

• 工艺技术 Technology •  
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5122

# ZTC4 钛合金组合管路熔模铸造工艺优化

李 弘<sup>1,2</sup>, 丁方政<sup>3</sup>, 刘云超<sup>1,2</sup>, 高雨龙<sup>1,2</sup>, 刘珍君<sup>1,2</sup>, 孟晓东<sup>1,2</sup>

(1. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北 保定 072750; 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081; 3. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100071)

**摘 要:**针对钛合金铸件管路区域易产生疏松缺陷和壁厚不均的情况,分别从增设工艺孔、增加辅浇数量、优化浇道结构等角度对浇注系统进行多轮优化迭代,使用 ProCAST 数值模拟软件对优化后的浇注系统进行模拟验证。模拟结果显示管路区域冶金质量明显上升,缩孔疏松等空洞类缺陷数量显著降低。除优化浇注系统外,同时从型壳制备工艺、焊接工装等角度对生产工艺进行优化。优化结果显示,管路区域产生疏松缺陷和壁厚不均的概率分别由 73%和 85%降低到 2%和 3%,证明模拟结果准确,优化方案有效可行,能够满足实际生产需求。

**关键词:**ZTC4; 薄壁管路; 熔模精密铸造; 数值模拟; 疏松缺陷; 壁厚不均

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)12-1249-09

## Optimization of the Investment Casting Process for the ZTC4 Titanium Alloy Composite Pipeline

LI Hong<sup>1,2</sup>, DING Fangzheng<sup>3</sup>, LIU Yunchao<sup>1,2</sup>, GAO Yulong<sup>1,2</sup>, LIU Zhenjun<sup>1,2</sup>, MENG Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, China; 2. Beijing Steel Research Gaona Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. No. 6 Military representative office in Beijing region, Beijing 100071, China)

**Abstract:** Because the pipeline area of titanium alloy castings is prone to porosity defects and uneven wall thickness, the gating system was optimized and iterated in multiple rounds from the perspectives of adding process holes, increasing the number of auxiliary castings, and optimizing the runner structure. The optimized gating system was simulated and verified via ProCAST numerical simulation software. The simulation results show that the metallurgical quality in the pipeline area has significantly improved, and the number of hollow defects, such as shrinkage cavities and porosity, has significantly decreased. In addition to optimizing the gating system, the production process is also optimized from the perspectives of shell preparation technology and welding fixtures. The optimization results reveal that the probabilities of loose defects and uneven wall thickness in the pipeline area decrease from 73% and 85% to 2% and 3%, respectively. This confirms the accuracy of the simulation results, validates the effectiveness and feasibility of the optimization scheme, and demonstrates its ability to meet actual production requirements.

**Key words:** ZTC4; thin-walled tubing; investment precision casting; numerical simulation; porosity defects; uneven wall thickness

熔模精密铸造是钛合金的主要生产方式<sup>[1-6]</sup>,该方式能够提供浇注过程所需的真空环境及惰性型壳,并且所浇铸的结构件尺寸精度高、机械加工余量小、金属利用率大<sup>[7-9]</sup>。随着熔模精密铸造工艺的成熟与发展以及热等静压技术的广泛应用,钛及钛合金铸件的品质现已接近或达到了变形钛合金的

水平,因此在工业生产中,用熔模精密铸件代替锻件更为经济适用。且随着计算机和数值模拟技术的快速发展,钛合金铸造过程的模拟分析已经越来越普遍,充型、凝固、应力模拟,铸造缺陷预测,以及微观组织模拟已成为钛合金铸造领域的研究热点。

朱小平<sup>[10]</sup>和张铭杰<sup>[11]</sup>分别进行了熔炼浇注工艺

收稿日期: 2025-06-24

作者简介: 李 弘, 1976 年生, 硕士, 高工。主要从事钛及钛合金铸造, 主要包括钛合金和高温钛合金材料研发、产品设计与开发、工艺研究与应用等。Email: sevenholly@163.com

引用格式: 李弘, 丁方政, 刘云超, 高雨龙, 刘珍君, 孟晓东. ZTC4 钛合金组合管路熔模铸造工艺优化[J]. 铸造技术, 2025, 46(12): 1249-1257.

LI H, DING F Z, LIU Y C, GAO Y L, LIU Z J, MENG X D. Optimization of the investment casting process for the ZTC4 titanium alloy composite pipeline[J]. Foundry Technology, 2025, 46(12): 1249-1257.

优化、3D 打印熔模研究、铸造模拟仿真和陶瓷型壳制备等试验,成功浇注了直径超 1 100 mm 的大型 ZTC4 钛合金机匣铸件。刘鸿羽等<sup>[12]</sup>通过研究 ZTA15 钛合金铸件与氧化钼铸型的界面反应现象,发现采用酸洗工艺能够有效去除铸件表面 200~500  $\mu\text{m}$  的富氧扩散层( $\alpha$  层)和组织过渡区。贾志伟等<sup>[13]</sup>采用分体熔模铸造加真空电子束焊接的工艺方案,实现了长度超过 1 260 mm 具有复杂三通道狭长内腔结构的大型进气道铸件的成功制备。时俊克<sup>[14]</sup>研发了离心熔模铸造充型与凝固数值模拟求解器,能够针对 ZTA15 钛合金复杂薄壁铸件在铸造过程可能出现的缺陷进行预测,进而优化铸造工艺参数,实现平稳充型,减少缩孔和疏松缺陷。程亚珍等<sup>[15]</sup>根据模拟仿真结果,优化了某薄壁复杂钛合金铸件的浇注系统,在易产生缩孔的位置添加冒口后,成功将缩孔缺陷引入冒口并未造成应力场变化。然而,熔模精密铸造钛合金工艺仍存在一些亟需改进的地方,例如细长管路结构件的薄壁区疏松和壁厚不均、管路铸件的稳定性和一致性问题。

