

# 基于 ProCAST 吸阀壳体铸铝件铸造工艺设计

马煜林<sup>1</sup>, 刘少华<sup>1</sup>, 纪良鑫<sup>1</sup>, 王芃喆<sup>1</sup>, 李婷惠子<sup>1</sup>, 魏长锁<sup>2</sup>, 赵林<sup>3</sup>

(1. 沈阳大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110044; 2. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471003;  
3. 中国科学院沈阳金属研究所, 辽宁沈阳 110016)

**摘要:** 以吸阀壳体铸件为研究对象, 通过对铸件材质、形状、大小及结构特点进行详细分析, 提出合理的铸造工艺设计方案。运用ProCAST数值模拟软件进行铸造工艺数值模拟, 对模拟结果的充型过程、缺陷分布以及工艺改进性等方面进行分析。结果表明, 采用平做立浇工艺、开放式底注式浇注系统, 再添加冒口及冷铁, 使铸件形成一个自下而上的顺序凝固, 可消除铸件存在的缩松、缩孔缺陷, 确保得到符合使用条件的合格铸件。

**关键词:** 吸阀壳体; 铸铝件; ProCAST软件; 铸造工艺; 铸造缺陷

吸阀壳体是油储罐必不可少的部件之一, 其充分利用油罐本身的承压能力来减少油蒸气排放, 使罐内的压力不再升高, 其原理是利用阀盘的重量来控制油罐的吸气负压<sup>[1]</sup>。吸阀在正压的工作环境中持续受到一定的冲击, 所以吸阀壳体要具有较高的强度和韧性。浇注工艺方案对铸件的质量有很大影响, 包括缩松、缩孔、气孔、夹杂等缺陷情况<sup>[2]</sup>。铸件浇注位置要根据铸件的大小、结构特点、合金性能、生产批量、现场生产条件及综合效益等方面确定, 以保证铸件质量为出发点, 尽量简化造型工艺和浇注工艺。选择分型面时应注意做到“四少两便”, 即少用砂芯、少用活块、少用三箱、少用分型面、便于清理、便于合箱<sup>[3]</sup>。

本研究的吸阀壳体为铸铝件, 在铸造过程中极易出现针孔及缩松等缺陷, 从而严重影响吸阀壳体的强度和韧性。以油储罐用ZL114A材质的吸阀壳体为研究对象, ZL114A铝合金属于轻合金, 其特点是密度小、熔点低、导热系数大、质量定容热容量小、化学性质活泼、极易氧化和吸收气体, 易诱发气孔、缩松和缩孔等缺陷<sup>[4]</sup>。通过数值模拟技术对吸阀壳体铸件充型过程和凝固过程的温度场和凝固场进行模拟, 重点根据模拟结果分析铸件缺陷分布和特征, 对铸造工艺方案进行优化, 确保得到符合使用条件的合格铸件。

## 1 吸阀壳体铸铝件的材质和结构分析

铸件的材质为ZL114A, 属于Al-Si系合金, 合金的成分要求如表1所示。该合金具有优良的流动性、气密性, 较小的热裂倾向和收缩率等铸造性能; 同时具有良好的力学性能、铸造性、焊接性和耐腐蚀性<sup>[5-6]</sup>。吸壳阀体铸铝件的三维模型如图1所示。铸件整体结构对称, 内部为较复杂的空腔。零件质量为30 kg, 轮廓尺寸为726 mm × 362 mm × 352 mm, 最大壁厚约29 mm, 最小壁厚约4 mm, 主要壁厚约10 mm。法兰盘较多且壁厚均较厚, 成为铸件热节部位, 易产生缩松、缩孔等缺陷。

采用Unigraphics NX三维建模软件进行三维实体的绘制, 导入ProCAST中mesh部分进行网格划分, 在网格划分后进行网格质量检测, 出现网格质量较差或者网格交叉先进行修复再进行体网格的划分, 以保证网格划分的质量<sup>[7]</sup>。

