

自吸式泵体铸造工艺设计优化研究

刘嘉明¹, 杨 军², 岳 宗², 王晓磊¹

(1. 大连环友屏蔽泵有限公司, 辽宁大连 116041; 2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 根据自吸式泵体结构及材质, 设计初始铸造工艺方案, 利用Flow-3D铸造模拟软件完成各方案数值模拟计算。结合实际生产铸件的缺陷情况进行对比和分析, 依据缺陷种类、体积和位置预测可能原因。经过两次浇注和补缩系统优化, 确定较优铸造工艺设计方案。按照优化后的铸造工艺设计方案进行铸造生产验证, 所得铸件符合验收标准要求, 证明本研究方法和思路对指导铸造实际生产具有一定的可行性。

关键词: Flow-3D; 自吸式泵体; 铸造工艺设计; 数值模拟; 方案优化

化工生产是工业生产的支柱和基础, 目前国内外正加大对化工行业环保和安全监管力度, 因此相关企业对泵的泄漏率要求更加严格。而自吸式屏蔽泵可实现完全无泄漏, 所以市场上对这类泵的需求量逐年递增^[1]。

本文所研究的自吸式泵体(以下简称“泵体”), 是自吸式屏蔽泵中的关键部件。该泵体除了具有传统泵体的单一涡室结构, 还具有储液室和气液分离室等, 能够在叶轮作用下实现自吸, 从而简化启动程序。泵体铸件铸造有两个关键点: 一是对涡壳部位有较高精度要求。因为涡壳结构复杂, 难以通过其他加工方法加工, 如果出现偏差, 泵的参数就无法达到设计要求^[2]。二是铸件要有良好力学性能。由于泵体位于泵的最外侧, 且包裹大量液体, 因此承受较高压力, 如果泵体由于力学性能不达标而出现破损, 造成介质泄露, 不但泵无法使用, 而且还可能危害人身安全和污染环境^[3]。因此, 笔者结合铸造生产, 采用铸造模拟软件Flow-3D对泵体铸造工艺方案进行多次分析和优化, 以提高泵体的整体品质, 保证成品率。确保按照新工艺生产的自吸式屏蔽泵品质能够满足使用要求, 为企业的产品能够保质保量地向市场推广打下基础。

1 铸造工艺性分析及工艺方案设计

1.1 铸造工艺性分析

泵体铸件实体模型如图1所示, 多曲面, 并包含多层结构, 模型较复杂。轮廓尺寸为610 mm × 360 mm × 380 mm, 平均壁厚12 mm, 其中腔体、法兰、隔板和涡壳等部位壁厚差异较大, 最小处为9 mm, 最大处为32 mm, 铸件毛坯净重90 kg。根据技术要求, 法兰、隔板、吸入管和蜗壳部位上任意110 mm × 150 mm的面积内缺陷不得超过5处, 缺陷最大尺寸不得超过3 mm。

铸造工艺设计重点考虑以下因素:

(1) 铸件轮廓尺寸较大, 材质为ZG07Cr19Ni10奥氏体不锈钢, 易形成浇不足等铸造缺陷^[4]。

(2) 铸件各部位壁厚尺寸相差大(最高达23 mm), 热节多且分散, 易形成局部孤立液相区, 从而出现裂纹、缩孔和缩松等缺陷。

作者简介:

刘嘉明(1995-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为铸造过程数值模拟。
E-mail: srig789@126.com

中图分类号: TG245

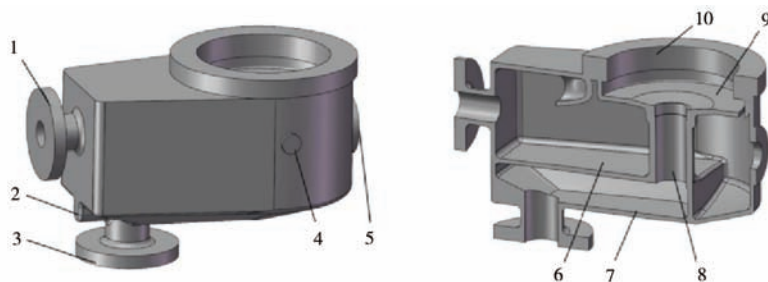
文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0808-10

收稿日期:

2024-10-15 收到初稿,
2024-11-27 收到修订稿。



1. 出口法兰; 2. 排气凸台; 3. 入口法兰; 4. 外循环凸台;
5. 放液法兰; 6. 隔板; 7. 腔体; 8. 吸入管; 9. 涡壳; 10. 大法兰

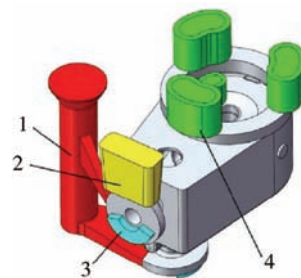
图1 自吸式泵体结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of self-priming pump body

因此需要设置合理的浇注和补缩系统, 使铸件实现顺序凝固, 以保证关键部位的品质。

1.2 工艺方案设计

泵体初始铸造工艺方案如图2所示。采取一箱一件铸造, 选用阶梯式浇注系统, 将内浇道开设在铸件底部入口法兰和中间出口法兰上, 且使内浇道横截面积大于直浇道。在铸件法兰和涡壳等厚大部位设置冒口, 并在冷铁协同作用下加强补缩能力^[5]。



