

复杂混流泵外壳铸造工艺设计与数值模拟

胡 怡¹, 汪东红², 吴文云¹, 余江平³, 唐 鼎³, 疏 达²

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240; 3. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 为减少复杂薄壁立式混流泵外壳缩孔缩松凝固缺陷, 通过ProCAST软件, 对混流泵外壳的流场、孤立液相区以及缩孔缩松的体积与分布进行了计算机模拟分析, 并根据模拟结果进行了工艺优化设计, 增加冒口和冷铁对凝固缺陷补缩, 最终实现了顺序凝固, 明显提高了混流泵壳体的合格率。

关键词: 混流泵外壳; ProCAST; 工艺优化; 数值模拟

作者简介:

胡 怡(1994-), 女, 硕士生, 研究方向为铸造数值模拟。电话: 15952799022, E-mail: wdh@sues.edu.cn

通讯作者:

汪东红, 男, 博士, 助理研究员。电话: 021-54748678, E-mail: wangdh2009@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG249.5;

TP39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

09-1026-05

基金项目:

国家重点研发计划项目(2016YFB0701405); 国家自然科学基金(51705314); 国家自然科学基金创新研究群体(51821001)。

收稿日期:

2019-02-22 收到初稿,
2019-04-11 收到修订稿。

熔模铸造能够实现近净形制造复杂结构零件^[1-3]。复杂混流泵外壳不锈钢部件采用熔模铸造制造, 传统的“经验+试验”熔模铸造生产周期长、铸件工艺出品率较低^[4]。铸件的金属液体流动与凝固过程的温度分布影响铸件的质量。随着计算机的快速发展, 数值模拟可以可视化呈现金属流动以及温度分布情况^[5], 还可以缩短产品的生产周期, 减少能源消耗, 符合绿色铸造与智能铸造发展趋势, 此外还能提高产品质量, 提高经济效益^[6]。

在工艺设计与数值模拟的研究中, 衣春雷研究了外加冷铁大小对金属液流动场、温度场及缩孔缩松凝固缺陷的影响规律^[7]。孙锦玉等讨论了不同浇注方式对复杂泵头铸件流场、温度场、孤立液相区及缩孔缩松体积与分布^[8]。向涛对比分析了两种不同浇注系统下凝固过程的温度场与缩孔缩松分布, 并分析原因, 优化了浇注系统, 最终消除了铸件缺陷^[9]。蒋文明研究了铸件在低压铸造下的数值模拟与工艺优化^[10]。

本研究铸件为复杂薄壁立式混流泵外壳, 泵壳的作用是把液体引向叶轮, 并汇集由叶轮流出的液体流向出水管, 同时将液体流动的部分动能转化为势能。这就要求铸件强度高、耐磨性好、组织致密、尺寸稳定, 同时还要具有良好的导热散热性能和防腐性能, 以防止泵体产生体积膨胀及渗漏等故障问题。在研究中, 先根据铸件特征以及以往经验设计恰当合理的浇注系统, 进行数值模拟, 再根据模拟结果中出现的缺陷进行工艺优化, 增添冒口和冷铁。最终消除铸件中的缩孔缩松缺陷。

1 混流泵外壳的结构及浇注方案分析

1.1 壳体结构

图1为混流泵外壳的三维模型, 最大外轮廓尺寸为438 mm × 184 mm × 184 mm, 体积为1 549.534 cm³, 铸件主体为圆筒结构, 顶部有一弯筒形状结构, 壁厚为7 mm。铸件内腔深窄, 截面突变多, 结构紧凑, 铸造难度大。

1.2 材料成分及热物性

复杂薄壁立式混流泵外壳的材质为SCS13不锈钢, 是按日本JIS标准生产的耐蚀不锈钢, 是典型的耐酸不锈钢, 在硝酸、有机酸、许多盐溶液及碱类溶液、石油产品中有高的耐蚀性, 但有晶间腐蚀倾向, 铸态力学性能差, 一般经固溶处理后使用。主要用于耐蚀性要求较高的化工设备、石油精炼设备中的机件, 如泵、阀等铸件, 表1为SCS13钢的化学成分。



图1 复杂混流泵外壳的三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of a complex mixed-flow pump casing

