

环形钛合金铸件缩孔工艺改进与试验验证

孙妍¹, 马静¹, 张光¹, 郅喜望¹, 赵瑞斌¹, 南海²

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 针对环形钛合金铸件在熔模铸造生产过程中常出现缩孔缺陷, 设计了三种冒口优化方案, 并通过ProCAST软件进行模拟仿真分析。结果表明, 采用增大冒口模数的第一种成形工艺方案时, 钛合金铸件具有较好的充型能力和较优的凝固顺序。基于确定的最佳成形方案, 试制了12个试验件, 进行X光检验和力学性能测试。结果表明, 铸件表面光洁平整, 内部组织致密, 无缩孔缺陷, 力学性能满足要求。本研究降低了压坑的发生率, 铸件内部的冶金质量得到了显著改善。

关键词: 钛合金; 熔模铸造; 缩孔缺陷; 模拟仿真; 冒口优化

钛合金以其优异的性能在航空航天、国防装备、生物医学等领域迅猛发展并得到了广泛应用。对于铸造钛合金, 熔模铸造是目前国内外采用最多的成形方法之一, 这种铸造方法具有高尺寸精度和较低的机械加工成本, 适用于大型复杂薄壁件^[1]。近年来, 随着热等静压技术的不断发展, 一些较小的缩孔缺陷可以通过该方法消除, 因此钛合金铸件冶金质量有所提高^[2]。但对于较大的宏观缩孔, 热等静压无法消除, 这将以压坑的形式显现。我司在采用熔模铸造法生产环形钛合金铸件时, 发现外环安装边结构在热等静压后存在较为明显的目视压坑(如图1), 压坑发生率高达31%。该问题严重影响产品质量、增加补焊返工流程、降低生产效率, 因此开展工艺优化改善此情况具有重要意义。

该环形钛合金铸件材质为ZTC4, 名义成分为Ti6Al4V(质量分数), 具体成分要求见表1。本文以该钛合金铸件为对象, 设计了三种外环安装边冒口优化方案并开展成形模拟, 基于仿真结果选取最优方案进行试验验证。

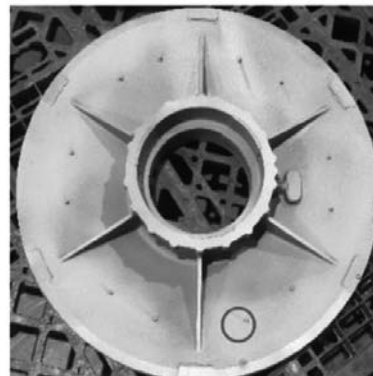


图1 热等静压后的铸件表面压坑

Fig. 1 Indentations of the casting after hot isostatic pressing

作者简介:

孙妍(1997-), 女, 硕士, 初级工程师, 主要从事钛合金熔模铸造工作。E-mail: hblgyssy@126.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

10-1429-06

收稿日期:

2024-02-26 收到初稿,

2024-04-25 收到修订稿。

表1 ZTC4钛合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the ZTC4 Ti alloy

w_B/%

Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Y	其他元素	
										单个	总和
余量	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.15	≤0.10	≤0.05	≤0.015	≤0.20	≤0.005	0.10	0.40

1 冒口优化方案设计

研究发现铸件出现缩孔的原因是金属液在流经冒口根部与铸件接触的部位时形成了热节，导致局部温度过高，使冒口根部金属液凝固时间延长，成为整个铸件与浇注系统最后凝固的部位，自身无法得到外部补缩，从而产生缩孔缺陷^[3]。在钛合金铸件浇注系统设计中，一定程度上冒口模数越大、数量越多，对铸件本体的缩孔消除效果越好，可以通过增加冒口高度、宽度、加大起模斜度来实现模数的增大^[4]。研究表明，