## 2 铸铝件的初步工艺方案

### 2.1 铸造工艺方案的制定

本研究的吸壳阀体铸件生产方式为单件小批量手工造型, 材料为ZL114A, 浇注

#### 作者简介:

马煜林(1988-), 男, 讲师, 博士, 硕士生导师。研究方向为钢铁材料成形过程组织调控及力学性能。电话: 024-62268215, E-mail: mayulin@syu.edu.cn

中图分类号: TG27  
文献标识码: B  
文章编号: 1001-4977(2021)01-0094-05

#### 基金项目:

中国博士后科学基金(2019M661122); 辽宁省自然科学基金博士启动项目(2019-BS-168)。

#### 收稿日期:

2020-07-27 收到初稿,  
2020-09-20 收到修订稿。

时易产生氧化膜, 从而形成针孔类缺陷, 因此浇注时应确保金属液流平稳充型, 故本次浇注采用底注式浇注系统。浇注温度为710 ℃, 浇注时间为17.3 s, 砂型为碱性酚醛树脂自硬砂, 砂型和铸件之间热交换系数取500 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[8]</sup>。初步设计了图2所示分型方案, 减少砂芯数量, 方便下芯, 降低工艺难度。

浇注时间对铸件质量有重要影响, 而合适的浇注时间与铸件结构、铸型工艺条件、合金种类与选择的浇注系统等有关<sup>[8]</sup>。浇注时间可由公式(1)确定。

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

式中:  $t$ 为浇注时间, s;  $G_L$ 为浇注金属液的质量, kg;  $S$ 为经验系数。

本次浇注的金属液质量约48 kg, 铸件的平均壁厚为10 mm, 通过查阅《铸造工程师手册》, 最终选取经验系数为2.5<sup>[8]</sup>。则:

$$t = 2.5 \times \sqrt{48} = 17.3 \text{ s}$$

开放式浇注系统充型平稳, 对型腔冲刷力小, 能够减少铝合金铸件浇注时金属液的氧化。底注式浇注充型时内浇道基本在淹没状态下工作, 充型平稳, 可避免金属液发生飞溅、氧化及由此形成的铸造缺陷, 故本次浇注方案采用底注开放式浇注系统。设计了图3所示的两种对比方案。

由于熔渣通常浮于金属液的上部, 为避免浇注过程中表面氧化铝和夹杂卷入铝液影响铸件质量, 本次采用底漏式浇包, 这种浇包底部设有开口, 避免浮在上面的铝渣进入铸型。同时, 在直浇道中放置陶瓷过滤网, 减少或避免浮渣通过直浇道进入铸型的型腔而使铸件产生夹渣等缺陷; 另一方面, 由于过滤网对金属液的阻碍作用, 应适当放大直浇道尺寸。

考虑到这两种方案中浇注系统在砂型内部或砂芯内部, 造型时浇注系统难以起模。因此最终浇注系统使用耐火管。通过查阅《铸造工程师手册》, 确定各浇道的截面积比为 $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 1 : 2 : 3$ <sup>[9]</sup>。

## 2.2 初步工艺方案的模拟结果

图4为平做平浇方案充型速度场。方案采用了底注式浇注系统, 整个充型过程较为平稳。充型3.80 s时, 金属液进入阀体下侧腔体。从图4中可以看出, 金属液没有冲击砂型, 金属液流动比较平稳。金属液汇合后流速有所增加, 没有金属液的飞溅、卷气现象。充型6.83 s时, 金属液进入法兰盘, 造成了一定的落差, 此时金属液对法兰盘底部存在较小的冲击。充型10.30 s时, 金属液填充到分型面处, 可以看出, 液面比较平整, 充型比较稳定, 没有冲击砂型; 充型18.85 s时充型完毕。金属液刚刚进入法兰盘时流速较大, 产生了较大的落差, 有一定的飞溅, 其余充型效果良好。

