

铝合金缸盖低压铸造模具设计及凝固质量优化

陈晓斌¹, 谈毅¹, 杨安², 刘臻炜¹

(1. 广州城市理工学院机械工程学院, 广东广州 501800; 2. 贵州蓝辉新材料有限公司, 贵州遵义 563000)

摘要: 针对摩托车发动机的铝合金单缸缸盖低压铸造成形时容易发生缩松、缩孔和气孔等缺陷问题, 运用MAGMA软件模拟缸盖低压铸造过程温度和冷却率变化情况, 预测缸盖容易产生的缺陷趋势及重点发生区域。在合理设计缸盖模具结构和侧模各部分冷却系统的同时, 将数值模拟结果与智能化设备相结合应用, 运用低压铸造机数字化智能技术进行凝固工艺过程的冷却时序控制和压力分段精细化控制, 避免缸盖燃烧室重点区域凝固结晶时的缺陷发生, 提高铝合金缸盖铸件内部组织成形致密度及低压铸造生产质量。

关键词: 铝合金缸盖; 低压铸造; 缺陷预测; 智能设备

作者简介:

陈晓斌(1983-), 男, 本科, 实验师, 研究方向为智能制造技术。E-mail: chenxb@gcu.edu.cn

通讯作者:

谈毅, 男, 本科, 实验师。E-mail: 249911313@qq.com

中图分类号: TG245;

TG249.2;

TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

08-1144-07

基金项目:

2022年度广东省普通高校特色创新类项目(2022KTSCX182); 2022年度广州城市理工学院质量工程项目(JY220102)。

收稿日期:

2023-09-04 收到初稿,

2023-10-23 收到修订稿。

较大功率的摩托车单缸发动机铝合金缸盖作为动力输出主体, 在高速行驶过程中缸盖底部的燃烧室中会长时间持续产生热量, 因此要求铝合金缸盖铸件内部组织致密度高, 尤其在燃烧室区域更不允许有缩孔、缩松、夹渣等缺陷存在。并且针对性地采用能够进行压力补缩充型的低压铸造方法进行批量生产。如图1所示为单缸发动机的铝合金缸盖, 采用A356.2铝合金材料低压铸造成形, 产品结构的复杂造成了低压铸造工艺、模具结构和浇注系统更加复杂。这也为低压铸造时铝合金液体的充型过程和顺序凝固结晶增加了许多干扰因素, 容易导致单缸发动机的铝合金缸盖多处产生卷气、缩松和缩孔等缺陷^[1]。生产中为了更好地保证低压铸造凝固顺序, 确保单缸发动机的铝合金缸盖铸件内部结晶组织的致密度, 达到其高强度和耐高温的工作性能要求^[1]。运用MAGMA数值模拟软件进行充型过程数值模拟分析, 通过冷却速度和关键凝固位置分析等预测卷气、缩松和缩孔等发生情况。同时结合低压铸造机数字化智能控制技术, 通过压力分段及补偿控制、模具温度反馈控制和模具冷却时序控制等手段, 提升铝合金缸盖低压铸造凝固质量和铸件合格率^[2], 具体从以下几方面进行研究。

1 模具结构设计方案和MAGMA模拟应用流程

随着计算机软硬件技术的快速发展及在制造业的广泛应用, MAGMA软件在低压铸造数值模拟智能化方面的功能不断丰富强大, 开发了许多新的缺陷预测判据方法。针对铝合金缸盖这类形状结构紧凑复杂, 砂芯占比大, 容易出现卷气、缩松和缩孔缺陷的零件。更需要将MAGMA数值模拟和数字化的低压铸造机控制技术相结合, 进行更精细准确的工艺参数设置, 以期达到更高的产品合格率。

1.1 缸盖零件结构分析

如图1a、b所示的单缸缸盖采用A356.2高强度铝合金低压铸造工艺成形, 基本形状为长度216 mm、宽度170 mm、高度127 mm的长方体, 铸件壁厚为3~6 mm之间, 质量约为6.3 kg。缸盖在车辆行驶过程中承受长时间的高温运转工作, 因此对缸盖重

