DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4137

ZTi60 钛合金大型构件熔模精铸工艺及组织性能研究

刘云超[2],李　弘[1,2],刘珍君[1,2],孟泽炎[2],程永建[1,2],王　凯[1]

(1. 北京钢研高纳科技股份有限公司,北京 100081; 2. 河北钢研德凯科技有限公司,河北 保定 072750)

摘　要:针对 ZTi60 钛合金大型构件熔模精铸件研制周期长、风险大和成本高的问题,开展了大型构件缩比件的熔模铸造工艺和组织性能研究,为大型构件工艺设计和优化提供技术支持和试验验证。基于 ZTi60 合金特点,设计缩比件的铸造工艺参数,并使用计算机软件对浇注系统进行设计和模拟验证优化。此外,对单铸试棒进行不同参数热等静压实验以确定最佳热等静压工艺,对结构复杂难焊位置进一步加大补焊难度后试验 ZTi60 可焊性,取样测试不同位置的微观组织、化学成分和力学性能。结果表明,铸件浇注成形完整,表面无明显缺陷;热等静压后疏松和缩孔压实,密集气孔得到有效改善,且铸件具有良好的可焊性;铸件各部位化学成分相同、组织相同但晶粒度差异较大,力学性能均高于性能指标。

关键词:高温钛合金;大型构件;熔模铸造;力学性能

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)10-0994-10

Study on the Investment Casting Process, Microstructure and Mechanical Properties of Large-sized Structural Components in ZTi60 Titanium Alloy

LIU Yunchao[2], LI Hong[1,2], LIU Zhenjun[1,2], MENG Zeyan[2], CHENG Yongjian[1,2], WANG Kai[1]

(1. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China)

Abstract: To address the problems of a long development period, high risk and high cost, the investment casting process and microstructure properties of large component reduction parts of ZTi60 titanium alloy were studied to provide technical support and test verification for the process design and optimization of large components. On the basis of the characteristics of the ZTi60 alloy, the casting process parameters of the reduced parts were designed, and the pouring system was designed and simulated via computer software. In addition, a hot isostatic pressing test with different parameters was carried out on a single casting test rod to determine the best hot isostatic pressing process for ZTi60 castings. The weldability of ZTi60 was tested after further increasing the difficulty of welding in the difficult position of the complex structure, and the microstructure, chemical composition and mechanical properties at different positions were tested. The results show that the casting is complete, and no obvious defects are observed on the surface of the casting. After hot isostatic pressing, the dense porosity is effectively improved, and the casting has good weldability. The chemical composition and structure of each part of the casting are uniform, whereas the grain size varies significantly. The mechanical properties are greater than the performance indices.

Key words: high-temperature titanium alloy; large-sized structural components; investment casting; mechanical property

收稿日期:2024-07-20

基金项目:国防科工局年度配套项目(2019-112)

作者简介:刘云超,1991 年生,学士,工程师. 主要从事钛及钛合金铸造,包括钛合金产品设计与开发、工艺研究与应用等方面的工作. Email: 15104605670@126.com

通讯作者:李　弘,1976 年生,硕士,高级工程师. 主要从事钛及钛合金铸造材料和工艺技术方面的工作. Email: sevenholly@163.com

引用格式: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.

中国知网　https://www.cnki.net

目前,高速飞行器结构件对高温性能和复杂结构的需求不断提升,采用高温钛合金熔模精铸技术生产高速飞行器结构件已成为发展趋势[1-4]。熔模精铸技术的工艺流程主要有工艺设计、蜡模制备、模壳制备、熔炼浇注和后处理,工艺流程较为复杂,每道工序均会对最终产品的尺寸精度产生影响[5-9]。此外,由于钛合金化学活性强的特征,其金属液容易与模壳发生化学反应,导致铸件冶金质量问题[10-12]。尤其是对于 Ti55、Ti60 和 Ti65 等高温钛合金,除了易发生化学反应外,由于含有 Nb 和 Ta 等高温难熔元素,流动性差,产生铸造缺陷的风险大,裂纹倾向严重。这些问题为高温钛合金熔模精铸的完整成型、尺寸精度、成分控制和力学性能达标带来了很大挑战[13-17]。因此需要根据高温钛合金的特性,设计合理的铸造工艺,并进一步对铸件微观组织和力学性能进行研究。

研究人员对高温钛合金熔模铸造工艺和后处理工艺进行了研究。时俊克[18]针对 ZTA15 钛合金复杂薄壁构件开发了离心熔模铸造充型与凝固数值模拟求解器,对铸造过程可能出现的缺陷进行预测,通过优化铸造工艺参数,实现了平稳充型,并使缩孔和缩松问题大为改善。李义军等[19]通过改进 ZTA15 钛合金熔模精密铸造的铁基引流工装,抑制了铁元素进入铸件型腔,解决了铸件在机械加工过程中出现裂纹和掉块现象。刘鸿羽等[11]对 ZTA15 钛合金大型框架铸件与氧化钇铸型的界面反应研究,研究发现采用酸洗工艺可以去除铸件表面 200~500 μm 的组织过渡区及富氧扩散层。朱郎平等[20]对 TG6 高温钛合金熔模铸造试棒进行 900 ℃热等静压和 750 ℃退火热处理后,强度和塑性从铸态组织的 871.3 MPa 和 0.8%提升至约 950 MPa 和 5%。目前,中科院金属所在高温钛合金铸造研究上走在了行业前列[21],但针对高温钛合金熔模精铸件工艺及其后处理研究的公开报道仍较少,可为新型高温钛合金熔模精铸件生产提供的参考案例和数据严重不足。

本文以 ZTi60 高温钛合金大型构件零件为研究对象,开展了铸造工艺、成形计算机模拟和铸件组织性能研究,突破大型复杂薄壁件型壳制备、完整成形、冶金质量控制、补焊修复、热等静压和尺寸控制等一系列关键技术,可为大型、复杂薄壁件产品的批量化生产和其他高温钛合金大型铸件生产提供技术指导。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

图 1 为大型构件铸件结构示意图,其外廓尺寸 1 600 mm×800 mm 左右,零件呈非回转半敞开结构,大面积壁厚 3 mm,是典型的大尺寸、复杂、薄壁铸件,采用 ZTi60 高温钛合金进行整体铸造成形,ZTi60 是中科院金属所在变形钛合金 Ti60 的基础上开发了 600~750 ℃短时热强铸造钛合金,ZTi60 材料的名义成分见表 1。