组合管路是航空发动机输油管路结构件,选用材质为 ZTC4 钛合金,零件加工后需进行打压测试,即放入水中并通入压力为 1.2 MPa(表压)的空气,保持 2 min,不允许出现泄露和目视可见的永久变形<sup>[16]</sup>。然而在熔模精铸过程中,管路区域由于冷却速度较快易导致金属液补缩不及时,并且管路内部的细窄腔体结构使得型壳的制作难度较大,面层与加固层浆料易在此处出现涂挂不均匀、不充分、干燥不彻底的现象,从而导致铸件管路处易出现壁厚不均匀和管路薄壁区易产生疏松缺陷等问题<sup>[16-19]</sup>。因此,通过浇注系统设计优化和生产工艺把控,提升管路结构钛合金铸件的冶金质量是很有必要的。

基于此,本文以 ZTC4 钛合金组合管路为工艺研究对象,根据前期研制阶段铸件表现出的问题,分别从增设工艺孔、增加辅浇数量、优化浇道结构等角度对浇注系统进行多轮优化迭代,并使用 ProCAST 数值模拟软件对优化后的浇注系统进行模拟验证。同时从型壳制备工艺、焊接工装等方面对生产工艺进行优化,为解决钛合金铸件管路结构区域冶金缺陷提供技术支持,也为数值模拟方法在钛合金熔模精铸领域的应用拓展提供参考。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 案例产品结构分析

ZTC4 组合管路铸件属于管路类结构件,产品铸造难度极大,结构方面:直径 15 mm 管路长约 300 mm,最小壁厚为 1.5 mm,两端及两端侧壁上含有装配法兰,呈非规则回转体;冶金方面:薄壁管路区域较长,不易成形,易出现疏松等内部缺陷,热结主要存在于两端厚大法兰处,不易补缩且冶金质量要求极高,尤其是对密封性、壁厚公差、管路表面质量、夹杂、针孔及气孔等有极为严格的要求;尺寸方面:侧壁上的法兰导致该铸件的结构不对称,极易产生弯曲变形,同时管路狭窄且较长,极易偏芯导致壁厚不均。该产品尺寸精度要求高,尤其是管路接口位置。铸件三维几何实体如图 1a 所示,铸件外形尺寸为 50 mm×300 mm×50 mm。管路最小壁厚 1.5 mm,最大壁厚为 4.8 mm,端面圆形法兰直径为 43 mm,侧面方形法兰尺寸为 33 mm×33 mm,铸件轴向直线度要求偏差 $\leq 0.3$  mm,方形法兰管路和主管路之间呈 90°。铸件壁厚分布如图 1b 所示,生产过程中测量壁厚时采用超声波测厚仪,采样方案如图 1c 所示。

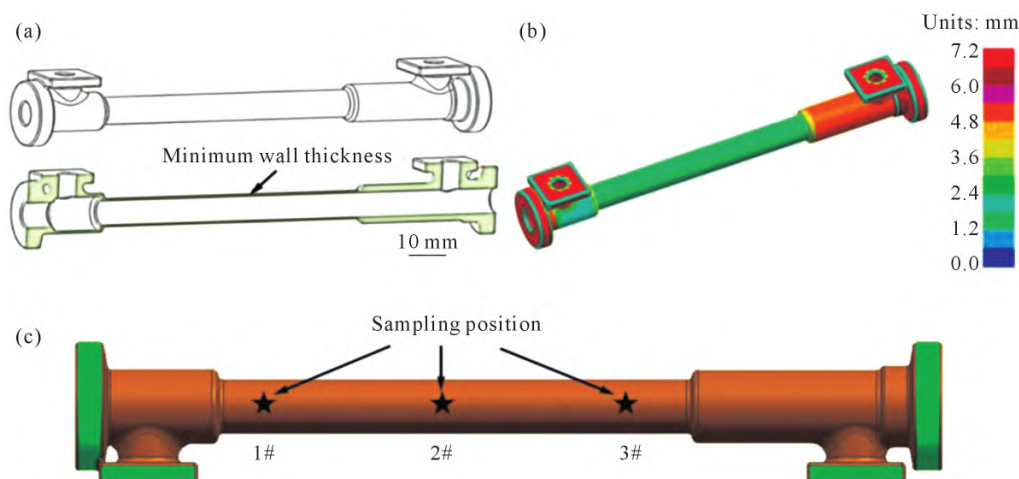


图 1 案例产品图示:(a) 产品三维结构;(b) 壁厚分析示意图;(c) 壁厚分析采样位置示意图

Fig.1 Case product schematic diagram: (a) 3D diagram of the casting; (b) casting thickness analysis diagram; (c) schematic diagram of the sampling position for wall thickness analysis

## 1.2 案例产品缺陷分析

### 1.2.1 冶金缺陷

铸件在荧光和 X 射线检验时发现大量疏松缺陷,如图 2 所示。图 2a 为黑光灯下管路铸件内部荧光缺陷照片,图 2b 为疏松缺陷外观照片,图 2c 为铸件排除表面缺陷和内部缺陷后的照片,由图可知薄壁管路排缺面积较大,补焊修复较为困难。其原因分析如下。

(1)在熔模精密铸造过程中,由于组合管路内腔狭窄且尺寸较长,使得该位置在型壳制备阶段面层涂料的涂挂性和润湿性普遍低于铸件其余位置,此外,内腔空间狭窄也使得面层涂料的干燥性难以得到保证。因此在浇注金属液充型过程中,熔融钛液与局层面层发生轻微的界面反应<sup>[8]</sup>,最终在铸件上形成上述类型的缺陷。

