DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.012

SLS 成型技术在钛合金熔模铸造中的应用

杨佳静,王涛亮,崔利可,吕　昌
(洛阳鹏起实业有限公司,河南 洛阳 471023)

摘　要:采用 SLS 激光烧结模型与熔模精密铸造相结合的方法成型了单件或小批量钛合金叶轮。对激光烧结的叶轮模型的制备、型壳制备、脱蜡、熔炼浇注等方面进行了研究。结果表明,采用激光烧结的模型制备时间短、成本低;浇注出的铸件表面无裂纹、冷隔、化学粘砂等缺陷,内部无裂纹、夹渣缺陷。铸件的化学成分达到标准要求。在试制阶段,该工艺与传统的工艺相比,SLS 激光烧结的熔模制备时间短,生产成本低。

关键词:钛合金;SLS 激光烧结技术;熔模精密铸造

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0550-03

Application of SLS Forming Technology in Investment Casting of Titanium Alloy

YANG Jiajing, WANG Taoliang, CUI Like, LYU Chang
(Luoyang Pengqi Industrial Co.,Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: Single or small batch titanium alloy impeller was formed by SLS laser sintering model and investment mold precision casting. The preparation of impeller model, mold shell preparation, dewaxing, melting and pouring were studied. The results show that the model of laser sintering has a short time and low cost. There are no cracks, cold insulation, chemical sand and other defects on the surface of castings, and no cracks and slag defects inside. The chemical composition of the casting is up to standard. In the trial production stage, compared with the traditional process, SLS laser sintering has a shorter investment mold preparation time and a lower production cost.

Key words: titanium alloy; SLS laser sintering technology; investment precision casting

钛合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀、生物相容性好等优异性能,在航空、航天、船舶、化工、医疗卫生等行业中得到广泛应用[1-3]。熔模精密铸造是钛合金零件的先进制造技术,具有尺寸精度高、表面质量好、加工量少或无加工余量,在各个领域的应用越来越广泛[4,5]。熔模铸造是用可熔型一次模和一次型(芯)使铸件成型的铸造方法,传统熔模铸造工艺,必须先制作熔模压型模具,用压型压制熔模,然后进行组模、型壳制备等工序,由于必须制作压型模具,生产周期长,生产成本高,不适合新产品的研制及单件生产。采用 SLS (Selective Laser Sintering 选择性激光烧结)快速原型制造技术可直接制造熔模原型,省去了压型模具制作的时间和成本,非常适合新产品研制及单件生产。

SLS 技术作为快速原型制造技术的一种方法,在铺粉平面上铺展一层烧结粉末,预热装置将其加热到原型材料的熔点或软化点以下的温度,激光器按照零件的分层信息进行有选择的烧结,逐层叠加,直到整个零件烧结完成,去除多余的粉末后,即得到所需产品的原型熔模。SLS 技术采用的成形材料主要是低熔点物质,可以是熔模铸造用粉料、PS (Polystyrene,缩写 PS,聚苯乙烯,一种热塑性塑料)粉等,用这些材料快速烧结的熔模,可直接或者经过表面处理后进行熔模铸造,SLS 技术在熔模铸造领域应用前景非常可观[6]。但是,国内关于快速烧结技术在钛合金熔模铸造领域的应用研究偏少,本文以钛合金叶轮为研究对象,开展了 SLS 成型技术在钛合金熔模精密铸造中的应用研究。

1　铸件结构及难点分析

以某叶轮为研究对象,图 1 为钛合金叶轮三维

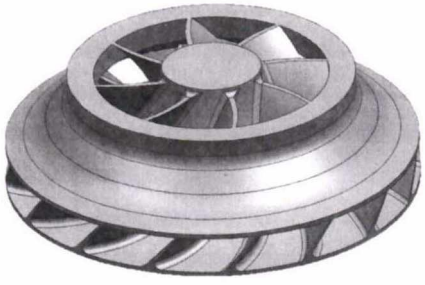

图 1 叶轮三维示意图
Fig.1 3D schematic diagram of the impeller

收稿日期:2020-04-02

作者简介:杨佳静(1990-),女,河南洛阳人,学士,工程师.主要从事有色合金精密铸造技术研究方面的工作.
电话:0379-69967101,E-mail:18749491909@163.com

视图。该铸件外廓尺寸为 ϕ400 mm×100 mm，质量为 9 kg，叶片数量长短共 18 片，厚度 4；，轴径为 50 mm。钛合金叶轮铸件内部质量需满足 GJB2896A-2007 中Ⅱ类 B 级要求。