基于大型构件的结构特点,设计了合理的铸件结构,制定了可行的铸造工艺。为给后续的大型制件工艺设计和优化提供技术支持和试验验证,预先开展了缩比试验件的工艺研究。如图 2 所示,缩比试验件为大型构件铸件完全 1:2 的缩小件,结构和细节完全相同。缩比件虽然外形尺寸变小,但因铸件为整体缩比,其壁厚比正式铸件更小,难度并未有实质上的降低。采用三维制图软件进行浇注系统设计,设置铸件收缩率和机加工余量,设计与选择铸孔、铸槽、

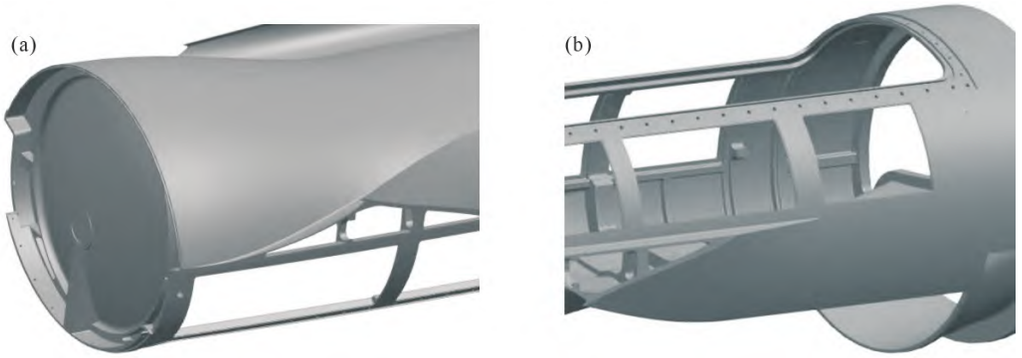


图 1　大型构件铸件结构示意图:(a) 左侧视图;(b) 右侧视图

Fig.1　Schematic diagram of the casting structure of the fuel tank skeleton: (a) left side view; (b) right side view

表1　ZTi60化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZTi60

(mass fraction/%)

Element	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nb	Ta	N	H	O	C
Content/%	5.5~6.6	3.5~4.5	3.2~3.7	0.3~0.7	0.3~0.5	0.3~0.7	0.1~0.5	≤0.05	≤0.012	≤0.2	≤0.1

中国知网　https://www.cnki.net

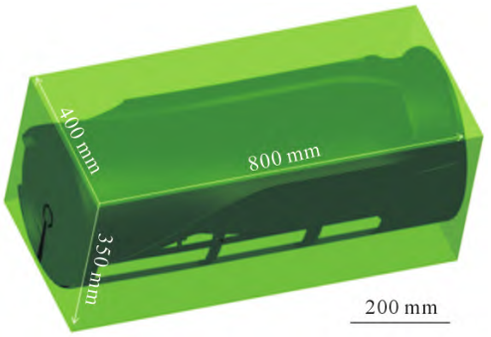


图 2 缩比试验件形状及轮廓尺寸
Fig.2 Shape and contour size of the scaled test piece

工艺孔和工艺凸台，确定浇注方式，以实现铸件完整成形。同时，在铸件成型的基础上，使用铸造模拟软件开展铸件工艺设计研究和成形计算机模拟，对铸造工艺进行优化。

在型壳工艺方面：针对 ZTi60 材料铸造裂纹倾向严重的工艺特点，采用具有良好化学惰性的特殊面层与具有良好退让性和透气性的加固层的复合型工艺，制壳工艺参数见表 2。对型壳面层惰性、型壳综合强度、退让性、溃散性等方面进行调控，控制和减轻铸件裂纹产生的风险，减少铸件夹杂和密气等冶金缺陷。

在浇注工艺方面：针对高温钛合金铸件易产生各类冶金缺陷，且缺陷修复异常困难，导致产品生产周期长和废品率高的问题。基于铸造过程充型凝固规律和前期研究经验，并进行计算机模拟，设计了浇注工艺，如表 3 所示。

在后处理方面：铸件经过清壳、打磨和吹砂后进行热等静压。铸件热等静压前，单独浇注一炉试棒，对该炉试棒进行热等静压试验。根据 ZTi60 材料 1 050~1 060 ℃的相变区间，设计了如表 4 所示的 3 组热处理制度进行热等静压工艺研究，以确定最佳工艺制度。

浇注完成后，采用最佳热等静压工艺进行处理，热等静压后对铸件进行焊接性能测试，焊丝选用 Ti60 焊丝。补焊工艺为焊丝处理、焊前处理、补焊工艺和焊后检查。焊接前，从铸件上不同位置取样进行成分检测、拉伸力学性能测试和组织观察。取下试样经磨制抛光并用氢氟酸硝酸水溶液腐蚀后，获得金相组织观察样品。

1.2 实验分析与检测方法

(1)力学性能测试　试样按照 GB/T 228-2015《金属拉伸试验试样》的规定，采用线切割及机加工的方法加工成标准圆形横截面试样，试样直径为 5 mm、标距为 25 mm，在 Instron 电子万能试验机上进行检测，加载速度 2 mm/min。

(2)金相组织观察　金相组织试样经过切样、镶样、预磨、抛光、侵蚀等过程后，进行组织观察。腐蚀液为 K 氏腐蚀剂：5%氢氟酸 +10%硝酸 +85%水(体积分数)。采用 Olympus 金相显微镜，对已制备好的试样进行金相分析，主要观察式样组织的大小、形貌、分布等情况。

(3)化学成分分析　按照 HB 5297-1-25、HB 7716-13 进行化学成分分析检验。

表2 制壳工艺参数
Tab.2 Parameters for the shell-making process

Serial number	Name of parameter	Parameter values	Serial number	Name of parameter	Parameter values
1	Top layer	2	3	Reinforcement layer	6
2	Transition layer	1	4	Sealing paste layer	1

表 3 缩比试验件熔炼浇注工艺参数
Tab.3 Melting and pouring process parameters of the scaled test pieces

Serial number	Equipment	Name of parameter	Parameter values
1	Trolley type resistance furnace	Shell preheating temperature	(400±25) ℃
2	Trolley type resistance furnace	Shell holding time	≥2 h
3	Vacuum consumable condenser furnace	Degree of melting vacuum	≤1.0 Pa
4	Vacuum consumable condenser furnace	Melting current	18 000~22 000 A
5	Vacuum consumable condenser furnace	Melting voltage	35~45 V
6	Vacuum consumable condenser furnace	Cooling time	≥40 min
7	Vacuum consumable condenser furnace	Metal cast	120 kg

表 4 热等静压试验制度
Tab.4 Method of hot isostatic pressure test

Scheme	Specification/mm	Temperature/℃	Holding time/h	Holding pressure/MPa	Cooling mode	Oven temperature/℃
I	ϕ20	920	2	120	Furnace cooling	≤300
II	ϕ20	960	3	135	Furnace cooling	≤300
III	ϕ20	1 060	2.2	135	Furnace cooling	≤300