(2)钛合金在凝固过程中,原子间的距离减小,导致体积收缩<sup>[20-24]</sup>。这种收缩现象如果不加以控制,会在铸件内部形成缩孔或疏松,影响铸件的力学性能和完整性。在重力浇注模式下,为弥补凝固收缩造成的体积损失,需要通过补缩流动来补充金属液,即在液态金属凝固过程中,由铸件的其他部分向缩孔区域流动,以完成补缩的目的<sup>[25]</sup>。而组合管路的特殊结构(图 1),使得铸件薄壁位置冷却速度较快,且补缩难度大,因此在充型和凝固过程中,金属液

对该区域补缩能力不足,最终导致疏松缺陷更加严重。

### 1.2.2 壁厚不均现象

该产品在零件加工过程中发现管路壁厚不均现象,如图 3 所示。其原因可归结为:产品内腔狭窄深长,涂料制壳过程的型芯细长且只有两端芯头固定,在金属液对型腔进行充型时,由于型壳内芯强度不足,熔融钛液的冲击导致型芯发生轻微弯曲而偏向一侧,导致最终铸件管壁一侧偏厚,一侧偏薄。

### 1.2.3 变形现象

组合管路产品细长且两端及两端侧壁上含有装配法兰,呈非规矩回转体结构,产品在无损检测缺陷的焊接修复过程中,会发生弯曲变形,同轴度无法满足设计加工要求。经分析,铸件后工序焊接缺陷或工艺孔的补焊修复过程是导致变形的主要原因。

## 1.3 案例产品工艺研究及设计优化

### 1.3.1 铸造数值模拟

基于 ZTC4 合金材料的化学成分组成,利用模拟软件的合金材料数据库等方法<sup>[26]</sup>,理论计算 ZTC4 合金材料在不同温度条件下热物性参数和力学性能参数,计算结果如图 4 所示,ZTC4 材料化学成分如表 1 所示。

首先对铸件的裸件进行模拟,随后经过多次迭代模拟确定产品的最佳浇注系统,保证金属液充形过程平稳,降低金属液对型壳的冲击,控制精密铸造

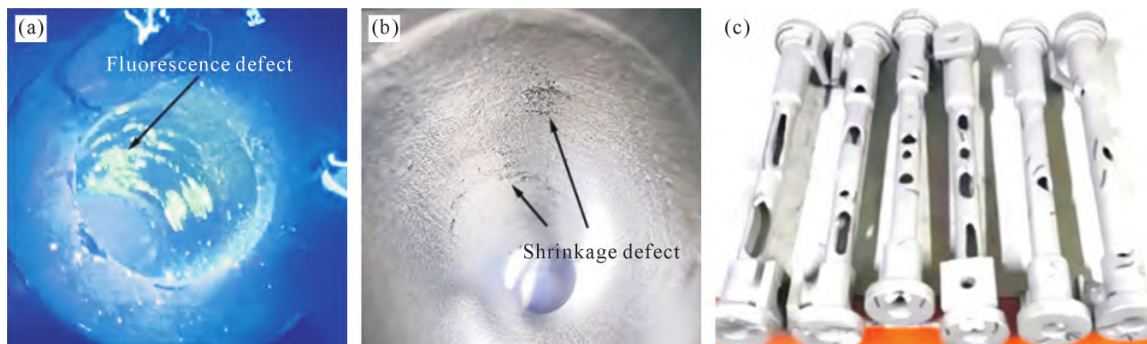


图 2 管路缺陷示意图:(a) 荧光显示缺陷;(b) 缺陷外观示意;(c) 铸件排缺后照片

Fig.2 Schematic diagram of pipeline defects: (a) fluorescence display of defects; (b) appearance of defects; (c) diagram of casting defect removal

