DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2024.4174

典型薄壁窄槽深盲腔钛合金铸件工艺数值模拟及优化

高晓慧，龙兴权，任安兴，李　浩
（贵州安吉航空精密铸造有限责任公司，贵州 安顺 561000）

摘　要：聚焦于钛合金铸件，尤其是薄壁窄槽深盲腔结构件的熔模真空离心铸造技术，鉴于钛合金具有较高的化学活性，易与多种大气成分发生反应，因此对型壳材料的选择及其干燥过程提出了严格要求。然而，由于窄槽深盲腔型壳受限于干燥条件，浇注过程中易产生冷隔、欠铸、气缩孔等缺陷，导致其铸件质量的稳定性未能满足服役标准。针对这一问题，采用铸造模拟仿真技术，对金属液充型行为进行精确分析，以确保薄壁区域按序填充，并优化离心铸造中的补缩路径和气体逸散通道，有效解决了密集气孔的问题，实现复杂钛合金铸件的稳定批量生产。

关键词：薄壁；窄槽；深盲腔；方案设计；密集型气孔

中图分类号：TG249.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2024)10-0975-06

Numerical Simulation and Optimization of the Thin-wall, Narrow-groove and Deep-blind Cavity Titanium Alloy Casting

GAO Xiaohui, LONG Xingquan, REN Anxing, LI Hao
(Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd., Anshun 561000, China)

Abstract: The focus of this paper is on vacuum investment casting technology for titanium alloy castings, particularly those with thin-walled narrow grooves and deep blind cavity structures. Owing to the high chemical reactivity of titanium alloys, which are susceptible to reactions with various atmospheric components, stringent requirements are placed on the selection and drying process of mold shell materials. However, limited drying conditions in narrow, deep blind cavity molds often lead to defects such as cold shuts, misruns, and gas porosity during pouring, causing the castings to fall short of service standards. To address this issue, casting simulation technology was utilized to analyse metal-filling behavior precisely and ensure the sequential filling of thin-walled regions. Additionally, the filling path and gas escape channels in the investment casting process were optimized, effectively resolving issues related to dense pores and achieving stable mass production of complex titanium alloy castings.

Key words: thin-wall; narrow groove; deep blind cavity; scheme design; dense porosity

钛合金密度低、比强度高、耐热及抗蚀性能优异，是一种优良的铸件结构材料，在航空、航天、医疗及汽车制造等领域展现出广泛应用前景[1-4]。尤其是航空航天领域，如美国 F-22 歼击机采用了 70 多个钛合金精铸件，且机翼的 50%是由钛合金铸件构成，国内某型飞机上也大量使用了钛合金热等静压铸件作为主要承力构件，确保了飞机的轻质、敏捷和低成本的性能[5]。在当前广泛使用的铸造钛合金中，ZTC4 是现代飞机、发动机结构经常选用的骨干钛合金材料。随着航空用钛合金铸件产品的应用领域日渐增加，对钛合金铸件的批量生产能力及产品稳定性提出了更高的要求[6-7]。然而，钛合金高的化学活性使得其在铸造过程中易与耐火材料反应，导致铸件中存在气孔、夹杂、裂纹等诸多缺陷，尤其在离心浇注条件下，钛液的剧烈摩擦及高温冲刷，对型壳材料提出了高惰性、高强度及强抗冲刷能力的严格要求[8-13]。但在常规的生产现场，窄槽深盲腔铸件受结构的影响，干燥风场建立和保持难度大，型壳质量存在波动，金属液与型壳发生作用，产生大量气体，在糊状凝固环境下，将气体裹挟在金属中，形成密集

收稿日期：2024-09-13

作者简介：高晓慧，1988 年生，本科，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: 907054963@qq.com

引用格式：高晓慧，龙兴权，任安兴，李浩. 典型薄壁窄槽深盲腔钛合金铸件工艺数值模拟及优化[J]. 铸造技术，2024, 45(10): 975-980.
GAO X H, LONG X Q, REN A X, LI H. Numerical simulation and optimization of the thin-wall, narrow-groove and deep-blind cavity titanium alloy casting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 975-980.

