

• 工艺技术 Technology •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4239

阀体铸造工艺设计及优化

陈国宝¹, 高通旺¹, 赵程斌¹, 卢其炎¹, 黄嵘森¹, 廖龙兴^{1,2}

(1. 集美大学 海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361000 2. 大连理工大学 高性能制造研究所, 辽宁 大连 116000)

摘要: 铸造阀体作为液压阀的重要组成部分, 其质量和性能对于液压系统的可靠性、稳定性和寿命有着重要的作用。随着工业技术的不断发展, 各行业对液压阀的要求日益提高。为提升铸造阀体的工艺稳定性, 使其适配高压、高温、高腐蚀等复杂工况条件, 构建阀体铸件三维模型, 运用 ProCAST 数值模拟软件对铸件充型及凝固过程进行仿真分析, 明确缩松、缩孔缺陷的形成机理。通过优化浇道系统结构、设计冒口补缩方案及设置冷铁激冷单元, 实现缩松、缩孔缺陷体积占比的有效降低。结果表明, 改进后铸件的缩松及缩孔缺陷得到有效控制, 缺陷体积减少 95% 以上。

关键词: 阀体; 缩松缩孔; 铸造工艺; 铸造质量

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)10-1019-08

Casting Process Design and Optimization of the Valve Body

CHEN Guobao¹, GAO Tongwang¹, ZHAO Chengbin¹, LU Qiyan¹, HUANG Rongsen¹, LIAO Longxing^{1,2}

(1. College of Ocean Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361000, China; 2. High Performance Manufacturing Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Casting valve bodies serve as critical components of hydraulic valves. The quality and performance of hydraulic systems are highly important for ensuring their reliability, stability, and service life. With the continuous development of industrial technology, the requirements for hydraulic valves in various industries are increasing daily. To improve the stability of the casting process of the casting valve body and adapt the product to more complex high-pressure, high-temperature, and high-corrosion working conditions, a casting model of the valve body was established. The casting process was simulated through the numerical simulation software ProCAST. The causes of shrinkage porosity and shrinkage cavity defects have been discovered. The volume of shrinkage holes and porosity defects is reduced by measures such as optimizing the runner, setting risers, and placing chill irons. The results show that the shrinkage hole and porosity defects of the improved castings have been effectively controlled and that the defect volume has been reduced by more than 95%.

Key words: valve body; shrinkage hole and porosity; casting process; casting quality

在现代工业的庞大体系中, 液压系统占据着关键地位, 广泛应用于工程机械、汽车制造、航空航天等众多领域。而液压阀作为液压系统的核心控制部件, 其性能直接影响整个液压系统的运行效果^[1-3]。铸造阀体作为液压阀的重要组成部分, 其质量和性能对于液压系统的可靠性、稳定性和寿命有着至关重要的作用^[4-5]。随着工业技术的不断发展, 各行业对液压阀的要求日益提高, 例如在高压、高温、高腐

蚀等极端工况下的稳定运行^[6-7], 这对铸造阀体的性能提出了更为严格的挑战。

数值模拟技术作为一种低成本、高效率的研究方法, 在国内外已广泛运用在各种阀体铸造工艺的优化中^[8-13]。Xie 等^[14]通过 ProCAST 软件模拟和优化铸件的凝固过程, 确定了最佳工艺参数, 优化后的铸件无铸造缺陷。杜尊重等^[15]基于 ProCAST 软件对阀体消失模铸造工艺进行模拟, 研究阀体铸件在充型、

收稿日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(52305058); 厦门市自然科学基金(3502Z202373030); 福建省自然科学基金(JAT220167); 泸州市科技计划(2024JYJ077)

作者简介: 陈国宝, 2002 年生, 学士, 本科生。研究方向为铸造工艺。Email: 2574265220@qq.com

通信作者: 廖龙兴, 1990 年生, 博士, 讲师。研究方向为先进制造技术。Email: 1625146629@qq.com

引用格式: 陈国宝, 高通旺, 赵程斌, 卢其炎, 黄嵘森, 廖龙兴. 阀体铸造工艺设计及优化[J]. 铸造技术, 2025, 46(10): 1019-1026.

CHEN G B, GAO T W, ZHAO C B, LU Q Y, HUANG R S, LIAO L X. Casting process design and optimization of the valve body [J]. Foundry Technology, 2025, 46(10): 1019-1026.

