DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4070

薄壁框型钛合金铸件熔模铸造数值模拟及验证

孙　冰[1,2],杨　光[1,2],李渤渤[1,2],乔海滨[1,2],孙宏喆[1,2],王　非[1,2]

(1. 洛阳双瑞精铸钛业有限公司,河南 洛阳 471000; 2. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所,河南 洛阳 471000)

摘　要:薄壁框架类钛合金铸件是铸造领域复杂结构件之一,被广泛应用于航空、航天领域的高端装备重要部件中,对尺寸及形位公差要求严格。由于框架类铸件结构复杂、壁薄且厚度不均,在铸造过程中很容易出现缩孔、变形等缺陷,因此在确定铸造工艺时需要多方面考虑,并通过铸造模拟软件评价工艺的可行性。针对薄壁框型架大体积、大厚壁比、结构复杂,铸造过程易出现缩松缩孔、热裂、变形等的问题,设计顶注式和底注式两种浇注系统方案,采用 ProCAST 铸造仿真数值模拟软件对两种浇注充型凝固过程温度场、应力场模拟,分析了铸造凝固过程中框型件总缩松率、残余应力、残余变形情况,确定了底注充型方案的可行性,经过对比分析发现,底注式浇注生产的钛合金框型架,相比于顶注式浇注充型过程更加平稳,总缩松率较小,铸件本体肋板及壁板之间的有效应力明显降低,总变形量降低到 0.5 mm 以下,且变形主要集中于冒口及冒口所在平面。结果表明,底注加冒口工艺有效解决了铸件热节缩孔问题,铸件成形质量、冶金质量和尺寸控制达到预期效果,同时运用铸造仿真模拟技术可有效指导实际铸造过程,缩短试制周期,降低生产成本。

关键词:钛合金;仿真模拟;浇注系统设计;铸造缺陷

中图分类号:TG146.2+3; TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0925-07

Numerical Simulation and Verification of Investment Casting for Thin-walled Frame Titanium Alloy Castings

SUN Bing[1,2], YANG Guang[1,2], LI Bobo[1,2], QIAO Haibin[1,2], SUN Hongzhe[1,2], WANG Fei[1,2]

(1. Luoyang Shuangrui Precision Casting Titanium Co., Ltd., Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China)

Abstract: Thin-wall frame titanium alloy castings are complex structural parts in the field of casting and are widely used in important parts of high-end equipment in the aviation and aerospace fields. There are widespread assembly requirements, and strict tolerances in terms of size, shape and position are needed. Owing to the complex structure, thin wall and uneven thickness of frame castings, shrinkage holes, deformation and other defects easily form during the casting process. Therefore, when determining the casting process, it is necessary to consider various factors and evaluate the feasibility of the process through casting simulation software. In this work, to address the issues of the large volume, large thickness ratio and complex structure of thin-walled frames, which are prone to casting defects such as shrinkage and porosity, thermal cracking and deformation during casting, two casting system schemes, namely, the top casting type and bottom casting type, were designed, and ProCAST simulation software was used to simulate the thermal field and stress field during the solidification process of two kinds of casting mold filling. The total shrinkage rate, residual stress and residual deformation of the frame parts in the casting solidification process were analysed, and the feasibility of the bottom filling pattern scheme was determined. A comparative analysis of the simulation results reveals that the titanium alloy frame produced by bottom casting is more stable than that produced by top casting, the total shrinkage rate is lower, and the effective stress between the rib plate and the wall plate of the casting body is significantly lower. The total deformation is reduced to less than 0.5 mm, and the deformation is mainly concentrated in the riser and the plane where the riser is located. The test results show that the process can effectively solve the problem of hot shrinkage holes in casting, and the forming quality, metallurgical quality and size control of the

收稿日期:2024-04-01

基金项目:洛阳市重大科技专项(2301002A)

作者简介:孙　冰,1988 年生,硕士,工程师. 主要从事钛及钛合金熔模精密铸造及仿真数值模拟方面的工作. Email: ice211sun@163.com

引用格式: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.

中国知网　https://www.cnki.net

casting can achieve the expected effects. Moreover, computer casting simulation technology can effectively guide the actual casting process, shorten the trial production cycle, reduce the production cost, and provide a reference for high-quality near-net investment casting of thin-wall frame titanium alloy castings.

