

基于复合铸型的钛合金双流道闭式叶轮铸造工艺研究

肖强伟^{1,2,3} 贾志伟¹ 范世玺¹ 纪志军² 王德季¹

(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 针对具有狭小间隙特点的钛合金双流道闭式叶轮铸造过程中存在的技术难点,提出了一种复合铸型铸造工艺。复合铸型的外模采用石墨铸型,型芯为特种砂芯,该砂芯成本低、生产周期短和溃散性好。复合铸型预热后在真空自耗凝壳炉中熔炼浇注,对铸件浇注结果进行了分析。结果表明,闭式叶轮清芯便捷,铸件成形完整,表面粗糙度在 6.3 μm 以下,铸件尺寸轮廓误差在±0.5 mm。采用石墨-砂芯复合铸型铸造工艺可实现对具有狭小间隙特点的钛合金铸件的研制。

关键词 钛合金铸件;双流道闭式叶轮;狭小间隙;复合铸型

中图分类号 TG249.5;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Product of Titanium Alloy Double-channel Enclosed Impeller Based on Compound Mold

Xiao Qiangwei^{1,2,3}, Jia Zhiwei¹, Fan Shixi¹, Ji Zhijun², Wang Deji¹

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

Abstract: In view of technical difficulties existing in the development of titanium alloy double-channel enclosed impeller casting with narrow clearance, a casting process of compound mold was proposed with graphite shell and special casting sand core, which has advantages of low cost, short production cycle and high collapsibility. After preheating, melting and pouring were conducted in vacuum consumable shell furnace. The results indicate that closed impeller core cleaning is convenient and the casting shape is complete, where the surface roughness is controlled below 6.3 μm and profile size error within ±0.5 mm. Therefore, development of titanium alloy castings with narrow clearance can be realized by graphite-sand core compound casting process.

Key Words: Titanium Alloy Casting, Double-channel Enclosed Impeller, Narrow Clearance, Compound Mold

钛合金具有密度小、比强度高、抗耐腐蚀强等特点,在航空、航天、化工、石油等领域得到了广泛应用^[1-5]。常规的钛合金铸造工艺有精密铸造、机加石墨型铸造、特种砂型铸造等。传统的单一铸型很难同时满足不同铸型特性要求。将多种铸型或型芯有机结合起来,可以实现铸件不同部位所需的性能要求^[6-10]。对于具有复杂狭小型腔结构的钛合金铸件,通常采用精密铸造或石墨型-型芯的成形方法。但目前常用的型芯存在脱除困难、成本高、周期长等问题,尤其是对于具有大面积的狭

长内腔的铸件^[11-13]。基于钛合金石墨铸型和特种砂型的优点,提出了一种石墨型复合砂芯的铸件成形工艺。

石墨铸型具有短流程、高精度的特点,而砂芯相对传统的型芯制备不但具有低成本、短周期的特点,同时具有更好的溃散性和低热导率。该技术结合石墨铸型与特种砂型砂芯的优势,可实现薄壁狭小间隙结构特点的铸件完整成形,同时型芯易于脱除。采用石墨型-砂芯的复合铸型工艺对某狭小间隙双流道闭式钛合金叶轮铸件进行研制,旨在为相关产品的生产提供参考。

收稿日期:2022-08-31;修改稿收到日期:2022-10-20

第一作者简介:肖强伟,男,1979 年出生,高级工程师,北京(100094),E-mail: x_qiangwei@163.com

引用格式:肖强伟,贾志伟,范世玺,等. 基于复合铸型的钛合金双流道闭式叶轮铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 275-1 278.

XIAO Q W, JIA Z W, FAN S X, et al. Product of titanium alloy double-channel enclosed impeller based on compound mold[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 275-1 278.

[15] WU Y P, YE L Y, JIA Y Z, et al. Precipitation kinetics of 2519Al aluminum alloy based on aging curves and DSC analysis[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(10): 3 076-3 083.
[16] 李润霞,李荣德,何立子,等. 可热处理铸造 Al-Si 系合金时效行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(2): 171-175.
[17] CHOI S W, CHO H S, KANG C S, et al. Precipitation dependence

of thermal properties for Al-Si-Mg-Cu-(Ti) alloy with various heat treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 1 091-1 097.
[18] WANG G, BIAN X, LIU X, et al. Effect of Mg on age hardening and precipitation behavior of an AlSiCuMg cast alloy[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(7): 2 535-2 537.