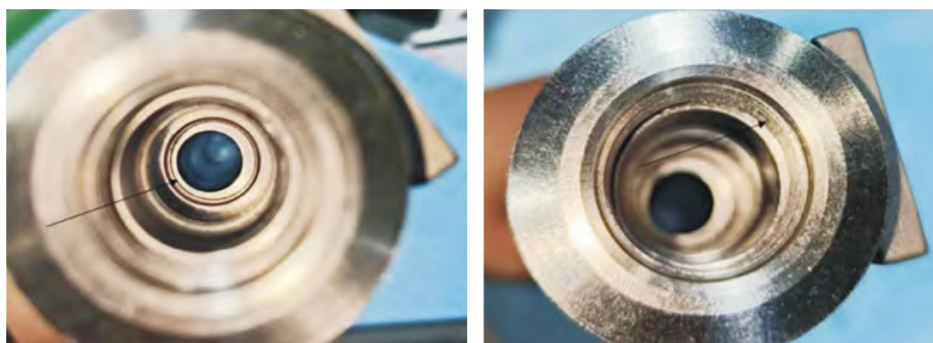


图 3 管路偏芯示意图

Fig.3 Pipe core deviation diagram



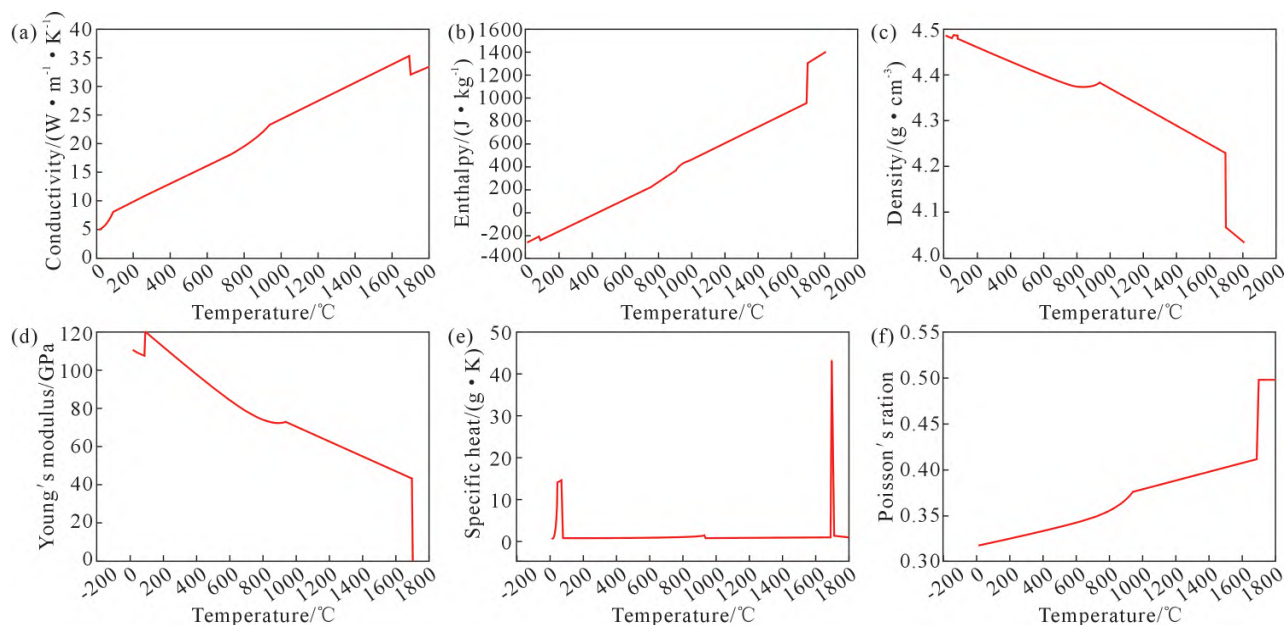


图4 ZTC4的热物性参数和力学性能参数:(a)热导率;(b)热焓;(c)密度;(d)弹性模量;(e)比热;(f)泊松比

Fig.4 Thermophysical parameters and mechanical properties of ZTC4: (a) conductivity; (b) enthalpy; (c) density; (d) Young's modulus; (e) specific heat; (f) Poisson's ratio

表1 ZTC4合金成分

Tab.1 Chemical composition of the ZTC4 alloy

(mass fraction/%)

Material	Element									
	Ti	Al	V	Si	N	O	Fe	H	C	Other individual
ZTC4	Bal.	6.32	3.96	0.019	0.009	0.15	0.22	0.004	0.007	0.1

型壳质量,减少夹杂等冶金缺陷产生。

裸件模拟凝固顺序及微观疏松如图5所示。可以看出,产品的薄厚转接处缩孔、疏松倾向严重,薄壁管路上有轻微疏松显示。根据裸件模拟的结果,在成形条件较差的区域设置辅助浇口,在模拟产生缩孔、疏松的位置(铸件厚大部位)设计合理的补缩冒口,如图6a和b所示。设计的单模组浇注系统和整体浇注系统如图6c和d所示。

如图6所示,优化前内浇口为4个,薄壁管路区域仅1个③号辅浇,优化后内浇口增加至8个,同时薄壁管路区域有③、④、⑤、⑥、⑦5个 $\phi 8$  mm辅浇,以此提高薄壁处金属液的补缩效果。同时在上

方法兰处设计专用冒口,如图6c上方红框内所示,增加厚大法兰处的补缩能力。

对设计好的浇注系统进行有限元模拟,基于组合管路的实际尺寸、结构与铸造特性等因素,先建立较为合适的模壳厚度均匀、外部环境稳定等假设条件,然后根据浇注系统和模拟软件建立有限元模型,其模型的微元化处理结果如图7所示。模型由3部分组成:铸件与浇注系统、模壳、真空环境,网格类型均为四面体,网格尺寸为3 mm,微元体总网格数量为486432。

背层材料选用莫来砂,型壳厚度为10 mm,浇注温度为1750 °C,型壳预热温度为350 °C,浇注完成

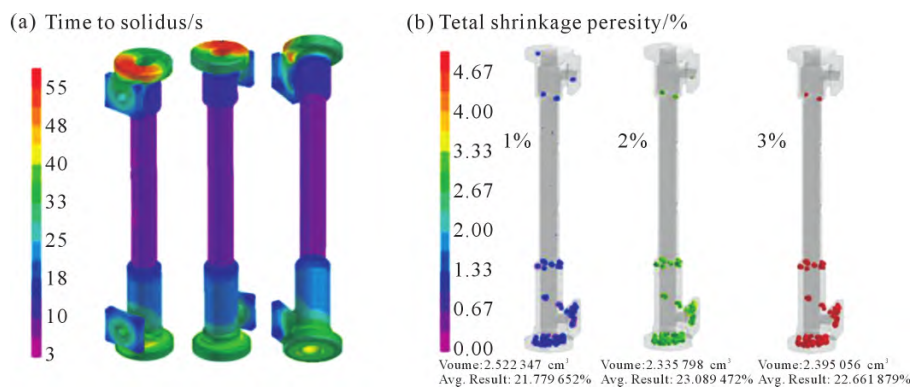


图5 裸件模拟结果:(a)凝固顺序;(b)微观缩孔、疏松显示

Fig.5 Bare part simulation results: (a) solidification sequence; (b) microshrinkage and porosity display

