

大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术

冉兴^{1,2}, 吕志刚^{1,3}, 曹建⁴, 李培杰¹

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 中航重机股份有限公司, 贵州贵阳 550005;
3. 摩擦学国家重点实验, 北京 100084; 4. 贵州安吉航空精密铸造有限责任公司, 贵州安顺 561003)

摘要: 钛合金熔模铸造工艺过程复杂, 影响铸件质量的因素较多, 而大型复杂钛合金熔模精密铸造技术是铸造行业的前沿技术。文中介绍了大型复杂钛合金熔模铸造技术的国内发展现状, 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。结合大型复杂铸件离心铸造生产实际, 对关键过程的质量影响因素进行全面分析, 从制模、制壳、熔铸等工艺过程阐述如何提高大型复杂铸件的尺寸精度及铸件质量, 为大型复杂钛合金熔模铸造工艺设计提供参考和借鉴。

关键词: 钛合金; 熔模铸造; 离心铸造; 尺寸精度; 铸件质量

作者简介:

冉兴(1968-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 清华大学创新领军工程博士在读, 研究方向为熔模精密铸造。电话: 0851-32208022, E-mail: 2560680637@qq.com

通讯作者:

李培杰, 男, 博士, 教授, 研究方向为轻金属材料成形。电话: 010-62785906, E-mail: lipj@mail.tsinghua.edu.cn

中图分类号: TG249.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)02-0139-08

基金项目:
两机重大专项基础研究(J2019-VII-0002)。
收稿日期:
2020-10-27。

钛合金具有密度低、比强度高、抗腐蚀性能好等优点, 广泛应用于航空、航天、船舶、电子等各个领域。随着航空、航天工业的发展, 对装备的载荷、强度、刚性等要求越来越高, 大型复杂钛合金整体铸件逐步取代传统的“多件组合”结构(图1)。特别是在航空制造领域, 发动机在需要高推重比的同时, 还要具备更长寿命、更高可靠性与经济性及满足适航认证要求, 加快了钛合金铸件向功能化、整体化、轻量化、大型化发展, 铸件已从传统意义上的毛坯升级为近净形整体功能部件。铸件结构越来越复杂、外廓尺寸越来越大、最小壁厚越来越薄; 尺寸精度越来越高、冶金质量要求近乎严苛; 对铸件的可靠性、安全性、长时稳定性等要求越来越明确。这些都对大型钛合金结构件提出了越来越高的要求^[1-2]。

1 国内大型钛合金铸件发展现状

20世纪90年代初, 我国航空发动机的钛合金机匣采用分体铸造再焊接成整体部件方式生产, 在使用过程中由于机匣焊接量大, 部件刚性差, 易产生疲劳裂纹, 部件可靠性和寿命下降, 难以实现全寿命使用。随着航空发动机性能要求不断提升, 分体铸造再焊接成整体部件的机匣类构件已满足不了航空发动机的使用要求, 需采用结构刚性更好、更为可靠的整体铸件。

国内从20世纪90年代起开展大型钛合金铸件的研制工作, 整体铸造的中介机匣率先在XX10发动机上使用。开展钛合金铸造技术研究和钛合金铸件研制生产的单位有航空工业贵州安吉航空精密铸造有限责任公司、中国航发北京航空材料研究院、中科院金属所、沈阳铸造研究所、洛阳船舶材料研究所等。其中, 航空工业贵州安吉航空精密铸造有限责任公司、中国航发北京航空材料研究院是航空用钛合金铸件研制和生产主要单位。近年来, 我国研制的钛合金铸件尺寸不断增大, 从轮廓尺寸为 $\Phi 890$ mm航空发动机中介机匣, 发展到轮廓尺寸为 $1\ 372\ \text{mm} \times 782\ \text{mm} \times 621\ \text{mm}$ 的某钛合金异形结构件(图2)。

长期以来, 大型复杂钛合金铸造主要以型号任务为技术发展导向, 通用技术的发展相对滞缓, 造成了钛合金铸造技术的进步赶不上当前铸件质量及尺寸的发展需求, 使得当前研制及生产中的大型复杂钛合金铸件的制备一直存在型面尺寸精度

低、冶金缺陷较多、批次稳定性不够等方面的技术瓶颈。

2 大型复杂钛合金铸件制造技术

20世纪80年代至90年代初,我国基本形成了钛合金精密铸造技术体系,近年来开始注重近净形熔模精密铸造技术的工程化应用技术研究。铸造技术是实现铸造产品质量符合性的基础,质量符合性是产品能否实现装备所需功能的必要保障。从铸造技术到产品功能实现是一个复杂的过程,各项铸造技术通过质量一致性来实现产品功能。因此,铸造技术基础是否扎实,尤其是能否突破瓶颈技术、关键技术,是大型复杂钛合金铸件能否安全、可靠地实现其应有功能的重中之重。下面就钛合金铸造过程中的尺寸精度控制技术 & 冶金质量控制技术进行分析。

