对熔模铸造工艺下中介机匣铸件进行数值模拟,采用底注式离心浇注,设置不同股数进水工艺和浇道数量比,研究对比不同设计方案下金属液在充型和凝固过程中的流场、温度场变化,选择最优浇注工艺方案,以期实现超大型钛合金中介机匣铸件的完整成型。模拟结果表明,利用铸件本身结构特点,采用 4 股进水工艺,并增加缝隙浇道,当直浇道:横浇道:内浇道数量比为 1.0:1.2:2.5 时,铸件出品率达到 57%。随后对该工艺方案进行了试验验证,得到满足相关技术协议规定的铸件,验证了模拟结果的可行性和准确性。

关键词:超大型;钛合金;铸造模拟;方案设计;出品率

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0988-06

Study on the Numerical Simulation Process of Oversized Titanium Alloy Intermediary Casing with a High Yield Rate

LONG Xingquan, GAO Xiaohui, LI Pengchao, FU Zhipeng
(Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd., An'shun 561000, China)

Abstract: Oversized titanium alloy intermediary casing casting is a key component of aero engines, with a complex structure and greatly varying wall thickness, which is the largest and heaviest intermediary casing casting in aviation engines at present. Traditional single-strand water inlet process schemes are prone to causing converging flows at multiple locations, such as the struts, splitter rings, and outer rings of the casing, leading to difficulties in mold filling and susceptibility to casting defects such as splashing and cold shuts. To address this, numerical simulations of the investment casting process for intermediate casing casting were conducted via ProCAST simulation software. Bottom-pour centrifugal casting was employed, with different numbers of water inlet strands and gate ratios being set. Changes in the fluid field and temperature field during the mold filling and solidification processes under different design schemes were studied and compared to select the optimal pouring process scheme. This aimed to achieve complete molding of the superlarge titanium alloy intermediate casing, paving the way for efficient aerospace engine production. The simulation results indicate that by utilizing the structural characteristics of the casting itself and adopting a four-strand water inlet process with additional slot gates, setting the ratio of sprue to runner to ingate as 1.0:1.2:2.5, the casting yield reaches 57%. Subsequent experimental validation of this process scheme yields castings that meet the relevant technical agreement specifications, with experimental results aligning with the simulation outcomes, thereby verifying the feasibility and accuracy of the simulation results.

Key words: oversized; titanium alloy; casting simulation; scheme design; yield rate

钛合金具有密度小、熔点高、比强度高、浇铸过热度低、耐腐蚀性强及韧性较好等特点,被广泛应用于航空、航天、现代兵器、船舶等领域[1-2]。随着航空与航天工业技术的发展,对装备材料性能的需求日益严苛,特别是对载荷承受能力、结构强度及刚性等方面提出了更高要求[3-5]。在此背景下,大型且结构

收稿日期:2024-09-13

作者简介:龙兴权,1982 年生,本科,高级工程师.主要从事钛合金精密铸造工艺设计等模拟方面的工作.Email:lxq0303@126.com

引用格式:龙兴权,高晓慧,李鹏超,付志鹏.高出品率超大型钛合金中介机匣数值模拟工艺研究[J].铸造技术,2024,45(10):988-993.
LONG X Q, GAO X H, LI P C, FU Z P. Study on the numerical simulation process of oversized titanium alloy intermediary casing with a high yield rate[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 988-993.

中国知网　https://www.cnki.net

复杂的钛合金整体铸件逐渐崭露头角，成为替代传统“多部件组装”结构的优选方案[6]。美国 Howment 公司于 1984 年扩建 Hamptom 精铸厂，专门生产直径 400 mm 以上的大型复杂薄壁宇航用整体精铸钛合金结构件，已能浇注出 730~770 kg 的工件；德国 TiAl 公司也于 1986 年扩大钛合金精铸车间，安装 100 t 大型压蜡机、250 kg 机械手等先进设备，具备了生产大型复杂薄壁整体精铸钛合金结构件的条件[7-9]。尤其在以发动机作为核心部件的航空制造领域，其设计不仅追求高推重比以提升性能，还需兼顾延长使用寿命、增强可靠性与经济性，并严格符合适航认证的各项标准[10-12]。这一系列需求推动了钛合金铸件技术的革新与发展，促使其向功能集成化及尺寸超大型化方向快速迈进[13]。

