

# 基于数值模拟和 3D 打印砂型的出气联接管铸造工艺设计及验证

杨成龙<sup>1, 2, 3</sup>, 刘士渊<sup>1, 2, 3</sup>, 徐宏<sup>1</sup>, 毛红奎<sup>1</sup>, 黄雪枫<sup>2, 3</sup>, 王光伟<sup>2</sup>

(1. 中北大学, 山西太原 030051; 2. 山西柴油机工业有限责任公司, 山西大同 037006;

3. 山西中兵铸造有限公司, 山西大同 037006)

**摘要:** 针对小批量试制生产的出气联接管铸件, 基于Magma软件进行铸造工艺建模、数值模拟分析, 待工艺确定后, 再采用3D打印方法进行砂型快速制作, 并完成样件浇注。结果表明, 采用数值模拟+3D打印砂型的方法是实现铸造工艺快速固化及铸件的快速铸造方式, 节省了模具制造、改进所耗的大量费用, 对快速响应生产具有重要意义。

**关键词:** Magmasoft; 铸造工艺; 3D打印砂型; 铸造缺陷

通常铸件的铸造过程基本分为铸件毛坯图绘制、铸造工艺设计、砂芯分型设计、模具设计、模具制造、样件试制、铸造工艺调整等多个阶段, 铸件试制周期需1~2个月, 且铸件试制、工艺优化以及模具制造和改进的成本较高。近年来, 砂型3D打印技术日趋成熟, 在航空、航天、兵器、汽车工业等领域广泛应用<sup>[1]</sup>。采用3D打印砂型进行样件试制, 无需进行模具设计和制造, 节约制造成本, 且工艺设计也无需考虑模具制芯的出型问题。

本文根据出气联接管铸件结构, 通过NX三维建模软件对浇注系统、补缩系统、激冷系统等铸造工艺进行三维模型构建, 将构建完成的铸造工艺导出为STL格式文件, 输入Magma数值模拟软件中进行流场、温度场分析以及缺陷模拟仿真预测<sup>[2]</sup>。在优化后的铸造工艺基础上进行砂型结构分割, 并进行3D打印砂型, 最后完成铸件浇注和清理。采用数值模拟结合3D打印砂型的方法, 整个铸件铸造周期一周左右, 极大缩短了样件试制周期和铸造成本。

## 1 出气联接管铸件结构

出气联接管铸件结构如图1所示, 铸件材料为ZL114A, 整体轮廓尺寸为363 mm × 297 mm × 140 mm, 基本壁厚为6 mm, 铸件重量约为4.5 kg, 内部设有两个独立不通的管道, 在各管口法兰和立柱上存在多处热节, 铸件整体壁厚差较大。由于该铸件所需批量很小, 因此, 采用数值模拟结合3D砂型打印的方式进行铸件快速试制。



图1 出气联接管铸件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the outlet pipe casting

作者简介:

杨成龙(1989-), 男, 硕士, 主要从事铝合金材料及精确成形技术研究工作。电话: 15235358735, E-mail: 346926954@qq.com

中图分类号: TG242.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)11-1413-05

收稿日期:

2022-01-15 收到初稿,  
2022-03-05 收到修订稿。

## 2 铸件热节位置分析

铸件缩孔、缩松缺陷通常在较慢凝固的热节位置<sup>[3-4]</sup>，本文通过Magma数值分析，对铸件进行无浇注系统、激冷系统及补缩系统的单凝固计算，快速定位铸件可能产生缩孔、缩松缺陷位置。假设铝液瞬间充满型腔后开始凝固，如图2a、2b所示，从单凝固16.4 s

和20.8 s时仍存在的液相比例发现，铸件液相部位基本集中在各法兰及凸台上，可以判定该区域存在缩孔、缩松缺陷风险。如图2c铸件完全凝固后的缩孔率结果所示，铸件缩孔、缩松严重部位均在法兰及凸台部位，与凝固过程中的较晚凝固部位一致。热节位置的确定，为工艺设计提供了参考。

