

大型复杂钛合金进气道铸件成形工艺研究

贾志伟^{1,2,3} 殷建锋^{1,2,3} 鞠忠强^{1,2,3} 崔新鹏^{1,2,3} 南海^{1,2,3}
(1.北京航空材料研究院股份有限公司;2.中国航发北京航空材料研究院;
3.北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心)

摘要 通过分析大型复杂钛合金进气道铸件的结构特点、技术要求和技术难点,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。结合 ProCAST 软件进行铸造成形工艺优化,设计了合理的浇注系统,实现了两段分体铸件的铸造完整成形。采用真空电子束整体焊接方法,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,最终生产出长度为 1 260 mm 的进气道钛合金铸件。

关键词 钛合金;进气道;熔模精密铸造;重力浇注;电子束焊接

中图分类号 TG146.23;TG249.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Forming Process of Large-scale Complex Titanium Alloy Air Inlet

Jia Zhiwei^{1,2,3}, Yin Jianfeng^{1,2,3}, Ju Zhongqiang^{1,2,3}, Cui Xinpeng^{1,2,3}, Nan Hai^{1,2,3}

(1.BAIMTEC MATERIAL Co., Ltd.; 2.AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials;

3.Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology)

Abstract: The structural features, technical requirements and technical difficulties of the large-scale complex titanium alloy air inlet were analyzed, and a reasonable casting forming process of “split investment casting+electron beam welding” was designed. The casting process was optimized by the ProCAST software, and the reasonable gating system was designed to realize the complete casting forming of two-stage split castings. Vacuum electron beam welding was utilized to solve the complete forming of large-scale complex casting with three-channel narrow and long internal cavity structure. Finally, the air inlet titanium alloy casting with a length of 1 260 mm was produced successfully.

Key Words: Titanium Alloy, Air Inlet, Investment Casting, Gravity Pouring, Electron Beam Welding

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐高温、耐腐蚀等特点^[1],被广泛应用于航空航天飞行器结构件。为适应高马赫飞行速度,飞行器进气道被设计成异形曲面中空结构,具有轮廓尺寸大、壁厚薄、通道截面形状不规则等结构特点,采用“铸造+焊接+加工”工艺可以制造出大型复杂薄壁的钛合金结构件^[2,3]。

本研究针对大型复杂钛合金进气道铸件的结构特点及技术难点,制定合理的分体设计方案,采用熔模精密铸造+重力浇注工艺方案进行分体铸造成形,采用 ProCAST 软件开展铸件成形工艺设计及优化,结合真空电子束焊接成形技术,研制出尺寸精度满足要求的大型薄壁复杂结构钛合金进气道,为后续生产此类铸件提供参考。

1 产品结构及工艺方案

1.1 产品结构特点及技术要求

进气道铸件采用 ZTA15 钛合金,其化学成分及力学性能分别见表 1 和表 2^[4]。图 1 为进气道铸件的示意图。其轮廓尺寸为 1 260 mm×335 mm×130 mm,质量为 46.2 kg,其结构为三通道狭长空腔结构,结构复

表 1 ZTA15 钛合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZTA15 titanium alloy										%
w _B										
Al	V	Zr	Mo	Si	Fe	C	N	O	H	Ti
5.5~6.8	0.8~2.5	1.5~2.5	0.5~2.0	≤0.15	≤0.30	≤0.13	≤0.05	≤0.16	≤0.01	余量

收稿日期:2022-03-09;修改稿收到日期:2022-06-17
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300)
第一作者简介:贾志伟,男,1982 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail:jiazhawei2022@163.com
引用格式:贾志伟,殷建锋,鞠忠强,等. 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, et al. Forming process of large-scale complex titanium alloy air inlet[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4): 570-574.