传统意义的铸件毛坯已逐步转型升级为接近最终形状的整体功能部件[14]。近年来，随着计算机技术的发展，模拟仿真在精密铸造领域获得了广泛应用。陈正阳等[15]以某钛合金异性薄壁件为研究对象，结合 ProCAST 有限元分析软件，最终获得合格的异性薄壁件。冉兴等[16]以大型环状钛合金铸件为研究对象，利用数值模拟技术进行模流分析，揭示了钛合金金属液充型过程中熔体的运动行为，提出了螺旋形横浇道的设计方法。李飞等[17]利用 ProCAST 软件对大型中介机匣的铸造工艺及其冷隔、缩孔等缺陷进行了数值模拟分析，并通过离心浇注技术制备了冶金质量优良的中介机匣铸件。然而，国内大型复杂薄壁钛合金铸造主要以下发的任务型号为技术发展导向，通用技术革新步伐则显得较为迟缓[18]。这种发展模式导致了钛合金铸造技术的整体进步无法匹配当前铸件质量及尺寸日益提升的要求，使得大型复杂钛合金铸件的研发与生产面临诸多技术挑战。如型面尺寸精度低、冶金缺陷较多、批次稳定性不够、出品率低等，这些瓶颈制约了钛合金精密铸造领域的技术突破与产能提升[19-21]。

基于此，本文以超大型复杂钛合金机匣为研究对象，在熔化量仅有 650 kg 的前提下，利用 ProCAST 软件，对直径 1.7 m、质量近 370 kg 的钛合金中介机匣铸造过程中的温度场和凝固场变化进行数值模拟，利用铸件本身结构特点，设计最优浇注方案，并对其进行试验验证，最终研制出成熟度 7 级的铸件，铸件出品率达到 57%，对未来航空发动机用 2 m 级复杂精铸钛合金机匣关键技术提供设计思路，为后续超大型铸件研制提供方向并积累批量生产经验。

1　大型中介机匣结构特点

选用 Ti-6Al-4V 作为本次中介内机匣模拟和实验材料，化学成分如表 1 所示。利用三维建模软件对其进行几何建模和壁厚分析，三维模型如图 1 所示。该机匣为某型号航空发动机重要承力部件，质量约 370 kg，整体尺寸 ϕ1 676 mm×541 mm，厚大安装边尺寸 78.0 mm×36.4 mm，10 处支板深度 259~597 mm，其中个别支板还存在封闭式盲区，腹板、流道、支板等位置大面积壁厚 2.5 mm，薄壁腹板上分布着不同结构的安装凸台、吊耳等厚大结构，整体为多环支板结构、大型薄壁的复杂内机匣铸件。

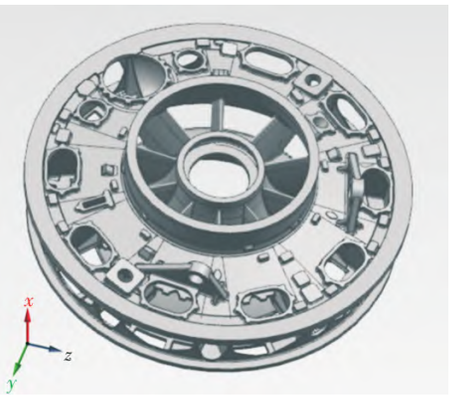


图 1 中介内机匣铸件示意图

Fig.1 Schematic diagram of intermediate internal casing casting

2　工艺方案设计及模拟仿真

钛合金中介机匣铸件尺寸较大，其直径约为 ϕ1 700 mm，薄壁结构较多、形状复杂，在大型钛合金结构件铸造成形方面，常选用离心熔模精密铸造工艺，离心运动不仅促进液态金属沿径向更好充型，且有助于排除液态金属中的气体及夹杂物，其铸造出的铸件相比传统铸造具有表面质量好、尺寸精度高、力学性能好、原材料利用率高等特点。目前形状复杂的薄壁铸件，尤其是大型复杂薄壁整体精密铸造的结构件，浇注系统与铸件毛坯质量比达到 4:

表1 Ti–6Al–4V化学成分

Tab.1 Chemical composition of the Ti–6Al–4V alloy

(mass fraction/%)

Major element			Impurity content, ≦							
Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Other	
									Singular	Total
Bal.	5.50~6.75	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

中国知网　https://www.cnki.net

1~6:1,甚至可能会更高,但铸件出品率仅有 14.3%~20.0%,本项目在熔化量仅有 650 kg,铸件质量为 370 kg 的条件下，经设计得到出品率达 57%的方案,且保证能够完整成型,无流痕、欠铸等缺陷,舍弃了传统的工艺方案设计，利用铸件本身结构充型,并进行设计模拟。

对铸件进行铸造工艺设计,整体浇注方式采用底注式离心浇注,以实现更好的顺序凝固及增强冒口补缩作用。将带有安装凸台及吊耳的腹板面朝上放置,舍弃厚重的多股横浇道盘,采用单股液流进入铸件型腔,螺旋弧浇道尽头增配金属液“贮槽”,收集从前面浇注系统表面解吸的气体沾污的头一部分金属液,避免这部分金属液进入型腔;金属液进入铸件后,利用铸件本身厚大安装边作为进水浇道,减少浇道质量,方案见图 2。该方案中直浇道:横浇道:内浇道=1.00:1.05:2.30,采用 UG 进行三维建模，将建好的三维模型以 X_T 格式导入到 ProCAST 的 Visual-Mesh 模块进行网格化分、模壳创建及真空环境设定,网格尺寸设为 7 mm，最终划分约 39 万个面网格,424 万个体网格,模壳层数设定为 17 层。

设置浇注温度为 1 700 ℃,浇注时间为(坩埚反转时间)7 s，莫来石陶瓷型模壳预热温度为 500 ℃,铸件与模壳之间的传热系数取 500 W/(m²·K),转速设为 100 r/min,在真空环境下进行浇注,模拟结果见图 3。从图 3a 中可以看出,在第 0.7 s 左右,横浇道自外环内浇口,分流环内浇口均有金属液自由面出现,并向铸件型腔运动。从图 3b 可以看出,在第 0.9 s 时,从外环内浇口进入的金属液一部分朝旋转中心运动，一部分沿外环安装边向内浇口另一侧运动，自分流环内浇口进入的金属液一部分加速向外环方向运动，另一部分沿分流环安装边朝内浇口另一侧运动，径向运动的两股金属液自由面在支板中间汇流。从图 3c 可以看出,沿切向朝内浇口另一侧运动的金属液在各个支板处均形成汇流,并在第 2.5 s(图 3d),沿切向运动的 4 股金属液在另一侧的外环和分流环形成汇流。