要制备的铸件为闭式叶轮，由 18 个叶片与前、后盖板组成，前、后盖板之间存在 30 mm 型腔。该铸件为试制件，常规的叶轮熔模制作方式为制作金属模具压制蜡型。该方式的缺点：①模具制作成本高且周期长；②蜡型壁薄，在制备熔模过程中，易产生变形、破裂现象，造成尺寸精度下降，最终影响叶轮综合质量及效率。本研究采用 SLS 激光粉末烧结成型原型代替蜡型，通过熔模涂料、脱蜡、焙烧等手段制备熔模型壳，采用真空自耗电弧熔炼浇注成形，从而获得满足技术要求的合格铸件。

2　铸造工艺设计

2.1　叶轮模组的制作工艺

(1)SLS 激光烧结原型　建立叶轮的三维模型，对叶轮整体模型的各个部位按一定的尺寸比例进行预缩放处理。模拟、优化、调节参数后，首先对模型进行分层处理；然后在工作台上均匀铺上一层 PS 粉末进行激光烧结，一层烧结完成后再铺粉、扫面、烧结，直至全部烧结完成；完成后得到带未烧结粉末的叶轮模型，对叶轮模型进行清粉处理。该 SLS 成型模形状、结构完整，尺寸精度高，变形小，满足设计要求。

(2)浸蜡处理　为了改善 SLS 成型模原样的表面粗糙度，将清粉处理完成后的叶轮模型原样在自制的浸蜡机构中进行渗蜡处理，蜡温设定在 58～63 ℃，模型匀速下降至全部浸入蜡池中浸泡，待原型件表面无气泡冒出，匀速将原型件提出蜡池。等浸蜡处理的叶轮模型表面蜡料凝固后进行表面修整，去除表面多余蜡。SLS 成型模原样表面的烧结痕迹、微小棱角及清理模型时造成的表面凹坑等缺陷得到弥补，表面粗糙度也得到保证。图 2 为叶轮熔模实物图。

(3)组焊模组　将用中温蜡压制的浇道盘与

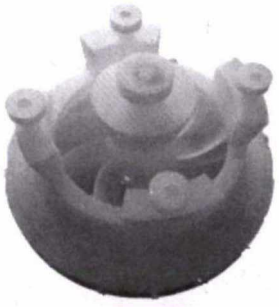

图 2　叶轮 3D 打印实物图
Fig.2　3D printed impeller pattern

PS 粉烧结的原型组焊到一起形成所需要的模组。

2.2　叶轮型壳制备工艺

(1)型壳涂料　由于钛合金在高温下化学性质及其活泼，可与大多数材料发生反应。本叶轮型壳制造面层采用氧化钇耐火材料和二醋酸锆粘结剂，涂挂两层面层后，转入背层涂挂。背层材料采用莫来石耐火材料和硅溶胶粘接剂。制备工艺流程如图 3。

(2)型壳脱蜡、去除 PS 模样，焙烧　常规熔模铸造型壳采用高压蒸汽脱蜡，但 SLS 成型模用 PS 粉为高分子化合物，熔化温度高，熔料粘度大不利于脱蜡，极易残留在型壳中，最终造成铸件产生夹渣缺陷。SLS 成型模不能采用高压蒸汽脱蜡法，本试验中型壳采用高温焙烧汽化脱蜡。脱蜡去 PS 模工艺如下：型壳采用台式电阻炉进行脱蜡，焙烧炉升温至 200～300 ℃，将型壳缓慢放入焙烧炉内脱蜡架上，使大部分蜡流出。而后升温至 600～750 ℃，保温 2～3 h，烧失残余部分 PS 粉原型。脱蜡后继续升温至 1 000～1 100 ℃，保温 3～4 h，进行型壳的高温焙烧。叶轮型壳焙烧后，观察发现，型壳面层表面光洁，无剥落情况，型壳质量良好。

2.3　熔炼浇注

熔炼浇注是在 150 kg 真空自耗电极凝壳炉中进行，浇注选用经过两次熔炼的 ZTC4 铸锭。型壳按照要求进行组型和紧固，装炉后进行抽真空，当炉内真空度小于 4 Pa 时开始熔炼，铸件浇注完成后随炉冷却 2 h 后出炉。图 4 为浇注清壳后的铸件。