表 2 铸件室温和高温力学性能要求

Tab.2 Mechanical properties of castings at room and high temperature

温度/℃	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%
25	≥885	≥785	≥5	≥12
400	≥622	—	≥10	—

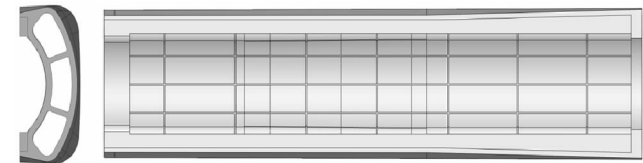


图 1 进气道铸件示意图

Fig.1 Schematic diagram of air inlet casting

杂,外型面为渐变壁厚的扇形曲面,内腔通过两个 3.0 mm厚的隔板贯穿整体形成 3 个通道,每个通道最小截面尺寸约为 97 mm×52 mm,网格面上的壁厚为 3.0 mm。

1.2 技术难点

进气道铸件扇形曲面的外型面和两端口部为机加工面,网格面和内腔通道为非加工面,由铸造来保证。由于铸件长高比大(9.5 : 1),最小壁厚薄(3.0 mm),不利于铸件完整成形,长度方向上易发生弯曲变形;通道截面的壁厚突变大,最大壁厚达 41 mm,容易形成缩孔、缩松。除此之外,三通道内腔狭长,铸件长度方向上的中间位置若产生铸造缺陷,将会导致无损检测及内腔缺陷修复困难极大。

1.3 工艺方案的选择

因进气道铸件结构复杂、壁薄以及尺寸精度等级高,同时为满足内腔流道气体流通顺畅的工况,保证内腔表面粗糙度小于 6.3 μm,采用熔模铸造成形。若采用整体铸造完整成形工艺,由于内腔通道狭窄,金属型模具抽芯困难且壁厚均匀性差,型壳内腔干燥困难,易产生鼓胀,通道内的缺陷难以检测和修复;铸件易弯曲变形,经综合分析,将进气道铸件采用分体铸造+焊接的方式来成形。

2 工艺设计及优化

2.1 分体设计与收缩率的设置

为便于进气道铸造成形、无损检测及尺寸控制,将铸件分为前段 460 mm 和后段 800 mm 两部分,见图 2。钛合金铸件线收缩率的准确度直接关系到铸件的尺寸精度,线收缩受合金成分、铸型材料和铸型类型以及铸件结构影响^[5]。综合考虑蜡模收缩、铸型的阻碍以及合金成分等因素,结合铸件实际的结构和尺寸,拟定两段铸件的 X(长度)、Y(宽度)和 Z(高度)方向收缩率分别

定为 1.0%、1.2% 和 1.5%。

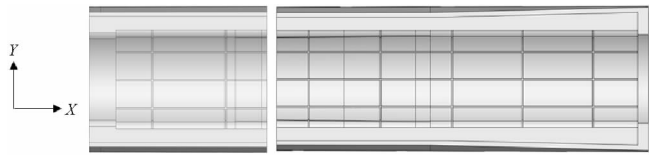


图 2 分段铸件示意图

Fig.2 Schematic diagram of segmented castings

2.2 数值模拟分析及优化

2.2.1 模拟工艺参数

采用 ProCAST 软件对铸件充型、凝固过程进行模拟,分析铸件模拟成形品质和缩孔。依据铸造工艺方案,制定模拟仿真主要参数见表 3^[5]。

表 3 模拟仿真参数

Tab.3 Simulation processing parameters

材料	浇注温度/℃	液相线温度/℃	固相线温度/℃	浇注时间/s	型壳厚度/mm	型壳温度/℃	浇注方式
ZTA15	1 720	1 659	1 620	6.5	15	250	重力浇注

2.2.2 铸件凝固热节模拟分析

根据铸件壁厚大、轮廓尺寸要求高等特点,对铸件进行无浇注系统的凝固热节模拟分析,以确定铸件凝固热节部位,其模拟结果见图 3。结果表明,前段和后段铸件的扇形曲面上下部位均存在长条状的孤立液相区(灰色区域),这些部位若得不到足够的金属液补缩,极易产生缩孔、缩松缺陷,导致铸件热等静压后形成压坑,增加铸件表面补焊修复量和修复难度,进而影响铸件内腔表面品质,因此在浇注系统设计时需要重点关注。