2.1 大型复杂钛合金铸件尺寸精度控制技术

精密铸造的工艺流程复杂,从蜡模到型壳、再到铸件,进行递次的形状复制。蜡模、型壳的形状和尺寸稳定性及精度传递过程对最终获得高精度铸件具有重大影响。铸件后续的焊接、热处理、加工均会带来铸件的变形。

2.1.1 关键技术难点

大型复杂钛合金铸件受结构限制以及制造过程多因素影响,造成铸件变形和尺寸收缩影响因素的多样性,要实现变形与尺寸控制就必须分别弄清各因素产生变形的机理,才能制定有效的控制方法^[3-4]。造成铸件变形的主要因素如下。

(1) 蜡模变形。由于结构复杂,蜡模模具打开

后,模具活块只能逐个取出。此时蜡模一部分与模具活块接触,另一部分被裸露出来,这造成蜡模各部位所受到的束缚不能被同时解除且接触的外界温度也不同,形成的收缩不同;而由于大面积薄壁和不等壁厚差,蜡模自身收缩也不一致。在蜡模存放过程中,存放方式、环境温度变化、自重等也会带来蜡模的变形。

(2) 型壳变形。大型复杂模组在制壳过程中受自重影响在模组干燥存放过程中会发生变形;型壳是在室温环境下复制蜡模尺寸,而浇注后型壳温度会升高到铸件浇注温度附近,型壳温度变化会引起其尺寸发生变化;浇注过程中受金属液和离心力的作用,型壳也会产生变形。

(3) 铸件凝固变形。在蜡模组安装冒口和浇道以及铸件浇注过程中,铸件的冷却环境和凝固收缩都受到浇冒口的影响,由于铸件本身结构的不均匀、大面积薄壁易变形、尺寸大收缩差大等特点,受到浇冒口系统对其温度场和收缩应力的影响就更大。