中国知网　https://www.cnki.net

型气孔缺陷，该类缺陷一直是薄壁窄槽深盲腔铸件批量生产的最大障碍[14-16]。

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的应用。邵文宝等[17]基于ProCAST 软件对某铝合金精密铸件的组合工艺进行了数值模拟，分析铸件凝固过程中固相率的变化以及疏松缺陷分布，缩短了研发周期，制备出高质量的合格铸件。陈正阳等[18]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。徐达鸣等[19]模拟了 TC4 的充型过程和温度场，模拟结果与实验结果基本相符，并通过模拟结果改变离心转动方向和浇道设计，改进了浇注工艺，得到质量良好的铸件。李飞等[20]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，通过离心浇注技术制备了冶金质量优良的中介机匣铸件。楚玉东等[21]采用数值模拟方法研究了 ZTC4 合金机匣离心铸造的充型和凝固过程，分析了离心转速、浇注温度和铸型预热温度对熔体充填过程流动场、凝固过程温度场和应力场的影响，并预测了缺陷的分布。

针对薄壁复杂深盲腔 ZTC4 钛合金铸件铸造过程中因型壳与高温金属液反应产生的密集型气孔问题，本文从工艺设计的角度，结合先进的铸造模拟仿真技术，精准调控金属液的充型与凝固顺序，优化离心铸造中的补缩通道，以促进气体有效逸出，减少气孔与气缩孔缺陷，从而显著提升工艺出品率，最终实现了薄壁窄槽深盲腔钛合金铸件的稳定批量生产。

1 铸件基本信息

选取钛合金支板铸件作为典型件进行工艺设计和分析。铸件材质为 ZTC4，化学成分如表 1 所示。应用于飞机发动机上。轮廓尺寸为329 mm×253 mm×32 mm，质量为 3.77 kg，属于中型铸件，铸件三维结构如图 1 所示。铸件盲腔最大宽度尺寸为 26 mm，且两方向呈逐渐减小状态，盲腔深度尺寸为307.8 mm，盲腔外侧大面积壁厚为 3 mm，内腔 2 根加强筋壁厚为 2 mm，支板小端厚度达 32 mm，盲腔另一端呈半封闭状态，且厚度达 27 mm，铸件的厚大热节集中在底座与支板壁的交接位置。铸件壁厚尺寸差异大，盲腔深度尺寸大，且内腔狭窄，型壳不易干燥，过程质量控制波动大，铸件熔炼浇注后易产生密集型气孔缺陷和气缩孔缺陷，报废率高。

2 铸造工艺设计及浇注过程模拟

2.1 离心浇铸工艺设计

离心浇注工艺相较于重力浇注，其独特之处在于液态金属在复杂离心力场中的行为模式。在此过程中，液态金属的补缩不仅受到重力导致的垂直方向补缩影响，还受到离心力驱动下的径向补缩作用，两者相互交织。特别地，由于离心力场本质上是一种非均匀分布的体积力场，随着离心半径的增大，补缩过程的主导因素逐渐从重力作用过渡到离心力作用。因此，在制定离心浇注工艺方案时，必须构建高度专业化的补缩数学模型，该模型需精确考虑重力场与非均匀离心力场的双重物理效应，以确保补缩

表1 ZTC4化学成分
Tab.1 Chemical composition of the ZTC4 alloy

(mass fraction/%)

Major element			Impurity content, ≦							
Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	other	
									Singular	Total
Matrix	5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20	0.10	0.40

