

燃气轮机大型复杂厚壁钛合金铸件整体精铸成形工艺优化

冉 兴¹, 陈义斯², 文 迪³, 龙兴权³, 高晓慧³, 何良菊⁴, 李培杰²

(1. 中航重机股份有限公司, 贵州 贵阳 550005)

(2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

(3. 贵州安吉航空精密铸造有限责任公司, 贵州 安顺 561000)

(4. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 熔模精铸大型复杂厚壁钛合金机匣是重型燃气轮机的核心部件之一, 该铸件具有轮廓高、壁厚大和形状复杂等特征, 存在整体成形困难、缩松缩孔缺陷多、尺寸精度低等难题, 限制了高功率燃气轮机的装配和使用。本工作采用ProCAST软件开展了离心铸造过程凝固温度场和流场研究, 通过分析模拟结果确定了潜在的孤立液相区范围, 根据离心铸造特性推导出用于设计螺旋形横浇道和倾斜冒口的数学模型, 基于此构建了集排气集渣、调节流量和优化温度场的一体化浇注系统结构, 能够有效降低凝固缺陷。进一步, 开发了蜡模分体拼接方案, 同时构筑了直浇道、横浇道、内浇道截面积比例为1:2.5:6的浇注系统蜡模树组, 结合尺寸定型和型壳加固工装, 最终获得了充填完整、冶金质量良好和尺寸精确的优质铸件。为重型燃气轮机的钛合金机匣规模化制造提供了有效的技术指导, 其浇注系统构型对于其他大型复杂厚壁钛合金铸件也有一定参考价值。

关键词: 钛合金; 燃气轮机; 机匣; 离心精铸; 铸造工艺

中图法分类号: TG249.4; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)07-1701-08

1 引言

自20世纪60年代以来, 大型钛合金铸件在发动机、燃气轮机等高端装备中的应用日趋增加, 得益于整体化设计, 提升了可靠性和功能性^[1]。然而, 一次性成形大尺寸铸件的难度极大, 通常采用分体制造结合焊接的复合工艺^[2]。但该工艺的工艺周期较长, 同时也容易导致铸件精度下降和组织不均匀问题, 增加了使用风险^[3]。燃气轮机对重量敏感度低, 随着使用功率的提升, 机匣铸件轮廓尺寸扩大, 环面和支板厚度增加^[4-5], 给制模、工装和冶金质量控制方面带来新难题。

离心铸造是一种通过离心力驱动金属液充填型腔, 并促进凝固补缩的工艺^[6]。Xu等^[7]研究表明离心铸造过程中熔体的填充能力随着旋转速度的增大而增大。Yang等^[8]研究中发现离心力场成形的铸件力学性能高于轧制和挤压样品。此外, 陈诚等^[9]对比动力细晶离心铸造工艺和传统重力铸造成形的K4169组织性能, 结果显示晶粒尺寸显著下降, 从 5.37 ± 0.21 mm减小到 0.27 ± 0.01 mm, 抗

拉强度提高31%, 归因于熔体紊流促使固液界面发生强烈的相对运动, 对型壳壁面上的初生枝晶造成动力学折断, 形成弥散枝晶碎片增加了熔体中的形核核心, 有利于细化铸件凝固组织。由此可见, 离心铸造工艺在增强充型、细化组织和提高性能方面具有显著优势, 有利于大型复杂厚壁钛合金铸件高质量成形。

针对整体化设计的大型铸件, 以发动机机匣为例, 研究人员展开了一系列研究^[10-12]。杨新娣等^[10]对涡轮后机匣进行模拟研究, 从熔体充型、型腔压力演变、缩松缩孔等方面分析缺陷铸件形成原因, 通过增设排气通道并改变其方向, 延缓浇注时长, 有效地提升产品质量。马月姣等^[11]根据某大型复杂环形薄壁机匣铸件的结构特征和工艺分析, 在支板下设置内浇道缓冲熔体减少卷气, 在支板-内环转接处布置浇口强化补缩。刘珍君等^[12]模拟了ZTC4钛合金中介机匣, 实验与模拟结果误差低于20%, 验证了模拟准确性。崔加裕等^[13]系统综述了发动机机匣薄壁精密铸件尺寸精度控制技术, 指出某些大型铸件蜡模无法实现一次整体注射成形, 而不同拼接方案会对组

收稿日期: 2025-07-13

基金项目: 两机重大专项基础研究(J2019-VII-0002)

作者简介: 冉 兴, 男, 1968年生, 博士, 研究员级高级工程师, 中航重机股份有限公司, 贵州 贵阳 550005, E-mail: ranxing257@163.com, ranx@avic.com

装误差产生影响。Liu 等^[14]提出拼接组装中的定位面、定位点和定位槽的偏差严重影响压型精度,通过定位方式、装配顺序等工艺优化减小了蜡模组装误差。值得注意的是,上述发动机部件通常为薄壁结构件,而厚壁类钛合金铸件整体成形工艺研究鲜有报道。

相较于薄壁成形,厚壁结构的相对散热面积更小,中心区域凝固时间更久,难以得到有效的补缩,容易出现疏松缩孔缺陷。计鑫等^[15]针对铝合金电机壳体安装耳厚壁结构的缺陷研究中,观察到该部位内浇口过早凝固,产生孤立液相区,不合理的凝固顺序导致厚壁区得不到有效补缩,通过增加辅助浇道,可保持内浇口凝固过程中补缩通道的畅通。孙冰等^[16]在对 ZTA15 钛合金小型复杂厚壁铸件研究中发现,凸耳结构产生独立热节,导致补缩通道受阻,形成了较大的缩孔,通过设置排气冒口和随形冒口可降低缺陷。