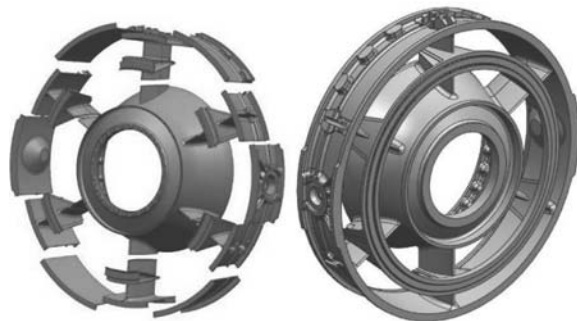


图1 大型复杂铸件示意图

Fig. 1 Example of large complex castings

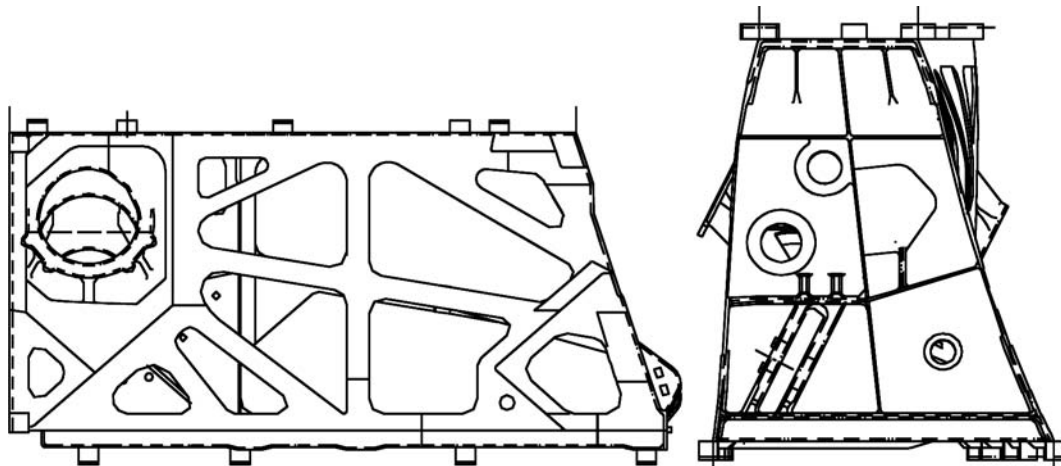


图2 某型飞机钛合金异形结构件

Fig. 2 Titanium alloy casting for a certain type of aircraft

(4) 焊接变形。在技术标准范围内,铸件的某些缺陷可以通过补焊修复,但补焊过程中因局部温度与组织变化产生的应力会导致铸件变形。

(5) 结构变形。与一般铸件相比,大型钛合金铸件的尺寸和壁厚差异较大,尺寸波动受制模、制壳、浇注、热等静压、热处理等过程中的工艺环境影响更显著。

2.1.2 解决的技术途径

通过系统研究铸件变形及尺寸精度演变规律,确定全流程尺寸误差链的关键环节,并采取相应的工艺技术措施,突破以下尺寸精度控制关键技术。

(1) 蜡模尺寸精度控制技术。通过冷却收缩、重力(蠕变)对蜡模变形规律影响的测试与分析,在环境温度受控的前提下,优化蜡模存放条件;通过蜡模胎模/矫形模,控制蜡模的形位变形量,保证蜡模的圆度、平面度符合工艺要求;采用三坐标或蓝光检测方法评价蜡模尺寸精度的符合性。

(2) 型壳尺寸精度控制技术。通过制壳过程中载荷分析与校验、脱蜡/焙烧/预热条件下高温-重力对型壳变形影响、熔体热作用和充型载荷对型壳变形影响、离心力对型壳变形的影响研究,系统制定型壳防变形措施,如:设计制造模组防变形工装;调控制壳工艺(湿强度、高温强度);调整优化脱蜡、焙烧、预热工艺参数,将型壳变形率控制在最小范围。

(3) 铸件尺寸精度控制技术。研究凝固冷却收缩对铸件形状和尺寸影响,结合凝固过程应力-应变模拟分析结果,通过控制熔铸过程工艺参数(如:铸型温度、浇注温度等)、调整浇注系统、局部增厚或减薄型壳强度、控制因凝固和冷却收缩受阻造成的应力不均和应力集中等方法,使铸件收缩更均匀。

(4) 后处理热过程尺寸精度控制技术。在分析大型铸件在热处理(含热等静压、时效等)、焊接等热过程中变形规律的基础上,运用金属材料的蠕变特性,设计和制造必要的热定型工装和防变形工装以减小后处理热过程中铸件变形。

2.2 大型复杂钛合金铸件质量控制技术

2.2.1 关键技术难点

由于过程控制难度更大,大型复杂钛合金铸件缺陷产生的可能性较中小尺寸铸件增加。从现有大型钛合金铸件的生产与加工情况来看,铸件浇注后几乎都存在一定数量的冶金缺陷,靠补焊挽救,毛坯合格后,在加工过程的荧光检查中,还会有部分铸件存在荧光显示。对铸件质量影响的主要因素有以下几方面。

(1) 外廓尺寸不断增加,加大了熔体的流动距

离,延长了熔体与铸型接触的时间,增加了熔体与铸型相互作用的机会。

(2) 壁厚差不断增大,增加了缩孔、疏松和应力集中的机会。

(3) 最小壁厚越来越小,增大了欠铸、浇不足的可能性。

(4) 铸件结构越来越复杂,使金属液填充过程处于多管流动过程,极易将外来物卷入铸件成为夹杂、夹渣等缺陷。

2.2.2 解决的技术途径

(1) 采用数值模拟分析型壳受热条件下的温度场和浇注时的金属液流场、温度场及应力场变化规律。构建实际工况下的温度测量系统,对实际生产过程的温度状态和金属液流动进行测量,从而检验和修正数值模拟结果。

(2) 改进型壳温度控制方法。通过型壳局部保温或激冷等手段实现型壳散热条件的差异化精确控制,配合浇注工艺设计,优化金属液凝固顺序,减少充型不完整、补缩不足导致的铸件缺陷。

(3) 针对构件结构特点,结合计算机模拟优化的浇注方案,研究铸型预热温度对金属液充型补缩性能的影响,获得优化的铸型预热温度,减少流痕、浇不足、疏松缩孔等缺陷,实现铸件完整成形。

(4) 采用计算机有限元模拟技术分析温度场对凝固中缩孔等缺陷形成的影响,预测缺陷位置。基于此结果,优化三维铸件结构、浇冒口等浇注系统设计。采用X射线探伤、渗透检验等无损检验手段,结合铸件解剖,分析检测成形的铸件冶金缺陷及其分布规律,并与有限元模拟结果对比验证,迭代工艺参数设置,优化浇注工艺。

