

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.4057

Y型管熔模铸造数值模拟工艺研究

王立召¹, 王琳¹, 王子阳¹, 刘鑫霞¹, 薄煜¹, 朱春雷^{1,2}

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072500; 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081)

摘要: Y型管作为航天器燃料的输送管道对其使用寿命极其关键。本文通过三维造型软件对Y型管进行几何建模和结构分析,其整体壁厚较薄,3个法兰及凸台位置较厚,存在充型困难,易产生冷隔等铸造缺陷。采用ProCAST模拟软件对熔模铸造工艺下Y型管进行数值模拟,设置不同的浇注温度和模壳温度,研究对比不同工艺下铸件的冶金质量,选择最优工艺参数,进而提高Y型管的使用寿命。模拟结果表明,在浇注温度1650℃和模壳温度350℃时,在3%判比下,铸件疏松体积最小,为1.42 cm³,得到铸件的冶金质量最优,随后对该工艺参数方案进行了实验验证。经DR验证,得到满足相关技术协议规定的铸件,实验与模拟结果一致,验证了模拟结果的可行性和准确性。

关键词: Y型管; 熔模铸造; 数值模拟; 工艺参数方案

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)10-0981-07

Study on the Numerical Simulation Technology of Y-tube Investment Casting

WANG Lizhao¹, WANG Lin¹, WANG Ziyang¹, LIU Xinxia¹, BO Yu¹, ZHU Chunlei^{1,2}

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072500, China; 2. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Y-shaped tubes are key to the service life of spacecraft fuel delivery pipelines. Three-dimensional modelling software was used to conduct geometric modelling and structural analysis of the Y-shaped tube, of which the overall wall thickness was thin, and the three flanges and convex position were thick, leading to difficulty in filling the mold and the tendency to form cold shuts and other casting defects. The ProCAST simulation software was used to numerically simulate the Y-shaped tube during the investment casting process. By setting different pouring temperatures and mold shell temperatures, the metallurgical quality of castings under different process parameter schemes was studied and compared. The optimal process parameter scheme was selected to further improve the service life of the Y-shaped tube. The simulation results show that when the pouring temperature is 1650 °C and the mold shell temperature is 350 °C, the porosity of the casting is the smallest (1.42 cm³) at a 3% ratio, and the metallurgical quality of the casting is the best. The experimental verification of the process parameter scheme was then carried out. Through DR verification, a casting meeting the requirements of the relevant technical agreement is obtained, and the experimental results are consistent with the simulation results, which verifies the feasibility and accuracy of the simulation results.

Key words: Y-shaped tube; investment casting; numerical simulation; process parameter

钛及钛合金因具有比强度高、密度低、膨胀系数小、生物相容性优及塑韧性好等优势,被广泛运用于民生及军工等领域,如,航天、航空、医疗保健及化工等产业^[1-2]。在砂型铸造过程中,钛合金因具有较强的活泼性与砂型发生反应,故不能使用砂型铸造的方式,只能采用石墨型和熔模精密真空铸造进行铸造。采用熔模精密真空铸造出的钛合金铸件尺

寸精度高,表面质量优,故应用越来越广泛^[3-5]。王非等^[6]对ZTC4钛合金支板熔模铸造工艺进行了研究,认为氧化锆陶瓷型芯可作为钛合金狭小型腔部位的主要材质,水力清洗效果优于机械法和碱洗法。夏兴川等^[7]对钛合金髌关节铸造工艺进行了研究,通过数值模拟与试验验证表明金属型离心铸造工艺方案的可行性。翟宇龙等^[8]针对钛合金离心泵泵体铸造

收稿日期: 2024-03-23

作者简介: 王立召, 1985年生, 本科, 工程师。主要从事轻质合金铸造模拟研究方面的工作。Email: 905014177@qq.com

通讯作者: 朱春雷, 1984年生, 博士。主要从事铝、镁、钛轻质合金和高温合金铸造及工程化应用研究方面的工作。

Email: zchuchunlei@163.com

引用格式: 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, LI Y Y, BO Y, ZHU C L. Study on the numerical simulation technology of Y-tube investment casting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(10): 981-987.

