

# 水冷机壳低压铸造凝固过程数值模拟及工艺优化

梁秋华, 韩 伟, 黄凌森, 潘健怡

(华南理工大学广州学院机械工程学院, 广东广州 510800)

**摘要:** 水冷机壳铝合金薄壁零件低压铸造工艺非常复杂。为降低产品试制成本, 应用AnyCasting软件对充型过程中的压力变化及充填时间进行数值模拟, 以研究各种工艺因素对充型凝固过程的影响, 并预测螺旋砂芯的存在引起的充填不足、缩松等低压铸造缺陷。结果显示, 合理调整压力、增压速度和模具温度等工艺参数, 可提高产品质量, 稳定水冷机壳低压铸造生产。

**关键词:** 压力曲线; 充型速度; 缺陷预测; 参数优化

新能源汽车电动机铝合金水冷机壳目前大多采用低压铸造工艺生产, 使用的材料是A356铝合金, 本研究中的铸件最小壁厚为4 mm, 属于典型的铝合金薄壁零件。为适应电动机长期运转时循环水冷的要求, 圆筒状的机壳壁内做成了中空的螺旋水道, 需要在低压铸造前安装螺旋砂芯在模腔中, 如图1所示<sup>[1]</sup>。生产过程中高温液态铝合金在压力作用下进入模具型腔, 如果铝液以较高的压力和较快的速度充型, 就会对砂芯造成热能冲击, 影响砂芯的定位甚至冲坏砂芯。因此, 在工艺设计时, 需要运用智能化的CAE模拟软件进行充型模拟和科学分析, 正确设计工艺参数, 使铝液在合理的压力数值作用下平稳充型顺序凝固, 实现铸件内部高致密度结晶, 得到合格的水冷机壳铸件<sup>[2-5]</sup>, 降低产品试制成本。

本研究运用了AnyCasting软件对水冷机壳充型过程中的压力、温度及充填时间进行数值模拟分析及结果比较, 并对工艺参数进行了优化, 提高了产品的合格率。

## 1 水冷机壳低压铸造过程及工艺设计

铝合金水冷机壳低压铸造的工艺规范主要包括升液、充型、增压、保压结晶、卸压、冷却延时, 以及铸型预热温度、浇注温度、铸型的涂料等内容。生产中使用了带有数字控制液面加压系统的WFZJ4510低压铸造机进行水冷机壳低压铸造, 同其他低压铸造铸件一样经过升液、充型、增压、保压结晶、卸压和延迟冷却的压力控制变化过程<sup>[6]</sup>, 其工艺流程如图2所示。

为使铝合金在持续气体压力状态下进行致密度较高的结晶, 水冷机壳低压铸造时压力增加从升液阶段开始, 到充型时压力一般为0.02~0.06 MPa, 充型时间为4.5~20 s。在这个过程中, 不同结构类型以及不同材质的铝合金液体从开始充型到最后完全凝固, 生产中各个阶段会采用不同的压力及充型速度, 从而形成不同的压力变化曲线。表1所示为三类可参考的铝合金低压铸件的加压工艺。

由表1可以看出, 对于无砂芯的铸件, 其补缩需求小, 可以使用较高的充型速度, 并可以选择低压、大流量、大口径升液管设备。而对于薄壁有砂芯的铸件, 补缩需求点多, 补缩需求量大, 需要选择高压、大流量、大口径升液管以及增加细化压力变化环节。带有螺旋砂芯的水冷机壳低压铸造即属于典型的薄壁有砂芯的铸件, 应该使用第三种情况的加压工艺规范, 首先进行快速增压, 即在凝固早期阶段, 就施以尽可能大的补缩压力。这有利于提高水冷机壳铸件薄壁处的致密度, 有

作者简介:

梁秋华(1983-), 男, 实验师, 研究方向为有色金属铸造技术及CAE应用。  
E-mail: liangqh@gcu.edu.cn

通讯作者:

韩伟, 男, 高级实验师。  
电话: 13632201698, E-mail: sghanwei@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

