

大型钛合金泵体的特种砂型铸造工艺研究

肖强伟^{1,2,3}, 范世玺^{1,2}, 纪志军^{1,3}, 王德季², 张元光², 南海^{1,3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 北京百慕航材科技股份有限公司, 北京 100094; 3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100094)

摘要: **目的** 以大型钛合金泵体为研究对象, 研究特种砂型铸造工艺。**方法** 采用铝制模具, 以铝矾土混合物为填料进行造型, 氧化钇料浆为面层涂料, 经高温烧结后制备成大型钛合金泵体铸造用特种砂型铸型, 在真空自耗凝壳炉中进行熔炼浇注, 并对铸件外观、冶金质量、成分性能及尺寸进行检验测试。**结果** 用该铸造工艺研制的大型钛合金泵体铸件成型完整, 铸件表面光洁度可达到 6.3 μm ; 铸件的化学成分和力学性能可以满足 ASTM B367 中 C3 的指标要求; 经热等静压后铸件内部质量达到了 ASME 1320 中 7 级; 荧光检测结果满足 ASME B16.34 中的标准, 铸件尺寸精度可到达 CT9 级的要求。**结论** 铸件检测结果表明, 该特种砂型铸造工艺可以实现大型钛合金铸件的制造。

关键词: 钛合金; 特种砂型铸造; 大型铸件; 力学性能; 尺寸检查

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.03.011

中图分类号: TG249.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)03-0060-05

Special Sand Casting Process of Large Titanium Alloy Pump Body

XIAO Qiang-wei^{1,2,3}, FAN Shi-xi^{1,2}, JI Zhi-jun^{1,3}, WANG De-ji², ZHANG Yuan-guang², NAN Hai^{1,3}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: A large titanium alloy pump body was taken as the object to study the special sand casting process. With bauxite as filler and yttrium oxide plaster as primary layer coating, aluminum mold was used to cast large titanium alloy pump body with special sand after high sintering. The casting was formed in a vacuum consumable furnace. The surface quality, metallurgical quality, chemical composition, mechanical properties and dimension were tested. The results show that, the large titanium alloy pump body casting developed by the casting process was complete in forming and the smoothness of casting surface could reach $Ra6.3 \mu\text{m}$; the chemical composition and mechanical properties of the casting could meet requirements of C3 level in ASTM B367. After HIP, the internal quality could meet the requirements of ASME 1320 Class 7; FPI results could meet the requirements of the ASME B16.34; the casting dimension accuracy could reach CT9. It shows that the special sand mold casting process can realize manufacturing of large casting titanium alloy pump body.

KEY WORDS: titanium alloy; special sand casting; large casting; mechanical properties; dimensional inspection

钛合金因具有低密度、高比强度、耐腐蚀、热导率低、无毒无磁、可焊性、生物相容性好、线膨胀系数小等特性, 是一种轻质高强度耐腐结构材料, 在航空航天

领域中具有广泛的应用前景, 并已经广泛应用于化工、石油、电力、医疗、建筑、体育用品等领域^[1-5], 然而钛合金的制备成本高也是制约其进一步扩大应用的

收稿日期: 2018-04-08

作者简介: 肖强伟(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钛及钛合金铸造。

重要障碍,无余量和近无余量铸造成型技术不仅可以实现钛合金短流程制备,还可以最大限度地降低材料的使用,是降低钛合金制备成本的重要途径之一,尤其适合于结构复杂的构件^[6-7]。

常规的钛合金铸造方法有熔模精密铸造、机加石墨型铸造和金属型铸造。熔模精密铸造生产的钛合金铸件表面粗糙度好,尺寸精度高,但制备成本高且对一些大型铸件生产难度大。石墨具有较好的热化学稳定性以及较高的耐火度,对熔融钛具有很好的润湿性,有利于轮廓清晰的铸件,但由于石墨型的强度高、激冷能力强,铸件表面容易出现微裂纹^[8-10],不适合薄壁件和具有复杂内腔的铸件。金属型模具由于可以多次反复利用,生产周期短且铸件表面精度高,为中小型钛合金铸件的批量生产提供了保证,然而金属型使用寿命较低,而且也具有较强的激冷能力,容易在铸件表面产生冷隔、流痕等缺陷^[11-12]。上述 3 种铸造方法的铸型的制作工序较繁琐、周期较长或成本高,在一定程度上限制了钛合金铸件的推广和广泛应用,研究新的铸型工艺,降低铸件成本是钛铸件今后发展的方向^[13]。

从钛合金铸造的生产工艺方法来看,砂型铸造成

本低,生产灵活性大,为一些中、大型钛合金构件提供了很好的解决方案^[14]。目前国内外钛合金砂型铸造相关的研究资料较少,使用的铸型材料主要是以锆英砂、镁橄榄石等为主,材料成本较高^[15],无法满足规模生产需要。