过程中存在的气缩孔缺陷问题展开研究,优化工艺后铸件中气缩孔缺陷得到有效控制。贾志伟等^[9]通过分析大型复杂钛合金进气道铸件制定了合理的“分体熔模精密铸造+真空电子束焊接”的铸件成形工艺方案,解决了大型复杂三通道狭长内腔结构的铸件完整成形问题。付景宇等^[10]采用机加工石墨型铸造工艺,结合模拟仿真技术,确定了 ZTA5 钛合金框形底座铸件的浇注系统设计和浇注参数,得到了合格铸件。陈正阳等^[11]以某钛合金异形薄壁件为研究对象,结合 ProCAST 有限元分析软件最终获得合格的异形薄壁件。程亚珍等^[12]利用数值模拟技术对某薄壁复杂钛合金铸件的温度场、应力场进行了模拟,确定了适合于生产该铸件的铸造工艺。宁兆生等^[13]利用 ProCAST 有限元分析软件对叶轮铸件进行了模拟和分析,最终生产出了高精度优质纯钛叶轮铸件。冉兴等^[14]对大型复杂钛合金熔模铸造技术进行了调研,详细论述了铸件尺寸精度及铸件质量控制的技术难点及应对措施。李飞等^[15]利用 ProCAST 软件对中介机匣的铸造工艺及其缩松等缺陷进行了模拟分析,通过离心铸造技术制备了冶金品质优良中介机匣铸件。司永超等^[16]研究了一种镂空薄壁环状 ZTC4 框架的熔模铸造工艺,利用华铸 CAE 软件对该铸件进行了数值模拟,得到了质量合格的铸件。综上所述,大多数学者对薄壁件熔模铸造工艺研究较少。

Y 型管为航天器燃料的输送管道,对航天器的服役寿命及其关键,钛合金因其具有密度低和抗腐蚀性能良好等优点,使薄壁 Y 型管在保持足够强度的同时,实现了轻量化设计,有效减轻了航天器的整体重量,并且在恶劣环境下仍能保持良好的性能。但是由于 Y 型管壁厚较薄,在熔模铸造过程中存在变形、冷隔等铸造风险。

数值模拟技术不仅能模拟的结果直观显示,而且能辅助工艺人员在铸造过程中对 Y 型管铸件生产工艺的设计过程进行分析,结合技术工人现有的经验,只需经过少量的试验就可完成 Y 型管铸件工艺参数方案的优化,进而提高 Y 型管产品的合格率及使用寿命,降低工程技术成本^[17-21]。

本文以钛合金 Y 型管为研究对象,利用 ProCAST 软件对铸件在不同浇注温度、不同模壳温度条件下的熔模铸造工艺进行了数值模拟分析,得到最优的浇注方案,并对其进行了试验,获得了高精度优质的钛合金 Y 型管铸件,进而提升了 Y 型管产品的合格率及使用寿命。

1 实验材料与方法

1.1 铸件结构分析及实验方法

选用 ZTC4 作为本次 Y 型管模拟和实验材料,化学成分如表 1 所示。利用三维造型软件对其进行几何建模和壁厚分析,几何模型如图 1 所示。铸件尺寸为 302 mm×180 mm×318 mm,属于中型、薄壁类铸件,铸件平均壁厚为 3~5 mm,壁厚分析结果示意图如图 2 所示。选用莫来砂作为型壳材料,型壳厚度 12 mm,根据 ZTC4 合金材料的化学成分,利用 JmatPro 软件和 ProCAST 软件的合金材料数据库等方法,理论计算 ZTC4 合金材料的热物性参数,其结



图 1 几何模型

Fig.1 Schematic diagram of geometric model

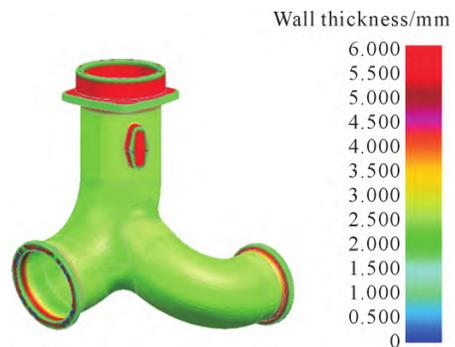


图 2 壁厚分析结果

Fig.2 Schematic diagram of wall thickness

表 1 ZTC4 化学成分

Tab.1 Chemical composition of the ZTC4 alloy

Major element			Impurity content, ≅							(mass fraction/%)	
Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Other		
									Singular	Total	
Matrix	6.2	3.5	0.31	0.14	0.12	0.04	0.014	0.17	0.10	0.40	

