

# 基于砂型 3D 打印技术的气缸体快速铸造工艺开发

倪允强<sup>1</sup>, 王 佳<sup>1</sup>, 陈秀明<sup>1</sup>, 臧加伦<sup>1,2</sup>, 刘庆义<sup>1,2</sup>, 孙玉成<sup>1,2</sup>, 李春旭<sup>1</sup>

(1. 潍柴动力股份有限公司工艺研究院, 山东潍坊 261061; 2. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东潍坊 261061)

**摘要:** 运用MAGMA数值模拟软件和采用3D打印砂型芯快速铸造技术, 对某型发动机气缸体工艺设计方案进行仿真分析和优化工艺设计。采用3D打印技术进行砂型、砂芯的快速制造, 大大减少了型芯数量, 提高了铸件尺寸精度, 缩短了开发周期。

**关键词:** 3D打印砂芯; 气缸体; 铸造工艺; 数值模拟

在装备机械等产品设计中, 为提高整机性能, 铸件的集成化、轻量化设计已成为趋势, 并对铸件精度也提出了更高的要求。同时, 复杂的铸件结构也给铸造过程带来了更大的挑战, 尤其是对于一些单件、小批量铸件的制造, 采用传统有模铸造方法, 需要制造多套模具, 存在制造周期长、成本高等问题, 制约了企业新产品开发进程<sup>[1]</sup>。3D打印技术是一种快速成形技术, 它以数字化模型为基础, 运用粉末状金属或非金属等可粘结材料, 通过逐层打印的方式构造产品, 具有制造周期短、灵活性高、稳定性好, 可成形复杂结构产品等优点, 特别适用于单件、小批量复杂铸件的制造、新产品的试制、产品的改进改型及产品铸造工艺方案验证<sup>[2]</sup>。

随着3D打印技术的日益发展, 砂型(芯)3D打印被越来越多地应用于铸造用型芯的制造, 与传统模具制造方法相比, 可将铸造周期缩短50%~80%, 生产复杂形状的铸件时更能体现其优越性<sup>[3]</sup>。本文以公司某型柴油机气缸体为例, 通过运用数值模拟技术、3D打印技术进行铸造工艺开发, 有效缩短了铸件开发周期, 节约了开发成本。

## 作者简介:

倪允强(1987-), 男, 工程师, 研究方向为先进制造技术。E-mail:niyunqiang\_10@126.com

中图分类号: TG241

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)08-0911-05

## 基金项目:

科技部增材制造与激光制造专项(2016YFB1101804); 泰山产业项目: 发动机关键铸件数字化快速制造技术开发及产业化。

## 收稿日期:

2019-01-28 收到初稿,  
2019-02-26 收到修订稿。

## 1 基于砂型3D打印技术的快速铸造工艺开发流程

(1) 铸造工艺设计。通过对产品进行铸造工艺性分析, 通过三维制图软件进行铸件建模, 并根据产品结构特点进行铸造工艺设计, 建立铸造三维工艺模型。

(2) 铸造数值模拟分析。应用Magma、ProCAST等铸造CAE软件对铸件在充型、凝固过程中的流动场和温度场进行模拟分析来预测铸造缺陷, 并利用分析结果来验证铸造工艺的合理性。

(3) 砂型(芯)模型设计。利用三维制图软件进行砂型(芯)分模设计, 是将铸型分割成若干砂型(芯)的过程, 需结合3D打印技术特点、设备加工范围、产品结构等因素进行分模设计。由于3D打印对于型芯结构复杂程度的不敏感性, 砂芯分模一般遵循“少分模少装配”的原则, 但分芯过程需要关注砂芯清砂过程, 避免砂芯遮挡造成砂芯清理不到位或者砂芯过渡清理问题。

(4) 砂型(芯)3D打印。利用上一流程设计完成的型芯三维模型, 使用专用工艺设计软件完成型芯成形工艺设计与切片, 并生成加工程序。将加工程序导入打印设备可直接驱动设备加工, 实现砂型(芯)3D打印。由于3D打印工艺可实现成形幅面内型芯的自由布置, 该过程可同时实现多种型芯的打印。