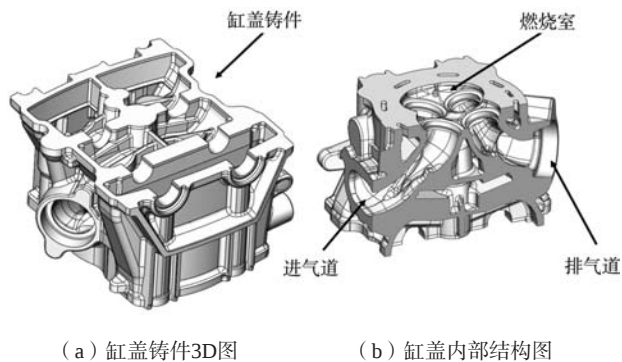


图1 铝合金缸盖零件及内部形状图

Fig. 1 Aluminum alloy cylinder head parts and internal shape drawing

点位置的内部组织致密度要求更高。其中燃烧室区域在汽车行驶过程中承受反复多次的高温燃烧工作及生成动气输出,对燃烧室区域铝合金内部组织致密度和尺寸精度要求较高。如图1b所示,燃烧室部位壁厚变化较多,形状弯曲变化,容易导致铝合金缸盖多处产生卷气、缩松和缩孔等缺陷。

在低压铸造铝合金液体充型凝固过程中,金属液在型腔内的不同局部凝固收缩应力差异较大,在壁厚较大的局部位置凝固时,容易产生热节,引起缩松和缩孔缺陷,特别是在铸件最后凝固的部位容易出现热节形成缩松和缩孔缺陷。所以缸盖低压铸造生产的首要质量目标要求为保证燃烧室区域位置的致密度,减少这部分区域凝固缩松的发生。

1.2 模具结构和浇注系统设计及分析

如图2所示,缸盖低压铸造模具组成复杂,共由上、底模和四个侧模六个部分组成,中间内部由体积较大、形状复杂的上模型芯形成。其主要的外形部分设计在上模形成,底模主要分布着浇注系统并用于放置砂芯及定位^[3]。

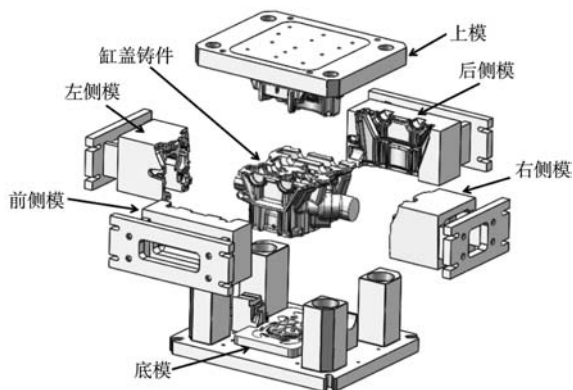


图2 铝合金缸盖模具结构分解图

Fig. 2 Exploded view of structure of the aluminum alloy cylinder head mold

为了能在短时间完成铝合金液体迅速注入型腔,初步设计分成四个梯形圆柱体分浇道同时注入铝液,铝合金液体在低压铸造气压作用下经升液管进入浇注系统后再进入型腔。每个浇道最大尺寸 $\Phi 20$ mm,具体的浇注系统和浇道结构如图3所示。

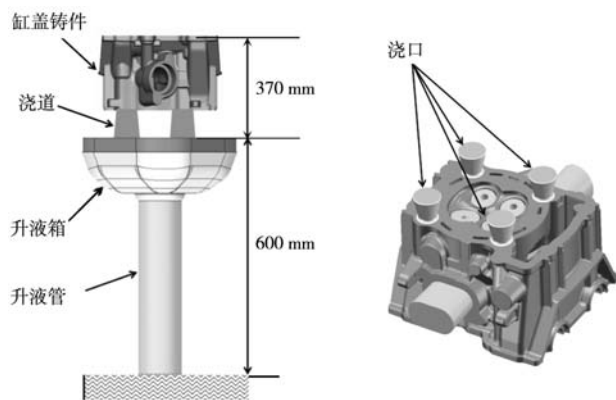


图3 铝合金缸盖低压铸造浇注系统

Fig. 3 Low pressure casting gating system for the aluminum alloy cylinder head

1.3 数值模拟分析与工艺优化流程

在数值模拟软件中,低压铸造属于其中一个特定的模块,能够对升液管、模具和砂芯各组件的网格进行非均匀区别划分,其中进、排气管二个砂芯作为铝合金缸盖低压铸造充型凝固过程的重要组件,充型时除芯头外的部位被铝液全面包熔,与铝合金之间存在着大量边界热传导。同时,造成缺陷的影响因素较多,卷气、缩松和缩孔等问题相互作用交织产生多个位置缺陷,因此有必要运用MAGMA数值模拟软件预测方法卷气、缩松和缩孔等缺陷进行模拟预测^[4]。并运用智能数字化的设备进行精确的压力控制和模具温度控制,流程如图4所示。