中国知网 https://www.cnki.net

(4)尺寸检测设备　采用手持式三维蓝光扫描设备进行蜡件和铸件尺寸的检测，并采用三维扫描对比软件进行数据处理，该设备最高扫描分辨率为0.01 mm。

2　实验结果及讨论

2.1　铸造工艺研究

按照正式件的铸件设计、工艺和浇注系统设计制备缩比件蜡模,在蜡模投产之前已经按比例进行了数模处理，采用3D打印的方式制备缩比件蜡模和浇注系统，其收缩参考正式件 (因尺寸外形不一样,收缩率进行了微调),浇注系统原则来源于正式件的设计原则。如图3所示,采用底注式浇注系统,使浇注过程充型平稳、对型壳冲击小、利于顺序凝固及排气,有利于保证铸件冶金质量;设置合理的冒口和辅助支撑进行排气和补缩;减少和缩小薄壁区域的排气冒口,减少热节的产生,降低铸件质量风险。

使用铸造模拟软件对设计的模型和浇注系统进行浇注模拟验证,分析缩松,缩孔,浇不足,冷隔等铸造缺陷。浇注温度1 700 ℃,型壳温度500 ℃,浇注时间5 s，型壳材料莫来砂壳 (内部采集数据设定),型壳壁厚12 mm,冷却方式随炉冷却>2 h。浇注结果如图4所示,铸件无浇不足的风险,铸件底端个别部位存在较小的孤立液相区,其余位置均不存在孤立液相区,疏松主要存在于上图红色圈出的位置,铸件基本无氧化夹杂现象。

采用3D打印制备蜡模,蜡模采用如图5a所示模型分段制备后整体拼接，尺寸精度可反复调整,确保蜡模尺寸精度合格,变形量可控。如图5b和c所示，最终蜡模尺寸精度控制较好，收缩率设置合理,符合预期。

完成蜡模组合后,安装工装后进行制壳。如图6所示,试验结果表明,涂料工装可操作性、涂挂均匀性、干燥均匀性均达到预期设计,过程操作简便,制壳过程中平稳。工装的结构刚度较好,未出现型壳破损和开裂,工装变形等质量问题。后续脱蜡、焙烧过程中工装芯骨可实现去除,高风险环节,未造成型壳损坏,型壳厚度均匀。制壳过程中无裂纹、胀壳和掉皮等异常现象。

如图7所示，铸件浇注完成并吹砂后，成形完整,无欠注和跑火现象,铸件表面平整、光滑,无明显的裂纹、冷隔和流痕等缺陷。这表明铸件工艺方案和浇注系统合理,能够满足试制生产要求。

2.2　铸件后处理工艺研究

2.2.1　试棒热等静压工艺研究

研究采用的单铸试样直径为ϕ20 mm左右,高度约为160 mm,试样状态基本一致;试样热等静压前进行了X光抽测,试样均存在缩孔、气孔和缩松缺陷。

(1)方案I采用ZTC4和ZTA15铸件热等静压工艺,ZTi60试样和铸件随炉进行热等静压如图8a所示,压后X光显示缺陷并未完全消除,试样加工后和X光显示多数试样存在缺陷(图8b),无法进行性能测试。

(2)方案III试验效果不理想,在此工艺制度下,个别试样发生了严重变形,如图9所示,试样失去强度,呈半固态状,按极限理论推断,该工艺制度的温

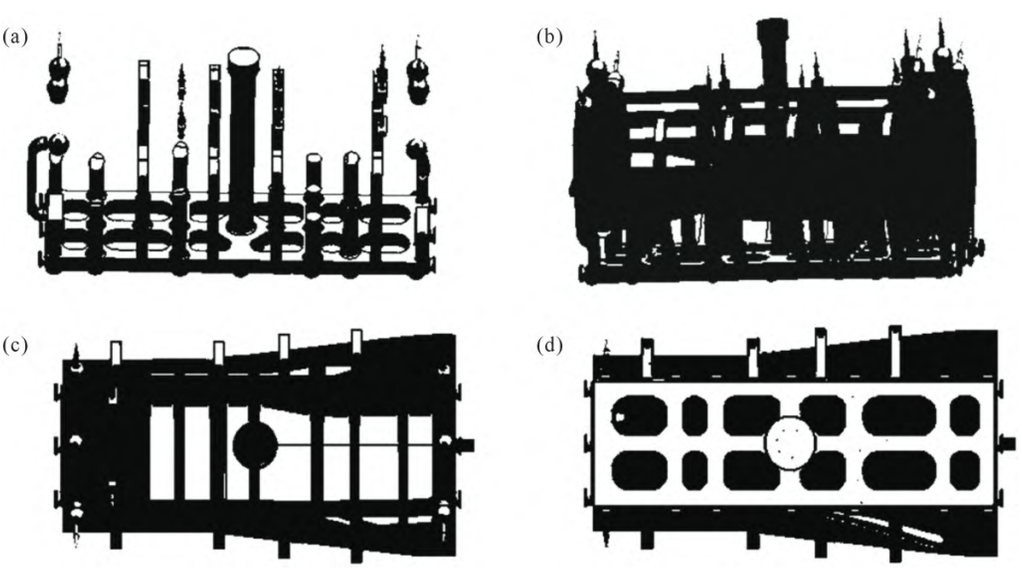


图3　铸件蜡模和浇注系统设计:(a) 浇道和浇冒系统;(b) 组合系统;(c) 加强筋和辅浇;(d) 浇道和芯骨

Fig.3　Design of the casting wax pattern and gating system: (a) sprue and pouring system; (b) combined system; (c) stiffener and auxiliary pouring; (d) sprue and core

