

基于三维打印的铝合金单缸缸盖快速铸造方法

赵 彬

(康硕电气集团有限公司, 北京 100102)

摘要: 本研究利用3D喷墨粘接砂型打印技术, 快速制造了铝合金单缸缸盖用砂型和砂芯, 并采用低压铸造技术, 完成缸盖的铸造, 所得的铸件减少了气孔产生, 从而保证了零件的气密性要求。此外, 采用电加热管加热冷铁, 改变了铸件的凝固场, 使其满足了铝合金单缸缸盖毛坯燃烧室表面的粗糙度要求和加工基准的尺寸公差要求, 并利用计算机数值模拟软件, 进行了铸造前的充型和凝固模拟, 避免了缩孔、缩松和冷隔等缺陷的产生。

关键词: 3D喷墨粘接砂型打印; 快速铸造; 低压铸造; 铝合金; 单缸缸盖; 表面粗糙度

1 研究背景及生产条件

汽车工业发展日新月异, 排放和油耗指标要求越来越高, 而发动机作为汽车的心脏, 在汽车研发中地位颇高。铝合金缸盖是发动机的重要零件, 也是最为复杂的铸件之一。如何快速生产出适合发动机用的缸盖, 成为各主机厂及铸件生产企业需要解决的难题之一。

目前, 缸盖大多采用铝合金材料铸造, 通过不同的铸造工艺和热处理方式, 满足铝合金缸盖产品的各种性能要求。最广泛使用的铸造工艺有低压铸造或重力铸造, 低压铸造充型能力比重力铸造强, 采用底注式浇注系统, 充型平稳, 能减少气孔和氧化夹杂, 已成为铝合金缸盖的主要工艺手段。铝合金量产铸件采用金属型低压铸造工艺, 金属模具结构复杂, 其模具价格在60~100万元每套, 周期要3~6个月, 模具成本高, 而且周期太长。研发阶段通常只生产几个到几十个毛坯, 有时还要反复修改设计图, 响应速度慢。本研究采用三维喷墨粘接砂型打印技术和计算机辅助设计(CAD), 计算机铸造工艺模拟分析(CAE)软件, 电加热冷铁等技术, 成功实现了铝合金缸盖毛坯的快速开发。

2 技术要求

铝合金单缸缸盖铸件如图1所示。

铸件材料为ZAlSi7MgA-T6, 重量5.5 kg, 主要壁厚3~3.5 mm, 要求抗拉强度>275 MPa, 硬度>HB80。铸件尺寸公差要求达到CT8, 进排气道轮廓度1.5 mm, 进排气道表面粗糙度 $Ra < 12.5 \mu\text{m}$ 。燃烧室表面粗糙度 $< 6.3 \mu\text{m}$, 燃烧室测量点到Z基准的高度公差要求为 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。

X、Y、Z三个方向6个基准点要求满足机加工定位要求, 进排气道及水套气密要求250 kPa, 20 min无泄漏, 曲轴箱气密要求150 kPa, 5 min无泄漏。

3 技术难点和解决方案

3.1 技术难点

- (1) 此铸件为快速铸造样件, 开发周期短, 从接单到发货只有20天时间;
- (2) 进排气道及燃烧室表面粗糙度要求高, 且为铸造面, 传统砂铸无法满足;

作者简介:

赵 彬(1978-), 男, 学士, 研究方向为铸造工艺。
E-mail: binzhaomail@163.com

中图分类号: TG241

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)10-1143-05

收稿日期:

2019-06-24 收到初稿,
2019-07-17 收到修订稿。

(3) 加工基准点尺寸公差要求为 $\pm 0.2 \text{ mm}$ ，且需要在毛坯上铸出；

(4) 铸件各腔体结构都有气密性要求，对铸件气孔和缩孔缩松等缺陷控制有较高要求；

(5) 铸件壁较薄，曲面较多，用传统砂铸铸造方式易产生冷隔和浇不足。

3.2 解决方案

针对技术难点拟定如下工艺路线：

(1) 采用三维喷墨粘接砂型打印技术制作砂型和砂芯，结合低压铸造的工艺路线，实现快速无模化生产，满足生产周期的同时，还能降低铸件产生的气孔、冷隔和浇不足等缺陷，达到铸件各腔体的气密要求；