单缸缸盖低压铸造的生产使用某公司生产的HDTD-800低压铸造机,该型号低压铸造机的压力调节使用自适应控制算法与PID相结合的液面加压控制系统,具有数字化参数设计及智能化的液面压力伺服控制设置功能,提高了低压铸造液面加压的动态性能和控制精度^[5]。同时具有模具温度传感器反馈温度并连通PLC模温机冷却回路控制,可以控制冷却管回路开闭时序,使数值模拟结果均能在低压铸造机数字化设定界面相对应进行调整。提高铝合金壳体内部结晶凝固致密度,推动铝合金缸盖低压铸造工艺技术提升。

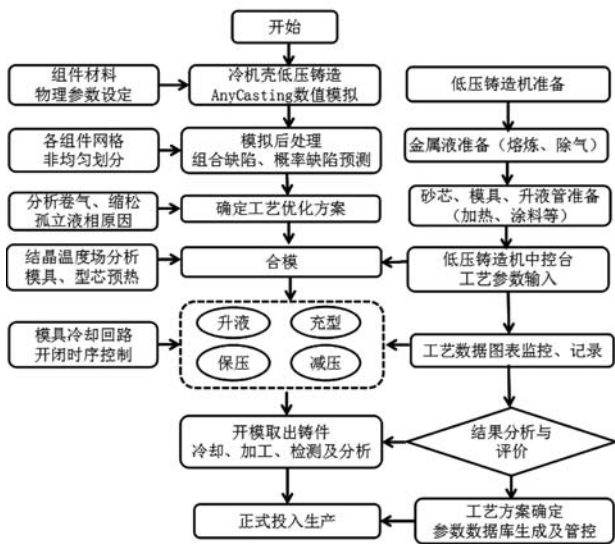


图4 MAGMA数值模拟与工艺优化流程
Fig. 4 MAGMA numerical simulation and process optimization flow

2 低压铸造充型凝固过程模拟及缺陷分析

燃烧室区域在汽车行驶过程中承受反复多次的高温燃烧工作及生成动气输出，对燃烧室区域铝合金内部组织致密度和尺寸精度要求较高。所以缸盖低

压铸造生产的首要质量目标要求为保证燃烧室区域位置的致密度，减少这部分区域凝固缩松的发生。基于MAGMA的数值模拟重点也是围绕着燃烧室区域的凝固结晶质量来进行。

2.1 铝合金缸盖低压铸造充型模拟

实践中结合低压铸造的其他类似铸件生产经验以及MAGMA通过温度热传导、充型压力变化和充型速度控制等方面，对铝合金缸盖低压铸造充型过程进行初始模拟和缺陷预测，其中数值模拟所采用的初始工艺参数如表1所示。

表1 铝合金缸盖低压铸造数值模拟初始参数表
Table 1 Initial parameters table for numerical simulation of low pressure casting of the aluminum alloy cylinder head

参数名称	数值	参数名称	数值
铝液充型温度	720 ℃	铝液充型速率	0.0068×10^5 Pa/s
上模预热温度	380 ℃	铝液升液速率	0.02×10^5 Pa/s
下模预热温度	420 ℃	充型时间	170 s
侧模预热温度	410 ℃	凝固冷却时间	360 s