中国知网　https://www.cnki.net

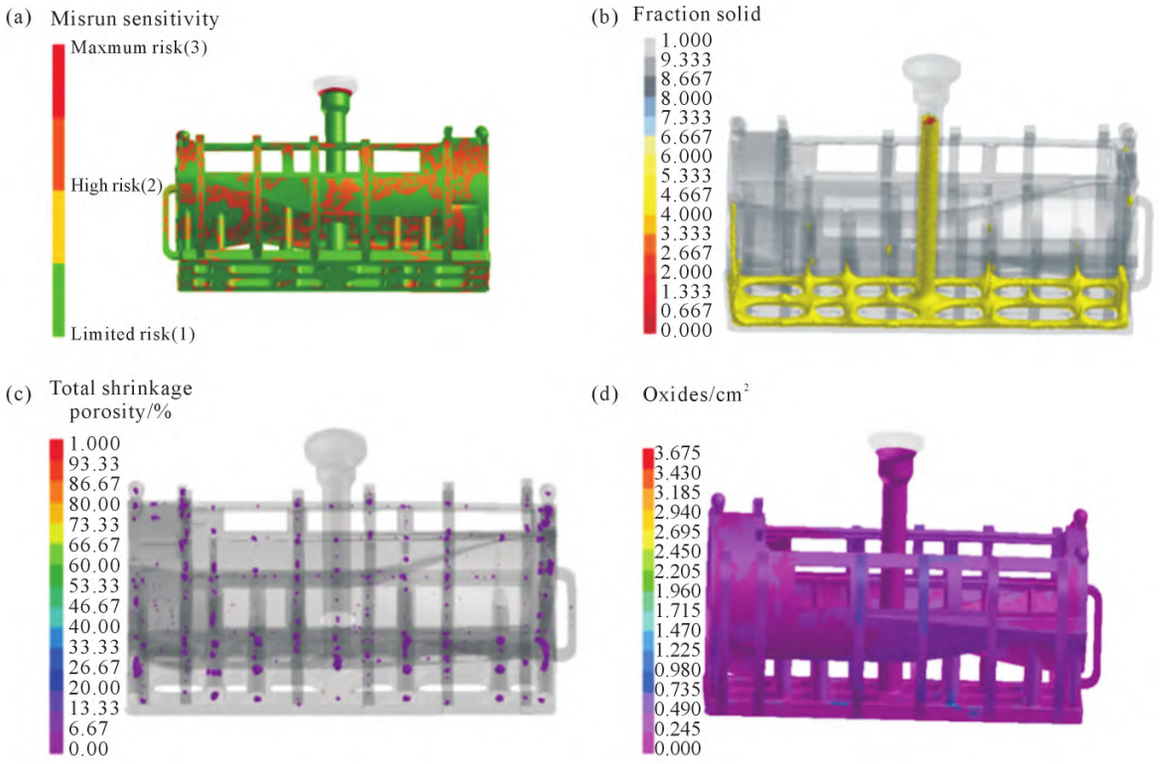


图 4 铸件缺陷模拟结果分布图:(a) 浇不足风险;(b) 孤立液相区;(c) 缩松;(d) 氧化夹杂

Fig.4 Distribution of casting defect simulation results: (a) risk of underpouring; (b) isolated liquid phase area; (c) shrinkage porosity; (d) oxidation inclusions

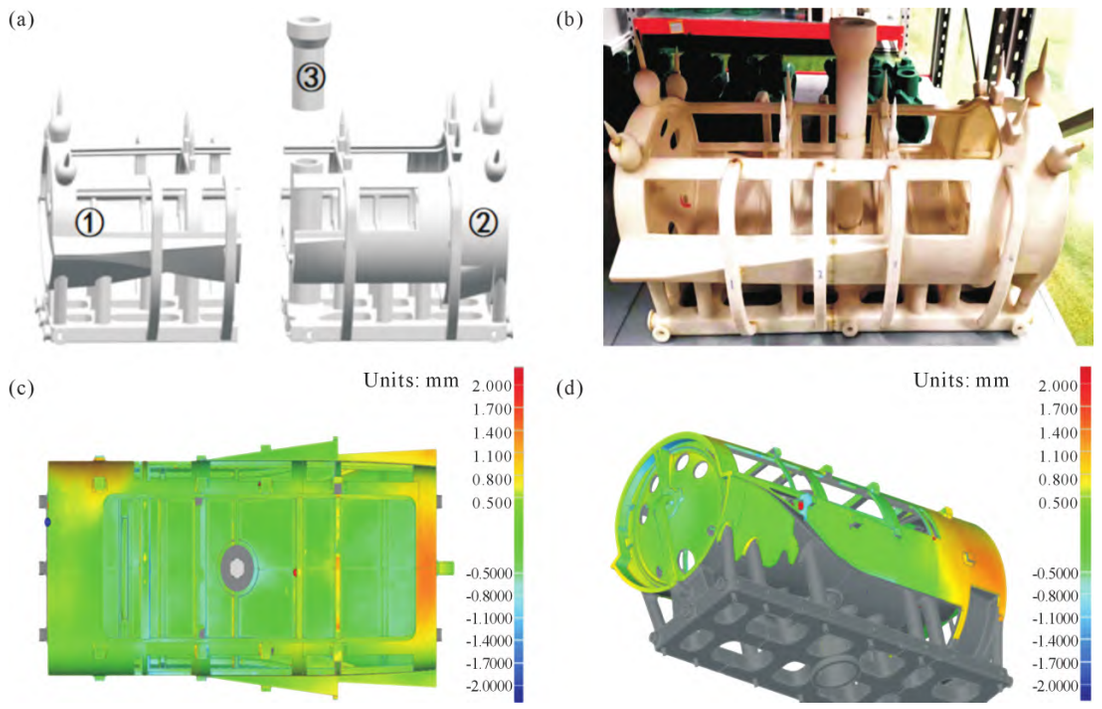


图 5 快速成型蜡模及其尺寸:(a) 分段式蜡模模型;(b) 蜡模组合;(c, d) 蜡模尺寸精度

Fig.5 Rapid prototyping wax model and its size: (a) segmented wax model; (b) wax model combination; (c, d) wax model dimensional accuracy

度应该超出了其相变温度。

(3)本批试样方案 II,铸造内部缺陷基本消除,可进行室温和高温力学性能测试,X 射线测试结果如图 10b 所示。

采用方案 II 的热等静压制度进行若干批次试样的 X 射线数据统计,结果如图 11 所示。

基于上述性能测试结果,ZTi60 宜采用的最佳热等静压制度如表 5 所示。铸件经热等静压和酸洗后表面光洁,未发现目视缺陷和穿透性缺陷,荧光和 X 射线检测结果显示铸件无冷隔和流痕,存在少量

