DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.011

大型复杂单螺杆压缩机壳体数值模拟与工艺设计

李佳丁[1],王　辉[1],姜　淼[1],汪东红[1,2,3]

(1. 嘉善鑫海精密铸件有限公司,浙江 嘉善 314101;2. 浙江工业大学 化学工程学院,浙江 杭州 310014;3. 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室,上海 200240)

摘　要:单螺杆压缩机机壳铸件结构复杂,水压测试要求零泄漏,要求铸造工艺设计合理,无缩松缺陷。内腔结构采用开天窗的铸造工艺,单体铸造后再焊接上天窗铸件。根据铸件结构特点,采用底注式加侧注式浇注系统设计,采用ProCAST模拟软件分析了铸件凝固过程中的温度场与疏松缺陷位置,攻克铸造工艺难题。结果表明,铸件力学性能、金相组织指标合格,铸件表面粗糙度小于 *Ra*3.2。

关键词:复杂单螺杆压缩机机壳铸件;开天窗铸造工艺;数值模拟;底注式加侧注式

中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)09-0789-04

Numerical Simulation and Process Design of Large Complex Single Screw Compressor Housing

LI Jiading[1], WANG Hui[1], JIANG Miao[1], WANG Donghong[1,2,3]

(1. Jiashan Xinhai Precision Casting Co., Ltd., Jiashan 314101, China; 2. College of Chemical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Shanghai Key Lab of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China)

Abstract: Single screw compressor housing casting structure is complex, water pressure test requires zero leakage, which requires reasonable casting process design, no shrinkage defects in the casting. The housing is cast separately: main body and window parts; then, the widow parts are welded on the main body late. According to the structure characteristics of the casting, bottom and side gating system is adopted., and the temperature and shrinkage defect position during solidification are analyzed by ProCast simulation software, and the difficult problems of casting process are solved. The results show that the mechanical properties and metallographic structure of the castings are qualified and the surface roughness of the castings is less than *Ra*3.2.

Key words: complex single screw compressor housing casing; separately casting process; numerical simulation; bottom and side pouring system

精密铸造产品具有零件品种多、工艺难度大、生产工序多、周期长等特点,人员变动差异大,工序控制凭经验,工艺数据不记录,造成了铸造产品合格率一直不高[1-2]。铸造数值模拟技术可以对生产工艺的设计过程进行分析,并结合技术工人的经验,完善铸造工艺设计[3]。同把不可见的高温凝固过程转换为可见的铸造过程,完善铸造工艺[4]。郄喜望利用数值模拟程序对钛合金支板在不同转速条件下的充型顺序与夹杂物运动轨迹进行了预测与优化[5]。谭诗薪通过ProCAST软件对离心泵壳体的流场、温度场、孤立液相区与缩松分布进行了模拟,优化了浇注系统与铸造工艺,提高了离心泵壳体的合格率[6]。利用数值模拟技术能分析液态金属在浇注系统、冒口系统和型壳中的充型和流动状态,模拟金属液的充填情况,判断铸件的缺陷位置和原因,进而优化浇注系统,防止液态金属在浇道中的吸气和夹杂[7];另一方面,模拟充填动态过程、应力场与温度场变化,预测铸造缺陷,优化浇注系统和工艺参数避免凝固缺陷。

单螺杆压缩机是由一个圆柱螺杆和两个对称布置的平面星轮组成啮合副,装在机壳内。机壳铸件采用不锈钢熔模精密铸造技术制造。根据JB/T6405-2006《大型不锈钢铸件》要求铸件不允许有气孔、夹砂、缩松、裂纹等降低强度的缺陷,机壳粗加工后进行压力试验,排气通道试验压力为5.0 MPa,历时保压30 min,不得有渗漏现象;对于缺陷深度超过壁厚20%的铸件,未经允许不能进行焊补,焊补后一律需

收稿日期:2021-02-27

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1710101,2020YFB1710102);国家自然科学基金(51821001,52090042);中国博士后科学基金面上资助(2020M671787);浙江省博士后项目择优资助(zj2019035)

作者简介:李佳丁(1992—),浙江嘉善人,本科,工程师.主要从事不锈钢精密铸造工艺方面的工作.
电话:18858348620,Email:1175363002@qq.com