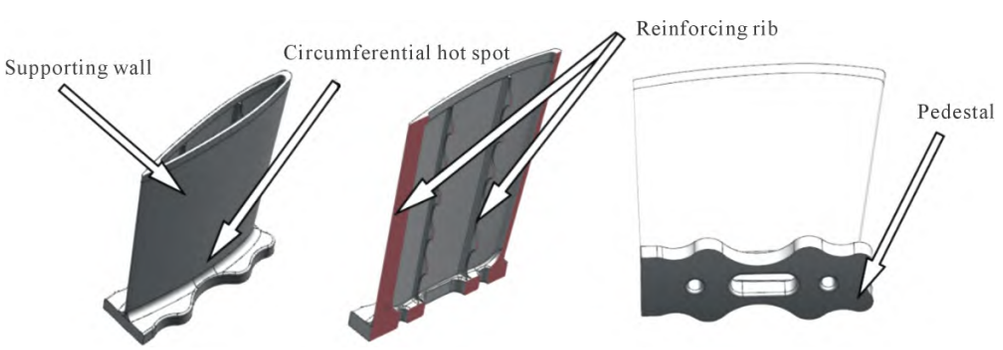

图 1 铸件三维结构
Fig.1 Three-dimensional structural diagram of the casting

中国知网 https://www.cnki.net

过程的优化与控制。

在离心浇注工艺规划时，热节常被置于离心远端，利用较大的离心半径增强浇注系统对热节的补缩效能。针对该铸件特点，其大面积壁薄(3 mm 及 2 mm)，金属液凝固迅速，导致型壳与高温金属液反应产生的气体及环境气体难以逸出，糊状凝固时裹挟气体，造成密集型气孔缺陷。因此，设计铸造工艺时，应将薄壁区域置于离心远端，旨在加速充型速度并优化补缩机制，以减少气孔缺陷。为确保充型效率，支板壁设计有 3 条缝隙浇道与之同步充型，扩大横截面积，加速金属液流动。这些缝隙浇道在离心作用下，沿圆周切线方向为支板壁薄壁区提供补缩并辅助排气。针对底座厚大区位于离心近端，补缩集气时易产生气缩孔的问题，特在底座近直浇道侧增设大型补缩浇道，构建有效补缩路径(图 2)。此外，支板开口朝外，便于涂覆与观察，其充型浇道引导金属液上行后，自外向内与支板型面同步充型，确保铸造质量。

2.2　浇注过程数值模拟

选用 Siemens 公司的 Unigraphics NX 作为铸造件及其浇注系统的三维建模软件，采用 ProCAST 铸件模拟软件对上述方案进行模拟仿真。根据 ZTC4 合金物化性质参数，在模拟软件中选择所属材料类型、力学计算模型、温度等。本次模拟设置浇注温度为1 700 ℃，浇注时间(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/(m^2·K)，转速设为 140 r/min，离心旋转方向为顺时针，在真空环境下进行浇注，模拟结果见图 3。金属液充型时从直浇道进行分流，浇道内的熔体流动呈现出一种沿型腔一侧紧贴流动的现象。随着离心作用下的半径逐渐增大，熔体在该流动路径上的速度也相应地加快，展现出一种速度随离心半径增加而递增的流动特性。熔体先到达横浇道的最远端，然后进入远端的充型浇道与支板同时充型，离心半径最小的补缩通道最后进行充型。凝固过程中铸件先于缝隙浇道进行凝固，补缩通道内的金

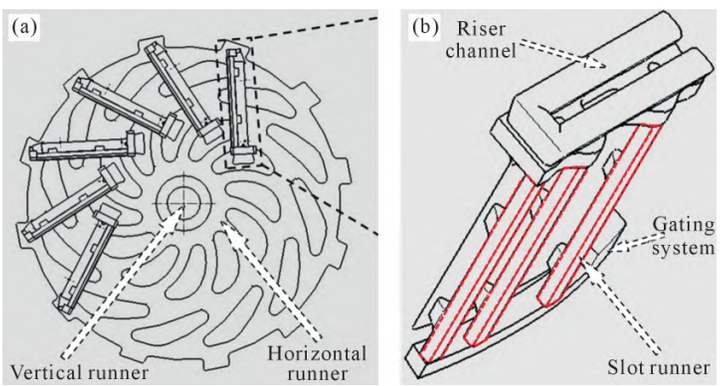

图 2　浇注系统示意图：(a) 平面结构；(b) 支板放大图

Fig.2　Schematic diagram of the pouring system: (a) planar structure; (b) enlarged view of the support plate