中国知网 https://www.cnki.net

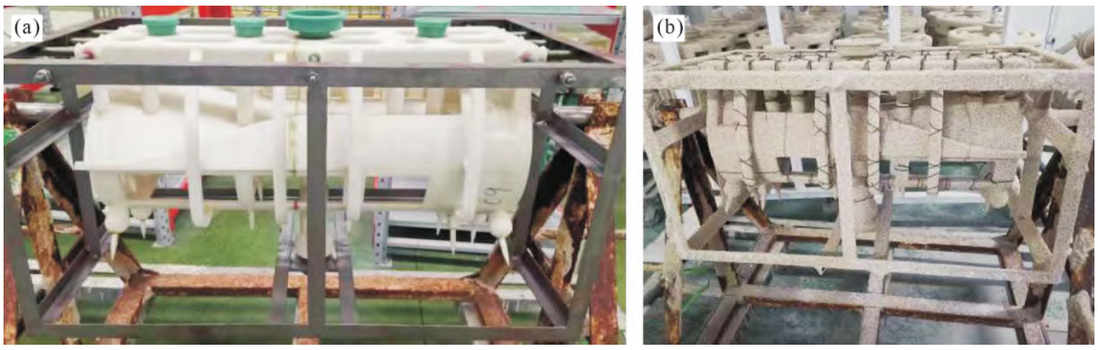


图 6 蜡模工装与模壳制备:(a) 蜡模工装;(b) 模壳

Fig.6 Preparation of the wax mould tool and mould shell: (a) wax mould tool; (b) mould shell

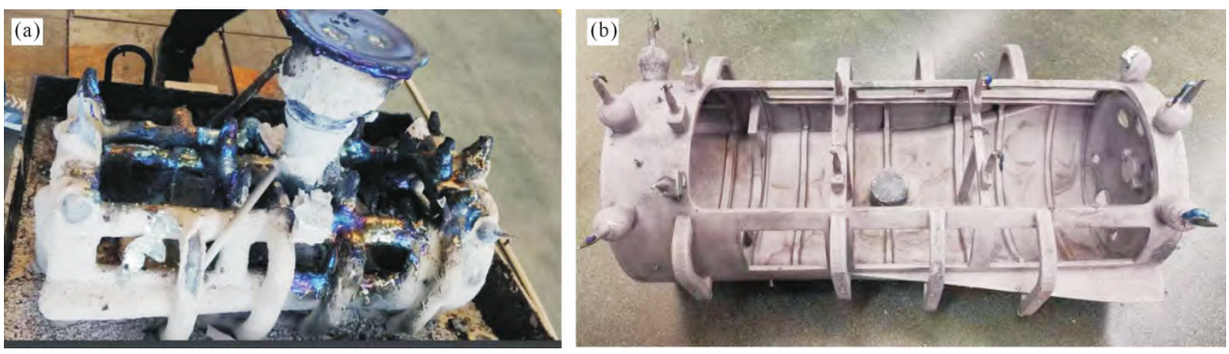


图 7 浇注完成后的铸件:(a) 浇注后;(b) 清壳吹砂后

Fig.7 Castings after pouring: (a) after pouring; (b) after cleaning the shell and blowing sand

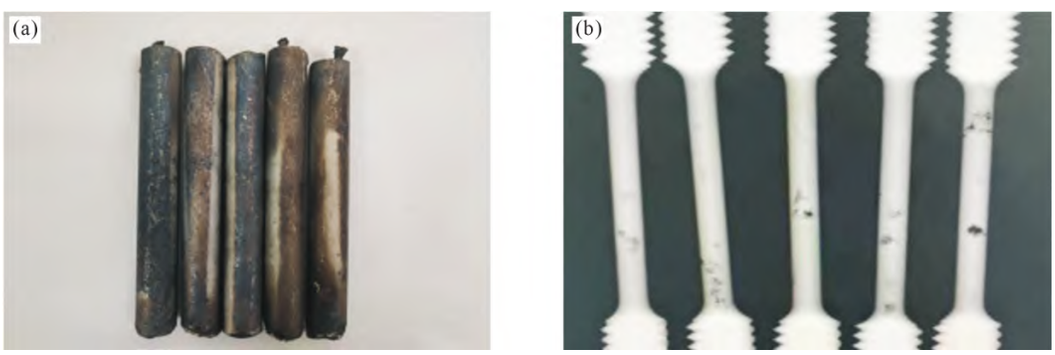


图 8 方案 I 试样的外观及 X 射线测试结果:(a) 样外观状态;(b) X 射线测试结果

Fig.8 Appearance and X-ray test results of the sample in Scheme I: (a) appearance of the sample; (b) X-ray test results

表5 最佳热等静压工艺

Tab.5 Optimal HIP process

Temperature/℃	Holding time/h	Holding pressure/MPa	Cooling mode	Oven temperature/℃
960±10	2.5~3.0	130~140	Furnace cooling	≤300



图 9 方案 III 试样外观

Fig.9 Appearance of the sample in Scheme III

表层线性显示,可通过打磨去除,荧光的主要缺陷为表面单个气孔和压坑显示,均可通过打磨去除,铸件未发现穿透性裂纹缺陷。大多数疏松和缩孔压实,多数密集气孔得到有效的改善。

2.2.2 铸件补焊工艺研究

对铸件典型位置进行了补焊工艺研究,位置分别为腹板(薄处)、转角处、厚大区域。为了研究焊接工艺的可靠性,对缺陷进行扩大和穿透处理,以增加补焊的工艺难度。选择了薄壁和厚大部位的转接处,这些位置难于补焊,易产生次生裂纹。焊后经荧光和 X 光检测,表现如图 12 所示。焊点及其周围未发现异常,无气孔、裂纹、线性显示和次生缺陷。经过放置 48 h 和最终退火再进行荧光检查观察,焊点

中国知网 https://www.cnki.net

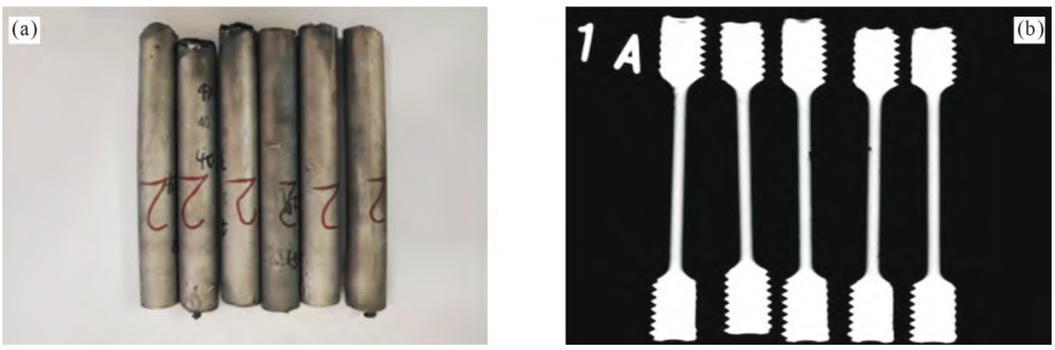


图 10 方案 II 试样的 X 射线测试结果：(a) 试样外观状态；(b) X 射线测试结果

Fig.10 X-ray test results of the sample in Scheme II: (a) appearance of the sample; (b) X-ray test results