凝固过程中的流场、温度场、固相率分布和缺陷分布,并根据模拟结果优化工艺,优化后缺陷率减少了42%以上。冯坤等^[16]使用MAGMA铸造仿真软件模拟现有铸造工艺,并对浇注工艺系统及冷却工艺系统进行工艺优化,优化后基本可消除内腔缺陷,缺陷率下降约20%,大幅提升了铸件的承压能力。Ma等^[17]采用ProCAST模拟了过共晶高铬铸铁充填凝固过程中的温度场和缺陷预测等,探讨了工艺过程中浇注温度、负压和悬浮剂添加量的影响,提出了最佳工艺参数,提高了凝固速率。

在阀体铸造时,如果铸造工艺不合适,极易产生疏松、缩孔等缺陷,影响铸件的性能,甚至产生废品^[18-19]。为了保证阀体的铸造品质,本文通过模型建立和分析来确定铸钢阀体铸件的铸造工艺方案。使用ProCAST软件对阀体的铸造过程进行模拟,根据模拟结果,分析模拟过程中的缩松和缩孔等缺陷的原因,进而优化设计方案,改进铸造工艺。

1 零件的结构与材料

图1为阀体铸件三维结构,整体结构相对对称,内部为空腔,铸件的轮廓尺寸为长760 mm,宽760 mm,高270 mm。体积约为73 053.11 cm³,质量约18 499.22 kg,最厚大部位32 mm,最小壁厚为22 mm,孔径均为500 mm。观察铸件结构,可以发现热节部位位于阀体的背部。

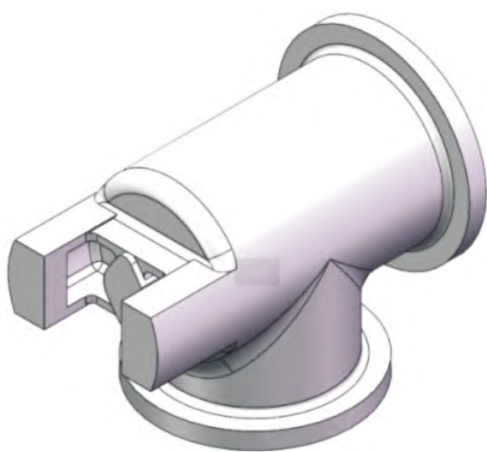


图1 零件三维结构

Fig.1 Three-dimensional structure diagram of the part

2 铸造工艺方案设计

2.1 造型材料的选择

该铸件采用ZG275-485H铸钢,参考GB 7659-1987标准,通过酚醛树脂砂工艺进行小批量生产,手工造型,确保铸件尺寸精度高、表面质量优良,同时旧砂易于再生利用。此外,采用醇基石墨粉涂料

在铸型和砂芯表面形成绝热涂层,有效避免铸件产生粘砂等缺陷,确保产品质量稳定可靠。

2.2 分型面的确定

铸造分型面是指铸型组元间的接合面。合理地选择分型面,能简化铸造工艺、提高生产率、降低成本、提高铸件质量。分型面的选择应尽量与浇注位置一致,使两者协调起来,这样使铸造工艺简便,有易于保证铸件质量。

阀体铸件的的分型形式多样,但在生产中具体确定分型面时应考虑以下原则:铸型易于组装固定;铸型的制造尽可能简便;铸型要坚固耐用,重复使用性好;确保下芯操作方便,型芯安放稳定。因此,本研究上下方向以铸件中心线为分型面,如图2所示。这种分型方式有助于金属液在型腔内围绕两孔的位置均匀分布,可加工性较好。且分型面置于最大截面处,下芯比较方便。

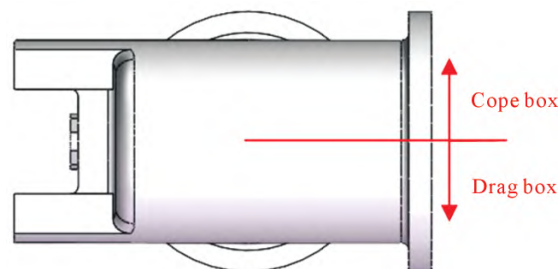


图2 分型面位置

Fig.2 Position of the parting surface

2.3 浇注位置与浇注系统设计

根据ZG275-485H铸钢的性能特点,ZG275-485H铸钢在熔炼及浇注时表面可能形成一层铁锈皮,液态合金若卷入铁锈皮夹层,容易引发夹杂和缩孔等缺陷。为此,在浇注系统的选择上应减少对熔炼金属液的扰动,保持金属液流动的稳定性。为此,选择封闭式浇注系统作为本次设计的浇注方式。

由于利用横浇道进行补缩,浇注系统的具体设计参数为:浇道比 $\sum S_{直} : \sum S_{横} : \sum S_{内} = 1.4 : 1 : 1$ 。其中,各个组元的横截面积分别为 $\sum S_{直} = 108 \text{ cm}^2$, $\sum S_{横} = 75 \text{ cm}^2$, $\sum S_{内} = 75 \text{ cm}^2$ 。为确保开放式浇注系统的压头满足要求,根据铸件最大壁厚约32 mm和铸件长度760 mm,直浇道高度设定为400 mm,以保证充型压力的稳定。铸件的三维模型总质量550 kg,浇注时间 t 通过下式计算^[20]:

$$t = S\sqrt{G} \quad (1)$$

式中, S 为与铸件有关的系数,本铸件取1.35; G 为铸件、浇注系统的总质量。根据式(1)可以计算出浇注时间为31.6 s,浇注系统的具体设计如图3所示。

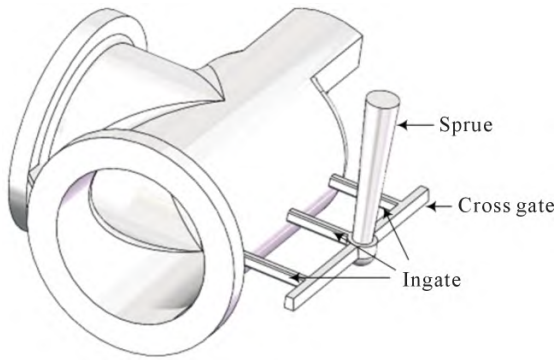


图3 浇注系统
Fig.3 Gating system

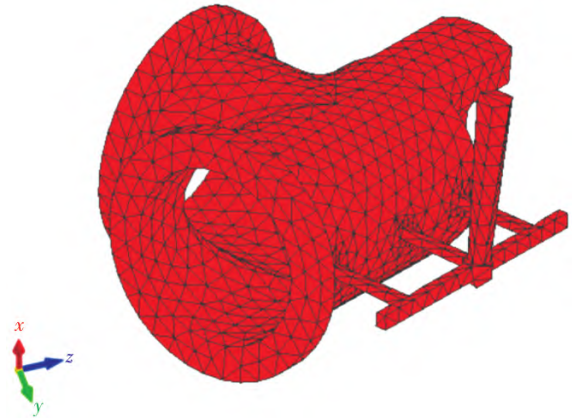


图4 模型网格
Fig.4 Diagram of the model mesh

3 铸造工艺模拟与分析

3.1 网格模型建立

本次模拟采用三维建模软件精确绘制阀体铸件实体,将上述模型保存为兼容的IGS格式,在ProCAST软件中,利用mesh模块进行划分出491 800个三维网格单元,如图4所示。

3.2 模拟参数设置

在ProCAST的Cast模块中设置阀体材料为ZG275-485H合金,其化学成份如表1所示,并使用ProCAST软件计算出该材料的热物性参数。如图5所示,阀体材料的液相线温度为1 498.3℃,如图5b所示。浇注温度通常要高于液相线温度40~60℃,所以浇注温度设为1 550℃。铸型初始温度为20℃,近似实际生产环境室温。铸型材料为酚醛树脂砂,合金液和铸型材料的换热系数取值500 W/(m²·K)^[21],冷

表1 ZG275-485H合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of the ZG275-485H alloy
(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Mo	V
Content	0.25	0.5	1.2	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.05	0.05

却方式采用空冷^[22]。

3.3 充型过程分析

在充型过程中,时间点为9.4 s时(图6a),金属液在重力的作用下,通过内浇道注入型腔并铺满型腔底部,此时的充型量达到30%。内浇道的参数依据型腔底部的几何形状进行优化设计,其目的在于保障金属液能够均匀地在型腔底部铺展,并且能够有效避免卷气现象的出现,此阶段构成了整个充型过程的关键起始环节。

当充型时间来到15.8 s时(图6b),浇注系统与型腔之间的阻力达成平衡状态,从而使得液面能够

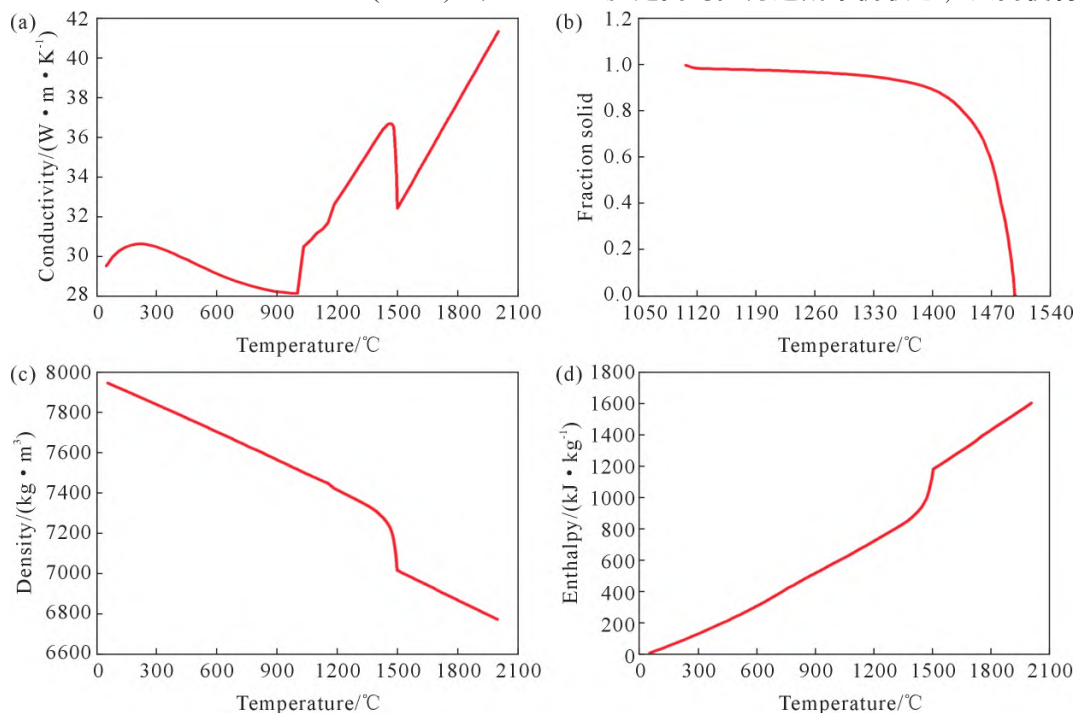


图5 合金热物性参数:(a)热导率;(b)固相率;(c)密度;(d)热焓

Fig.5 Thermal properties of the alloy: (a) conductivity; (b) solid fraction; (c) density; (d) enthalpy