1. 浇道; 2. 普通冒口; 3. 冷铁; 4. 保温冒口

图2 初始铸造工艺方案

Fig. 2 Initial casting process diagram

2 初始工艺方案模拟分析

2.1 速度场

图3显示了泵体初始铸造工艺方案充型过程的速度场。从图3(a)中观察到, 充型初始期金属液迅速沿下层内浇道进入型腔, 金属液间速度差达1.6 m/s, 致使

金属液卷入大量空气, 进而形成氧化渣并聚集在型腔中, 影响铸件品质^[6]。充型至图3(b)所示阶段, 铸件型腔外壁增大了金属液的上升阻力, 进而削减了金属液的动能, 且重力抵消了部分动能, 使金属液间速度

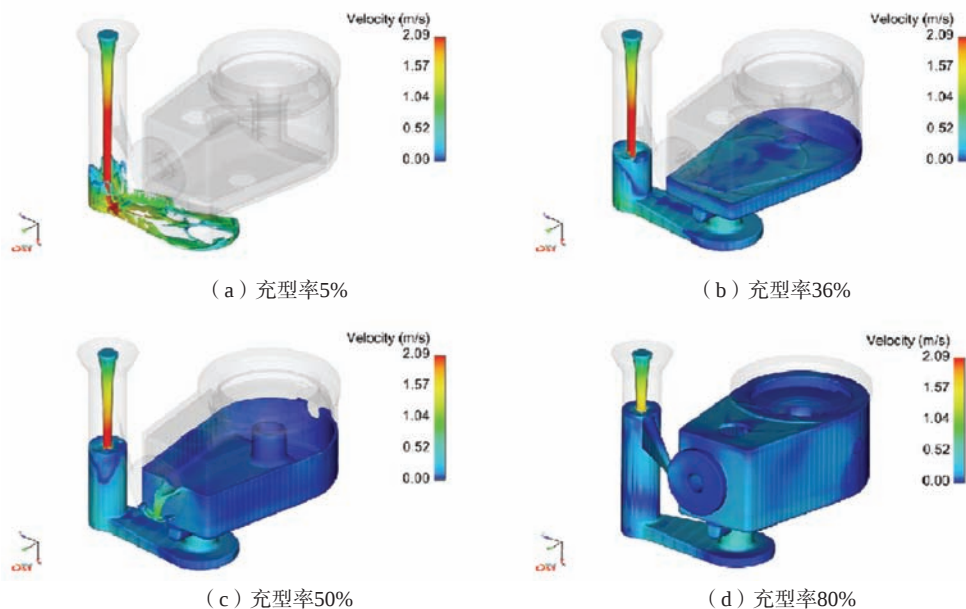


图3 充型过程速度场

Fig. 3 Velocity field in mold filling process

差逐渐降低至0.6 m/s, 液流趋于平稳。如图3(c)和图3(d)所示, 到充型后期, 型腔内金属液速度相差较小(0.5 m/s), 液面上升平稳, 没有出现紊流。

2.2 固液相分布

图4显示了铸件凝固过程中固液相随时间的变化过程。如图4(a)所示, 凝固至50%时, 壁厚较薄及设置

冷铁的部位已凝固。型腔中存在多处分隔的孤立液相区, 包括腔体下层外壁、隔板与腔体交接处和排气凸台等部位, 会出现缩孔和缩松缺陷。凝固至图4(b)时, 排气凸台部位仍然存在孤立液相区, 判断会有严重缺陷^[7]。图4(c)和图4(d)所示, 凝固进入到后期, 各部分浇道和冒口都能保证金属液在其内部最后凝固。