首先进行充型过程中铝液、模具和涂料之间的传热情况模拟，如图5所示。低压铸造充型过程中在模具、铝液、砂芯和涂料之间发生交互作用的热传导，

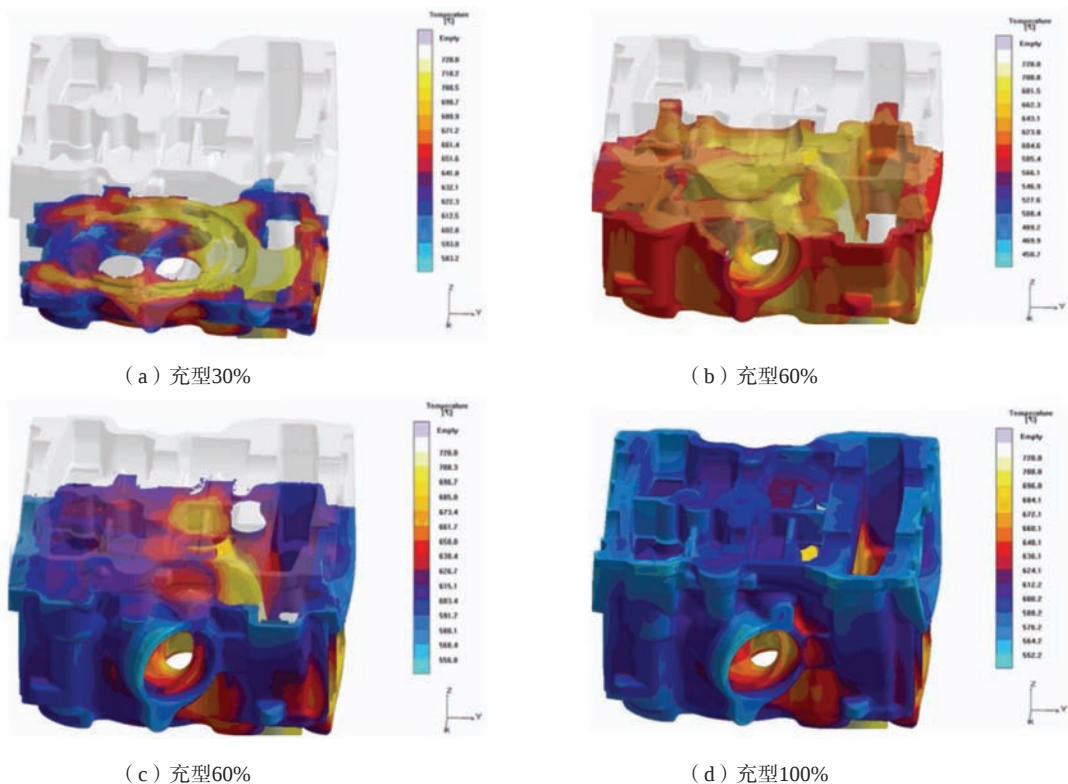


图5 铝合金缸盖低压铸造充型过程温度变化模拟
Fig. 5 Simulation of the temperature changes during low-pressure casting filling process of the aluminum alloy cylinder head

MAGMA软件求解过程是根据多个模拟传感器产生的温度变化数据,采集模具、铝液、砂芯和涂料等各种热传导参与元素的温度梯度变化值。通过预测可以看出,充型初始温度为720℃,充型过程中金属液温度均在585℃以上,高于固相线温度(570℃),出现冷隔概率较低。但同时铸件内部中间的燃烧室区域的温度一直高于其他部位,涂料及模具冷却传热并没有使该

部位先冷却凝固,燃烧室位置存在发生凝固缺陷的趋势,因此预设理想的凝固顺序并没有完全实现。

其次进行凝固冷却的模拟,如图6所示,MAGMA软件低压铸造的凝固冷却求解过程通过温度梯度、冷却率和铸件局部凝固时间等因素进行判据运算,并综合了充型温度、模具预热温度、压力增速和凝固冷却控制等多方面工艺因素交织影响。