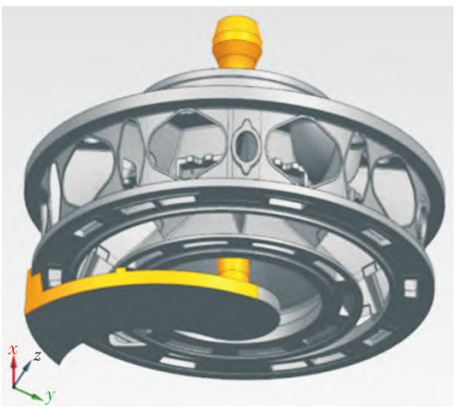


图 2 单股进水方案

Fig.2 Schematic diagram of the single stream inlet scheme

从金属液金属型腔的流场来看，单股进水方案在铸件支板、分流环及外环等多处形成汇流,未形成连续、平稳的充型,易产生飞溅、流痕、冷隔等缺陷。

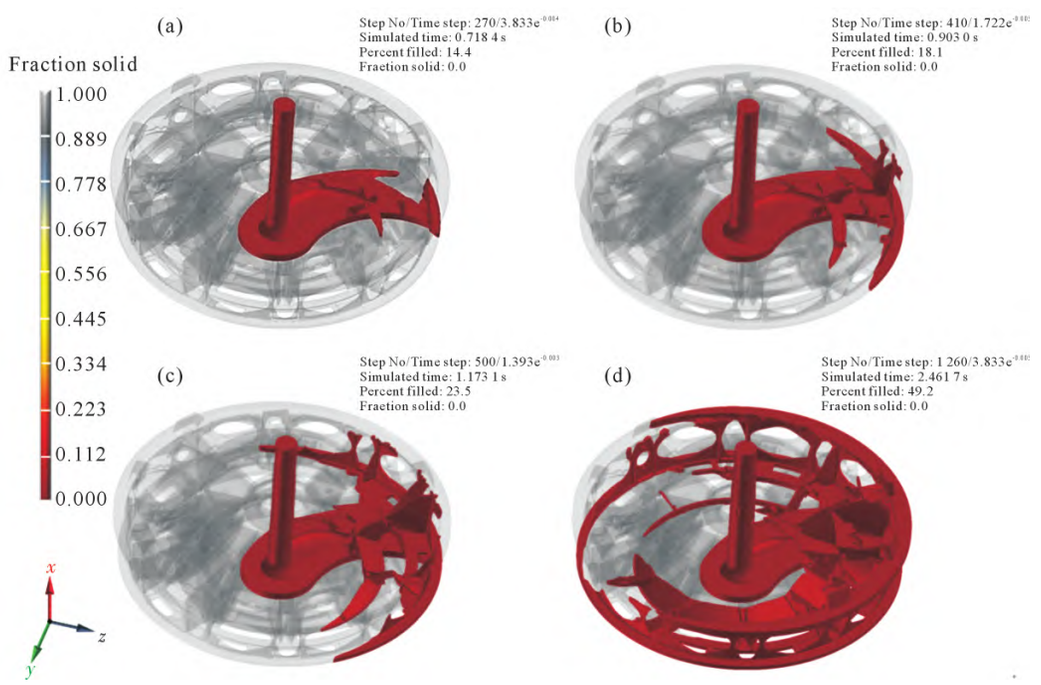


图 3 单股进水方案模拟结果:(a) 金属液进入铸件型腔; (b) 金属液在支板处汇流;(c) 金属液沿横浇道充型;(d) 金属液在另一处汇流

Fig.3 Simulation results of the single-strand water inlet scheme: (a) metal liquid entering the casting cavity; (b) convergence at the support plate; (c) filling along the transverse runner; (d) convergence at another location

中国知网 https://www.cnki.net

3　工艺方案优化及模拟分析

为减少金属液充型流程及汇流等问题，考虑将原单股金属浇道在体积不变的情况下分为多股，分出的股数越多，单股横浇道横截面积越小，整个横浇道型壳内壁表面积越大，表面凝壳质量增大，导致实际横浇道充型的金属液流量变少。综上考虑，将横浇道分为 4 股进行设计，同时增加缝隙浇道，加速上方厚大安装边充型，各样点分布状态如表 2 所示，此方案中直浇道:横浇道:内浇道 =1.0:1.2:2.5，出品率为 57%，工艺方案见图 4。

表2 各样点分布状态

Tab.2 Distribution status of various points

Number	Component	Quantity	Notes
1	Sprue	1	20G 363/159-V001
2	Runner	1	20G26302/410-V521
3	Ingate 1	4	80×35×100
4	Ingate 2	4	50×30×300
5	Riser 1	9	20G 26300 V209
6	Riser 2	4	20G 16300/112-V087

