

薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化

程亚珍 李渤渤 孙冰 杜延乐 孙宏喆 刘茵琪
(洛阳双瑞精铸钛业有限公司)

摘要 利用数值模拟技术对某薄壁复杂钛合金铸件的温度场、应力场进行了模拟,确定了适合于生产该铸件的铸造工艺。该方案模拟的温度场分布比较均匀,利于铸件的均衡凝固,铸件的内部品质较好,模拟的应力场分布比较均匀,整个铸件的应力差最小。根据模拟的结果,对大壁厚比部位采用冒口补缩。采用优化后的铸造工艺生产铸件,制造出与模拟结果一致的符合技术要求的优质铸件。

关键词 数值模拟;钛合金铸件;铸造工艺

中图分类号 TG249.5;TG146.23

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation and Process Optimization of Investment Casting Process for Thin-walled Complex Titanium Alloy Casting

Cheng Yazhen, Li Bobo, Sun Bing, Du Yanle, Sun Hongzhe, Liu Yinqi
(Luoyang Sunrui Titanium Precision Casting Co., Ltd.)

Abstract: The temperature field and stress field of a thin-walled complex titanium alloy casting was simulated by numerical simulation technology, and the casting process suitable for the casting was determined. The temperature field distribution simulated by the scheme is relatively uniform, which is conducive to the balanced solidification of the casting. Internal quality reaches optimal, and the simulated stress field distribution is relatively uniform with the lowest stress difference in the whole casting. According to the simulation results, riser feeding is adopted for the parts with large wall thickness ratio. High quality castings which are consistent with the simulation results and meet the technical requirements are effectively produced by optimized casting process.

Key Words: Numerical Simulation, Titanium Alloy Casting, Casting Process

随着航空航天技术的进步,钛合金铸件的结构向轻量化、薄壁化、整体化方向发展。钛合金流动性差,在凝固过程中易产生缩孔、缩松缺陷^[1];浇注温度高、热导率偏低,成形过程中易产生热裂及变形等缺陷^[2]。某钛合金铸件(见图1)为薄壁复杂腔体类结构,材质为ZTC4

钛合金,主体结构为异形结构的腔体,腔体尺寸为530 mm×70 mm×95 mm,两侧平均壁厚为2 mm,有两个凸台,连接处的壁厚为32 mm;另外两侧壁厚为4 mm,该处壁厚比为16:1。工艺难点为:一是壁厚比大,收缩应力差异大,且壁厚较薄,易产生穿透性裂纹,采用补

收稿日期:2021-06-24;**修改稿收到日期**:2021-11-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(2020YFB2008300)

第一作者简介:程亚珍,女,1982年出生,高级工程师,河南洛阳(471023),E-mail:3504169@qq.com

通信作者:李渤渤,男,1987年出生,高级工程师,河南洛阳(471023),E-mail:libobo0816@126.com

引用格式:程亚珍,李渤渤,孙冰,等.薄壁复杂钛合金铸件熔模铸造工艺模拟及优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(6):780-784.

CHENG Y Z, LI B B, SUN B, et al. Numerical simulation and process optimization of investment casting process for thin-walled complex titanium alloy casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):780-784.

[3] 宋鲁南,刘嘉斌,黄六一,等.强变形对Cu-Cr合金组织性能的影响[J].金属学报,2012,48(12):1459-1466.

[4] 赵冬梅,董企铭,刘平,等.探索高强高导铜合金最佳成分的尝试[J].功能材料,2001,32(6):609-610.

[5] JIA S G, LIU P, SONG K X, et al. Microstructures and properties of Cu-Cr-Zr in-situ composites[J]. Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7):1334-1338.

[6] GUO S H, ZHANG M, PENG G Y, et al. Aging precipitation of Cu-Cr-Zr-Y alloys with different heat treatment[J]. Dongbei Daxue Xuebao, 2010, 31(1):23-26.

[7] 陈小波,姜锋,陈蒙,等.固溶时效后高强高导Cu-Cr-Zr合金的性能与显微组织研究[J].宇航学报,2009,30(4):1673-1678.

[8] 朱永兵,慕思国,李华清,等.Cu-Cr-Zr系合金变形过程中的组织分析[J].材料工程,2009(7):9-11.

[9] 管桂生. Cu-Cr-Zr合金线材非真空上引连铸生产工艺研究[J].云南冶金,2021(4):97-103.

