

新型柴油机缸体复杂铸件的快速制造工艺

许海铎^{1,2}, 郭亚辉^{1,2}, 吕乐华^{1,2}, 张杰琼^{1,2}

(1. 第一拖拉机股份有限公司制造工程中心, 河南洛阳 471000; 2. 农机铸件快速成型技术河南省工程实验室, 河南洛阳 471000)

摘要: 介绍了新型柴油机缸体铸件的快速制造工艺。在综合考虑生产成本和生产效率的前提下, 采用立浇方案辅以定轴加工技术和喷墨砂型3D打印技术制备砂型、砂芯, 有效保障了最终铸件的尺寸精度。科学、系统的设计排气通道, 使型腔内的气体顺利排出, 可有效避免因砂型、砂芯瞬间发气量过大而带来的气孔缺陷, 大大提高了缸体类新产品试制的成品率。

关键词: 缸体立浇; 定轴加工; 3D打印

随着我国农业机械化程度不断提升, 农业机械化普及范围越来越广, 我国对于农业机械的自动化水平、功率需求、环保要求都在逐渐提高。现有农业机械所使用的国III排放标准柴油发动机将被逐步淘汰, 国IV排放标准柴油发动机也逐步向国V排放标准升级。因此, 新型国V排放标准的发动机研发迫在眉睫。

柴油机缸体作为柴油发动机的核心部件, 其自身品质决定了整台发动机的寿命和可靠性。作为发动机运行过程中的高温高压承受部件和机械受力部件, 其缸体的抗爆性、本体抗拉性能、水套和油道的壁厚均应得到可靠保障^[1]。

运用快速成形技术中的数字化定轴加工技术和喷墨砂型3D打印技术制备砂型, 可以在缸体铸件试制过程中灵活设计和调整铸造工艺、砂型分型方案、砂型制备工艺等环节的工艺参数, 从根本上保证砂型(砂芯)的装配精度和铸件的尺寸精度。此种运用数字化定轴加工技术和喷墨砂型3D打印技术制备砂型的方法在模具设计阶段无需考虑拔模斜度, 可大大提高砂型制备效率, 缩短造型周期, 降低直接成本, 为新型号柴油发动机的产品研发开辟了一条新路径。

1 铸造方案的确定

1.1 铸造难点分析

选取新型国V柴油发动机四缸缸体为试制对象, 该产品单件毛坯重160 kg, 外部轮廓尺寸536 mm × 526 mm × 439 mm。由于缸体平浇方案应用广泛、造型便捷, 因此以往缸体新产品试制均采用平浇工艺。但是, 由于以下3方面的原因, 此种新产品的试制不宜采用平浇方案。

(1) 该缸体在挺杆室一侧外部端面增加了安装气泵的厚大平面, 该平面结构自缸体外表面向外延伸182 mm, 厚度35 mm, 易在该处形成热节(图1a), 采用平浇工艺该处补缩通道不畅通, 容易形成缩孔缩松缺陷;

(2) 该缸体在挺杆室一侧的对立面新增油道腔, 该结构自下而上由三条油道构成, 且腔体结构呈扁平拱桥状(图1b), 平均厚度为15 mm, 如果采用平浇方案, 该处在充型过程中砂芯难以承受铁液浮力, 易断裂;

(3) 该缸体的水道较以往产品更为狭窄, 结构最窄处只有4.5 mm(图1c), 如果采用平浇方案该处砂芯难以承受铁液浮力, 易断裂。

作者简介:

许海铎(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事快速铸造技术开发与应用方面的研究。电话: 18317558712, E-mail: xhd198863@126.com

