

# 基于 3D 打印技术的气缸盖自补缩 低压铸造工艺优化研究

刘士渊, 杨成龙, 黄雪枫, 徐 宏, 毛宏奎, 张国伟, 柴建丽

(中北大学材料科学与工程学院, 山西太原 030051)

**摘要:** 某型号铝合金气缸盖采用传统低压铸造工艺生产时, 喷油器孔附近频繁出现气孔和缩松缺陷, 导致铸件出现渗漏现象。采用MAGMA铸造过程模拟仿真软件对铸造工艺进行模拟仿真优化, 结合3D打印砂芯技术, 通过优化铸造工艺设计、调整低压铸造曲线, 消除了铸造缺陷, 并提出了一种自补缩无加压低压铸造工艺, 提升气缸盖铸造良品率, 为气缸盖铸造工艺提供新方向。

**关键词:** 3D打印; 气缸盖; 铸造缺陷; 低压铸造

某型号气缸盖是特种车辆柴油机构造的主要部件, 用来封闭机体上部, 与活塞、气缸套构成燃烧室空间并保证柴油机进、排气过程的顺利进行<sup>[1]</sup>。气缸盖是柴油机的固定不动机件, 一般采用铝合金铸造。为了散热, 气缸盖的内部都铸有水腔。冷却液在水泵的压力作用下从水箱或散热器进入气缸体水套, 然后经过气缸垫出水孔进入气缸盖内部水套, 再从气缸盖端面上的出水孔排出, 进入气缸盖出水管, 最后回到水箱<sup>[2]</sup>。

该型号气缸盖是一个热机承载大、形状不规则、壁厚差别较大、结构不对称的复杂空间结构。该铝合金气缸盖为6缸气缸盖, 铸件外形尺寸1 362 mm × 244 mm × 152 mm, 重量约90 kg, 由于存在有较大的铸造平面和曲面, 内腔有上下两层水腔和复杂曲面结构, 且热节部位很多, 不利于顺序凝固, 铸件平均壁厚约10 mm, 属薄壁复杂件, 铸造时容易产生憋气、冷隔、浇不足等现象, 因此铸造工艺性差, 平稳充型比较困难, 铸造成形难度大<sup>[3-4]</sup>。在铸件批量试制过程中, 频繁出现气孔及缩松缺陷, 如图1所示。

本文主要研究某型号气缸盖铸件在生产过程中存在的缺陷, 分析缺陷产生的原因, 对现有的铸造工艺进行分析并优化改进。本文的研究意义是解决某型号气缸盖在批量生产过程中频发的缺陷问题, 优化传统的低压铸造曲线设计和铸造工艺设计, 为气缸盖铸造工艺设计提出一种新理念和新思路。

## 作者简介:

刘士渊 (1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为复合材料铸造工艺。E-mail: 233663282@qq.com

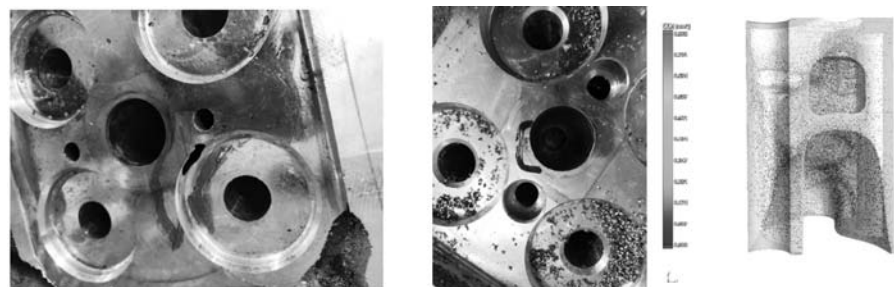
中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022) 10-1295-04