果如图3所示。

1.2 铸件浇注系统及实验方案

选用底注式浇注系统对钛合金Y型管进行数值模拟及试验验证,浇注系统示意图如图4所示。基于钛合金Y型管的实际尺寸、结构与铸造特性等因素,建立适宜的假设条件(模壳厚度均匀、外部环境稳定等),利用三维造型软件对铸件和浇注系统进行模型处理,最后借助ProCAST软件建立有限元模型,其模型微元化结果如图5所示。

模型由铸件与浇注系统,模壳,真空环境3部分组成,网格类型均为四面体,微元体总网格数为397万,选用模壳温度和浇注温度作为试验的变量,试验方案如表2所示。

表2 试验方案

Tab.2 Process scheme for the test

Test plan	Pouring temperature/°C	Mold temperature dropping/°C
1	1 750	350
2	1 750	400
3	1 750	450
4	1 700	350
5	1 700	400
6	1 700	450
7	1 650	350
8	1 650	400
9	1 650	450

充型30%时,浇注系统中的底浇盘部分开始被充型,各处合金液的上升速率不太稳定。造成合金液不平稳的原因是开始充型时大量金属液进入主浇道后方向较为紊乱,且主浇道底部无缓冲机构。当充型50%时,金属液开始充型铸件,左边铸件填充速率大于右边铸件填充速率,此时浇注系统内的各处液面高度差异较大,造成此现象的原因是金属液初始浇注位置靠左。当充型70%时,浇注系统中金属液液

2 实验结果及讨论

2.1 充型结果分析

由于充型过程不受浇注温度和模壳温度的影响,选取方案1下铸件的充型结果进行分析,图6为钛合金Y型管的充型过程示意图。由图可知,当

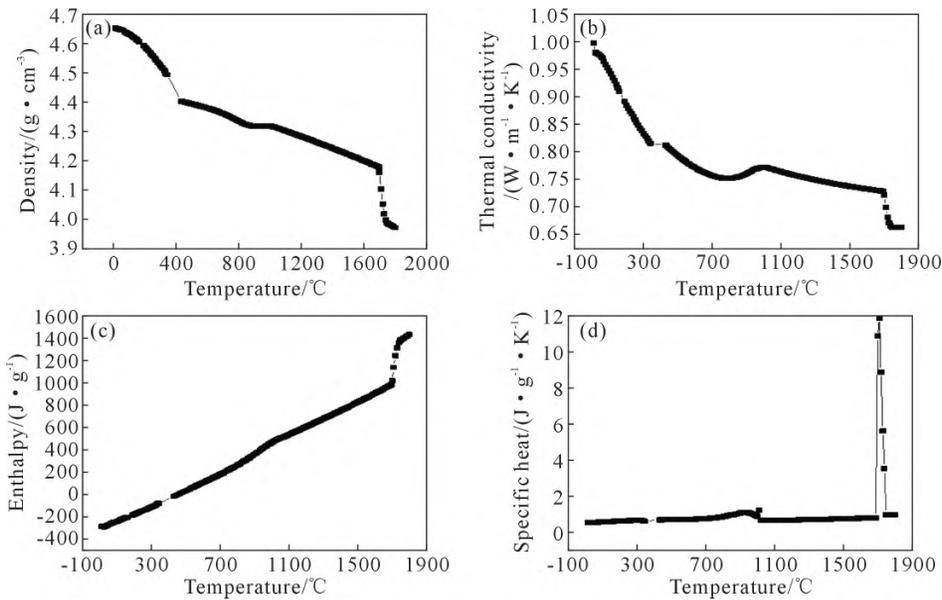


图3 ZTC4材料的热物性参数:(a)密度;(b)热导率;(c)焓;(d)比热

Fig.3 Thermophysical parameters of the ZTC4 material: (a) density; (b) thermal conductivity; (c) enthalpy; (d) specific heat