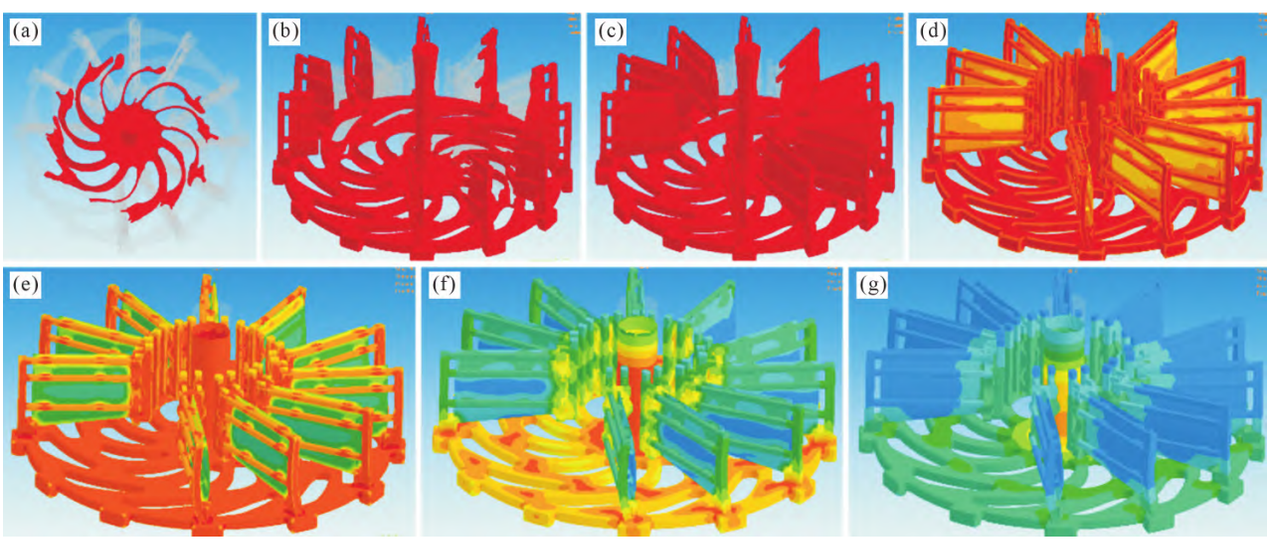

图 3　金属液流动路线和充型过程温度场变化：(a) 0.7 s; (b) 3.4 s; (c) 5.6 s; (d) 15.1 s; (e) 30.0 s; (f) 110.1 s; (g) 530.1 s

Fig.3　Variation in the temperature field during metal liquid flow and mold filling process in casting: (a) 0.7 s; (b) 3.4 s; (c) 5.6 s; (d) 15.1 s; (e) 30.0 s; (f) 110.1 s; (g) 530.1 s

中国知网　https://www.cnki.net

属液温度高于铸件温度。

2.3 缩孔缺陷分析

在铸件模拟结果中，针对气缩孔缺陷的分析，可以利用 ProCAST 软件内置的缩松缩孔评判标准。该判据依托于准确的孔隙率模型，能够深入分析并识别铸件内部可能形成的疏松及缩孔缺陷。充型和凝固结束后，分析铸件的缺陷状态，铸件气缩孔缺陷少，仅在底座靠补缩浇道的位置存在缩孔缺陷，且均处于离心方向的起始侧，如图 4 所示。从缺陷位置和离心旋转方向进行分析，气缩孔缺陷处于离心补缩方向的近端面，即可确定为补缩通道在离心方向的补缩距离不足，导致缺陷未全部引出至浇注系统中。