## 收稿日期:

2022-03-18 收到初稿,  
2022-04-30 收到修订稿。



(a) 气孔

(b) 缩松

(c) 针孔

图1 气缸盖铸造缺陷

Fig. 1 Casting defects of the cylinder head

## 1 铸造缺陷原因分析

针对原工艺铸件试制时出现的缺陷,对铸件存在部位进行解剖分析,缺陷部位有光滑的曲面或明显的缩松,对这两种缺陷形成进行原因分析。

### 1.1 缩松

气缸盖铸件上下水腔中间部位存在厚大热节部位,由于水腔和气道芯难以布置冷铁,导致铸件喷油器孔内部凝固冷却速率较慢,使铸件凝固组织粗大,导致铸件内部疏松缺陷。

### 1.2 气孔

气缸盖铸件顶平面的气孔是由于铸件结构的特殊性,水腔和气道芯被铝液完全包裹,使得水腔和进排气道砂芯的局部气体压力超过金属液的压力,同时由于传统制芯方式难以抑制水腔和气道芯气体排出,形成铸件表面和次表层的气孔缺陷。

## 2 铸造工艺优化

该型号气缸盖原低压铸造工艺采用升液-充型-加压-凝固-卸压和冷却传统低压铸造方式,由于铸造结构较为复杂,内浇道难以补缩到铸件的顶平面,无法形成一种自上而下的凝固方式,容易形成液相孤立区,为此开发设计一种自补缩无加压低压铸造工艺,并对铸件的浇注系统进行了优化设计。

### 2.1 原铸造工艺分析

该铝合金气缸盖原工艺的浇注系统采用 $\Phi 45$  mm的内浇道,内浇道布置在主丝对孔部位,横浇道的厚度为80 mm,采用陶瓷过滤片进行铝液过滤,液重128 kg,浇注系统、补缩系统设计如图2所示。

通过采用铸造模拟仿真软件MAGMA5.4,对气缸盖铸造浇注和凝固过程进行模拟分析,设置铝合金材料、树脂砂种类等边界条件参数,铸造铝合金选用AlSi7Mg合金(液相线温度 $613^{\circ}\text{C}$ 、固相线温度 $557^{\circ}\text{C}$ );

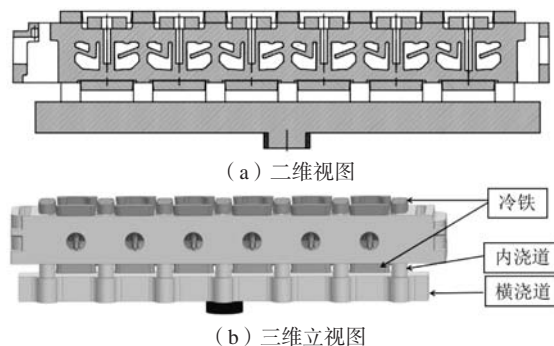


图2 原铸造工艺示意图

Fig. 2 The schematic diagram of original casting process

砂型及砂芯选用呋喃树脂砂;浇注温度选取 $680^{\circ}\text{C}$ ;砂型及冷铁温度采用室温 $20^{\circ}\text{C}$ 。同时输入传统低压浇注压力曲线,充型速率 $0.001\sim 0.0012$  MPa/s,稳压时间为 $5\sim 7$  s,加压时间为 $3\sim 5$  s,保压压力为 $0.016\sim 0.018$  MPa,保压时间 $> 10$  min。

从铸件浇注过程模拟结果来看,铸件顶平面存在气体滞留和憋气的风险,如图3所示,气体压力大于大气压力( $0.1013$  MPa),同时冷铁大范围的存在,导致铸件顶平面的气体无法排出,形成铸件顶平面的气孔。

从铸件凝固过程模拟结果来看,铸件内浇道具有补缩能力,冷铁具有快速激冷能力,从理论上形成了自上而下的凝固方向,但由于铸件中部位置存在厚大热节,无法通过定向凝固实现铸件厚大部位补缩,最终导致铸件主丝对位置的疏松,如图4所示。