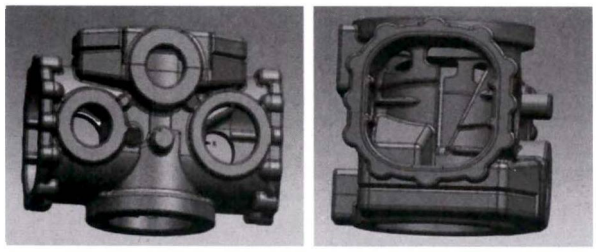
进行固溶热处理。

本文对大型复杂精密高耐压单螺杆压缩机机壳铸件的几何结构特点进行分析，对封闭的内腔结构采用开天窗的铸造工艺，单体铸造后再焊接上天窗铸件部分。并利用 ProCAST 模拟软件对铸件的流场、温度场与疏松缺陷进行模拟优化，确保了铸件开发一次性成功。

1 试验材料与方法

1.1 铸件结构特点

图 1 为单螺杆压缩机机壳铸件的形状结构。铸件单重 75 kg，最大壁厚 55 mm，平均壁厚 15 mm，最大轮廓尺寸 450 mm×280 mm×320 mm，内腔叶片最小间距 16 mm，中间肚子大，两端孔小，两端内孔直径分别为 180 mm 和 100 mm，中间内腔肚子直径为 280 mm，整体结构较为复杂，多处地方容易产生热节，对浇注系统设计要求较高。产品两侧存在两个双内流道内腔，这种内腔，如果采用整体铸造，制壳时无法上砂及干燥，后处理无法清砂。因此采用分体铸造，分壳体主体和天窗部分分别铸造，然后再将天窗铸件焊到壳体主体上去的方案，来解决这一结构难题。壳体铸件及开天窗的形状结构如图 2 所示。



(a)主视图　　(b)侧视图

图 1 单螺杆压缩机机壳铸件形状结构

Fig.1 Shape and structure of housing casting of single screw compressor

1.2 材料性能计算与模拟边界条件

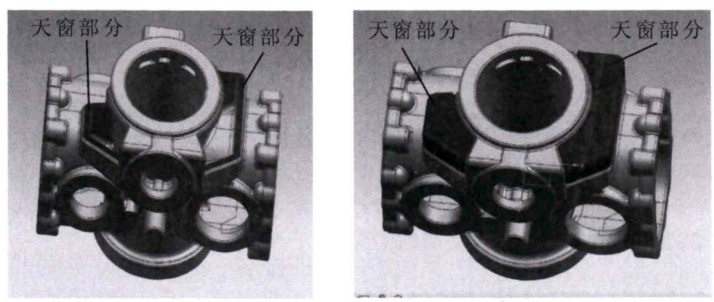
单螺杆压缩机机壳铸件本产品材质为 ZG07Cr17Ni10 奥氏体不锈钢，具有抗腐蚀的特性，表 1 为 ZG07Cr17Ni10 奥氏体不锈钢的化学成分。低碳（C≤0.08%）是为了尽量减少钢中碳化铬（主要是 $Cr_{23}C_6$）的析出，避免产生晶间“贫铬层”，防止铸件发生晶间腐蚀倾向。18%~20%的铬，可以使钢的表面在氧化性介质中迅速形成致密的氧化铬保护膜，阻止氧化性介质的进一步侵入，使铸件具备足够强的抗氧化腐蚀、抗晶间腐蚀和抗应力腐蚀能力；8%~11%的镍，除了发挥自身优良的抗腐蚀性能之外，其作用是形成足够小的“铬镍比”，扩大奥氏体区，使铸件在固溶处理的状态下，尽量形成单一奥氏体组织，减少或避免残余铁素体和碳化物的析出，使钢的基体保持单一均衡的电极电位，避免发生电化学腐蚀和晶间腐蚀倾向；低的含磷量（P≤0.045%）防止铸件发生冷裂倾向，低的含硫量（S≤0.030%）防止铸件发生热裂倾向。

表1 ZG07Cr17Ni10奥氏体不锈钢铸件化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of ZG07Cr17Ni10 stainless steel castings