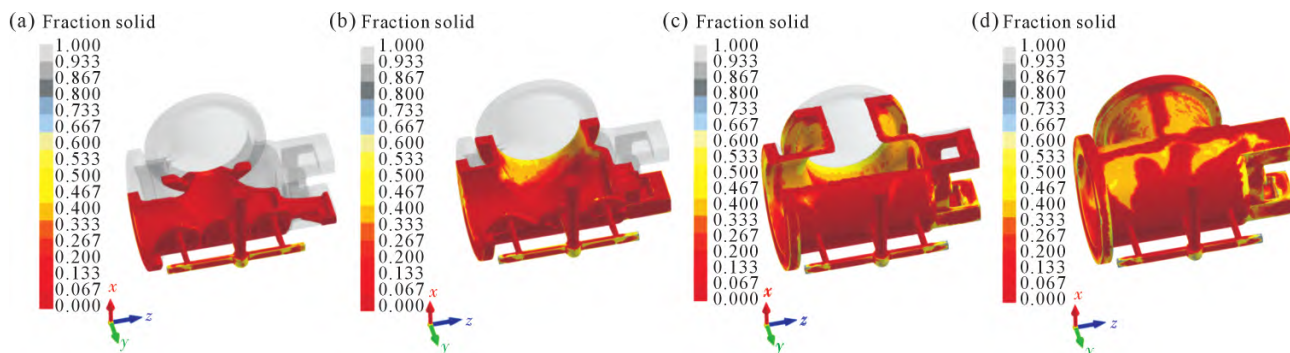


图6 充型过程: (a) $t=9.4$ s; (b) $t=15.8$ s; (c) $t=25.7$ s; (d) $t=31.6$ s
Fig.6 Filling process: (a) $t=9.4$ s; (b) $t=15.8$ s; (c) $t=25.7$ s; (d) $t=31.6$ s

平稳地上升,此时的充型量已提升至50%。在充型时间为25.7 s时(图6c),金属液继续向上攀升,充型量达到80%。直至充型时间达到31.6 s时(图6d),充型过程宣告结束。从模拟结果来看,同种颜色呈现水平带状分布,这一现象从流体动力学原理上表明金属液在水平方向的流速是均匀的。基于此,可以推断整个充型过程较为平稳,没有出现较大幅度的液面波动情况。综合而言,此次充型效果表现良好,所设计的浇注系统基本能够满足铸件的充型需求。

3.4 凝固过程分析

图7为铸件凝固过程的温度分布。可以看出,当凝固30%时(图7a),浇铸系统法兰等部分温度低于液相线(1498.3°C),这些部分开始凝固。当凝固60%时(图7b),铸件中部的温度也低于液相线,铸件中部也开始凝固。当凝固90%时(图7c),法兰和阀盖

厚壁等处的温度比铸件中部高,因此,可以推测铸件中部先凝固完成,法兰和阀盖厚壁等处是后凝固完成。当凝固率为100%时(图7d),整个浇铸系统的温度都已经低于固相线,凝固完成。

图8为铸件凝固过程中固相率低于60%的区域。当铸件凝固至40%时(图8a),可以看出铸件中部凝固的速度较快。当铸件凝固至50%时(图8b),横浇道已经凝固。当铸件凝固至70%时(图8c),铸件中部基本已经凝固。当铸件凝固至80%时(图8d),浇铸系统大部分都已凝固,法兰和两个阀盖厚壁凝固较慢,还有部分未凝固。

从中可以得出法兰等处凝固较慢的原因,这是由于法兰盘处型壁较厚,铸件凹处的散热条件差,导致铸件的凝固速度较慢,铸件中部无法对法兰盘和两个阀盖厚壁起到补缩的作用,此时法兰盘和两个

