

一种医用钛合金铸件熔模铸造工艺设计

程亚珍, 柴自毫, 李勃勃, 杜延乐

(洛阳双瑞精铸钛业有限公司, 河南洛阳 471023)

摘要: 一种医用钛合金铸件采用ZTC4钛合金, 由熔模铸造工艺生产。通过对浇注系统进行模拟分析, 确定适用于生产该医用钛合金铸件的浇注系统。面层采用1#粘结剂制壳工艺、加固层硅溶胶制壳工艺, 采用蒸汽脱蜡及合适的焙烧工艺、离心浇注工艺获得医用钛合金铸件, 铸件经过修整、热等静压等工序获得了内部及外观质量好、尺寸精度高的钛合金铸件, 批量试制产品的一次合格率达到97.6%, 表明该熔模铸造工艺方法适合生产结构相似的医用钛合金铸件。

关键词: 医用钛合金铸件; 熔模铸造; 浇注系统; 制壳工艺; 离心浇注

钛合金具有强度高、比重小、耐腐蚀性好等特点, 在航空、航天等领域应用广泛^[1]。随着钛在生物性能、物理性能等方面与人体环境相适应的发现以来^[2], 钛合金作为生物材料在人体植入、假肢等开始生产使用。医用钛合金铸件的体积、重量都比较小, 且壁比较薄, 钛合金熔模铸造能生产各种形状复杂的近净和净尺寸的薄壁钛合金构件^[3], 适合的生产工艺为精密铸造, 植入人体类医用钛合金质量要求必须无任何铸造缺陷。目前该产品机加工后端面有轻微的缩松缺陷, 比例高达40%以上, 且在底部有变形, 与其他医疗器械配合时存在干涉, 缩松缺陷及变形为该产品生产的质量瓶颈。

本文通过对钛合金铸件的结构、材料等进行分析, 确定该医用钛合金铸件采用硅溶胶熔模铸造工艺生产, 通过设计合理的铸造工艺方案, 获得良好的铸件质量, 为该医用钛合金铸件的批量化生产提供必要技术参考。

1 铸件结构及技术要求分析

一种医用钛合金铸件见图1, 尺寸公差为GB/T 1804 m级。该产品的壁厚比较均匀, 最厚的区域为顶面凸台处, 最厚处壁厚为9 mm, 最薄处为下部骨托部位, 最薄处壁厚为2 mm, 壁厚比为4.5:1, 在壁厚比大的交接处有产生微裂纹的倾向。由于薄壁结构的区域比较大, 适合采用熔模铸造工艺进行生产, 在铸造过程中, 由于2 mm壁厚区域的高度为42 mm, 骨托底部的宽高比为4:1, 在此部位易产生变形。顶面凸台壁厚区域易产生缩松、缩孔缺陷, 此处探伤要求没有任何缺陷, 以上技术要求增大了该医用钛合金铸件的生产难度。

该医用钛合金铸件的材质为Ti6Al4V, 其化学成分见表1。Ti-6Al-4V具有良好的物理性能和生物性能, 在生物领域中应用广泛, 尤其是生物植入领域。

2 浇注系统设计

该医用钛合金铸件对顶端平面的铸造质量要求非常严格, 同时骨托部位不能有变形, 这对铸件凝固时的温度场与应力位移场的要求比较严格, 浇注系统设计合理性与铸件的质量密切相关, 利用模拟软件对浇注系统进行模拟, 确定适合于生产该医用钛合金铸件的浇注系统。

作者简介:

程亚珍(1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事钛合金熔模铸造工艺设计工作。
电话: 0379-67256991,
E-mail: 3504169@qq.com

中图分类号: TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)03-0362-05

基金项目:

国家重点研发计划项目(2020YFB2008300、2020YFB2008301)。

收稿日期:

2021-08-26 收到初稿,
2021-11-25 收到修订稿。

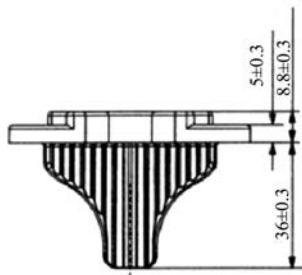


图1 铸件结构
Fig. 1 Casting structure

表1 钛合金铸件化学成分

Table 1 Chemical compositions of titanium alloy castings

$w_B/\%$

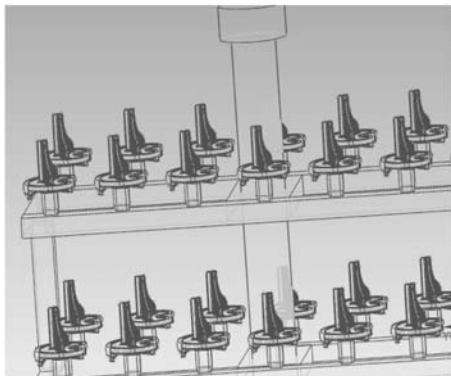
主要成分			杂质 \leq				
Al	V	Ti	Fe	C	N	H	O
5.5~6.75	3.5~4.5	基体	0.30	0.08	0.05	0.010	0.20

根据产品的结构特点、合金的充型凝固特性、生产的实用性，确定采用离心浇注、底注式浇注系统。由于骨托处的宽高比为4:1，厚度为2 mm，易产生变

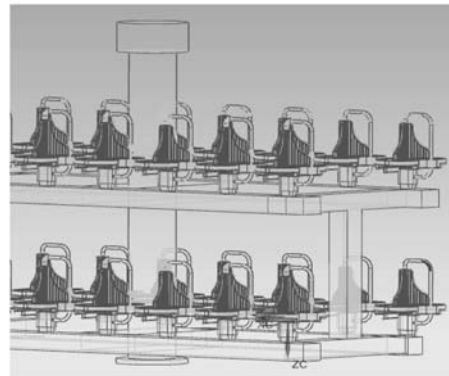
形，设计浇注系统时有两种方案（见图2）。方案一，采用底注式浇注系统，离心转速为100 r/min；方案二，采用底注式浇注系统，但是在骨托部位设计辅助浇道，离心转速为100 r/min。对两种方案进行模拟，分析凝固时的温度场与应力场，比较缩松、缩孔与铸件应力位移的分布情况，确定最佳方案。

2.1 方案一的模拟结果

图3为方案一的模拟结果，从图中缩松缺陷分布可以看出，凝固后缩松缺陷只有一处，在内浇道处，在铸件的其他位置没有缩松缺陷，去除浇道时保留10 mm的浇道余量，钛合金铸件热等静压时，可将缩松转移至残留浇道内，铸件内部的缩松缺陷通过热等静压即可消除。从应力位移场的分布情况可以看出铸件的应力分布相对比较均匀，应力差小于60 MPa，在骨托壁厚比4.5:1处，应力差小于20 MPa，应力分布比较均匀，不会造成微裂纹的产生，且铸件不易在钛合金凝固时产生变形。从应力位移图中可以看出，骨托长宽比为4:1的位置，最终凝固后，最大位移量小于0.2 mm，0.2 mm的位移在最小壁厚的尺寸公差范围内，符合图