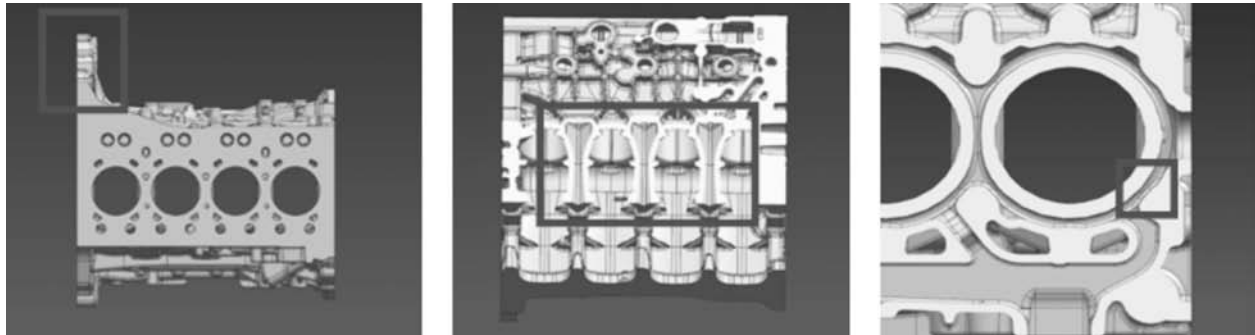
中图分类号: TG242

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2020)12-1356-05

收稿日期:

2020-02-26 收到初稿,
2020-03-23 收到修订稿。



(a) 新增厚大热节不易补缩

(b) 扁平“拱桥形”结构

(c) 水套结构更狭窄

图1 新型缸体的结构难点

Fig. 1 Structure of new cylinder block

1.2 主要设备

本次试制用到的主要设备有数字化五轴铸型精密成型设备、喷墨砂型3D打印设备。考虑到有利于解决铸造难点，同时充分利用高端砂型制造设备的造型优势，决定采用立浇方案，对该产品进行试制。

2 浇注系统设计

为了保证铸件浇注过程中铁液在较短时间内平稳充满型腔，避免在厚大热节部位出现缩孔缩松缺陷^[2]，决定采用底注方案进行浇注，且在热节部位合理设计冒口及出气片，各浇注系统的截面积之比为 $\sum F_{直} : \sum F_{横} : \sum F_{内} = 2.1 : 1.7 : 1$ ，铸造工艺如图2所示。

3 分型和装配设计

3.1 分型方案

与以往的卧浇工艺方案不同，本次立浇试制工艺更适合采用组芯造型的方案。可按照上盖板、侧板、下底板、缸筒芯、油道芯、水套芯、挺杆室芯等7大部分进行设计分型。遵循上述思路，以缸顶平面、缸底平面、缸体两个端平面、缸筒与缸筒的中心面作为分型面进行分型^[3]。最终自缸体底面至缸体顶面将该缸体分型为：上盖板2块、侧板4块、下底板2块、缸筒芯4个、油道芯1个、水套芯1个、挺杆室芯1个。各个砂型、砂芯的装配关系和最终效果分别如图3、图4所示。

3.2 装配精度

本次试制在综合考虑成本和效率的前提下同时采用了数字化定轴加工技术和喷墨砂型3D打印技术。基于设备自身成形特点，这两种成形技术所制备出的砂型的理论尺寸精度分别为 $\pm 0.3 \text{ mm/m}$ 和 $\pm 0.1 \text{ mm/m}$ 。因此，在组型前必须充分考虑不同尺寸砂型的装配关系，经过测量、试验、计算、分析，根据砂型最终成