Key words: titanium alloy; simulation; gating system design; casting defects

随着航空航天装备及其技术的不断发展,大型薄壁框型结构在高端装备的设计和制造中越来越常见。这类结构通常用于航天器设计和制造过程中使用的重要构件,包括航天器的外壳、舱段、支撑架等,其质量、强度和耐用度直接关系到器件整体性能及安全。这一类结构常采用具有高比强度、高比模量、良好的耐蚀性及热稳定性的航空钛合金材料制备而成,以确保航天器在极端环境下具备良好的强度及刚性[1-3]。然而,由于框型架结构壁薄、尺寸大,大小尺寸极端结合,使其在铸造过程中易产生缩松缩孔、热裂及变形等铸造缺陷,在后续排缺补焊过程中又会进一步出现变形,导致铸件反复修复难以制造。铸造缺陷的产生与工艺设计有着很大关系,过去常采用的试错法普遍依赖于人工经验,不仅试错成本高、效率低,而且工艺可重复性差,新产品开发废品率高,浇冒口系统精确设计难[4-9]。随着计算机模拟软件的应用,通过虚拟铸造系统对铸造充型、凝固、冷却全过程进行仿真模拟,再根据模拟结果优化工艺方案,以达到减少,甚至避免铸造缺陷的目的,不仅可靠性高,同时可实现工艺设计的优化和标准化,已成为复杂铸件设计及研制过程中的重要方法[10-19]。

本文针对框型架实际铸造中出现的缺陷,利用ProCAST 有限元铸造模拟软件对其铸造过程进行数值模拟,研究了两种浇注方式:顶注式和底注式对铸件成型性能及缩松缩孔、变形等方面的影响,得到了薄壁框型架的最佳铸造工艺,为同类薄壁复杂钛合金铸件制造提供技术参考。

1 铸件分析及设计

1.1 铸件材料与结构

产品框型架材料为 ZTC4,其化学成分见表 1。铸件整体为框架型结构,外部轮廓尺寸为 348.0 mm×283.5 mm×198.0 mm,平均壁厚为3 mm,框架内有多处筋板、凸台等,铸件结构如图 1 所示。产品交付

表1 ZTC4化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZTC4
(mass fraction/%)

Ti	Al	V	Si	Fe	C	H	N	O	Rests	
									Single	Sum
Bal.	5.5~6.8	3.5~4.5	0.15	0.3	0.1	0.015	0.05	0.2	0.1	0.4

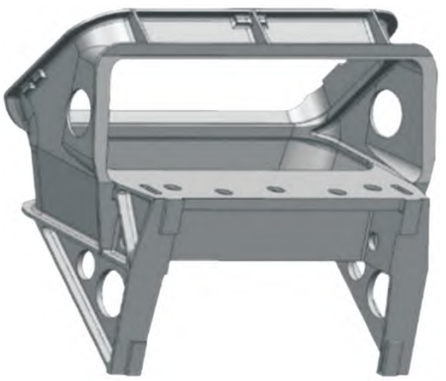


图 1 铸件三维模型
Fig.1 3D model of the casting

条件:要求毛胚尺寸精度高,外表面光洁,内部质量组织致密、无缩孔、缩松、裂纹等铸造缺陷。

1.2 浇注系统设计

形状复杂的框型架钛合金铸件,存在壁厚不均、加工面多等特点。其浇注系统的设计要保证金属液在铸件各个部位较均衡地流动,使热量的传导平稳进行,避免某个部位过热,导致热裂、应力集中等。根据铸件结构特点及以上分析,设计了两种浇注系统,如图 2 所示。其中图 2a 为顶注浇注方式,浇注系统截面比为 1.00:1.25:1.75,其特点是结构简单,型腔易于充满,有利于造型和实现铸件的顺序凝固;图 2b 为底注式浇注系统,截面比为 1.00:1.25:2.20,其特点是充型平稳,有利于排气,同时实现自下而上的顺序凝固。为了保证模拟的准确性及效率,对模型不同部位进行面网格划分,两种浇注系统及铸件网格尺寸均为 3 mm,型壳厚度设置 10 mm。

2 数值模拟及分析

2.1 边界条件设置

ProCAST 模拟分析的边界条件与初始条件为:型壳和铸件接触面类型为 COINC,界面换热系数为1 000 W/(m^2·K),浇注类型为 Gravity Filling。浇注温度为 1 750 ℃,型壳初始温度为 25 ℃,浇注时间 3 s,型壳材料为 CBSMS-M(Chemically Bonded Shell Molding Sand-Mold),应力应变设置中铸件为Linear-Elastic,型壳为 Rigid。