由于离心力场的特殊性^[17],铸件补缩压力方向和重力方向存在偏移,导致传统的竖直冒口对铸件基体的补缩作用下降。此外,大型厚壁铸件所需金属液容量大,离心铸造过程熔体难以完整填充浇道,易出现紊流并产生表面负压区,吸气倾向严重^[18]。另一方面,高速熔体的冲击可能导致型壳破裂^[19]。因此,具体而言,大型复杂厚壁钛合金铸件铸造工艺优化包括:分析离心力和柯氏力对熔体运动轨迹的影响以优化浇道结构,促进熔体快速地充填铸件型腔;解析补缩压力和离心压力及重力的关联性,通过倾角设计充分发挥冒口补缩作用;根据铸件特点给出蜡模压型分解和拼接方法,同时设计定位工装保障精度;避免型壳在制造和浇注中受到破坏,采用工装对其补强。

本研究针对某重型燃气轮机的大型复杂厚壁钛合金机匣铸件,利用数值仿真辅助设计浇注系统。根据本体凝固热节分布和铸件结构特点,设计浇道及冒口,优化熔体充型和补缩行为。进一步设计整体成形所需的工装,基于此开展铸件试制,验证设计方案的可行性。

2 研究方法

2.1 典型铸件的结构和技术难点分析

选取某大型复杂钛合金机匣铸件为研究对象,该铸件最大外轮廓尺寸为 $\Phi 1350\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$,由 4 处流道面、10 个支板和多处厚大安装凸台组成,最大壁厚为 100 mm,最小壁厚 10 mm,支板为实心支板,壁厚为 20 mm,是目前文献报道中尺寸最大的钛合金机匣之一^[20-22]。该铸件难以通过一次性注蜡获得压型,需设计蜡模分解及拼接工艺;此外,过程中型壳所受离心力较大,型壳强度不足,易发生破裂。从宏观结构和壁厚来看,多处热节位置特殊,传统的冒口难以补缩充分,易产生缩孔缺陷。钛合金熔体过热温度较低、熔体粘度大,浇

注过程必须快速充满型腔,否则易出现欠铸和冷隔缺陷^[23-24]。

由此可见,大型复杂厚壁钛合金铸件整体成形工艺难度非常大,需要对离心精铸全过程进行优化,包括压型、铸型和浇注系统结构。尤其是要合理地设计浇注系统结构降低充型过程熔体动能的损失,调节铸件凝固温度场,加速铸件的充型同时保障关键部位得到有效补缩。

2.2 铸造模拟和工艺设计

为了针对性地设计浇注系统,首先进行不含浇注系统的铸件本体凝固模拟,定位铸件主要的热节区域。然后基于离心精铸原理和铸件结构特点,依据横浇道二维平面熔体质点运动轨迹设计螺旋形横浇道盘,促进大量熔体平稳充型至铸件型腔。在此基础上,将离心压力和静压力的合力视为补缩压力,根据补缩压力方向设计倾斜冒口,最后构筑浇注系统,再次模拟,分析铸件充型和凝固行为,指导工艺实践。

使用三维建模软件 UG 建立模型,划分网格后采用 ProCAST 有限元分析软件进行模拟。其中,相关材料物性参数参考 Ma 等人^[25]的研究,型壳材料选用莫来石,层数设置为 13,厚度约为 4 mm,预热温度设置为 500 °C、浇注温度设置为 1700 °C、浇注时间设置为 12 s、铸件与模壳之间的传热系数取 $400\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,边界条件热物性参数依据已报道工作^[18]。型壳外侧采用与工装连接的铁丝及钢筋进行加固补强。综合考虑加固铸型承载能力选择离心转速为 60 r/min。

3 结果与讨论

3.1 铸件本体凝固模拟与热节分析

大型复杂厚壁钛合金铸件壁厚较大,铸件热节分布复杂,难以直接通过结构分析预测。为提高设计效率,先对不含浇注系统的铸件本体进行模拟,结果如图 1 所示。从图 1a 可见,铸件整体凝固固相分数在 33.5% 时,铸件外环型面先开始凝固,并呈现出同时凝固倾向,铸件内流道面和支板根部转接圆角位置还属于液相区。固相分数在 49.1% 时,如图 1a₁ 可见,液相区分布与低固相率时接近。这是由于相较于其他机匣类铸件^[20-22],该铸件的支板厚度较大,故而支板与环面接触部位对于整个铸件而言属于壁厚较厚的区域。

为了更好地看清铸件内部凝固情况,图 1b 和图 1b₁ 给出铸件底部视图。由图 1b 可见,固相分数在 58.7% 时铸件外侧基本完成凝固,但铸件内流道面还有较大面积液相区,尤其是型面和支板厚壁转接处,图 1b₁ 中铸件最后凝固位置为内侧支板的中间部位,分析固液相转变过程可知,铸件内侧凝固较慢,流道面内侧及中间支板最后凝固。大尺寸安装节和多处小凸台有明显的缩孔倾向,需放置冒口补缩。