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	18.00～20.00	8.00～11.00

工艺设计需要考虑铬、镍元素造成缩孔的影响，浇注系统要比碳素钢大。内腔制壳后全部封满，散热不良，极易造成缩松缺陷，另该铸件要求加工后 PT 检测及 12 kg 水压测试，对壳体内部质量要求极高，内部不允许有缩孔、缩松缺陷。该产品结构复杂，中孔两侧均有大热节，底部有大热节，如果铸造工艺设计不当，极容易产生缩孔或缩松。所以需要详细分析凝固过程，以便选择合适的浇冒口系统和浇注温度。模拟分析的边界条件与初始条件为：型壳和铸件之间的传热系数为 1 000 W/m²·K，型壳焙烧温度为 1 000 ℃，浇注时间为 6 s，型壳材料为熔融莫来石砂。

合理的浇注温度，是由铸件的重量、结构、壁厚、浇注者的操作水平等因素共同决定的。一般浇注温度随铸件的重量和壁厚的增加而降低。对于奥氏体不锈钢而言，考虑到含有较高的镍铬，钢液粘性大，流动性较差，所以浇注厚大件时，浇注温度需高出液相线温度 50~60 ℃；而浇注薄小件时，浇注温度需高出液相线



(a)铸件开天窗后形状结构　　(b)铸件天窗焊接后的形状结构

图 2 单螺杆压缩机壳体铸件开天窗后及天窗焊接后的结构

Fig.2 Shape and structure of single screw compressor housing

温度 60~70 ℃;如果铸件结构复杂而壁薄,钢液流动受阻时,还要适当提高浇注温度。钢液的浇注温度,原则上讲应该是钢液进入型壳时的温度。它包括两部分:一是钢液的液相线温度,二是钢液的过热度,即高于液相线的温度值。液相线温度与钢种和化学成分密切相关,采用下面的经验公式(1)计算:

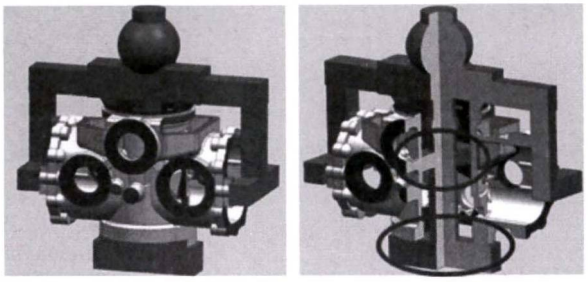
$$t_{液}=1\,538-(70C+8Si+5Mn+30P+25S+5Cu+4Ni+2Mo+2V+1.5Cr) \quad (1)$$

式中,1 538 为纯铁的熔点(℃)。元素前的数字代表对应元素的温度系数,元素符号代表对应元素的含量(%)。利用此经验公式,按照 ZG07Cr17Ni10 的化学成分计算,可得出其液相线温度约为 1 470+5/-15 ℃。按照液相线温度中限计算,加上上文所述的过热度,ZG07Cr17Ni10 不锈钢的浇注温度(钢液进入型壳时的温度)约为:浇注厚大件时,1 520~1 530 ℃;浇注薄小件时,1 530~1 540 ℃;如果铸件结构复杂而壁薄,钢液流动受阻时,还需增加 10~30 ℃。钢液在进入型壳时的温度,还需要考虑到钢液在出炉到浇入型壳过程中的热量损失,尤其硅溶胶精铸大多是挑壳或抬壳浇注,在这个过程中炉前钢液热量会有下降,所以钢液出炉温度还需要加上 20~30 ℃。如是抬包浇注,出炉温度还需更高。综上,选择本产品的浇注温度为 1 560~1 580 ℃。

2　铸造工艺设计与数值模拟

2.1　浇注系统设计

根据此产品的热节情况,依据亨金公式计算出来的内浇道模数是 2.5,预设浇注温度 1 580 ℃,液相线温度 1 470 ℃,则实际模数应该是 1 580/1 470×2.5=2.68,也就是说,实际模数应该稍大一些,增大比例为 2.68/2.5=1.072。这样计算出的浇注温度和开设的内浇道,给了现场浇注工人一个较大的操作空间,即使现场测温仪有少许误差,或者浇注者经验不足判断有误,也可以浇注出合格铸件。单螺杆压缩机机壳铸件的浇注系统如图 3 所示,铸件内部不允许有缩孔、缩松缺陷,由于中孔两侧以及底部极易形成热节,采用底注式方法进行浇注,在铸件中间孔洞处设值了横浇道对其进行填充,并且对于铸件两侧法兰采取了竖向浇道与横向浇口相结合的补缩设计。