(2) 打印前将进排气道砂芯数模表面减小 0.2 mm 单边的涂料层厚，砂芯浸涂烘干后，手工对其表面打磨，边打磨边进行三维纵向扫描比对，要求将进排气道砂芯铸前轮廓度控制在 0.4 mm ，进排气道砂芯铸前表面粗糙度要求达到 $Ra=3.2\sim 6.3 \mu\text{m}$ ；

(3) 6个加工基准点连同燃烧室模芯做在同一块成形冷铁上，满足加工基准的尺寸公差要求和燃烧室的表面粗糙度要求。成形冷铁如图2所示。

4 工艺设计

4.1 浇注系统设计

本设计采用砂型低压铸造，在火花塞处设冒口，燃烧室处厚大位置放成形冷铁，实现低紊流充型，控制凝固顺序，确保燃烧室面组织致密，满足伸长率、强度和硬度等技术指标要求。火花塞处设置冒口，避免了缩孔缩松的出现。底注式浇注系统实现平稳充型，陶瓷过滤器有效地阻止了铝渣和夹杂进入铸件型腔。浇注系统如图3所示。

4.2 加工余量及缩尺

本缸盖毛坯相对较小，结构复杂，变形量小，综合考虑加工余量设计为 3 mm/面 。本缸盖采用砂型铸造+电加热管加热成形冷铁，根据经验燃烧室面和加工基准面为金属型，且在 X 、 Y 方向为受阻收缩，故缩尺设计为 0.5% ，余量设计为 1% 。

4.3 冷铁加热方式及加热时间

根据经验，冷铁体积过大，可引起金属液充型时冷料过多。为了避免充型不良及产生气孔，在冷铁底部设置直径 17 mm ，功率 500 W 的发热管两根，冷铁加热时间为 18 min 。冷铁加热时间取决于两个方面：一方面是满足充型时的温度要求；另一方面，冷铁上组装有水套和气道砂芯，水套和气道砂芯均为呋喃树脂

砂材料，长时间的高温加热，会使呋喃树脂砂溃散。因此，在正式浇注前，需要提前做好实验，以满足 $230\sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷铁初温，且呋喃树脂砂芯不溃散为宜。本文所述 18 min 加热时间，为实验所得数据。

