

某型船舶柴油机复杂铸件设计与制造

张延亭, 韩小科, 张学艳, 李耀宗, 于寰宇

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 某型高功率密度柴油机采用无管化、免维护设计的零件集成了大量水腔与油腔, 其结构复杂, 零件铸造难度高。为优化铸造工艺, 在零件生产阶段采用 3D 打印砂芯的方式, 结合铸造仿真技术和熔炼控制技术, 快速进行多轮铸造工艺优化验证, 有效降低了铸造难度并提高了铸造精度。该方法在柴油机研制阶段缩短了复杂零件的制造周期和开发成本。

关键词: 船舶柴油机; 铸件; 3D 打印

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)06-0055-04

Design and Manufacture of a Complex Casting Component for a Marine Diesel Engine

Zhang Yanting, Han Xiaoke, Zhang Xueyan, Li Yaozong, Yu Huanyu

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The component of a high power density diesel engine was designed with no pipe and maintenance-free, and inside it integrated lots of water and oil cavities, thus had a complex structure and hard to cast. To optimize the casting technology, the technology combining 3D printing sand cores with casting simulation and smelting control were employed in the production of the component. Several rounds of verification about the casting optimization scheme were carried out in very short time, which made the casting easier than before and boasts high precision. This technology can cut the manufacturing cycle and development cost of complex components in the stage of engine design.

Key words: marine diesel engine; casting component; 3D printing

0 引言

随着市场对高功率密度、高可靠性船舶柴油机需求的不断提高, 在新型柴油机设计开发中, 整机的紧凑性要求越来越高, 同时又要求产品安全可靠、检修方便^[1]。

以往, 受限于仿真和制造技术的落后, 高集成度的大型铸件往往开发投入大、生产周期长、调试过程复杂、废品率高甚至无法制造。综合考虑产品研制的周期、成本及可制造性, 产品实际设计一般会采用多个独立、结构简单的小零部件组合, 以分散、降低零件的制造难度。如在柴油机设计中会采

用大量独立的弯折、焊接管路或小铸件把各辅助泵、换热器、滤器等附件连接在一起。这种设计会导致零部件数量多, 相互间的接口多, 润滑油、冷却水等流体泄漏风险大, 维护需求及维护难度大。零件多还会导致整机布置松散、紧凑性差, 功率密度低。

某型船舶柴油机为满足高功率密度、高紧凑性、高可靠性要求, 采用了无管化、免维护设计方案, 导致零件结构复杂、铸造难度大。本文介绍该机复杂铸件的设计、制造过程。针对其铸造难度大的风险, 应用 3D 打印砂芯的铸造技术, 快速进行多轮铸造工艺优化验证, 成功缩短了该零件在研制

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-09-01

作者简介: 张延亭(1981—), 高级工程师, 主要研究方向为大功率柴油机结构设计, 37263750@qq.com。

阶段的制造周期。

1 无管化零件设计

为满足市场需求,在设计之初就对该型船舶柴油机的整机总体尺寸提出高要求。总体布置须在柴油机自由端有限的空间内完成海淡水泵、滑油泵、燃油泵、滤器、换热器、气动球阀等多种类配套件的布置。若采用常规的独立管路连接各配套件的布置方式,势必无法满足空间布置的紧凑性要求。经过多轮布置方案的优化,最终形成了一个集成度高的无管化设计方案:一个箱体型式的铸件作为结构布置的核心零件,零件本身集成了各种润滑油、冷却水流道,同时又作为各种配套件的安装支座。该铸件大体分为上下两层,局部位置会出现三层腔结构,集成了 9 个独立流道,共计 22 个接口,如图 1 所示。