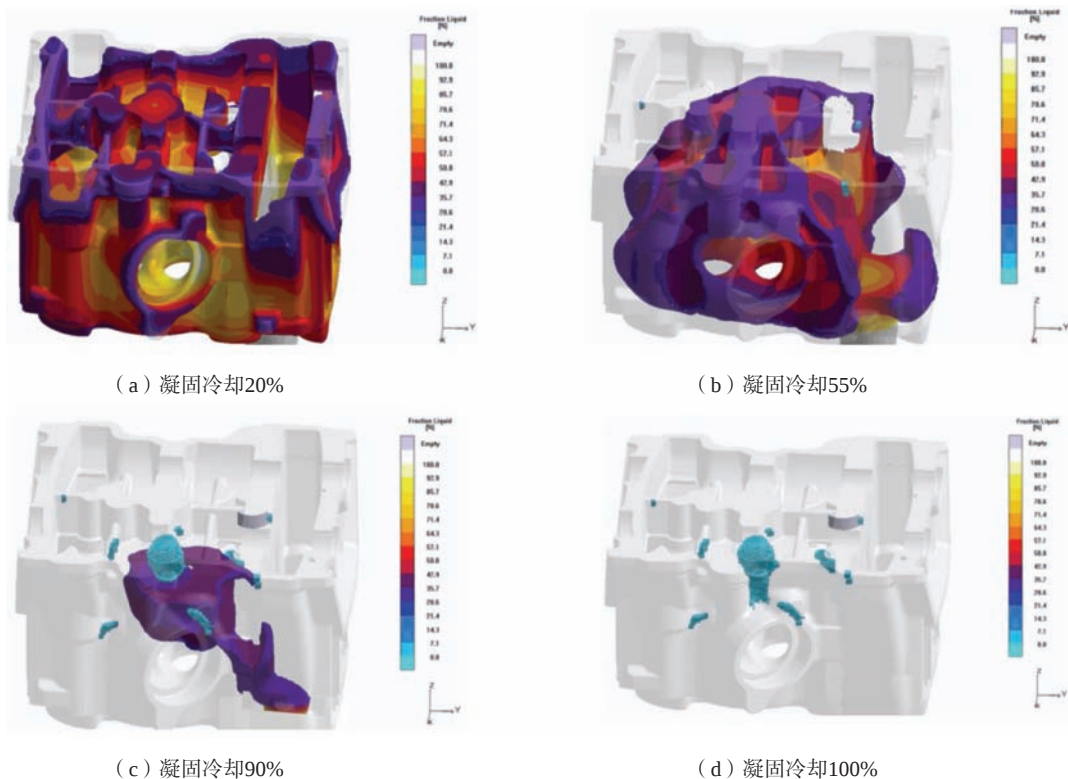


图6 铝合金缸盖低压铸造凝固冷却过程模拟

Fig. 6 Simulation of the temperature changes during low-pressure casting filling process of the aluminum alloy cylinder head

通过上述凝固冷却20%、55%、90%和100%四个阶段的模拟结果可以看出,一方面来自升液管自下而上的低压铸造机压力对燃烧室位置的补缩距离较长,造成致密度降低^[6]。另一方面从铸件周边浇注系统产生的补缩作用也是最后到达顶部燃烧室位置,零件凝固时间较短的曲面将凝固时间较长的燃烧室区域包围,造成了补缩通道被截断,使燃烧室区域容易成为孤立液相区域,因此最后凝固的燃烧室位置发生缩孔、缩松和气孔的缺陷倾向也随之增大。因此中心燃烧室的周围区域最有可能产生缩松缺陷。