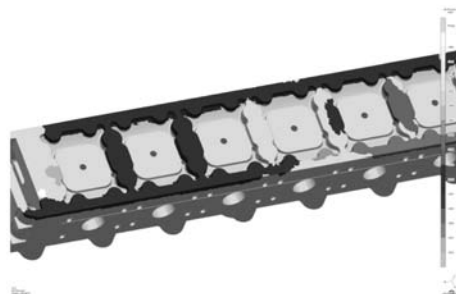
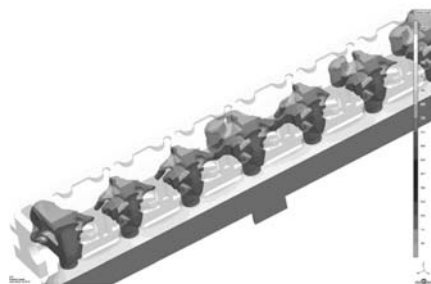
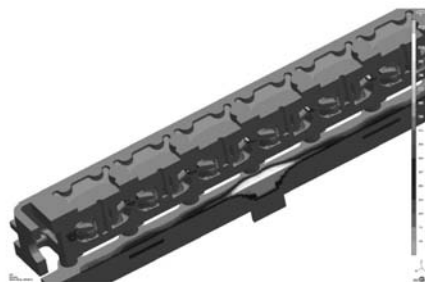


图3 原工艺浇注过程气体压力模拟结果

Fig. 3 Simulation results of gas pressure during pouring for the original casting process



(a) 凝固过程中液相比例



(b) 缺陷分析

图4 现工艺凝固过程缺陷模拟结果

Fig. 4 Simulation results of defects during solidification for the original process

## 2.2 改进工艺分析

对现有的低压铸造工艺进行改进，主要针对顶平面主丝对位置疏松、气孔等问题制定铸造工艺方案。改进后的铸造工艺方案如图5所示。

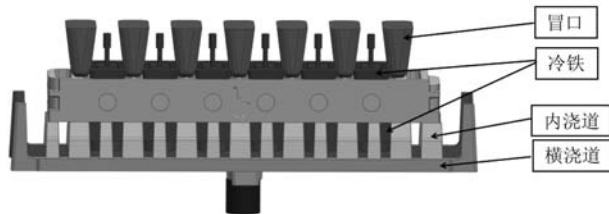


图5 改进后的铸造工艺设计

Fig. 5 Design of the casting process after improved

### 2.2.1 浇注系统设计优化

为保证金属液的平稳充型，浇注系统设计采用整体开放式，内浇道设计在燃烧室面厚大副丝对孔处，内浇道形状呈扁平式，两侧共30处，大内浇道设置在壁厚处，小内浇道设置在壁厚处，浇注温度由680℃提高到710℃。浇注系统截面比： $A_{升液} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : 1 : 1.5$ ，浇注系统如图6所示。通过MAGMA软件的模拟结果观察金属液充型过程中的充型速率，改进后的铸造工艺不易在浇注过程中形成紊流，从而避免夹杂、夹砂的风险。

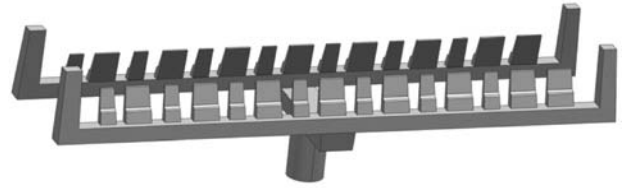


图6 改进后的浇注系统设计

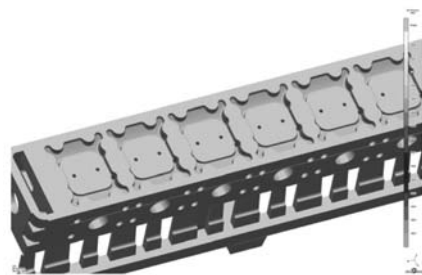
Fig. 6 Design of the gating system after improved