4.4 计算机铸造工艺模拟

快速样件的制作周期短，采用计算机铸造工艺模拟技术可以对铸件缩孔、缩松、冷隔及浇不足等缺陷做出预测，在铸前调整好铸造工艺，提高产品的一次

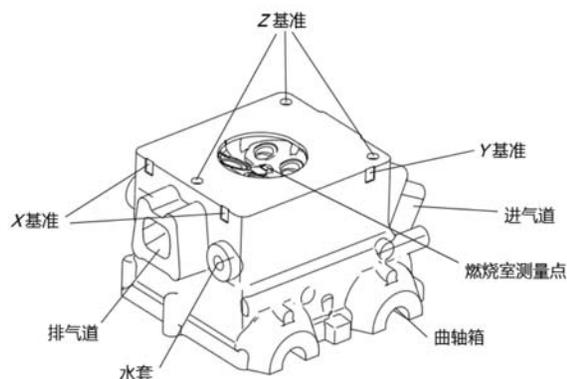


图1 缸盖的结构

Fig. 1 Structure of cylinder head

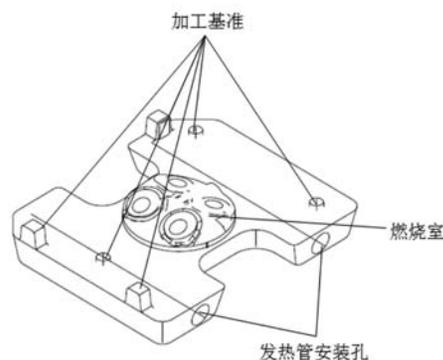


图2 成形冷铁

Fig. 2 Molded chill

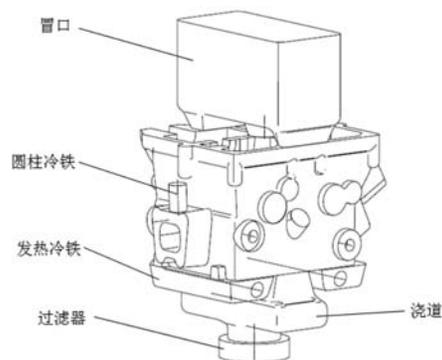


图3 浇注系统三维图

Fig. 3 A schematic diagram showing three-dimensional pouring system

性合格率，以缩短交货时间。本研究利用计算机仿真技术使铸件第一次浇注就避免了缩孔、缩松、冷隔及

浇不足缺陷，从而保证了交货时间。图4、5和6分别是工艺优化流程、充型温度场和铸件凝固模拟结果。

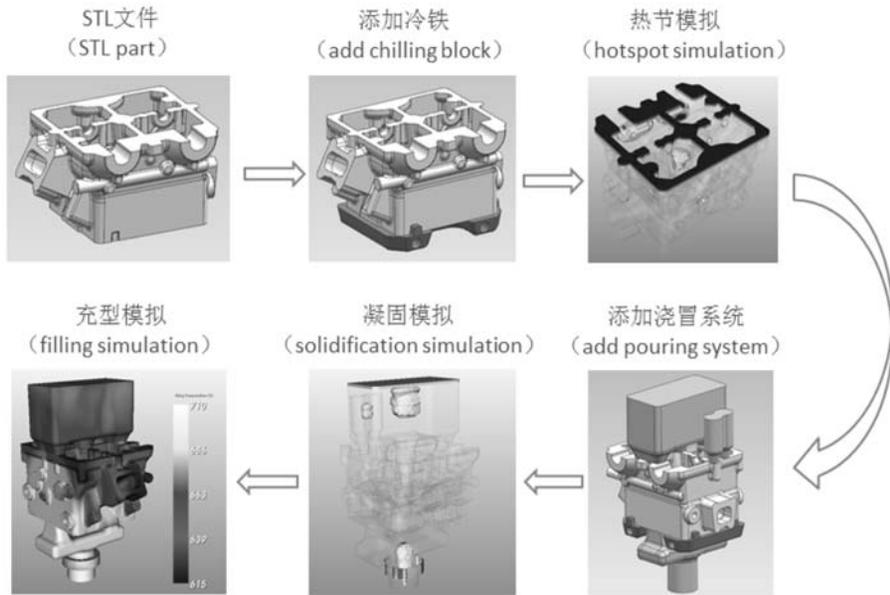


图4 铸造工艺模拟流程
Fig. 4 Casting process simulation path

4.5 铸型设计

铸型设计图见图7。

5 砂型及砂芯打印

因本缸盖为新品研发，数量只有4件，且生产周期只有20天，用传统方法制作模具无法满足交货期，且成本太高。随着增材制造技术的发展，三维喷墨粘接砂型打印技术以其快速、精确、柔性好的特点，非常适合本缸盖砂型的制作。

三维喷墨粘接砂型打印技术是喷墨粉体粘接 (Ink-Jet Powder Binding) 3D打印技术的一种，由德国Generis GmbH (现为voxeljet GmbH) 的Ingo Ederer和Hoechs mann Rainer在1996年发明的。它与激光选区烧结工艺制造砂型的固化原理最大区别在于：前者是基于覆膜砂的热固化成形特点进行固化，后者采用的是自硬树脂砂的树脂与固化剂的化学反应来进行固化的^[1]。打印好的砂型见图8。

水套砂芯仅有3个小孔可以排气，为避免气孔引起泄漏，打印时将水套砂芯内部挖空，砂型发气量控制在9 mL/g以下，其他砂芯为13 mL/g以下，所有砂芯要求抗拉强度>1.1 MPa，抗弯强度>2.5 MPa。