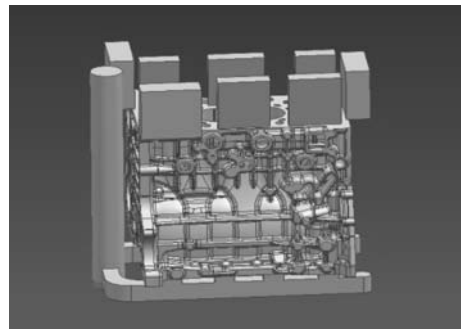


图2 新型缸体的铸造工艺

Fig. 2 Casting process of new cylinder block

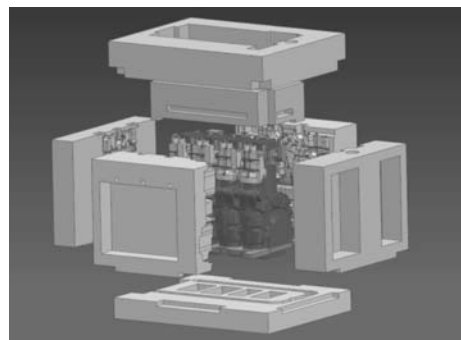


图3 砂型装配关系图

Fig. 3 Process of sand mold/core assembly

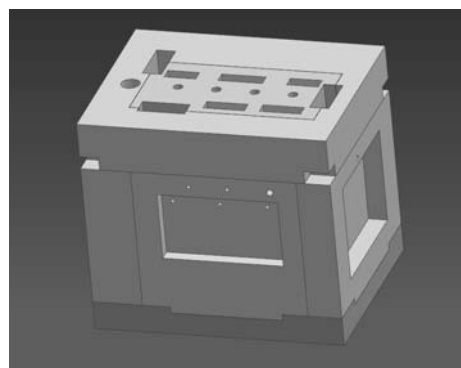


图4 砂型装配效果图

Fig. 4 Effect drawing of sand mold /core assembly

形精度的实际情况，加工按照表1所示参数对该套铸型进行装配精度设计。

4 砂型型腔和砂芯内部气路设计

确保砂型、砂芯气路通畅，是缸体成功浇注的关键因素之一。因此，必须将分型完成后的砂型、砂芯进行科学、系统的排气通道设计。排气通道的设计遵循以下原则：①型腔的排气通道横截面积之和大于等于铸件顶部最大截面积的1/5；②为保证排气的畅通有效，单个排气通道的横截面积不宜小于100 mm²；③排气通道尽可能采用直线型通道，避免出现弯曲；④排气通道都应独立通向型腔之外直连大气，避免出现搭接和分支。按照原则分别对型腔、缸筒芯、油道芯、水套芯和挺杆室芯的排气通道进行设计，效果分别如图5所示。

5 砂型、砂芯的制备

5.1 砂型、砂芯的质量要求

缸体内部的复杂曲面较多，这些复杂曲面往往包含细小的结构特征，砂芯强度要求更高。因此，本次制备的砂型、砂芯的抗拉强度必须达到1.5 MPa以上。

采用酚醛树脂砂工艺制备砂块，树脂CPI-1600和CPII-2600加入量各为1.5%，固化剂加入量为树脂加入量的1%。在此工艺下，砂芯强度1.7~2.0 MPa，发气量11 mL/g。

5.2 砂型、砂芯的定轴加工成形和3D打印成形

初次试制采用“Z轴粗开+Z轴精加工”的减材无模成形方法。采用此种方法制备了缸体的上盖板、侧板、下底板、缸筒芯、油道芯等砂型和砂芯。其中，上盖板、侧板、下底板成形效果优良，而复杂曲面结构较多的缸筒芯、油道芯成形效果欠佳。由于结构限

表1 砂型装配精度参数设计

Table 1 Assembly accuracy parameter design of sand mold/core

装配面	砂型尺寸/mm	装配间隙设计/mm
外模/外模	0~500	0.7
	501~800	1.3
外模/芯头	0~150	0.3
	151~500	0.6
芯头/芯头	0~50	0.1
	51~200	0.3