(5) 采用热等静压技术消除铸件内部疏松缩孔缺陷。

3 大型复杂钛合金熔模铸造工艺案例

如图2的某钛合金异形结构铸件是典型的大型复杂钛合金铸件。钛合金铸件制造工序流程长(从投料到铸件入库需要经过70余道主要工序),任一工艺过程操作质量对铸件最终质量都将造成影响。主要的工艺过程有:蜡模压制、蜡模组合、涂料制壳、熔炼浇注、吹砂打磨、排故补焊、酸洗荧光、热等静压、多次X光探伤、矫形、机加终检等。由于钛合金熔体非常活泼,浇注熔体多采用真空自耗电极熔壳获得,但因该种熔炼方式金属液过热度不高,造成熔体本身粘度大、流动性差,通常采用离心浇注的方式进行铸造生产^[5]。

3.1 制模过程

3.1.1 制模工艺

蜡模尺寸控制是铸件尺寸控制的首要环节,为保证蜡模尺寸的准确性,同时验证工艺参数的可行性,压制了不同压型预热温度、射蜡压力和保压时间的蜡模,对蜡模尺寸划线检查、三维扫描(图3)和破坏性全面尺寸测量,确定适合的制模工艺参数。

3.1.2 蜡模尺寸控制技术

设计了蜡模胎模和测具,对蜡模进行符合性矫

正。铸件曲面所对应的蜡模曲面变形量测量结果表明,设计的蜡模胎模和测具能有效控制蜡模变形,经胎模固化、测具检查控制和胎模局部矫正后的蜡模尺寸能控制在0.5 mm左右(图4)。

3.2 浇注系统设计

3.2.1 计算机工艺方案模拟

利用铸造工艺模拟仿真软件对表1所示不同工艺参数下的工艺方案进行了浇注和凝固模拟分析,为浇注工艺参数优化提供了依据。模拟过程见图5。

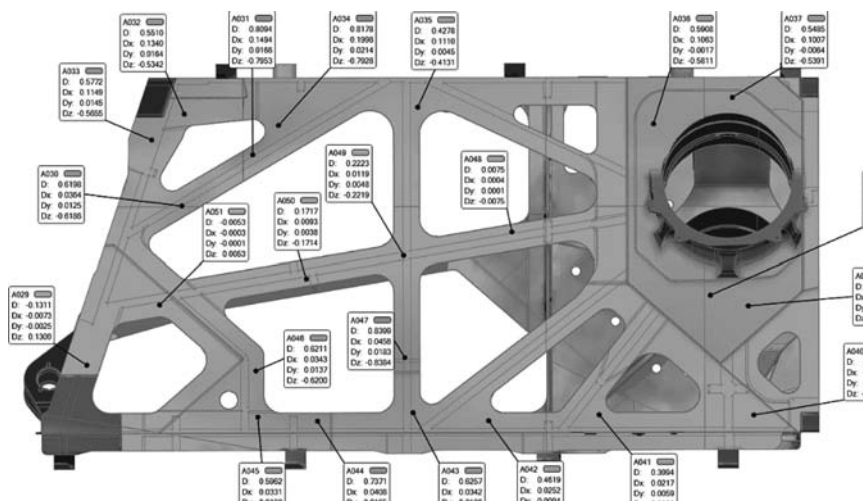


图3 三维扫描结果

Fig. 3 Three-dimensional scanning results

3.2.2 模拟结果分析

由图5分析结果可知,方案一充型、补缩效果更好,其主要原因为离心转速高,有利于合金的充型和补缩。若降低离心转速,则必须大幅度提高型壳预热温度和加大补缩通道。但是两种方案的轴承孔处冒口容量都不够,补缩效果都不好,需加大厚大部位的补缩。

3.2.3 浇注系统确定

由于铸件具有外廓尺寸大、薄壁的特点,蜡模组合工艺方案主要考虑了以下两个问题:

(1) 设计合适的内浇道与横浇道以及中心浇道的比例关系,以保证型腔内获得足够的压强;