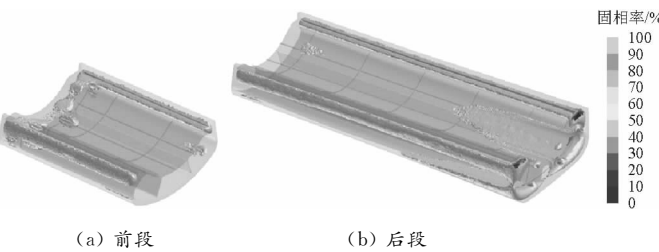


图 3 铸件凝固热节

Fig.3 Solidification hot spots of castings

2.2.3 铸造成形设计及模拟优化

铸件的浇注系统设计是关系到铸件品质的关键环节^[6]。依据铸件凝固热节模拟结果,结合铸件结构特点和技术难点,制定进气道铸件的浇注系统和组模工艺方案,模拟铸件金属液充型过程,分析缩孔分布,并制定工艺方案迭代优化,以对缩孔进行有效补缩。

为保证铸件三通道狭长内腔的型壳通风干燥,采用底注式浇注系统,将蜡模平躺组焊于横浇道上并设置合理的浇冒口;同时将蜡模倾斜一定的角度,保证金属液充型平稳,实现顺序凝固和排气通畅,避免产生大面积