图5为平做立浇方案充型速度场。整个充型过程

表1 ZL114A合金的成分要求  
Table 1 Chemical composition requirements of ZL114A alloy

					$w_B / \%$
Cu	Si	Fe	Mg	Ti	Al
≤0.06	6.8~7.1	≤0.05	0.55~0.65	0.15~0.2	余量



图1 铸件三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of casting

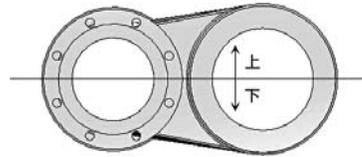
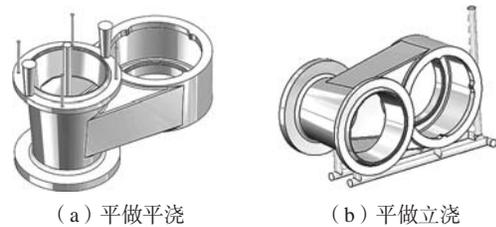


图2 分型面的设计

Fig. 2 Design of parting surface



(a) 平做平浇

(b) 平做立浇

图3 两种浇注方案模型

Fig. 3 3D models of two casting schemes

较为平稳均匀, 对应右侧速度标尺, 可以看出充型时金属液速度约为0.366 m/s。充型2.43 s时, 金属液进入型腔, 由于没有受到砂型、砂芯的阻碍作用, 充型平稳; 金属液接触型腔壁, 由于流速较慢, 没有发现金属液的飞溅、卷气现象; 充型8.47 s时, 金属液充满型腔底部。18.91 s充型完毕, 总体充型效果较好。

从充型过程来看平做立浇方案浇注系统充型平稳、均匀且铸件顶部为法兰盘大平面, 易于设置冒口进行补缩。因此, 最终确定使用平做立浇浇注方案并对其进行改善。

## 2.3 初步工艺方案的缺陷分析

缺陷分析主要以缩松缩孔为主。缩松是指铸件最后凝固的区域没有得到液态金属或合金的补缩形成分散和细小的缩孔。常分散在铸件厚大部位、冒口根部和内浇口附近<sup>[10]</sup>。缩松隐藏于铸件的内部, 外观上不易被发现。本次缺陷分析均以切片形式进行。图6为平做立浇浇注方案的缺陷分布图。

图6为铸件上的6个缺陷切片。其中前3个可以看出, 此部分为缩松主要分布区域, 尤其在壁厚最大的大法兰盘上, 缩松严重。这是由于本次工艺采用底注

式浇注系统，厚大法兰盘处为最后凝固区域，且由于下方靠近内浇道，金属液最后进入，较开始进入型腔顶部金属液温度高，导致该处从浇注开始到凝固结束，金属液始终保持较高温度。从图6可以看出，该部分为铸件的最顶端，由于上部温度低的金属液先行凝固，同时得不到金属液的补充，导致凝固后出现了塌陷。

### 3 工艺优化及模拟结果分析

#### 3.1 工艺优化方案

工艺优化主要分为两个方面：一是通过开设冒口，消除铸件收缩缺陷；二是通过控制浇注时铸件的凝固顺序，在热节处放置冷铁，使该处金属液受到激冷作用来实现补缩，消除缺陷。冒口的主要作用是贮

存金属液对铸件进行补缩。从模拟结果来看，铸件顶部产生较大塌陷，故需要在铸件顶部添加明顶冒口进行补缩。由于铸件顶部塌陷集中，而且面积较大，因此，采用2个明顶冒口进行补缩。

#### 3.2 优化方案结果分析

图7为工艺初步改进后缺陷分布图。依据图7缺陷分布的结果来看，铸造工艺质量有了较大改善。其中，从图7d可以看出，加上冒口之后，消除了顶部凝固时出现的塌陷，但是在冒口底部法兰盘表层出现了较小的缩松。对比未改进工艺中缩松缩孔缺陷，缺陷有一定程度的改善，但并未完全消除。因而对凝固时间与温度场进行分析。