[10] 郭大为,管桂生.连续挤压对铸态Cu-Cr-Zr合金性能的影响[J].云南冶金,2020(3):88-92.

(编辑:刘晨辉)

焊方式修复时,壁厚会产生腔体塌陷、变形;二是铸件多处有壁厚比大于10的热节区,易产生缩孔,消除缺陷时由于壁厚比大,会使铸件变形严重。这些问题可通过铸造工艺进行改善,利用ProCast模拟软件对工艺进行模拟及优化,提高工艺的合理性,降低生产成本,提高铸件的合格率。

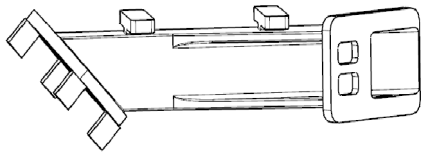


图1 钛合金铸件
Fig.1 Titanium alloy casting

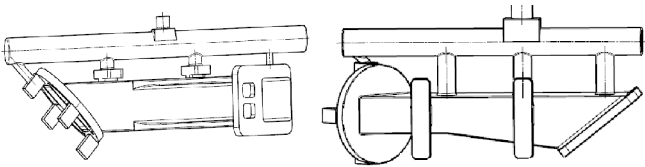
1 铸造工艺模拟

1.1 铸造工艺设计

钛合金铸件采用熔模精密铸造生产,由于铸件的高度小于100 mm,且壁厚比大于10,对钛液的补缩要求比较高。主体结构腔体的壁厚比较薄,腔体4个面的壁厚均小于5 mm,

对钛液的充型性要求也比较严格,选择顶注式浇注系统,即钛液由顶面流入型腔,易于充满且有利于形成自上而下的凝固顺序,补缩效果较好。顶注式浇注系统

的设计有两种方案(见图2),方案1是内浇道设在壁厚为4 mm的面上,位于大壁厚比的凸台处,在法兰与圆盘端面设置 $\phi 10$ mm的内浇道,便于补缩凸台,实现顺序凝固;方案2内浇道设在壁厚为2 mm的面上,两个大壁厚比的凸台位于浇注的侧面,并在圆盘处设置 $\phi 10$ mm的内浇道,利用顶注式浇注系统及铸件结构的特点,实现均衡凝固。



(a) 方案1 (b) 方案2

图2 浇注工艺方案设计

Fig.2 Process scheme for gating system

1.2 方案1的数值模拟

图3和图4分别为方案1充型模拟结果和应力场。由图3可以看出,钛合金液自下而上进行充型,最后充型区域为腔体的凸台处、圆盘的顶部凸台处、法兰的顶部浇道处,整个充型过程平稳。最先凝固的是腔体壁薄的两侧面以及底部区域,最后凝固的是腔体的顶部凸台处、圆盘的凸台处。从图3j可以看出,大缩孔产生的位置位于圆盘的4个厚壁凸台处、法兰两个热节处,以上