文中以某大型泵体铸件为研究对象,介绍了钛合金特种砂型铸造工艺过程,并对铸件的质量进行了检测分析,为钛合金特种砂型铸造技术应用提供参考。

1 泵体铸造工艺

1.1 泵体铸件简介

国外某化工用钛合金泵体铸件见图 1,铸件轮廓尺寸为 1200 mm×660 mm×390 mm,最小壁厚为 8 mm,质量为 115 kg,铸件材质为 C3。要求化学成分和力学性能满足 ASTM B367 中 C3 的要求,具体指标见表 1 和表 2,铸件内部冶金质量满足 ASME 1320 中 7 级标准,铸件表面质量满足 ASME B16.34 中关于表面质量的要求,粗糙度 6.3 μm 以下,尺寸等级按 GB/T 6414 中 CT9 级要求执行。

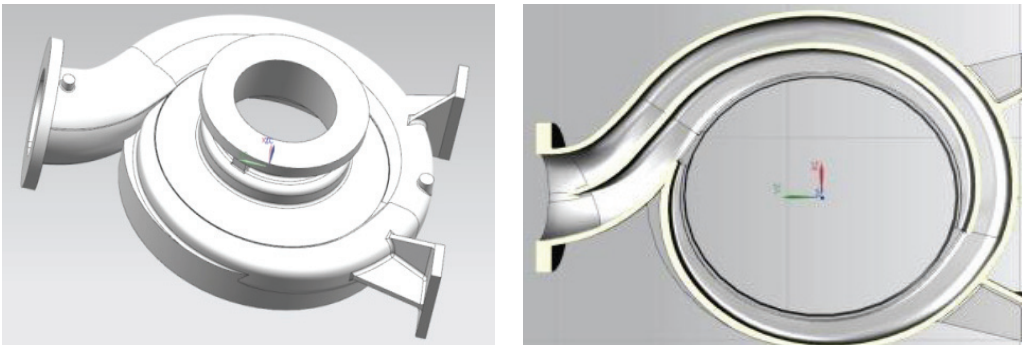


图 1 泵体铸件轮廓
Fig.1 Outline of pump body casting

表 1 铸件的标准化学成分(质量分数)
Tab.1 Standard chemical composition of casting %

Ti	Fe	C	N	H	O	其他杂质
余量	<0.25	<0.1	<0.05	<0.015	<0.4	<0.4

表 2 铸件的力学性能标准
Tab.2 Standard mechanical properties of casting

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
≥450	≥380	12

1.2 泵体工艺设计

该泵体为大型钛合金民用铸件,对成本和周期要求严格。综合考虑,该钛合金泵体铸件采用特种砂型铸造工艺,静止浇注进行研制。

根据钛合金特种砂型铸造的收缩特点和以往经

验,铸件的缩尺在 1.0%~2.0%,拔模斜度≤2°,工艺补正量为单边 0.5~2 mm。泵体的浇注系统设计见图 2。铸件水平放置进行浇注,共设置 4 个冒口,中心部位法兰端面设置环形冒口 1,泵体支座顶部位置设置冒口 2 和冒口 3,在泵体进口法兰顶部设置冒口 4。

铸件4个冒口均为明冒口,并开设相应导气槽,增强铸型的排气,泵体表面两个凸台增加出气孔1和出气孔2,避免由于气体局部聚集而产生的缺陷。铸件浇口设置在泵体的中间部位。

