DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.020

基于 SLA 技术的钛合金熔模精密铸造工艺

宁二宾,李　曼,杨佳静,蔡银枝
(洛阳鹏起实业有限公司,河南 洛阳 471023)

摘　要:采用 SLA 光固化成型技术和钛合金熔模精密铸造相结合的方法,从 SLA 光固化熔模结构设计及制壳工艺、铸件浇注工艺、热等静压等 3 个方面展开工艺研究。结果表明,SLA 光固化中空腔体熔模原型设计及型壳直接高温焙烧的工艺合理可行,有效解决了型壳开裂的技术难题;采用离心真空浇注和热等静压工艺,可保证复杂铸件的充填性和内部质量;该工艺成功研制出符合技术要求的铸件,其表面粗糙度可达 6.3 μm,尺寸精度达到 CT6 级,综合性能满足国军标要求。

关键词:SLA 光固化;钛合金;熔模铸造

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1103-03

Investment Casting Process of Titanium Alloy Based on SLA Technology

NING Erbin, LI Man, YANG Jiajing, CAI Yinzhi
(Luoyang Pengqi Industry Co., Ltd., Luoyang 471023, China)

Abstract: By adopting the method of SLA light curing molding technology and titanium alloy investment mold precision casting, the technological research was carried out from three aspects, such as SLA light curing investment mold structure design, shell making process, pouring process and thermal isostatic pressure. The results show that the prototype design of SLA light-curing hollow cavity and the direct high-temperature roasting technology of shell are reasonable and feasible, and the technical problems of shell cracking are solved effectively. Centrifugal vacuum casting and thermal isostatic pressure process can ensure the filling and internal quality of complex castings. The surface roughness of the castings could up to 6.3 micron, and the size accuracy is up to CT6. The comprehensive performance meets the requirements of national military standards.

Key words: SLA light-curing; titanium alloy; investment casting

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好,高、低温力学性能优良的特点,在航空、航天、化工、医疗和体育等方面得到了较多的应用,被誉为继铁、铝之后的“第三金属”。熔模精密铸造是金属的先进成形技术之一,可以得到无余量或近无余量的精密复杂结构[1]。但是该工艺流程较长,对于新产品开发来说,缩短模具周期尤为重要,并且市场单件、小批量产品需求也日益扩大。熔模快速原型制造技术直接生产熔模,省去了模具制作成本和时间,为小批量熔模铸件的研发提供了解决方式。

SLA 光固化成型较其它快速原型制造技术具有精确度高的特点。该技术是通过在计算机控制下的紫外激光束,以计算机模型的各分层截面为路径逐点扫描,被扫描区树脂薄层产生固化反应,形成零件的薄层截面。完成一个液态树脂固化层后,固化好的树脂表面再敷上一层新的液态树脂重复扫描、固化,如此反复直至完成整个零件的固化成型[2]。SLA 光固化成型已广泛应用于航天、汽车、电器、医疗等领域的产品原型制造,但目前国内该技术用于熔模精密铸造领域的研究较少,因此研究 SLA 光固化成型在钛合金熔模精密铸造领域的应用具有重要意义。

1　铸件结构分析

研究对象为高速离心风机用闭式叶轮精密铸件,外形轮廓尺寸 ϕ350 mm×153 mm,叶片最小厚度为 2.5 mm,4 枚长叶片与 4 枚短叶片均匀分布,材质为 ZTC4,表面粗糙度要求≤Ra6.3。其三维铸件图如图 1 所示。

该闭式钛叶轮精密铸件壁薄(叶片最薄 2.5 mm)、内腔窄且狭长、尺寸精度和粗糙度要求高。常规的叶轮蜡型制作方式为制作轮盘(带叶片)和轮盖两副模具,分别压制轮盘和轮盖的蜡型,再把两个蜡型组焊

收稿日期:2019-06-17
作者简介:宁二宾(1979-),河南洛阳人,学士,工程师.主要从事钛合金精密铸造工艺技术研究方面的工作.
电话:0379-69967101,E-mail:neb9843025036@126.com