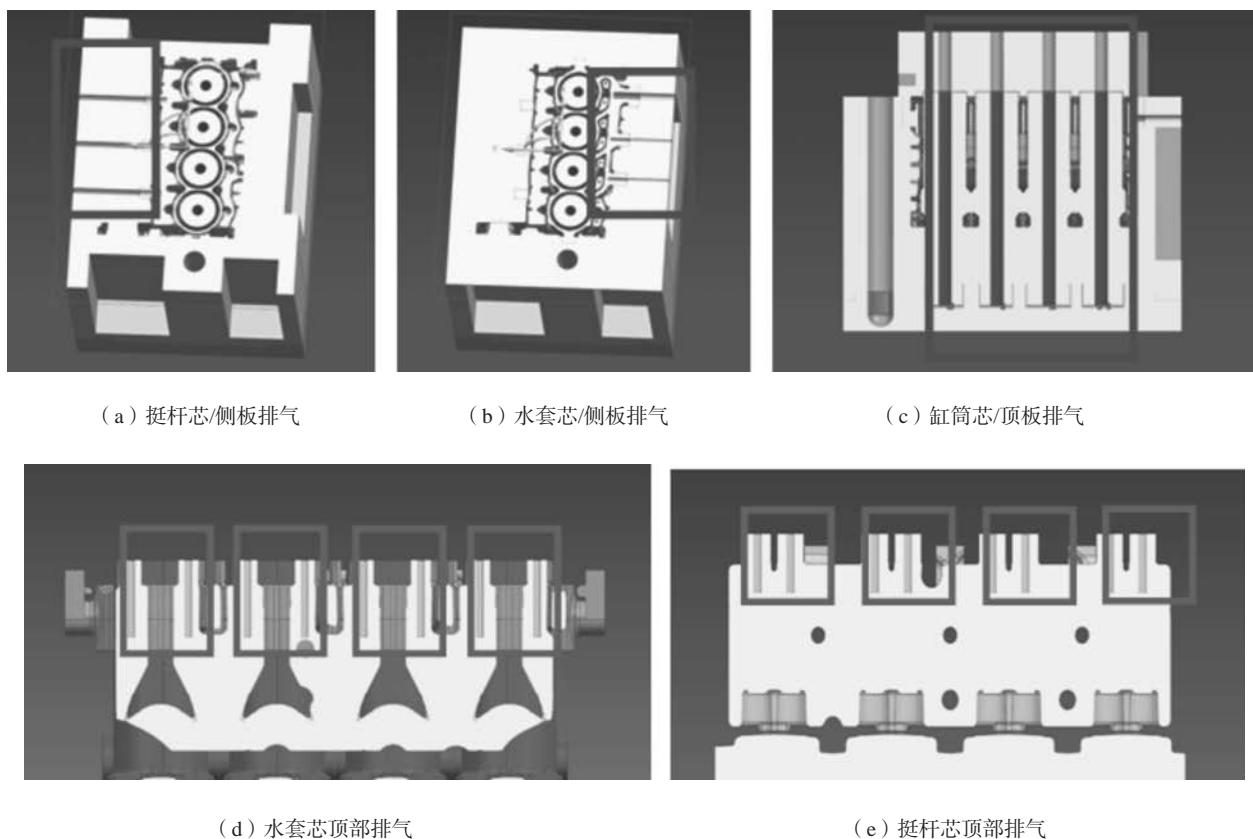


图5 型腔、砂芯排气通道设计

Fig. 5 Exhaust passage design of mold cavity and sand core

制,缸筒芯和油道芯均需要进行双面加工^[4],但是加工第二面时的人工定位会影响加工精度和结构对称度,多次反复验证修改切削参数均未取得更好效果,只要人为定位过程存在,此项误差无法避免,结构精度误差通常大于等于 ± 0.7 mm/m,这对于油道芯和缸筒芯来说不可接受。因此,考虑在数字化五轴铸型精密成形设备上采用正反面加工精度更高的“定轴粗开+定轴精加工”的方案解决上述难点,具体解决方案如下。

(1) 刀具选择。由于砂型、砂芯的结构复杂,无模成形过程对加工刀具的要求更高,主要表现在尺寸细小的结构要求更细的刀具,考虑到细小刀具损耗和生产成本,决定粗开采用 $\Phi 16$ 普通合金刀具,“剩余铣”直接采用 $\Phi 4$ PCD刀具。

(2) 加工方案选择。以缸筒芯为例,确定采用“定轴粗开+定轴精加工”的方案,采取定轴转换的思维,将原有Z轴加工方向定轴转换为Y轴加工方向,以Y轴为刀具进给方向。初始加工定位点确定后开始加工

砂芯第一面(图6a),第一面加工完毕后以机械移动的方法来找到和确定砂型第二面的加工定位点,而后开始第二面的加工(图6b)。整个工艺过程仅初始加工定位点需要人为选择,其余过程完全避免人工行为的参与,可有效保证所加工砂芯达到 ± 0.3 mm/m的尺寸精度。

(3) 砂型、砂芯辅助支撑的设计。以油道芯为例,确定采用“定轴粗开+定轴精加工”的方案,还必须在砂芯外部设计辅助支撑和便于加工定位的边框。此种边框一般为长方形,既便于定位又便于存放。