(5) 铸件试制。铸型全部加工完成后, 经过必要的浸涂涂料、烘干处理, 利用各砂型单元之间的定位结构实现砂型组装验箱, 最后经浇注、落砂清理后得到铸件。

基于砂型3D打印技术的快速铸造工艺开发流程图1所示。

## 2 产品结构简介

气缸体作为柴油机最主要的关键零部件之一, 具有产品集成度高、内部结构复杂、尺寸精度要求高等特点。某型柴油机气缸体属于中小型铸铁件, 铸件尺寸455 mm × 360 mm × 345 mm, 铸件基本壁厚4.5 mm, 材质为HT280。气缸体采用干式缸套, 缸间最小砂芯壁厚3.5 mm, 集成桁架、进水道、水泵等结构复杂, 局部砂芯结构薄弱, 铸件尺寸难以控制, 且在铸造过程中易出现断芯、冷隔等缺陷。气缸体结构如图2所示。

## 3 铸造工艺方案

### 3.1 浇注系统设计

在砂型铸造方面, 浇注系统设计与铸件的质量存在密切联系。通过合理的浇道设计与布置, 可以控制金属液的流速与充型效率, 减少铸件出现缩孔、卷气、缩松等铸造缺陷的可能性<sup>[4]</sup>。根据气缸体结构特征, 为保证铸造过程充型平稳, 设计了底注式浇注系统,  $\Sigma_{直} : \Sigma_{横} : \Sigma_{内} = 1.2 : 1 : 1.5 \sim 1.8$ , 在铸件底部开设横浇道及8道内浇道, 顶部设置出气溢流冒口。气缸体浇注系统模型如图3所示。

### 3.2 铸造数值模拟分析

对于3D打印工艺进行的铸造工艺开发, 铸造工艺仿真分析尤为重要。通过数值模拟分析, 得出流动场、温度场等, 利用分析结果来验证铸造工艺的合理性, 为铸造工艺设计提供改进建议, 最终提高铸件一次成功率。该过程实际是一个“设计工艺→模拟→修改工艺”的反复过程, 直到最终得出最优的工艺方案<sup>[1]</sup>。本文利用Magma铸造模拟软件对气缸体铸件浇铸过程进行模拟分析, 对浇注过程的铁液流动性、温度场等进行了分析评估, 设定浇注温度1 400 ℃。

铸件充型时的状态如图4所示。从图4可以看出, 铁液由下而上顺序充型, 液面速度分布均匀, 无明显涡流现象, 减少了金属液飞溅、冲刷带来的氧化夹杂等缺陷, 有利于提高铸件质量, 总体上浇注系统设计较为合理。

### 3.3 砂芯设计

由于气缸体为干式缸套结构, 集成桁架、水泵

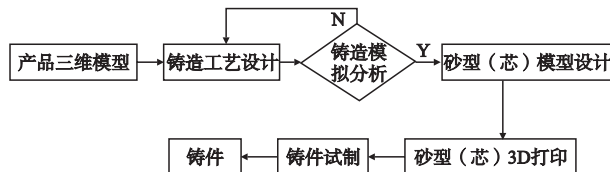


图1 基于砂型3D打印技术的快速铸造工艺开发流程图

Fig. 1 The flow chart of rapid casting technology based on sand core 3D printing technology

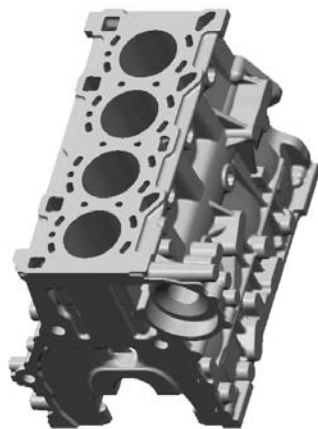


图2 铸件三维模型

Fig. 2 3D model of casting

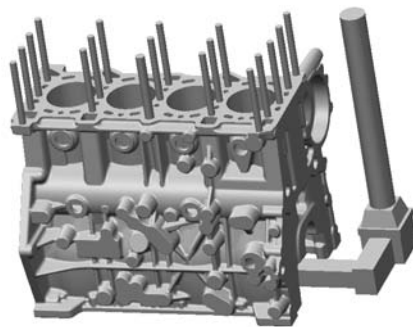


图3 浇注系统模型

Fig. 3 The model of gating system

等, 内腔结构复杂, 考虑到砂芯制芯开模及砂芯组芯等问题, 采用传统工艺开发, 至少需要14个砂型芯才能完成整体造型, 需要制造多套铸造工装, 模具开发成本高。

根据3D打印技术特点, 结合气缸体结构紧凑、尺寸精度要求高等方面的要求, 从以下几个方面考虑分芯设计, 充分发挥3D打印技术在铸造方面的优势。

(1) 砂芯强度。由于水套芯仅通过数个串水孔位置与上盖连接, 局部砂芯壁厚仅为3.5 mm, 砂芯结构薄弱, 易出现断芯问题。利用砂型3D打印技术对于砂芯结构复杂程度不敏感的特点, 通过将气缸体水套芯与其他内腔砂芯集成为一个整体, 提高砂芯整体强