2.2 充型过程分析

两种浇注系统的充型过程模拟如图 3 和 4 所示。其中图 3 是顶注式不同时刻充型过程模拟,当

中国知网 https://www.cnki.net

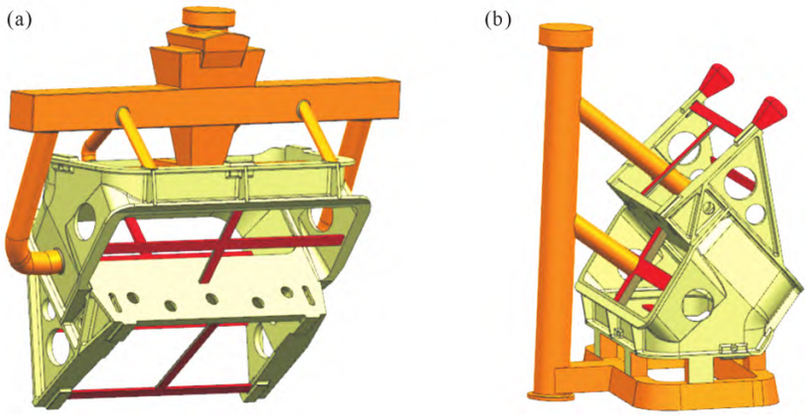


图 2　浇注系统：(a) 顶注式；(b) 底注式

Fig.2　Gating system: (a) top gating system; (b) bottom gating system

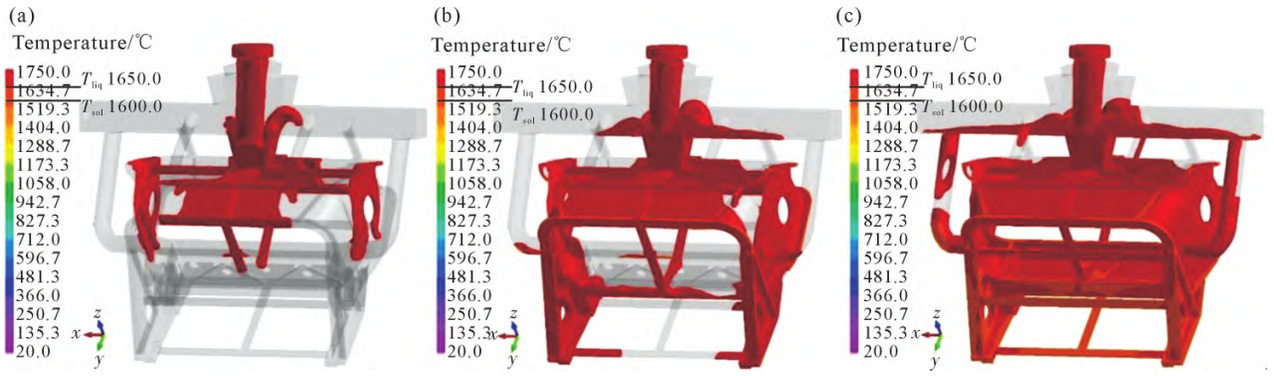


图 3　顶注充型过程：(a) t=0.6 s; (b) t=1.02 s; (c) t=1.78 s

Fig.3　Results of top filling: (a) t=0.6 s; (b) t=1.02 s; (c) t=1.78 s

t=0.6 s 时，合金液通过内浇道分流向底部运动，浇注速度过快，对型壳内部产生激烈冲击；当 t=1.02 s 时，合金液到达型壳底部，同一水平位置的充型状态不相同，合金液液面高低不平，这说明充型的平稳性较差，尤其是框型架筋板部位，紊流现象更加明显；当 t=1.78 s 时，铸件本体充型基本完成，合金液逐渐填充上层浇注系统，直至充型结束。这个过程中的主要问题是铸件内部出现金属液断续、紊流，金属液混乱作不规则运动，不利于充型，整个充型过程中出现浇不足、卷气现象。图 4 为底注式不同时刻充型过程模拟，当 t=1.68 s 时，合金液已完成对直浇道、横浇道、内浇道的充型，开始从 5 个内浇道向铸件本体进行充型，来自 5 处的合金液汇流平稳，充型中未出现卷气；当 t=2.17 s 时，合金液继续向上充型(图 4b)，过程平稳；当 t=2.81 s 时，整个浇注系统充型率达到 99%(图 4c)，未出现紊流现象。采用以上两种浇注系统时，浇注温度表现出由 1 750 ℃到液相线 1 650 ℃从上往下的变化，充型结束时铸件各区域的温度均在液相线以上，没有低于 1 650 ℃的区域或点出现，即表明发生冷隔的概率较小，基本不会出现冷隔缺陷。