支板与流道面连接处、厚大安装凸台、厚大支板中间部位以及流道与铸件内环交汇处成为孤立液相区,这些部位浇注过程中极容易发生缩孔、缩松等缺陷。

环形铸件的直浇道位于铸件中心,浇注过程中金属液会持续从直浇道流入浇注系统,保持高温状态。同时内环尺寸较小,经过制壳工序后,内环开口几乎会被中心浇道外部的型壳全部填实,散热能力较低,热辐射效应显著。因此在浇注系统设计时需要重点考虑内环区域凝固,设置暗冒口加强补缩。

3.2 燃气轮机大型复杂钛合金铸件浇注系统设计

首先确立铸件浇注位置,如图2a所示,铸件小端面朝上放置时,顶部出现明显欠铸,这是由于轮廓尺寸达到 $\Phi 1350\text{ mm}\times 1000\text{ mm}$,金属液的流程长,而小口端面的半径小。根据离心铸造原理^[26-27],离心力场中质点受离心压力见式(1),与质点半径和自由面半径平方差有关,故浇注时小端面受离心压力也小。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r^2 - r'^2) \tag{1}$$

式中, ΔP 为离心压力(Pa), ρ 为熔体密度(g/cm^3), ω 为旋转角速度(rad/s), r' 为离心铸造自由表面半径(m), r 为质点半径(m)。因此,铸件浇注位置为大口朝上,小端面设置内浇口引入熔体。根据之前的研究可知^[18],采用螺旋形横浇道有助于顺应熔体流动,降低紊流和卷气倾向的优势,基于上节铸件本体凝固模拟的结果,考虑熔体受离心力和柯氏力影响下的运动行为,保障大容量金属液进入型腔后可以快速充填铸件,根据补缩压力方向设计倾斜冒口强化补缩,设计工艺方案见图2。

横浇道二维平面质点运动轨迹方程,见式(2),设计了如图2b中的螺旋形横浇道^[18]。为提供充足的金属液

流量,同时避免12 s内倾转浇注的熔体在直浇道中堵塞,采用分布式的横浇道。在直浇道和横浇道的接触区域设计缓冲结构,内浇道从环状横浇道中引出,综合调节熔体运动方向,组建底部横浇道盘。

$$\begin{cases} x(t) = v_0^x t \cos \omega t + v_0^y t \sin \omega t \\ y(t) = -v_0^x t \cos \omega t + \left(\frac{2v_0^y}{\omega} - v_0^x t \right) \sin \omega t \end{cases} \tag{2}$$

式中, t 为熔体浇注后的时间, $x(t)$ 和 $y(t)$ 是 t 时刻质点所处横浇道盘二维平面中的坐标位置, v_0^x 是横浇道中心原点处横向初速度(m/s), v_0^y 是横浇道中心原点处法向初速度(m/s)。一般地,增设内浇口和扩大内浇口截面积可以提高充型流量,加快铸件成形,但是在厚壁铸件中,由于底部安装边尺寸较大,大量的内浇口不利于铸件凝固。本工作中,设计了如图2d所示的缝隙式浇道,铸件上下由法兰端面连接,加快熔体的充填。

由图1可知,铸件小端面在凝固中后期仍存在液相区。基于隋艳伟等^[27]研究可知,在离心半径较小的区域,离心压力较低处更容易出现缩松缩孔缺陷。区别于传统的重力铸造,离心力场和重力耦合力场呈抛物面形。假设熔体完全充满铸件,并且未出现凝固时,铸件内环中一点所受的力为离心压力和静压力合力,见图3。此时,自由面位于中心浇道旋转轴,即 r' 为0,该点所受离心补缩压力和静压力如下:

$$P = \frac{\rho \pi^2 n^2 r^2}{1800} \tag{3}$$

$$G = \rho gh \tag{4}$$

式中, P 为离心补缩压力(Pa), n 为离心转速(r/min), G 为静压力(Pa), h 为压头的高度(m), g 为重力加速度,取 $9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。在冒口的设计中,为最大程度地利用补缩作用,冒口取向可设为合力方向。其中,夹角 θ 可通过反正

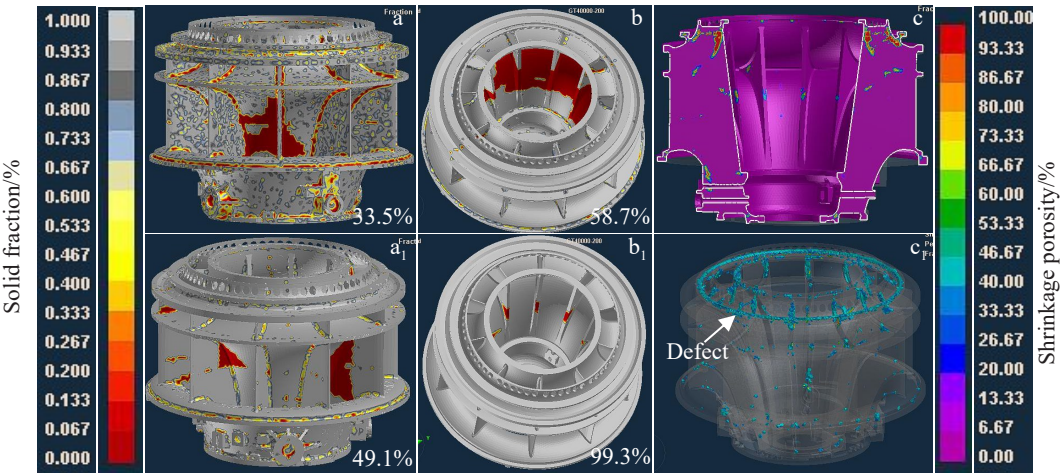


图1 铸件本体型面和底部的凝固固相分数及铸件缩松缩孔分布模拟结果

Fig.1 Simulation distributions of solid fraction (a–b, a₁–b₁) and shrinkage porosity (c, c₁) of castings without pouring system: (a, a₁) casting profile; (b, b₁) casting bottom