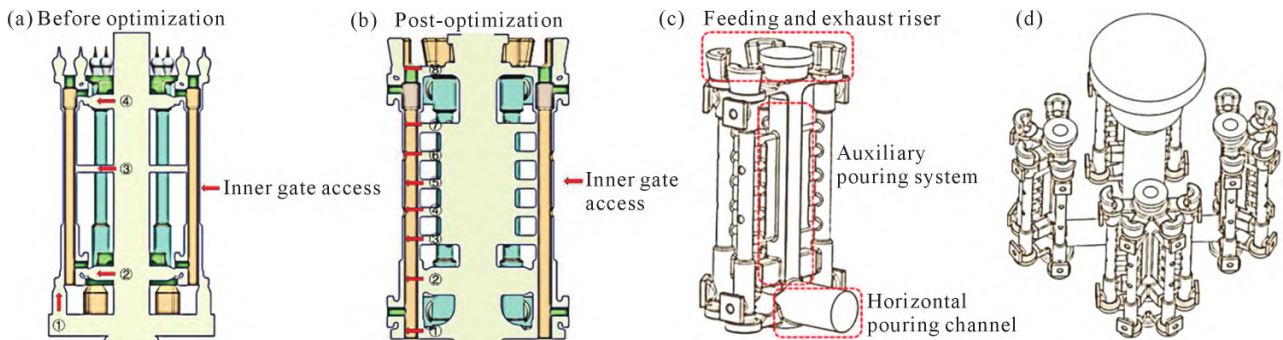


图6 铸造工艺优化示意图:(a) 添加辅助浇口前;(b) 添加辅助浇口后;(c) 单模组示意;(d) 整体浇注系统  
Fig.6 Casting process optimization schematic: (a) before optimization; (b) after optimization; (c) single module diagram; (d) integral pouring system

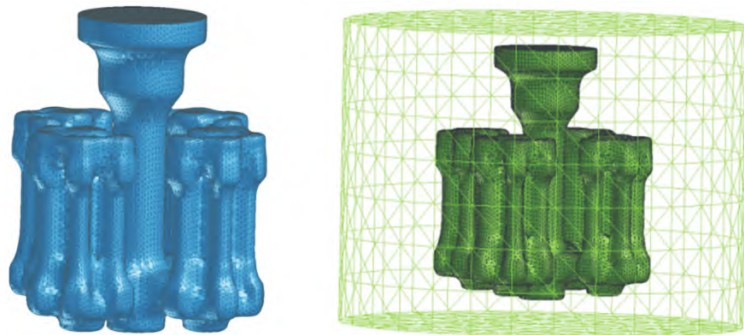


图7 几何模型的微元化结果  
Fig.7 The micro-elementalization results of the geometric model

后破空。设计浇注系统凝固顺序及微观疏松如图8所示。

图5 铸件模拟结果显示,疏松缺陷多数集中在两端法兰厚大区域,管路薄壁区域有疏松倾向需要布置合理的冒口和辅浇进行补缩,如图6c所示单件浇注系统设计,顶部的多个冒口主要作用为补缩、排气,保证充型顺利。图8模拟结果显示,缩孔疏松等空洞类缺陷显著降低,剩余少量的内部缺陷后序可通过热等静压进行消除。

### 1.3.2 铸造工艺优化

(1)管路偏芯壁厚不均 针对该问题,在铸造工艺设计阶段增设工艺孔,增加芯头数量来保证内芯的强度。如图9所示,铸件薄壁区域增设两个直径8 mm

的工艺孔,内芯芯头数量由4个增加到6个,新增设的两个芯头可以有效抵抗型芯弯曲,保证内芯形位。

(2)型壳制备工艺优化 ①涂挂面层浆料时,使用压缩空气对管路内腔进行吹气处理,目的是增加面层涂料的涂挂性和润湿性,吹气压力为0.4~0.6 MPa,处理时间为10~12 h;②面层、过渡层、加固层,每层涂料在干燥过程中,都在管路内腔插入风管通入流动空气进行局部干燥处理,目的是保证管路内腔的涂料干燥性和外表面尽可能一致,制壳间温度控制为20~22℃,干燥时间为10~12 h;③型芯内增加铁丝进行加固,如图10所示,增加整个型芯的刚度,提高抗金属液冲击的能力,保证型芯形位符合设计要求。

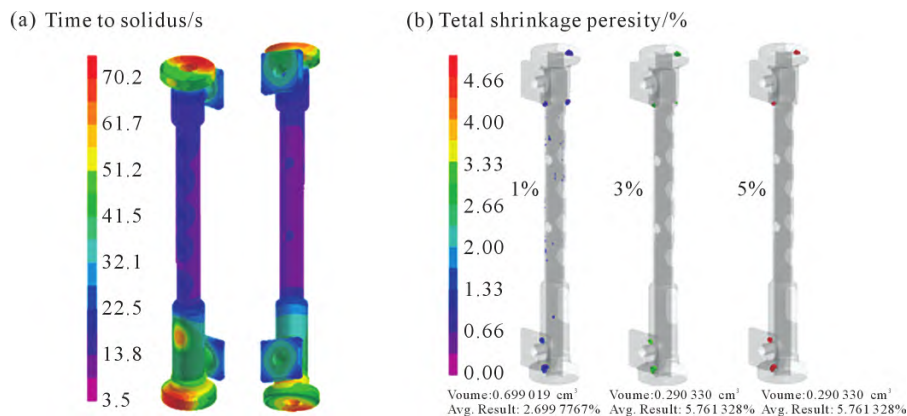


图8 模拟结果:(a) 凝固顺序;(b) 微观缩孔、疏松显示  
Fig.8 Simulation results: (a) solidification sequence; (b) microscopic shrinkage and porosity display