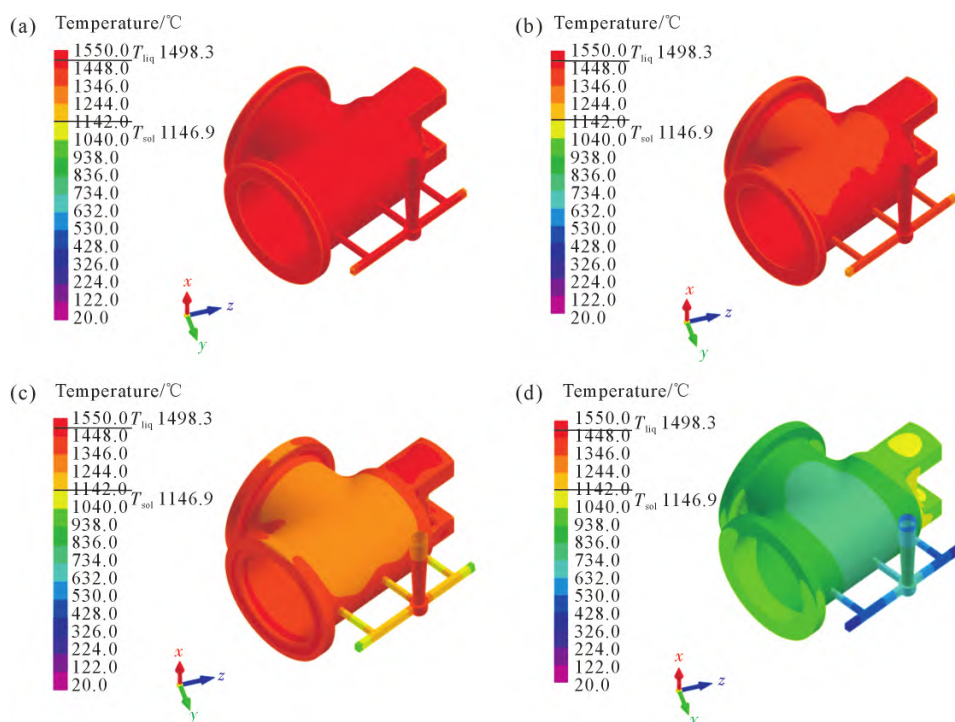


图7 铸件凝固过程的温度分布: (a) 凝固30%; (b) 凝固50%; (c) 凝固80%; (d) 凝固100%

Fig.7 Temperature distribution during the solidification process of the casting: (a) 60% solidified; (b) 70% solidified; (c) 90% solidified; (d) 100% solidified

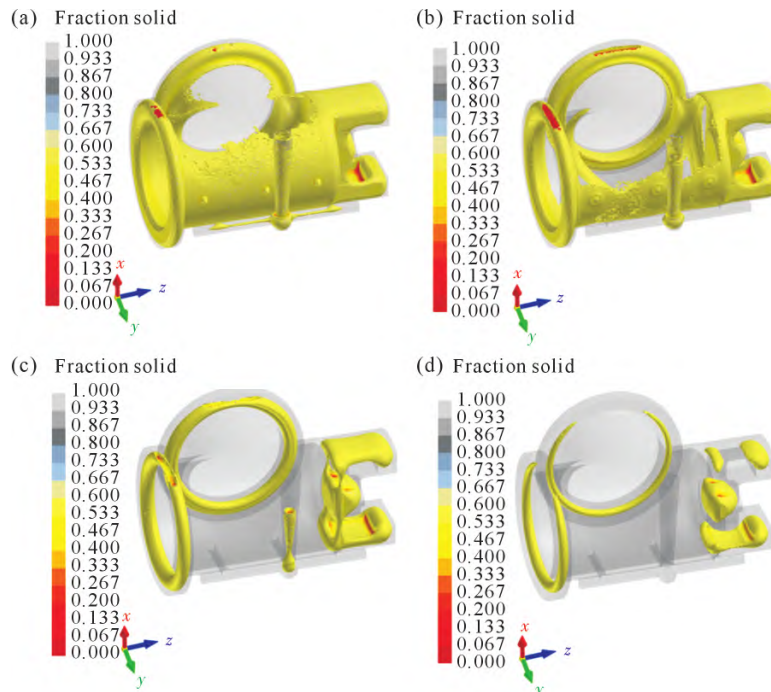


图8 凝固过程中的固相率低于60%的区域:(a)凝固40%;(b)凝固50%;(c)凝固70%;(d)凝固80%

Fig.8 Regions with solid fractions less than 60% solidified: (a) 40% solidified; (b) 50% solidified; (c) 70% solidified; (d) 80% solidified

阀盖厚壁最后凝固完成,因此凝固过程中随着体积的收缩很可能会出现缩松、缩孔缺陷。

3.5 铸件的缺陷分析

ProCAST 软件可以预测出可能存在缩松缩孔的区域,图9为ZG275-485H铸钢阀体凝固后收缩率 $>3\%$ 的缺陷分布情况,紫色部分为铸件内部存在的体积较大的缩松缩孔缺陷。从缺陷图中可以看出,这种铸件的缩孔和缩孔缺陷主要集中在两个法兰和阀盖的两个厚壁上。这是由于铸件的中部会更快凝固,使得补缩通道被阻塞,钢液得不到有效补充,最终形成孤立液相区,并产生缩松、缩孔缺陷。此时铸件缺陷体积为 314.03 cm^3 ,经过分析,浇注系统设计不当,无法对法兰和两个阀盖厚壁进行补缩是产生缺陷的主要原因。

