

高承压泵体粉末冶金包套型芯铸造工艺研究

史 昆¹, 鲁玲玲², 赵 军¹, 曲赫威¹, 倪 嘉¹, 宁兆生¹, 王彦鹏¹, 包宪宇¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 10022;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: Inconel718合金高承压泵体是某航天发动机中的关键部件, 采用热等静压粉末冶金工艺整体成形方法制备。该高承压泵体存在复杂变曲面流道, 流道最窄处仅7 mm, 泵体叶片最薄处仅1 mm, 对内部质量、表面质量、尺寸精度要求较高。采用数控加工中心加工锻料的方法制备高承压泵体粉末构件成形用的复杂变曲面流道型芯, 加工难度大、成本高、周期长, 不利于低成本快速批量生产。本文根据型芯结构特点和质量要求, 通过研究精密铸造工艺方法, 选用熔模铸造工艺进行型芯制备, 大幅度降低了生产成本, 提高了生产效率。

关键词: 精密铸造; 型芯; 高温合金; 粉末冶金

Inconel718高温合金广泛应用于航空、航天领域, 属于镍基高温合金, 主要以奥氏体为基体, 以 γ' 相为主要强化相, 辅以 γ 相强化的沉淀强化型合金, 能够在-253~650℃温度范围内和较大复杂应力工况下长期工作^[1]。该合金凝固温度范围宽、合金化程度高, 在精密铸造过程中, 不仅存在大量微观疏松, 而且Nb、Mo等元素容易存在偏析, 易产生Laves、 δ 等脆性相, 严重恶化铸件的力学性能。

1 铸件简介

高承压泵体是某航天发动机中的关键部件(图1), 其结构复杂, 泵体流道存在变曲面结构和薄壁叶片, 最窄处仅7 mm, 泵体叶片最薄处仅1 mm, 在-183℃液氧环境下工作, 需要承压20 MPa, 质量要求达到GJB2896A—2007规定的I类B级。如果采用传统的熔模精密铸造方法制备, 容易在薄壁处出现大量疏松等缺陷, 打压过程会发生泄漏, 出现严重的安全事故。

粉末冶金工艺是一种利用金属(或非金属)粉末制备材料的常用方法, 该方法可生产大块材料和一定形状的近无余量零件。相对于传统的铸造方法而言, 粉末冶金的原材料利用率很高(达95%), 在零部件制造和材料合成方面具有可近净成形、材料显微组织细小、成分均匀、所制备材料的综合性能好等优点, 在材料领域得到了广泛的应用^[2]。

由于粉末冶金可以制备出性能优良的零部件产品, 因此该高承压泵体可以采用粉末冶金工艺进行整体制备。但是粉末冶金包套型芯一般采用锻料数控加工。通过对型芯结构进行分析, 发现型芯存在变曲面结构和薄壁窄腔结构, 最窄处仅1 mm。型芯如果采用数控加工方法加工, 复杂变曲面结构和窄腔道加工难度大, 成本高, 加工周期长, 无法满足该构件的低成本快速制备要求。

本实验主要通过研究高承压泵体粉末冶金包套流道型芯的整体熔模精密铸造工艺, 通过设计合理的浇注系统, 采用合理的制壳工艺和熔炼浇注工艺, 低成本快速生产出质量合格的粉末冶金包套型芯。

2 试验材料及方法

高承压泵体粉末冶金包套型芯所用材料为0Cr18Ni9Ti合金, 具有好的铸造性

作者简介:

史 昆(1982-), 男, 高工, 主要从事钛合金及高温合金材料及精密成形工艺研究。E-mail: shikun77@163.com

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

06-0636-04

基金项目:

辽宁省科学技术计划项目(2018304027); “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项子课题项目(2018ZX04044001); 国家重点研发计划项目(2016YFF0202101-02)。

收稿日期:

2020-02-27 收到初稿,

2020-03-19 收到修订稿。

能、高温强度、组织稳定性。试验所用母合金采用三室半连续真空感应炉进行熔炼,该母合金的化学成分(表1)满足技术条件要求。采用3D打印的光敏树脂制备蜡模,蜡模检验合格后拼接浇注系统,然后制作型壳,型壳的面层采用硅溶胶和刚玉粉进行涂挂2层,背

层采用硅溶胶和莫来石粉涂挂5层,型壳干燥后进行脱蜡和焙烧处理。采用三室半连续真空感应炉进行重熔母合金并浇注。铸件经切割、打磨、抛光处理后,用于后续粉末冶金成形的包套焊接和封装。

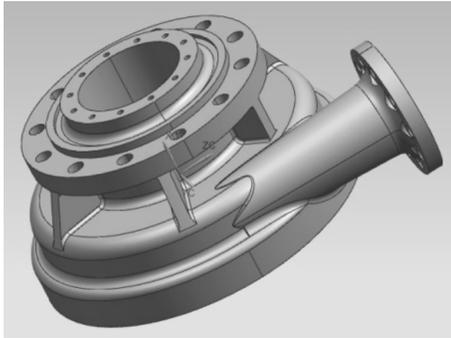


图1 零件三维模型示意图

Fig. 1 Three dimensional model of high pressure pump body

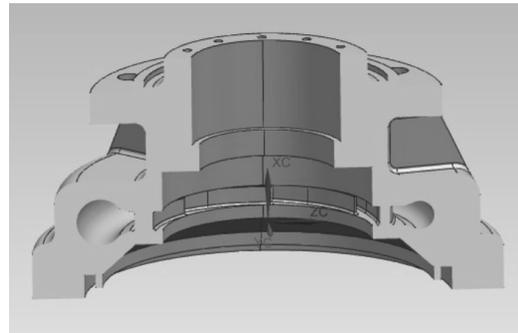


图2 零件流道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flow channel

表1 0Cr18Ni9Ti合金母合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 0Cr18Ni9Ti alloy master alloy

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Fe
标准要求	≤0.08	≤1.5	0.8~2.0	17.0~20.0	8.0~11.0	5×C~0.7	≤0.03	≤0.04	余量
母合金成分	0.05	0.42	1.31	18.10	8.77	0.56	0.001	0.019	余量

2.1 光敏树脂蜡模制备

高承压泵体复杂曲面流道型芯,结构复杂,对表面质量和尺寸精度要求很高,通常制备型芯成形用金属模具,然后利用模具制备出型芯蜡模,再进行制壳和浇注,虽然尺寸精度可以达到CT6~CT7级,表面粗糙度可以达到 $R_a 3.2 \sim R_a 6.3 \mu\text{m}$,但是模具制备时间长、成本高,无法快速低成本制备型芯。通过分析型芯结构特点和质量要求,该型芯蜡模采用中瑞科技ISLA1600D光固化3D打印机进行制备,型芯蜡模结构如图3所示。

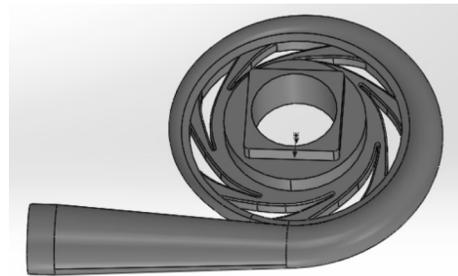
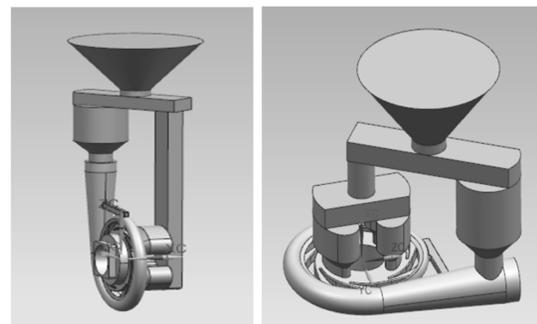