04-0353-06

收稿日期:

2018-09-20 收到初稿,

2018-12-29 收到修订稿。

效提高机壳零件的力学性能。但金属液充型上升过程中很快会遇到螺旋状的砂芯，金属液体将会大面积地与螺旋状砂芯进行热交换及化学反应，仅凭理论计算和分析难以得出结论，因此这个阶段采用的压力和速度参数需要通过CAE软件模拟，并在生产实践中验证得出。

## 2 低压铸造过程的压力计算及模拟分析

### 2.1 低压铸造过程的压力计算

铸件充型过程是铸件凝固成型的前导，充型过程中金属液与模具、砂芯之间进行了复杂的换热及化学反应。铸件充型过程的初始压力及压力变化速率直接影响后期铸件顺序结晶的凝固质量。许多铸件凝固后期的缺陷都是在充型不利的情况下出现的，因此分析控制铝液金属充型质量因素是获得优质铸件的重要保证之一<sup>[7]</sup>，其中充型压力是软件模拟中首先需要设定的参数值，也是其后续的增压数值设定的起始参考值。在低压铸造条件下，金属流体的各物理参数（如速度、温度、压力等）都随时间与空间发生随机变化。充型压力按公式（1）进行计算<sup>[8-9]</sup>。

$$P = \frac{h \cdot r \cdot \mu}{13.6} \times 133.3 \quad (1)$$

式中： $P$ 为充型压力，Pa； $h$ 为合金液从液面上升到铸件顶部的总高度，mm； $r$ 为合金液在浇注温度时的密度， $g/cm^3$ ； $\mu$ 为阻力系数，通常可取1.0~1.5。

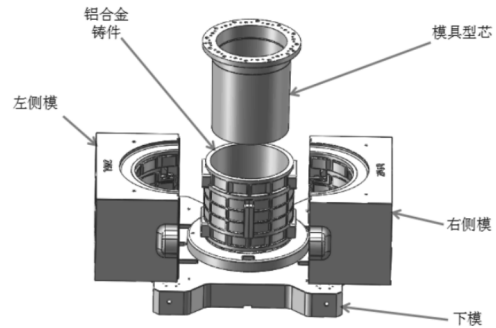


图1 新能源汽车电动机铝合金水冷机壳模具  
Fig. 1 Mold cavity of water-cooled aluminum alloy shell for new energy vehicle motor

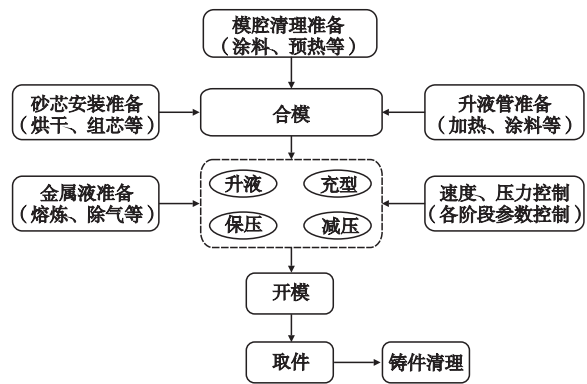


图2 水冷机壳低压铸造工艺流程  
Fig. 2 Flow chart of low pressure casting process for water-cooled shells

表1 铝合金低压铸造分类  
Table 1 Pressurization process for low pressure casting of aluminum alloy

低压铸造类型	压力曲线图形	压力变化过程
厚壁金属型 无砂芯铸件		分为充型、增压、保压和减压四个阶段，升液时增压速度与充型时相同
薄壁金属型 无砂芯铸件		分为升液、充型、增压、保压和减压五个阶段，升液时压力提升缓慢，充型时快速增压
薄壁金属型 有干砂芯铸件		分为升液、充型、结壳、增压、保压和减压六个阶段，与无砂芯薄壁铸件相比，增加了10~15 s的结壳时间