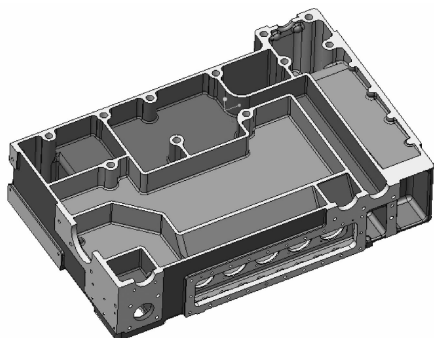


图 1 铸件型腔示意图

对所有流道采用 CFD 软件 STAR-CCM 进行流场仿真评估,完成流速分布、压力损失等评价指标的计算与分析,见图 2,评估结果满足系统要求。

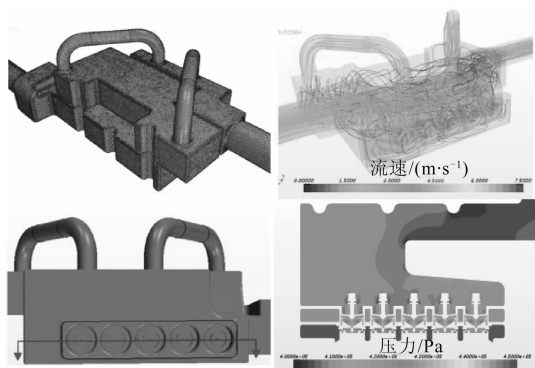


图 2 铸件流腔流速分布及压力损失计算

2 铸造工艺设计

该方案满足系统设计要求,但由于零件结构复杂,制造难度大,如采用传统的铸造工艺,至少须要制作 2 个外模和 12 个砂芯,相应的,模具数量

多、制造费用高、周期长;并且由于零件处于研制阶段,须要在试制过程中进行多轮改进优化,每轮铸造优化都须经历修改模具、制作砂芯、浇铸铁水、冷却、开箱、清理型砂、检测铸件质量等工序,响应速度慢,无法满足项目进度需求。

为尽快完成产品研制并投放市场,经评估后决定采用 3D 打印砂芯铸造该零件。

2.1 结构和铸造工艺协同设计优化

在零件铸造工艺制定阶段,结构设计团队与铸造工艺团队协同开展优化工作,从零件结构、铸造工艺两方面提高零件的铸造工艺性。三维建模软件、结构强度仿真软件、铸造过程仿真软件为上述工作提供了有力的技术支撑。

为提高部分砂芯的强度,增大相应流腔的截面尺寸;根据 3D 打印砂芯的设计方案,结合分型和砂芯装配要求,添加数个必要的芯头支撑;采用细长形状砂芯增大宽度;对砂芯转折处及处于箱体中间的厚大砂芯增加工艺门孔,以提高砂芯的稳定性;通过把相近的安装搭子合并,减小该处铸造尺寸,降低发生缩松等铸造缺陷的几率。优化后的铸件型腔见图 3。

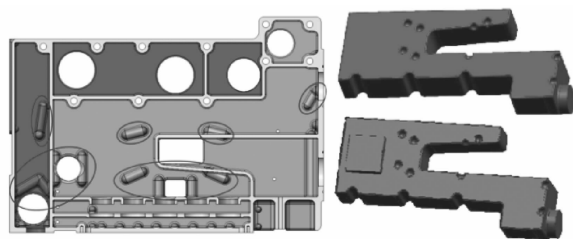


图 3 铸件型腔优化示意图

通过多轮铸造仿真计算评估,并相应地调整冷铁尺寸、冒口位置和数量,避免了大部分模拟中出现的铸造缺陷。同时,在熔炼过程中提高材质的碳当量,将碳当量控制在 ± 0.05 偏上限;降低浇注温度,将温度控制在 $(1\,380 \pm 10)^\circ\text{C}$,以进一步降低缺陷生成的几率。

2.2 铸造浇注系统优化

为制定最佳的铸造浇注方案,采用铸造过程仿真软件对浇注过程进行仿真,根据铁水的走向及温度,分析可能出现缩松的区域(图 4、图 5)并模拟布置冷铁和冒口。经对多个浇注系统设计方案的仿真计算(图 6、图 7)及优化,并横向对比铁水温度场、充型时间等多种因素,最终选择了底侧面厚大位置进流、快速充型的开放式浇注系统。仿真分析表明:该系统可能发生缩松的区域最少、铁水冷凝效果最好、铁水流动过程中对砂芯的冲击较小。