保持模拟参数不变对该方案进行铸造模拟，模拟结果见图 5。从图 5a 可以看出，铸件横浇道呈螺旋分布，金属液从直浇道进入横浇道，均匀地向横浇

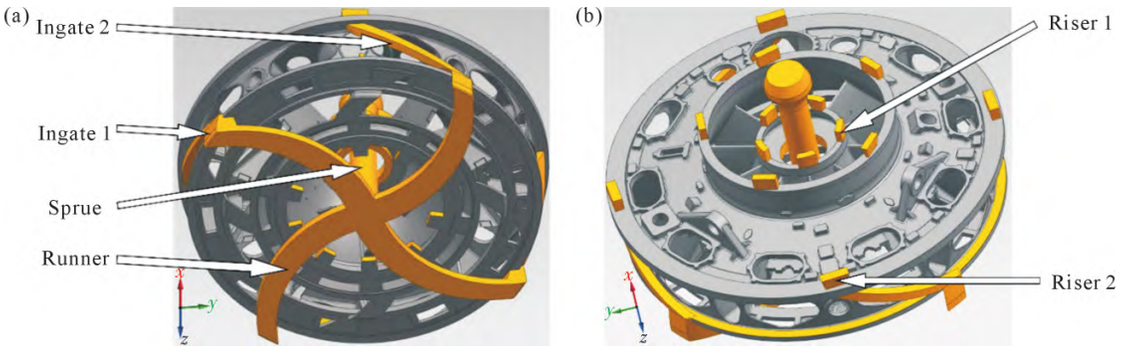


图 4　4 股进水工艺方案

Fig.4　Process plan for four-strand water inlet streams

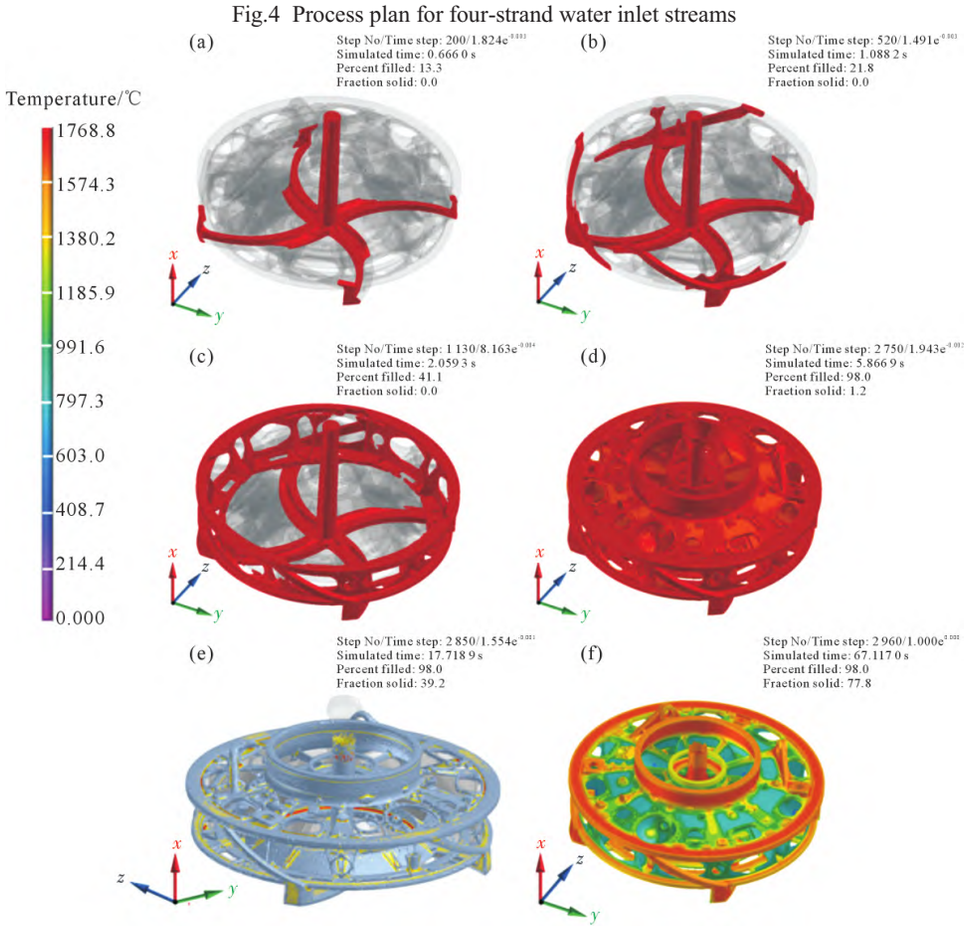


图 5　4 股进水模拟结果：(a) 金属液沿横浇道到达外沿阶段；(b) 金属液从内浇口进入铸件阶段；(c) 金属液进行向心充型阶段；(d) 金属液完全充满；(e) 固相率；(f) 热节区域