图2所示为利用材料性能模拟软件JMatPro计算得出的SCS13不锈钢的比热和热导率。从图2a可以看出, 不锈钢的比热随着温度的升高缓慢增加, 在1 325 °C时, 温度接近相变温度, 比热开始急剧上升, 在1 445 °C时, 比热达到最大值为477 J/(g·K)。固相全部转变成液相, 比热迅速降低。从图2b可以看出, 热导率随着温度的升高而逐步上升, 在1 405 °C时, 热导率达到最大值33.10 W/(m·K), 随着温度的继续升高, 热导率先降后升。

2 浇注工艺模拟

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), 浇注温度为1 550 °C, 型壳焙烧温度为950 °C, 浇注时间为5.6 s, 型壳材料为熔融莫来石砂。

2.1 浇注系统设计

铸件壁较厚且不均匀, 有两个法兰, 一个凸台, 底部一个小孔洞, 这些部位存在热节, 在设计浇注系统时要重点考虑这些形状结构特点。图3所示为顶注式浇注系统, 整个铸件侧躺, 浇注系统横浇道延伸到两端, 整个浇注系统对铸件半包裹, 是顶注式加侧注

表1 SCS13不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of SCS13 stainless steel $w_B/\%$

Cr	C	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
19	0.08	2	10	0.04	0.04	2	余量

式, 在顶部小法兰上设置一个冒口, 以补缩浇不足。从左到右, 第一段横浇道长340 mm, 高60 mm, 连接随管道弯曲37°的过渡横浇道, 过渡到第二段横浇道, 高52 mm, 横浇道重心在同一高度。竖浇道长284 mm, 宽50 mm, 浇口杯高85 mm, 冒口高66 mm。浇注过程和缓平顺, 铸件两端法兰先凝固, 然后整体部件凝固。

2.2 流场分析

复杂薄壁立式混流泵外壳的充填过程如图4所示, 金属液一方面沿着浇口杯下的两个竖浇道从两端流入铸件, 另一方面沿着横浇道流向铸件底部的竖浇道, 充型过程并不均匀, 存在金属液的环流、碰撞、飞溅, 金属液面缓慢上升, 铸件最后充填的部位在管道前方的法兰和上部凸台^[1]。

2.3 凝固过程分析

铸件的凝固过程基本符合顺序凝固, 浇道和浇口是

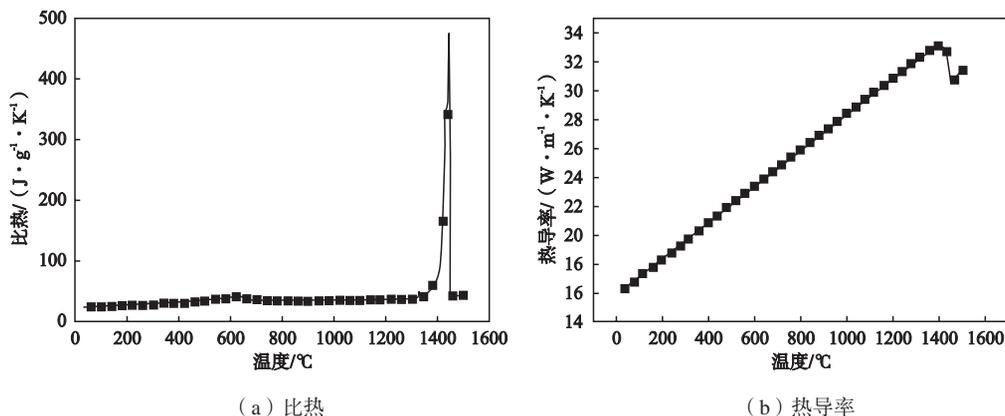


图2 SCS13不锈钢的比热和热导率

Fig. 2 Specific heat and thermal conductivity of SCS13 stainless steel

最后凝固的部位，但铸件凝固过程并不均匀，弯曲的管道及与管道相连处的铸件壁上首先开始凝固，如图5a所示，铸件前端法兰上仍有金属液流动，后端渐渐开始凝固，在底部孔洞周围有孤立液相区的出现，如图5b所示，在铸件上端的凸台上四角都有孤立液相区的存在，铸件前端的法兰上也存在孤立液相区。孤立液相区的存在会导致缩孔缩松缺陷的产生。