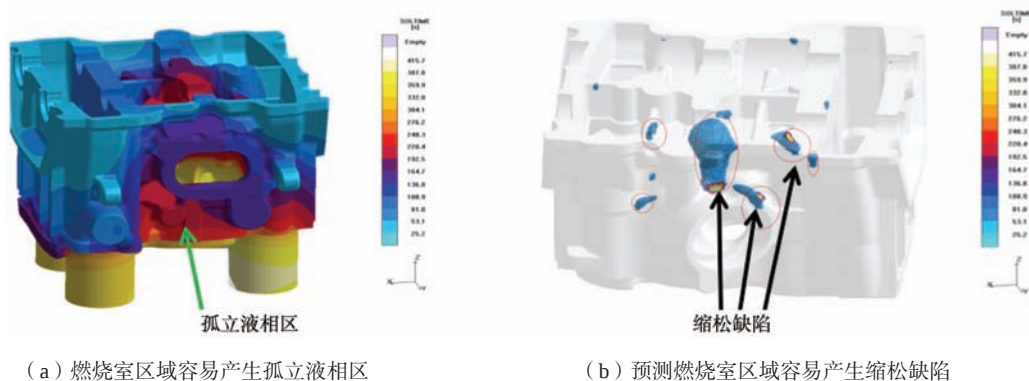
2.2 缸盖低压铸造缺陷分析

由于铸件内部有三个大型砂芯,分别为进、排气道弯管形状砂芯和燃烧室水套砂芯,砂芯在模腔中所占的体积比达到了41%,砂芯体积占比越大,形状复

杂,铸件充型时的发气量也随之增大,铝液充型过程发生卷气的趋势也较大。充型时金属液必须将大量的热能分配传递给砂芯,温度梯度由此而迅速扩大。如图7所示,缸盖铸件凝固时间较短的曲面将凝固时间较长的燃烧室区域包围,造成了补缩通道被截断,使燃烧室区域容易成为孤立液相区域,因此最后凝固的燃烧室位置发生缩孔、缩松和气孔的缺陷倾向也随之增大^[6]。所以缸盖低压铸造生产的重点质量目标应该是保证燃烧室位置的致密度,减少燃烧室区域的凝固缩松的发生。

3 缸盖低压铸造凝固缺陷控制

根据MAGMA软件数值模拟的结论,缸盖低压铸造的凝固结晶质量控制重点应该放在增强浇口到燃烧



(a) 燃烧室区域容易产生孤立液相区

(b) 预测燃烧室区域容易产生缩松缺陷

图7 铝合金缸盖低压铸造缺陷预测

Fig. 7 Prediction of low pressure casting defects in the aluminum alloy cylinder head

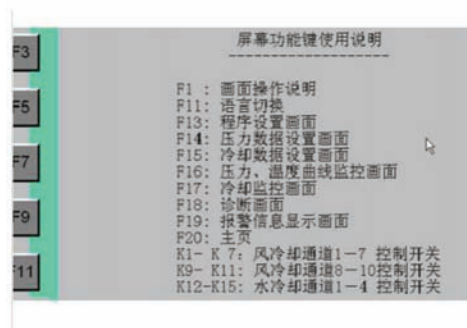
室区域的补缩通道作用上。生产中需要充分利用低压铸造机数字化压力分段控制能力，使液态金属在来自底部压力作用下自下而上地补缩铸件，减小乃至避免燃烧室区域的缩松缺陷产生^[7]，同时合理控制上、下冷却回路的开闭时序，优化理顺铸件凝固结晶顺序，提高铝合金壳体内部结晶凝固致密度，从而实现铝合金缸盖铸件各位置都处在压力作用下结晶，达到内部组织致密度要求。

3.1 通过数字化的压力控制提高补缩效果

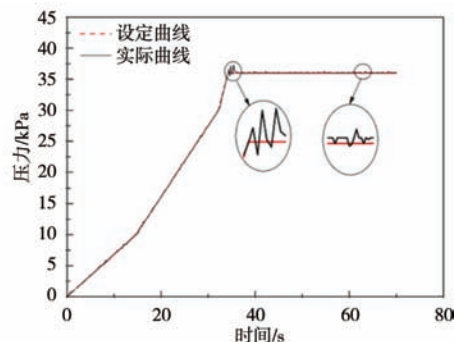
在低压铸造铝液充型凝固过程中，各个阶段需要匹配不同的压力和压力增速。其中凝固阶段所占的时间最长也是对凝固致密度影响最大的阶段，也是最需要压力保持不变的阶段，因此需要对此阶段的保压压力进行检测和补偿，实现闭环压力控制。从图8b中的低压铸造压力变化检测曲线图看出，在铝液升液和充型阶段动态压力跟踪检测效果良好，但是在转入到保压阶段时产生了压力的振荡和超调，来自低压铸造机底部升液管的压力作用此时受到了干扰。这主要是因为环绕状的燃烧室水套砂芯还对来自底部升液管的补缩压力产生了阻断作用，使保压阶段的压力出现了波