度,有利于防止断芯。

(2) 尺寸精度。通过将气缸体内腔结构整体打印,实现大缸芯、水套芯、桁架芯等砂芯的集成,大大减少了砂芯的拆分,避免了砂芯相互组合带来的尺寸精度误差,对于提高铸件尺寸精度起到很好的保障作用。

(3) 砂芯发气。考虑砂芯发气问题,通过将整体芯组内部掏空、设计随型排气通道,减少铸造过程发气量。

(4) 砂型定位。根据左右砂型与下砂型之间的装

配方式,采用坎合定位结构来保证整体砂型的组装精度<sup>[5]</sup>,并设计砂型把紧位置及现场吊运结构。

(5) 砂芯清砂。3D打印砂芯需要特别注意的就是砂芯的清理,要保证将砂芯的内腔每个角落清理干净,不能有浮砂。在分型分芯设计时,要避免出现清砂死角<sup>[6]</sup>。设计整体芯组时,将内浇道设计为扁平结构,分布在芯组下部,可有效避免砂芯清砂死角,保障清理效果。

气缸体型芯被拆分为4个砂芯:1个整体砂芯,3个外部砂型(下砂型、左右砂型),组合模型如图5所示。

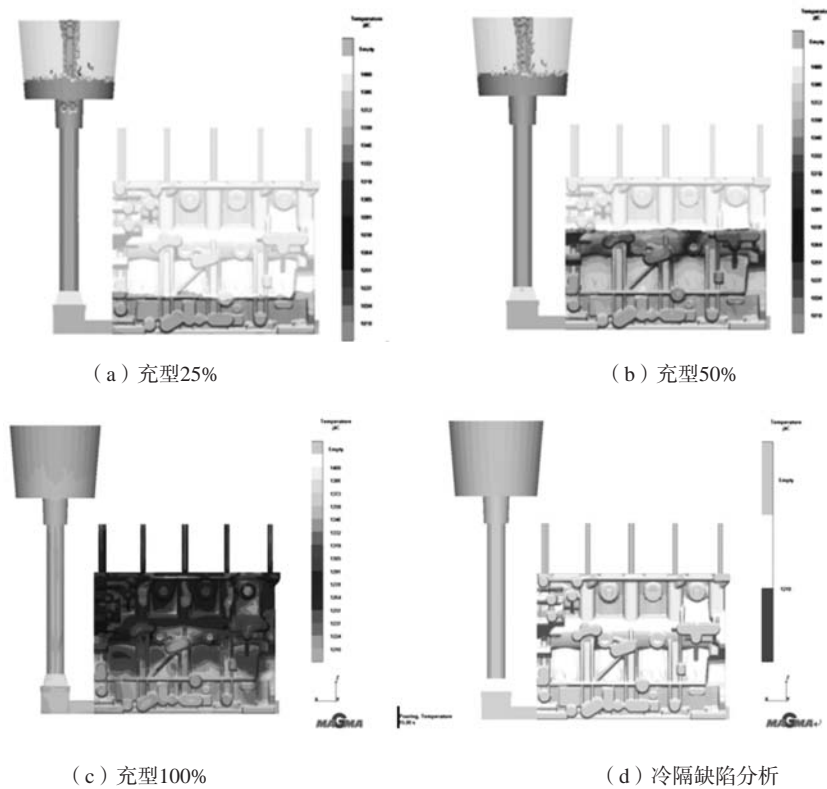


图4 浇注过程模拟结果

Fig. 4 The numerical simulation results of pouring process

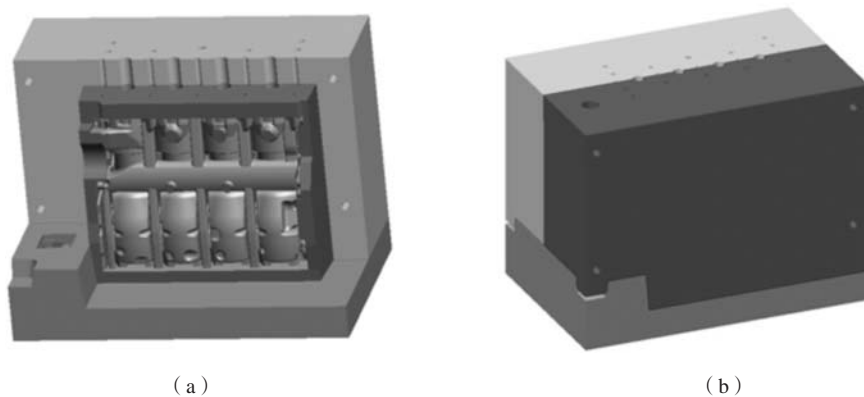


图5 气缸体整体型芯组合三维CAD模型

Fig. 5 The 3D CAD model of sand mold and core assembly