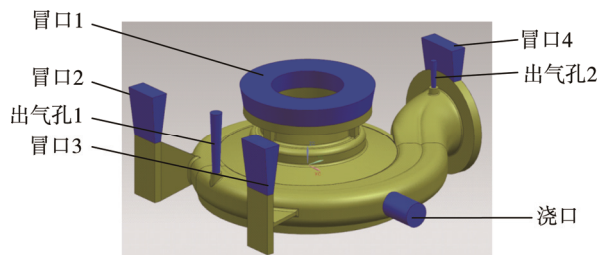


图2 砂型工艺设计

Fig.2 Process design of sand mold

泵体铸型工艺设计见图3。铸型分为上箱、下箱和砂芯3个部分,采用芯头芯座定位,芯头长度为30 mm,配合间隙预留单边0.5 mm。

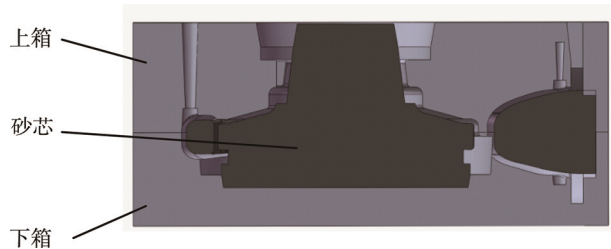


图3 泵体砂型铸型设计

Fig.3 Sand mold casting design of pump body

1.3 泵体铸型的制备

在钛合金的熔炼与浇注过程中,由于钛及其合金属于高活性金属,极易与铸造工艺中所采用的常规铸型材料之间发生不同程度的交互反应,使铸件表面会形成气孔、针孔、夹杂、成分超差等缺陷,严重影响表面质量。砂型铸型的造型材料选用耐火度较高的铝矾土混合物,粘结剂为硅溶胶。为了提高铸型表面惰性和抗热冲击性能,选用高惰性耐火面层材料对砂型铸型工作表面进行喷涂处理,涂层材料是采用氧化钇料浆。

根据模具设计图及技术要求,制作泵体模具,模具材质采用铸铝,而不采用易吸潮变形的木模材料。模具共上模、下模和芯盒3部分。

砂型铸型的成形。采用制作好的模具进行填砂造型,造型过程中保证铸型均匀、紧实,并对铸型进行自然干燥,干燥时间不小于48 h。为了提高铸型的强度,干燥后的铸型需要进行低温焙烧,焙烧温度为450~600 ℃,保温时间4 h,经过低温焙烧后的铸型强度得到大幅度提高。

砂型铸型表面处理。表面涂料过程中应确保铸型和砂芯工作面被涂料完全覆盖,为了涂层的稳定化,需要对铸型和砂芯进行高温焙烧,焙烧温度为1000~1300 ℃,保温时间6 h。高温焙烧后的铸型、砂芯进行组装,待浇注。如不能及时浇注,铸型应在烘箱中保存。砂型铸型实物结构及装配见图4。



a 外模铸型



b 砂芯



c 外模砂芯配合



d 砂型铸型装配

图4 砂型铸型

Fig.4 Sand mold and casting mold

铸件表面粗糙度要求 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 以下，需要严格控制铸型砂芯的涂料过程，保证铸型和砂芯工作面光洁完整，在高温焙烧后对铸型和砂芯的涂层表面进行检查，必要时进行打磨抛光处理。

1.4 熔炼浇注

熔炼浇注在真空自耗电极凝壳炉中进行，采用经过二次熔炼并取样合格的铸锭。钛合金泵体铸件的熔炼浇注工艺参数见表 3。

表 3 熔炼浇注工艺参数
Tab.3 Parameters of smelting casting

起弧真空度/Pa	熔炼真空度/Pa	熔炼电流/kA	熔炼电压/V	金属量/kg	冷却时间/min
≤3.0	≤6.0	18~22	35~45	240	90

2 泵体的研制结果分析

2.1 铸件表面质量

清理后目视检查泵体铸件充型完整，棱角清晰，表面光洁度较好，基本可以满足粗糙度 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 的要求。泵体铸件经局部打磨和表面处理后进行荧光检测，铸件无裂纹、冷隔等缺陷，满足 ASME B16.34 中的要求。

2.2 铸件内部质量

经 X 射线检测，法兰部位存在少量缩孔，经热等静压后缩孔完全消除，内部冶金质量满足 ASME 1320 中 7 级要求。在 X 光检测过程中，泵体铸件未发现夹

杂缺陷，这说明砂型铸型具有较高的可靠性和抗热冲击性能，可以满足大型钛合金铸件浇注的条件。

2.3 铸件的化学成分

铸件的化学成分检测从浇道取样，本批共检测 3 组试样，见表 4。成分分析表明，采用特种砂型铸型工艺研制的铸件化学成分稳定，满足技术指标要求。

2.4 铸件的力学性能

铸件的力学试样采用随炉试棒进行检测，试棒是采用特种砂型铸型工艺与铸件同炉进行浇注，经热等静压处理，本批共检测 6 根试样，其结果见表 5。测试结果表明，采用特种砂型铸造的工艺研制的钛合金泵体铸件力学性能稳定，满足技术指标要求。

表 4 铸件的化学成分（质量分数）
Tab.4 Chemical components of casting (mass fraction) %

试样编号	Ti	Fe	C	N	H	O
1	余量	0.048	0.040	0.0095	0.0069	0.20
2	余量	0.050	0.033	0.012	0.0065	0.20
3	余量	0.046	0.030	0.010	0.0060	0.21
标准	余量	<0.25	<0.1	<0.05	<0.015	<0.4

表 5 铸件的力学性能
Tab.5 Mechanical properties of casting

试样编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
1	492	406	22.4
2	494	408	18.0
3	494	413	20.4
4	501	417	19.6
5	489	410	20.0
6	503	412	19.5
标准	≥450	≥380	12