(编辑:栗万仲)

1 铸造工艺

1.1 叶轮的结构特点分析

图1为化工用钛合金叶轮铸件结构剖面图,其轮廓尺寸为 $\phi 218\text{ mm}\times 88\text{ mm}$,最小壁厚为5 mm,质量为8 kg。该叶轮为双流道闭式结构,上层为5个曲面叶片,下层为8个直面叶片,叶轮的最小间隙仅为5 mm。

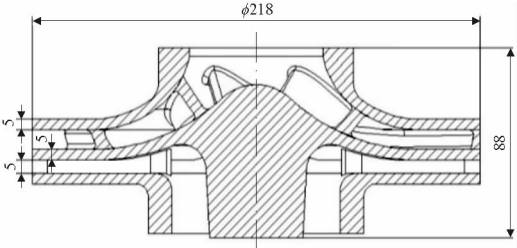


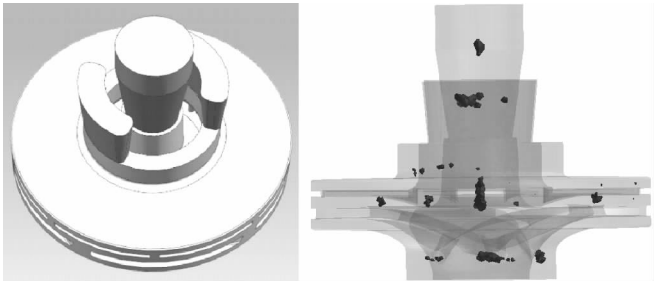
图1 叶轮铸件结构剖面图
Fig.1 Profile of impeller casting

1.2 叶轮铸造方案的讨论

叶轮铸件的双层流道间隙为5 mm,考虑到工艺设计余量,流道间隙仅为4 mm。由于其狭小的结构特点,采用熔模精密铸造生产,在制壳过程中,双流道的狭小间隙涂料和干燥将非常困难,型壳不能干透或因强度不够导致铸件报废。采用石墨-型芯工艺是制备该双层闭式叶轮的有效途径,其中型芯一般采用石墨型芯和陶瓷型芯。石墨型芯采用石墨块机加工而成,但石墨强度相对较高,铸造后的脱芯非常困难,内腔的表面粗糙度也较差。该型芯尺寸规格较大,如采用陶瓷型芯,制备的周期较长、成本高,脱芯也是很大的挑战。基于上述石墨-型芯工艺存在的问题,该双层闭式叶轮采用石墨-砂芯复合铸型方法,其中砂芯采用特种工艺制备,具有高惰性、溃散性好、低成本的特点。

1.3 叶轮铸件的工艺设计

采用数值模拟仿真技术进行工艺优化,铸型温度为200 ℃,金属液浇注温度为1 720 ℃,浇注时间为3 s,传热系数为600~1 500 W/(m²·K),得到最佳的浇注工艺,见图2。可以看出,铸件本体内部缩孔体量较小,经



(a) 工艺方案设计 (b) 内部缩孔分布

图2 工艺方案设计及仿真模拟
Fig.2 Scheme design and simulation

后续的热等静压处理可以愈合。根据钛合金叶轮铸件结构特点,铸件的收缩率为0.5%~2.0%,工艺补正量单边为0.3~1.0 mm。

1.4 叶轮复合铸型的制备

依据叶轮浇注工艺方案,双流道闭式叶轮的复合铸型结构设计见图3。

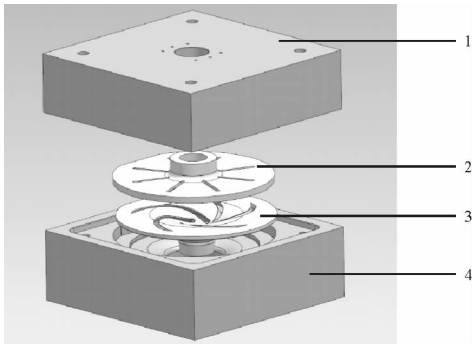


图3 复合铸型设计图

Fig.3 Designed diagram of compound mold

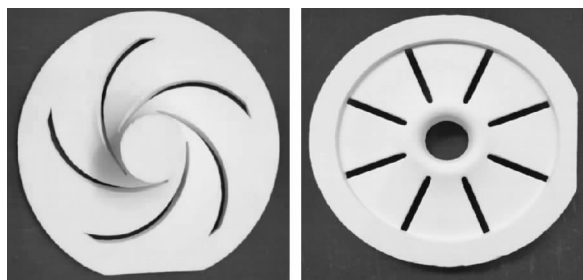
1.上模 2.砂芯1 3.砂芯2 4.下模

(1)上、下外模石墨铸型的制备 上、下外模石墨铸型材料采用高纯石墨数控加工而成,石墨铸型内腔表面采用自制的石墨专用惰性涂料进行喷涂,保证涂料覆盖整个石墨铸型工作面,石墨铸型经真空除气后放置在烘箱中待用。