图3 型芯模样

Fig. 3 Core pattern

2.2 浇注系统设计及优化

根据型芯结构特点和相关铸造经验,该型芯属于复杂螺旋曲面窄腔道结构,一般采用顶注配合辅助浇口,这种浇注系统可以保证钢液在型芯各个部位都能进行均匀补缩,避免某个热节处出现补缩不充分,内部出现大的缩孔缺陷。为了使浇注系统设计得更合理,本文设计了两种浇注系统,并运用Procast模拟软件进行了模拟研究。具体浇注工艺设计见图5~6,模拟结果见图7~8。通过对图7和图8模拟结果分析,可以看到图7所示浇注系统A和图8所示浇注系统B补缩都比较充分,铸件内部均没有缺陷,缺陷集中于冒口处。根据投料量和制壳难度,认为浇注系统A方案型壳制备操作方便,综合成本更低,因此按照浇注系统A方案进行蜡模组树和后续浇注。



(a) 方案A

(b) 方案B

图4 浇注系统

Fig. 4 Pouring system of core casting

2.3 复杂曲面流道型芯制壳工艺

复杂曲面流道金属型芯熔模精密铸造工艺(表2)采用刚玉粉面层陶瓷型壳材料,粘结剂选用硅溶胶。背层材料采用莫来石粉和硅溶胶浆料,莫来石砂进行型壳涂挂。由于制壳材料来源广泛,价格低廉,可以控制生产成本。型壳制备完成后厚度约为 (10 ± 2) mm。

2.4 铸件浇注

浇注采用真空感应炉进行熔炼浇注,母合金铸锭尺寸为 $\Phi 70$ mm \times 500 mm,铸锭表面打磨到金属光

泽,并用酒精清洗干净。铸件浇注工艺参数:真空度 $\leq 1 \times 10^{-2}$ Pa,型壳浇注温度 $950 \sim 1\ 000$ °C,金属熔炼浇注温度 $1\ 350$ °C,浇注完成型壳冷却30 min出炉。

3 型芯铸件表面处理

3.1 型芯铸件喷砂处理

金属型芯采用干喷砂设备进行表面清理,主要采用刚玉砂进行表面喷砂处理,将氧化层去除干净,具体喷砂工艺见表3所示。

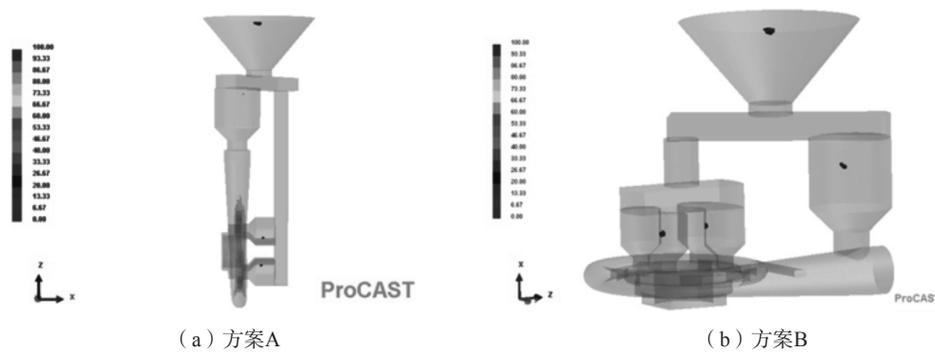


图5 模拟结果

Fig. 5 Simulation results

表2 型芯制壳工艺

Table 2 Core shell making process

涂料 层次	涂料 种类	涂料粘度 /s	撒砂/目	干燥			
				温度/°C	风速/($m \cdot min^{-1}$)	相对湿度/RH	时间/h
面1	刚玉粉	20~30	刚玉砂 80~120	22~24	240~300	50~70	8~12
面2	刚玉粉	10~15	刚玉砂 40~80	22~24	240~300	50~70	8~12
背3~背5	莫来石粉	8~10	莫来石砂 30~60	22~24	240~300	40~50	8~12
封浆层	浸硅溶胶溶液						12~24