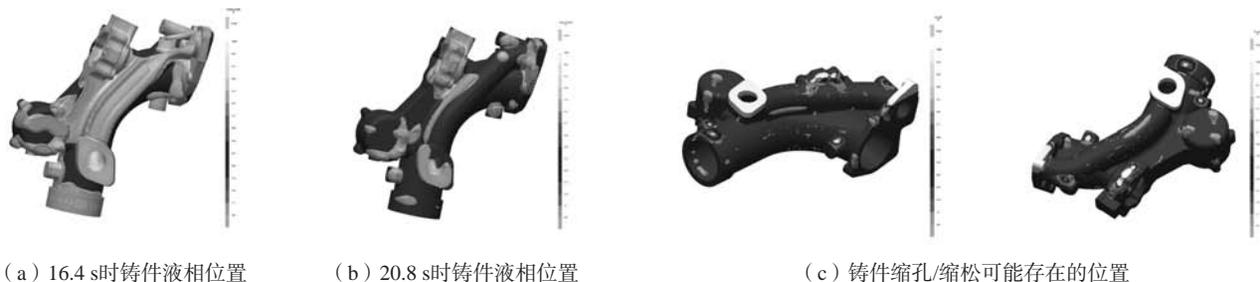


图2 铸件热节位置判定

Fig. 2 Location determination of the casting hot spot

## 3 出气连通管铸件铸造工艺设计

根据上述已定位的铸件热节位置，通过NX三维建模软件进行铸件毛坯建模以及铸造工艺设计，铸造工艺如图3所示。为保证铝合金液经过横浇道后平稳上升，选用底注式浇注系统进行铸件工艺设计。常规圆锥形直浇道在浇注过程中铝液旋转下行容易产生涡流，卷气造渣情况较为严重，采用扁平状直浇道，避免充型涡流产生，减少充型过程中所产生的卷气造渣。补缩系统的内浇口和冒口基本布置在铸件法兰及需加工的管口等厚大热节位置，由压力头给予内浇口补缩能力。对无法布置内浇口，且需要进行补缩的热节部位设置明冒口，增强热节处的补缩能力，同时避免由于排气困难而导致的气孔缺陷。

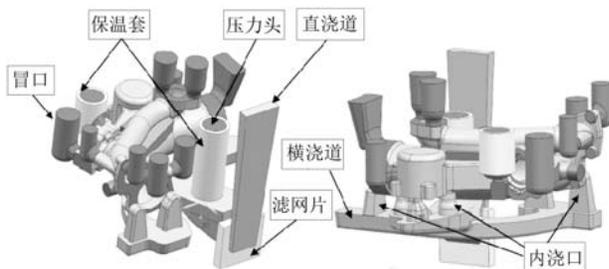


图3 铸造工艺

Fig. 3 Casting process

## 4 出气连通管模拟仿真分析

### 4.1 模拟仿真参数设置

铸造合金材料根据ZL114A材料成分输入Magma软件中，其成分如表1所示，铝合金材料在浇注过程中与3D打印砂型之间的传热系数为 $800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，铸件

浇注温度设置为 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ ，按照经验公式(1)计算铸件浇注时间。

$$t = (3.2 \sim 3.6) \times \sqrt[3]{G} \quad (1)$$

式中： $G$ 为铸件、浇道和冒口的重量之和。

经计算， $t = (3.2 \sim 3.6) \times \sqrt[3]{16} \approx 8 \text{ s}$ 。

表1 ZL114A合金化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL114A alloy  $w_B/\%$

Si	Mg	Ti	Fe
7	0.6	0.15	0.1

### 4.2 铸造流场模拟预测

铸件在浇注过程中可能发生的卷气、夹渣等缺陷，可以通过铸造流场的模拟仿真计算进行分析。一般来说，控制充型过程内浇口的金属液流速小于 $0.5 \text{ m/s}$ ，可有效避免铸件在充型过程中的卷气、夹渣等缺陷<sup>[5]</sup>。本文通过设计扁平式直浇道、 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的10PPI滤网片、横浇道 $2^\circ$ 拔模斜度等设计，有效避免了铸件充型过程卷气夹渣风险。如图4a所示，铝液下行直浇道底端阻流截面后降低流速，再经过横浇道缓流段充满横浇道，图4b所示铝液充满横浇道后平稳上升至内浇口，图4c、4d为铝液由内浇口进入铸件型腔后平稳上升。