2.3　凝固过程与缺陷分布

浇注过程中，铸件的凝固情况直接影响成形质量，两种浇注系统的凝固时间及缺陷分布如图 5 所

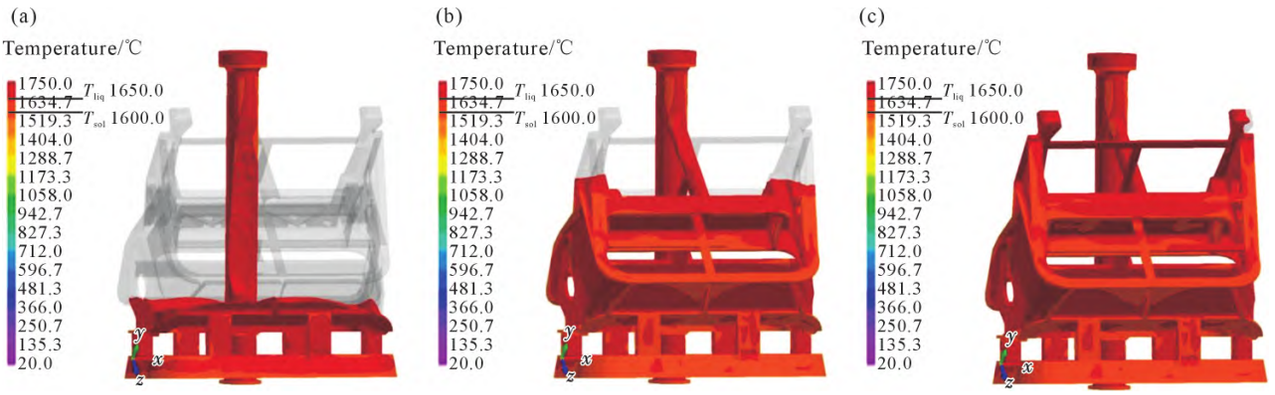


图 4　底注充型过程：(a) t=1.68 s; (b) t=2.17 s; (c) t=2.81

Fig.4　Results of bottom filling: (a) t=1.68 s; (b) t=2.17 s; (c) t=2.81

中国知网　https://www.cnki.net

示。图 5a 和 b 显示顶注浇注系统中，内浇道凝固时间早于铸件中间肋板与侧壁凝固，导致铸件本体靠近中、底部的合金液由于没有得到充足的补充而发生自收缩。总缩松率分布显示最终缺陷分布于肋板与肋板和筋交接位置，且离散性强，顶注式浇注系统设计充型紊流，同时存在卷气现象，因此凝固过程中铸件内部缩孔缩松比较明显。图 5c 和 d 的底注浇注系统显示凝固顺序由上向下、由外向内进行，同时顶部冒口合理设计实现了较好的补缩功能。从凝固中的总缩松率可以看出，铸件内部无缺陷，80%以上的缩孔缩松集中分布在冒口、浇注系统中。

2.4 有效应力分布

有效应力模拟结果如图 6 所示，图 6a 显示顶注式浇注系统下框架的转角(R)处及肋板与侧壁交接处的应力较大，超过了 750 MPa，此时凝固过程结束，易出现冷裂纹。而在底注式条件下，大的应力主要集中在防变形筋区域，如图 6b 所示，铸件主体部分应力分布均匀，且低于屈服应力，不易发生开裂。

2.5 变形结果分析

位移模拟结果如图 7 所示，图 7a 显示顶注方式下铸件本体总变形量超过 1 mm，主要集中在开口及内壁处；图 7b 显示底注方式下开口处总变形量降低到 0.5 mm 以下，且变形主要在冒口及冒口所在平面。