(2) 由于蜡模为非对称薄壁异型面,组合方案(图6)需要考虑模组在制壳旋转过程中容易因重量不平衡而产生扭矩,导致模组断裂。特制做涂料用工装。

3.2.4 防变形设计

考虑铸件筋板跨度大易变形,为保证蜡模强度,避免蜡模和铸件后工序变形,在蜡模相应位置组合设

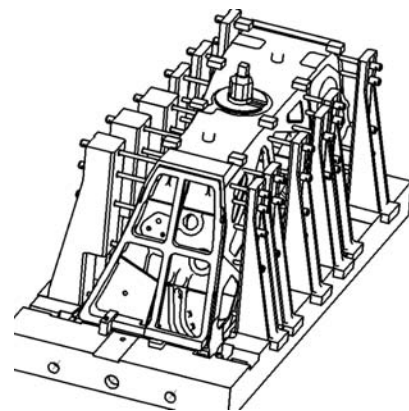


图4 蜡模胎模和测具

Fig. 4 Wax pattern and gauge

表1 工艺模拟方案
Table 1 Scheme of process simulation

工艺参数	方案一	方案二
浇注温度/℃	1 700	1 700
型壳温度/℃	500	230
转速/(r·min ⁻¹)	180	120
浇注时间/s	20	20

计制造、安装了工艺筋，用以连接跨度较大的铸件筋板，形成了防变形框架，如图7所示。

3.2.5 专用涂料工装设计

铸件蜡模结构为非对称薄壁异型结构，在组合和涂料过程中常在浇冒口等连接部位出现裂纹或断裂，增加了铸件变形、跑火、气孔和高密度夹渣缺陷的风险。为改善模组的受力情况，发挥工装的防变形和对模组的保护作用，最大限度减少模组出现裂纹或断裂的风险，提

高铸件的实物质量，设计制造了专用组合工装，防止蜡模在组合及涂料过程中的变形，如图8所示。

3.3 制壳技术

铸件蜡模尺寸大、壁薄、整体强度差，在涂料过程中易发生垮塌或产生微裂纹。脱蜡后在型腔内表面形成飞翅，浇注时卷入金属液中形成夹渣。因此，必须用加固框架增强蜡模组的强度，并且在操作过程中要认真，防止模组发生垮塌或蜡模产生裂纹。

