

高精度钛合金叶轮熔模精密铸造工艺优化

宁兆生^{1, 2}, 宋克兴¹, 张彦敏¹, 赵 军², 郑松翔², 陈 彪², 于志强², 杨晓曦², 王彦鹏²

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 分析纯钛叶轮铸件的材料、结构特点和技术要求, 拟定了叶轮铸件初始的熔模精密铸造工艺方案并浇注样件。通过ProCast有限元分析软件进行工艺缺陷的复现与优化, 改善铸造缺陷控制的方法, 解决了铸件成形问题并最终生产出了高精度优质纯钛叶轮铸件。

关键词: 纯钛叶轮; 陶瓷型壳工艺; 精密铸造; ProCast有限元分析; 工艺优化

钛合金比传统不锈钢具有更加优异的性能, 如密度较低、比强度高、膨胀系数小、塑韧性好和抗裂纹扩展速率低等优点^[1]。耐腐蚀和抗冲蚀性能优良的纯钛在制酸、碱企业中应用广泛。采用ProCast有限元分析软件不仅能够事先预测不同工艺方案出现的缺陷及变形等问题, 而且能够复现形成的缺陷, 进而优化工艺。软件中分析手段多样且模拟结果非常直观, 能够极大地提高工艺水平和产品的成品率, 有利地推动了工艺质量与产品质量的升级^[2-5]。

本文针对某钛合金叶轮的特点及使用要求, 进行了其陶瓷型精密铸造工艺设计和ProCast数值模拟及工艺优化, 经过工艺改进后铸造出了高精度优质的叶轮铸件。

1 产品结构及铸造工艺分析

1.1 技术要求与产品的特点

某钛合金叶轮作为流体机械装置中的核心零件, 长时间在腐蚀性气氛中高速运转, 对其耐蚀性和动平衡等性能指标有很高要求, 因此要求铸件的轮廓外形精确、密度均匀、组织致密, 内部质量要求为GB/T6614-2007中C级。该叶轮铸件采用牌号为TA2的工业纯钛, 其结构是由圆盘两侧面均匀分布五条叶筋, 每条叶筋的外形为三维曲面, 其中正面的外形轮廓为叶轮的重要工作面, 最大轮廓尺寸为 $\Phi 300$ mm \times 80 mm, 叶轮的最小壁厚为6 mm, 铸造尺寸公差等级要求为CT7级。图1为纯钛叶轮的平面图。

1.2 铸造难点分析

(1) 工业纯钛的熔点比其他钛合金高, 按常规熔炼工艺导致过热度不高; 此外该叶轮的浇口位置选择单一, 离心铸造时易产生缩孔及冷隔等缺陷, 影响铸件的使用寿命。

(2) 此叶轮铸造尺寸公差等级要求为CT7级, 均匀分布的五个叶片的角度误差不得大于 $10'$, 允许轮廓偏差为 ± 0.5 mm, 要由铸造工艺来保证两者的精度, 难度较大。

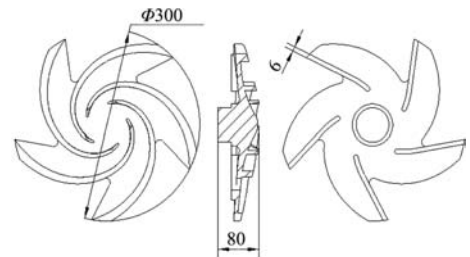


图1 叶轮铸件平面图

Fig. 1 Drawings of the impeller casting

作者简介:

宁兆生(1980-), 男, 硕士生, 高级工程师, 主要研究方向为钛合金铸造工艺。电话: 024-89354095, E-mail: ningzhaosheng@126.com

通讯作者:

宋克兴, 男, 博士, 教授。E-mail: kxsong@haust.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)06-0751-05

基金项目:

辽宁省科技计划(2019JH1/10100004); 辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1808030); 沈阳市科技计划(Z19-1-003)。

收稿日期:

2021-11-25 收到初稿,

2021-12-13 收到修订稿。

2 铸造工艺设计

2.1 铸件缩尺的设置

根据铸件结构选用陶瓷型精密铸造工艺，这其中包含有蜡模成形和铸件成形两次热胀冷缩过程，所以双重缩尺是其具有的独有特征，同时也是铸件尺寸的重要影响因素。针对上述情况，工艺设计时充分考虑以下两点。一是中温蜡的收缩对最终铸件尺寸的影响，中温蜡从半固态的蜡液冷却至室温，蜡模的变形收缩小，一般情况下取0.9%至1.3%。根据叶轮铸件的结构特点，拟定该蜡模各个方向的缩尺均为1.2%。二是高温钛液的收缩对最终铸件尺寸的影响，钛液的收缩在很多文献已经多次分析总结，本文采用成熟的经验数据为1.0%^[6]。

2.2 铸件的浇注系统设计及布局

直浇道从叶轮中心顶部引入，截面直径尺寸为60 mm；五处分浇道的截面直径为15 mm，倾角为25°，采用顶注式浇注系统，其布置如图2所示。蜡模组型如图3所示。

3 铸件试生产及检验结果分析

3.1 铸件试生产及检验结果

按上述工艺进行生产，在真空电弧自耗凝壳炉中进行熔炼及浇注。采用顶注式浇注，熔炼电流15 kA，熔炼电压40 V，离心转速250转/分钟。经过清理和喷砂等工序处理后，铸件经目视检查发现铸件边缘存在大

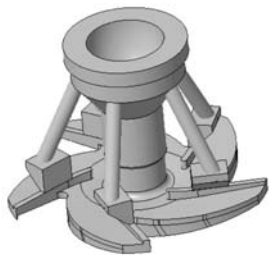


图2 叶轮的初始浇注系统布置图

Fig. 2 The initial diagram of the pouring system of the impeller casting



图3 叶轮模组的实物图

Fig. 3 The wax pattern group of the impeller

量的缩松缺陷，叶盘中心部位及叶筋与叶盘转角处存在严重的冷隔缺陷，包含有一处重熔型冷隔和四处欠铸型冷隔。表面目视检查结果见图4。铸件经X光射线检验在底片中发现缩松缺陷若干，X射线底片结果见图5所示。

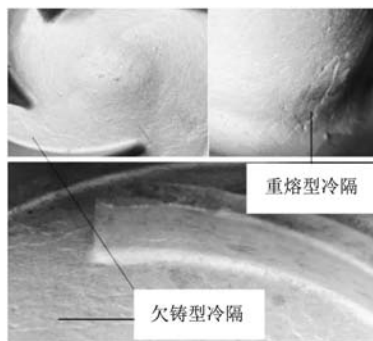


图4 样件的缺陷实物图

Fig. 4 Casting defect image of the sample

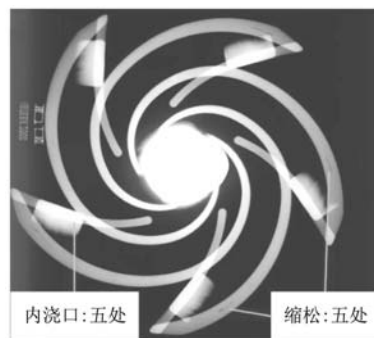


图5 样件的X射线底片缺陷图

Fig. 5 X-ray photograph of the sample

3.2 铸件试生产缺陷机理分析

纯钛的熔点比钛合金高，按常规的熔炼制度过度热度不高、粘度大是导致冷隔产生的内因；金属熔体充型过程不平稳，造成了局部温度分布不均匀，部分区域先凝固，而熔体活跃区域由于温度偏高而后凝固，出现了凝固的不同步性是产生重熔型冷隔的外因^[7-8]。而欠铸型冷隔与宏观浇不足缺陷不同，这种冷隔的不连续介于微米与毫米尺度之间，诱发该型冷隔的原因是由多种不确定的因素造成，其凝固区的温差较重熔型的小，外观呈开放式线条，而重熔型冷隔呈闭合式线条。目前采用真空自耗离心铸造的工艺方法很难从根本上消除该类缺陷。