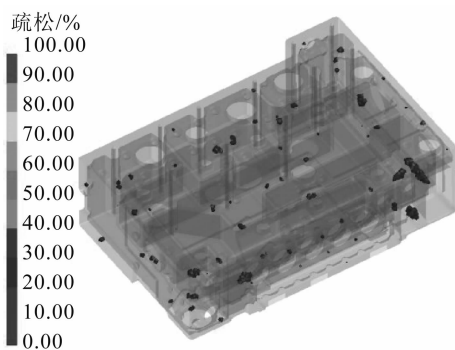


图4 铸件中具有疏松倾向部位示意图

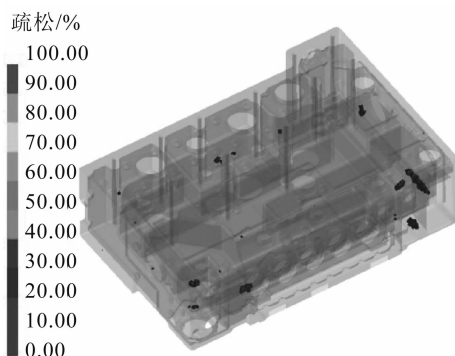


图5 铸件中具有缩孔倾向部位示意图

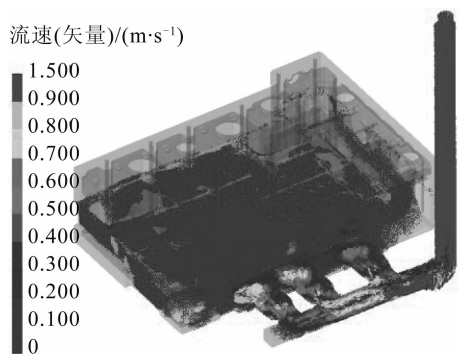


图6 浇注过程仿真示意图(矢量方向)

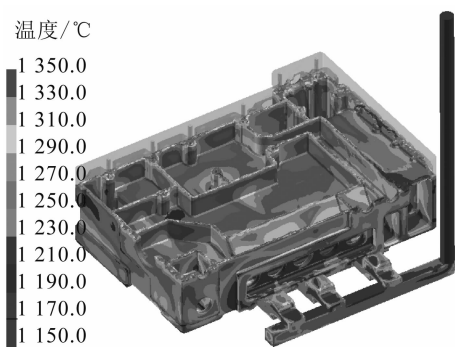


图7 浇注过程仿真示意图(温度场)

2.3 3D 打印砂芯的设计

3D 打印技术是现代制造领域中正在快速发展的一项技术,其主要原理是以一个三维数学模型文

件为基础,采用粉末状材料,通过层层叠加打印的方式获得物体原型^[2]。

相对传统的模具制作砂芯的工艺,3D 打印砂芯技术在产品研制阶段、小批量生产阶段具有较大优势:不须要制做模具,节省了模具制造时间和成本;变更响应速度快,适应研制阶段经常性的零件设计改进或铸造工艺变更;大幅提高铸件的尺寸精度,减小零件重量偏差^[3]。

该零件3D 打印砂芯的基本流程如下:将树脂砂均匀地铺设在工作仓中,在制定区域将液态粘合剂用喷头按指定路径喷涂在砂层上,待粘合剂固化后,去除多余的树脂砂材料,就获得了所需要的砂芯,见图8、图9。

采用3D 打印技术制作砂芯,砂芯本身可以完全按照铸件的复杂结构进行设计,取消了芯撑,可将多个砂芯整合成一个较大的砂箱,提高了砂芯的尺寸稳定性。为保证转运过程中砂芯不损坏,在砂芯的连接薄弱部位增加几条加强筋,在合箱之前去除。