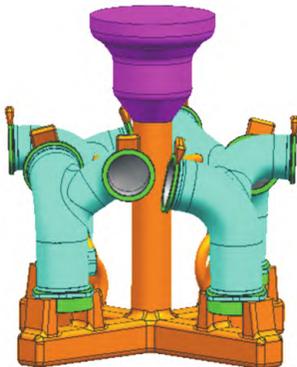


图4 Y型管浇注系统

Fig.4 Schematic diagram of the Y-shaped pipe pouring system

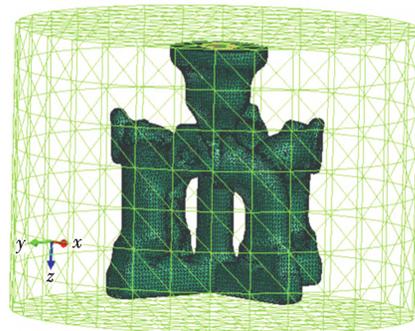


图5 Y型管模型微元化结果

Fig.5 Schematic diagram of the mesh of the Y-shaped tube model

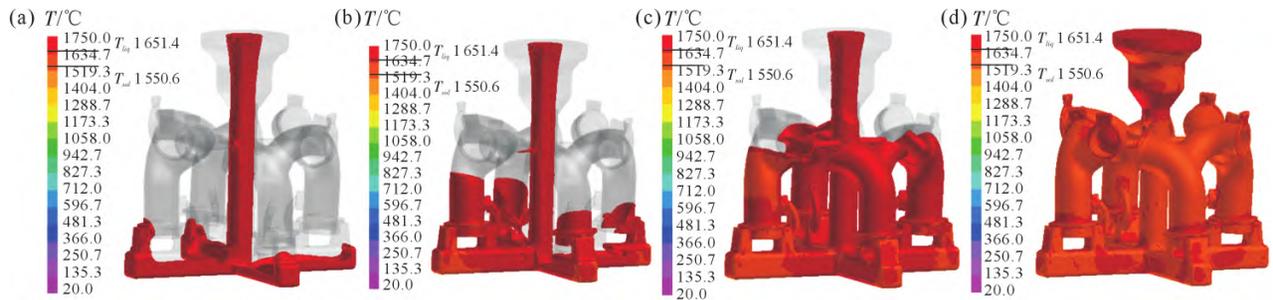


图 6 钛合金 Y 型管充型过程示意图 : (a) 30%; (b) 50%; (c) 70%; (d) 100%

Fig.6 Schematic diagram of the filling process of titanium alloy Y-shaped tubes: (a) filling 30%; (b) filling 50%; (c) filling 70%; (d) filling 100%

面基本一致, 金属液填充平缓稳定, 当充型 100% 时, 充型过程结束, 整体浇注系统开始逐渐凝固。由此可见, 本次充型过程初期金属液充型较为紊乱, 后期充型过程较为平缓稳定。

2.2 孤立液相区分析

孤立液相区是指铸件凝固过程中被已凝固金属所包围的多个封闭熔融金属区域。孤立液相区能定量地预测铸件缩孔和缩松缺陷, 以方案 1 为例, 图 7 为铸件孤立液相区分布示意图。

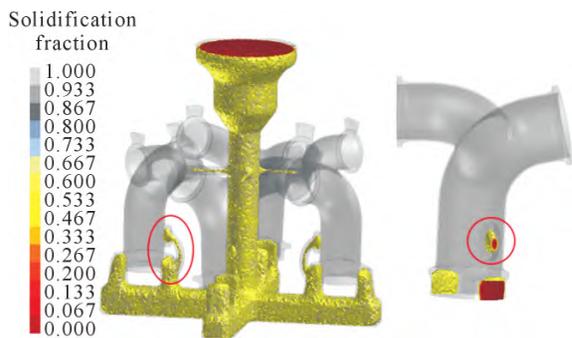


图 7 铸件孤立液相区分布

Fig.7 Distribution diagram of the isolated liquid phase zone in the castings

由图 7 可得, 铸件在凸台位置(图中红色圆圈位置)存在孤立液相区, 在凝固前凸台位置的补缩通道被截断, 即凸台区域为封闭熔融金属区域, 造成此现象的原因是水口的模数小于凸台位置的模数。在实际铸造过程中, 凸台位置可能产生缩孔或缩松缺陷。