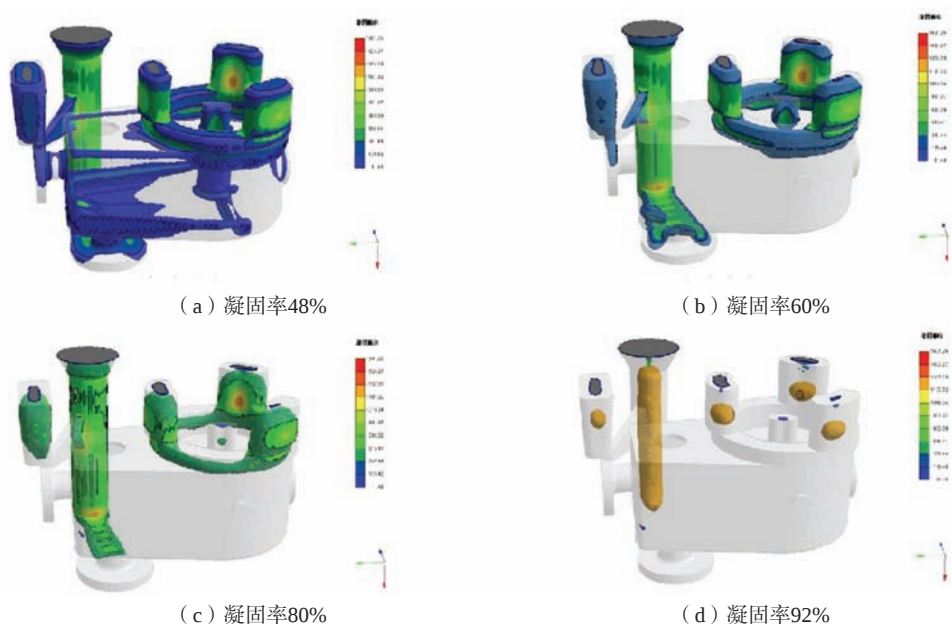


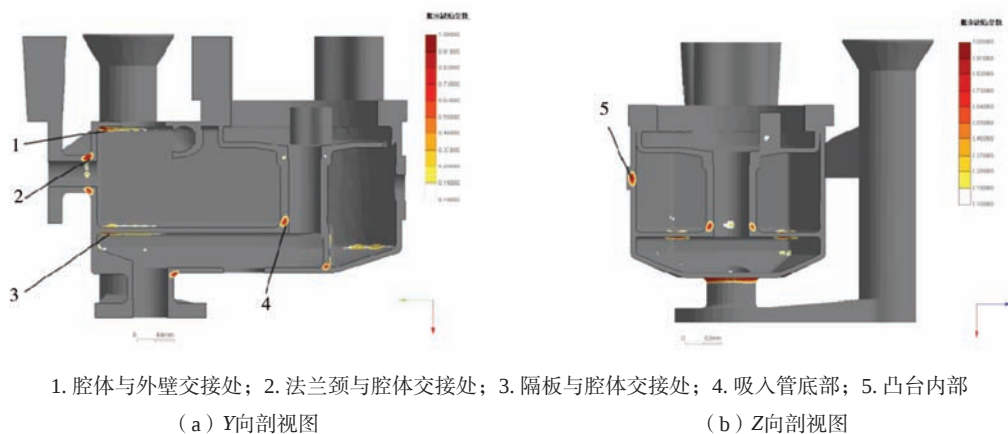
图4 凝固过程中固液相分布

Fig. 4 Solid-liquid phase distribution in the solidification process

2.3 缩孔、缩松缺陷

采用残余熔体模数判据, 得到图5概率缺陷参数图。从图5观察到, 模拟出缩孔、缩松缺陷集中在法兰、凸台和隔板等壁厚较厚部位内部, 以及薄厚交接部位。判断产生缺陷的原因是这些部位散热能力较

差, 在凝固过程中形成了孤立液相区, 无法得到补缩所致。去除浇道和冒口后, 筛选出概率缺陷大于0.9的单元, 体积为 $3.0 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 占泵体总体积的2.6%, 故需要优化浇注和补缩系统设计, 以减轻或消除这些缺陷。



1. 腔体与外壁交接处; 2. 法兰颈与腔体交接处; 3. 隔板与腔体交接处; 4. 吸入管底部; 5. 凸台内部
(a) Y向剖视图 (b) Z向剖视图

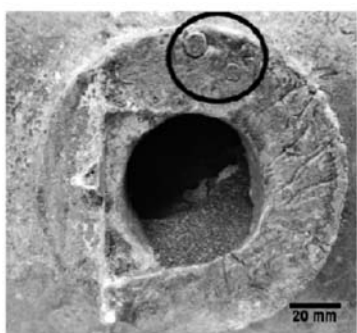
图5 概率缺陷参数图

Fig. 5 Probability defect parameter diagram

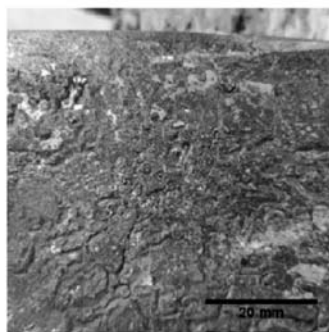
3 铸件实际缺陷分析

根据初始铸造工艺方案生产铸件,如图6所示,存在以下缺陷:图6(a)所示的豆状缺陷位于泵体放液法兰表面,没有与周围金属熔合而嵌在铸件表面,表

面颜色与铸件一致,判断为冷豆缺陷;图6(b)所示褶皱缺陷位于铸件上层表面,呈现不规则的皱褶状疤痕,判断为皱皮缺陷^[8];图6(c)和图6(d)中开裂与孔洞类缺陷的电镜扫描结果如图7所示。