气孔。以后段为例(前段组模方案与后段相同),铸件组模工艺方案见图 4。扇形曲面上部设置 12 个冒口,下部设置 18 个浇口。

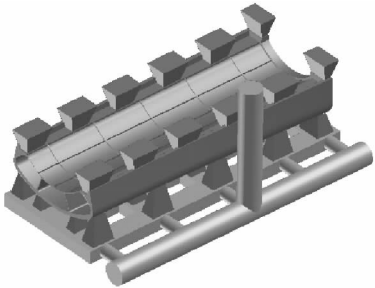


图 4 铸件组模方案
Fig.4 Modular scheme of casting

图 5 为铸件充型过程模拟结果。可以看出,充型开

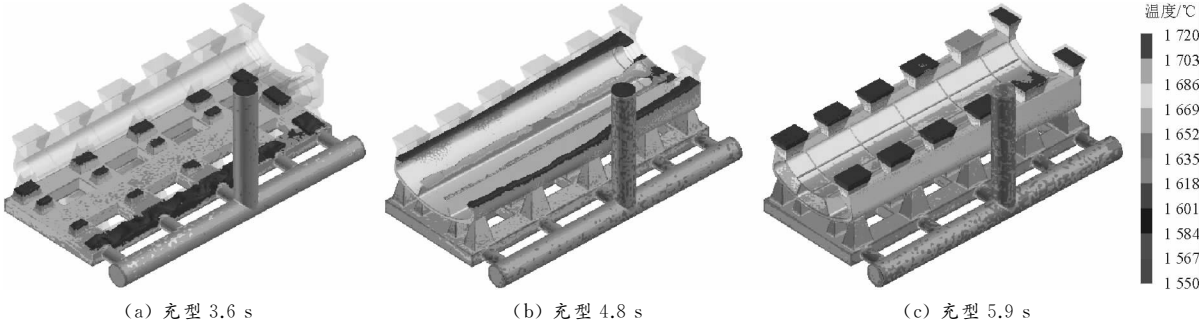


图 5 铸件充型过程
Fig.5 Filling process of casting

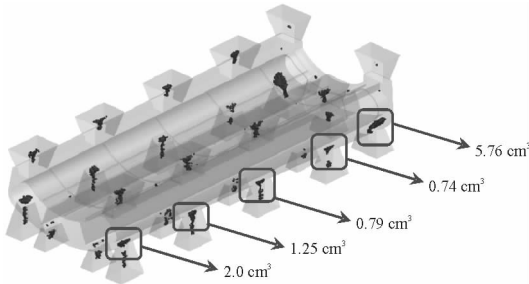


图 6 铸件缩孔分布
Fig.6 Shrinkage porosity distribution of casting

图 7 为铸件浇冒口位置的温度场分布情况。可以看出,扇形曲面两外侧面的浇口和冒口之间存在颈缩,该部位的温度约为 1 550 ℃,且低于固相线温度(1 620 ℃),而浇口与铸件连接根部的温度高于固相线温度,两

者的温度差高达 100 ℃,颈缩部位率先凝固,堵塞了补缩通道,导致浇口根部形成缩孔。

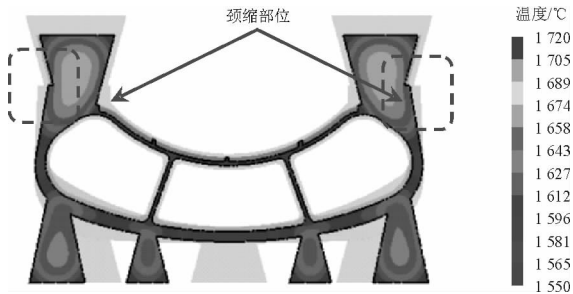


图 7 浇冒口位置的温度场分布
Fig.7 Temperature field distribution at riser position

为此,针对颈缩部位进行工艺优化,在扇形曲面两侧面增加5处弯形侧冒口。图8为浇口与铸件连接根

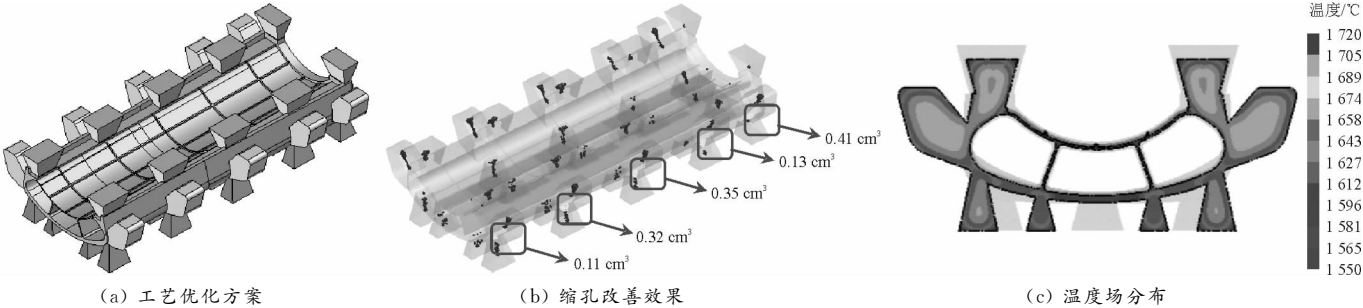


图 8 工艺优化方案、缩孔改善结果及温度场分布

Fig.8 Process optimization scheme, results of shrinkage improvement and temperature field distribution

部的工艺改进方案、缩孔改善效果及温度场分布情况。可以看出,在浇口根部附近采用弯形侧冒口,增大了浇口根部的补缩通道,缩孔大小明显改善(见图 8b),最大缩孔体积由改进前的最大 5.76 cm³降低至0.41 cm³,这样的小缩孔经过热等静压完全可以压扁愈合,不会在铸件通道内腔表面形成凹坑。