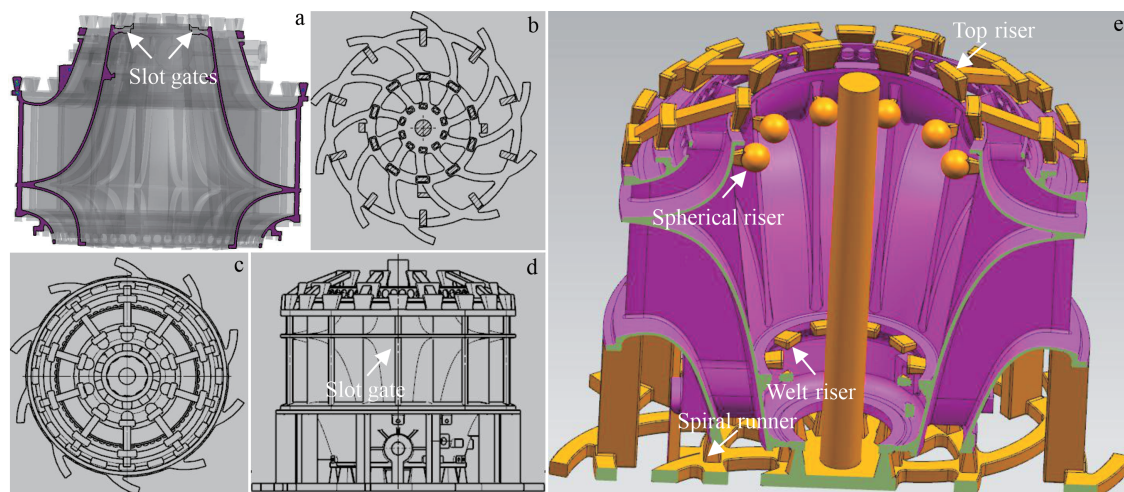


图2 浇注位置判断及优化的浇注系统结构小端面朝上模拟结果及结构视图

Fig.2 Structure of the gating system for judging and optimizing the pouring position: (a) simulation results with the smaller end facing upwards; (b) bottom view; (c) top view; (d) front view; (e) cross section of model

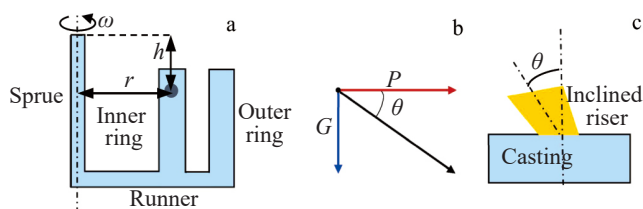


图3 倾斜冒口补缩压力分析及设计示意图

Fig.3 Feeding pressure analysis and design diagram of inclined riser: (a) casting model; (b) stress analysis; (c) inclined design

切函数计算,如下式:

$$\arctan\theta = \frac{\pi^2 n^2 r^2}{1800gh} \quad (5)$$

本工作中采用离心转速为 60 r/min,内环顶部半径约为 0.3 m,静压头高度约为 0.35 m,根据式(5)可知,此时合力与转轴的夹角约为 27°。值得注意的是,实际铸造中,已经凝固的部分金属无法施加有效的离心压力。因此在复杂铸件中有效的补缩自由面会发生迁移,最大离心自由面半径可视为环面的内型面,经计算倾角约为 9°。因此,此类铸件的倾斜冒口角度在 9°~27°范围内可调。综合考虑冒口布置,在大型复杂厚壁铸件中设计顶部冒口如图 2e 所示。

为减少中心浇道热辐射效应导致的内环补缩问题,设计了沿周向的随形贴边冒口,见图 2e。在铸件最上端内圆安装边上加厚后再放置冒口,防止流程最远且离心半径较小的位置欠铸。对上端各个冒口进行连接,增大补缩通道,提高补缩压力,使得金属液由外向内进行补充,从而构建有利于大型复杂钛合金铸件整体成形的浇注系统构型。

3.3 铸件充型模流分析及补缩行为

探究优化设计后的浇注系统结构对铸件成形过程流场和凝固的影响,图 4 中展示了含有浇注系统铸件的模流分析结果。如图 4a 所示,金属液由直浇道进入型腔,沿弧形浇道的切线方向快速填充横浇道盘,熔体流态平稳,浇道中未见明显空腔,符合螺旋形横浇道设计。有利于减少表面负压区的吸气效应。

受离心力影响,金属液首先由外侧的 10 处辅助浇道向铸件最外侧安装边进行充型,见于图 4b,熔体抵达铸件中间部位时,内环位置的内浇道开始充型,如图 4c 所示,过程中金属液无交汇现象,充型较为平稳。由于钛合金熔体过热度低,当前流态能够抑制两股或多股熔体汇流导致的冷隔。

在充型进行到 7.41 s 左右时,外侧流入的金属液与内环的金属液在下方流道面中间位置形成汇流,此时两股金属液前端冷熔体层交汇,有形成氧化夹渣的风险,因此实际铸造中需在此类位置设计排气、集渣冒口。