(a)正视图　　(b)半剖视图

图 3　底注式加侧注式浇注系统示意图

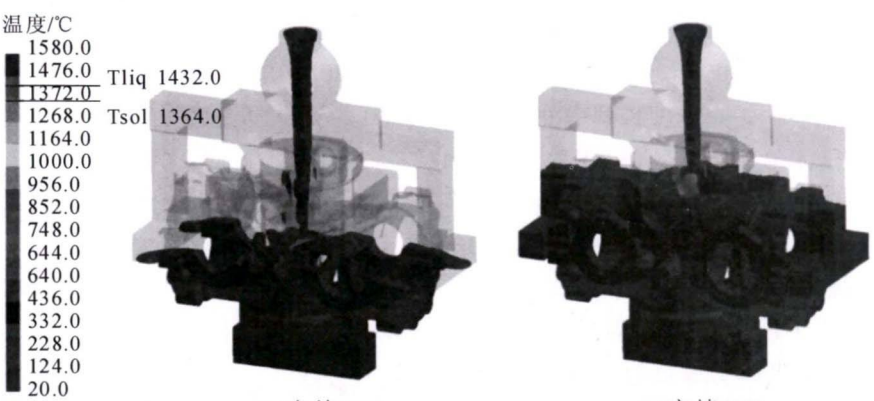
Fig.3　Schematic diagram of bottom plus side pouring system

2.2　流场、温度场与凝固缺陷数值模拟分析

图 4 为单螺杆压缩机机壳铸件金属流动充填过程。可以看出,钢液由浇口杯,直冲中间主浇道,而成为底注工艺。使钢液冲型平稳,避免钢液直冲产生卷气、紊流。底注工艺也很好解决了最底部两个浇口反补缩底部法兰,并利用中间浇道侧补产品中孔内侧热节。铸件的充型过程较为平稳,金属液受重力作用向下流动,从铸件底部开始填充,由于采用底注式浇注方式,铸件整体的充型顺序为自下而上,最后充型部位在铸件上方的横浇道处。图 5 为单螺杆压缩机机壳铸件的凝固过程。可以看出,铸件的各个部位凝固顺序可知,铸件上方以及孔洞处先开始凝固,两侧法兰后凝固,最后凝固的部位为底注式浇注系统,达到了顺序凝固的目的。在 ProCAST 软件中将孔隙率设为 5,即大于 5%的缩松缺陷将会显示,由图 6 可知,铸件整体已无缺陷,缺陷集中于浇注系统内。