### 2.2.2 激冷系统设计优化

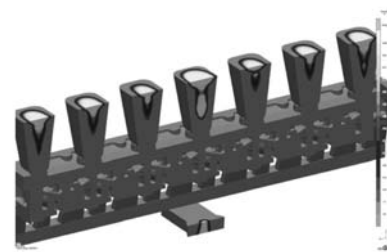
气缸盖燃烧室面承受着热机交变载荷，对性能和缺陷要求极高，为提升燃烧室面的力学性能和内部质量，对冷铁的厚度和材质进行优化，选用热导率较大的随形铜冷铁，冷铁厚度改为110 mm，对铸件下方进行大面积的快速激冷，促进自下而上的凝固起点，经过MAGMA铸造过程模拟仿真软件对改进后的铸造工艺进行模拟，未发现气孔及缩松缺陷。

通过采用模拟仿真软件对优化后的气缸盖铸造工艺进行模拟计算，分别对充型过程中压力场和凝固过程中温度场进行分析，铸件上平面的气体滞留风险变小，几乎没有气体滞留，如图7a所示，铸件厚大热节部位形成自下而上的凝固顺序，厚大热节得到充分补缩，铸件内部在计算机模拟状态下缺陷消失，如图7b所示。

(1) 铸造压力曲线优化。低压铸造曲线一般经



(a) 气体压力



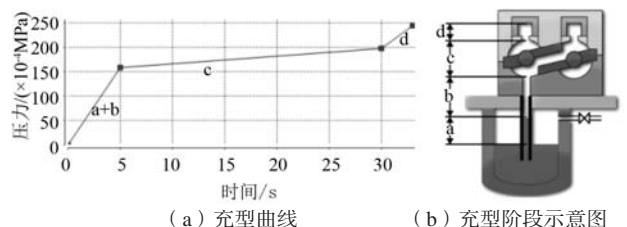
(b) 缺陷分析

图7 工艺改进后模拟仿真

Fig. 7 Simulation results after process improvement

过升液、充型、加压、保压、排气冷却5个阶段<sup>[5]</sup>，该铸件采用自补缩无加压的低压浇注方式，如图8所示，a+b阶段为升液管和浇注系统充型过程，c阶段为铸件型腔充型过程，d阶段为冒口充型过程，这种方式不通过坩埚内的铝液进行补缩，内浇道先凝固，切断补缩通道，通过上方布置的冒口对铸件形成了自上而下的补缩方式，同时浇注温度的提高能够保证冒口的补缩能力。

(2) 基于3D打印的型芯制备。传统手工树脂砂造型制作的砂芯发气量约为11~15 mL/g，为减少由于手工树脂砂造型带来的气孔缺陷，选用3D打印技术进行水腔、气道型芯的整体型芯打印制备，在保证砂芯强度的基础上降低砂型的发气量<sup>[6]</sup>，采用造型材料发气性



(a) 充型曲线

(b) 充型阶段示意图

图8 工艺改进后低压铸造充型曲线

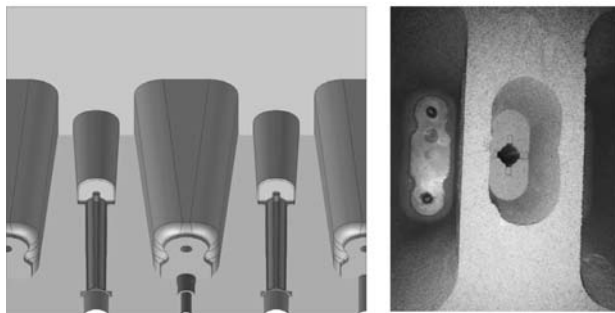
Fig. 8 Filling curve of the low pressure casting after process improvement  
测试仪进行检测，检测值均<7 mL/g，既提高了生产效率，又减少了铝液浸入气体，从根源上减少了气孔缺陷的产生。