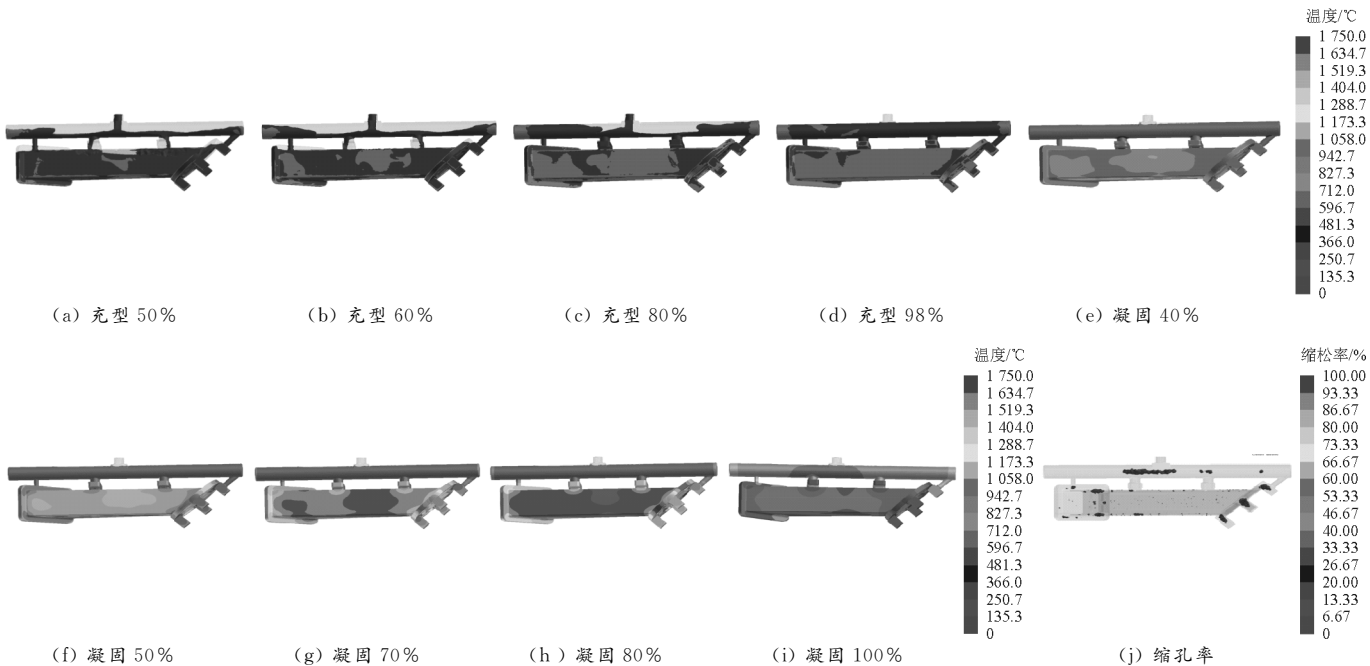


图3 方案1的充型凝固过程模拟结果

Fig.3 Simulation results of the filling solidification in scheme 1

位置为孤立液相区,容易形成缩孔。

由图4可以看出,铸件经过155 s后完全凝固,在22 s时,2 mm壁厚的腔体处开始产生约400 MPa应力,其余位置应力低于100 MPa。随着凝固时间延长,

在98 s时腔体壁厚2 mm处的应力增大至1 100 MPa,腔体壁厚4 mm处产生600 MPa的应力,在155 s时凝固结束,腔体壁厚2 mm处的应力增大至1 500 MPa左右,呈不均匀状态分布,腔体壁厚4 mm处应力为700