2.3 真空电子束焊接

由于分段铸件对接型面最大壁厚突变区的壁厚为 41 mm,壁厚突变非常大,见图 9,若整个对接型面完全采用真空氩弧焊接方法进行对接焊,焊接量大,铸件变形严重。真空电子束焊接技术具有高真空度、高能量密度、穿透能力强、焊接速度快、易于实现计算机控制等优点,可达到焊接结构焊缝深宽比大、热影响区小、焊接变形小,实现接头成形性及品质良好^[8-9]。因此,根据对接型面的结构特点,扇形曲面设计渐变的壁厚曲面,采用真空电子束焊接方法进行焊接,实现分段铸件焊接完整成形。

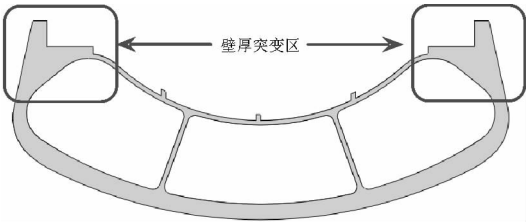


图 9 最大壁厚突变区

Fig.9 Mutation region of maximum wall thickness

针对对接型面的结构特点,设计了对接型面的电子束焊接工艺方案,见图 10。对接型面的壁厚由 3 mm 渐变至 6 mm,再由 6 mm 渐变至 10 mm。该设计具有壁厚突变小,电子束焊接电流均匀,焊缝高度控制均匀的特点。在前段和后段进行真空电子束焊接前,机加工两段铸件的对接型面,保证对接型面的尺寸精度。除此之外,设计并制作对接型面的工艺试验件,摸索焊接工艺参数,基于试验件内外型面的焊缝品质,选择合理的焊接工艺参数,图 11 为试验件焊缝照片。

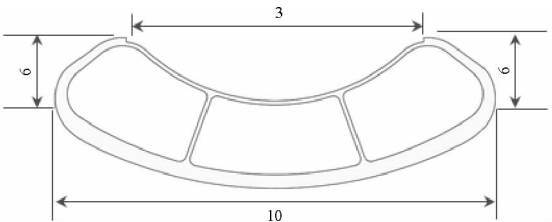


图 10 电子束焊接工艺方案

Fig.10 Scheme of electron beam welding



(a) 侧面 (b) 竖直面

图 11 试验件接焊缝照片

Fig.11 Images of welding beam in test piece

3 生产验证

采用熔模精密铸造+重力浇注方法进行浇注,铸件成形完整,无鼓胀、掉砂、粘砂等缺陷。经 X 射线检测,铸件凝固热节部位的缩孔明显降低,通过在颈缩部位增加弯形冒口,基本消除了浇口根部的缩孔,检测结果与数值模拟分析一致。采用 GOM 蓝光扫描设备对铸件尺寸进行分析,发现前段和后段铸件的收缩率符合设计要求。

图 12 为前段和后段铸件电子束焊接后的照片。可以看出,电子束焊缝高度为 1.0~2.0 mm,铸件尺寸经扫描,整体焊接变形量≤0.5 mm。前段和后段铸件采用真空电子束焊接后,形成完整的进气道铸件,通过精整打磨后铸件内外型面的焊缝余高光滑平整,经 X 射线和荧光检测结果合格。经过尺寸扫描检测,进气道铸件整体轮廓度控制在±0.6 mm 内,其余尺寸也符合铸件的精度要求。铸件化学成分和力学性能符合技术要求,见表 4 和表 5。



(a) 正面 (b) 反面

图 12 铸件电子束焊缝照片

Fig.12 Electron beam welding images of the casting

表 4 铸件化学成分检测结果

Tab.4 Chemical composition results of the casting %										
w _B										
Al	V	Zr	Mo	Si	Fe	C	N	O	H	Ti
6.56	2.29	2.30	1.88	0.02	0.04	≤0.02	≤0.014	≤0.013	≤0.005	余量

表 5 铸件室温和高温力学性能结果

Tab.5 Mechanical properties of the casting at room and high temperature				
温度/ °C	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩率/ %
25	950	860	11.5	15.5
400	662	498	15.5	37.0

消失模铸造球铁轮毂的工艺设计

梁守友

(安徽全柴天和机械有限公司实型铸造厂)