在模数相同的情况下，冒口形状不同，缩孔消除效果也不同，目前常用的冒口截面形状主要有长方形、梯形、球形等。

为提高外环安装边冒口的缩孔消除能力，制定三种优化方案，如图2所示。方案一，增大单个冒口模数，在原有的宽度基础上再加宽10 mm；方案二，增加冒口数量，由6个增至12个；方案三，改变冒口形状，由原来的梯形截面更改为直径50 mm的球形截面。

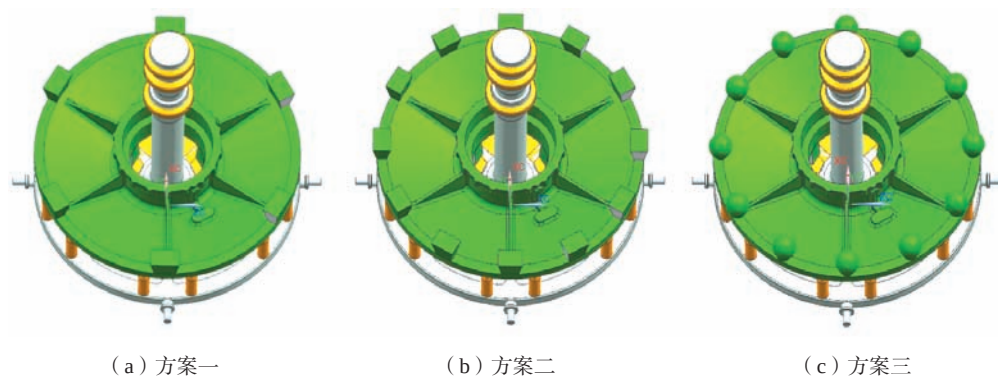


图2 三种冒口优化方案

Fig. 2 Three optimization schemes of the risers

2 模拟仿真分析

近年来，随着数字化和智能化的发展不断成熟，越来越多的专家学者通过模拟仿真方法来研究铸造过程充型、凝固规律，该方法具有周期短、成本低、效率高等优点，实现了铸造过程可视化^[5]。本文基于ProCAST软件的热分析模块、流动分析模块和应力分析模块对三种冒口优化方案分别进行成形模拟^[6]，一个浇道盘共上下两组（图3），模拟参数一致，均采用静止浇注，熔炼电流20 kA、电压40 V、型壳温度200 ℃。三种冒口优化方案得到的模拟仿真结果如图4所示，上下两组铸件缩孔分布情况相似，在此仅显示上面一

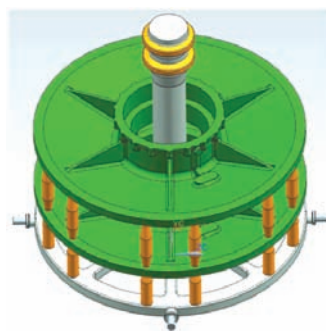


图3 两个蜡模组模方案

Fig. 3 Assembly scheme of two wax patterns

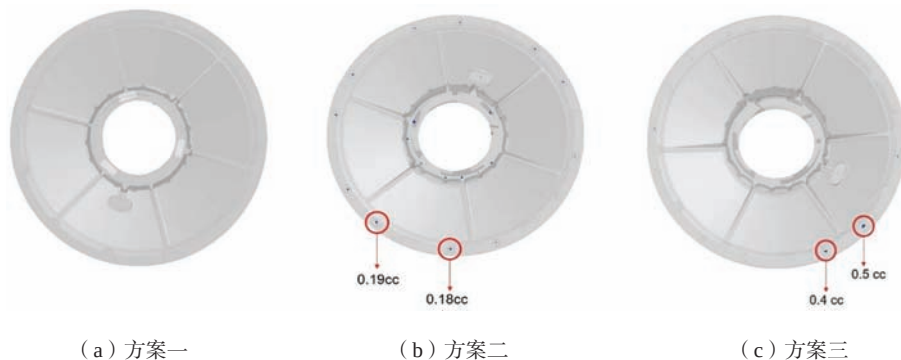


图4 模拟仿真得到的三种方案缩孔分布情况

Fig. 4 Simulated shrinkage distributions of three schemes

组。图中蓝色点代表缺陷,点簇越大,说明缩孔越宏观,越不容易通过热等静压方法来消除。从图4a可以观察到,大面积缩孔全部从铸件本体中剔除,而图4b和图4c外环安装边位置仍存在缩孔,尤其是图4c缩孔较大。模拟结果显示方案二与方案三的优化效果不理想,可行性较低,只有方案一铸件本体不存在任何缩孔、缩松缺陷,缩孔消除效果最佳,因此对方案一的充型凝固过程进行分析。