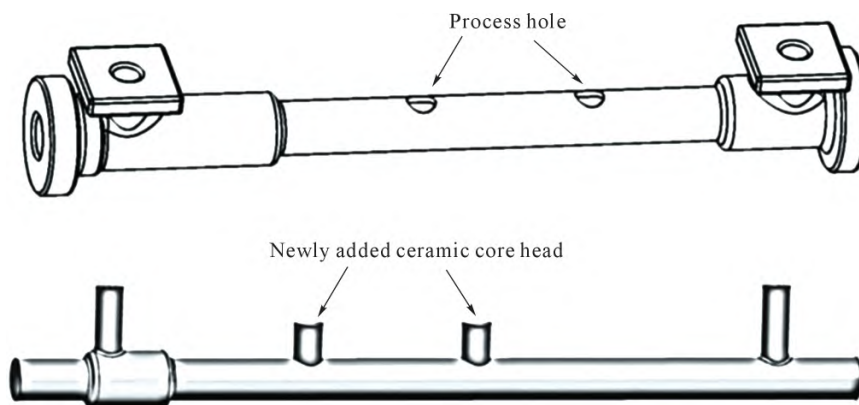


图9 铸件工艺孔示意及新增陶瓷芯头示意  
Fig.9 Casting process hole and new ceramic core head

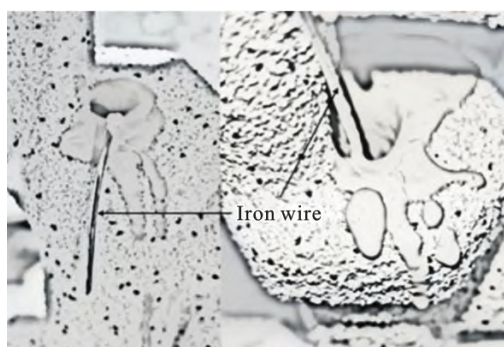


图10 型芯铁丝加固  
Fig.10 Core wire reinforcement

(3)焊接工装设计 针对焊接变形情况,设计相应的焊接工装,保证在焊接过程和焊接后铸件直线度满足零件加工要求,焊接工装示意如图11所示。

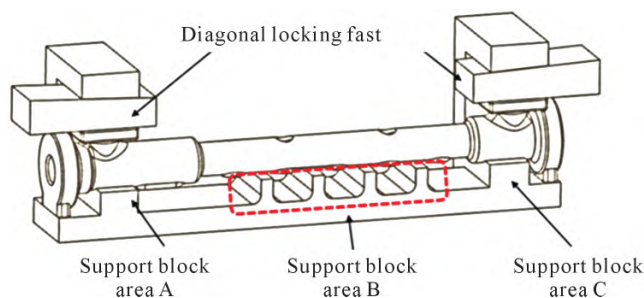


图11 焊接工装  
Fig.11 Welding tool

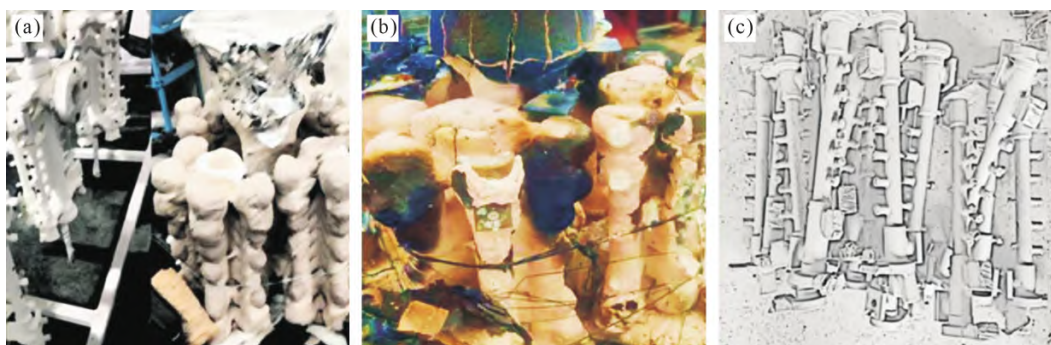


图12 熔模铸造过程:(a)型壳制备;(b)熔炼浇注;(c)清壳切割  
Fig.12 Investment casting process: (a) shell preparation; (b) smelting casting; (c) clear shell cutting

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 实验过程

整个制壳过程严格按工艺要求执行,其中脱蜡、焙烧、清洗、组装过程无异常情况。熔炼浇注用料材质为ZTC4,起弧真空度 $\leq 0.8$  Pa,熔炼真空度 $\leq 1$  Pa,熔炼电流20~22 kA,熔炼电压35~45 V,随炉冷却时间45 min以上,熔炼、浇注和清壳切割过程无异常情况发生,如图12所示。

### 2.2 实验结果

清壳切割后对组合管路进行实时成像扫描,优化前后对比如图13所示,图13a和b分别为工艺优化前后偏芯、壁厚尺寸分布情况。

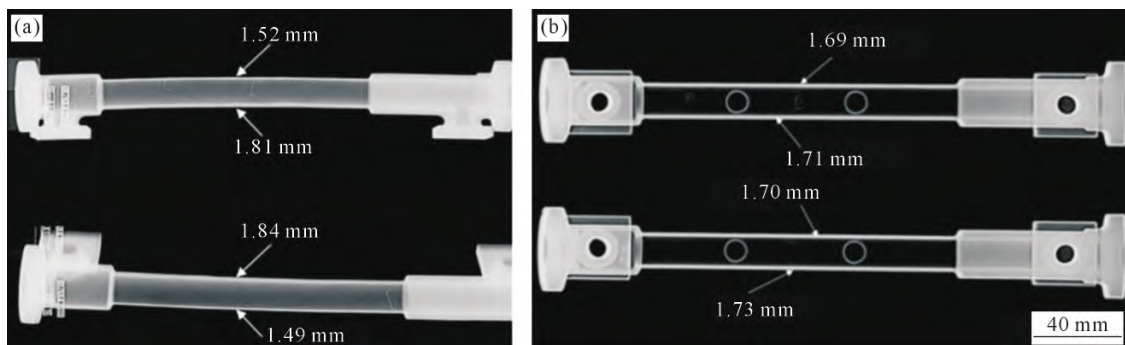


图 13 壁厚成像示意:(a) 工艺优化前;(b) 工艺优化后  
Fig.13 Imaging of wall thickness: (a) before process optimization; (b) after process optimization