### 4.3 凝固温度场及缩孔率分析

图5为出气连通管工艺系统和铸件的凝固过程。图5a、5b、5c、5d分别为凝固时间12.7 s、20.6 s、36.7 s、43.6 s时的凝固状态，从图中可以看出，凝固开始时，铸件管壁部位凝固速度较快，凝固时间20.6 s时，铸件

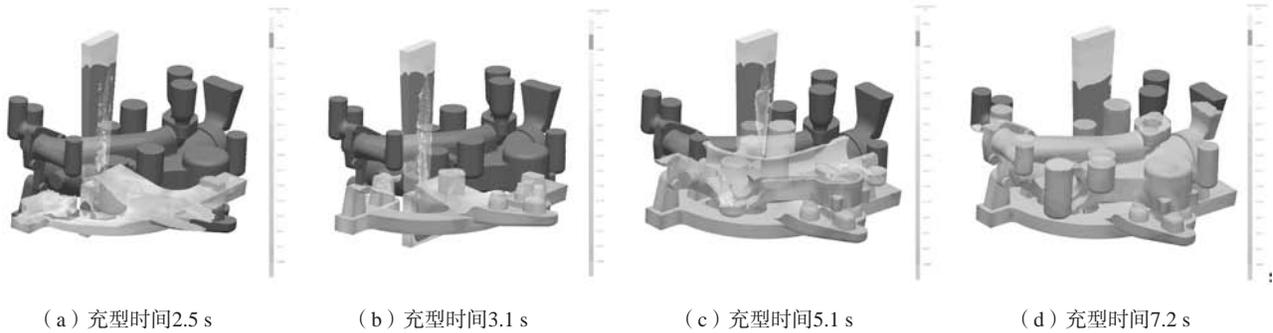


图4 铸件卷气夹渣风险预测

Fig. 4 Risk prediction of the casting entrainment and slag inclusion

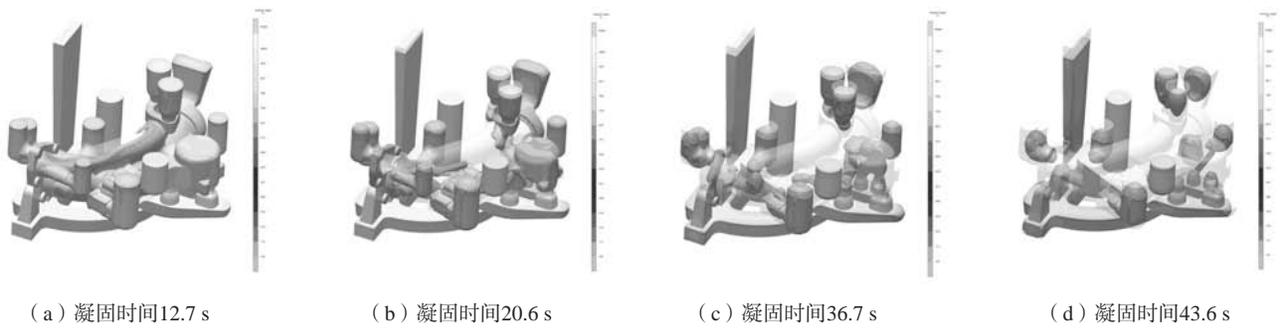


图5 铸件凝固温度场情况

Fig. 5 Solidification temperature fields of the casting

中间管壁部位几乎完全凝固；凝固时间36.7 s时，液态金属主要集中在了横浇道、冒口、内浇口上；凝固时间43.6 s时，铸件基本完全凝固，压力头、横浇道、冒口和内浇口仍处于液相状态，整个工艺系统的凝固顺序是由铸件向补缩系统进行，保证了铸件的完全补缩。