浇注充型过程是一种典型的黏性流体流动场和温度场耦合过程^[7],采用方案一模拟得到的环形钛合金铸件充型过程如图5所示。受铸件摆放情况与重力场的影

响,金属液首先在中间的直浇道充型,然后向四周8个内浇道流动,如图5a所示,此时铸件充型率为25%。浇道盘充满后,金属液平缓往上进行顺序充型,如图5b至图5c的变化过程。当充型率达到90%时,整个铸件本体基本充满,仅外环安装边部分区域尚没有金属液流经(图5d),这是由于此位置距回转中心最远,因此充型顺序位于最后^[8]。整个充型过程金属液遵循由内到外、自上而下的规律^[9],与回转中心等距的位置几乎可以同时到达,说明金属液流动速度稳定,充型过程比较平稳,也从侧面反映出浇注系统即冒口优化方案是合理的。

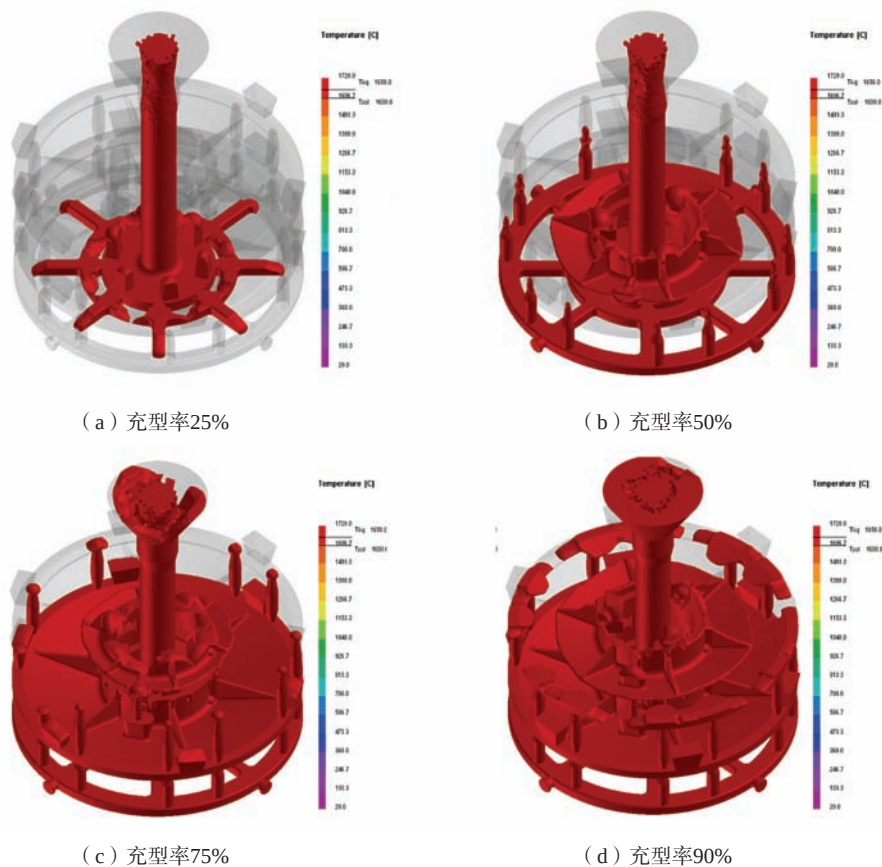


图5 模拟仿真得到的方案一充型过程
Fig. 5 Simulated filling process of the scheme 1

缩孔缺陷的产生主要发生在金属液凝固期间,由于液相转变为固相的过程密度增大导致体积收缩而形成^[10]。该环形钛合金铸件壁厚差异大,最厚处达到24 mm,最薄处仅有3.5 mm,壁薄区域最先凝固,厚区存在过热现象最后凝固,最终形成独立热节点。铸件不同结构凝固顺序的不同使金属液在型腔内形成多个互不连通的孤立液相区,而优化前冒口模数小,厚区补缩通道不畅通,各个孤立液相区凝固收缩后无法