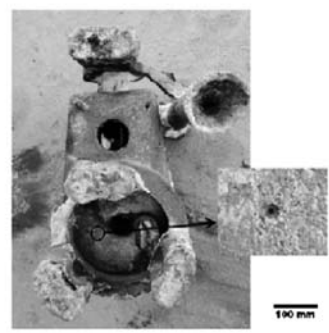
(a) 豆状缺陷



(b) 表面褶皱缺陷



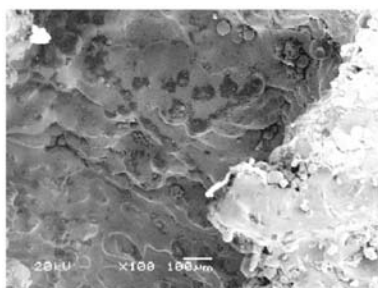
(c) 开裂缺陷



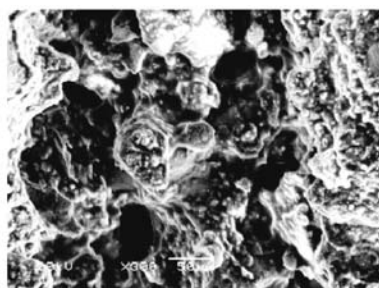
(d) 孔洞类缺陷

图6 泵体铸件的缺陷

Fig. 6 Defects of the casting of pump body



(a) 开裂缺陷部位



(b) 孔洞类缺陷部位

图7 泵体铸件的缺陷

Fig. 7 Defects of the casting of pump body

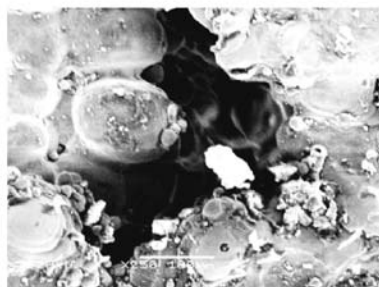
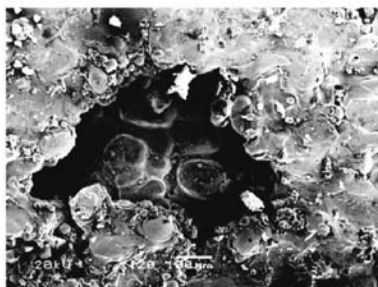


图7 (a) 中观察到, 开裂部位断口形状不规则, 表面粗糙, 断口呈海绵状并伴有粗大晶枝, 且开裂部位是铸件热节部位, 判断此部位缺陷是连续的缩孔和缩松^[9]。图7 (b) 中观察到, 孔洞类缺陷部位形貌与开裂部位类似, 位于铸件表层且尺寸较小 (约2 mm), 且结合铸件充型过程模拟结果, 判断缺陷由夹渣引起, 夹渣没有上浮到冒口中, 阻碍了铸件中金属液流动, 使金属液得不到补缩, 进而形成缩孔和缩松缺陷^[10]。

4 铸造工艺方案优化

4.1 浇注系统优化方案一

优化后浇注系统见图8, 缩小浇道横截面积, 改为封闭式浇注系统, 最小截面比 $\Sigma A_{\text{直}} : \Sigma A_{\text{内}} = 1.7 : 1$, 且保留下层内浇道, 内浇道沿切线引入法兰, 以改善流态, 减少紊流和卷气。

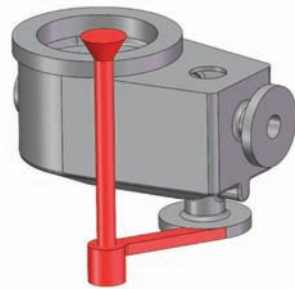


图8 浇注系统优化方案一

Fig. 8 Gating system optimization scheme 1

图9显示充型过程中的速度场。从图9 (a) 中可看到, 金属液充型到铸件底部入口法兰后, 法兰内金属液速度差降低至0.8 m/s, 但如图10所示, 金属液仍然以较高动能冲击到法兰中心砂芯表面, 形成局部紊流。到图9 (b) 所示阶段, 金属液间速度差逐渐降低至0.6 m/s, 液流趋于平稳。图9 (c) 和图9 (d) 所示,