## 4 生产试制

### 4.1 砂型(芯)3D打印

采用德国某公司生产的3D打印设备进行砂型芯打印,原辅材料的选择和使用如表1所示。

气缸体水套局部砂芯壁厚不足3.5 mm,为降低砂芯断芯风险,有必要对砂芯强度进行优化。结合前期大量实验研究,对影响砂型芯强度的树脂加入量、打印层厚、固化剂加入量、铺砂速度等进行选择,最终采用砂芯抗拉强度大于2.0 MPa工艺。

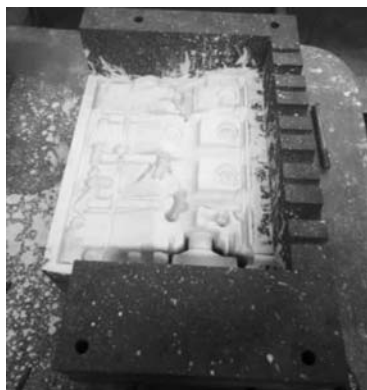
整套型芯打印清理周期仅需2天,砂型成形精度为 $\pm 0.3$  mm,打印出的内腔整体砂芯,如图6所示。

### 4.2 铸件试制

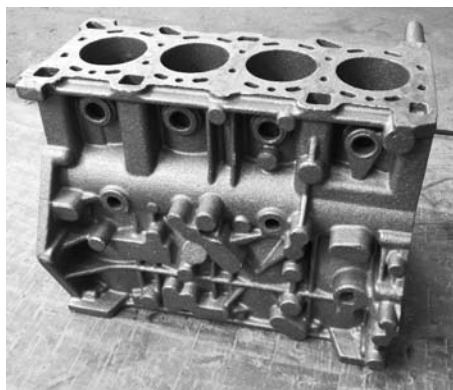
打印好的整体芯,使用波美度42~44的水基涂料进行浸涂,浸涂时注意翻转砂芯,避免局部出现灰瘤影响铸件尺寸。浸涂后使用烘干窑烘干砂芯,烘干温度140℃,保温时间30 min,严禁超时间烘烤,影响3D打印砂芯强度。

打印好的砂型,刷涂醇基涂料,刷涂过程注意避免局部堆灰,刷涂后进行砂型烘干处理。

依次组合下砂型、整体芯、左、右侧砂型,组芯过程利用各砂型单元之间的坎合定位结构保证砂芯定位和精度。经浇注、落砂清理后得到气缸体铸件,如图7所示。经检验,铸件结构完整,无冷隔、气孔等缺陷。采用HandySCAN 3D激光扫描仪扫描铸件获得三维点云数据,运用Geomagic Qualify进行数据处理及对比分析。结果表明,铸件尺寸精度可达DCTG8,满足样件需求,如图8和表2所示。