动现象，没能达到预设的保压压力值。也使得晶体长大的过程没有在顺序凝固的正向进行，结晶形核率容易受过冷度、杂质结构及燃烧室复杂曲面形状影响，进而容易产生非均匀形核，增加了凝固过程中产生局部孤立液相区的趋势^[8]。为使数值模拟过程同步与低压铸造机数字化控制技术相结合应用，将数值模拟的每一步骤均与低压铸造机的数字化设定界面相对应。在数值模拟的压力分段控制参数设定时，使用低压铸造机数字伺服压力控制的设定方式。如图8a、b所示，运用HDTD-800低压铸造机的数字化智能压力控制功能，在低压铸造机的操控界面按F14键进入压力设定画面，选择压力控制方式并输入产品所需要的压力段数，进行数字化分段压力精细化控制。根据人机对话操作界面显示的理论压力和实测压力生成相应的压力-时间曲线数据变化图表，对零件顶部重点位置进行结晶增压补缩。

铝液完全充型进入到单缸缸盖型腔每个角落，进入保压阶段时正是缸盖燃烧室重点位置完成补缩凝固的重要环节。此时升液箱内部需要保持一定的压力并且分段进行压力补偿，才能对单缸缸盖最后凝固的位置进行补缩^[9]。HDTD-800低压铸造机采用智能化的PID



(a) 低压铸造机压力分段设置



(b) 压力-时间变化曲线

图8 低压铸造机压力分段设置及压力-时间变化曲线图

Fig. 8 Pressure segmented setting and pressure time variation curve diagram of the low-pressure casting machine

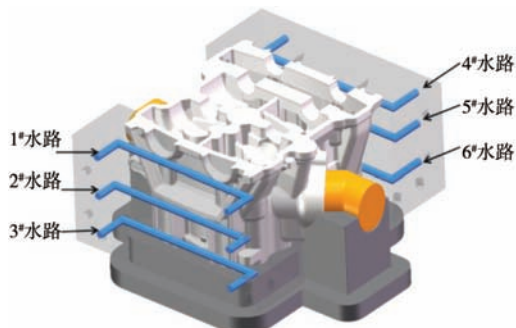
数字比例阀控制阀门的正转反转, 以及使用电液伺服系统的伺服系统产生压力流量输出, 可以对各阶段压力进行数字化闭环控制。其中低压铸造的增压、保压和卸压过程均可通过PID数字比例阀控制阀门的正转、反转实现, 在15 ms之内即可启动、停止和反转, 根据压力传感器的反馈信号, 随时利用电动阀调节压差值和补偿值, 避免发生图8b中出现保压阶段压力实测值与预设值偏离的现象, 保证铸件在凝固关键阶段时的压力作用效果。

3.2 通过模具温度控制提高凝固质量

由于缸盖低压铸造的保压阶段时间较长, 在此期间铸件和砂芯、模具之间发生着强烈的热传导作用, 在此阶段模具的温度波动相当大, 上、下模和每个方向的侧模部分温度变化各不相同。因此需要及时测量模具各部分温度并及时进行补偿控制, 才能实现预设的冷却凝固顺序^[10]。HDTD-800低压铸造机的温度控制方法是在模具安装冷却通道的各个位置安装快速热电偶, 随时检测模具温度, 所有通道都安装了数字比例阀, 便于现场观察调整流量, 精确控制冷却量。在冷却过程中, 当模具温度高于设定温度时打开冷却

通道的电磁阀, 当低于设定温度时关闭电磁阀, 实现真正意义上的模具温度控制。由于铝合金单缸缸盖零件形状变化多, 且内部成形的树脂砂芯厚度形状变化多, 其中砂芯大部分形状在上模区域, 铝合金缸盖的成形位置也集中于上模型腔内。根据铝合金缸盖形状特点, 在其模具体积较大的前、后侧模中各装置了三条循环冷却水路, 加强对金属型芯的冷却, 如图9a所示。

为了实现理想的铝合金单缸缸盖低压铸造自上而下的凝固顺序, 前、后侧模的冷却回路在铝液进入型腔后开启, 并依照编号1[#]、2[#]、3[#]的冷却顺序依次开启和关闭。充型完成后, 1[#]的冷却回路关闭。为了更好地发挥升液管和浇注系统的后续热量补缩作用, 实现预设的凝固顺序, 3[#]冷却循环水路启动时间应适当延迟, 通过模温机进行冷却水的时间/流量时序控制, 等待零件上部铝合金基本完成凝固结晶后再对浇注系统进行冷却。从而实现预设的低压铸造自上而下的凝固顺序, 如图9b所示。升级版的低压铸造机控制系统还增加了压力、温度和速度等工艺参数数据库功能, 能够保存不同各种低压铸造产品的工艺参数组合设置数据, 方便技术人员调用和修改使用。