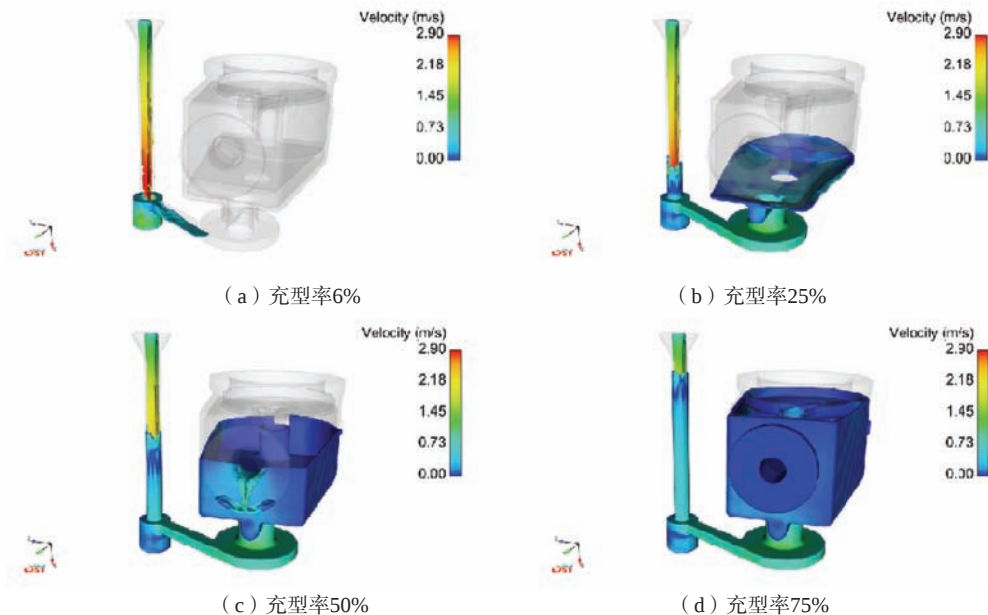


图9 充型过程速度场

Fig. 9 Velocity field in mold filling process



图10 充型初始阶段的局部紊流现象

Fig. 10 Local turbulent flow phenomenon in the initial phase of mold filling

到充型后期, 液面上升平稳。由于本方案出现局部紊流现象, 易引起夹渣缺陷, 需要进一步优化。

4.2 浇注系统优化方案二

优化后浇注系统如图11所示, 增加横浇道结构, 改为半封闭式浇注系统, 略微加大内浇道的横截面积, 使金属液能够平稳快速地充满浇道^[11]。

图12显示充型过程中速度场。从图12 (a) 中看到, 金属液沿着内浇道充型到铸件底部法兰, 速度差为0.4 m/s, 金属液沿切线在法兰中做回转运动, 液流平

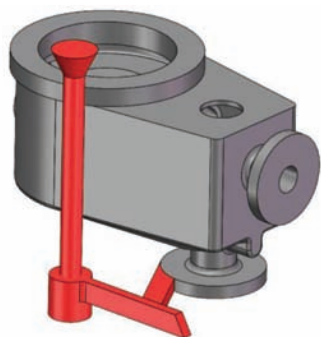


图11 浇注系统优化方案二

Fig. 11 Gating system optimization scheme 2

稳。到图12 (b) 所示阶段, 金属液间速度差逐渐降低至0.6 m/s, 液流平稳。图12 (c) 和图12 (d) 所示, 到充型后期, 液面上升平稳, 没有出现紊流, 因此采用此方案。

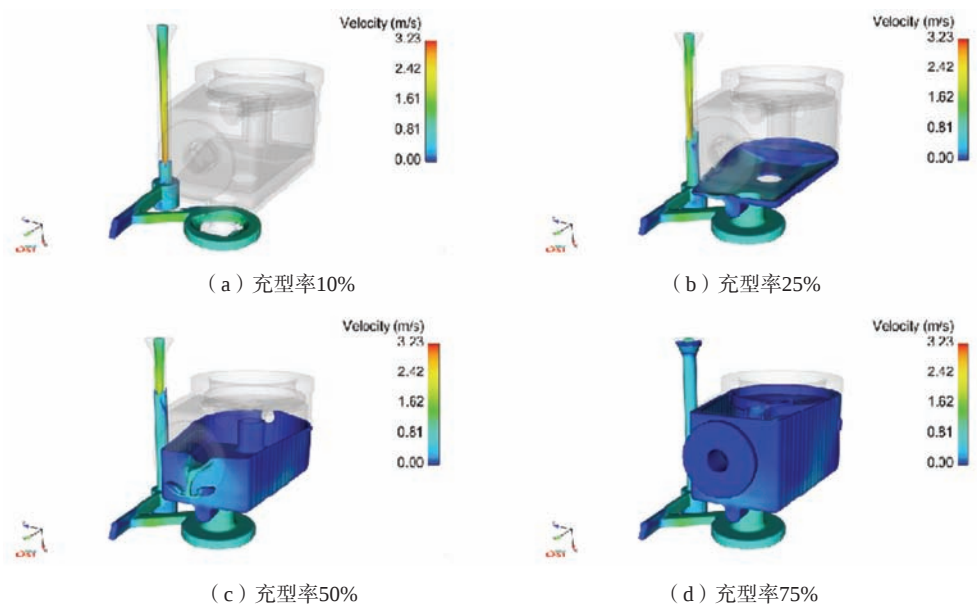
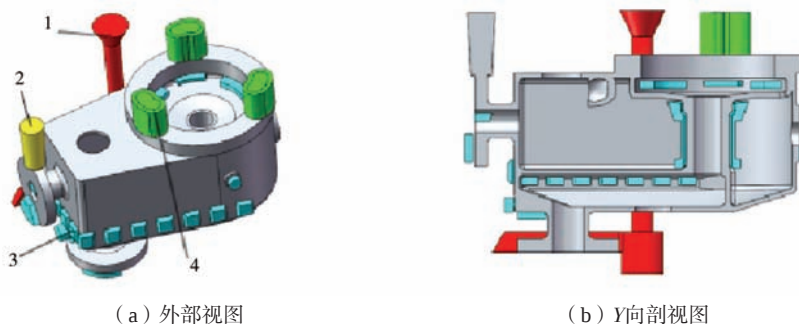


图12 充型过程速度场

Fig. 12 Velocity field in mold filling process



1. 浇道; 2. 普通冒口; 3. 冷铁; 4. 发热冒口

图13 补缩系统优化方案一

Fig. 13 Feeding system optimization scheme 1

4.3 补缩系统优化方案一

优化后补缩系统如图13所示, 取消涡壳底部部位保温冒口, 并减小其余三个冒口尺寸。在壁厚较厚部位的侧方和冒口下方设置外冷铁, 以及在保温冒口之间设置冷铁, 避免在凝固过程中出现收缩缺陷^[12]。