2.4 缩孔缩松缺陷分析

铸件在孔隙率为3的情况下，存在部分的缩孔缩松缺陷，如图6所示。在铸件顶部的小法兰上存在一个缺陷，在铸件正方形凸台上每个角各含有一个浇不足缺陷^[12]，是由于补缩不及凝固时存在孤立液相区所导致。在铸件凸台相对的一侧有一个圆形孔洞，孔洞的壁厚较周围要厚一些，极易在这样的部位形成孤立液相区，进而导致缩孔缩松缺陷，在底部法兰内部的一个凸体上也有缺陷存在，上部和下部的两个凸体有竖浇道的两个浇口进行填充和补缩，而中部的凸体，在浇注过程由于补缩不到此处，再加上壁厚较厚，造成

了缺陷。所有的缺陷体积和为6.039 cm³。

3 优化浇注系统

为了消除铸件重要位置的缩孔缩松缺陷，需进行进一步改进浇注系统（图7），原有浇注系统凸台上的竖浇口加宽，并加上冒口和冷铁，冒口很小，底边直径为15 mm，高10 mm，但足够补缩凸台上四角出现的缺陷。底部孔洞的周圈上安置冷铁，冷铁高

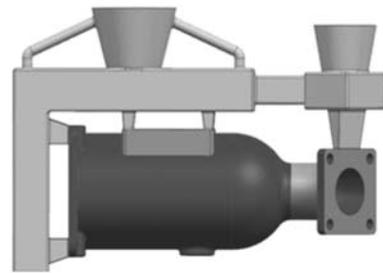


图3 混流泵外壳初步设计的浇注系统

Fig. 3 Preliminary design of gating system for mixed-flow pump casing

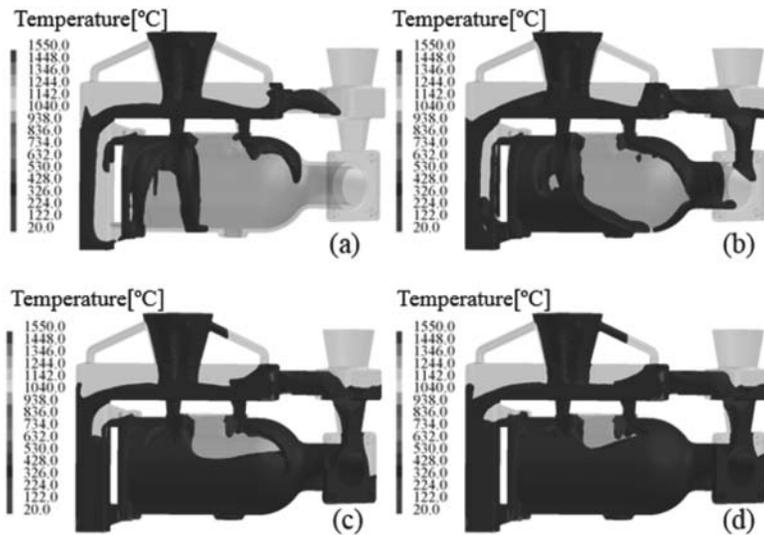


图4 复杂混流泵外壳充型过程

Fig. 4 Filling process of complex mixed-flow pump casing

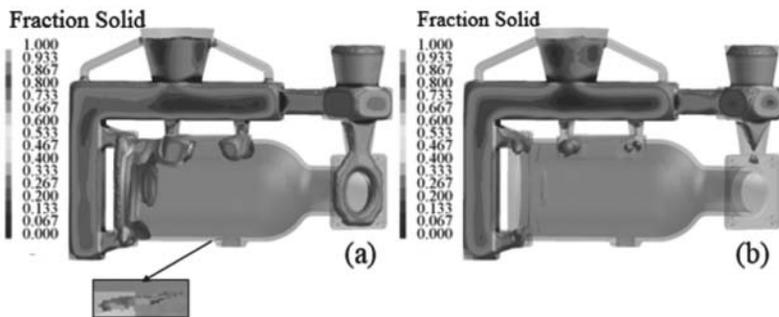


图5 浇注系统孤立液相区分布

Fig. 5 Distribution of isolated liquid phase in gating system

10 mm, 与底部孔洞尺寸相同, 表面涂敷耐热涂料, 防止氧化。将冷铁放在指定的位置, 型壳预热完成后再置于冷铁上, 型壳与冷铁间隙微小, 金属液浇注后迅速凝固而不会外溢^[13]。通过冷铁较强的激冷作用和导热性, 改善补缩通道, 加速凝固速度, 控制凝固顺序。浇注系统重量只增加0.019 kg。在原有工艺参数的基础上设置冷铁的初始温度为30 ℃, 型壳与冷铁的界面换热系数为2 000 W/(m²·K), 铸件与冷铁的界面换热系数为4 000 W/(m²·K)。