从凝固时间来看，图8a中铸件基本形成了自下而

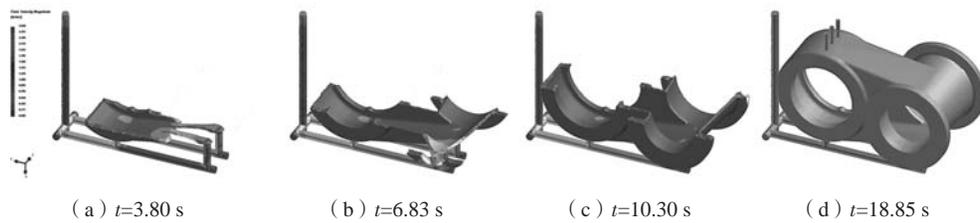


图4 平做平浇方案充型速度场

Fig. 4 Filling velocity field of horizontal molding and pouring method

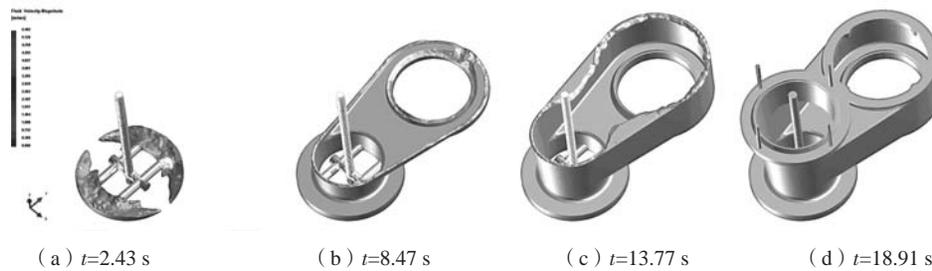


图5 平做立浇方案充型速度场

Fig. 5 Filling velocity field of horizontal mold and vertical pouring method



图6 平做立浇方案缺陷分布图

Fig. 6 Defect distribution diagram of horizontal mold and vertical pouring method

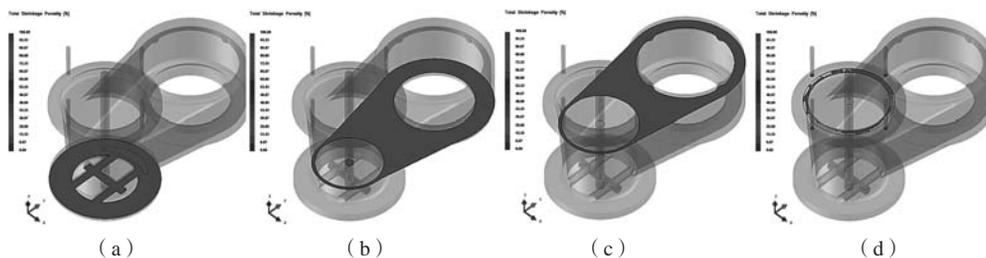


图7 工艺初步改进后铸造缺陷分布图

Fig. 7 Defect distribution after preliminary improvement on casting process

上的顺序凝固，保证了铸件的致密度，从而提高铸件性能。从图8b可以看出，ZL114A的液相线温度为618℃，固相线温度为553℃，图中与固相线颜色相同的区域即为温度较高凝固滞后的区域。从图8c凝固场中可以看出，凝固时，温度较高的区域为最后凝固的“孤立液相区”，该部分得不到金属的补缩，最终仍然形成缩松。

对上述工艺初次改进后缩松遗留区域进行分析，造成该处金属液温度过高的原因大致如下：①该处分

布在热节中间，金属液温度高；②在其周围热节处设置冷铁，加快其周围金属凝固速度，导致在法兰盘处出现封闭区。

针对如上因素，对工艺作出如下改进：①优化缩松区域冷铁数量及分布，从而加快法兰盘处的冷却速度，进而得到周围金属液的补缩。②调整冒口的位置，消除法兰表盘上的缩松缺陷。工艺进一步改进如图9所示。