Fig.5　Schematic diagram of four-strand water inlet simulation results: (a) metal liquid reaching the outer edge stage along the transverse runner; (b) metal liquid entering the casting stage from the sprue; (c) metal liquid undergoing the centripetal filling stage; (d) fully filled with molten metal; (e) solid fraction; (f) hot zone

中国知网　https://www.cnki.net

道外径方向充型，在第 0.7 s 左右到达横浇道最远端。当金属液到达最远端后，沿缝隙浇道向上安装边充型，在 1.1 s 时金属液从内浇口进入铸件，此时横浇道已基本完全充满金属液，型腔中金属液流的运动开始有了压头(图 5b)；整个系统在重力、离心力和科氏力的作用下，由外向内，由远及近连续地向中心充型，如图 5c 所示。由图 5d 可以看出，在第 5.9 s 左右，金属液完全充满铸件型腔，金属液自由表面转移到直浇道，在离心力作用下，直浇道金属液自由表面降低，金属液对铸件进行渗流补缩。在第 17 s 左右时，铸件整体的固相率达到 60%，此时金属液的流动性显著降低，基本不再具备补缩能力(图 5e)，铸件热节主要分布在冒口位置及内环厚大安装边上(图 5f)。

从模拟结果中可看出，横浇道沿直浇道中心线呈放射状周围分布，各横浇道距离铸件的长度相同，并且 4 组内浇道与支板对应，通过螺旋向上的浇道，加速上型面厚大安装边充型，使得金属液能够同时、均匀地由远至近、由外及内充填型腔，保证铸件温度场的均匀性，热节主要集中在厚大安装边及吊耳、凸台等位置，通过放置冒口使上述位置无较大缩孔。该方案既符合离心浇注的特点，又提高了出品率，最终决定采用该方案进行浇注验证。

4 浇铸生产验证

基于铸造仿真模拟结果，制订了中介机匣的浇注生产工艺。在完成了浇冒系统安装后，制备面层材料为氧化钇，背层材料为莫来石型壳，将型壳预热至 400 ℃，移至真空自耗电极凝壳炉中进行浇注，炉内真空度≤5 Pa，浇注电压 34~56 V，浇注电流 30 000~45 000 A，离心盘转速为 100 r/min，浇注时间 7 s，浇注后离心盘续转 2 min，铸件完整成型，无冷隔、欠铸等缺陷。浇注后铸件需移至热等静压机进行致密化处理，热等静压机型号为 RDJ1250/1500-150.1400 型，加热温度 910 ℃，压力 140 MPa，保温 5 h。再经工业CT(computerized tomography)检查，如图 6 所示。检测结果显示，机匣铸件表面光滑，无密集型气孔缺陷，厚大底座位置无气缩孔缺陷，所生产铸件合格，成熟度 7 级满足相关协议的规定，铸件实物如图 7 所示。