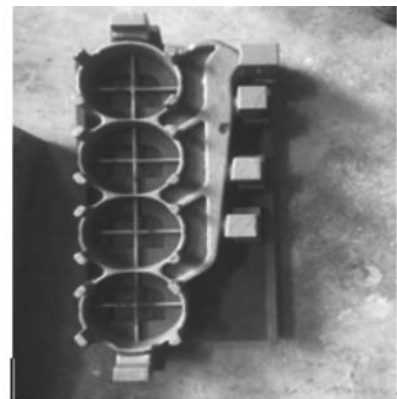
(4) 3D打印水套芯。水套芯结构复杂,如果采取减材方法,则需要定位6次加工6个面,且需要进行大约15次左右的刀具更换,加工成本较高,过程极为繁琐。同时,水套芯自身结构单薄,需要在套筒中加入提高强度的辅助支撑,这就更加增大了减材制备水套芯的难度。因此,决定采用喷墨砂型3D打印的方法制备此水套芯,产品如图6c所示。



(a) 缸筒芯第一面加工



(b) 缸筒芯第二面加工



(c) 3D打印水套芯

图6 制备砂型、砂芯

Fig. 6 Preparation of sand mold and sand core

(5) 对定轴加工成形和3D打印成形后的砂型(芯)的关键部位进行尺寸测量,铸型尺寸精度高,测量结果如表2所示。

6 涂刷涂料、组型、浇注

按照既定工艺设计方案对缸体的砂型、砂芯进行涂刷涂料、组型合箱、围箱等工序,完成后等待浇注。浇注完成后经铸件清理、喷丸等工序获得表面质量良好的柴油机四缸缸体铸件(图7)。经检测铸件尺寸合格,无铸造缺陷,性能满足客户要求。

表2 砂型、砂芯尺寸测量结果
Table 2 Size measurement results of sand mold and sand core

测量砂型(芯)部位	理论值/mm	实测值/mm	偏差/%
上盖板长度	581.0	580.7	-0.052
上盖板宽度	298.0	297.8	-0.067
缸筒芯直径	99.0	99.1	0.10
水套芯最薄处壁厚	4.5	4.5	0
油道芯“拱桥状”结构厚度	15.0	15.1	0.67
挺杆芯高度	167.0	166.8	-0.12



图7 柴油机缸体铸件

Fig. 7 Diesel engine cylinder block casting

7 结束语

在新产品试制阶段，对于结构特殊，尤其是增加了不利于平浇的结构特征的新型缸体，采用立浇工艺方案可提高产品试制的首次成功率。在综合考虑生产成本和效率的前提下，运用数字化定轴加工技术和喷墨砂型3D打印技术制备砂型、砂芯，可有效保障最终铸件的尺寸精度。科学、系统的设计排气通道，使型腔内的气体顺利排出，可有效避免因砂型、砂芯瞬间发气量过大而带来的气孔缺陷，提高成品率。

参考文献：

- [1] 陈军, 王运明, 邢继伦. HT300高强度K15缸体材料的试制 [J]. 中国铸造装备与技术, 2013 (4): 24-27.
- [2] 史玉升, 刘杰, 杨劲松, 等. 小批量大型复杂金属件的快速铸造技术 [J]. 铸造, 2005, 54 (8): 754-757.
- [3] 吴爵盛, 金枫, 张全艺, 等. 一种镶缸套铝合金缸体铸件的快速制造方法 [J]. 铸造, 2015, 64 (9): 842-845.
- [4] 刘丽敏, 单忠德, 兰盾, 等. 基于无模铸造精密成型技术的砂型切削性能研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (12): 1167-1171.

Rapid Manufacturing Process of New Diesel Engine Cylinder Block Casting

XU Hai-duo^{1,2}, GUO Ya-hui^{1,2}, LYU Le-hua^{1,2}, ZHANG Jie-qiong^{1,2}

(1. First Tractor Company Limited Engineering Center of Manufacture Technology, Luoyang 471000, Henan, China; 2. Rapid Prototyping Technology of Agricultural Machinery Castings Engineering Laboratory of Henan Province, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract:

The paper presents the rapid manufacturing process of new diesel engine cylinder block casting. Under the premise of comprehensive considering the production cost and efficiency, the vertical pouring process was designed, and the technologies of fixed axis machining and inkjet 3D printing sand mold and core were used to improve the size accuracy of casting. The design of the venting channels of the mold cavity and the sand core can not only avoid the casting defects, but also ensure the finished product rate of new diesel engine cylinder block in the process of new diesel engine cylinder block trial-production.

Key words:

cylinder vertical casting; fixed axis machining; 3D printing