图 4e 为充型后期熔体流态,可见由外环充填的金属液与内环金属液在上方流道面中间位置再次形成汇流。在此次汇流后,熔体完全合并,并在内外环中同步缓慢推进,最终完整地充满铸件内环顶端位置。说明图 2e 中设计的顶部并联冒口可以起到很好的排气、集渣和补缩作用。

图 5 给出铸件凝固固相分数及缩松缩孔分布图,如图 5a 所示浇注时间为 31.07 s 时,除了横浇道盘末端和铸件棱边位置发生凝固其余位置尚处于液相状态,可以判断整个浇注系统在充型完成后才开始凝固补缩。铸件的两处分流环厚度约为 10 mm,中间 10 道支板厚度为 20 mm,属于厚壁结构。从图 5a、5b 固相分数分布图可

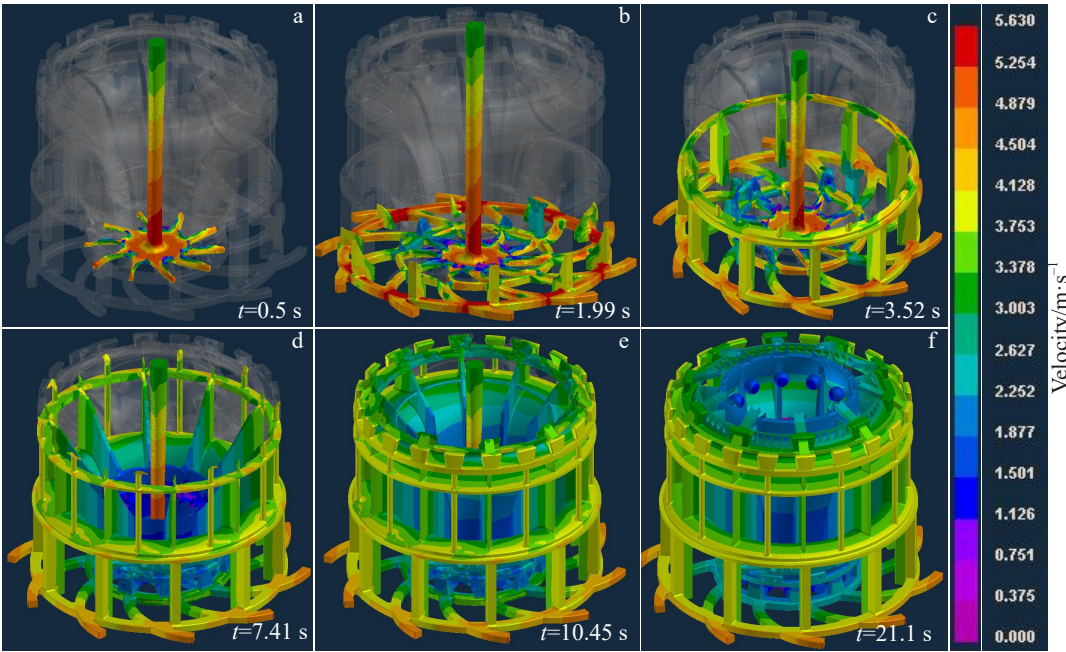


图4 不同充型阶段浇注熔体流场分布

Fig.4 Flow fields of titanium alloy melt filling in castings at different stages: (a) filling straight runner; (b) filling gate; (c) start filling outer ring of the casting; (d) filling support plates; (e) filling inner rings of castings; (f) finish filling

知,分流环的凝固速度要明显快于支板的凝固速度,其中支板与分流环的交接位置属于热节区域,最后凝固。

横浇道盘上的内浇口、辅助浇道和铸件上方的冒口温度均高于铸件本体,最后凝固,符合顺序凝固要求,此时浇道可以起到一定的补缩作用。铸件上端面内环位置的圆形暗冒口凝固速率基本与铸件相同,说明该冒口可以强化局部的补缩压力。另一方面,可收集金属液充型前端的低温熔体,起到集渣的效果。由此可见,所设计的浇注系统结构在铸件凝固过程构建了较为理想的凝固温度场,安装边和内环等关键部位补缩通道畅通。

图5c、5d显示了铸件中的缩松缩孔模拟情况,铸件本体中的大部分缺陷是糊状凝固很难避免的缩松缺陷,一般可以经过热等静压工艺消除。如图5d所示,改进工艺后铸件支板实现了致密凝固。对比图1c说明所设计

的浇注系统可有效降低缺陷体积分数。残余的凝固缺陷均分布在上下流道面夹角位置、流道面与支板的交接位置和厚大安装节、凸台。

3.4 大型复杂燃气轮机机匣工装设计及试铸

3.4.1 蜡模压型分体设计和型壳制备工艺优化

铸件轮廓尺寸高达 $\Phi 1350\text{ mm}\times 1000\text{ mm}$,移动射蜡嘴进行压型时,射蜡机压力难以达到要求,蜡料充型、凝固和后续的取模过程都引起整体尺寸上的变形^[28]。因此设计如图6所示的大型复杂钛合金机匣蜡模压型分体方案。机匣类铸件通常具有回转体特征,机匣两端是与其他部件进行连接安装部位,需要保证良好平面度,因此铸件两端必须单独开模制备压型。分体1和分体3为铸件两端面包含流道面部分,作为开放式的环形结构,其模具开发中有利于控制同轴度。