(2)砂芯1和砂芯2的制备 钛合金铸造用砂芯的造型材料选用耐火度较高、成本低廉的铝矾土砂、粉混合物,粘结剂为硅溶胶,制备砂芯的原料为:20%~40%的16~80目铝矾土砂,4%的硅酸盐水泥,10%~15%的硅溶胶,其余为150~200目铝矾土粉。按比例混合均匀后填满砂芯模具空腔并捣实,打开砂芯模具后得到砂芯,然后自然干燥,再进行低温焙烧,焙烧温度为200~500 ℃,保温2~4 h。经焙烧后的铸型强度得到提高。为了进一步提升砂芯的高温惰性,砂芯表面需均匀涂覆一层Y₂O₃惰性涂层,表面涂料应无明显涂料堆积、流痕、气泡等不良现象。将完成涂料涂覆的砂芯进行高温焙烧,焙烧温度为1 000~1 300 ℃,保温2~4 h后获得所需砂芯。

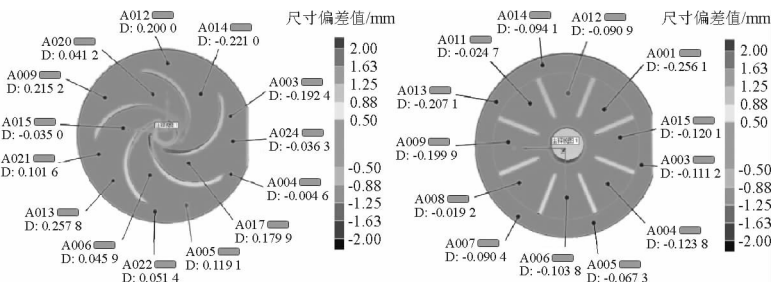
对于薄壁砂芯,砂芯的变形或断裂是制备的难点。为了预防薄壁砂芯制备过程中发生变形或断裂,在砂芯的造型、低温烘烤和高温烧结过程中采用防变形工装,制定适当的焙烧工艺曲线等。砂芯制备完成后首先需要对其进行外观检查,必要时进行X射线检查,确保砂芯内外部无裂纹;其次,砂芯质量误差应控制在理论质量的±1%以内;最后对砂芯进行三维扫描检测,砂芯尺寸变形应控制在±0.3 mm以内。对于不符合要求的砂芯应进行返修或报废。经检测,制备的薄壁叶轮砂芯表

面光洁,无裂纹,砂芯实物及尺寸精度见图4。将制备的石墨外模与砂芯进行组装,浇注前铸型放入烘箱进行



(a) 砂芯 1 实物

(b) 砂芯 2 实物



(c) 砂芯 1 精度

(d) 砂芯 2 精度

图 4 砂芯实物及尺寸精度扫描

Fig.4 Entity and dimension of sand core

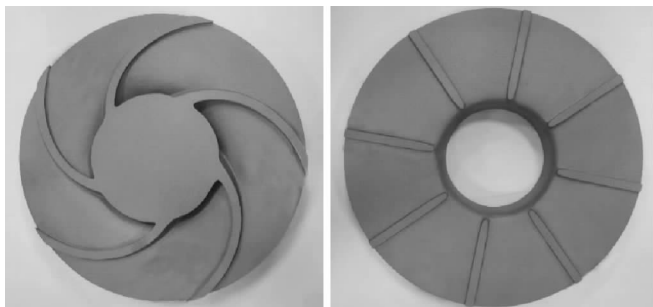
1.5 熔炼浇注

钛合金叶轮在 ZHN-100 真空自耗电极凝壳炉中浇注,合金为 C3 二次锭,熔炼与浇注工艺参数见表 1。

表 1 熔炼浇注工艺参数

Tab.1 Process parameters of melting and casting

起弧真空度/Pa	熔炼真空度/Pa	熔炼电流/kA	熔炼电压/V	冷却时间/min	浇注方式
≤3.0	≤6.0	18~22	35~45	≥60	重力浇注



(a) 内腔剖面 1

(b) 内腔剖面 2

图 6 叶轮剖面图

Fig.6 Profile of impeller

2 铸件的研制及分析

2.1 砂芯的清理情况

双流道叶轮铸件采用风镐进行清壳,内部的双层狭小砂芯采用高压水即可完全清除,狭长砂芯的脱除较为便捷。检测数据表明,特种砂芯的密度和抗弯强度分别为 1.95 g/cm^3 和 3.55 MPa ,显著低于传统陶芯的 2.62 g/cm^3 和 13.40 MPa ;高纯石墨的密度为 1.80 g/cm^3 ,略低于特种砂芯,但其强度一般在 50 MPa 以上,远高于特种砂芯。基于这种特性,特种砂芯脱除性能更好。