3 实验结果

依据上述计算机模拟仿真结果，分别采用顶注

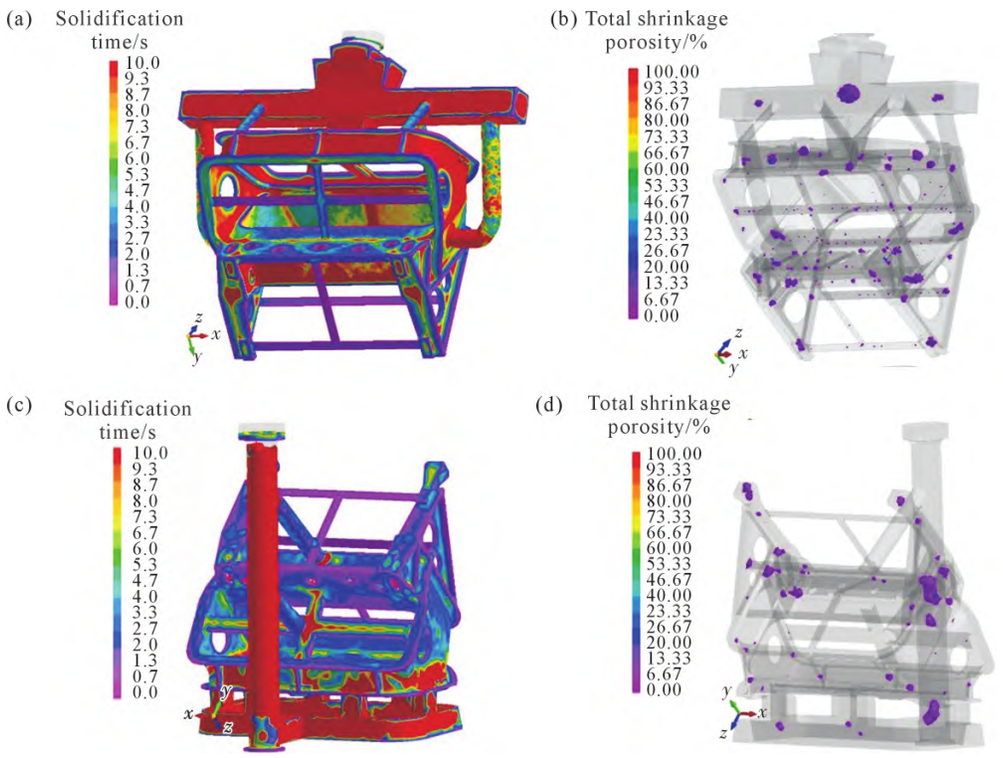


图 5 不同浇注方式下凝固时间及缺陷分布：(a, b) 顶注式；(c, d) 底注式

Fig.5 Solidification time and distribution of shrinkage porosity of castings processed with different gating systems: (a, b) top gating system; (c, d) bottom gating system

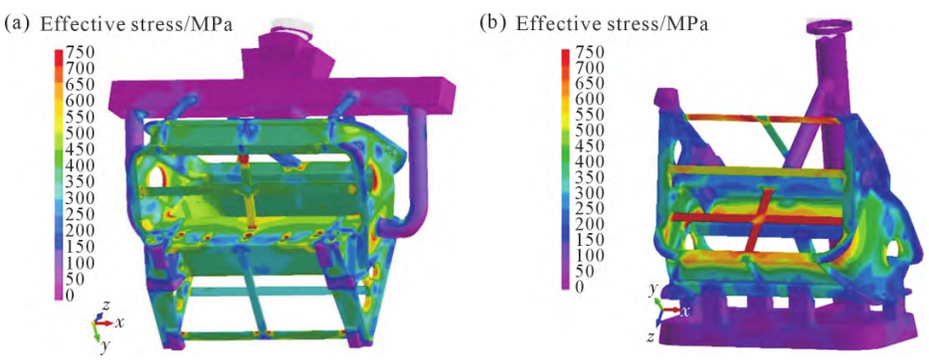


图 6 不同浇注方式下有效应力：(a) 顶注式；(b) 底注式

Fig.6 Effective stress of castings processed with different gating systems: (a) top gating system; (b) bottom gating system

中国知网 https://www.cnki.net

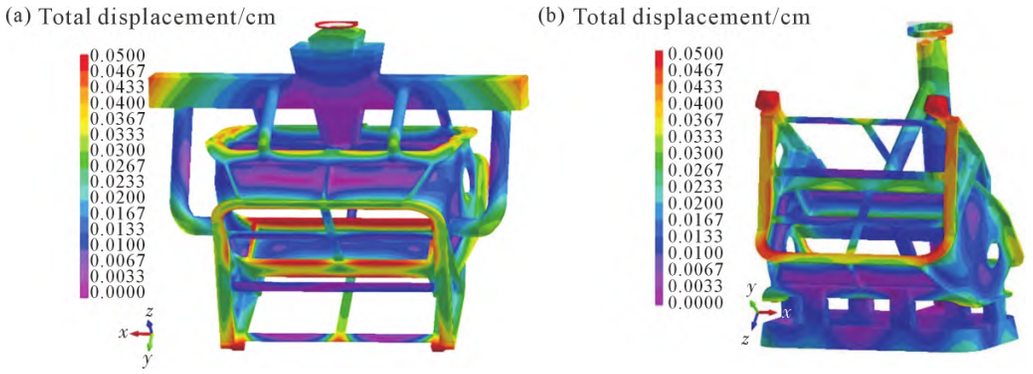


图 7　不同浇注方式下位移分布：(a) 顶注式；(b) 底注式

Fig.7　Displacement of castings processed with different gating systems: (a) top gating system; (b) bottom gating system