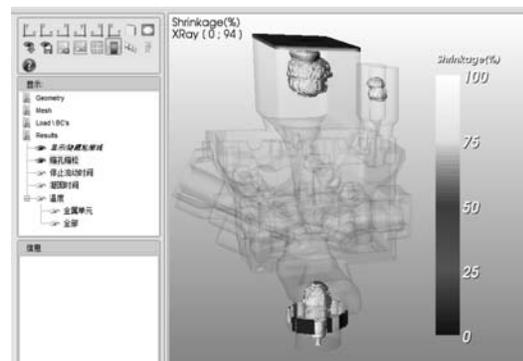


图5 熔体充型模拟
Fig. 5 Mold filling simulation

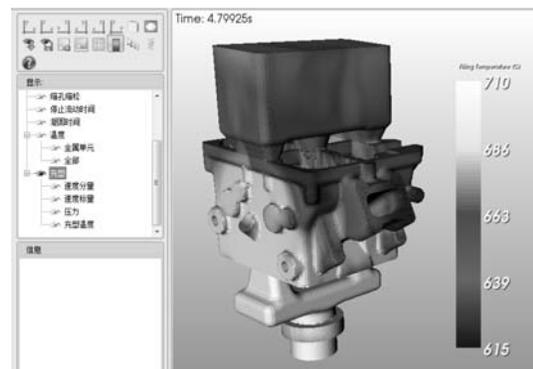


图6 铸件凝固模拟
Fig. 6 Casting solidification simulation

6 涂料和烘干

由于冷铁为金属型且燃烧室表面光洁度要求高，所以采用喷涂传统高压铸造涂料。气道表面粗糙度要求 $Ra=12.5\ \mu\text{m}$ ，轮廓度要求 $1.5\ \text{mm}$ ，此3D打印砂型无法满足，因此在打印时将气道砂芯表面偏置 $0.2\ \text{mm}$ /单边，采用刷涂工艺，表面采用手工打磨来完成，边打磨边进行逆向扫描比对，直至满足粗糙度和轮廓度的要求。其他砂芯采用浸涂即可。因上水套砂芯特别薄，仅有 $4\ \text{mm}$ 厚，所以在烘干时采用低温烘干，以避免变形。

7 合箱加热与浇注

铸型按设计要求装配，从冷铁底部引出发热管导线，套上铁砂箱并埋砂后备用。因本缸盖采用砂型低压铸造工艺，为加强砂型刚度，避免因砂芯开裂而引起的漏箱事故，需要用螺栓将砂型锁死，套上铁箱并在砂型和铁箱之间用树脂砂做填充。

铸件浇注重量为 $9.3\ \text{kg}$ ，浇注速度为 $2.5\ \text{kg/s}$ ，浇注温度为 $710\ ^\circ\text{C}$ ，保压时间为 $10\ \text{min}$ 。当金属液到达指定温度（通常为 $680\ ^\circ\text{C}$ 以上），经除气除渣后，安装浇注平台，再将埋砂完成的铸型吊装到低压铸造平台上。过滤器对准升液管，升液管四周放上石棉圈，冒口顶

端铺透气垫放压铁，放置妥当后，开始加热冷铁， $18\ \text{min}$ 后，此时金属液温度也达到 $710\ ^\circ\text{C}$ 左右，开始浇注。浇注示意如图9。

8 后清理及热处理

铸件开箱后做简单清理后，用振砂机振 $3\ \text{min}$ 后做T6热处理。具体操作：固溶（ $535\pm 5\ ^\circ\text{C}$ ， $8\ \text{h}$ ）后快速在 $60\sim 80\ ^\circ\text{C}$ 水中淬火，室温放置 $12\ \text{h}$ 再进行时效处理（ $180\pm 5\ ^\circ\text{C}$ ） $\times 6\ \text{h}^{[2]}$ 。