由图 13a 可明显观察到,工艺优化前管路铸件明显偏芯,且管路两侧壁厚偏差严重,两根管路铸件壁厚偏差分别为 0.29 和 0.35 mm。图 13b 为工艺优化后管路铸件成像扫描图,由图可知铸件已基本无偏芯情况,且壁厚偏差值较小,两根管路铸件壁厚偏差分别为 0.02 和 0.03 mm。在生产现场的铸件初检工序,分别对工艺优化前后的管路铸件(未校形、未补焊)随机抽取 200 件,进行壁厚统计对比。该铸件尺寸公差要求为 HB 6103-2004 CT7 级,即壁厚为 1.5 mm 时,其公差为 $\pm 0.37$  mm,同时铸件协议要求铸件管路同轴度偏差 $\leq 0.3$  mm,生产时对同轴度进行加严 0.25 mm 控制,即同轴度偏差应 $\leq 0.05$  mm,因此工艺自行设定壁厚偏差 $\geq 0.10$  mm,即同轴度偏差 $\geq 0.05$  mm 的管路铸件为壁厚不均。统计结果如表 2 所示。由图 13 和表 2 统计结果可知,通过增设工艺孔、优化浇铸工艺等方式,有效解决了偏芯、管路壁厚不均等问题。

对工艺优化后的管路铸件进行清壳切割、去除浇冒口、热等静压处理,随后对管路铸件进行荧光检验和 X 射线检验,检测结果如图 14 所示。

由图 14 与图 2 对比可知,工艺优化后铸件管路内荧光缺陷明显减少,目视无明显疏松缺陷,由图 14c X 射线检测结果可知,管路热等静压后冶金质量较好,无缩孔疏松等冶金缺陷。统计得工艺优化前

表 2 工艺优化前后管路铸件壁厚不均统计  
Tab.2 Statistics on uneven wall thickness of pipeline castings before and after process optimization

	Average value of wall thickness deviation	Number of uneven wall thickness pieces	Proportion of uneven wall thickness pieces
Before optimization	0.331 mm	170	85%
After optimization	0.027 mm	6	3%

后铸件出现明显疏松缺陷的概率分别为 73%和2%。

经生产验证,工艺优化后组合管路铸件合格率由 71%提升至 85%以上,且返工返修次数减少,生产周期缩短,证明优化方案有效,模拟结果准确。

### 3 结论

(1)增设工艺孔可有效提高型芯刚性,提高型壳在熔炼浇注过程中抵抗金属液冲击的能力,组合管路壁厚偏差平均值由 0.331 mm 降低到 0.027 mm,壁厚不均比例由 85%降低到 3%。

(2)增设辅浇可高效对薄壁管路区域进行充型、补缩,通过对铸件进行无损检测,薄壁管路冶金质量明显提升,管路内出现疏松缺陷的概率由 73%降低到 2%,铸件的合格率提升至 85%以上。

(3)焊接工装能有效防止铸件焊接变形。

(4)本文铸造工艺设计优化方案明确、有效、易实施,ZTC4 组合管路冶金质量明显提升。

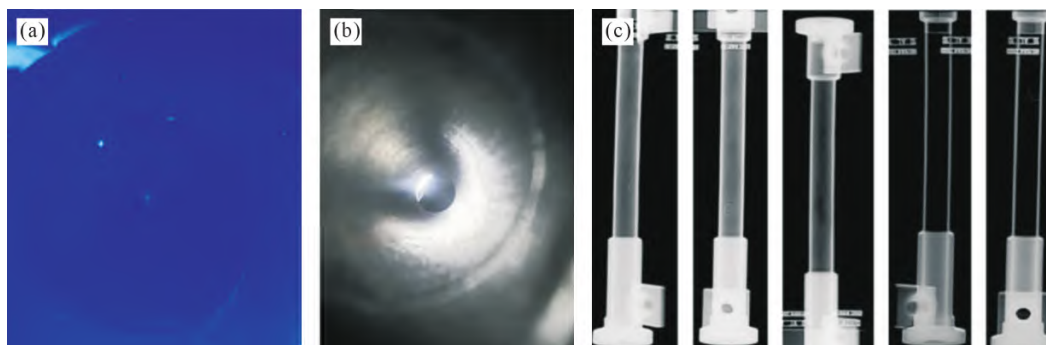


图 14 工艺优化后管路铸件无损检测结果:(a) 荧光检测;(b) 管路外观图;(c) X 射线检测  
Fig.14 Nondestructive testing results of pipeline castings after process optimization: (a) fluorescence detection; (b) pipeline appearance; (c) X-ray inspection