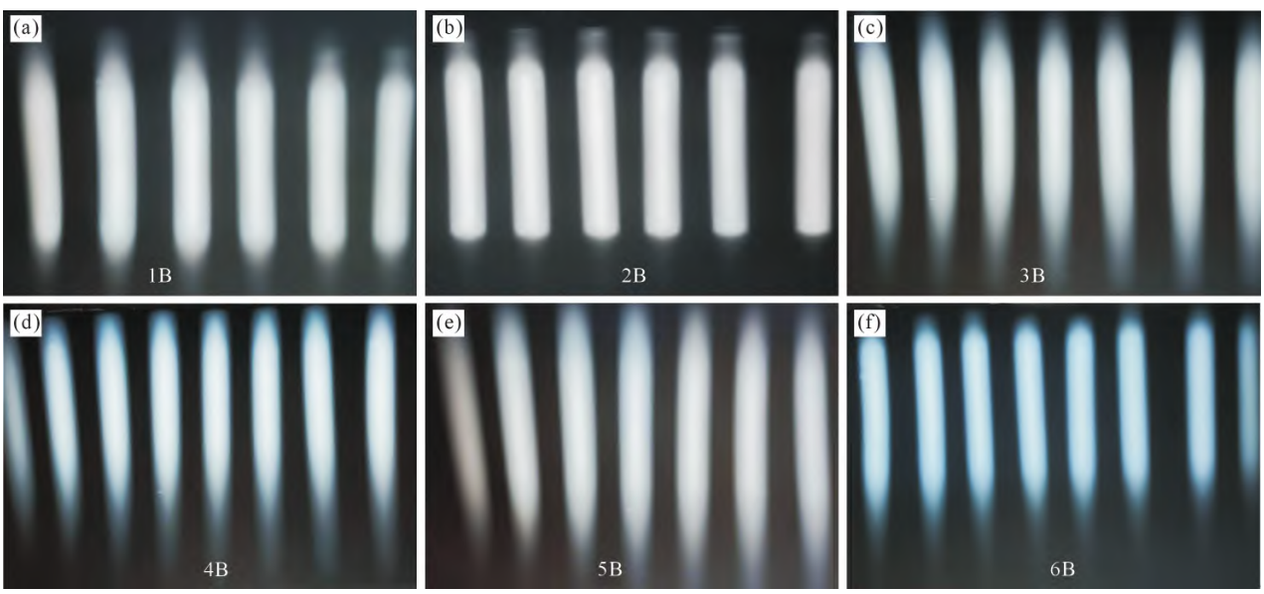


图 11 方案 II HIP 制度试样的 X 射线测试结果：(a~f) 不同批次

Fig.11 X-ray test results of the HIP system samples in Scheme II: (a~f) different batches

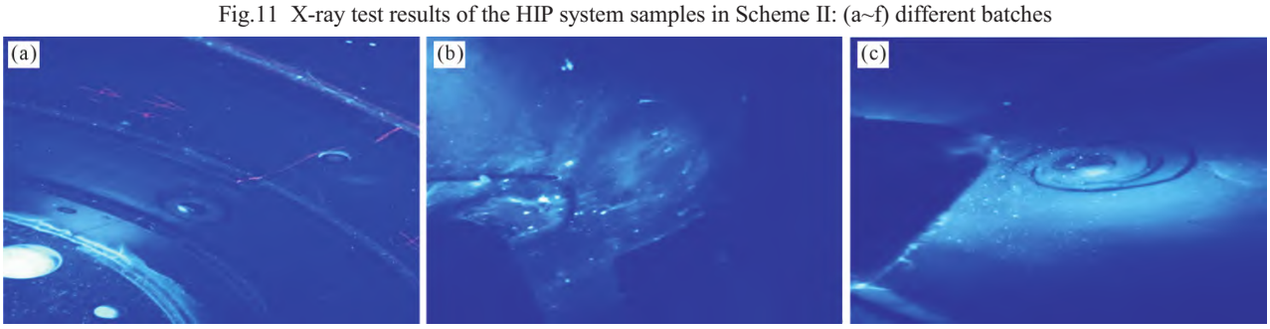


图 12 铸件典型缺陷焊后荧光显示：(a) 腹板穿透；(b) R 角；(c) 厚大区穿透

Fig.12 Typical defects of castings are fluorescent after welding: (a) web penetration; (b) inner arc fillet; (c) thick area penetration

及其热影响区未有异常。试验表明，由 ZTi60 试验铸件具有良好的可焊性，冶金缺陷可通过补焊进行修复。

2.3 铸件成分、组织和力学性能分析

对铸件的多个典型位置进行了化学成分、微观组织和力学性能研究，选取位置如图 13 所示。取样部位涵盖各个位置和厚薄典型区域，分布较为均匀，取样分布位置具有较高的代表性。不同位置的化学成分分析结果如图 14 和表 6 所示，不同取样位置的化学成分十分接近，表明铸件各部位成分分布较为均匀，铸件化学成分的均匀性和一致性较好。

表6 不同取样位置化学成分分析

Tab.6 Tabulation of the chemical composition analysis results at different sampling locations

(mass fraction/%)

Sample	Si	Zr	Al	Nb	Mo	Se	Ta
No.1	0.38	3.3	5.84	0.36	0.98	3.57	0.20
No.2	0.38	3.31	5.78	0.36	0.96	3.58	0.19
No.3	0.38	3.28	5.77	0.36	0.96	3.56	0.19
No.4	0.37	3.30	5.74	0.36	0.96	3.56	0.2
No.5	0.38	3.29	5.58	0.32	0.90	3.47	0.18
No.6	0.40	3.32	5.78	0.36	0.96	3.56	0.19
No.7	0.40	3.42	5.92	0.37	0.98	3.65	0.20

中国知网 https://www.cnki.net

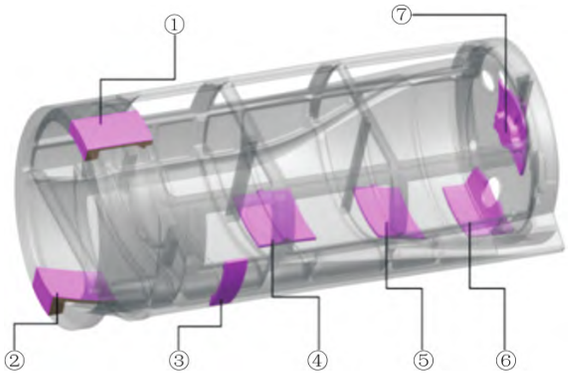


图 13 铸件化学成分、金相观察和力学性能测试取样示意图

Fig.13 Schematic diagram of the sampling for the chemical composition tests, metallographic observations and mechanical property tests of the casting