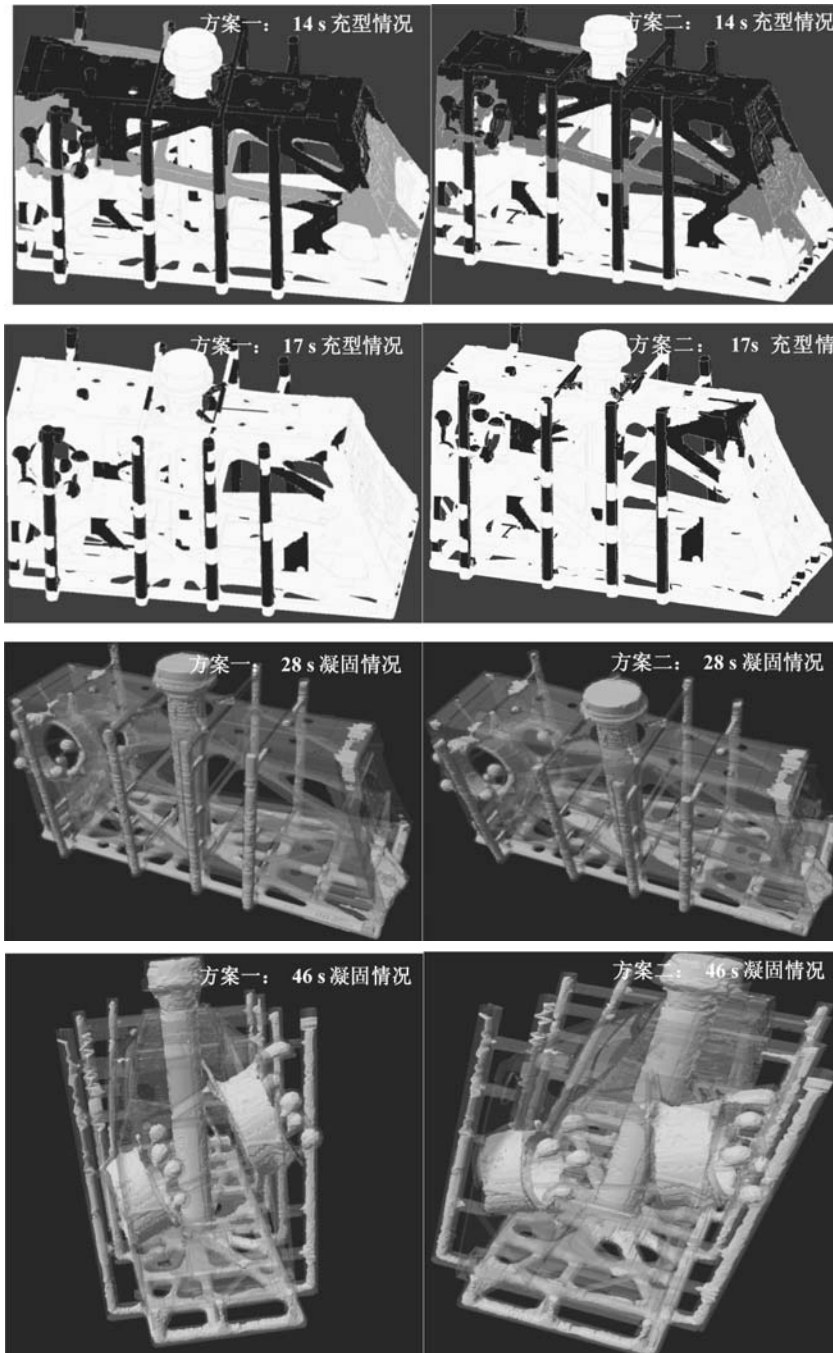


图5 工艺模拟充型和凝固过程

Fig. 5 Simulation of mold filling and solidification processes

3.3.1 制壳操作

由于模组轮廓尺寸超出现有涂料生产机械手的规格限制,只能手工涂料,增加了模组沾浆和撒砂均匀性的难度,涂料工艺稳定性差。为此设计制造了专用涂料吊轴,采用吊车和人工旋转涂料。

3.3.2 制壳工艺材料研究

高密度夹杂和荧光线性显示一直是钛合金铸件的主要缺陷,型壳质量稳定性不高是主要原因之一。为进一步提高钛合金铸件质量,缩短生产周期,采用碱性制壳材料(硅溶胶为主)替代酸性制壳材料(以二醋酸锆为主),型壳经涂料焙烧后,表面质量良好,无表面裂纹和面层脱落现象。经X光透视表明,铸件高密度夹渣缺陷大幅度减少。

3.4 熔化浇注工艺技术研究

正确选择与控制熔炼工艺参数,是保证获得优质铸件的关键环节。由于钛合金是活性金属,熔融状态容易与 N_2 、 O_2 、 H_2 等气体发生反应,因此钛合金熔炼和浇注过程要在真空状态下进行,既防止钛液氧化,又防止合金内的 N_2 、 O_2 、 H_2 含量超出标准要求。

工艺参数确定。

(1) 真空度。防止熔融钛液氧化,选择较高的真空度,真空压力需小于4 Pa。

(2) 电参数。由于铸件轮廓尺寸大、壁厚薄,要得到完整的铸件,需要较高的熔炼温度,对于真空电弧熔炼,在保证电压不能过高的情况下,提高温度的关键是要尽量提高熔炼电流。同时,为使设备熔炼过程处于安全状态,在提高熔炼电流的同时要防止断弧和偏弧。综合上述分析,采用的熔炼电参数为:熔化电压为34~50 V;熔化电流为28 000~32 000 A;熔化量按照模组重量计算。

(3) 离心转速。提高离心转速是大型、薄壁铸件充型的关键,根据理论计算公式为:

$$n=299\sqrt{G/R} \quad (1)$$

式中: n 为离心盘转速(r/min); G 为重力系数; R 为离心盘旋转中心到铸件的最短距离(cm)。考虑铸件结构的特点,计算选用的离心转速为200 r/min。