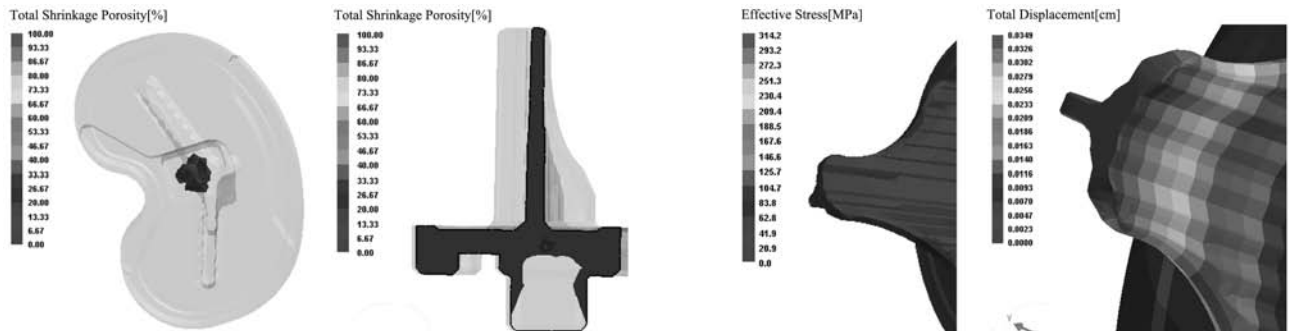
(a) 方案一



(b) 方案二

图2 浇注系统

Fig. 2 Gating system



(a) 缩松缺陷分布

(b) 应力位移分布

图3 方案一模拟结果

Fig. 3 Simulation results of scheme 1

纸的设计要求。

2.2 方案二的模拟结果

图4为方案二的模拟结果，从缩松缺陷分布图中可以看出，辅助浇道的引入改变了铸件凝固的温度场分布，除了在主浇道的热节处产生缩松外，在大平面处引入了新的缩松缺陷，主浇道的热节处的缩松去除浇道时保留10 mm的浇道，钛合金铸件热等静压时，可将缩松转移至残留浇道内，铸件内部的缩松缺陷通过热等静压即可消除。但大平面处的缩松缺陷，由于没有引缩通道，铸件热等静压后会在大平面缩松位置的表面产生静压凹坑，该位置不允许补焊，该缺陷的产生增加了铸件报废的风险。从应力位移场分布情况可以看出，铸件整体的应力场分布相对均匀，在骨托壁厚比4.5:1处，应力的差异在100 MPa以内，该位置不会产生微裂纹，但是在骨托底部，长宽比为4:1处的位置，由辅助浇道的增加，造成铸件凝固时应力差大于500 MPa，此处应力比较大，铸件凝固时有变形的风险。从应力位移图中可以看出，骨托长宽比为4:1的位置，最终凝固后，最大位移0.3 mm以上，0.3 mm的位移超出最小壁厚的尺寸公差范围，此位置的造型全部由R角组成，采用手工打磨不能保证造型结构的完整性，尺寸超出公差范围影响钛合金铸件的使用性能。

3 熔模铸造生产工艺

通过对方案一、方案二进行模拟分析比较，对铸件凝固时温度场及应力位移场进行分析比较，确定方案一为适合生产该医用钛合金铸件的工艺方案，采用该浇注系统工艺方案试制48件产品。

3.1 蜡模模组的制备

采用中温蜡作为模料制备蜡模，由于产品骨托部位的壁薄，且没有防变形支撑，蜡模取出后需即刻放

入温水中进行冷却，减少了蜡模阶段的收缩变形。蜡模组焊前，使用清洗液清洗蜡模，除去蜡模表面的油脂等杂物，使用温水清洗去除清洗液并风干蜡模，按照方案一的浇注系统组焊蜡模模组。

3.2 型壳制备及浇注

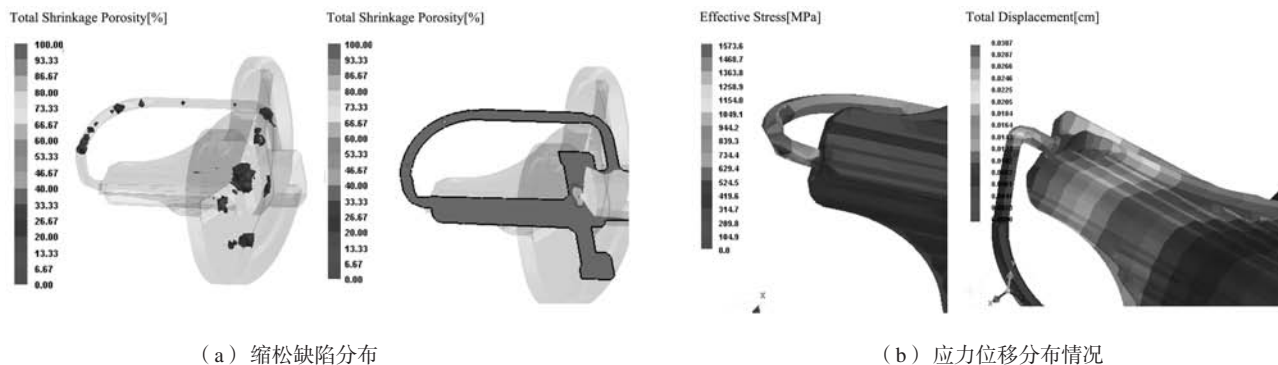
钛合金的化学活性很高，几乎能与所有的铸型材料产生界面反应，医用钛合金铸件对表面质量要求非常严格，制备型壳时面层工艺非常关键，选择1[#]粘结剂，稀土粉、锆砂作为耐火材料，并加入润湿剂、消泡剂配制面层浆料，配制面层浆料时，粘度值控制在30~40 s。加固层物料采用硅溶胶、莫来粉、莫来石，并加入纤维材料增加透气性与提高型壳的退让性，减少微裂纹的产生倾向，制壳时层数为7层半，其中半层只浸浆不撒砂。为了保证型壳的强度，每层型壳必须干燥充分，保证每层型壳的干燥时间不低于12 h。