(3) 砂芯排气通道设置。尽管从发气的根源进行了砂芯制备的改进，但砂芯内部的树脂燃烧仍然会形

成气体，因此设计合理的排气通道是有效控制气孔形成的最有效的方案，通过对喷油器孔内的蜡烛芯进行结构优化，增加排气通道，如图9所示，在上型增加4个排气槽，有效引导气体的排出。

### 3 生产验证

对铸件本体力学性能、金相组织检测均达到技术要求，同时委托金属材料理化检测中心采用nanoVoxel 4000进行X射线显微CT检测，喷油器孔内未发现气孔、缩松等缺陷，框选部位是铝芯未去除导致，不是

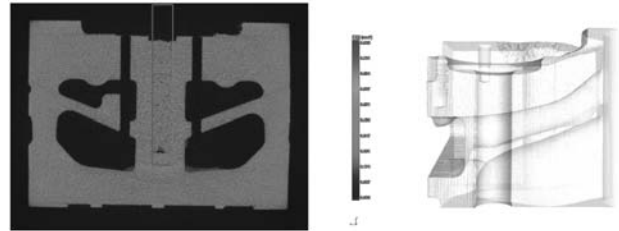


(a) 模具三维示意图 (b) 砂型示意图  
图9 模具排气通道优化

Fig. 9 Optimization of the die exhaust passage

#### 参考文献:

- [1] 王洪磊, 纪飞飞, 郑爱权. 汽车发动机缸盖湿型砂铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 866-871.
- [2] 梁亮. 16RK270柴油机气缸盖国产化工艺研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
- [3] 金延竹, 张世超, 夏振佳, 等. V12铝合金缸盖铸造工艺开发 [C]//第十三届中国铸造协会年会, 2017: 14-19.
- [4] 徐生龙, 崔玉萍. 基于计算机辅助设计的柴油机气缸盖铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2020, 69 (10): 1114-1116.
- [5] 姜月明. 某复杂铝合金铸件低压铸造数值模拟及工艺优化研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [6] 樊自田, 杨力, 唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用 [J]. 铸造, 2022, 71 (1): 8-23.



(a) CT断层扫描 (b) 三维X射线扫描

图10 X射线显微CT检测结果

Fig. 10 Test results of the X-ray microscopic CT

铸件内部的缺陷。

### 4 结论

(1) 传统的低压铸造只能通过内浇道进行补缩，自补缩无加压低压铸造可通过内浇道控制平稳充型，同时可以通过顶冒口补缩铸件厚大部位，从而避免缺陷的产生。

(2) 3D打印型芯制造技术可以有效降低砂芯发气量，避免复杂形状手工型芯制造难、尺寸精度差等问题。

(3) 按照改进后的工艺方案大幅度提升了铸件合格率，铸件力学性能达到规定的技术要求。

## Optimization of Cylinder Head Self-Feeding Low Pressure Casting Process Based on 3D Printing Technology

LIU Shi-yuan, YANG Cheng-long, HUANG Xue-feng, XU Hong, MAO Hong-kui, ZHANG Guo-wei, CHAI Jian-li

(School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

#### Abstract:

When a certain type of aluminum alloy cylinder head was produced by traditional low-pressure casting process, frequent blowhole and shrinkage defects occur near the injector hole, leading to leakage of the casting product. The casting process was simulated and optimized by using the simulation software of magma casting process. Combined with 3D printing sand core technology, the casting defects were eliminated by optimizing the casting process design and adjusting the low pressure casting curve. By putting forward a kind of self feeding without the pressure boost of low pressure casting process, the yield of the cylinder head casting was increased, which provided a new direction for the cylinder head casting process.

#### Key words:

3D printing; cylinder head; casting defect; low pressure casting