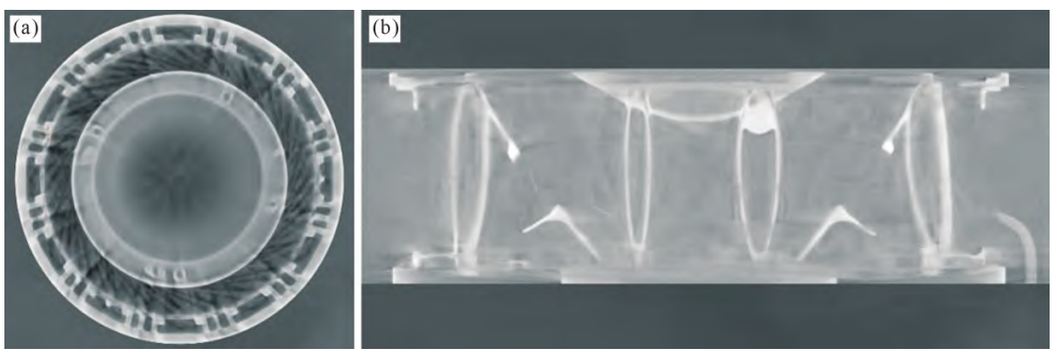


图 6 铸件工业 CT：(a) 俯视图；(b) 主视图
Fig.6 Industrial CT image of the casting: (a) top view; (b) front view



图 7 铸件实物
Fig.7 Final physical image of the casting

5 结论

(1)利用 ProCAST 软件对中介机匣铸造过程温度场和凝固场进行模拟，同时采用熔模离心结合底注+缝隙式方案保证铸件充型顺利平稳，最终研制出成熟度 7 级的铸件。

(2)针对超大型铸件，在熔化量受限的前提下，可利用铸件本身结构作为进水浇道，有利于提高金属利用率，保证铸件完整充型。

(3)在同等工艺参数条件下，适度调整进水工艺方案，增加了金属流体充型的高效性，保证了温度场的均匀性，最终提高了大型钛合金中介机匣的出品率。

参考文献：

[1] 李忠芳，杨思一，周李明，安钰坤，刘铎，张振波. 铝合金箱体砂型铸造数值模拟及工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2018, 38(7): 721-723.
LI Z F, YANG S Y, ZHOU L M, AN Y K, LIU D, ZHAGN Z B. Numerical simulation and process optimization of sand casting aluminum alloy box[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018,

中国知网 https://www.cnki.net

38(7): 721-723.

[2] 陈宗民. 铝合金 U 形外环框架砂型铸造工艺设计及仿真模拟[J]. 热加工工艺，2019, 48(19): 87-91.
CHEN Z M. Design and simulation of sand casting process for an U-shaped aluminum alloy outer-ring framework[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(19): 87-91.

[3] 南海，谢成木. 国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J]. 中国铸造装备与技术，2003(6): 1-3.
NAN H, XIE C M. The application & development of cast titanium alloys and their castings abroad[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2003(6): 1-3.

[4] 南海，谢成木，魏华胜，林汉同. 大型复杂薄壁类钛合金精铸件的研制[J]. 中国铸造装备与技术，2001(2): 12-14.
NAN H, XIE C M, WEI H S, LIN H T. The study of large thin-wall complex integrated titanium precision casting[J]. China Foundry Equipment & Technology, 2001(2): 12-14.

[5] 高婷，赵亮，马保飞，张恩平. 钛合金铸造技术现状及发展趋势[J]. 热加工工艺，2014, 43(21): 5-7, 11.
GAO T, ZHAO L, MA B, ZHAN E P. Present situation and development trend of titanium alloy casting technology[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(21): 5-7, 11.

[6] 冉兴，吕志刚，曹建，李培杰. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术[J]. 铸造，2021, 70(2): 137-146.
RAN X, LYU Z G, C J, LI P J. Investment casting technologies for large complex titanium alloy parts[J]. Foundry, 2021, 70(2): 137-146.

[7] 范李鹏，王宝兵，余国康，李宝辉，谢剑锋，顾辉旺，杨剑. 钛合金复杂薄壁结构件精密铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2016, 36(10): 1079-1081.
FAN L P, WANG B B, YU G K, LI B H, XIE J F, GU H W, YANG J. Investment casting titanium components with complex thin-walled structure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(10): 1079-1081.

[8] WILLIAMS J C, STARKE E A J R. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775-5799.

[9] 冯颖芳. 钛合金的精铸技术进展及应用现状[J]. 特种铸造及有色合金，2001(2): 72-74.
FENG Y F. Progress and application status for Ti alloy in investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001 (2): 72-74.