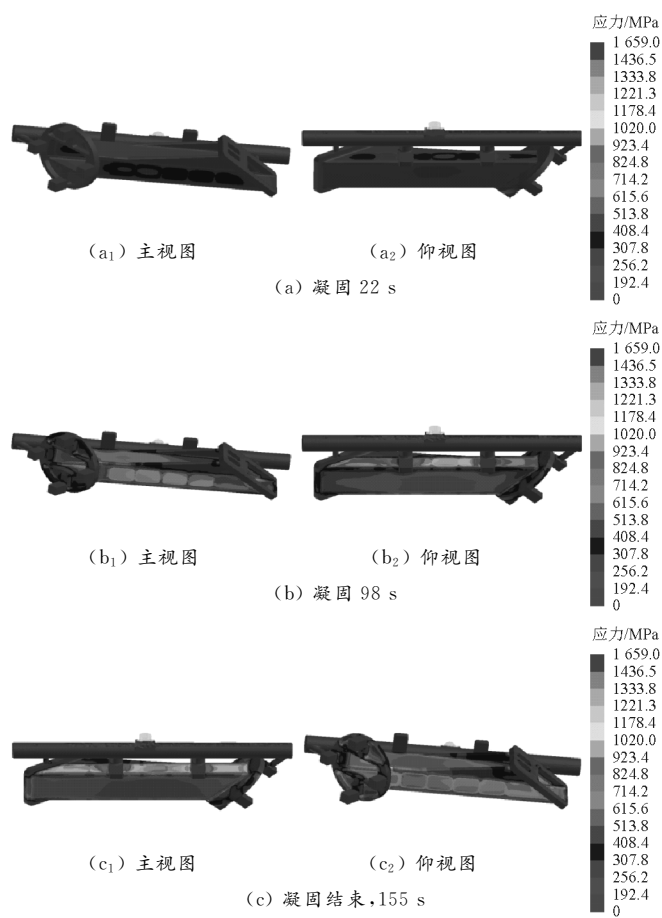


图 4 方案 1 的应力模拟结果

Fig.4 Stress simulation results of scheme 1

MPa,其余位置的应力低于 300 MPa,铸件的应力分布差异大。在 2 mm 的大壁厚比处,应力的差异在 1 000 MPa 以上,极易造成裂纹产生。

1.3 方案 2 的数值模拟

图 5~图 7 为方案 2 的充型及凝固过程模拟结果。可以看出,钛合金自下而上进行充型,由于大凸台厚壁处位于侧面,凝固时与腔体顶部浇道处的凝固温度场一致,其余铸件区域的凝固温度场一致。铸件整体处于均衡凝固状态,薄壁的区域先凝固,厚壁及浇道处最后凝固。由于壁厚差异较大,凝固过程中,厚壁的位置缺乏补缩,在两个大凸台处、圆盘的凸台处、法兰的热节处为孤立液相区,都会产生大缩孔缺陷,见图 7。

图 8 为方案 2 应力场的模拟结果。可以看出,经过 186 s 完全凝固。在 60 s 时,腔体在 2 mm 壁厚的腔体处开始产生 500 MPa 应力,其余位置应力低于 100 MPa;在 136 s 时,腔体壁厚 2 mm 处的应力增大至 800 MPa,腔体壁厚 4 mm 处产生 540 MPa 的应力,其余位置的应力小于 100 MPa;凝固结束时,腔体壁厚 2 mm 处的应力增大至 900 MPa,腔体壁厚 4 mm 处产生 800 MPa 的应力,其余位置的应力低于 200 MPa,应力分布差异不大。在 2 mm 的大壁厚处,应力差在 500 MPa