(a) 砂型



(b) 毛坯

图7 砂型与铸件毛坯

Fig. 7 The sand mold and cylinder block casting

表1 砂型/芯原辅材料

Table 1 Raw materials of sand mold and core

砂种	砂子型号	砂子酸耗值	树脂	固化剂
人造硅砂	100/200	$\leq 3$ g/mL	呋喃树脂	苯磺酸固化剂

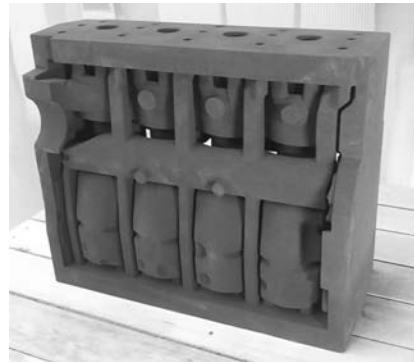


图6 3D打印的整体芯

Fig. 6 The 3D printed one-piece sand core

该气缸体铸件在工艺开发过程中应用数值模拟分析技术,有效提高了铸件一次成功率,通过采用砂型3D打印的铸造方法,铸件整个开发周期只需20天,比采用传统的有模铸造开发周期3~4个月缩短70%以上。

## 5 结论

(1) 通过采用砂型3D打印技术,该气缸体开发周期由传统的3~4个月缩短至20天以内,缩短铸件开发周期70%以上。

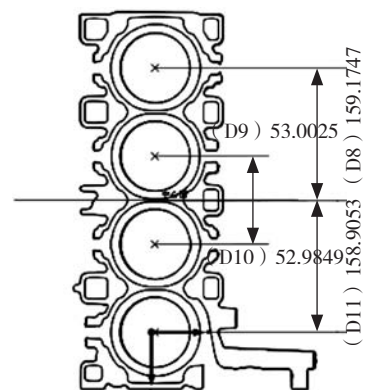


图8 铸件尺寸检测

Fig. 8 Sketch map of dimension examination

表2 铸件尺寸检测  
Table 2 Dimensional accuracy of cylinder block casting

名称	测量值	名义值	偏差	状态	上公差	下公差
D8	159.174 7	159.000 0	0.174 7	通过	0.9	-0.9
D9	53.002 5	53.000 0	0.002 5	通过	0.7	-0.7
D10	52.984 9	53.000 0	-0.015 1	通过	0.7	-0.7
D11	158.905 3	159.000 0	-0.094 7	通过	0.9	-0.9

(2) 通过采用3D打印技术, 将内腔多个砂芯合并为一个砂芯, 减少了铸造砂芯数量, 简化了操作过程, 减少了组芯误差, 有效控制了铸件产品尺寸精度。但过度集成砂芯会造成型芯清理困难, 容易出现型芯清理不到位或者过度清理问题, 造成铸件缺陷。

(3) 运用数字化模拟技术和3D打印技术进行铸造工艺开发, 可以大大减少开发试验成本, 适合在新产品开发过程中推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 赵国强, 刘庆义, 倪允强, 等. 基于CAD/CAE/CAM的大型复杂铸件无模快速制造技术研究及应用 [J]. 机械制造, 2018, 56 (652): 7-13.
- [2] 田乐, 沈其文, 魏青松, 等. 复杂铸造砂型(芯)3D打印关键工艺参数及材料的应用研究 [C] //中国铸造活动周论文集, 中国机械工程学会铸造分会, 2015.
- [3] 周志军, 刘轶, 徐云龙. 提高铸造用3D打印砂芯(型)强度的方法 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (10): 2284-2285.
- [4] 杨铁毅, 郭为忠. 3D打印砂模浇道曲线化设计与性能仿真 [J]. 机械设计, 2018, 35 (9): 1-7.
- [5] 陈少凯, 单忠德, 刘丰, 等. 金属件铸型数控加工制造技术应用研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2010 (2): 1-2.
- [6] 唐松, 夏繁. 气缸体3D打印工艺开发 [J]. 大型铸锻件, 2018 (2): 3-4.

## Development of Rapid Casting Technology for Cylinder Block Based on Sand Core 3D Printing Technology

NI Yun-qiang<sup>1</sup>, WANG Jia<sup>1</sup>, CHEN Xiu-ming<sup>1</sup>, ZANG Jia-lun<sup>1,2</sup>, LIU Qing-yi<sup>1,2</sup>, SUN Yu-cheng<sup>1,2</sup>, LI Chun-xu<sup>1</sup>

(1. Technology Research Institute, Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, Shandong, China)

#### Abstract:

Based on the MAGMA numerical simulation and 3D printing technology, the gating system of cylinder block was analyzed and optimized. The traditional sand mould and cores were replaced by 3D printing cores, and the key sand cores were printed in one-piece sand core. Therefore, the dimensional accuracy was effectively controlled, and the production efficiency was improved.

#### Key words:

3D printing sand core; cylinder block; casting process; numerical simulation