由于铸型内部事先装入了形状复杂的螺旋砂芯,将会对充填进入的金属液造成一定的阻力,故此处阻力系数 $\mu$ 取较大值1.35。根据铸件的体积和熔炉的直径计算,合金液体从液面上升到铸件顶部的总高度为220 mm,由此计算出初始的充型压力约为0.007 8 MPa。

## 2.2 充型过程的压力速度模拟曲线及比较分析

在充型压力的理论计算公式基础上,运用AnyCasting软件对不同的压力参数数值进行模拟分析。在分析之前,首先在软件系统中填入水冷机壳铝合金及低压铸造模具的热物性参数。机壳铝合金使用的材料为A356,模具材料为SKD61,表2列出了初始温度时的材料物性参数等模拟计算条件<sup>[10-11]</sup>。

除物性参数选定外,还对其他初始工艺条件如模具温度、升液条件进行了设置。然后根据表1中薄壁铝合金低压铸造的工艺规范,将压力变化划分为六个阶段<sup>[12]</sup>,进行了三种工艺参数的设定组合试验模拟。

(1) 升液压力为0.005 MPa,充型压力为0.007 8 MPa,加压曲线如图3a所示。由于充型时采用了较快的速度,没有增加设定一段稳压结壳阶段,经模拟得到图3b的结果。金属液与铸型、砂芯之间存在较大的温度梯度,特别是当金属液进入型腔后与砂芯接触时,与砂芯进行较大温度梯度的温度交换及化学反应,环绕螺旋状的砂芯与金属液全面反应及热交换,剧烈的

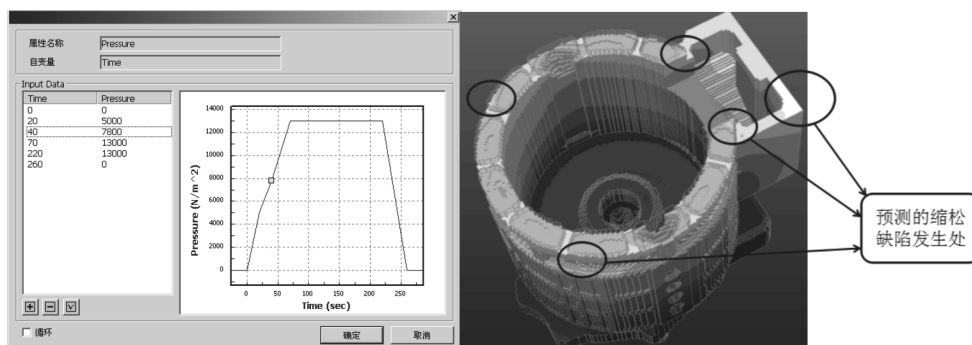
反应会使原来呈现层流平稳上升的金属液产生紊流,导致产生内部气体和缩松缺陷,如图3b中标示的位置。

由于低压铸造金属液充型是底注式,有外加压力时,其补缩是从下向上,充型初期自下而上的补缩,充型后期自上而下的补缩使得在铸件的顶部容易产生缩松和充填不足的缺陷。因此顶部成为铸件重点的补缩区域。根据模拟结果可以看出铝合金液体在上升经过螺旋砂芯的部分后,温度下降较多,金属液体与螺旋状砂芯大面积接触使得本来以平稳层流方式匀速上升的金属液不可避免地产生紊流现象,未经预热的螺旋砂芯会吸收铝合金液体的潜热及上升动能,使本应该迅速上升的金属液流动形态发生变化,增加了铸件顶部气孔和缩松的可能性,以至于产生缺陷。同时因为加热过程中模具温度控制不合理,导致充型时模具温度与铝合金液体之间温差较大,凝固时缩松区域(图3b)来不及补缩,形成较大的缩松。模具预热温度较低还会使铝液充型接近顶部时温度迅速降低到凝固温度以下,铸件过早凝固形成缩松。