固液相分布模拟结果如图14所示。如图14 (a) 所示, 凝固至30%时, 中间层隔板、吸入管及法兰端面已开始凝固。凝固至图14 (b) 时, 由于冒口尺寸较小, 在腔体下层外壁、中间层隔板和吸入管处存在孤立液相区, 会出现缩孔和缩松缺陷。如图14 (c) 和图14 (d) 所示, 凝固至后期时, 型腔内仍残留少量孤立液相区; 出、入口法兰部位补缩收缩效果良好; 大法兰中仍然有残留的金属液无法得到补缩。表明冒口的水平和垂直补缩距离不足, 需要进一步优化。

概率缺陷参数图如图15所示。相较初始铸造工艺

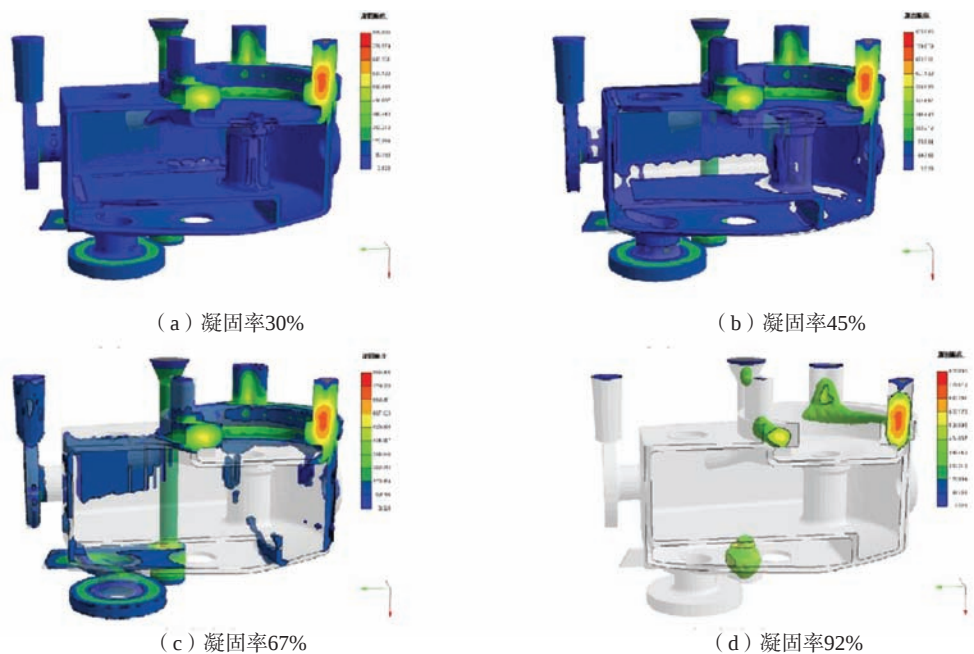
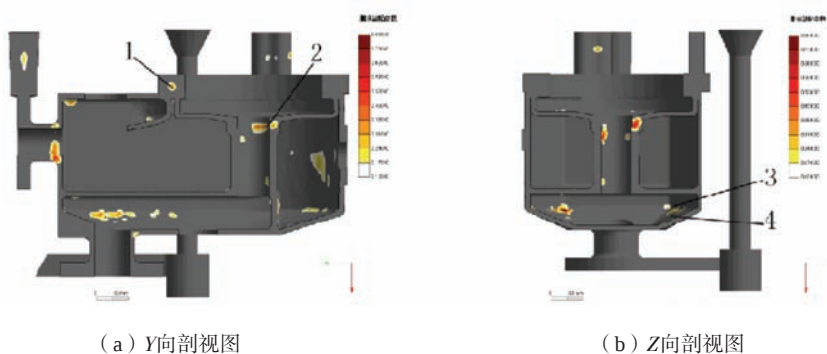


图14 凝固过程中固、液相分布

Fig. 14 Solid-liquid phase distribution in the solidification process



1. 大法兰中心处; 2. 吸入管内部; 3. 腔体外壁交接处; 4. 腔体底部平面

图15 概率缺陷参数图

Fig. 15 Probability defect parameter diagram

方案, 隔板与腔体交接处等壁厚较厚部位缺陷明显减轻。概率缺陷大于0.9的单元体积为 $1.6 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 占泵体总体积的1.4%, 缺陷部位主要是铸件的关键部位, 需要进一步优化补缩系统。

4.4 补缩系统优化方案二

优化后补缩系统如图16所示, 基于优化方案一, 将大法兰部位冒口调整为2个, 并增加冒口体积^[13]。增加了大法兰下方冷铁的长度和厚度, 在吸入管底面处设计冷铁。

固、液相分布模拟结果如图17所示。图17(a)所示, 凝固至40%时, 中间层隔板和吸入管及法兰端面已开始。凝固至图17(b)时, 型腔各部位均得到持续补

缩。判断冷铁不仅能使铸件的厚大部位先凝固, 也能增强冒口的补缩能力。图17(c)和图17(d)所示, 凝固至后期, 各部位补缩效果良好。虽然型腔内仍然残留少量孤立液相区, 但是造型时可敷设铬铁矿砂, 以缩短这些部位的凝固时间, 从而避免出现缺陷^[14]。