图8所示为优化浇注系统后的孤立液相区分布。仅在混流泵外壳内腔壁上的凸体上存在一个孤立液相

区, 消除了采用原有浇注系统产生的的铸件缺陷。

图9所示为优化浇注系统的缩孔缩松缺陷分布, 可以看出, 缩孔缩松缺陷减少了, 缺陷体积为0.678 cm³。

4 生产验证

优化设计后进行实际生产验证, 验证模拟结果是否符合准确性。重新制作蜡模、型壳, 冷铁预先放置于地面指定位置, 焙烧好的型壳置于冷铁上, 使冷铁面与型壳面无缝对接后进行浇注^[14]。批量生产后抽样检测发现, 铸件的合格率明显提升。图10为实际生产的铸件, 铸件表面光洁, 质量合格。

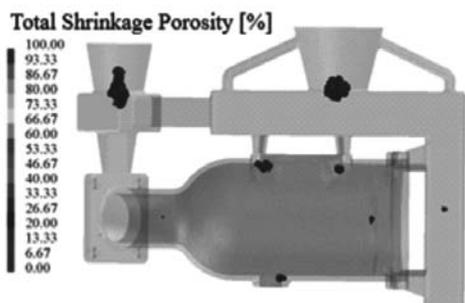


图6 复杂混流泵外壳的疏松分布

Fig. 6 Porosity distribution of complex mixed-flow pump casing

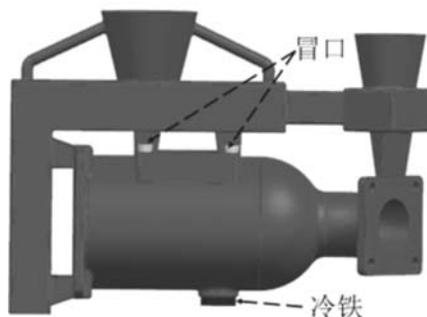


图7 优化的混流泵外壳浇注系统

Fig. 7 Optimized gating system of optimized mixed-flow pump casing

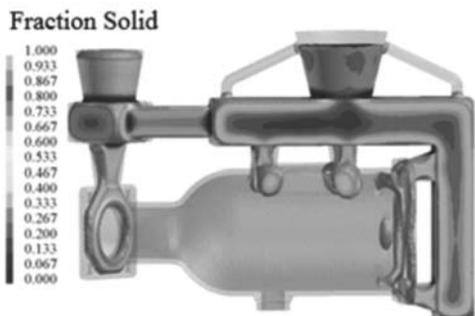


图8 优化浇注系统后的孤立液相区分布

Fig. 8 Distribution of isolated liquid phase in optimized gating system

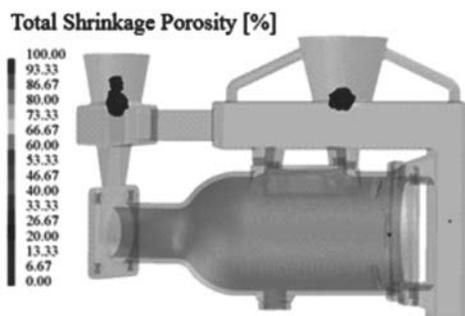


图9 优化浇注系统的缩松缺陷分布

Fig. 9 Dispersed shrinkage defect distribution in optimized gating system

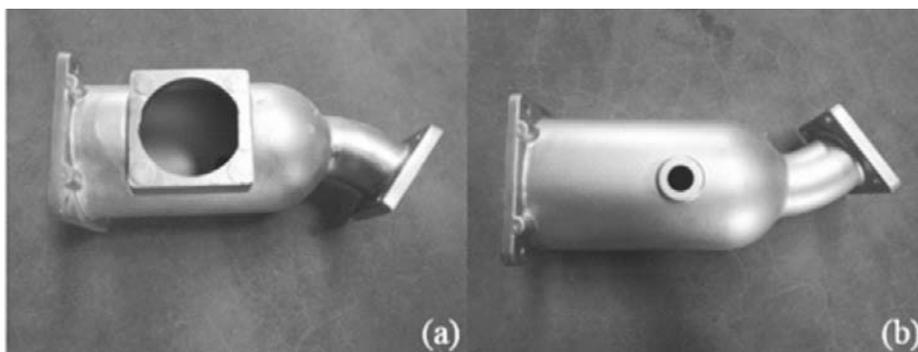


图10 实际生产的铸件

Fig. 10 Actually produced castings

5 结束语

(1) 采用ProCAST铸造模拟软件对SCS13不锈钢复杂薄壁立式混流泵外壳铸件的充型及凝固过程进行了数值模拟。对混流泵外壳的流场、孤立液相区以及缩松缺陷体积与分布进行了分析,对浇注工艺进行了优化,提高了产品合格率,降低了研制周期和生产成本。

(2) 在重力铸造条件下,通过顶注式与侧注式的结合,实现了铸件的完整浇注充型。通过在孤立热节处设置冷铁与缩松处增加冒口,使铸件实现顺序凝固,疏松缺陷体积由 6.039 cm^3 降到 0.678 cm^3 。

(3) 混流泵外壳内腔深窄,壁薄,突变多,铸造难度大,基于数值模拟的浇注系统优化后,进行实际生产,铸件表面光洁,符合产品的质量要求。

参考文献:

- [1] 陈晶阳, 吴文津, 李青, 等. 采用低温度梯度HRS工艺制备的镍基单晶高温合金雀斑组织 [J]. 中国有色金属学报, 2018, 28 (19): 2494-2498.
- [2] 王禹明, 张可人, 张洁. 薄壁筒体铸件的熔模铸造数值模拟 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 342-344, 350.
- [3] 关晓强. 泵体的铸造工艺优化及其应力模拟研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- [4] ZHANG C, FU Y, WANG H, et al. Multi-objective optimization of process parameters during low-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy wheel castings [J]. China Foundry, 2018, 15 (5): 327-332.
- [5] 曹岩, 张浩, 石亚茹, 等. 基于ProCAST的薄壁叶片熔模精铸过程模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1226-1229.
- [6] 张晓光, 韦洲. 不锈钢多管接头铸件的熔模铸造工艺数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (12): 1344-1346.