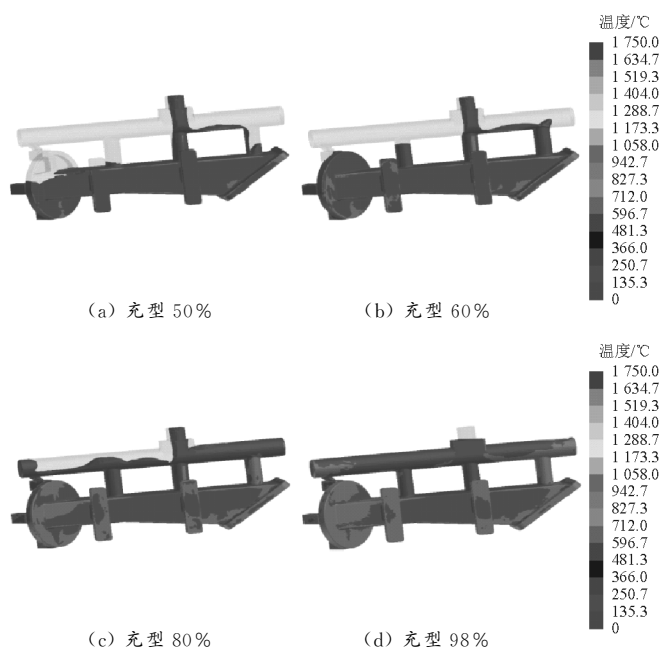


图 5 方案 2 的充型结果

Fig.5 Simulation results of the filling solidification in scheme 2

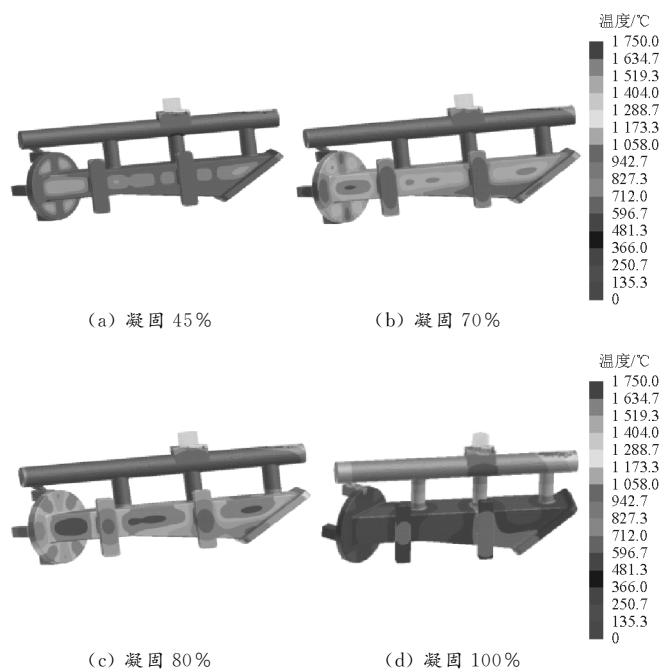


图 6 方案 2 的凝固结果

Fig.6 Simulation results of the filling solidification in scheme 2

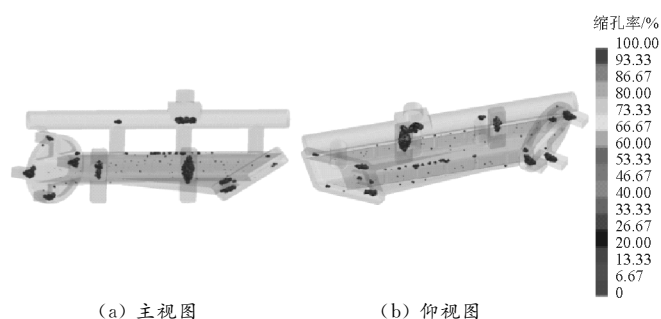


图 7 方案 2 的缩孔率

Fig.7 Shrinkage rate in scheme 2

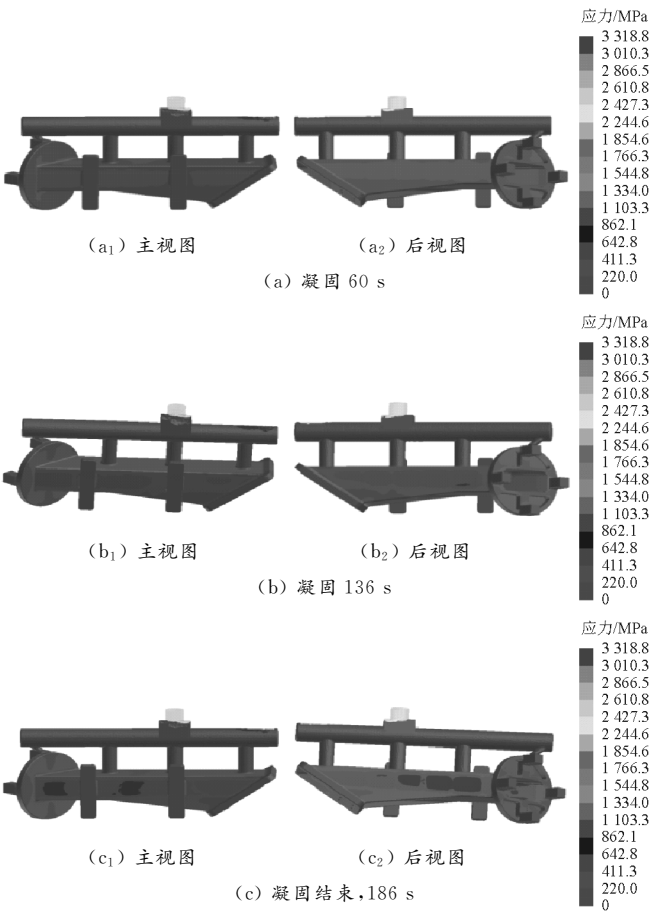


图8 方案2的应力模拟
Fig.8 Stress simulation results of scheme 2

以内,应力的分布相对较均衡,因此产生裂纹的倾向比较小。

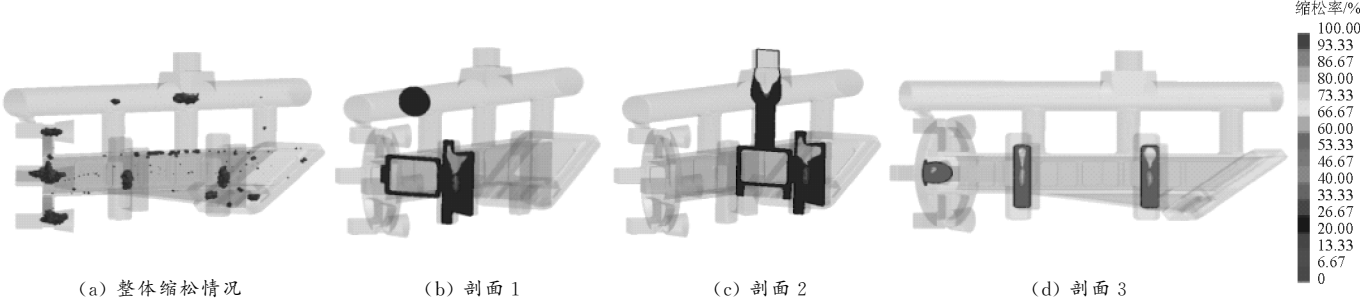


图10 优化方案缩松缺陷的模拟结果
Fig.10 Simulation results of optimized process scheme

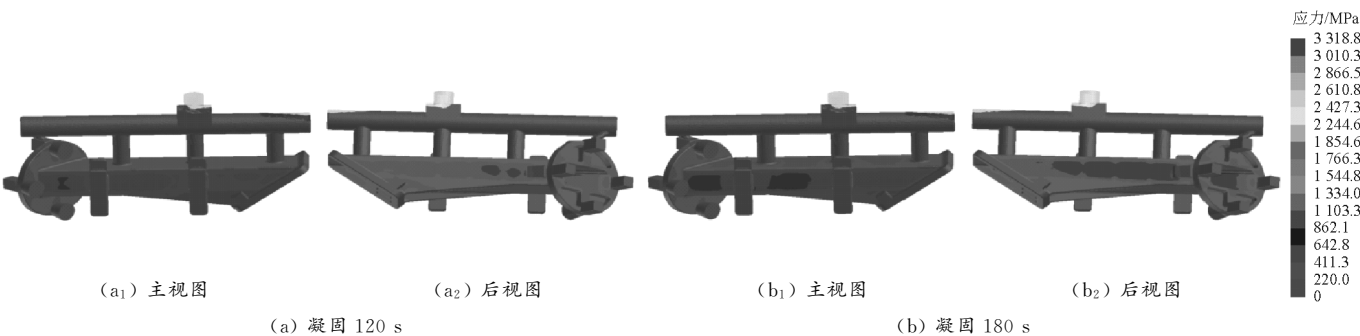


图11 优化后铸造工艺的应力模拟结果