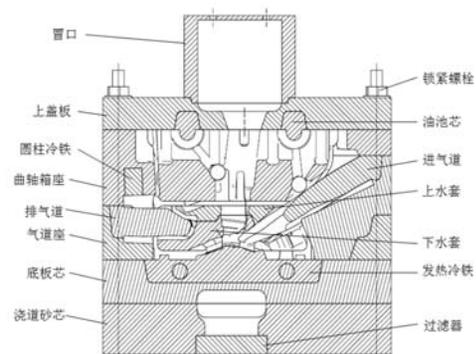


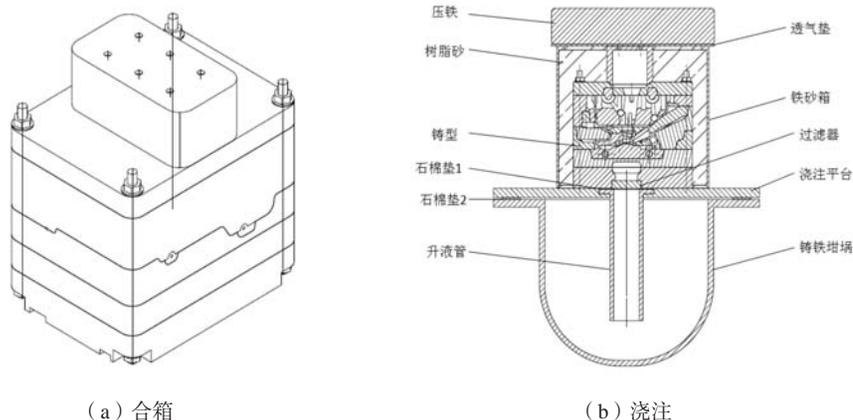
图7 铸型设计图

Fig. 7 Casting mold design drawing



图8 打印完成的砂芯

Fig. 8 Finished sand core by 3D printing



(a) 合箱

(b) 浇注

图9 合箱浇注示意图

Fig. 9 A schematic diagram showing mold assembling and pouring

热处理完成后做抛丸处理，抛丸后的铸件如图10。

9 铸件检查

经三维逆向比对，本缸盖毛坯尺寸精度达到CT8级。粗糙度比对，燃烧室达 $R_a=3.2\ \mu\text{m}$ ，气道表面处于 $R_a=6.3\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 之间，均高于客户要求。铸件经打压检查未发现泄漏，内窥镜检查，铸件内腔洁净无残砂。燃烧室高度经三坐标测量在 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 以内。经CT探伤检查，铸件未发现缩孔缩松（如图11），各项指标均满足客户要求。

10 结语

运用本方法生产出的毛坯铸件，解决了燃烧室表面粗糙度要求高、尺寸公差小的技术难点，达到了客户的技术要求。低压铸造满足了薄壁件的充型要求，且有效减少了气孔。采用低温烘干避免了3D打印水套的变形问题。运用计算机铸造工艺模拟技术在铸造前期优化工艺设计，提高了一次合格率。采用三维喷墨粘接砂型打印技术快速生产砂型和砂芯，实现无模化铸造的同时也缩短了生产周期。综上所述，本方法具有明显的时间和成本优势，取得了良好的社会效益。

参考文献：

- [1] 杨永泉, 刘文辉. 喷墨砂型打印技术浅析 [C] // 2015中国铸造活动周论文集. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2015.
- [2] 田荣璋. 铸造铝合金 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.

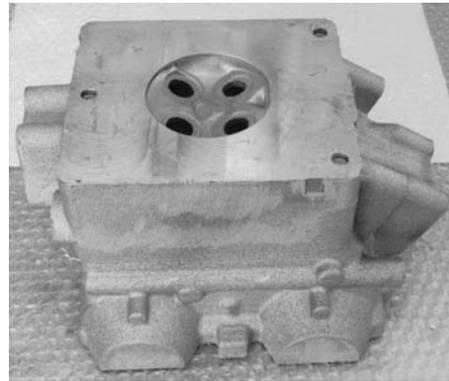


图10 清理后的铸件

Fig. 10 Cleaned cylinder head casting



图11 CT探伤结果

Fig. 11 CT inspection result

A Rapid Casting Method for Aluminum-Alloy Single Cylinder Head Based on 3D Printing

ZHAO Bin

(Kangshuo Electric Group Co.,Ltd., Beijing100102, China)

Abstract:

In this study, 3D ink-jet adhesive sand mold printing technology was used to produce rapidly sand mold and sand core for casting of aluminum alloy single cylinder heads. By using low-pressure casting technology, the aluminum-alloy cylinder heads free from blowholes were made, thus ensuring the air tightness of cylinder. In addition, chills were heated by electric heating tubes to change the solidification field of the casting and to achieve a satisfied surface roughness of combustion chamber and small dimensional tolerance. Before the cylinder heads were cast, the simulations of mold filling process and solidification process were carried out by using computer numerical simulation software to reduce the casting defects of dispersed shrinkage, shrinkage cavity and cold shuts and so on.

Key words:

3D ink-jet adhesive sand mold printing; rapid casting; low-pressure casting aluminum-alloy; single cylinder head; surface roughness