从浇冒系统得到金属液的补充,从而导致在最后凝固的区域产生缩孔缺陷。通过方案一模拟得到的环形钛合金铸件凝固过程见图6,图6a是凝固率为20%时的情况,可以看到,与铸件其他结构相比,腹板位置最先开始凝固,因为腹板与冒口距离最远,温度梯度相对较小。凝固率为50%时,外环冒口根部与周围结构相比液相占比较大(图6b),同样从图6c也可以看到类似情况。凝固率达到75%时,深灰色区域与周围浅灰色区

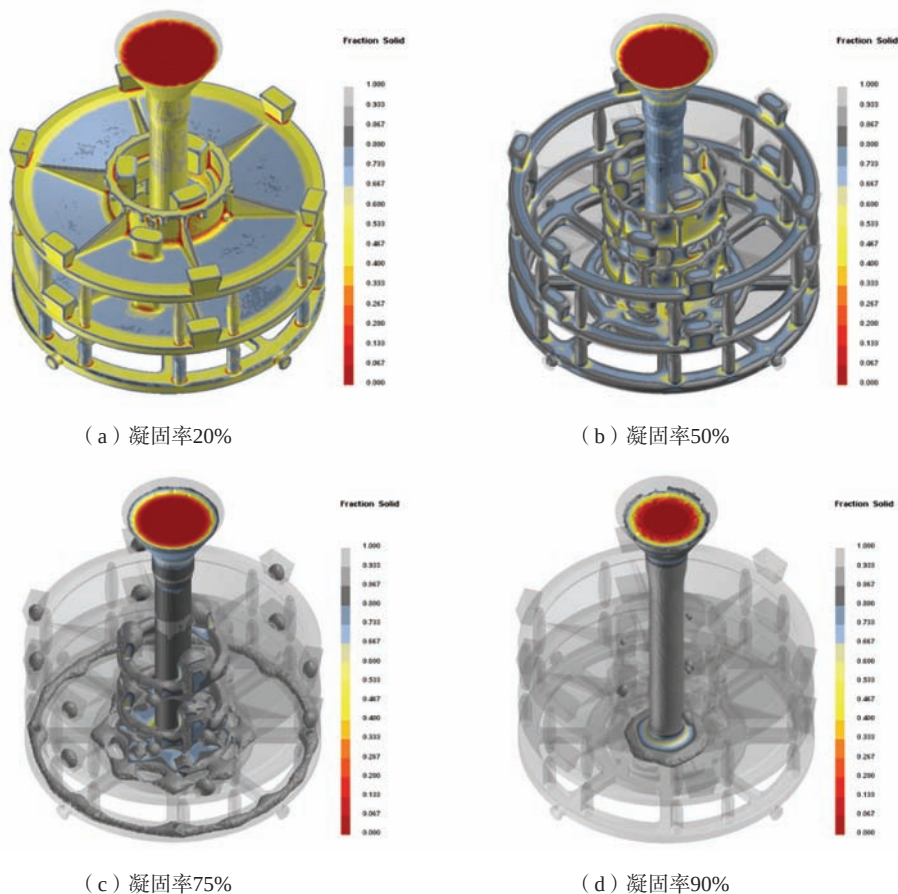


图6 模拟仿真得到的方案一凝固过程

Fig. 6 Simulated solidification process of the scheme 1

域相比, 凝固较不完全不充分, 形成了较为明显的热节, 但由于该热节完全位于冒口内部, 后工序去除冒口后对铸件本体无影响^[11]。将冒口中心到缩孔的距离定义为补缩距离, 工艺优化后冒口宽度增大, 补缩距离减小, 凝固时厚大区域、热节处可以更快地得到金属液补充^[12]。同时补缩通道更加畅通, 为最后凝固的区域提供了足够的金属液, 因此优化后该环形钛合金铸件的缩孔缺陷得以消除。