[10] 赵瑞斌. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成形技术研究进展[J]. 钛工业进展，2015(2): 7-12.
ZHAO R B. Research progress of precision casting of large complex thin-walled titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015(2): 7-12.

[11] 朱勇，龚伟，白朝中，张翔. 基于 Procast 的进气管砂型铸造的充型凝固数值模拟[J]. 铸造技术，2014, 35(8): 1859-1862.
ZHU Y, GONG W, BAI C Z, ZHANG X. Numerical simulation of sand casting filling and solidification for intake manifold based on Procast[J]. Foundry Technology, 2014, 35(8): 1859-1862.

[12] 张继聪，武继礼，李小军，黄旗，张利军. 基于空心熔模结构的 K648 高温合金铸件熔模铸造工艺研究[J]. 铸造技术，2023, 44(12): 1157-1159.
ZHANG J C, WU J L, LI X J, HUANG Q, ZHANG L J. Investment casting technology of K648 superalloy casting based on hollow wax mold[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1157-1159.

[13] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造，2012, 61(4): 347-356.
LYU Z G. History and development trend of investment casting industry in China[J]. Foundry, 2012, 61(4): 347-356.

[14] 张美娟，南海，鞠忠强，高富辉，郅喜望，朱郎平. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报，2016, 36(3): 13-19.
ZHANG M J, NAN H, JU Z Q, GAO F H, QIE X W, ZHU L P. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.

[15] 陈正阳，杨树峰，谢锦丽，于鸿垚，毕中南，张继. 钛合金异形薄壁壳体铸造工艺数值模拟及优化[J]. 中国冶金，2022, 32(10): 105-110.
CHEN Z Y, YANG S F, XIE J L, YU H Y, BI Z N, ZHANG J. Numerical simulation and optimization of titanium alloy shaped thin-walled shell casting process[J]. China Metallurgy, 2022, 32 (10): 105-110.

[16] 冉兴. 大型环状钛合金铸件立式离心铸造螺旋形横浇道设计[J]. 稀有金属材料与工程，2024, 53(7): 2049-2058.
RANG X. Design of spiral runner for vertical centrifugal casting process of large annular titanium alloy castings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(7): 2049-2058.

[17] 李飞，赵彦杰，李玉龙，吴雨，史志武，徐斌，汪东红，孙宝德. 钛合金中介机匣快速熔模铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(6): 637-639.
LI F, ZHAO Y J, LI Y L, WU Y, SHI Z W, XU B, WANG D H, SUN B D. Rapid investment casting process for titanium alloy intermediate casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(6): 637-639.

[18] 郑薄远，吴一栋，陈晶阳，肖程波，李宗臻，惠希东. K439B 高温合金薄壁机匣试验件熔模精铸缺陷预测与工艺优化研究[J]. 铸造技术，2023, 44(2): 147-152.
ZHENG B Y, WU Y D, CHEN J Y, XIAO C B, LI Z Z, HUI X D. Predication of the defects and optimization of the technology for the investment casting of thin-wall experimental cartridge receiver made of K439B superalloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(2): 147-152.

[19] 刘艳磊，孟磊，周含宣. 大型复杂钛合金底座铸造工艺研究[J]. 热加工工艺，2022, 51(19): 69-72.
LIU Y L, MENG L, ZHOU H X. Research on casting technology of a large complex titanium alloy base[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 69-72.

[20] 韩文虹. 基于计算机模拟的钛合金铸件充型过程分析与优化[J]. 铸造技术，2014, 35(9): 2073-2075.
HAN W H. Analysis and optimization of filling process of titanium alloy casting based on computer simulation[J]. Foundry Technology, 2014, 35(9): 2073-2075.

[21] 徐峰，郅喜望. ZTC4 钛合金精铸件铸造缺陷的氩弧焊补焊工艺研究[J]. 汽轮机技术，2024, 66(3): 229-232.
XU F, QIE X W. Research on arc repairing process of casting defects for ZTC4 titanium alloy[J]. Turbine Technology, 2024, 66(3): 229-232.

中国知网 https://www.cnki.net