3.2 型芯抛光处理

浇注完成并抛光后的金属型芯(图10),抛光后型芯表面粗糙度达到 $R_a 4.0 \mu m$ 。

4 型芯铸件质量分析

铸件经过清理打磨和抛光后,通过目视和荧光检查,表面无裂纹、冷隔等缺陷。铸件表面经过粗糙度仪器检测可以达到 $R_a 4.0 \mu m$,能满足粉末冶金包套型芯质量要求。铸件内部质量,型芯铸件经过X射线探伤检测,可以达到GJB2896A—2007规定I类B级标准。铸件化学成分和力学性能,型芯铸件浇注完成后,经过附铸试样取样化验成分,成分合格,详见表4所示。力学性能合格,详见表5所示。型芯铸件尺寸合格,达到GB/T6414—1999铸件尺寸公差与机械加工余量标准中规定的CT6级尺寸精度要求。

表3 喷砂处理工艺

Table 3 Sand blasting process

项目	材料	粒度/mm	喷砂压力/MPa	喷砂时间/min
第1遍	棕刚玉	0.8~1.2	5	5~10
第2遍	白刚玉	0.5~0.8	4	5~10
第3遍	玻璃微珠	0.2~0.5	2	5~10



图6 型芯铸件

Fig. 6 Core casting

表4 芯铸件化学成分
Table 4 Chemical composition of core casting

项目	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S	P	Fe
标准要求	≤0.08	≤1.5	0.8~2.0	17.0~20.0	8.0~11.0	5×C~0.7	≤0.03	≤0.04	余量
母合金成分	0.03	0.35	1.30	18.00	9.00	0.60	0.001	0.018	余量

表5 铸件力学性能
Table 5 Mechanical properties of core casting

项目	R_m /MPa	A %
标准要求	≥450	≥25
实测值1	555	51
实测值2	553	54

5 结束语

采用熔模精密铸造工艺制备复杂流道金属型芯, 型芯制备快速、工艺简单, 型芯表面粗糙度能达到 $R_a 4.0 \mu m$, 尺寸精度能达到GB/T6414—1999铸件尺寸公差与机械加工余量标准中规定的CT6级尺寸精度要求。型芯内部质量和表面质量能达到GJB2896A—2007规定 I 类B级标准。型芯化学成分和力学性能合格, 型芯整体性能符合粉末冶金包套使用要求, 能实现低成本、快速、高质量包套型芯制备, 具有较好的工艺技术推广前景, 能为降低复杂结构粉末冶金包套制备成本提供一种可行的工艺方法。

参考文献:

- [1] 凌李石保, 韩延峰, 王俊, 等. 热处理对热等静压K4169合金组织及高温持久性的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(10): 1013-1018.
- [2] 李嘉荣. 先进高温结构材料与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.

Casting Technology of Powder Metallurgy Canned Core of High Pressure Pump Body

SHI Kun¹, LU Ling-ling², ZHAO Jun¹, QU He-wei¹, NI Jia¹, NING Zhao-sheng¹, WANG Yan-peng¹, BAO Xian-yu¹

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. China Aviation Development Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

Inconel 718 alloy high pressure pump body is a key part of space engine. It is usually made by hot isostatic pressing powder metallurgy process and integral forming method. At the area of complex curved flow channel in the high pressure pump body, the narrowest part of the flow channel is only 7 mm and the thinnest part of pump blade is only 1 mm. It has high requirements for internal quality, surface quality and dimensional accuracy. It is very difficult to use CNC machining center to machine forge piece into complex curved channel core for powder member forming of high pressure pump body. This method has high cost and long cycle, so it is not suitable for low cost and rapid batch production. In this study, according to the core structure characteristics and quality requirements, core castings were successfully prepared by using investment precision casting technology. Therefore, the production cost of high pressure pump body is greatly reduced and the production efficiency is also improved.

Key words:

precision casting; core; superalloy; powder metallurgy