- [7] 衣春雷. 熔模铸造薄壁铸件工艺优化的实验及数值模拟研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [8] 孙锦玉, 汪东红, 董安平, 等. 基于ProCAST的复杂泵体熔模铸造工艺模拟 [J]. 热加工工艺, 2018 (23): 77-80, 85.
- [9] 向涛. ZL205A副构架铸件凝固工艺设计计算机仿真优化分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (5): 497-500.
- [10] JIANG W M, FAN Z T. Gating system optimization of low pressure casting A356 aluminum alloy intake manifold based on numerical simulation [J]. China Foundry, 2014, 11 (2): 119-124.
- [11] 李豫川. 某微型涡轮发动机涡轮熔模铸造数值模拟及工艺优化 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [12] 曹流, 廖敦明, 胡柏乐, 等. 铸造充型过程中浇不足缺陷的数值计算研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 487-491.
- [13] 杨胜男, 吴文云, 汪东红, 等. 大型不锈钢球阀熔模铸造工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (6): 623-625.
- [14] 行舒乐, 卢忠柏. 支撑架铸造过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1984-1986, 1995.

Process Design and Numerical Simulation of Complex Mixed-Flow Pump Casing

HU Qia¹, WANG Dong-hong², WU Wen-yun¹, YU Jiang-ping³, TANG Ding³, SHU Da²

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Key Lab of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China; 3. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract:

In order to reduce the shrinkage and dispersed shrinkage in complex thin-wall vertical mixed-flow pump casing, the flow field, isolated liquid region and shrinkage volume of the mixed-flow pump casing were simulated and analyzed by using ProCAST software. According to the simulation results, the process optimization was carried out, and the riser and the chill were added to realize sequential solidification and reduce the defects of the casting. Mass production shows that the qualified rate of the mixed-flow pump casings has been significantly improved.

Key words:

mixed-flow pump casing; ProCAST; process optimization; numerical simulation