Fig.11 Stress simulation results of optimized casting process

2 铸造工艺优化及模拟

2.1 铸造方案优化

根据对铸件的工艺方案的充型凝固、应力模拟分析,综合考虑铸件的内部品质、应力裂纹两方面的情况,选择方案2进行工艺优化。根据模拟结果,在易产生缩孔的位置加补缩冒口,优化后的工艺方案见图9。

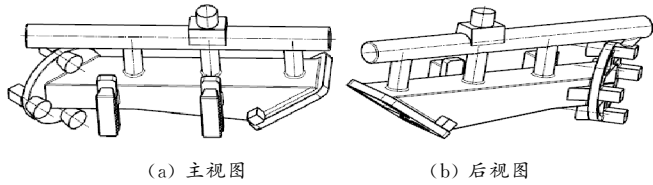


图9 优化后的工艺方案
Fig.9 Optimized process scheme

2.2 优化后铸造工艺的模拟

优化后的铸造工艺模拟结果见图10。可以看出,铸件侧面厚大部位的缩松转移至补缩冒口处,铸件凸台与法兰处的缩松产生在补缩小冒口处。小的缩松可以通过热等静压后消除,大的缩松缺陷会影响铸件的品质,在铸造工艺设计时需要考虑消除,通过模拟结果显示,优化后的铸造工艺可以消除铸件厚大部位的大缩松缺陷。

对优化后的铸造工艺进行应力模拟,模拟结果见图11。可以看出,在凝固120 s时出现应力差约200 MPa的情况;凝固时间为180 s,铸件的应力分布差异在300

MPa 之内,可见铸造补缩冒口的增加对应力场的改变不大。

3 铸件的生产验证

铸件采用快速成形 RP 模,因传统的试错法费工费时,成本较高^[3]。按照数值模拟优化后的铸造工艺组焊浇注系统,采用熔模精密铸造。型壳脱蜡后焙烧,焙烧温度为 1 100 ℃,型壳焙烧后水洗,然后烘干浇注,铸件