(2) 升液压力为0.006 MPa,充型压力为0.008 5 MPa,充型时采用较慢的速度,压力曲线的斜率减小,同时在金属液全面充型之后增加了一段5 s的稳压结壳阶段,如图4所示。图中可见仅有一处缩松缺陷发生,这说明增加一段稳压过程有利于结壳补缩。

表2 合金与模具材料的物理参数  
Table 2 Physical parameters of alloy and mould

材料	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	潜热 $/(J \cdot kg^{-1})$	液相线温度 $/^{\circ}C$	固相线温度 $/^{\circ}C$	初始温度 $/^{\circ}C$
A356	2.68	3.51	0.58	$3.89 \times 10^5$	610	555	735
SKD61	7.65	1.98	0.09	$2.09 \times 10^5$	1471	1404	350



(a) 加压曲线图

(b) 模拟结果

图3 充型快速增压的增压曲线及模拟效果1

Fig. 3 Supercharging curve and simulation effect 1 of fast pressurization filling

(3) 升液压力为0.006 MPa, 充型压力为0.008 5 MPa, 充型时采用了更慢的速度, 并将稳压结壳阶段的时间增加为15 s以上。同时将起始充型温度适当提高为735 ℃, 以避免充型过程中降温至固相区域, 铸件过早凝固的情况发生。加压曲线如图5a所示, 经模拟得到图5b的结果, 图中再没有缩松缺陷发生。

### 3 压力和速度工艺参数的优化

在水冷机壳实际生产中, 将软件模拟的参数设置方案与WFZJ4510低压压铸机控制面板上显示出来的加压曲线比对分析, 对水冷机壳这种薄壁铝合金低压铸造零件的压力工艺规范曲线应当进行更细致的划分设定, 全过程的工艺优化的内容总结如下:

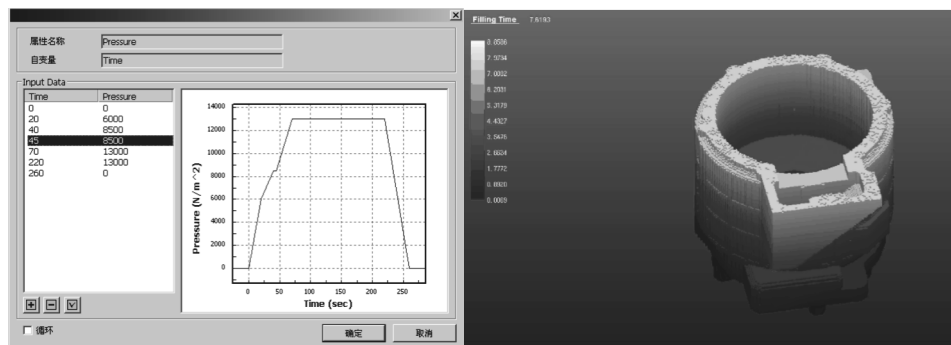
(1) 升液阶段。金属液在升液管内的上升速度应尽可能缓慢, 铝液自起始位置上升至升液管顶端即将进入模腔, 速度缓慢利于流动平稳, 一般控制在16~18 Mbar/s, 有利于型腔内气体的排出, 同时也可使金属液在进入模腔浇口时不致因为横截面突然变化

而产生喷溅。

(2) 加快充型压力提升速度。温度较低的砂芯将会消减金属液的热能, 在金属液进入型腔但未充满模腔时, 快速增压过程中的补缩显得尤为重要, 而且需要更高的补缩压力。在充型早期阶段金属液温度还较高时, 就施以尽可能大的补缩压力。金属液充满型腔后, 再继续增压, 铝液自升液管顶端至模具型腔顶端, 速度一般控制在6~10 Mbar/s。使铸件的结晶凝固在较大的压力作用下进行, 即进行快速增压以补充由于金属液体与螺旋状砂芯热交换及化学反应而产生的动能损失。