2.3 疏松分析

疏松是指铸件在凝固较缓慢的位置因微观补缩通道的堵塞而在枝晶间及枝晶晶臂间形成的细小孔洞。图 8 为在 3% 判比下不同试验方案铸件疏松分布示意图。

由图 8 和表 3 可得, 在 3% 判比下, 铸件在方案 7 下疏松体积最小, 为 1.42 cm³; 在方案 2 下疏松体积最大, 为 2.21 cm³; 铸件最优试验方案为方案 7。由于浇注温度和模壳温度的影响, 在凝固时铸件凝固顺序存在差异, 进而导致不同试验方案时铸

表 3 3% 判比下不同试验方案铸件疏松体积

Tab.3 Volume of shrinkage porosity in castings under different test plans at a 3% ratio

Test plan	Loose volume/cm ³
1	1.64
2	2.21
3	1.45
4	1.64
5	1.93
6	1.65
7	1.42
8	1.82
9	1.88

件疏松体积不一致。由铸件在不同试验方案下疏松结果可得, 在保证铸件充满的情况下, 浇注温度和铸件的模壳温度越低, 铸件产生的疏松缺陷最少。

2.4 浇不足分析

浇注温度和模壳温度越低, 造成铸件冷隔缺陷的机率越大。在方案 7 时浇注温度和模壳温度最低, 方案 7 下铸件浇不足示意图如图 9 所示。

由图 9 可知, 铸件在方案 7 下存在有轻微浇不足的风险, 根据之前模拟铸件浇不足与实际结果对比经验来看, 实际浇注的铸件可能不会存有浇不足风险, 因此可对此试验方案下铸件进行实验, 验证模拟结果的准确性。

2.5 工艺验证

根据模拟得到的最优试验方案, 对方案 7 进行了蜡模压制、模组组焊、型壳制备、脱蜡焙烧、熔炼浇注、清壳切割、热处理、精修打磨、检验和包装发货等工序。浇注后的铸件经 DR(digital radiography) 检查后内部无裂纹、缩松等冶金缺陷, 如图 10 所示, 铸件实物如图 11 所示, 满足相关技术协议的规定。