脱蜡前将型壳的手柄卸除，放入蒸汽脱蜡釜进行脱蜡，脱蜡时间控制在5 min之内，防止面层材料产生回溶造成铸件掉渣缺陷的产生。脱蜡后进入焙烧炉进行焙烧，焙烧温度为1 000 ℃，保温5 h。型壳为热壳浇注，型壳焙烧后型壳温度不低于50 ℃，采用真空自耗电极凝壳浇注，真空度≤1 Pa，采用离心浇注，离心转速为100 r/min，保温30 min后出炉。采用机械振动清壳，清壳后铸件进行热等静压。

3.3 铸件质量

对生产的48件医用钛合金铸件的内部质量进行X光探伤分析、表面质量进行荧光分析、铸件尺寸进行全尺寸扫描及专用工装辅助检测，综合分析产品的质量情况。

铸件探伤的结果见图5，从图中看出，经过热等静压后，铸件一次探伤没有任何缺陷，一次探伤结果与模拟的结果一致，铸件内部质量完全合格，符合医用钛合金铸件的技术要求；荧光检验的结果见图6，从



(a) 缩松缺陷分布

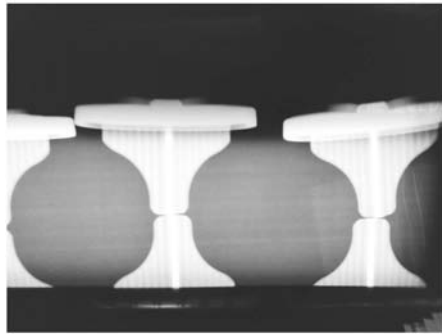
(b) 应力位移分布情况

图4 方案二模拟结果

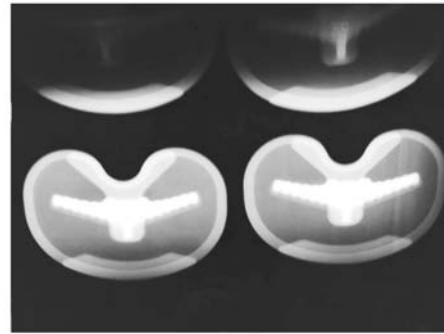
Fig. 4 Simulation results of scheme 2

图中看出，铸件所有位置一次荧光完全合格，铸件没有任何表面微裂纹的产生，铸件外观质量符合医用钛合金铸件的技术要求；铸件尺寸结果见图7，从图中看出，铸件全尺寸扫描结果与铸件符合铸件图纸尺寸，