4 ProCast有限元模拟工艺的复现及分析

基于上述的工艺模型三维模型进行数值模拟。采用Visual Mesh模块面网格化所有的立体模型，生成较为合理的面网格，依据蜡模面网格模型使用shelling命

令生成陶瓷型壳面网格模型，型壳厚度10 mm。将炉壳内壁的面网格转化为Enclose体，全部生成体网格，总网格数一般不超过1 000万。

在Visual Cast模块中设置如下初始条件和边界条件。

(1) 指定重力Gravity方向，铸型材料为Zirconia，预热后初始温度为300 ℃，充型阶段的应力类型为刚性。指定铸件及浇注系统的材料为纯Ti，生成液相线温度和固相线温度，流体模型为Newton流体。充型阶段时，铸件和浇注系统区域应力类型为Vacant，初始温度为300 ℃。

(2) 通过Heat Exchange指定型壳在低真空状态仅存辐射换热，假定辐射换热为常数，取值0.9。

(3) 采用Radiation指定炉体内壁的辐射方向向内，辐射率取值0.8。

(4) 采用Volecity指定钛液进入型壳的流动速度随时间变化的函数。

(5) 采用Revolution指定陶瓷型壳绕主轴旋转的转数随时间变化的函数。

经过模拟计算后，在Visual Viewer模块中查看整个过程的充型、温度变化情况。其中缩松缺陷的模拟结果和叶轮中心部位温度的模拟照片，如图6所示。

按照以上工艺模拟的缺陷结果见图7。从缺陷显示图中可以看出，模拟照片完全复现疏松缺陷的真实情况；而温度分布图显示了凝固后期叶轮正中心部位、外缘与两者之间过渡区的温度变化，充分说明了造成冷隔的原因是由于温度的差异导致的。

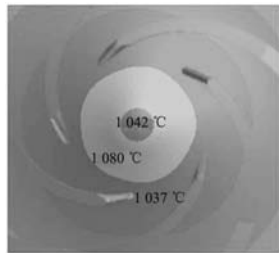


图6 初次模拟的温度分布图
Fig. 6 The temperature distribution diagram of the initial simulation



图7 初次模拟的缺陷显示图
Fig. 7 The defect display of the initial simulation

5 工艺改进措施及改进后的模拟结果

5.1 浇注工艺改进措施

采用底注式浇注系统，使用球底耐热离心杯，内浇道从叶轮中心底部引入，横浇道与内浇道截面的直径尺寸仍为60 mm。耐热铸铁浇杯容积大、散热慢且可重复使用，即有利于补缩又提高了劳动生产率。而加大离心半径会使沿径向的钛液自由表面前沿压力升高，流速加快，同时底注式又使陶瓷型腔内的液面在

竖直方向上平稳上升。离心半径过小且缺少足够的钛液持续补充收缩是产生缩松的主要原因。在不改变离心转数的情况下，通过热封顶技术来改善熔炼工艺^[9]，同时改变浇道布置形式，延长横浇道长度，在真空自耗凝壳炉中采用一炉浇注4件的工艺设计，4处横浇道均匀分布于直浇道圆周上，改进后的浇注系统布置如图8所示。



图8 叶轮铸件浇注工艺简图
Fig. 8 The pouring process of the impeller casting

5.2 工艺改进后的模拟结果

浇注工艺改进后再次进行ProCast有限元分析，采用5.1中底注式浇注，熔炼工艺及离心参数不变，仍是熔炼电流15 kA，熔炼电压40 V，离心转速250转/分钟。在模拟中对离心半径进行多次取值并进行模拟分析，结果表明，离心半径在取值450 mm时型腔内液面上升速度最平稳，温度分布也最合理，工艺方案最适宜。模拟结果发现上述缺陷得到了大量的消除（图9），冷隔问题也得到了较好地解决。

6 生产验证

根据最终的工艺方案进行了模具设计、压制蜡模，经挂壳、焙烧、组型、熔铸，浇注结束后，铸件进行打磨、探伤、喷砂等处理，该铸件表面棱角分明、轮廓外形精确，存在较少的冷隔缺陷，见图10。铸件经过三维扫描检测后通过对比软件检测其轮廓外形，除两处有局部凸起，其偏差均不超过 ± 0.5 mm，