此外,因铸件外轮廓尺寸较大,制作了专用的装炉箱以保证型壳有足够的强度承受设计转速下的离心力,如图9所示。

3.5 铸件后处理尺寸控制

3.5.1 铸件热处理防变形工装设计

通过对比热等静压前后铸件尺寸发现,铸件经热等静压处理后存在一定的变形量。为此依据铸件在热

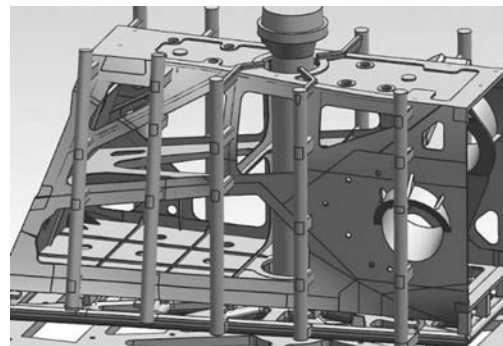


图6 蜡模组合工艺示意图

Fig. 6 Diagram showing wax pattern assembly process

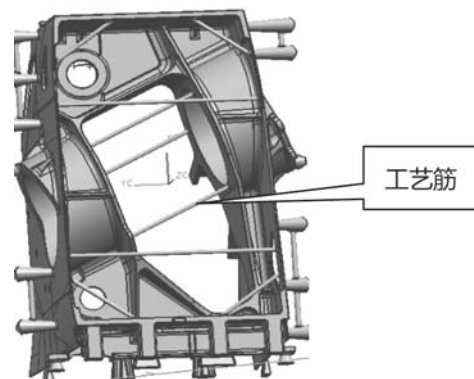


图7 蜡模防变形工艺筋图片

Fig. 7 Process reinforced bar for wax pattern deformation prevention

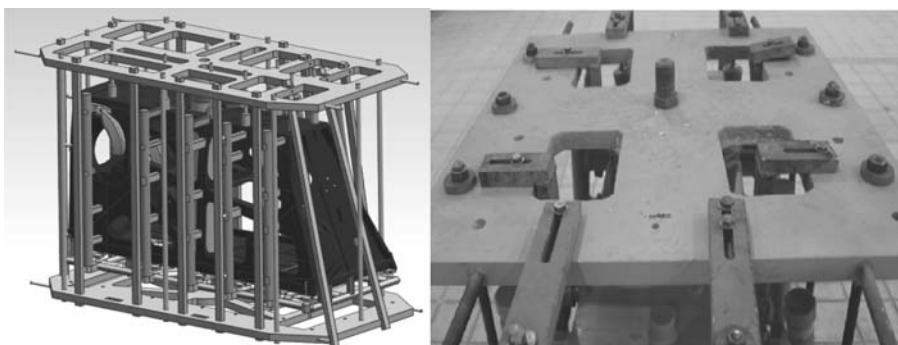


图8 专用组合工装

Fig. 8 Special combination tooling

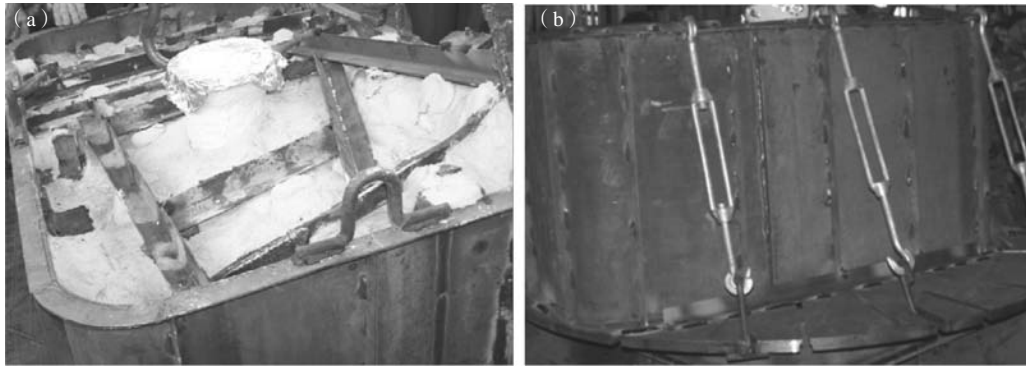


图9 装箱、装炉示意图

Fig. 9 Schematic diagram of packing and furnace loading

等静压过程中的装炉方式，从避免铸件变形考虑，设计了图10所示的热等静压防变形工装。同时为满足现场研制要求，焊接制造了简易热等静压卡板，应用后对铸件防变形起到了一定效果，热等静压后铸件经划线检查曲面偏差能控制在1.5 mm左右。

3.5.2 铸件真空蠕变热矫形工艺优化研究

为了保证铸件变形后的尺寸形状和位置精度，设计制造了热矫形模具，并进行了热矫形工艺实验。在铸件研制中优化了两种整体热矫形工装设计思路，具体见表2中优化方案1和2。

利用优化方案2的矫形模对铸件进行矫形后，铸件经划线检查和三坐标拟合检查后，曲面的尺寸偏差能控制在1.5 mm左右。

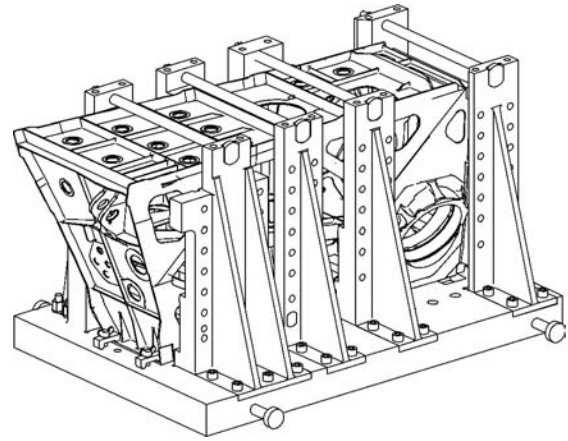
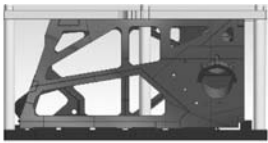
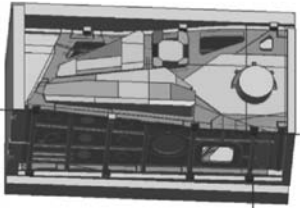
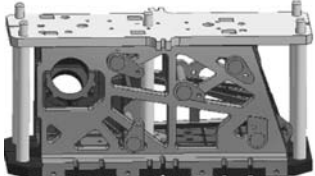