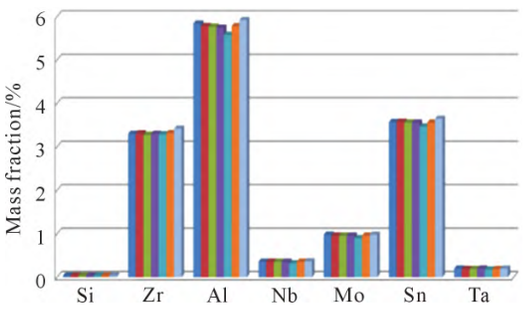


图 14 不同取样位置化学成分分析结果

Fig.14 Chemical composition analysis results at different sampling locations

对热等静压后的铸件不同位置进行金相组织观察,如图 15 所示,各部位金相组织为典型的魏氏组织,均由粗大的片层 α 和晶界 α 组成。不同厚度部位的晶粒度大小有较大差异,但结果符合铸件的晶粒大小的一般规律。晶粒尺寸分布如表 7 所示,铸件上较厚的位置 2、4、6 晶粒度偏大,β 晶粒平均尺寸约为 1 200 μm;薄区 1、3、7 晶粒尺寸偏小,β 晶粒平均尺寸约为 500 μm。这是由于厚区冷却速率慢,而薄区冷却速率快。冷速快的区域 β 晶粒形核较多,并且晶粒长大较为迟缓,因此晶粒细小。

采用最佳热等静压工艺后,对符合测试条件的附铸试棒进行室温和高温拉伸力学性能测试,测试结果如表 8 所示,所有性能均能达到性能指标要求,尤其是高温力学性能显著高于性能指标。

3　结论

(1)通过计算机软件对大型构件缩比件的浇注系统进行设计和模拟验证优化后,所得铸件成形完整,无欠注和跑火现象,铸件表面平整、光滑,无明显的裂纹、冷隔和流痕等缺陷。

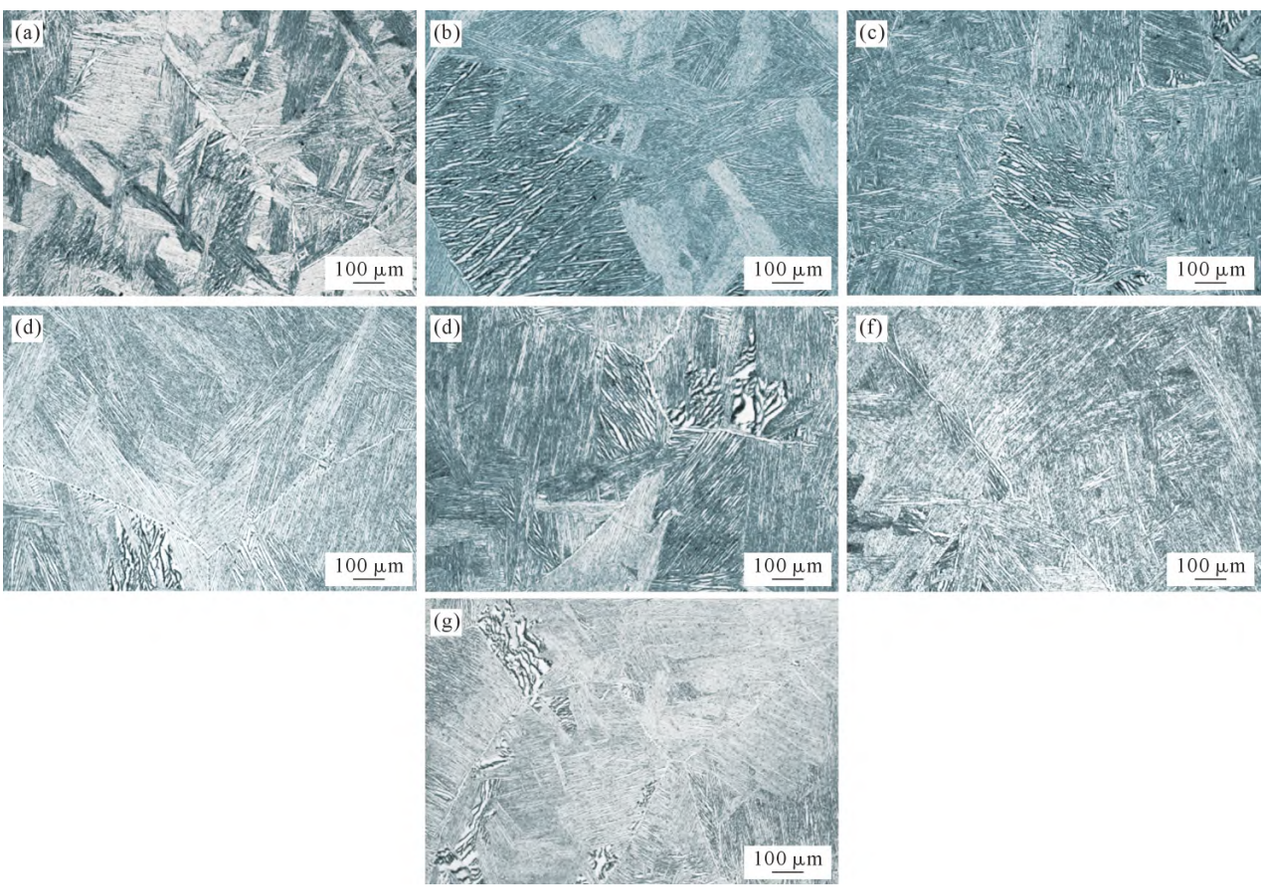


图 15 铸件不同取样位置的金相图:(a~g) samples No.1~7

Fig.15 OM images of the casting at different sampling locations: (a~g) samples No.1~7

中国知网　https://www.cnki.net

表7 铸件不同位置的平均晶粒尺寸
Tab.7 Average grain sizes of the casting at different sampling locations

Sample number	Mean diameter/μm	Grain size
No.1	553	M-11.5
No.2	1 159	M-9.5
No.3	565	M-11.5
No.4	1 224	M-9.5
No.5	968	M-10.0
No.6	1 238	M-9.5
No.7	434	M-12.5

表 8 铸件附铸试棒的室温和高温拉伸力学性能
Tab.8 Room-temperature and high-temperature tensile properties of the attached test bars on the casting