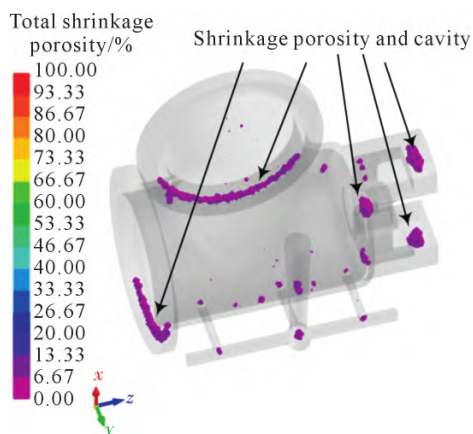


图9 阀体缺陷分布情况

Fig.9 Distribution of defects in the valve body

4 铸造工艺优化

4.1 优化方案

首先,经过观察,在右侧部分发现较多缺陷,可能是由于金属液填充过慢,导致产生大面积缺陷,因此决定采用优化浇道的方式,在铸件右侧多增添一个内浇道,内浇道的横截面积和初始设置一致。优化后的浇道系统如图10a所示。

其次,阀体的缩松和缩孔缺陷主要集中在两个法兰和阀盖的两个厚壁上,通过缺陷分析,这是由于法兰和两个厚壁部分的凝固时间更长,铸件的中部部分更快凝固,导致补缩通道被阻塞,法兰等处的钢液得不到有效补充,进而产生缩松、缩孔缺陷。基于此,为了减少法兰等处的凝固时间,在两个法兰和两个阀盖厚壁部分放置4块冷铁,使其先凝固。并且为了让法兰和阀盖厚壁等处的缺陷更少,让冷铁基本覆盖法兰和两个阀盖厚壁;将冷铁1和冷铁2的形状设置为圆环状,形状和尺寸相对法兰较小。冷铁1和2的大小相等,尺寸为外圆半径325 mm、内圆半径260 mm、厚30 mm;冷铁3和冷铁4的形状设置为长方体,冷铁3和4的大小相等,尺寸为长230 mm、宽132 mm、厚30 mm。并且在两个阀盖厚壁上方设置冒口,用于法兰等处的补缩,冒口直径为50 mm,冷铁与冒口布置位置如图10b所示。

4.2 优化方案模拟结果分析

工艺改进(优化浇道、增加冒口和增设冷铁)后

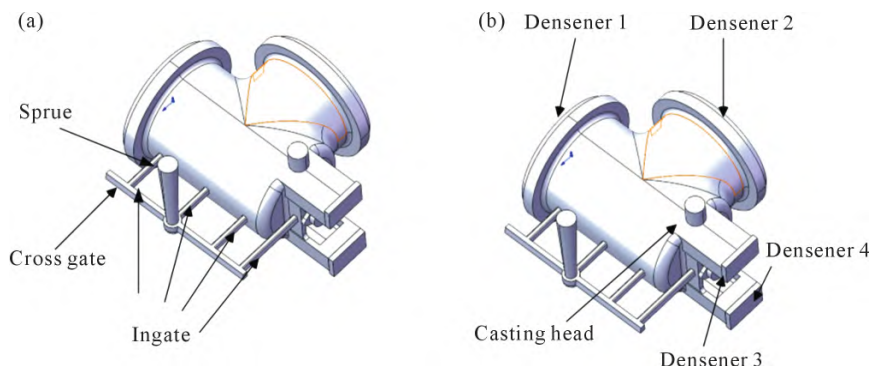


图 10 铸造工艺优化:(a) 优化后的浇铸系统;(b) 冷铁与冒口位置

Fig.10 Optimization of the casting process: (a) the optimized gating system; (b) the positions of chill irons and risers

的铸件凝固过程,如图 11 所示。当浇铸系统凝固 20% 时(图 11a),法兰和两个阀盖厚壁率先开始凝固。当浇铸系统凝固 40% 时(图 11b),铸件中部也开始凝固。当浇铸系统凝固 60% 时(图 11c),浇道也开始进一步凝固。当浇铸系统凝固 80% 时(图 11d),法兰等处已经凝固完成,铸件中部还在继续凝固。从中可以得出,增加冷铁之后,法兰等处的凝固时间缩短,已经先于铸件中部凝固。

图 12 为阀体凝固后的收缩率 $>3\%$ 的缺陷分布情况,从中能够清晰地观察到,铸件中的关键部位,阀盖厚壁和法兰部分出现缩松和缩孔问题的区域,其缺陷大部分得到有效解决,铸件缺陷体积降为 13.55 cm^3 ,缺陷率减少了 95% 以上。优化后的浇注工艺方案通过缩短法兰等处的凝固时间,使其先于铸件中部凝固,铸件中部能够为法兰等处进行补缩,大

量减少了因凝固收缩而产生的缩松现象。结果表明,浇道优化、增加冒口和增设冷铁对铸件起到了较好的补缩和冷却作用,验证了改进方案的合理性。

5 结论

(1) 使用 ProCAST 软件对 ZG275-485H 阀体铸件的铸造过程进行了模拟研究,发现法兰及阀盖厚壁部位处存在较多缩松和缩孔缺陷。通过对凝固过程的分析,得知缺陷产生原因:法兰盘等处壁厚较大,凝固时得不到有效补缩,从而产生缩松、缩孔。