3 结论

(1) 利用三维造型软件对钛合金 Y 型管进行几何建模和结构分析, 通过 ProCAST 模拟软件对铸件在

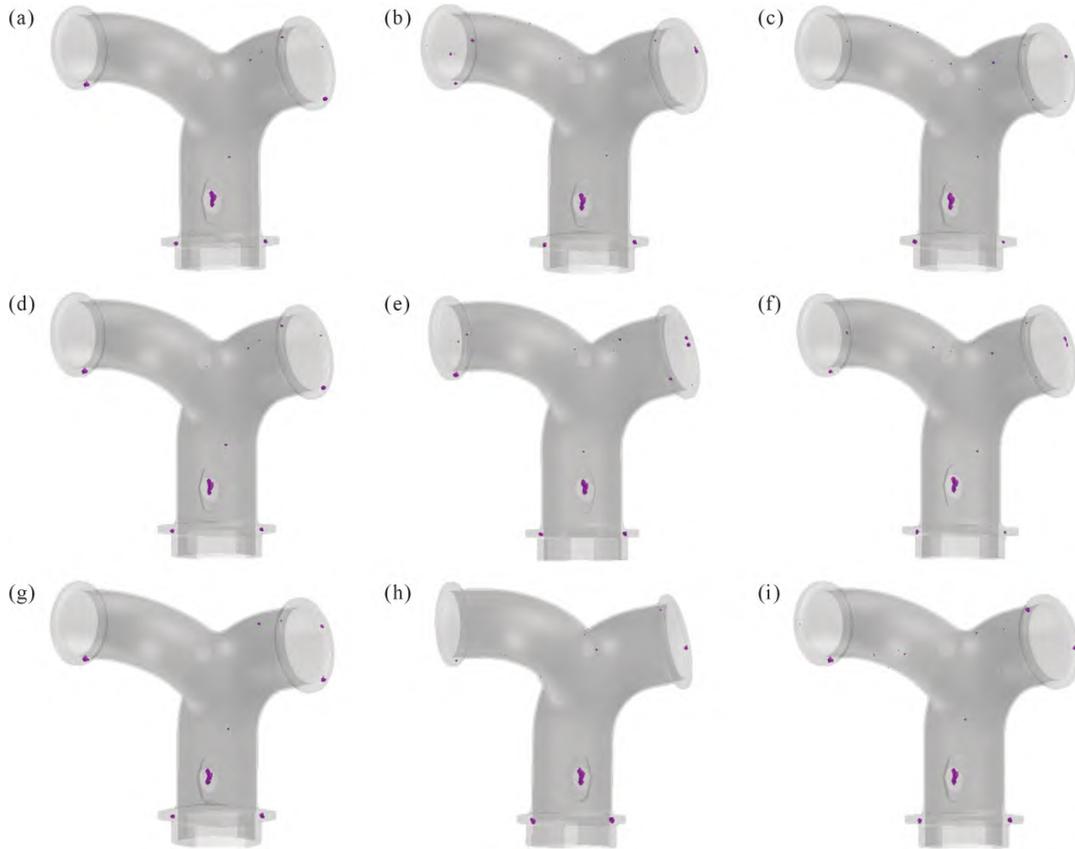


图 8 3%判比下不同试验方案铸件疏松分布:(a)方案 1;(b)方案 2;(c)方案 3;(d)方案 4;(e)方案 5;(f)方案 6;(g)方案 7;(h)方案 8;(i)方案 9

Fig.8 Schematic diagram of shrinkage porosity distribution in castings under different experimental schemes: (a) plan 1; (b) plan 2; (c) plan 3; (d) plan 4; (e) plan 5; (f) plan 6; (g) plan 7; (h) plan 8; (i) plan 9