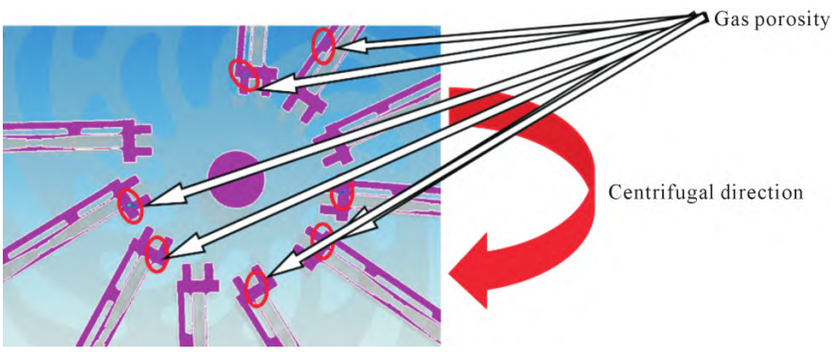

图 4 缺陷模拟结果

Fig.4 Simulation results of defects

3 工艺改进

为了解决支板铸件补缩浇道位置处的缩孔缺陷，将初版浇注设计方案进行改进。通过对上述工艺方案模拟结果的分析，可以发现造成缺陷的主要原因是补缩通道在离心方向的补缩距离不足，无法及时保证气缩孔缺陷导出导致的缺陷，因此将对补缩通道模型进行调整。在钛合金真空浇注中，提升金属液补缩距离的常见方法包括：增大离心半径以增强离心力作用范围；提升离心转速以加速金属液流动；加大补缩浇道尺寸减少流动阻力；优化补缩方向确保金属液精准补缩，综合提升铸件质量。在实际生产中，受真空凝壳炉的炉膛尺寸、模组尺寸和型壳强度的影响，增大离心半径和提高离心转速的方法不适用，铸件生产性质为批量生产，在模组尺寸一定的前提下，加大补缩浇道的尺寸，必须减少同一模组中的蜡模数量，出品率降低，经济效益差。因此，在本次工艺改进中选用优化补缩方向方法来提升补缩通道的补缩能力和补缩距离。如图 5，对补缩通道的方向进行更改，增加沿离心旋转方向的拔模斜度至 20°(如图 5 放大图所示)，使得补缩通道有离心半径和离心切线方向的双重补缩作用，其他位置的浇道并未改变。

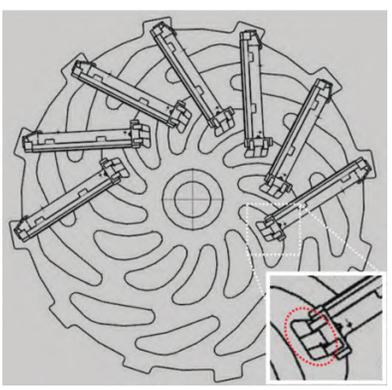

图 5 工艺优化示意图

Fig.5 Schematic diagram of process optimization

对改进后的方案进行模拟，模拟参数同 2.2 部分。如图 6 所示，由于其他浇道并未改变，铸件刚开始的凝固情况与工艺改进前铸件的凝固情况基本保持一致，由直浇道分流到达横浇道最远端，然后远端的充型浇道与支板同时充型，缝隙浇道与支板先后凝固，并逐渐向热节区域进行。不同的是在

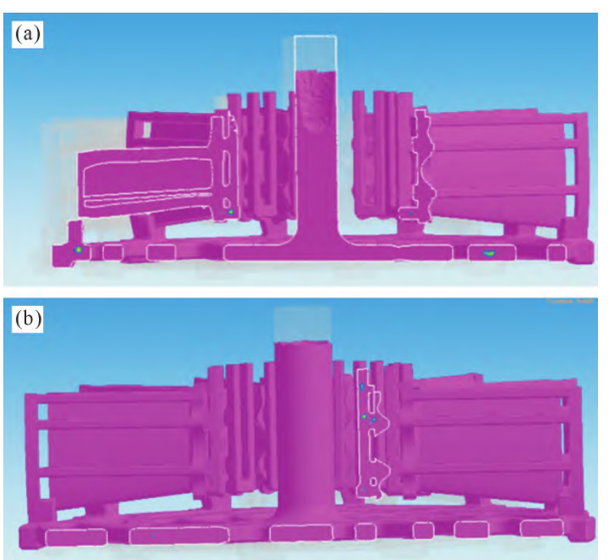

图 6 缺陷模拟结果：(a) 凝固中；(b) 凝固结束

Fig.6 Simulation results of defects: (a) during solidification; (b) solidification completed