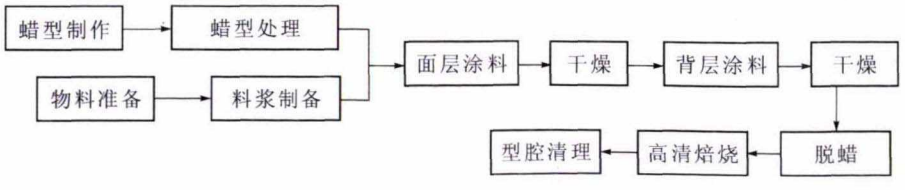

图 3　型壳制备流程
Fig.3　Shell preparation process

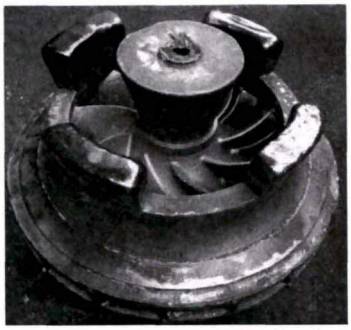

图 4 清壳后铸件实物图
Fig.4 The impeller casting after shell removal

3 结果与讨论

通过本研究确定的工艺方案及工艺参数，成功的研制出合格的叶轮铸件。

3.1 表面及内部质量

铸型清理和浇注系统切割后，目视观察，铸件表面光洁，没有发生化学粘砂现象，铸件进行荧光渗透检测，铸件表面无裂纹、冷隔等铸造缺陷。经 X 射线检查铸件内部没有夹渣、裂纹缺陷。表明采用 SLS 成型技术烧结制备的熔模表面涂挂性好，型壳的质量高，型壳采用高温气化法脱蜡，PS 粉末材料能够完全去除，没有残留；氧化钇制备的型壳强度符合要求；氧化钇面层惰性符合要求，几乎不与钛液发生反应。

3.2 化学成分

采用 FOUNDRY-MASTER Xpert 全谱直读光谱仪和 G8 GALILEO ONH 氧氮氢分析仪进行叶轮铸件的化学成分分析，铸件的化学成分结果见表 1。

上述结果表明，叶轮铸件的化学成分符合 GJB2896A-2007 标准要求。试验结果证明，SLS 快速成型模熔模铸造工艺能够保证钛合金铸件的化学成分。

表 1 铸件的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of the casting

ZTC4	主量元素			杂质元素(≤)					
	Ti	Al	V	Fe	Si	C	N	H	O
标准值	余量	5.50～6.80	3.50～4.50	0.300	0.150	0.100	0.050	0.015 0	0.200
实测值	余量	6.31	4.06	0.085	0.026	0.018	0.033	0.002 4	0.178

4 结论

(1)SLS 激光烧结熔模与中温蜡组成的模组型壳直接在大气中进行脱蜡、去除 PS 模样，焙烧。有效解决了型壳脱蜡过程中，SLS 激光烧结模因受热膨胀而导致型壳开裂造成铸件缺陷的技术难题。

(2)通过 SLS 激光烧结熔模和熔模精密铸造结合的工艺，不仅能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铸造难题，而且在较大程度上提高生产效率，降低生产成本。

(3)采用快速成型模熔模铸造工艺，成功完成 ZTC4 钛合金叶轮铸件的试制，铸件表面无裂纹、冷隔、化学粘砂缺陷，铸件内部无裂纹、夹渣缺陷，铸件的化学成分合格，铸件质量满足 GJB2896A-2007 的要求。

参考文献：

[1] 谢成木. 钛及钛合金铸造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
[2] 霍东兴，梁精龙，李慧，等. 钛合金研究及应用进展[J]. 铸造技术, 2016，37 (10)：2065-2066.
[3] 曹运红. 钛合金成型工艺在飞航导弹上的应用研究 [J]. 飞航导弹，2002(7): 50-60.
[4] 阎峰云，陈基东，马孝斌. 钛合金熔模铸造技术[J]. 中国铸造装备与技术，2009(2):1-5.
[5] 谢华生，刘时兵，苏贵桥，等，我国钛合金精铸件铸造技术的发展及应用[J]. 特种铸造及有色合金，2008(S1):462-464.
[6] 黄乃瑜，万仁芳，董选普，等. 中国模具工程大典[M]. 北京：电子工业出版，2007.

(上接第 549 页)

于面二层涂料的粉液比小于面一层，所以面二层的失水重量就大于面一层，背一层涂料的粉液比增大，所以失水重量就减少，背二层涂料的粉液比降低，失水重量就增加。

3 结论

(1)干燥 8 h 和 20 h 后的型壳质量无明显差异，型壳均致密，光滑，无剥落及开裂。

(2)背层干燥时间 20 h 和 8 h 相比，失水重量无明显变化，20 h 干燥效果和 h 干燥效果基本相同。

(3)粉液比影响型壳失水重量，粉液比越大，失水重量越小，粉液比越小，失重重量越大。

参考文献：

[1] 李海树.熔模铸造制造成本降低的几种工艺方法[J]. 特种铸造及有色合金，2008，28(4)：292-294.
[2] 马波. 快干硅溶胶应用研究 [J]. 特种铸造机有色合金，2005,25 (4):234-236.
[3] 姜不居. 熔模铸造手册[M]. 北京：机械工业出版社，2000.