式和底注式设计方案，采用静浇工艺，实行同炉浇注，保证浇注工艺的一致性，跟踪铸件浇注成形及缩孔结果，分析模拟仿真可行性和准确性。

3.1　表面质量

铸件浇注成形完整，无欠注、鼓包、冷隔等缺陷，如图 8 所示。表明顶注式及底注式浇注系统合理可行，均可以实现铸造完整成形，试验结果与模拟仿真预测结果吻合。

3.2　冶金质量

完成浇注成形后，采用 X 探伤对铸件内部质量检测，统计结果如表 2 所示。采用顶注浇注系统浇注成形的铸件内部缩孔较多，主要分布在铸件本体肋板转角、肋板与筋交接热节位置以及凸台位置，缩孔位置和体积与计算机模拟结果基本吻合；采用底注浇注系统浇注成形的铸件内部质量整体较好，仅有一处较大的缩孔分布在外壁与筋交接的热节位置。铸件经过表面喷砂处理后进行热等静压处理，热等静压工艺为 130~140 MPa 氩气压力下，920 ℃、保温 2.0~2.5 h，随炉冷却至 300 ℃以下。铸件内部缩松、缩孔在热等静压处理时可以被熔合，大尺寸的缩孔在热等静压工艺后，表面会出现静压坑，结果如图 9 所示。采用顶注浇注系统浇注成形的铸件静压后表面出现多处静压坑；采用底注浇注系统浇注成形的铸件热等静压后表面仅有 1 处静压坑，可以通过焊补的方式进行修复。

3.3　铸件尺寸

采用三维扫描仪对铸件进行扫描检测，评估铸件的尺寸精度，结果如图 10 所示。顶注浇注方式成形的铸件整体轮廓变形量超过了 1 mm，局部面轮廓度超过 3 mm；底注浇注方式成形的铸件面轮廓度可以控制在 1 mm 以内，壁厚尺寸偏差可以控制在 ±0.3 mm 以内，符合设计要求。

4　结论

(1)采用同样浇注参数，底注式浇注生产的钛合金框型架相比于顶注式浇注充型过程平稳，缩松缩孔体积较小，减小了铸件本体肋板及壁板之间的有效应力；底注方式下开口处总变形量降低到 0.5 mm 以下，且变形主要是在冒口及冒口所在平面。

(2)实践表明，应用 ProCAST 模拟铸件充型及凝

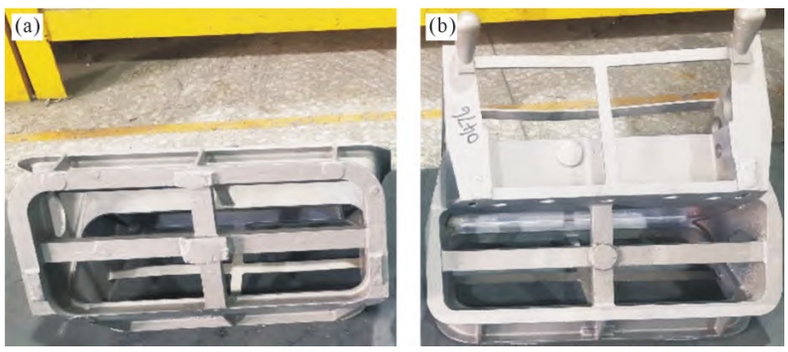


图 8　铸件毛胚：(a) 顶注式；(b) 底注式

Fig.8　Castings processed with different gating systems: (a) top gating system; (b) bottom gating system

表 2 X 探伤缩孔缺陷统计

Tab.2 X testing shrinkage hole defect statistics

The pouring system	Number of shrinkage holes	Location of distribution
Top pouring type	＞5 places	Floor angle, floor and rib joint, boss
Bottom pouring type	1 place	The hot joint where the outer wall meets the tendon

中国知网　https://www.cnki.net



图 9 热等静压后 X 光探伤标识缺陷位置

Fig.9 Location of defects identified via X-ray detection after hot isostatic pressing