Test temperature	Date type	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	Z/%
Room temperature	Measured	1 069	959	6.5	8
	value	1 078	968	6.0	8
	Index	≥980	≥880	≥6	-
600 ℃	Measured	669	517	8	12
	value	675	500	8.5	26
	Index	≥600	≥470	≥8	-
650 ℃	Measured	618	482	13.0	31
	value	613	475	12.0	28
	Index	≥580	≥450	≥10	-
700 ℃	Measured	521	388	34	46
	value	552	419	16.0	39
	Index	≥460	≥380	≥12	-
750 ℃	Measured	452	334	37.0	58
	value	466	329	36.0	-
	Index	≥380	≥300	≥15	-

(2)ZTi60 最佳热等静压参数如下：温度(960±10) ℃，保温时间 2.5~3 h，压力 130~140 MPa，冷却方式采用炉冷，出炉温度不高于 300 ℃。

(3)ZTi60 铸件具有良好的可焊性。

(4)缩比件各部位化学成分相同、组织相同但晶粒度差异较大、力学性能均高于性能指标。

参考文献：

[1] 陆子川，张绪虎，微石，纪玮，温涛. 航天用钛合金及其精密成形技术研究进展[J]. 宇航材料工艺，2020, 50(4): 1-7.
LU Z C, ZHANG X H, WEI S, JI W, WEN T. Research progresses of titanium alloys and relevant precision forming technology for the aerospace industry[J]. Aerospace Material & Technology, 2020, 50(4): 1-7.

[2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报，2014, 34(4): 44-50.
ZHU Z S. Research status and development of titanium alloys for aviation in China[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.

[3] 项征. 大型复杂钛合金薄壁件精铸成型技术[J]. 轻合金加工技术，2024, 52(1): 1-6.
XIANG Z. Precision casting technology of large and complex titanium alloy thin-wall parts[J]. Light Alloy Processing Technology, 2024, 52(1): 1-6.

[4] 熊艳才. 精密铸造技术在航空工业中的应用和发展[J]. 航空制造技术，2008(22): 32-35.
XIONG Y C. Development and application of precision casting technology in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 32-35.

[5] 李俭英. 熔模精密铸造工艺优化及应用研究[J]. 世界有色金属，2023(21): 43-45.
LI J Y. Research on process optimization and application of investment mold precision casting[J]. Non-ferrous World Nonferrous Metals, 2023(21): 43-45.

[6] 纪志军，吴国清，孙智，南海. 热等静压对 ZTC4 钛合金铸件内部孔洞缺陷显微组织性能的影响[J]. 铸造工程，2022, 46(4): 18-24.
JI Z J, WU G Q, SUN Z, NAN H. Effect of hot isostatic pressing on microstructure and mirohardness of internal hole defects in ZTC4 titanium alloy castings[J]. Foundry Engineering, 2022, 46(4): 18-24.

[7] 贾翃，逯福生，郝斌. 2015 年中国钛工业发展报告[J]. 钛工业进展，2016, 33(2): 1-6.
JIA H, LU F S, HAO B. Report on China titanium industry progress in 2015[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(2): 1-6.

[8] 王新英，谢成木. 国内外钛合金精密铸造型壳材料的发展概况[J]. 特种铸造及有色合金，2001(3): 40-42.
WANG X Y, XIE C M. Development of shell mold materials for Ti alloy investment casting in domestic and foreign countries[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2001(3): 40-42.

[9] 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.

[10] 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): 139-146.
RAN X, LYU Z G, CAO J, LI P J. Investment casting technologis for large complex titanium alloy parts[J]. Foundry, 2021, 70(2): 139-146.

[11] 刘鸿羽，柴皓，娄延春，金磊，赵军，刘时兵，倪嘉. ZTA15 大型钛合金熔模精密铸件界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(3): 890-896.
LIU H Y, CHAI H, LOU Y C, JIN L, ZHAO J, LIU S B, NI J. Interface reaction of large size ZTA15 titanium alloy investment casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(3): 890-896.

[12] 韩云飞，孙冰，刘义辉，侯佩华，袁兵兵，乔海滨. 酸洗对 ZTA15 钛合金表面污染层及化学成分的影响[J]. 钢铁钒钛，2023, 44(3): 75-79.
HAN Y F, SUN B, LIU Y H, HOU P H, YUAN B B, QIAO H B. Effect of pickling on surface contamination layer and chemical composition of ZTA15 titanium alloy [J]. Iron Steel Vanadium Ti-

中国知网 https://www.cnki.net

tanium, 2023, 44(3): 75-79.

[13] 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, 32(2): 7-12.
ZHAO R B. Research progress of precision casting of large complex thin-wall titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 2015, 32(2): 7-12.

[14] 樊振中，徐秀利，王玉灵，刘建军. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金，2014, 34(3): 285-289.
FAN Z Z, XU X L, WANG Y L, LIU J J. Investment casting technology application and development in the aviation industry [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(3): 285-289.

[15] 宗学文，周升栋，刘洁，张佳亮，权坤. 光固化3D打印及光敏树脂改性研究进展分析[J]. 塑料工业，2020, 48(1): 12-17.
ZONG X W, ZHOU S D, LIU J, ZHANG J L, QUAN K. Research progress in photo-curing 3D printing and photosensitive resin resin modification[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(1): 12-17.

[16] 潘港元，伍志勇，杨桂珍，贾永梅，刘培炼，李建鹏，原爽，余彪，张军. 光固化3D打印用光敏树脂的研究进展[J]. 合成材料老化与应用，2019, 48(4): 116-120, 33.
PAN G Y, WU Z Y, YANG G F, JIA Y M, LIU P L, LI J P, YUAN S, YU B, ZHANG J. Advances in light sensitive resins for light curing 3D printing[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(4): 116-120, 33.

[17] 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 intergrated titanium precision casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2001(2): 12-14.

[18] 时俊克. 钛合金复杂薄壁构件离心熔模铸造充型与凝固过程数值模拟[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
SHI J K. Numerical simulation of mold filling and solidification process incentrifugal casting of complex thin-walled titanium alloy casting[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[19] 李义军，赵云霞. ZTA15钛合金熔模精密铸造浇注用铁基引流工装的优化[J]. 铸造，2020, 69(10): 1087-1092.
LI Y J, ZHAO Y X. Improvement of Fe-based draught tooling for pouring of ZTA15 alloy in investment casting[J]. Foundry, 2020, 69(10): 1087-1092.

[20] 朱郎平，李建崇，莫晓飞，罗倩，南海. 热处理对高温钛合金TG6铸造组织及性能的影响[J]. 钢铁钒钛，2017, 38(1): 43-47.
ZHU L P, LI J C, MO X F, LUO Q, NAN H. Effect of annealing on microstructure andtensile property of cast TG6 high-temperature Ti-based alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(1): 43-47.

[21] 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.

中国知网　https://www.cnki.net