摘要 消失模铸造 QT500-7 球铁轮毂因壁厚大,在铸造过程中易出现缩松、缩孔等缺陷。通过对铸件结构分析,在其易出现缩松、缩孔部位,通过调整进浇方式和浇注工艺优化,确保达到客户要求。同时,通过成分控制实现硬度、伸长率等性能的保证。

关键词 球铁; 厚度; 缩松缩孔; 性能

中图分类号 TG142; TG249.6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Process Design of Ductile Iron Hub by Lost Foam Casting

Liang Shouyou

(Anhui Quanchai Power Co., Ltd. Real Casting Factory)

Abstract: Due to the thickness of QT500-7 ductile iron hub by lost foam casting, casting defects including shrinkages and cavities are prone to occur during the casting process. Through the analysis of the product structure, targeted optimization was carried out at the positions prone to shrinkages and cavities to meet customer requirements. Meanwhile, hardness, elongation and other performance were guaranteed through composition control.

Key Words: Ductile Iron, Thickness, Shrinkage and Cavity, Performance

某轮毂铸件材质为 QT500-7 球铁,经正火与回火处理,其硬度(HB)要求为 170~230,铸件平均壁厚为 12 mm,质量为 120 kg,轮廓尺寸为 $\phi 556\text{ mm} \times 414.5\text{ mm}$,见图 1。轮毂铸件不得有缩松、缩孔等缺陷。该铸件先前采用砂型铸造,由于废品率高、效率低、成本高,现改用消失模铸造。

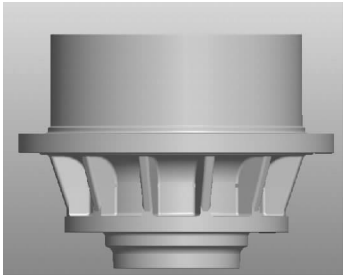


图 1 轮毂结构

Fig.1 Structure of hub

收稿日期:2022-04-09;**修改稿收到日期:**2022-05-12

作者简介:梁守友,男,1964 年出生,高级工程师,安徽滁州(239500),E-mail:15855078072@163.com

引用格式:梁守友.消失模铸造球铁轮毂的工艺设计[J].特种铸造及有色合金,2023,43(4):574-576.

LIANG S Y. Process design of ductile iron hub by lost foam casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):574-576.

4 结 论

(1)基于进气道钛合金铸件的结构特点、技术难点,确定了铸件分体设计及铸造工艺方案,结合 ProCAST 软件分析铸件凝固热节,设计合理的浇注系统并对浇冒系统进行优化,模拟结果与实际情况相一致,实现了两段分体铸件的铸造完整成形。

(2)进气道铸件采用分段熔模精密铸造+重力浇注+电子束焊接的工艺方案,成功研制出长度为 1 260 mm 的大型薄壁复杂异形曲面狭长三通道结构钛合金结构件。

参 考 文 献

[1] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.

[2] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究[J]. 飞航导弹, 2002(7): 50-60.
[3] 彭瑾, 徐兴柱, 蓝仁恩. 巡航导弹中金属结构材料的应用[J]. 飞航导弹, 2008(9): 54-58.
[4] 黄旭, 朱知寿, 王红红. 先进航空钛合金材料与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2012.
[5] 李锋, 崔新鹏, 南海. 基于 ProCAST 某环形钛合金铸件仿真分析及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 469-1 472.
[6] 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, 67 (12): 1 110-1 114.
[7] 肖树龙, 陈玉勇, 朱洪艳, 等. 大型复杂薄壁钛合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 678-681.
[8] 高奇, 廖志谦, 蒋鹏, 等. 大厚度钛合金的电子束焊接技术研究现状[J]. 材料开发与应用, 2018, 33(2): 118-128.
[9] 孙文君, 王善林, 陈玉华, 等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(18): 63-72.

(编辑:刘卫)