3 试验验证

基于ProCAST模拟仿真分析确定方案一缩孔消除效果最优, 因此在其他工艺参数保持不变的条件下, 采用该方案进行熔炼浇注得到12个钛合金试验验证件。

3.1 内部质量分析

统计试验验证件热等静压后的外环安装边压坑情况, 并与冒口工艺优化前的12个铸件相对比, 将数据汇总得到图7。图中平行于X轴的黑线代表冒口优化前铸件表面压坑数量的平均值, 为2.9个, 红线则代表优

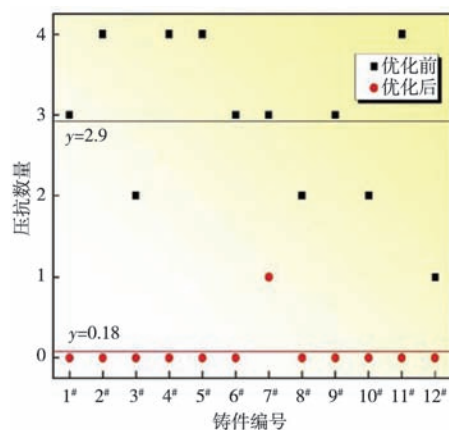


图7 冒口优化前后铸件表面压坑数量

Fig. 7 Indentation quantities of the castings before and after riser optimization

化后压坑数量的平均值为0.18个, 由此可见, 铸件表面存在压坑的数量显著减少。另外, 从散点数据的分布情况也可以看出, 优化后压坑出现次数呈明显下降趋势, 12个试验件中仅一件存在一处压坑, 压坑发生率为8.3%, 其余11件外观均光滑平整, 表面光洁度较

高,无目视压坑出现。

图8为冒口工艺优化前后铸件X射线探伤检测的结果,从图8a可以看到,优化前安装边位置存在较大的宏观缩孔和密集气孔,内部冶金质量较差^[13]。而优化后铸件内部组织致密,12件中仅一件有一处缩孔,且与存在目视压坑的铸件为同一件。其余11件均无缩孔、夹杂、气孔、细小裂纹等缺陷,如图8b所示,内部冶金质量得到明显改善,压坑发生率由31%下降到8.3%。



(a) 优化前



(b) 优化后

图8 冒口优化前后X射线探伤结果

Fig. 8 X-ray inspection results before and after riser optimization

3.2 力学性能分析

该环形钛合金铸件力学性能要求:抗拉强度 ≥ 890 MPa,屈服强度 ≥ 820 MPa,伸长率 $\geq 5\%$,断面收缩率 $\geq 10\%$ 。对于试验验证件,在每个铸件本体取2根拉伸试样($d=5$ mm)进行检测,试样为热等静压

状态,并取平均值作为整体表现,得到力学性能结果如表2所示。可以看到,12个试验件均满足力学性能要求,且数据之间差异不大,说明该钛合金铸件力学性能表现比较稳定。

表2 试验件力学性能
Table 2 Mechanical properties of the experimental castings

试验件 编号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 $A/\%$	断面收缩率 $Z/\%$
1 [#]	937	836	11.7	15.7
2 [#]	947	862	12.2	21.8
3 [#]	941	852	10.6	21.8
4 [#]	949	861	13.6	20.0
5 [#]	947	862	12.2	21.8
6 [#]	943	854	12.4	17.8
7 [#]	943	858	11.4	18.9
8 [#]	946	855	12.2	24.9
9 [#]	926	838	10.7	21.8
10 [#]	935	844	10.0	23.2
11 [#]	920	830	10.0	22.1
12 [#]	934	847	11.4	18.9