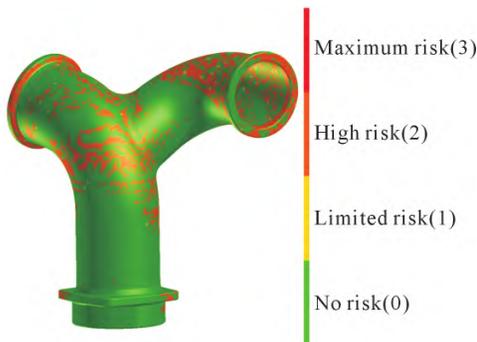


图 9 方案 9 铸件浇不足分布

Fig.9 Distribution of misrun in the casting of plan 9



图 10 铸件 DR

Fig.10 DR image of the casting



图 11 铸件实物

Fig.11 Physical image of the castings

不同试验方案下进行模拟分析,从充型、孤立液相区和疏松 3 个方面分析铸件的冶金质量,得到在浇注温度 1 650 ℃和模壳温度 350 ℃下铸件的质量最优。

(2)在保证中型薄壁铸件充满的情况下,铸件的浇注温度和模壳温度越低,铸件产生的疏松也缺陷最少。

(3)通过实验验证,得到无疏松和夹杂等冶金缺陷的铸件,满足相关技术协议的规定。

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] 苏鹏, 刘鸿羽, 赵军, 刘时兵, 史昆, 宁兆生. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J]. *铸造*, 2012, 61(12): 1401-1404.
SU P, LIU H Y, ZHAO J, LIU S B, SHI K, NING Z S. Research status of shell mold preparation for titanium alloy investment casting[J]. *Foundry*, 2012, 61(12): 1401-1404.
- [3] 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 investemt casting technology for titanium alloys castings of china[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2008 (S1): 462-464.
- [4] SEN I, TAMIRISAKANDALA S, MIRACLE D B, RAMAMURTY U. Microstructural effects on the mechanical behavior of B-modified Ti-6Al-4V alloys[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55 (15): 4983-4993.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 夏兴川, 李日, 刘宏伟, 井常立. 钛合金髋关节铸造工艺 CAD 及模拟验证[J]. *铸造技术*, 2007, 28(10): 1375-1378.
XIA X C, LI R, LIU H W, JING C L. Computer aided design for the casting technology of the titanium hip joint and its simulation [J]. *Foudry Technology*, 2007, 28(10): 1375-1378.
- [8] 翟宇龙, 陈战考, 程佳, 谢霄, 殷莹, 孙博. 钛合金离心泵泵体铸造工艺设计及优化[J]. *铸造设备与工艺*, 2023(6): 14-18.
ZHAI Y L, CHEN Z K, CHENG J, XIE X, YIN Y, SUN B. Design and optimization of casting process of titanium alloy centrifugal pump casting[J]. *Foundry Equipment & Technology*, 2023(6): 14-18.
- [9] 贾志伟, 殷建锋, 鞠忠强, 崔新鹏, 南海. 大型复杂钛合金进气道铸件成形工艺研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(4): 570-574.
JIA Z W, YIN J F, JU Z Q, CUI X P, NAN H. Forming process of large-scale complex titanium alloy air inlet[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2023, 43(4): 570-574.
- [10] 付景宇, 纪志军, 肖强伟, 赵瑞斌. ZTA5 钛合金薄壁复杂框形底座铸件的研制[J]. *铸造工程*, 2023, 47(2): 6-11.
FU J Y, JI Z J, XIAO Q W, ZHAO R B. Development of ZTA5 titanium alloy thin-walled complex frame base castings[J]. *Foundry Engineering*, 2023, 47(2): 6-11.
- [11] 陈正阳, 杨树峰, 谢锦丽, 于鸿鑫, 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.
- [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] 宁兆生, 宋克兴, 张彦敏, 赵军, 郑松翔, 陈彪, 于志强, 杨晓曦, 王彦鹏. 高精度钛合金叶轮熔模精密铸造工艺优化[J]. *铸造*, 2022, 71(6): 751-754.
NING Z S, SONG K X, ZHANG Y M, ZHAO J, ZHENG S X, CHEN B, YU Z Q, YANG X X, WANG Y P. Optimization of investment casting process for high precision titanium alloy impeller [J]. *Foundry*, 2022, 71(6): 751-754.
- [14] 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, CAO J, LI P J. Investment casting technologies for large complex titanium alloy parts[J]. *Foundry*, 2021, 70(2): 139-146.
- [15] 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 D B. Rapid investment casting process for titanium alloy intermediate casing[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(6): 637-639.
- [16] 司永超, 黄东, 魏战雷, 余龙, 崔新鹏, 南海. 一种镂空薄壁 ZTC4 框架的熔模铸造工艺研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36 (12): 1302-1304.
SI Y C, HUANG D, WEI Z L, YU L, CUI X P, NAN H. Investment casting process of a hollow and thin-walled ZTC4 framework [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2016, 36(12): 1302-1304.
- [17] 吴士平, 张军, 徐琴, 郭景杰, 施家飞, 辛惠军. 钛合金铸件立式离心铸造凝固组织的数值模拟研究[J]. *中国体视学与图像分析*, 2010, 15(2): 134-140.
XU S P, ZHANG J, XU Q, GUO J J, SHI J F, XIN H J. Solidified microstructure simulation of the titanium castings made by vertical centrifugal casting [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2010, 15(2): 134-140.
- [18] 刘其涛. Ti48Al2Cr2Nb 合金铸件应力和变形的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU Q T. Research on numerical simulation of stress and deformation of Ti48Al2Cr2Nb alloy castings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] 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.
- [20] 袁焕龙, 曹喜彪, 黄挺挺. 铝合金缸盖倾转铸造数值模拟及优化

- 研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1068-1071.
- YUAN H L, CAO X B, HUANG T T. Numerical simulation and optimization of tilting casting of aluminum alloy cylinder head[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(10): 1068-1071.
- [21] 江长, 向思雨. 基于 ProCAST 的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化[J]. 铸造工程, 2020, 44(5): 40-43.
- JIANG C, XIANG S Y. Numerical simulation and optimization of casting process of headstock based on ProCAST[J]. Foundry Engineering, 2020, 44(5): 40-43.