(2) 通过对浇道进行了重新设计,并且在法兰等关键部位放置冷铁、设置冒口,缩短了法兰等处的凝固时间,使其先于铸件中部凝固,并且能够为缺陷部分及时补缩。使铸件内部缺陷率减少了 95% 以上,优化了生产工艺。

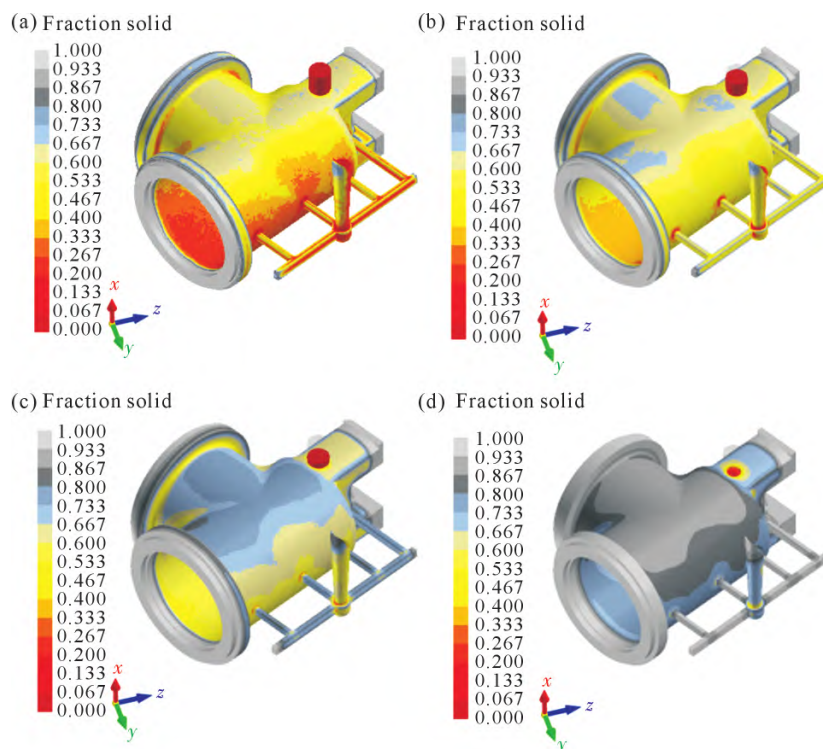


图 11 工艺优化后的凝固过程:(a) 凝固 20%;(b) 凝固 40%;(c) 凝固 60%;(d) 凝固 80%

Fig.11 Solidification process after process optimization: (a) 20% solidified; (b) 40% solidified; (c) 60% solidified; (d) 80% solidified

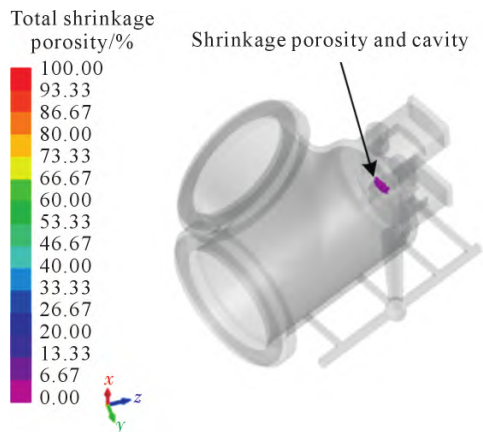


图 12 工艺优化后的缩松缩孔分布

Fig.12 Distribution of shrinkage holes and porosity after process optimization

参考文献:

- [1] LI Y C, LI R C, YANG J R, YU X D, XU J K. Review of recent advances in the drive method of hydraulic control valve[J]. Processes, 2023, 11(9): 2537.
- [2] SCIATTI F, TAMBURRANO P, DISTASO E, AMIRANTE R. Digital hydraulic valves: Advancements in research[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e27264.
- [3] RAMESH M D, TAN Y A, LAN X K. Optimization of a hydraulic valve design using CFD analysis[R]. SAE Technical Paper, 2005.
- [4] 李文兵,叶德莉,董华宝. 跨声速风洞调压阀制造工艺[J]. 金属加工(冷加工), 2024(1): 49-53.
LI W B, YE D L, DONG H B. Manufacturing process of transonic wind tunnel pressure regulating valve[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2024(1): 49-53.
- [5] 张芳. 阀体压铸工艺设计及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12): 1353-1356.
ZHANG F. Design and optimization of casting process of valve body die[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(12): 1353-1356.
- [6] 杨建,夏鹏飞,曹峤,宋帮鹏,朱玮. 一种高压加氢阀体铸造缺陷分析与工艺优化[J]. 铸造工程, 2023, 47(6): 16-19.
YANG J, XIA P F, CAO Q, SONG B K, ZHU W. Defect analysis and process optimization of a high pressure hydrogenation valve body casting[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(6): 16-19.
- [7] 杨建,曹峤,宋帮鹏,蒯云龙,孙志标. 一种高磅级阀体的铸造缺陷分析与工艺优化[J]. 铸造工程, 2021, 45(2): 61-63.
YANG J, CAO Q, SONG B K, KUAI Y L, SUN Z B. Analysis of casting defects and process optimization for a high-poundage valve body[J]. Foundry Engineering, 2021, 45(2): 61-63.
- [8] 宋正义. 铸钢蝶阀的缺陷分析及解决措施[J]. 科技视界, 2019(16): 32-34, 43.
SONG Z Y. Defect analysis and solutions of cast steel butterfly valve[J]. Science & Technology Vision, 2019(16): 32-34, 43.
- [9] 李兵,刘剑,蒲正海,蒲宇捷,陈喆. 钛合金阀体件“一模多件”铸造工艺优化设计[J]. 精密成形工程, 2023, 15(1): 86-93.
LI B, LIU J, PU Z H, PU Y J, CHEN Z. Optimization design of “one mold multi-parts” casting process for titanium alloy valve body[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(1): 86-93.
- [10] 裴颖脱. 基于计算机模拟的安全阀阀体多向模锻精密成形工艺[J]. 锻压技术, 2022, 47(5): 12-18.
PEI Y T. Multi-directional die forging precision forming process of safety valve body based on computer simulation[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(5): 12-18.
- [11] SEYDANI M Z, KRIMI A, KHELLADI S, BEDEL M, EL MAN-SORI M. 3D numerical simulation and experimental validation of resin-bonded sand gravity casting: Filling, cooling, and solidification with SPH and ProCAST approaches[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47: 102329.
- [12] 高浩斐,屈银虎,钟涛,王震,陈苗苗,王钰凡,张红. 基于 ProCAST 的阀体零件熔模铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 657-660.
GAO H F, QU Y H, ZHONG T, WANG Z, CHEN M M, WANG Y F, ZHANG H. Optimization of casting process of valve body by ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5): 657-660.
- [13] 潘安霞. 基于 ProCAST 的超临界阀体铸造工艺优化[J]. 铸造技术, 2014, 35(10): 2431-2434.
PAN A X. Optimization of casting process for supercritical body based on ProCAST[J]. Foundry Technology, 2014, 35(10): 2431-2434.
- [14] XIE S Y, LYU Z Z, DONG S Q. Study on the optimization of investment casting process of exhaust elbow for high-power engine[J]. Metals, 2024, 14(4): 481.
- [15] 杜尊重,徐哲,时晓,陈烜,袁岳东,张国群,刘琨,陈正. 基于实型铸造数值计算的制动铸件工艺设计与调控[J]. 铸造技术, 2022, 43(9): 836-840.
DU Z J, XU Z, SHI X, CHEN X, YUAN Y D, ZHANG G Q, LIU K, CHEN Z. Process design and regulation of brake casting based on real casting numerical calculation[J]. Foundry Technology, 2022, 43(9): 836-840.
- [16] 冯坤,师羽. 水击泄压阀阀体铸造工艺优化研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(12): 1096-1099.
FENG K, SHI Y. Study on optimization of the casting process of a surge relief valve body[J]. Foundry Technology, 2022, 43(12): 1096-1099.
- [17] MA H L, FU H G. Study on simulation of mold filling and solidification characteristics of hypereutectic high-chromium cast iron by lost foam suspension casting[J]. Metals, 2023, 13(10): 1761.
- [18] 李乐义,卢明锡,卢兴,王运程. 蝶阀体的精铸工艺与结构优化方案[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(1): 59-62, 105-106.
LI L Y, LU M X, LU X, WANG Y C. Process of butterfly-valve body and its structure optimization[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(1): 59-62, 105-106.
- [19] 蒋智慧,韩振中. 铸铁件常见铸造缺陷的防止方法[J]. 现代钢铁, 2005, 25(6): 59-63.
JIANG Z H, HAN Z Z. Common defects of iron castings and measures of defects prevention[J]. Modern Cast Iron, 2005, 25(6): 59-63.
- [20] 刘文川. 铸钢件的有效浇注时间计算公式[J]. 铸造, 2002(2): 115-118.
LIU W C. Formula of effective pouring time for steel castings[J].

Foundry, 2002(2): 115-118.

- [21] 余勃, 张学宾, 杨冉, 周延军, 郁炎, 陈纪东. 基于 ProCAST 的铜合金舷侧阀体铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 471-476.

YU B, ZHANG X B, YANG R, ZHOU Y J, YU Y, CHEN J D. Optimization of electrohydraulic side valve castings of Cu alloy based on ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024,

44(4): 471-476.

- [22] 张云平. 基于 ProCAST 的制动铸件精确成形数值模拟与工艺提升[J]. 精密成形工程, 2022, 14(9): 97-103.

ZHANG Y P. Casting numerical simulation of butterfly valve for exhaust brake based on ProCAST[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(9): 97-103.

(责任编辑: 宫文婧)