(3) 增压后期加入5~15 s的稳压结壳阶段用于补缩, 速度一般控制在50~70 Mbar/s。这时的压力越大, 补缩效果越好, 最后获得的铸件组织也越致密。

(4) 保压时间。对于水冷机壳这类较大型的薄壁零件, 保压时间在10~15 s较为适宜。如果保压时间不够, 铸件未完全凝固就卸压, 型腔中的金属液将会回流炉内, 造成机壳铸件“放空”报废; 如果保压时间

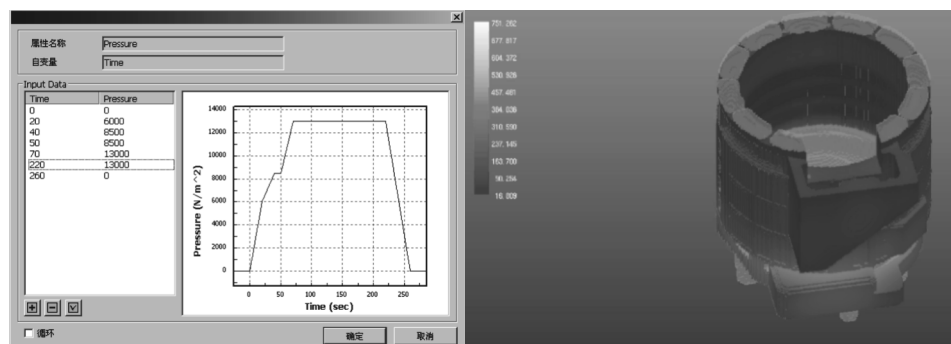


(a) 加压曲线图

(b) 模拟结果

图4 充型快速增压的增压曲线及模拟效果2

Fig. 4 Supercharging curve and simulation effect 2 of fast pressurization filling



(a) 加压曲线图

(b) 模拟结果

图5 充型快速增压的增压曲线及模拟效果3

Fig. 5 Supercharging curve and simulation effect 3 of fast pressurization filling

太长,则金属液在浇口会残留较多,不仅降低生产收得率,而且还会造成浇口部分“冻结”,使铸件出型困难。

以上参数优化的重点在于凝固开始阶段尽快施以较大的补缩压力,因为对于薄壁件金属型铸造,铸件凝固时间不长。液面升高的同时液态金属已经在快速结晶,固相部分的比例快速增加,此时应急速升压,以克服重力的负作用,进行补缩。与表1中一般通用的工艺规范比较,具体的参数优化设置如表3所示。

## 4 模具温度控制工艺优化

运行AnyCasting中的Anypost模块之后,模拟计算得到循环铸造过程中铸型的温度变化。从中

可以看出,不同的低压铸造条件参数形成的铸型及铸件温度不同。我们将模具预热至350℃,并在连续低压铸造过程中采用自动水冷系统控制模具温度的工艺。通过分析软件的模拟结果,如图6可以看出,在增压阶段模具经过预热后温度从350℃开始上升,铸件急剧下降,在保压阶段铸型和铸件之间的温度变化较为平缓,因此可有效避免铸件和模具之间温度差较大而过早开始凝固形成缩松等缺陷。

## 5 其他改进

(1)使模具预热温度分布合理,即左右侧模具同步均衡加热,预防温度不均匀。

表3 工艺参数的优化  
Table 3 Optimization of process parameters

方案	铝液温度/℃	升液压力增速/(Mbar·s <sup>-1</sup> )	稳压结壳时间/s	保压时间/s	保压压力/MPa
一般	723	10~16	0~5	10~15	0.008 5
优化	735	16~18	5~15	10~20	0.008 5