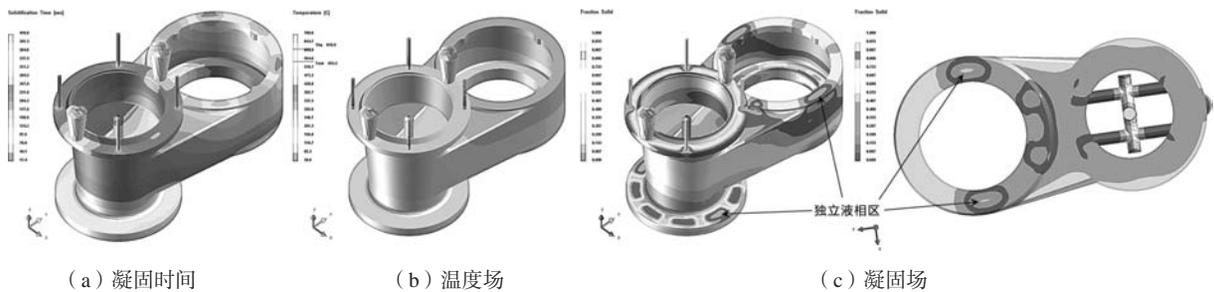


图8 凝固时间、铸件温度场与凝固场的分布

Fig. 8 Distributions of solidification time, temperature field and solidification field

图10为与图8中取相同位置时缺陷分布示意图。可以看出，图8中出现的缺陷全部消失，同样对其他位置进行检查，均未出现缩松、缩孔缺陷。铸件毛重35.5 kg，浇注系统重6.8 kg，工艺出品率83.9%。

### 3.3 优化方案工装设计

图11为平做立浇工艺合箱图。金属的浇注将经过以下几个步骤：①加料熔化：本工艺采用合金锭重熔法进行熔炼。称量后将合金锭加入电阻坩埚炉中，熔炼温度(740±10)℃；②变质处理：温度在710~730℃，

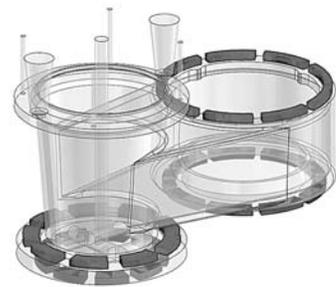


图9 进一步改进后的工艺

Fig. 9 Further improved casting process

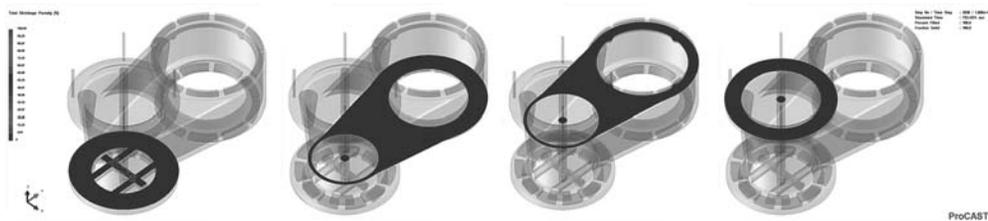


图10 优化工艺后缺陷分布图

Fig. 10 Defect distribution after casting process optimization

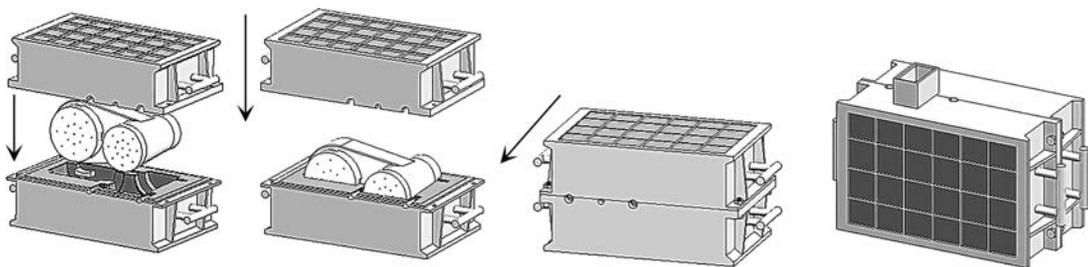


图11 平做立浇工艺合箱图

Fig. 11 Mold assembling drawing of horizontal mold and vertical pouring casting process