图9 工艺改进后缺陷模拟显示图
Fig. 9 The defect display of the casting after improved process



图10 清理后的铸件
Fig. 10 Photo of the casting after cleaned

偏差部位均匀分布在以叶轮中心轴为圆心的同心圆上，动平衡指标能够满足实际工作要求，如图11所示。X光检查内部无裂纹、缩松等缺陷，见图12，全部满足相关技术协议的规定。采取上述工艺方案浇注后，获得了优质的纯钛叶轮铸件。

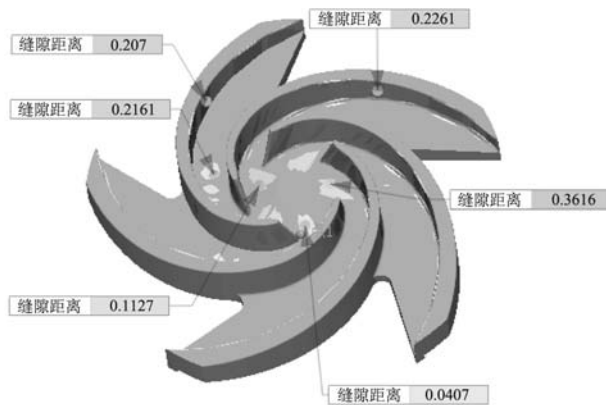


图11 铸件三维扫描数据对比结果

Fig. 11 Comparison result in 3D scan data of the casting



图12 铸件的X光检查照片

Fig. 12 X-ray photograph of the casting

7 结束语

通过采用底注式浇注系统，使用球底耐热离心杯，改变浇道布置等形式可以达到浇注补缩的效果，从而获得外表面光滑，内部质量合格的优质钛合金铸件。

在钛合金熔模精密铸造工艺的设计过程中，通过ProCast软件对铸造方案进行模拟分析，对铸件的充型、凝固过程进行数值模拟，准确有效地预测出其中的缩孔、缩松的产生，改进工艺使铸件中的缩孔、缩松缺陷消除，进而实现了工艺方案的优化。

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] 刘其涛. Ti48Al2Cr2Nb合金铸件应力和变形的数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [3] 朱勇, 龚伟, 白朝中, 等. 基于ProCAST的进气管砂型铸造的充型凝固数值模拟 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (8): 1859-1862.
- [4] 袁焕龙, 曹喜彪, 黄挺挺. 铝合金缸盖倾转铸造数值模拟及优化研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (10): 1068-1071.
- [5] 江长, 向思雨. 基于ProCAST的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (5): 40-43.
- [6] 宁兆生, 包有宇, 郑松翔, 等. 复杂钛合金阀体的铸造工艺设计与研究 [J]. 铸造, 2018 (12): 1111-1112.
- [7] 刘铁军. 钛合金叶轮离心铸造数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 徐达鸣, 李鑫, 安阁英, 等. 钛合金离心精密铸造充型过程计算机模拟 [J]. 铸造, 2002 (1): 39-43.
- [9] 谢成木. 钛及钛合金铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

Optimization of Investment Casting Process for High Precision Titanium Alloy Impeller

NING Zhao-sheng^{1,2}, SONG Ke-xing¹, ZHANG Yan-min¹, ZHAO Jun², ZHENG Song-xiang², CHEN Biao², YU Zhi-qiang², YANG Xiao-xi², WANG Yan-peng²

(1. Henan University of Science and Technology School of Materials Science and Engineering, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

A whole set of casting process of pure titanium impeller was designed with the considering of material property, the structure and technical requirements, and a sample casting was produced. The process defects were reproduced and optimized by ProCAST finite element analysis software, the method of casting defect control was improved, the casting forming problem was solved, and finally the high-precision and high-quality pure titanium impeller casting was produced.

Key words:

pure titanium impeller; ceramics casting process; investment casting; ProCast finite element analysis; process optimization