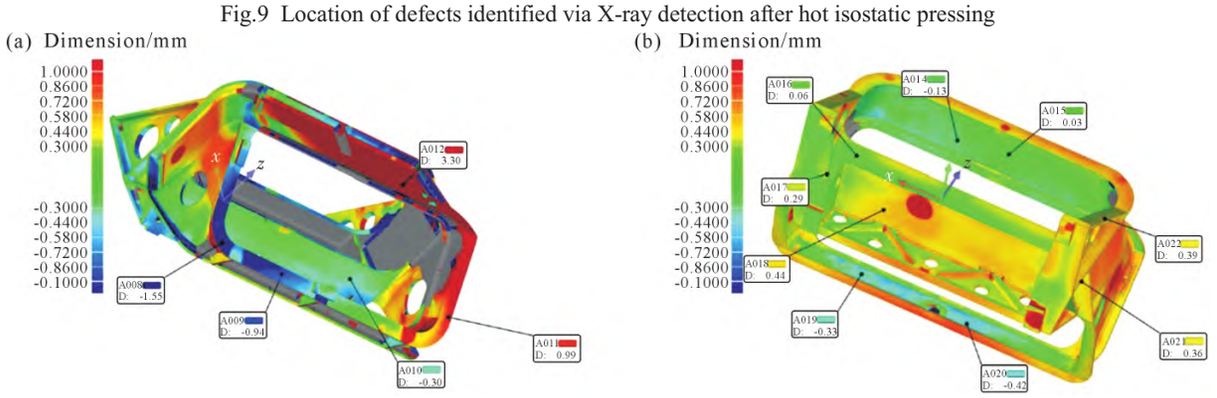


图 10 尺寸测量结果:(a) 顶注式;(b) 底注式

Fig.10 Results of dimensional measurements of castings processed with different gating systems: (a) top gating system; (b) bottom gating system

固过程,可以准确地预测缺陷类型、大小及位置,分析有效应力及位移量,为选择高效工艺方案提供了可靠的依据。

参考文献:

[1] 阚延勇,苏方正,徐曦荣,刘鸿彦,吴丕杰. 工业用钛及钛合金材料的应用现状[J]. 上海化工,2023, 48(6): 58-61.
KAN Y Y, SU F Z, XU X R, LIU H Y, WU P J. Application status of industrial titanium and titanium alloy materials [J]. Shanghai Chemical Industry, 2023, 48(6): 58-61.

[2] 张鹏省,毛小南,赵永庆,曾卫东,洪权,李辉. 世界钛及钛合金产业现状及发展趋势[J]. 稀有金属快报,2007, 26(10): 1-6.
ZHANG P S, MAO X N, ZHAO Y Q, ZENG W D, HONG Q, LI H. Industry status and development trend of world titanium and titanium alloys [J]. Rare Metals Letters, 2007, 26(10): 1-6.

[3] 朱知寿,王新南,童路,曹春晓. 中国航空结构用新型钛合金研究[J]. 钛工业进展,2007, 24(6): 28-32.
ZHU Z S, WANG X N, TONG L, CAO C X. Studies of new-type titanium alloys for aviation industry application in China [J]. Titanium Industry Progress, 2007, 24(6): 28-32.

[4] 王非,李伟东. ZTC4 钛合金支板熔模铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2020, 41(10): 950-953.
WANG F, LI W D. Research on investment casting process of ZTC4 titanium alloy supporting plate [J]. Foundry Technology, 2020, 41(10): 950-953.

[5] 王孟光. 复杂型腔结构钛合金精铸件型壳工艺研究[J]. 材料开发与应用,2014, 29(4): 86-89.
WANG M G. Research of precision casting titanium shell with complicated cavity structure [J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(4): 86-89.

[6] 罗国军,贺同正,沈选金. 熔模精密铸造钛合金气门[J]. 铸造技术,2014, 35(10): 2428-2430.
LUO G J, HE T Z, SHEN X J. Investment casting of titanium alloy valve[J]. Foundry Technology, 2014, 35(10): 2428-2430.

[7] 孙冰,刘义辉,乔海滨,孙宏喆,杨学东. 水溶蜡芯在钛合金精铸件生产中的应用[J]. 铸造技术,2022, 43(6): 468-472.
SUN B, LIU Y H, QIAO H B, SUN H Z, YANG X D. Application of water-soluble wax core in titanium alloy investment casting[J]. Foundry Technology, 2022, 43(6): 468-472.