通过在铸件凸台、法兰和管口等厚大热节部位设置冒口、保证内浇口补缩的压力头以及激冷系统的设计，保证铸件内部无缩孔、缩松缺陷，有效避免出气连通管铸件打压渗漏风险，缺陷预测结果如图6所示。

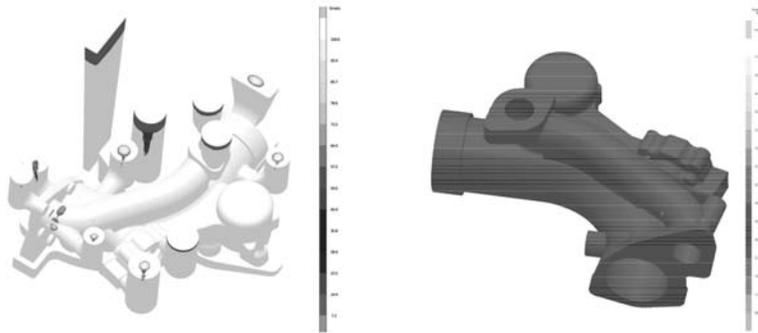


图6 铸件缺陷预测

Fig. 6 Defect prediction of the casting

## 5 3D打印砂型设计及制造

相对于铸造模具设计的砂型分割设计，3D打印的型芯分割设计自由度较大，可以不考虑砂型由模具中是否可以成型，仅需保证下芯的干涉性，在方便清理3D打印散砂的基础上，尽量减少砂芯数量。为减少砂型发气导致的气孔缺陷，同时达到砂型强度高的要求，采用KOCEL-AJS-1800E呋喃树脂3D打印设备以及低发气量粘结剂、高透气性型砂制备砂型，砂型参数

如表2所示。

出气连通管铸件的砂型分割是通过NX三维建模软

表2 3D打印砂型原材料及性能参数  
Table 2 3D printing sand mold raw materials and performance parameters

项目	发气量/( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ )	透气性	24h抗拉强度/MPa	尺寸精度/mm
实际参数	8	650	1.65	$\pm 0.3$
生产要求	$\leq 10$	$\geq 500$	$\geq 1.5$	$\pm 0.4$

件进行设计，保证3D打印砂芯在装配冷铁时不干涉以及清砂干净。型芯设计及装配顺序如图7所示，3D打印砂芯实物如图8所示。

## 6 试验验证

完成砂型及加工冷铁装配后，按照模拟仿真确定

的浇注温度，完成铸件小批量浇注。完成12套砂型进行样件试制后，经过浇冒口切割、T6热处理、表面喷丸处理以及机械加工后，12件出气联通管全部通过水压测试。铸件浇注完成及清理后如图9所示。

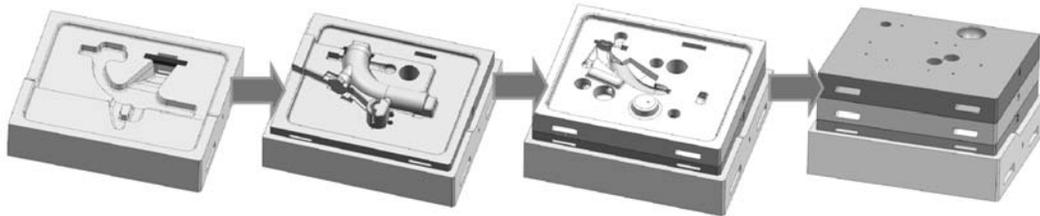
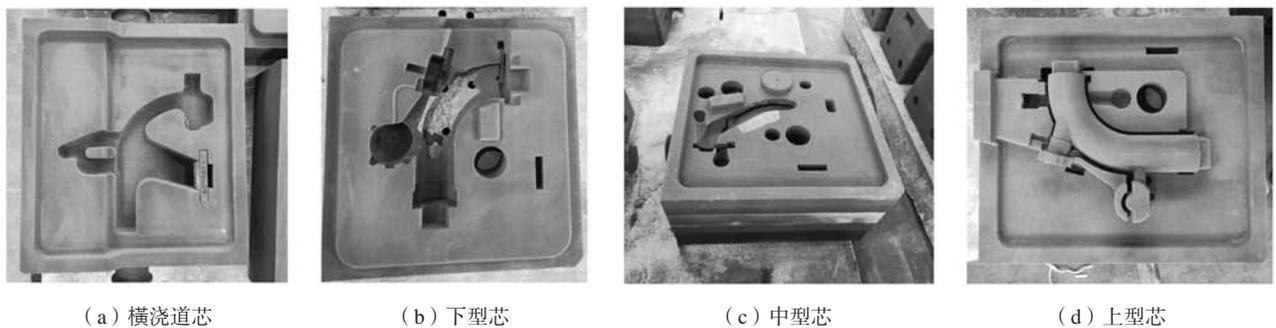