中国知网 https://www.cnki.net

凝固结束后，对模拟结果进行缺陷分析发现，在初版浇注工艺离心补缩方向的近端面的气缩孔转移到补缩通道内，孔隙留在了铸件本体以外，离心半径和离心切线方向的补缩通道起到了良好的补缩作用。

4　生产验证

为了验证模拟预测结果的准确性及评估优化后工艺方案的实施效果，将优化后组合工艺方案进行浇注验证，铸造参数如 2.2 部分，在经过蜡模压制成型、组焊、型壳制备、脱蜡处理、型壳高温焙烧、浇注、浇冒口清理等一系列工序后得到了产品浇注零件。浇注后的铸件经工业 CT 检查，如图 7 所示。结果显示按改进后工艺方案生产的铸件表面光滑，无密集型气孔缺陷，厚大底座位置无气缩孔缺陷，所生产铸件全部合格，满足相关协议的规定。实际生产的铸件毛坯如图 8 所示，验证了模拟的准确性及优化后方案的可行性，现已大规模批量生产。

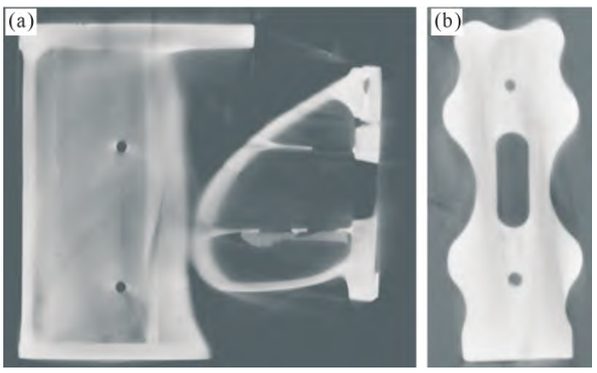

图 7　铸件工业 CT 图：(a) 支板表面；(b) 支板底部

Fig.7　Industrial CT image of the casting: (a) outer surface; (b) bottom of the support plate

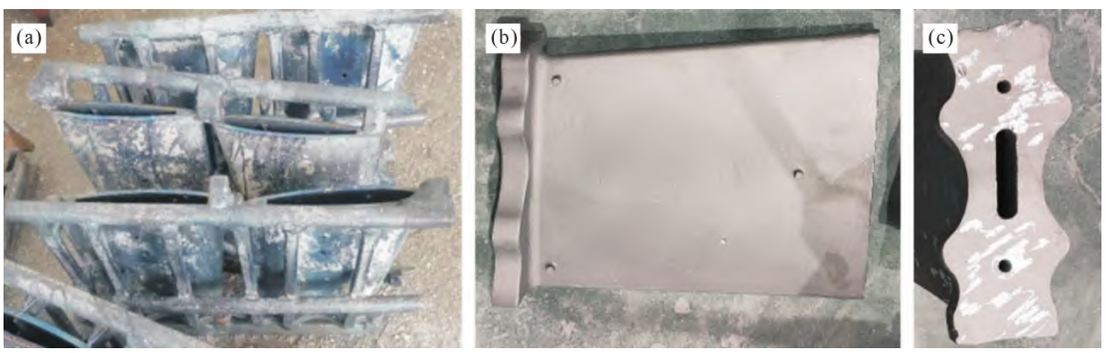

图 8　实际生产的铸件：(a) 铸件毛坯；(b) 支板表面；(c) 支板底部

Fig.8　Actual production of the castings: (a) rough casting; (b) outer surface; (c) bottom of the support plate

5　结论

(1)在工艺设计初期，铸造模拟仿真可以起到缩短研发周期，对设计方案查漏补缺、减少冶金缺陷、改进铸造工艺的作用。

(2)钛合金薄壁窄槽深盲腔铸件的工艺方案设计时，深盲腔开口要朝向模组外侧，便于型壳质量的控制，金属液从远端向近端依次充型，铸件厚大位置放置在离心近端，对薄壁区的补缩和集气起到积极的作用。

(3)离心浇注中，离心半径方向和离心切线方向的双重补缩，对改善铸件的气缩孔缺陷有显著效果。实现顺序凝固，使排气通道顺畅，并利用直浇道热源，保证冒口的温度。

参考文献：

[1] 游涛，吴鹏，姚谦，赵军，曲玉福，王利. 一种钛合金镜筒的石墨型离心铸造工艺[J]. 铸造，2012, 61(4): 434-436.
YOU T, WU P, YAO Q, ZHAO J, QU Y F, WANG L. Centrifugal casting process with graphite mould for a titanium alloy lens cone [J]. Foundry, 2012, 61(4): 434-436.