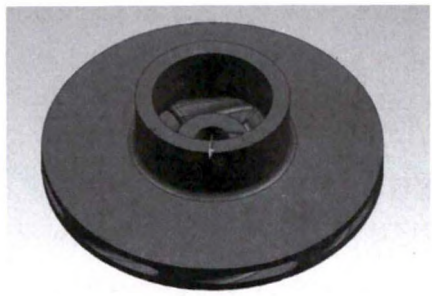

图 1 钛合金叶轮熔模铸件三维图
Fig.1 Three-dimensional diagram of titanium alloy impeller investment casting

在一起。该方式的缺点:①需要两副模具,模具制作成本高且周期长,不适于单件小批量生产;②蜡型组焊时存在装配误差,尺寸精度下降,最终影响叶轮综合质量及效率。

本研究选用整体 SLA 光固化成型原型代替蜡型,通过熔模涂料、高温焙烧等手段制备熔模型壳(焙烧时去除光固化原型),采用真空自耗电弧熔炼,浇注成形之后对铸件进行热等静压以消除内部缺陷,从而获得满足技术要求的合格铸件。

2 铸造工艺设计

本研究重点讨论叶轮铸件 SLA 光固化熔模及型壳制备、浇注和热等静压等工艺设计。

2.1 SLA 光固化熔模及制壳工艺

熔模型壳质量直接影响铸件的质量。其中影响型壳质量的主要因素包括:SLA 熔模原型质量、型壳材料的选择和制备工艺等。

SLA 采用光固化树脂作为成型材料,成型精度高。但 SLA 熔模受热膨胀较大,且只能在高温下烧损,故型壳在焙烧时极易发生涨裂。考虑到上述因素,本研究将叶轮的 SLA 熔模内部设计为中空腔体,使型壳在高温焙烧受热时腔体向内塌陷,防止型壳涨裂;同时在叶片出口及厚大处设置出气口(同时起冒口的作用),光固化树脂模在焙烧时产生的气体得以快速排出,焙烧后用压缩空气吹出气口也可模壳内残余灰分吹走。

钛合金在高温下化学性质极其活泼,可与大多数材料发生反应。目前我国钛合金精铸用型壳面层多采用氧化物陶瓷材料,背层多采用莫来石材料。

氧化钇材料具有较高的强度和高温稳定性,浇注的铸件表面光洁,尺寸精度高等特点。本研究面层材料采用氧化钇耐火材料和醋酸锆粘接剂,面层涂料粉液比控制在 2.5～4.0:1,涂挂两层面层后,转入背层涂挂。

背层材料采用莫来石砂耐火材料和硅溶胶粘接剂。背层先涂挂背 1 层至背 5 层,每层风干不少于 12 h。然后涂挂背 6 层至背 8 层,为增加型壳强度,背 6 层用铁丝网加固,每层风干不少于 8 h,背 8 层只涂挂,不撒砂。

涂挂后型壳不进行脱蜡,直接高温焙烧,使型壳来不及升温膨胀而直接受高温加热塌陷和烧损,避免型壳涨裂。焙烧在台式电阻炉中进行,焙烧温度为 1 050 ℃,保温 4～6 h。其中 SLA 光固化树脂熔模在焙烧过程中直接烧损。图 2 为焙烧后的叶轮型壳。

图 2 钛合金叶轮焙烧后型壳
Fig.2 Shell after calcination of titanium alloy impeller

2.2 铸件浇注工艺

钛叶轮铸件采用真空自耗电弧凝壳炉熔炼离心浇注。所选 ZTC4 原材料化学成分符合GB/T15073-2014《铸造钛及钛合金牌号和化学成分》的要求,具体成分见表 1。

表 1 叶轮铸件原材料化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical Composition of Raw Materials for Impeller Castings

材料	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O	Ti
ZTC4	6.61	3.9	0.047	0.012	0.009	0.04	0.004	0.155	余量

钛合金熔炼必须在较高的真空度或惰性气体(Ar 气)保护下进行,钛熔炼浇注设备主要有真空自耗电弧凝壳炉、电子束凝壳炉、真空感应炉等,其中真空自耗电弧凝壳炉熔炼是目前最经济适用的熔炼方法[3]。它是一种将熔炼与离心浇注连为一体的铸造炉,其特点是在水冷铜坩埚与熔体之间存在一层钛合金凝壳,这层凝壳作为铜坩埚的内衬,用于形成熔池储存钛液。

离心浇注适用于件重和尺寸适中,壁厚比较薄(<4 mm)的复杂钛合金铸件,在离心力的作用下,金属液的流动、凝固和补缩发生了很大的变化,可以提高充型能力,又能提高铸件致密度。