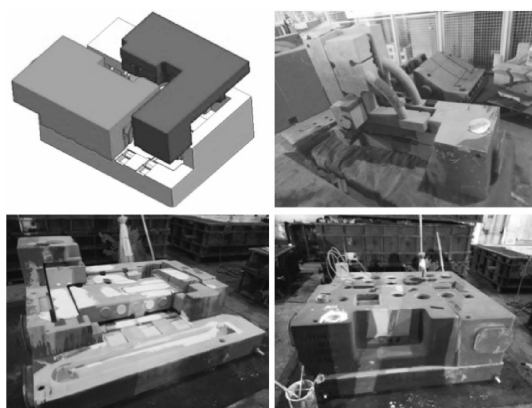


图8 砂芯方案与实物图

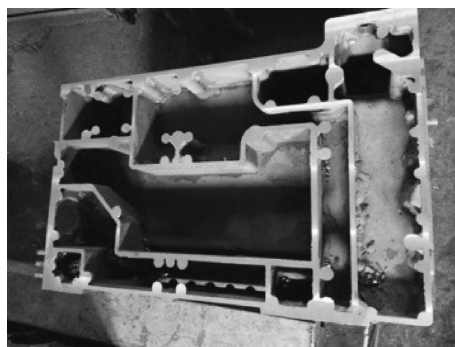


图9 实物内腔解剖图

3 零件试制

由于该零件结构复杂,在试制过程中先后出现了皮透、内冷铁残留等铸造缺陷。针对这些问题对

铸造工艺进行优化改进,经多轮制造工艺优化,最终制造出符合设计要求的铸件。以下介绍对皮透及内冷铁残留的优化过程。

零件 L 型腔体出现了皮透,见图 10。经对故障件拆检,并结合铸造仿真分析确认皮透原因:铸件腔体结构复杂,腔室与腔室之间的固定支撑不足,在铁水浇灌过程中出现小范围的飘芯,导致砂芯脱落,形成皮透。改进措施是在砂芯内增加一根芯铁作为支撑。后续试制验证过程中该部位未再出现皮透现象。

铸件某处在机加工试制后检查发现:部分螺栓长孔内部出现疑似裂纹现象。经对故障件进行解剖确认:该裂纹为工艺工装的内冷铁残留导致,见图 11。由于该螺栓孔较长,孔径偏小,导致冷铁刚度不足,在铁水浇灌后发生弯曲。为了解决该问题,加大了内冷铁及螺栓搭子的直径。该现象在后续试制中有显著改善。

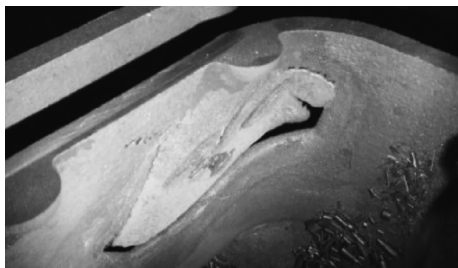


图 10 铸件内壁面皮透缺陷



图 11 内冷铁残留缺陷

4 结论

零件从工艺设计到首件成品加工完成,仅历时 6 个月,3D 打印砂芯的铸造方式在其中发挥了极大的作用,相对传统模具制作方式其具有以下优势:

(1) 节省了工艺优化产生的模具制造时间和模具费用。

(2) 适合零件在研制阶段的设计及工艺的频繁修改。在 3D 打印砂芯之前,零件结构和工艺经多次改进,但对打印成本及完成时间未产生影响。

(3) 节省了装配时间。按传统铸造方式制作砂芯,共需 2 个外模和 12 个砂芯,装配时间约需 12 h;采用 3D 打印砂芯方式,只需 4 个砂芯,结合埋砂浇注,砂芯装配时间约为 3 h。

(4) 提高了铸造精度。按传统铸造方式制作砂芯,铸件毛坯尺寸精度为 GBT 6414 的 CT12 级,按以往经验,毛坯重量偏差约 3%。按 3D 打印砂芯方式,铸件毛坯尺寸精度可达到 GBT 6414 的 CT9 级。毛坯内腔各腔道壁厚均匀。该零件实际重量与设计重量偏差不到 1%。

综上所述,3D 打印技术在产品研制阶段、小批量生产和个性化复杂产品的生产中具有明显的经济和效率优势,为高指标要求的船用柴油机设计提供了一种新手段,使柴油机产品研制在更低成本和更短周期方面实现了新的突破。

参考文献

- [1] 田海涛. 我国船用柴油机发展趋势探析 [J]. 柴油机设计与制造, 2019, 25 (1): 4-7.
- [2] 董云菊, 李忠民. 3D 打印及增材制造技术在铸造成形中的应用及展望 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 2901-2904.