概率缺陷参数图如图18所示。型腔外壁交接等壁厚较厚部位缺陷基本消除。概率缺陷大于0.9的单元体积为 $1.0 \times 10^5 \text{ mm}^3$, 比初始方案减少了69%, 因此认为此工艺方案合理有效。工艺出品率由初始工艺方案的56%提高到77%, 降低了生产成本。

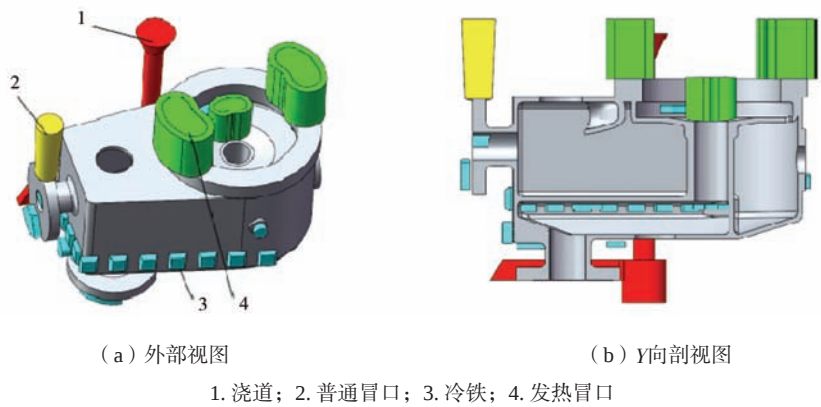


图16 补缩系统优化方案二

Fig. 16 Feeding system optimization scheme 2

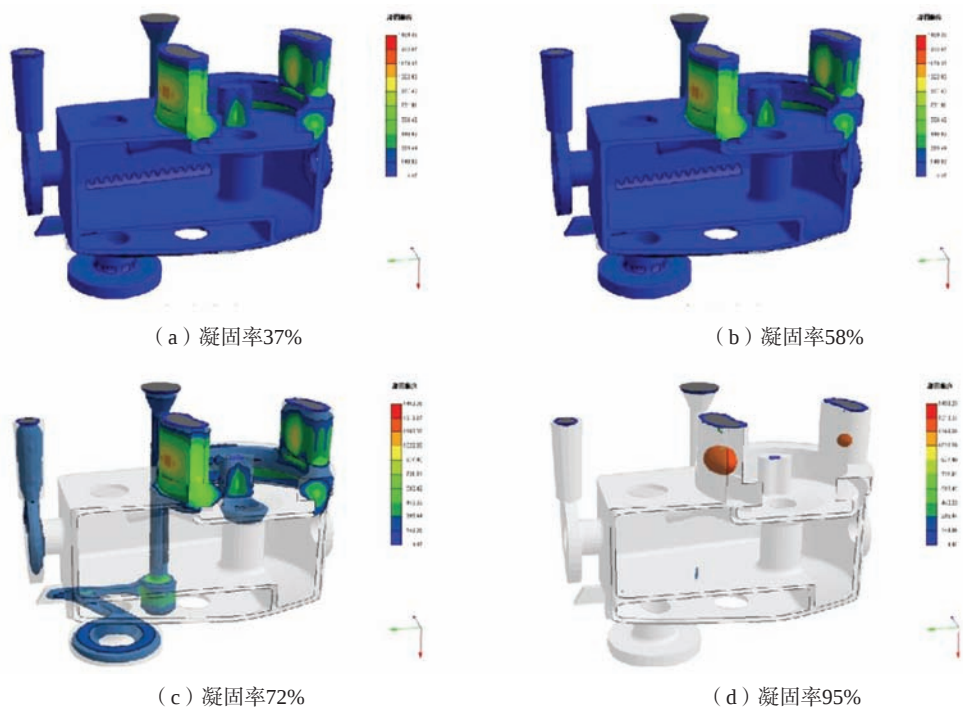


图17 凝固过程中固液相分布

Fig. 17 Solid-liquid phase distribution in the solidification process

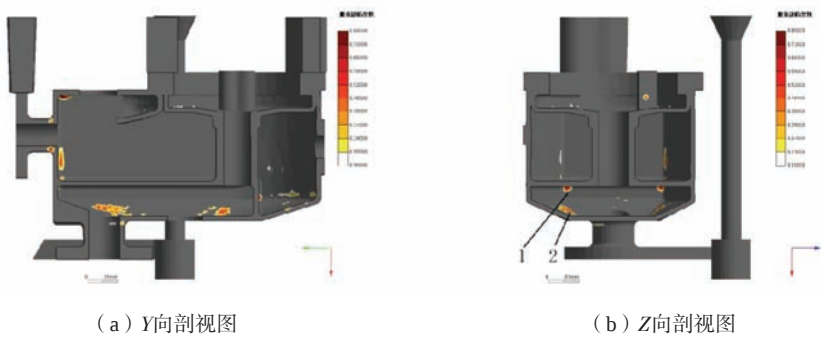


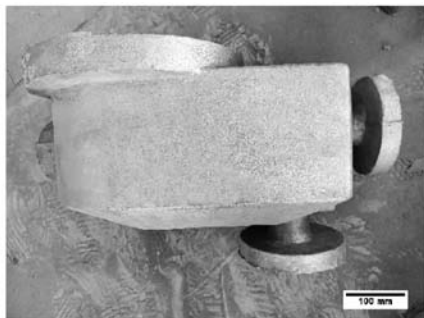
图18 概率缺陷参数图

Fig. 18 Probability defect parameter diagram

5 验证试验

按照所设计铸型结构和生产工艺参数方案进行铸造生产试验,铸造后经固溶处理,铸件如图19所示。铸件外观质量符合图样要求。

根据技术要求进行气密试验,采用 N_2 气体进行检漏,在泵体内通入2.2 MPa气体后保压10 min,放入水槽中观察无气泡泄露,进而判定试件质量合格,检测现场如图20所示。