[8] 孙冰,麻毅,乔海滨,孙宏喆,侯佩华,李渤渤,杨学东. ZTA15 钛合金精铸件漏油失效原因分析[J]. 铸造工程,2023, 47(3): 17-20.
SUN B, MA Y, QIAO H B, SUN H Z, HOU P H, LI B B, YANG X D. Analysis of oil leakage failure cause of a ZTA15 titanium alloy investment casting[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(3): 17-20.

[9] 杨佳静,王涛亮,崔利可,吕昌. SLS 成型技术在钛合金熔模铸造中的应用[J]. 铸造技术,2020, 41(6): 550-552.
YANG J J, WANG T L, CUI L K, LYU C. Application of SLS forming technology in investment casting of titanium alloy [J]. Foundry Technology, 2020, 41(6): 550-552.

[10] 李婷. 钛合金熔模铸造用氧化物陶瓷型壳的制备工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
LI T. Study on preparation technology of oxide ceramic shell for investment casting of titanium alloy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[11] 张攀,时朋召,谢世正,梁亮,徐李军,王明林. 高强钢板坯凝固过程模拟与工艺优化[J]. 钢铁钒钛,2023, 44(2): 132-140.

中国知网 https://www.cnki.net

ZHANG P, SHI P Z, XIE S Z, LIANG L, XU L J, WANG M L. Solidification process simulation and process optimization of high strength steel slab [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(2): 132-140.

[12] 程亚珍，李渤渤，孙冰，杜延乐，孙宏喆，刘茵琪. 薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金，2022, 42(6): 780-784.
CHENG Y Z, LI B B, SUN B, DU Y L, SUN H Z, LIU Y Q. Numerical simulation and process optimization of investment casting process for thin-walled complex titanium alloy casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6): 780-784.

[13] 唐平梅，周扬，姜东滨. 镍基高温合金感应锭浇注过程的数值模拟研究[J]. 钢铁钒钛，2022, 43(4): 127-133, 141.
TANG P M, ZHOU Y, JIANG D B. Numerical simulation on pouring process of nickel base superalloy induction ingot[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(4): 127-133, 141.

[14] 程亚珍，郭举乐，乔海滨，孙宏喆，李渤渤，杨学东，刘茵琪. 基于数值模拟的杆状钛合金铸件熔模铸造工艺研究[J]. 材料开发与应用，2022, 37(5): 37-44.
CHENG Y Z, GUO J L, QIAO H B, SUN H Z, LI B B, YANG X D, LIU Y Q. Study on investment casting process of rod titanium alloy castings based on numerical simulation[J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(5): 37-44.

[15] 常化强，孙冰，孙宏喆，穆晓辉. 大型筒状薄壁钛合金铸件变形预防及工艺改进[J]. 铸造工程，2022, 46(4): 7-10.
CHANG H Q, SUN B, SUN H Z, MU X H. Deformation prevention and process improvement of large cylindrical thin wall titanium alloy castings[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(4): 7-10.

[16] 孙冰，王易山，孙宏喆，乔海滨，李渤渤，王非. ZTA15 钛合金小型复杂厚壁类铸件的缩孔分析及工艺改进[J]. 特种铸造及有色合金，2023, 43(1): 102-105.
SUN B, WANG Y S, SUN H Z, QIAO H B, LI B B, WANG F. Shrinkage cavity analysis and process optimization of small and complex thick-wall ZTA15 titanium alloy castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1): 102-105.

[17] 李辉，时建松，张爱琴. 应力框热应力数值模拟及变形分析[J]. 铸造，2010, 59(1): 38-41.
LI H, SHI J S, ZHANG A Q. Numerical simulation and deformation analysis of thermal stresses in stress frame[J]. Foundry, 2010, 59(1): 38-41.

[18] 程建国，康进武，张家锋，黄天佑，柳百成. 从凝固过程的位移数值模拟结果中提取铸件的变形[J]. 铸造技术，2008, 29(10): 1322-1326.
CHENG J G, KANG J W, ZHANG J F, HUANG T Y, LIU B C. Extraction of deformation of castings from simulated displacement results[J]. Foundry Technology, 2008, 29(10): 1322-1326.

[19] 崔新鹏，张晨，范世玺，南海. 钛合金框架铸件铸造变形和应力的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2015(3): 257-259.
CUI X P, ZHANG C, FAN S X, NAN H. Numerical simulation of casting deformation and stress in the Ti-alloy parts with framework structure[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015(3): 257-259.

中国知网 https://www.cnki.net