2.2 铸件的成形情况

图 5 和图 6 分别为叶轮成品及剖切图。可以看出,铸件成形完整、棱角清晰。经检测,封闭流道内侧的表面粗糙度在 $1.8 \sim 3.7 \mu\text{m}$, 完全满足标准要求。石墨的热导率一般超过 $100 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 而陶瓷型芯热导率一



图5 叶轮成品

Fig.5 Product of impeller

预热,预热温度为 100~300 ℃,保温 1~3 h,然后进行浇注。

般为 $1.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 而特种砂芯的热导率仅为 $0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。对于具有薄壁特点的叶轮铸件, 内部型芯采用具有低热导率的特种砂芯, 有利于避免由于高温金属液的急冷导致的成形不良及表面品质不良。

2.3 铸件冶金品质

经 X 射线检测,叶轮铸件内部无夹杂缺陷,表明石墨-砂芯复合铸型具有较好的抗热冲击能力,整个浇注过程可靠性较好。铸件内部小体量的缩孔、缩松缺陷与模拟结果基本一致,经热等静压处理后缺陷完全愈合,满足 ASME 1320 中 7 级要求。铸件经着色检验,无裂纹、冷隔等缺陷,满足 ASME B16.34 中的技术要求。

2.4 铸件尺寸精度

铸件采用关节臂扫描进行尺寸检测,将扫描结果与理论三维数模进行对比拟合,结果见图7。可以看出,

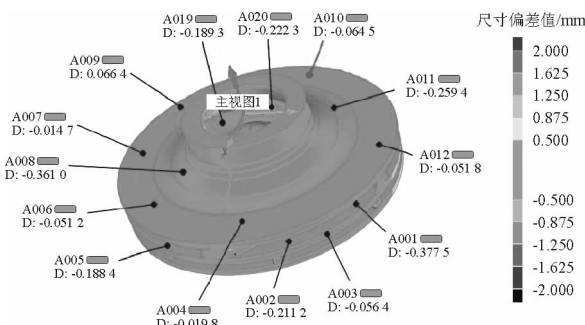


图 7 叶轮扫描对比结果

Fig.7 Scanning result comparison of impeller

叶轮铸件尺寸轮廓度控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$,完全满足技术要求。

3 结 论

(1)基于石墨-砂芯复合铸型的工艺可研制出具有狭小间隙薄壁特点的钛合金双流道闭式叶轮铸件,砂芯清理便捷,铸件成形完整,流道内部表面粗糙度控制在 $1.8\sim 3.7\text{ }\mu\text{m}$ 。

(2)经检验,叶轮铸件内部无夹杂缺陷,少量缩孔缺陷经热等静压后可完全愈合;表面无裂纹、冷隔等缺陷;尺寸轮廓可控制在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

(3)基于铸件结构特点制备的具有针对性的复合铸型,可以实现铸型-铸件的最佳匹配,规避了传统单一铸型存在的不足,在钛合金铸造方面具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 南海,谢成木.国外铸造钛合金及其铸件的应用与发展[J].中国铸造装备与技术,2003(6): 1-3.
- [2] 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.
- [3] SUNG S Y, KIM Y J. Alpha-case formation mechanism on titani-

um investment castings[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A405: 173-177.

- [4] 高婷,赵亮,马宝飞,等.钛合金铸造工艺现状及发展趋势[J].热加工工艺,2014,43(21): 5-11.
- [5] 赵亮,高婷,杜宇,等.大型钛合金叶轮的铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2015,35(9): 955-957.
- [6] 王惠梅,范玉虎,汪勇,等.复杂薄壁筒体的复合铸型工艺研究[J].热加工工艺,2015,44(9): 81-87.
- [7] 杨兵兵,范志康,陈淑惠.大型复杂不锈钢叶轮熔模-砂型复合铸造工艺[J].铸造技术,2007,28(4): 457-460.
- [8] 潘龙,余国康,邹文兵,等.镁合金筒形件低压铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(4): 512-517.
- [9] 谢华生,姜延春,赵军,等.石墨-陶瓷芯钛合金精密铸造方法.中国:CN101733383A[P]. 2010-06-16.
- [10] 张洋,梁润孜,于宗溟,等.某航天钛合金壳体铸件石墨陶瓷复合铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12): 1 572-1 575.
- [11] 李重阳,刘鸿羽,薛松海,等.钛合金铸造用型芯应用现状及展望[J].铸造,2021,70(9): 1 023-1 028.
- [12] 赵军.钛合金石墨型铸造技术国内外发展现状及趋势[A].2019 中国铸造活动周论文集[C].武汉,2019.
- [13] 郑松翔,宁兆生,甘志文,等.数控加工石墨型在钛合金铸造中的应用及发展[A].2020 中国铸造活动周论文集[C].合肥,2020.

(编辑:彭瑾)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

《特种铸造及有色合金》杂志社



地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