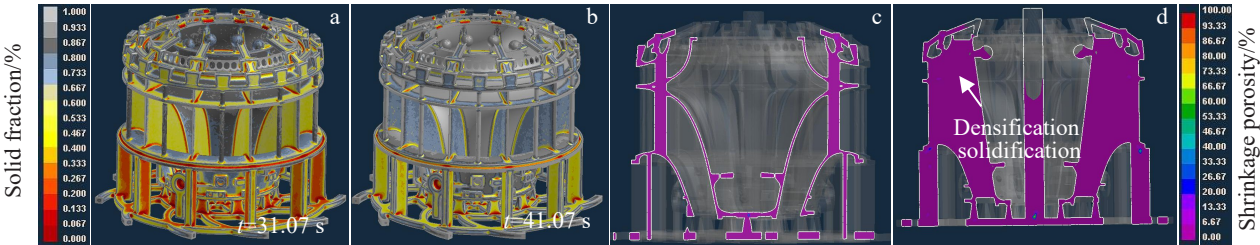


图5 铸件不同阶段凝固固相分数及缩松缩孔分布图

Fig.5 Solid fraction (a–b) and shrinkage porosity (c–d) of casting at different stages: (a) mid-term stage; (b) end of solidification; (c) defects of the casting; (d) defects in section of casting support plate

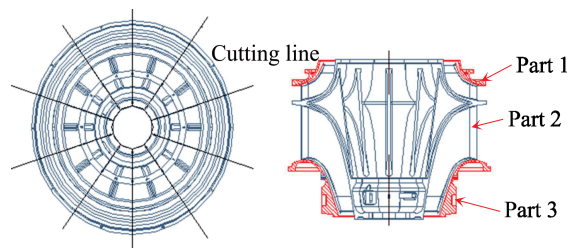


图6 大型复杂钛合金机匣蜡模压型分体设计方案

Fig.6 Design scheme of wax mold separate parts for large-scale and complex titanium alloy casing

余下的分体2为中心对称结构,设计时基于结构对称性按支板数量平均拆分成10份,可使用同一个主体模具压制而成,局部差异结构使用专用活块替换,在简化模具的同时可最大程度保证分体尺寸一致性,方便后续的蜡模拼接。拆分后的分体蜡模尺寸相对较小,工艺稳定性更好,精度可控性强。该分解方式只需3套模具,最大程度缩小单一模块的尺寸,减少蜡料冷却收缩产生的变形量,同时避免了安装边和支板的熔接,有利于提升定位精度。

为保证12个小型蜡模拼接后分体1和分体3具有良好同轴度,以及分体2中的10个支板位置准确,设计如图7所示的大型复杂厚壁钛合金铸件蜡模压型分体拼接模具工装,辅助整体蜡模的组合和修型。

对于大型铸件,蜡模拼接时需选择变形量更小的端面作为定位面。因此,该工装以分体3作为整体基准,以下方凸台和机匣内环圆为定位标准。将10个支板分别通过分体3上的凹槽进行组装,工装外侧同时设计10个可推拉活块,通过定位槽控制支板位置度。机匣铸件需具有精确同轴度,因此,控制分体1拼接的工装必须和分体3基准面具有精确的平行度,并在水平平面中可自由移动,从而调节位置。

基于模拟结果,在铸件压型上熔接浇注系统,采用开放式浇注系统加快金属液的充型速度,直浇道、横浇道、内浇道截面面积比例为1:2.5:6,横浇道使用螺旋浇道,金

属液充型至离心最远端后,由外环向内环充型,充型更平稳。由模拟结果可知,上下端面的离心半径最小处补缩效果相对较差,可在内环安装边增加冒口,增强补缩压力促进凝固致密化。

大型复杂厚壁铸件本体及附加浇注系统整体用蜡量较大,为防止脱蜡时导致胀型,在内浇口下方设置脱蜡口,可扩大排蜡速度并且不影响熔体在横浇道中的流动。铸件压型流道面死角位置开设工艺孔,便于后续涂料过程中料浆能够顺利流出,防止涂料堆积。

陶瓷型壳的均匀性及面层挂浆的稳定性,对于铸件成形质量有显著影响。本工作中大型复杂钛合金铸件在结构上具有大面积流道面,容易出现浆料滑移,导致局部面层厚度不足,无法良好地隔绝熔体和铸型的反应。此外,弯角等锐边结构中也易出现浆料堆积,型壳局部厚度增加会抑制散热,加剧缩松缩孔倾向。

制造了涂料吊轴工装如图7d所示,提升挂浆制壳自由度,改善型壳材料均匀性。在背层对模组使用铁丝及钢筋加固。值得注意的是,燃气轮机机匣内腔流道面和支板存在死角,挂浆过程中需确保铸件内腔多余料浆完全流出,通过工艺孔排尽并进行撒砂操作,避免造成面层涂料垮塌。机匣类铸件内腔水分挥发更难,不均匀干燥会产生应力集中,甚至型壳开裂。不同于传统铸件只需横向吹风干燥,此类铸件应在模壳上下布置可动的吹风装置,促使气流通过铸件内腔,加强内环型面的干燥,保证模壳强度和尺寸稳定性。