3　实验验证与性能检测

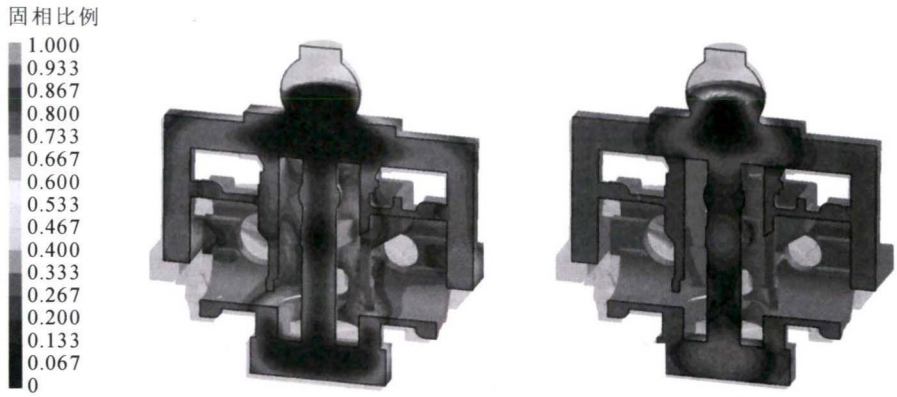
图 7 为熔模铸造生产中的蜡模与最终的单螺杆



(a)充填30%　　(b)充填60%

图 4　压缩机机壳铸件的金属流动充填过程

Fig.4　Metal flow filling process for compressor housing casting



(a)凝固60%　　(b)凝固90%

图 5 压缩机机壳铸件凝固过程

Fig.5 Solidification process of compressor housing casting

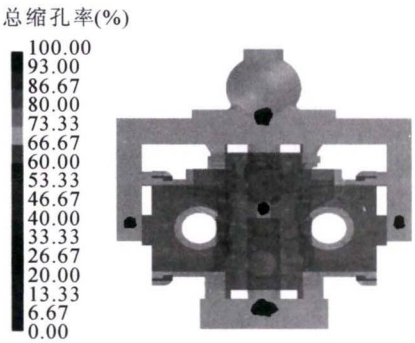
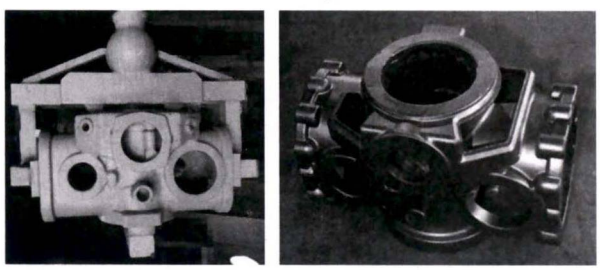


图 6 预测的压缩机机壳铸件疏松缺陷

Fig.6 The predicted shrinkage porosity of compressor housing casting



(a)蜡模　　(b)铸件

图 7 实际生产的蜡模与铸件

Fig.7 Wax pattern and actually produced casting

压缩机机壳铸件，采用底注式与侧注式浇注系统进行实际生产，铸件无缩孔缩松，在进行水压测试时零泄漏，提高了铸件的生产率以及生产品质。

本产品材质为 ZG07Cr17Ni10，此材质铸态组织为奥氏体+少量铁素体+碳化物。为了使铸件具有最佳的抗腐蚀性能，需要对铸件进行热处理，以便最大限度地形成奥氏体单一组织，和最大限度地消除残余应力。本产品选择的固溶处理工艺为：入炉温度不高于 300 ℃，升温速率 150~200 ℃/h，温度升至 1 080±10 ℃，保温 3.5 h 出炉。出炉后，在 15 s 内淬水冷却，水温 30 ℃以下，冷却到常温后吊出。二次热处理（退火）：产品初加工后进行二次热处理，以减少产品加工后产生应力，确保尺寸稳定。热处理工艺为：入炉温度不高于 300 ℃，升温速率 100~150 ℃/h，温度升至 630±10 ℃，保温 3 h 随炉冷却。冷却至 150 ℃以下出炉，冷却到常温。热处理后，铸件本体试块抗拉强度 630 MPa，屈服强度 340 MPa，力学性能合格。

4 结论

（1）单螺杆压缩机机壳铸件两侧存在两个双内流道封闭内腔结构，采用开天窗的铸造工艺，单体铸造后再焊接上天窗铸件部分，攻克了铸造工艺难题。结果表明，铸件力学性能、金相组织指标合格，铸件表面粗糙度小于 *Ra*3.2，成功研制了单螺杆压缩机机壳铸件。

（2）根据铸件结构特点，设计了底注式加侧注式浇注系统，数值模拟分析了铸件金属流动过程、凝固过程中的温度场与疏松缺陷位置，采用底注式浇注系统充填，金属溶体充型平稳，侧注式浇口补缩，实现顺序凝固和热节的补缩，很好的解决了大型机壳类铸件多热节引起的缩孔缩松缺陷的问题，为后续生产提供了实际指导。

参考文献：

[1] 陆伟，孙锦玉. 复杂壳体熔模铸造工艺数值模拟与优化控制[J]. 铸造技术，2017, 38(8): 2045-2048.

[2] 胡恰，汪东红，吴文云，等. 复杂混流泵外壳铸造工艺设计与数值模拟[J]. 铸造，2019，68(9): 1026-1030.

[3] 郭红星，杨志强. 数值模拟技术在充型凝固过程中的应用[J]. 铸造技术，2016，37(12): 2676-2680.

[4] 郑伦川，刘贯军. 基于 ProCAST 模拟的铸钢件熔模铸造工艺优化[J]. 铸造技术，2016，37(8): 1776-1778.

[5] 郄喜望，肖艮，殷亚军，等. 立式离心铸造中夹杂物运动规律数值模拟研究与应用[J]. 铸造技术，2020，41(12): 1165-1169.

[6] 谭诗薪，郝新，胡兵，等. 离心泵壳体精密铸造数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金，2020，40(7): 770-773.

[7] 柳百成. 铸造技术与计算机模拟发展趋势 [J]. 铸造技术，2005，26(7): 611-617.