2.5 铸件的尺寸精度

经尺寸检验，泵体铸件尺寸较为良好，90%以上尺寸能够满足 GB/T6414 中 CT9 级要求，铸件存在尺

寸超差情况，但满足客户最终加工使用要求。经分析铸件尺寸的超差的原因主要是铸件缩尺不均匀以及铸型装配过程中存在误差。

3 结论

1) 采用特种砂型铸造工艺，静止浇注可以生产出轮廓尺寸为 $1200\text{ mm}\times660\text{ mm}\times390\text{ mm}$ ，壁厚为 8 mm 的大型钛合金泵体铸件。

2) 特种砂型铸型采用铝矾土混合物为造型材料，以氧化钎料浆为面层涂层材料，该铸型可以用于生产钛合金熔炼浇注，研制出的铸件表面粗糙度可达到 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 研制结果表明，采用特种砂型铸造工艺研制出来的钛合金泵体铸件化学成分、力学性能满足

ASTM B367 中 C3 的要求,铸件内部和表面质量好,尺寸精度满足使用要求。

参考文献:

- [1] 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.
HUANG Xu, ZHU Zhi-shou, WANG Hong-hong. Advanced Aeronautical Titanium Alloys and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [2] 肖树龙,陈玉勇,朱洪艳.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.
XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong, ZHU Hong-yan. Recent Advances on Precision Casting of Large Thin Wall Complex Castings of Titanium Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(5): 678—681.
- [3] KLEPEISZ J, VEECK S. The Production of Large Structural Titanium Castings[J]. Journal of Metals, 1997, 49(11): 18—20.
- [4] 南海,谢成木,魏华胜.大型复杂薄壁类钛合金铸件的研制[J].中国铸造装备与技术,2001(2):12—14.
NAN Hai, XIE Cheng-mu, WEI Hua-sheng. The Study of Large Thin-wall Complex Integrated Titanium Precision Casting[J]. China Foundry Machinery, 2001(2): 12—14.
- [5] SUNG S Y, KIM Y J. Alpha-case Formation Mechanism on Titanium Investment Castings Materials Science and Engineering A, 2005, 405: 173—177.
- [6] 南海,谢成木.国外铸造钛合金及铸件的应用与发展[J].中国铸造装备与技术,2003(6):1—3.
NAN Hai, XIE Cheng-mu. The Application & Development of Cast Titanium Alloys And Their Castings Abroad[J]. China Foundry Machinery, 2003(6): 1—3.
- [7] 高婷,赵亮,马宝飞,等.钛合金铸造技术现状及发展趋势[J].热加工工艺,2014,43(21):3—7.
GAO Ting, ZHAO Liang, MA Bao-fei, et al. Present Situation and Development Trend of Titanium Alloy Casting Technology[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(21): 3—7.
- [8] 谢成木.钛及钛合金铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.
- XIE Cheng-mu. Titanium and Titanium Alloy Casting[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [9] 苏鹏,刘鸿羽,赵军,等.钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状[J].铸造,2012,61(12):1401—1404.
SU Peng, LIU Hong-yu, ZHAO Jun, et al. Research Status of Shell Mold Preparation for Titanium Alloy Investment Casting[J]. Foundry, 2012, 61(12): 1401—1404.
- [10] 王震.船用钛合金基座铸造工艺研究[J].湖南农机,2012,39(7):63—64.
WANG Zhen. Research on Titanium Base Casting Process for Ship Building[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2012, 39(7): 63—64.
- [11] 韩峰,张新,刘鸿羽.钛液与铸型材料界面反应在我国的研究进展[J].铸造,2014,63(7):675—678.
HAN Feng, ZHANG Xin, LIU Hong-yu. Domestic Research Status of Interfacial Reaction Between Molten Titanium and Mold Materials[J]. Foundry, 2014, 63(7): 675—678.
- [12] 王铮.砂型铸造及熔模铸造BT20钛合金界面反应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
WANG Zheng. Interfacial Reaction Research of BT20 Titanium Alloy by Sand Mould Casting and Investment Casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [13] 修清磊.砂型铸造钛合金薄壁铸件凝固与变形数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
XIU Qing-lei. Study on Numerical Simulation of Solidification and Deformation of Titanium Alloy Thin-Walled Castings During Sand Casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [14] 王文清,李魁盛.铸造工艺学[M].北京:机械工业出版社,2010.
WANG Wen-qing, LI Kui-sheng. Foundry Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [15] 吴东辉.砂型铸造及熔模铸造BT20钛合金组织与力学性能分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
WU Dong-hui. Interfacial Reaction Research of BT20 Titanium Alloy by Sand Mould Casting and Investment Casting[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.