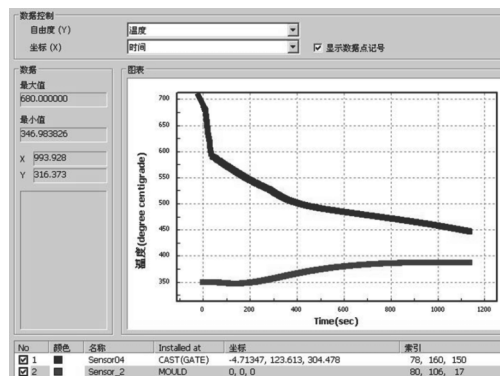


图6 AnyCasting模拟产生的模具与铸件温度变化曲线

Fig. 6 Temperature change curves of mold and casting simulated by AnyCasting

(2)使用烘干炉预先烘干螺旋砂芯至200℃或以上,减少砂芯与铝液之间的温度差值。

(3)对局部热节处的对应模具部位采用强制冷却,以调节出符合补缩的温度场分布。

(4)对局部影响补缩的“冷节”,在模具背后的四周钻孔铣槽,然后充填绝热材料,以增大热阻,减缓冷却凝固速度。

## 6 结束语

由于金属熔体在型腔内的流动与凝固过程无法在实际生产过程中看到,所以在解决铸件缺陷问题时常

需要花费大量的时间和试制成本,而且难以达到最佳的效果。根据水冷机壳的不同规格和几何形状,运用AnyCasting有限元分析软件对低压铸造充型过程进行分析,针对水冷机壳零件特点探究铝合金液面加压规范,制定不同产品的加压曲线工艺及操作规范并在生产中推行应用,可以帮助技术人员直观地分析熔体在型腔内部的流动及凝固过程,在实际试验前就对铸件可能产生缺陷及其大小、位置进行预测,可以有效提高低压铸件的生产质量。通过在WFZJ4510低压压铸机上进行多次试验,最终将水冷机壳的低压铸件合格率从55%提升到了75%。

**参考文献:**

- [1] 黄尧, 黄勇. 压铸模具设计实用教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 王小平. 低压铸造实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [3] 周建新, 廖敦明. 铸造CAD/CAE [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] 朱秀荣, 侯立群. 差压铸造生产技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] 杨兵兵. 特种铸造 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
- [6] 柴艳, 郝启堂. 大型薄壁铝合金铸件树脂砂型低压铸造设备的研究 [J]. 铸造技术, 2005 ( 11 ): 6-8.
- [7] 匡利华, 李永堂, 付建华. 衬板铸件消失模充型过程的数值模拟 [J]. 太原科技大学学报, 2010, 31 ( 4 ): 292-295.
- [8] 陈宗民. 汽车壳体低压铸造工艺与模具设计 [J]. 热加工工艺, 2008 ( 1 ): 79-81.
- [9] 廖海洪, 梁敏洁, 程军. 铝合金低压铸造浇注系统的CAD设计 [J]. 稀有金属, 2006 ( S1 ): 43-48.
- [10] 郑会芬, 曹韩学, 张培柳. 数值模拟在铝合金压铸件浇注系统设计中的应用 [J]. 铸造, 2012, 61 ( 11 ): 1317-1320.
- [11] 于彦东, 崔林林, 李超, 等. ZM6镁合金大型薄壁铸件数值模拟 [J]. 铸造, 2012, 61 ( 4 ): 400-403.
- [12] 刘孝福, 姜延春, 齐笑冰, 等. 低压铸造技术在铜合金和黑色金属领域的发展和应用 [J]. 铸造, 2006 ( 6 ): 585-588.

---

## Numerical Simulation and Process Optimization of Solidification Process in Low Pressure Casting of Water-Cooled Shells

LIANG Qiu-hua, HAN Wei, HUANG Ling-sen, PAN Jian-yi

(School of Mechanical Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China)

**Abstract:**

Filling and solidification process of low pressure casting of thin-walled aluminum alloy water-cooled shells is a very complex process. In order to reduce the trial production cost, AnyCasting software was used to simulate and analyze the pressure change and filling time in the filling process so that the influence of process factors on the filling and solidification was studied, and the defects such as insufficient filling and dispersed shrinkage were forecast under the condition of existence of spiral sand core. Results showed that adjusting reasonably process parameters such as pressure, pressurization speed and mold temperature could improve the quality of the water-cooled shells and stabilize the production.

**Key words:**

pressure curve; filling speed; defect prediction; parameter optimization

---