材质为 ZTC4,采用真空炉浇注,铸件修整后进行酸洗、热等静压。铸件的一次探伤结果合格,见图 12,符合 GJB2896A-2007 II 类 B 级的要求,在厚大凸台处、大壁厚比处均没有铸造缺陷,实际探伤情况与数值模拟的结果相符。铸件的一次荧光合格,见图 13,符合 GJB2896A-2007 II 类 B 级的要求,铸件的表面、铸件热节位置、铸件腔体的内部荧光没有荧光裂纹。结果表明,对于该铸件铸造应力模拟结果中应力差在 300 MPa

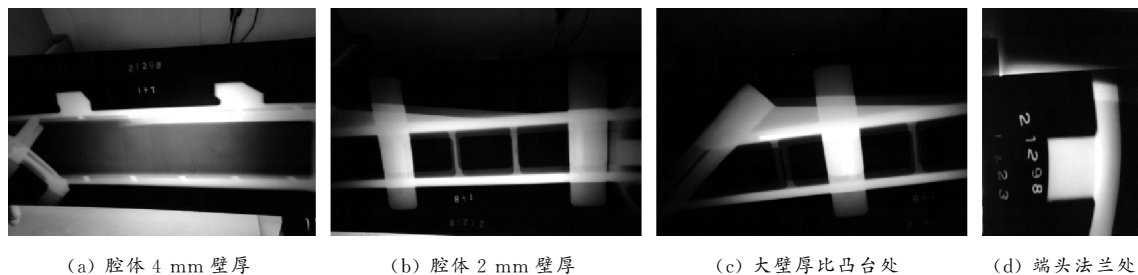


图 12 探伤结果

Fig.12 Defection results

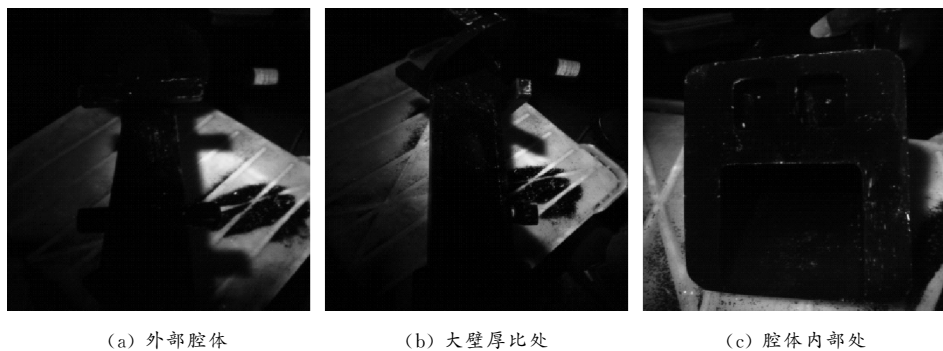


图 13 荧光结果

Fig.13 Fluoresce results

以内的,铸件实物不会产生荧光裂纹。

4 结 论

(1)以一种复杂薄壁钛合金铸件为研究对象,利用数值模拟仿真技术,对不同工艺方案的温度场、应力场进行模拟,模拟结果显示内浇道设置在壁厚为 2 mm 的面上,两个大壁厚比的凸台位于浇注侧面,并在圆盘处设置 $\phi 10$ mm 内浇道的温度场符合均衡凝固理论,铸件的温度场利于钛液的凝固补缩;模拟结果应力场分布比较均匀,应力的差异较小,造成裂纹的倾向最小,确定该方案为适用于该铸件的工艺方案。

(2)根据数值模拟结果对其进行铸造工艺优化,在产生缩孔的位置加冒口补缩,并对优化后的铸造方案模拟,模拟结果显示缩孔有效的引入冒口,且铸件的应力场没有明显的变化,确定此方案为最佳的铸造工艺方案。

(3)按照最佳的铸造工艺进行生产,实际铸件内部

品质经 X 光检验与模拟结果一致;实际铸件的表面品质经荧光检验与模拟结果一致,无表面裂纹产生。

参 考 文 献

- [1] 任贵娟,崔新鹏,肖强伟,等.钛合金喷管的数值模拟与工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2016,36(5):481-483.
- [2] 崔新鹏,张晨,范世玺,等.钛合金框架铸件铸造变形和应力的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2015,35(3):257-259.
- [3] 韩大平,杨武,彭志江.基于 ProCAST 的大型薄壁机匣件整体熔模铸造工艺研究[J].铸造,2013,62(10):979-982.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com