影响离心转速的因素有型壳强度、铸件尺寸、合金成分等。工业生产中最常用的计算离心转速的半经验公式——康斯坦丁诺夫公式:

$$n=29.9\sqrt{G/R}$$

式中,n 为离心转速,r/min;G 为重力系数,G>10 时,

能获得致密的钛合金铸件[4]；R 为铸件内表面半径，cm。

本研究采用 VAM150D 型真空自耗电极凝壳炉进行离心浇注。根据计算采用 200～250 r/min 的离心转速。熔炼时主要工艺参数为：熔炼真空度≤4 MPa，熔炼电流 12 000～18 000 A，熔炼电压 32～40 A，冷却循环水压力 0.2～0.3 MPa，电极熔化速率约 15 kg/min。

2.3 热等静压工艺

热等静压为铸造钛合金生产中的重要工序，原理为将铸件置入密闭耐高压和能够加热至高温的容器内，抽真空然后充入高压的惰性气体，加热升温至预定温度，在高温和各向等静压的作用下，铸件内部封闭的气孔、缩孔、缩松被压实闭合[5]。

热等静压工艺选择的压力介质为氩气，加热温度 920±10 ℃，压力为 110～140 MPa，保压时间为 2.0～2.5 h，随炉冷却至 300 ℃以下出炉。

3 结果及讨论

焙烧后观察型壳表面，无涨裂裂纹等缺陷产生，有效消除了 SLA 光固化树脂熔模高温时膨胀对氧化钇型壳造成的不利影响。说明本研究中设计的中空腔体熔模原型和型壳直接高温焙烧的工艺合理、可行。

浇注完成后，目视观察叶轮铸件质量良好，没有明显的化学粘砂及机械粘砂；叶轮铸件充型完整，表面光洁，无欠铸、裂纹、流痕和冷隔等缺陷；将叶轮铸件与表面粗糙度样块对比，铸件的表面粗糙度优于 $Ra6.3$，满足技术条件要求。

热等静压处理后对铸件进行 X 光检测，内部无气孔、缩孔和夹杂等缺陷，内部质量达到 GJB2896A-2007《钛及钛合金熔模精密铸件规范》中的 B 级要求。

经检验，尺寸精度达到 CT6 级，同时铸件附铸试棒（尺寸 ϕ13 mm×130 mm）的力学性能等指标均满足技术条件和 GJB2896A-2007《钛及钛合金熔模精密铸件规范》的要求。铸件力学性能见表 2。

表 2 叶轮铸件力学性能

Tab.2 Mechanical Properties of Impeller Castings

序号	抗拉强度 Rm/ MPa	屈服强度 Rp/ MPa	断后伸长率 A(%)	断面收缩率 Z(%)
第 1 根	954	827	12.0	21
第 2 根	949	830	11.5	18
GJB2896A-2007	≥835	≥765	≥5	≥12

4 结论

(1)SLA 光固化中空腔体熔模原型模设计及型壳直接高温焙烧的工艺合理、可行，有效解决了型壳脱蜡及焙烧过程中因受热膨胀而导致型壳开裂的技术难题。

(2)通过 SLA 光固化原型成型和精密铸造结合的工艺，成功地研制出尺寸精度高、结构复杂的 ZTC4 钛合金合叶轮铸件，该技术不仅较好的解决了单件小批量、高尺寸精度的钛合金精密铸件的技术难题，而且较大程度上缩短了新产品的研发周期。

(3)采用离心真空浇注和热等静压工艺，可保证复杂薄壁钛合金熔模精密铸件的充填性和内部质量，综合性能满足 GJB2896A-2007 的要求。

参考文献：

[1] 张文毓. 国外钛合金的研究与发展 [J]. 世界有色金属，2009(7)：64-66.

[2] 张署，金天拾，黄仲明. 三维打印的现状与发展前景[J]. 机械设计与制造工程，2013, 42(2)：1-5.

[3] 于思荣，张新平，何镇明，等. 水冷铜坩埚非自耗电极电弧炉熔炼钛合金的组织及硬度研究[J]. 稀有金属材料与工程，2004, 33(3)：247-250.

[4] 周彦邦. 钛合金铸造概论[M]. 北京：航空工业出版社，2000.

[5] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628