对骨托部位的变形检测除了参照尺寸扫描结果外，采用专用检测工装进行检测，骨托部位能顺利放入检测工装，尺寸符合图纸要求。



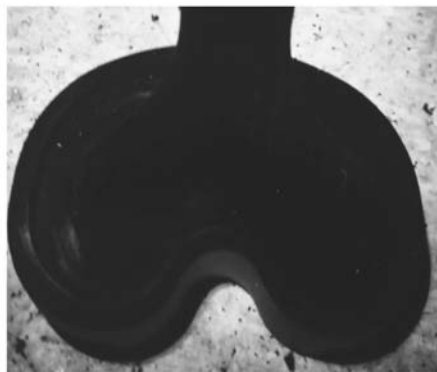
(a) 端部



(b) 顶部

图5 医用钛合金铸件探伤情况

Fig. 5 Flaw detection of medical titanium alloy casting



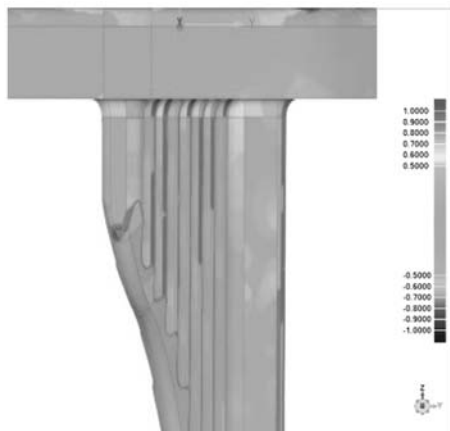
(a) 端部



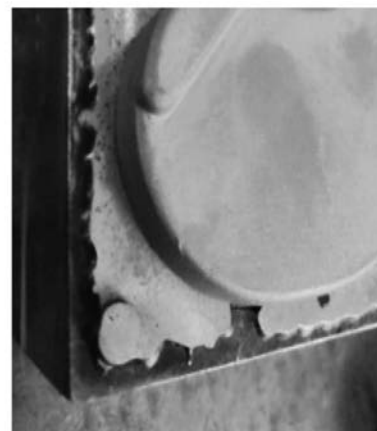
(b) 顶部

图6 医用钛合金铸件荧光情况

Fig. 6 Fluorescence result of medical titanium alloy casting



(a) 尺寸扫描结果



(b) 检具检验

图7 医用钛合金铸件尺寸

Fig. 7 Dimension of medical titanium alloy casting

4 生产验证

采用该熔模精密铸造工艺小批量试制该医用钛合金铸件后,按照该工艺开展大批量的生产,生产铸件300件,其中3件产品非加工面各有1处低密度夹杂缺陷报废,铸件探伤的一次合格率99%,剩余297件产品的荧光一次合格率为100%,铸件全尺寸检测符合图纸要求。

5 结论

(1) 该医用钛合金结构类的铸件采用熔模精密铸造生产时,底注式模架组焊浇注系统为适合该类铸件

的浇注系统,浇注时需采用离心浇注,离心转速为100 r/min,铸件缩孔、缩松缺陷基本消除。

(2) 制壳时采用1#粘结剂、稀土粉的面层制壳材料,且粘度值需控制在30~40 s,能保证型壳的面层制壳质量,保证不产生高密夹杂缺陷。在型壳材料中增加纤维,提高型壳透气性与退让性,减少铸件表面微裂纹的产生倾向。

(3) 型壳浇注时采用热壳、真空浇注(真空度 ≤ 1 Pa),提高了钛液的流动性,提高了铸件的内部质量。

参考文献:

- [1] 吴鹤,戴介泉,谢成木. 盘形钛合金铸件铸造工艺的优化设计[J]. 铸造, 2000, 49(9): 551-553.
- [2] 宁聪琴,周玉. 医用钛合金的发展及研究现状[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(1): 100-106.
- [3] 黄东,谢成木,南海,等. 国外钛和钛合金熔模精铸涂料浆料的研究和发展[J]. 铸造, 2004, 53(3): 179-182.

Process Design of Investment Casting of a Medical Titanium Alloy Casting

CHENG Ya-zhen, CHAI Zi-hao, LI Bo-bo, DU Yan-le
(Luoyang shuangrui precision casting titanium Co., Ltd., Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract:

A medical titanium alloy casting was made of ZTC4 titanium alloy and produced by investment casting process. Through simulation analysis of the gating system, the suitable pouring system for the production of the medical titanium alloy casting was determined. Surface shell adopted 1# binder shell making process, reinforced shell was silica sol making process, and steam dew axing and appropriate roasting process, centrifugal casting process were used, followed by HIP, dressing process to obtain titanium alloy castings with good internal and external quality and high dimensional accuracy. The first pass rate of batch trial products was 97.6%, indicating that the investment casting technology is suitable for the medical titanium alloy casting with similar structure.

Key words:

medical titanium alloy casting; investment casting; gating system; shell making process; centrifugal casting