加入Al-10Sr中间合金进行搅拌；③精炼除气：喷吹氩气对铝液进行精炼除气，后加入覆盖剂，静置10~15 min；④含氢量测量：对铝液的含氢量进行检测，含氢量合格后方可进行浇注；⑤浇注：浇注温度在 $(710 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

本次工艺采用平做立浇的浇注方式，通过设置冒口与冷铁使铸件形成一个自下而上的顺序凝固，保证了铸件的致密性，同时消除铸件的缩松缩孔缺陷。

## 4 结论

(1) 选用平做立浇工艺，两箱造型，采用开放式底

注式浇注系统，各浇道的截面积比为 $\Sigma F_{直} : \Sigma F_{横} : \Sigma F_{内} = 1 : 2 : 3$ ，采用底漏式浇包，配合直浇道设置陶瓷过滤网能够提高浇注系统的挡渣能力。

(2) 砂型为碱性呋喃树脂砂，浇注温度 $(710 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，浇注时间17.3 s，铸件毛重35.5 kg，工艺出品率为83.9%，金属液温度在710~730 $^\circ\text{C}$ ，加入Al-10Sr中间合金进行变质处理，保证了铸件致密性，提高了铸件的综合性能。

致谢：感谢“永冠杯”第十一届中国大学生铸造工艺设计大赛主办单位中国机械工程学会铸造分会提供的比赛题目。

### 参考文献：

- [1] 刘罡. 基于传热计算的低温储罐吸阀冬季可靠性分析[J]. 石油化工设备技术, 2019, 40(3): 5, 10-12.
- [2] 胡兴业, 张永, 刘野, 等. 浇注工艺参数对ZL114A合金热处理后性能的影响[J]. 铸造, 2015, 64(11): 1132-1134.
- [3] 刘艺, 王华. 基于Procast的上倾倒框铸造工艺设计优化[J]. 热加工工艺, 2019, 48: 72-77.
- [4] 罗传彪, 杜旭初, 樊振中, 等. 铸造工艺对ZL114A铝合金铸件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(6): 652-656.
- [5] 车家宝, 廖敦明, 孙飞, 等. 铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算[J]. 铸造, 2020, 69(4): 382-387.
- [6] 梁继亚, 李栋, 刘轶, 等. 大型薄壁铝合金铸件的铸造工艺[J]. 铸造, 2020, 69(1): 66-68.
- [7] 王华, 刘艺. 床身的铸造工艺设计及数值模拟[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 58-63.
- [8] 朱阳. 基于ProCAST的汽车挂车阀压铸工艺优化[J]. 铸造, 2019, 68(10): 1155-1158.
- [9] 王嘉诚, 曲元哲, 沈楚伦, 等. 上倾倒框铸铝件铸造工艺设计及模拟优化[J]. 精密成型工程, 2018, 10(6): 88-94.
- [10] 陈延伟, 刘佳琳, 赵亚鹏. 铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势[J]. 铸造, 2020, 69(4): 329-334.

## Casting Process Design of Aluminum Suction Valve Housing Based on ProCAST

MA Yu-lin<sup>1</sup>, LIU Shao-hua<sup>1</sup>, JI Liang-xin<sup>1</sup>, WANG Peng-zhe<sup>1</sup>, LI Ting-hui-zi<sup>1</sup>, WEI Chang-suo<sup>2</sup>, ZHAO Lin<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, Liaoning, China; 2. Luoyang Zhongzhong Heavy Forging Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 3. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, Liaoning, China)

### Abstract:

The suction valve housing casting process was designed through detailed analysis of casting material, shape, size and structural characteristics, and then the ProCAST software was used for numerical simulating of casting process, the filling process and defect distribution. The results show that when the horizontally molding and vertically pouring process and non-pressurized bottom pouring system are adopted, the addition of the risers and chill can ensure that the casting solidifies in a bottom-up order and the shrinkage hole and dispersed shrinkage defects in castings can be eliminated. Therefore, the qualified castings can be produced.

### Key words:

suction valve housing; cast aluminum parts; ProCAST software; casting process; casting defects