(a) 缸盖前、后侧模冷却水路布局图



(b) 低压铸造机冷却水路时序控制界面

图9 缸盖侧模冷却回路及低压铸造机冷却控制图

Fig. 9 Cooling circuit of the cylinder head side mold and cooling control diagram of the low-pressure casting machine

4 结论

(1) 由于缸盖的燃烧室周围区域被砂芯环绕, 容易造成低压铸造凝固时补缩通道被截断, 使燃烧室区域容易产生缩松缺陷。

(2) 为了实现单缸缸盖铸件各位置都在受压力作用下结晶, 达到内部组织致密度要求。利用低压铸造

机数字化压力分段控制能力, 对保压压力进行检测和补偿, 减小乃至避免燃烧室区域的缩松缺陷产生。

(3) 采用模温机的时序控制冷却回路开闭措施方法理顺铸件凝固结晶顺序。合理控制上、下冷却回路的开闭时序, 优化理顺铸件凝固结晶顺序, 提高铝合金壳体内部结晶凝固致密度。

参考文献:

- [1] 梁秋华, 韩伟, 黄凌森, 等. 水冷机壳低压铸造凝固过程数值模拟及工艺优化 [J]. 铸造. 2019, 68 (4): 353-358.
- [2] 游寿松, 张吉祥, 张科峰, 等. 铸造CAE模拟分析低压铸造泵轮缩松缺陷 [J]. 铸造. 2020, 69 (2): 183-186.
- [3] 朱洪军. 基于正交试验及数值模拟的下缸体压铸工艺优化 [J]. 铸造. 2021, 70 (6): 670-674.
- [4] 刘楚生, 韩伟, 陈晓斌, 等. 电动机机壳低压铸造模温系统设计 [J]. 现代制造工程. 2019 (6): 103-106.
- [5] 杨闯, 苏小平, 周大双, 等. 铝合金悬架摆臂低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 铸造技术. 2021, 42 (5): 371-374, 382.
- [6] 陈川川, 苏小平, 符继麟. 铝合金转向节低压铸造数值模拟与工艺优化 [J]. 热加工工艺. 2020, 49 (1): 61-64, 67.
- [7] 郭俊卿, 樊翠林, 陈拂晓. 镁合金汽车轮毂低压铸造工艺进展 [J]. 铸造. 2021, 70 (6): 639-645.
- [8] 魏剑, 吴龙, 胡州. 发动机铝合金缸盖低压铸造的数值模拟 [J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42 (2): 149-155.
- [9] 魏剑, 张永坚, 高浩. 铝合金汽车轮毂低压铸造的数值模拟 [J]. 三明学院学报, 2020, 37 (2): 46-51.
- [10] 彭曼琦, 程凯, 李成信, 等. 基于AnyCasting的铝合金弹底转座压铸工艺参数优化 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (2): 153-156.

Design of Low Pressure Casting Mold for Aluminum Alloy Cylinder Head and Optimization of Solidification Quality

CHEN Xiao-bin¹, TAN Yi¹, YANG An², LIU Zhen-wei¹

(1. Mechanical Engineering Department, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, Guangdong, China; 2. Guizhou Lanhui New Material Co., Ltd., Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract:

To solve the defects of aluminum alloy single cylinder head of motorcycle engine, such as dispersed shrinkage, shrinkage and blowhole, the MAGMA software was used to simulate the temperature and cooling rate changes in the low pressure casting process of the cylinder head, and predict the defect tendency and key development areas of the cylinder head. While reasonably designing the cylinder head die structure and the cooling system of each part of the side die, the numerical simulation results were combined with the intelligent equipment, and the digital intelligent technology of the low-pressure casting machine was used to control the cooling time sequence and the fine pressure control of the solidification process, so as to avoid the defects during the solidification and crystallization in the key area of the cylinder head combustion chamber, and improve the internal structure forming density of the aluminum alloy cylinder head castings and the production quality of the low-pressure casting.

Key words:

aluminum alloy cylinder head; low pressure casting; defect prediction; intelligent equipment