(a) 侧面照片



(b) 底部照片

图19 铸件图

Fig. 19 Casting drawing



图20 气密试验检测现场图

Fig. 20 Airtight test site map

6 结论

(1) 设计初始铸造工艺方案,完成模拟计算。结果表明:金属液紊流严重,存在较多分散热节,无法

实现顺序凝固。按初始铸造工艺方案生产铸件,检测发现:铸件中存在冷豆、皱皮、夹渣、缩孔和缩松等铸造缺陷。

(2) 分析初始铸造工艺浇注系统充型过程中的速度场,经过两次浇注系统优化设计,完成半封闭式浇注系统铸造工艺方案设计和模拟,结果表明:充型过程中金属液流动平稳,速度差小于0.5 m/s。模拟补缩系统凝固过程中的固液相分布及缩松和缩孔分布情况,经过两次补缩系统优化设计,确定冒口和冷铁的 shape、大小和位置,完成补缩系统铸造工艺方案设计和模拟,结果表明:该方案可以实现顺序凝固,且孔洞类缺陷体积小(占泵体总体积的0.88%)。优化后的最终工艺方案中,铸件中夹渣类缺陷显著减少,孔洞类缺陷减少69%,工艺出品率提高11%。

(3) 按照优化后的铸造工艺设计方案进行铸造生产验证试验,经检验,铸件符合验收标准要求,从而证明本研究思路和方法对指导实际生产可行。

参考文献:

- [1] 吕庆明. 石化装置屏蔽泵应用前景研究 [J]. 中国设备工程, 2024 (10): 261-263.
- [2] 徐诒浩. 泵铸件的材料选择及质量要求——目前国内外泵铸造技术的发展水平论述 [J]. 排灌机械, 1990 (3): 17-24.
- [3] 吴志兵. 水泵运行中的常见故障与检修措施 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13 (2): 141-144.
- [4] 李圣海, 兰鹏, 路祎帆, 等. 奥氏体不锈钢连铸坯轧制无缝管的缺陷遗传与控制 [J]. 连铸, 2024 (2): 71-76.
- [5] 李晓芳, 安朝阳, 陈书山, 等. 汽轮机用端盖铸造工艺设计及浇注系统优化 [J]. 铸造设备与工艺, 2022 (3): 51-53.
- [6] 杨双华. 大型柴油机气缸盖铸造工艺设计 [J]. 现代铸铁, 2013, 33 (1): 40-43.
- [7] 马聪, 杨梦馨, 程强, 等. 某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (5): 582-587.
- [8] 马青芬. 铸造缺陷分析及工艺优化措施 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32 (5): 177-179.
- [9] 朱巍峰, 冯楠, 陈正华, 等. 金属铸造件组织缺陷分析 [J]. 科技风, 2019 (20): 169.
- [10] 何志, 徐学利, 周好斌, 等. 铸件浇注系统的设计与优化 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (23): 81-84.
- [11] 杨曼利, 王倩, 王燕坡, 等. 浇注系统设计对不锈钢ZG1Cr11Ni2WMoV轴承座铸件质量的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (5): 473-475.
- [12] 张川, 余瑾. 基于ProCAST的124D型主泵泵壳铸造工艺设计及优化 [J]. 大型铸锻件, 2020 (1): 14-17.
- [13] 胡志强, 杜延强. 发热保温冒口在铸钢件生产过程中的应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2021 (9): 107-112.
- [14] JOSAN A. Studies regarding the use of molding mixtures based on chromite-sand to the casting of the steel parts [J]. Solid State Phenomena, 2016, 254: 243-248.

Research on the Optimization of the Casting Process Design for Self-Priming Pump Bodies

LIU Jia-ming¹, YANG Jun², YUE Zong², WANG Xiao-lei¹

(1. Dalian Huanyou Canned Pump Co., Ltd., Dalian 116041, Liaoning, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

Based on the structure and material of the self-priming pump body, design the initial casting process plan, and use FLOW-3D casting simulation software to complete numerical simulation calculations for each plan. The defects observed in actual production castings were compared and analyzed, and potential root causes were predicted by evaluating the type, size, and location of defects. After two iterations of pouring and feeding system optimization, a better casting process design scheme was determined. The casting production verification was conducted according to the optimized casting process design scheme, and the resulting castings met the acceptance criteria requirements, thus proving that the research methods and ideas had certain feasibility in guiding the actual production of casting.

Key words:

flow-3D; self-priming pump body; casting process design; numerical simulation; scheme optimization