[2] BALASUNDAR I, RAVI K R, RAGHU T. On the high temperature deformation behaviour of titanium alloy BT3-1[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 135-145.

[3] 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, ZHANG Z B. Numerical simulation and process optimization of sand casting aluminum alloy box[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(7): 721-723.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究[J]. 飞航导弹，2002(7): 50-60.
CAO Y H. Research on the application of titanium alloy forming process in cruise missile[J]. Aerospace Technology, 2002(7): 50-60.

中国知网　https://www.cnki.net

[7] 霍东兴,梁精龙,李慧,谢珊珊,杨宇. 钛合金研究及应用进展[J]. 铸造技术,2016, 37(10): 2065-2066, 2080.
HUO D X, LIANG J L, LI H, XIE S S, YANG Y. Progress of research and application of titanium alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 37(10): 2065-2066, 2080.

[8] 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.

[9] 谢华生,刘时兵,苏贵桥,汪志华,赵军. 我国钛合金精铸件铸造技术的发展及应用[J]. 特种铸造及有色合金,2008(S1): 462-464.
XIE H S, LIU S B, SU G Q, WANG Z H, ZHAO J. Development and application of investment casting technology for titanium alloys castings of China[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2008(S1): 462-464.

[10] SEN I, TAMIRISAKANDALA S, MIRACLE D B, RAMAMURTY U. Microstructural effects on the mechanical behayior of B-modified Ti-6A1-4V alloys[J]. Acta Materialia, 2007, 55(15): 4983-4993.

[11] 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.

[12] 张美娟,南海,鞠忠强,高富辉,郄喜望,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, XIE X W, ZHU L P. Development of aerospace casting titanium alloy and its forming technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 13-19.

[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(4): 347-356.
LYU Z G. History and development trend of investment casting industry in China[J]. Foundry, 2012(4): 347-356.

[14] 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,2022, 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, 2022, 44(2): 147-152.

[15] 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.

[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.
RAN X. Design of spiral runner for vertical centrifugal casting process of large annular titanium alloy castings[J]. Rare Metal Materials and Eengineering, 2024, 53(7): 2049-2058.

[17] 邵文宝,冀晓磊,刘晓杰,李园园,潘煜曜,刘鑫霞,葛学伟. 铝合金某壳体铸造工艺数值模拟及优化[J]. 铸造技术,2024, 45(7): 699-704.
SHAO W B, JI X L, LIU X J, LI Y Y, PAN Y Y, LIU X X, GE X W. Numerical simulation and optimization of the casting process for a certain aluminium alloy shell component[J]. Foundry Technology, 2024, 45(7): 699-704.

[18] 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.

[19] 徐达鸣,王军新,孙小波,郭景杰,安阁英,贾均. Ti-6Al-4V熔模精密铸造充型及凝固过程计算机模拟[J]. 材料科学与工艺,1999(S1): 6-11, 16.
XU D M, WANG J X, SUN X B, GUO J J, AN G Y, JIA J. Computer simulation for mold filling and solidification processes in precision casting of Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Science and Technology, 1999(S1): 6-11, 16.

[20] 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.

[21] 楚玉东,常辉,黄东,南海,钟宏,赵亚利,李金山. ZTC4钛合金机匣构件离心铸造过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2012, 32(2): 133-136.
CHU Y D, CHANG H, HUANG D, NAN H, ZHONG H, ZHAO Y L, LI J S. Numerical simulation of centrifugal casting process of ZTC4 Ti alloy case[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(2): 133-136.

中国知网 https://www.cnki.net