3.4.2 熔炼浇注及成形质量分析

基于上述工艺,开展大型复杂钛合金铸件试铸,铸件实物如图8所示。如图8a所示,清壳后可以观察到,铸件充型完整,无跑火、冷隔、欠铸等现象,说明优化后的浇注系统结构设计较为合理。吹砂后可见铸件表面完整光洁,未见表面色差和宏观缺陷。切割浇冒口后,铸件内环冒口根部缩孔相对较小,可通过补焊处理,经过X光和荧光检查,铸件支板与流道面交接位置、主安装节以及部分凸台存在缩孔缺陷,与数值模拟仿真预测结果基本一致,可通过补焊消除。

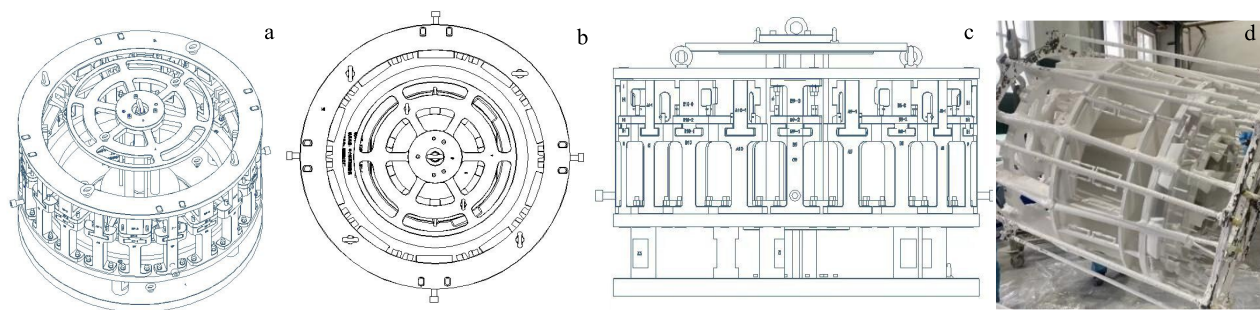


图7 大型复杂钛合金机匣的分体拼接模具工装和制壳工装

Fig.7 Assembly mold for tool (a-c) and shell-making tool (d) of large-scale and complex titanium alloy casing

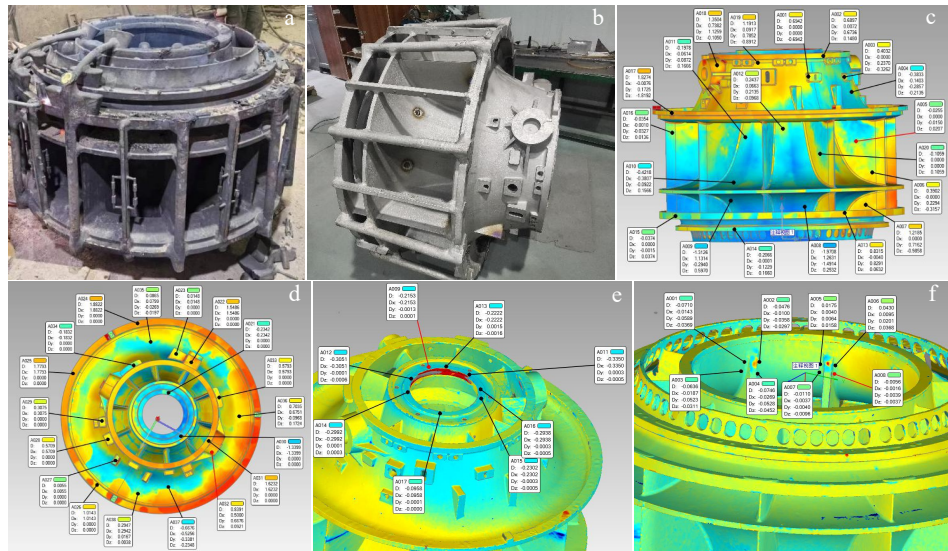


图8 大型复杂钛合金铸件离心铸造试验件实物及尺寸检验结果

Fig.8 Appearances (a–b) and dimensional inspection results (c–f) of centrifugal casting test piece of large-scale and complex titanium alloy castings: (a) after cleaning the shell; (b) after blowing sand

4 结 论

1)燃气轮机大型复杂厚壁机匣本体凝固模拟结果表明,铸件的内环型壁、流道面内侧、厚大安装凸台、支板以及其与流道交接部位属于孤立液相区,极易发生缩孔、疏松等缺陷。

2)基于本体凝固模拟结果,根据螺旋形横浇道和倾斜冒口的数学模型,设计开发了集合排气集渣、调节局部流量和优化凝固温度场等功能的一体化浇注系统结构模型,通过转移铸件热节显著降低了铸件内环上端和厚大型壁中的缺陷占比。

3)设计了大型铸件蜡模压型的分体拼接方案,结合铸造模拟结果,构筑了直浇道、横浇道、内浇道截面面积比例为1:2.5:6的浇注系统蜡模树组;在尺寸定型和型壳加固工装基础上,开展了大型复杂钛合金机匣的试制,获得了充填完整、冶金质量良好和尺寸精确的优质铸件。验证了工艺优化方案的可行性。

参考文献 References

[1] Zhang Meijuan(张美娟), Nan Hai(南海), Ju Zhongqiang(鞠忠强) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2016, 36(3): 13

[2] Ran Xing(冉 兴), Lv Zhigang(吕志刚), Cao Jian(曹 建) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2021, 70(2): 139