4 结论

(1)在熔模铸造环形钛合金铸件时,与增加冒口数量和改变冒口形状相比,增大冒口模数的方案对铸件本体的缩孔消除效果最佳。

(2)适当增大冒口模数,有利于延长补缩通道,建立顺序凝固条件,可以改善缩孔缺陷,提高铸件内部冶金质量。

(3)采用ProCAST软件仿真得到的环形钛合金铸件缩孔缺陷情况与实际试验结果较吻合,该模拟方法可应用于类似的钛合金铸件成形模拟。

参考文献:

- [1] 张美娟,南海,鞠忠强.航空铸造钛合金及其成型技术发展[J].航空材料学报,2016,10(3):13-18.
- [2] 李重阳,刘时兵,徐凯,等.大尺寸钛合金阀体石墨型铸造工艺研究[J].铸造,2023,72(2):188-192.
- [3] 郭智立.发动机铝合金活塞铸件缺陷分析及铸造工艺改进[J].铸造,2018,67(1):45-48.
- [4] 李兵,刘剑,蒲正海,等.钛合金阀件“一模多件”铸造工艺优化设计[J].精密成形工程,2023,15(1):86-93.
- [5] 宗学文,刘文杰,熊聪.钛合金叶轮精铸成型数值模拟及实验验证[J].航空材料学报,2019,39(5):103-112.
- [6] 李峰,崔新鹏,南海.基于ProCAST环形钛合金铸件工艺分析及优化[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1469-1471.
- [7] 程亚珍,柴自毫,李渤渤,等.一种医用钛合金铸件熔模铸造工艺设计[J].铸造,2022,71(3):362-366.
- [8] 林枫,叶锦瑞,刘志红,等.铝合金后副车架低压铸造成形工艺设计与试验验证[J].特种铸造及有色合金,2023,43(9):1225-1229.

- [9] 陈正阳, 杨树峰, 谢锦丽, 等. 钛合金异形薄壁壳体铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 中国冶金, 2022, 32 (10) : 105-110.
- [10] 郑蕊, 胡杰, 王胜良, 等. 隔膜阀阀体缩孔缺陷分析与改进 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (9) : 1279-1281.
- [11] 高大明, 王会东, 王珏, 等. TC4钛合金大深腔反向变曲率复杂蒙皮零件成形工艺 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (2) : 48-54.
- [12] 王德季, 李峰, 纪志军, 等. 钛合金砂型铸造冒口补缩距离研究 [J]. 铸造工程, 2023, 47 (6) : 1-5.
- [13] 冉兴, 吕志刚, 曹建, 等. 大型复杂钛合金铸件熔模精密铸造技术 [J]. 铸造, 2021, 70 (2) : 139-146.

Shrinkage Process Improvement and Experimental Verification of the Circular Titanium Alloy Casting

SUN Yan¹, MA Jing¹, ZHANG Guang¹, QIE Xi-wang¹, ZHAO Rui-bin¹, NAN Hai²

(1. Baimtec Material Co., Ltd., Beijing 100094, China; 2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

In view of the shrinkages in a circular titanium alloy casting during investment casting, three optimization schemes of risers were designed and simulated by ProCAST software. The results revealed that the titanium casting under the first process scheme with larger riser modulus presented a better filling capacity and solidification sequence. The best process scheme was selected to trial-produce 12 experimental titanium casting, and the X-ray inspection and mechanical properties tests were carried out. The results indicated that the casting surface was smooth, the inner structure was dense without shrinkages and the mechanical properties met the requirements. This study reduced the incidence of indentation and significantly improved the internal metallurgical quality of the titanium castings.

Key words:

titanium alloy; investment casting; shrinkage; simulation; riser optimization