## 参考文献:

- [1] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.  
XIE C M. Titanium and titanium alloy casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [2] 李梁, 孙健科, 孟祥军. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 钛工业进展, 2004, 21(5): 19-24.  
LI L, SUN J K, MENG X J. Application state and prospects for titanium alloys[J]. Titanium Industry Progress, 2004, 21(5): 19-24.
- [3] 张美娟, 南海, 鞠忠强, 高富辉, 郗喜望, 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.
- [4] LU K. The future of metals[J]. Science, 2010, 328(5976): 319-320.
- [5] 周彦邦, 甘敬林. 国外钛合金铸造技术的发展[J]. 现代铸造, 1981 (1): 60-66.  
ZHOU B Y, GAN J L. Development of foreign titanium alloy casting technology[J]. Modern Foundry, 1981(1): 60-66.
- [6] 赵永庆, 陈永楠, 张学敏, 曾卫东, 王磊. 钛合金相变及热处理 [M]. 长沙:中南大学出版社, 2012.  
ZHAO Y Q, CHEN Y N, ZHANG X M, ZENG W D, WANG L. Phase transformation and heat treatment of titanium alloys [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
- [7] 娄贯涛. 双重热处理对 ZTC4 铸造钛合金材料组织及性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2010, 25(4): 40-43.  
LOU G T. Influence of the double heat treatment on the mechanical properties and microstructure of ZTC4 cast titanium alloy material [J]. Development and Application of Materials, 2010, 25 (4): 40-43.
- [8] 李伟东, 周浩浩, 刘茵琪, 杨学东, 史凤岭. 钛合金熔模精密铸件表面荧光显示缺陷形成原因[J]. 铸造技术, 2021, 42(3): 199-202, 210.  
LI W D, ZHOU H H, LIU Y Q, YANG X D, SHI F L. Forming cause of fluorescence showed defects on the surface of titanium alloy investment casting[J]. Foundry Technology, 2021, 42(3): 199-202, 210.
- [9] 历长云, 吴士平, 郭景杰, 傅恒志, 张颖, 薛伟. 立式离心铸造熔体充填量的研究与模拟[J]. 特种铸造及有色金属, 2006, 26(2): 80-82.  
LI C Y, WU S P, GUO J J, FU H Z, ZHANG Y, XUE W. Molten filling in vertical centrifugal casting and its numerical simulation [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(2): 80-82.
- [10] 朱小平. 大重量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D]. 北京:北京科技大学, 2023.  
ZHU X P. Research on integral casting technology of large weight and high precision complex titanium alloy casing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [11] 张铭杰. 钛合金中介机匣浇注系统设计与快速熔模精密铸件解剖分析[D]. 上海:上海交通大学, 2022.  
ZHANG M J. Design of gating system and anatomical analysis of titanium alloy intermediate casing prepared by rapid investment casting process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.
- [12] 刘鸿羽, 柴皓, 姜延春, 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.
- [13] 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.
- [14] 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 in centrifugal investment casting of complex thin-wall titanium alloy castings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [15] 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.
- [16] 康靖宇. 某航空发动机机匣新型薄壁盖板型零件加工工艺研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2020.  
KANG J Y. Research on processing technology of a new thin-walled cover-type part for the case of an aeroengine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [17] 王狂飞, 历长云, 崔红保. 钛合金成形过程数值模拟[M]. 北京:冶金工业出版社, 2009.  
WANG K F, LI C Y, CUI H B. Numerical simulation of titanium alloy forming process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [18] 马尧, 岳源. 钛合金 TC25 铣削表面粗糙度预测模型研究[J]. 制造技术与机床, 2020(8): 141-145.  
MA Y, YUE Y. Study on predictive model for surface roughness of milling titanium alloy TC25 [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(8): 141-145.
- [19] 舒群, 郭永良, 陈子勇, 孔凡涛, 陈玉勇. 铸造钛合金及其熔炼技术的发展现状[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(3): 332-336.  
SHU Q, GUO Y L, CHEN Z Y, KONG F T, CHEN Y Y. Development of casting and melting technology of titanium alloys [J]. Materials Science and Technology, 2004, 12(3): 332-336.
- [20] 邵珩. 大型复杂薄壁 Ti-6Al-4V 合金铸件离心熔模铸造过程数值模拟[D]. 北京:清华大学, 2017.  
SHAO H. Numerical simulation of centrifugal investment casting of large thin-wall complex Ti-6Al-4V castings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [21] 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.
- [22] 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 for large and complex titanium alloy thin-walled parts[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2024, 52(1): 1-6.
- [23] 殷建锋,李峰,南海. 异形薄壁钛合金铸件熔模铸造成形数值模拟及验证[J]. 铸造,2022, 71(1): 71-76.
- YIN J F, LI F, NAN H. Numerical simulation and experimental validation study on investment precision casting of special-shaped thin-walled titanium alloy casting [J]. Foundry, 2022, 71(1): 71-76.
- [24] 胡春阳,贾志伟,李峰,肖强伟,赵瑞斌,南海. 钛合金薄壁弯管熔模铸造工艺试制开发[J]. 铸造工程,2025, 49(2): 7-11.
- HU C Y, JIA Z W, LI F, XIAO Q W, ZHAO R B, NAN H. Research and trial production of investment casting process for titanium alloy thin-walled bent tube[J]. Foundry Engineering, 2025, 49(2): 7-11.
- [25] 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): 137-146.
- [26] 张荣强,王琳,刘鑫霞,薄煜,潘煜曜,葛学伟. 钛合金薄壁弯管熔模铸造工艺研究[J]. 铸造,2024, 73(10): 1447-1452.
- ZHANG R Q, WANG L, LIU X X, BO Y, PAN Y Y, GE X W. Research on investment casting process of thin-wall bending tube of titanium alloy[J]. Foundry, 2024, 73(10): 1447-1452.

(责任编辑:杨浩雪)