[3] D’Andrea A, Gagnon M, Beretta S et al. *International Journal of Fatigue*[J], 2024, 188: 108501

[4] Mohiuddin M V, Hussaini S F, Krishnaiah A et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 90(9–12): 3147

[5] Xu Hui(许 辉), Guo Yanjun(郭延军), Wang Jiangwei(王江伟) et

al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(6): 2057

[6] Koike M, Krysiak A, Chan K S et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(4): 560

[7] Xu Q, Wang X, Guo Y G et al. *China Foundry*[J], 2019, 16(2): 105

[8] Yang Y J, Wang X Y, Li X M et al. *Materials*[J], 2024, 17(1): 184

[9] Chen Cheng(陈 诚), Yang Guangyu(杨光昱), Jin Menhui(金梦辉) et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2024, 60(7): 926

[10] Yang Xindi(杨新娣), Tian Zhixing(田智星), Lu Hanbo(路涵博) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2021, 41(9): 1184

[11] Ma Yuejiao(马月姣), Niu Juntao(牛俊涛), Xie Jun(谢 君) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2024, 73(7): 1024

[12] Liu Zhenjun(刘珍君), Zhu Xiaoping(朱小平), Li Nina(栗尼娜) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(1): 129

[13] Cui Jiayu(崔加裕), Wang Donghong(汪东红), Xiao Chengbo(肖程波) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2024, 44(2): 31

[14] Liu C H, Jin S, Lai X M et al. *Proceedings of the ASME 10th International Manufacturing Science and Engineering Conference*[C]. Charlotte: ASME, 2015: V001T02A083

[15] Ji Xin(计 鑫), Liu Lijun(刘立君), Jia Zhixin(贾志欣) et al. *Foundry*(铸造)[J], 2025, 74(1): 98

[16] Sun Bing(孙 冰), Wang Yishan(王易山), Sun Hongzhe(孙宏喆) et al. *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2023, 43(1): 102

[17] Sui Y W, Li B S, Liu A H et al. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2008, 18(2): 291

[18] Ran Xing(冉 兴). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2024, 53(7): 2049

- [19] Zhu X P, Zhu C L, Lin B S *et al.* *Metals*[J], 2022, 12(11): 1954
- [20] Hou N, Wang M H, Zhang Y *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2021, 113(5–6): 1229
- [21] Wang Z B, Sun J F, Chen W Y *et al.* *Metals*[J], 2018, 8(6): 464
- [22] Sun R C, Mi G B. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(9): 2405
- [23] Kollerov M Y, Gusev D E, Sharonov A A *et al.* *Metallurgist*[J], 2022, 66(3–4): 433
- [24] Mysik R K, Pavlinich S P, Kulakov B A *et al.* *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*[J], 2017, 58(3): 231
- [25] Ma C, Cao W, Liu B H *et al.* *International Communications in Heat and Mass Transfer*[J], 2024, 159: 108155
- [26] Sui Yanwei(隋艳伟), Li Bangsheng(李邦盛), Liu Aihui(刘爱辉) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(9): 1537
- [27] Sui Yanwei(隋艳伟), Li Bangsheng(李邦盛), Liu Aihui(刘爱辉) *et al.* *Foundry*(铸造)[J], 2008, 57(12): 1284
- [28] Bazhenov V E, Ovsyannikov A S, Kovyshkina E P *et al.* *Journal of Manufacturing and Materials Processing*[J], 2024, 8(5): 213

Optimization of Integral Investment Casting Process for Large-Scale and Complex Thick-Walled Titanium Alloy Castings in Gas Turbines

Ran Xing¹, Chen Yisi², Wen Di³, Long Xingquan³, Gao Xiaohui³, He Liangju⁴, Li Peijie²

(1. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd, Guiyang 550005, China)

(2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3. Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd, Anshun 561000, China)

(4. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Large-scale and complex thick-walled titanium alloy casings produced by investment casting are key components in heavy-duty gas turbine. Characterized by their large contour size, substantial wall thicknesses, and complex shapes, these castings often face challenges such as difficult monolithic molding, numerous shrinkage pore and shrinkage cavity defects, and low dimensional accuracy, limiting the assembly and use of high-power gas turbines. The solidification temperature field and flow field during centrifugal investment casting process were investigated using the ProCAST software. Results show that the potential isolated liquid phase regions are identified. According to the characteristics of centrifugal casting, the mathematical models for designing spiral runner and inclined riser are derived. Based on this, an integrated gating system is developed, which combines exhaust gas and slag collection, flow regulation, and temperature field optimization, thereby significantly reducing solidification defects in castings. Furthermore, a wax mold splicing scheme is designed, and a wax mold tree for the gating system is constructed, featuring a straight runner, cross runner, and inner runner with cross-sectional area ratios of 1:2.5:6. Additionally, through the integration of dimensional calibration and shell reinforcement tooling, high-quality castings with complete filling, good metallurgical quality, and precise dimensional accuracy are achieved. This work provides effective technical guidance for the manufacturing of titanium alloy casings in heavy-duty gas turbines, and the gating system configuration offers reference value for other large-scale and complex thick-walled titanium alloy castings.

Key words: titanium alloy; gas turbines; casing; centrifugal investment casting; casting process

Corresponding author: Ran Xing, Ph. D., Professorate Senior Engineer, AVIC Heavy Machinery Co., Ltd, Guiyang 550005, P. R. China, Tel: 0086-29-86231117, E-mail: ranxing257@163.com, ranx@avic.com