图10 热处理防变形工装

Fig. 10 Deformation prevention tooling for heat treatment

表2 热矫形工艺方案对比

Table 2 Comparison of thermal orthopedic procedures

序号	热矫形方案	优点	缺点	说明
原矫形方案		矫形前装夹容易，对于扭曲变形有一定的矫形效果	矫形时铸件自由度过多，不能同时保证形状和位置公差	只能局部矫形
优化方案1： 整体矫形方案		使零件内腔和外形与模具紧密贴合的矫形方式，矫形后铸件形状和尺寸精度能很好地符合图纸要求	矫形前装模困难	根据零件实际几何形状情况修配模具，保证既不损坏零件又能使变形得以矫正
优化方案2： 螺杆外贴式紧固矫形		在冷态下，用螺杆紧固变形面，使形位公差达到要求，然后以热定型方式矫正	受力集中，矫正应力大	生产效率高

3.6 某钛合金异形结构件研制结果

(1) 对制模、组合、涂料、熔炼浇注、热矫形等铸造过程采取的技术措施有效、可控。

(2) 铸件质量符合GJB2896A之I类B级验收要求、尺寸状态符合HB6103—2004/CT7。经装机试验，满足使用要求。

4 结束语

大型复杂钛合金整体铸件已经成为钛合金熔模铸造的发展趋势，我国相关技术与国外相比仍存在较大差距。为减少质量波动、提高铸件质量，以下铸造关键过程的控制尤为重要：

(1) 确定合理制模参数及蜡模防变形措施是大型复杂钛合金铸件精密铸造尺寸精度控制的关键；采用热矫形对铸件尺寸进行控制是应对大型复杂钛合金铸件精密铸造尺寸变形的重要方法；

(2) 针对大型复杂钛合金铸件，应适当增加离心转速、提高预热温度，在离心半径较小部位及厚大部位加大冒口补缩，能有效提高质量；

(3) 采用计算机模拟优化浇注系统设计，可缩短大型复杂钛合金铸件研制周期，快速提升产品质量。

参考文献：

- [1] 南海, 谢成木. 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.
- [2] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012 (4): 347-356.
- [3] WEI Yameng, HU Kehui, LÜ Zhigang. Effect of SiO₂ concentration in silica sol on interface reaction during titanium alloy investment casting [J]. China Foundry, 2018 (1): 23-30.
- [4] GUO Xin, WEI Yameng, LÜ Zhigang. Reaction of titanium investment castings made by Zr (CH₃COO)₂·Y₂O₃ shell [J]. Rare Metals, 2017 (6): 465-471.
- [5] 宁兆生, 包有宇, 郑松翔, 等. 复杂钛合金阀体的铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2018 (12): 1110-1114.

Investment Casting Technologies for Large Complex Titanium Alloy Parts

RAN Xing^{1,2}, LÜ Zhi-gang^{1,3}, CAO Jian⁴, LI Pei-jie¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, Guizhou, China; 3. State key Laboratory of Tribology, Beijing 100084, China; 4. Guizhou Anji Aviation Investment Casting Co., Ltd., Anshun 561003, Guizhou, China)

Abstract:

The investment casting process of titanium alloys is complicated, and there are many factors affecting casting quality. The investment casting technology of large complex titanium alloys is the frontier technology in the casting industry. In this paper, the domestic development of large complex titanium alloy investment casting technologies is introduced, and the technical difficulties and countermeasures of casting dimensional precision and metallurgical quality control are discussed in detail. Combined with the practice of centrifugal casting of large complex castings, the factors affecting the quality of key processes are analyzed comprehensively, and the methods of improving the dimensional accuracy and metallurgical quality of large complex castings are expounded from the aspects of pattern making, shell building, metal melting and pouring, providing reference for the technological design of investment casting of large complex titanium alloys.

Key words:

titanium alloy; investment casting; centrifugal casting; dimensional accuracy; casting quality