图7 3D打印砂芯设计

Fig. 7 Design of the 3D printed sand core



(a) 横浇道芯

(b) 下型芯

(c) 中型芯

(d) 上型芯

图8 3D打印砂型

Fig. 8 3D printed sand mold

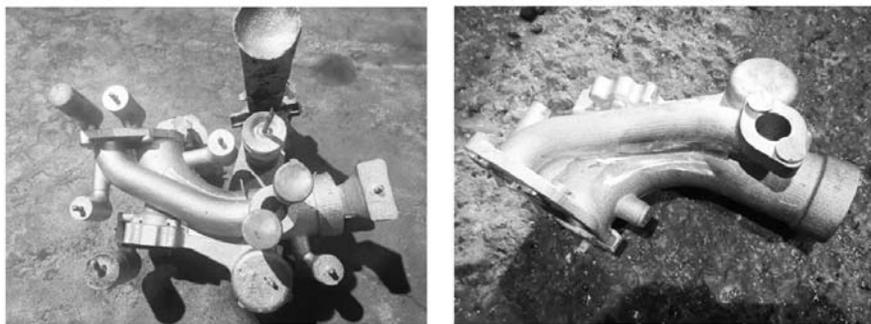


图9 铸件出型及清理

Fig. 9 Knocking out and cleaning of casting

## 7 结束语

(1) 采用Magma数值模拟仿真结合3D砂型打印的方式，对出气联通管铸件进行研制，试验结果表明，该方法可以快速、有效地对铸件进行试制。

(2) 3D砂型打印可以在不进行铸造模具制造的

的条件下进行砂型制备，且型芯分割无需考虑砂芯出型问题。数值模拟仿真结合3D砂型打印的铸件开发方式，极大缩短了铸件生产周期、节约了新产品铸件试制开发的成本。

**参考文献:**

- [1] UPADHYAY C, SIVARUPAN T, MANSORI M. 3D printing for rapid sand casting-a review [J]. J.Manuf.Pro., 2017, 29: 211-220.
- [2] 王大勇, 隋岩斌, 李伟. 基于MAGMA软件的支架铸造工艺优化 [J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(3): 57-60.
- [3] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 2版.北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 柳百成, 黄天佑. 铸造成形手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [5] 约翰·坎贝尔. 铸造原理 [M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2011.

---

## Casting Process Design and Verification of Air Outlet Connecting Pipe Based on Numerical Simulation and 3D Printed Sand Mold

YANG Cheng-long<sup>1,2,3</sup>, LIU Shi-yuan<sup>1,2,3</sup>, XU Hong<sup>1</sup>, MAO Hong-kui<sup>1</sup>, HUANG Xue-feng<sup>2,3</sup>, WANG Guang-wei<sup>2</sup>

(1. North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China; 2. Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd., Datong 037006, Shanxi, China; 3. Shanxi North Casting Co., Ltd, Datong 037006, Shanxi, China)

**Abstract:**

For the air outlet connecting pipe castings produced in small batch trial production, the casting process modeling and numerical simulation analysis were carried out based on Magma software. After the process was determined, the sand mold was quickly made by 3D printing method, and the pouring of the sample was completed. The results showed that the experimental method adopted in this paper can realize the rapid solidification of the casting process and the rapid casting of the casting, and save a lot of costs of mold manufacturing and repair, which is of great significance to the actual production.

**Key words:** Magmasoft; casting process; 3D printing sand; casting defect