• 工艺技术 Technology •
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.12.004

3D 打印砂芯技术在铸件开发中的应用

卢宝胜,程东霞
(一汽铸造有限公司,吉林 长春 220100)

摘　要:介绍了 3D 打印技术的发展历史及现状,分析了技术特点及应用范围。结合汽车零部件的开发,介绍了 3D 打印砂芯技术在气缸盖铸件开发中的应用,比较了 3D 砂芯打印技术和传统工艺的应用特点。结果表明,通过采用 3D 打印砂芯方式进行了复杂铸件的快速开发,在成本和时间上都较传统方式有了很大的优势。

关键词:3D 打印;铸件;开发

中图分类号: TG242　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)12-1026-05

Application of 3D Sand Core Printing Technology in Casting Development

LU Baosheng, CHENG Dongxia
(FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 220100, China)

Abstract: The development history and present situation of 3D printing technology was introduced, and the technical characteristics and application range was analyzed. Combined with the development of automobile parts, the application of 3D printing technology of sand core in the development of cylinder head casting was introduced, and the application characteristics of 3D printing technology of sand core and traditional technology were compared. The results show that the rapid development of complex castings by 3D printing sand core has a great advantage over the traditional method in both cost and time.

Key words: 3D printing; casting; development

3D 打印(3DP)作为一种快速成型技术,是以数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可粘合材料,通过逐层打印的方式来构造物体的技术。其常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型,后逐渐用于一些产品的直接制造,已经有使用这种技术打印而成的零部件[1]。3D 打印技术在珠宝、鞋类、工业设计、建筑、工程和施工、汽车、航空航天、牙科和医疗产业、教育、地理信息系统、土木工程、枪支以及其他领域都有所应用。

3D 打印已被世界公认为推动第 4 次工业革命的关键技术之一,在常规工艺生产的产品复杂性、成本、可行性达到极限的情况下,3D 打印几乎可无限地发挥它的潜力。本文作者对 3D 打印技术的发展和技术特点进行了分析,其与传统铸造技术相结合可实现铸件的快速开发。

1　3D 打印的技术发展

3D 打印技术最早出现于 20 世纪 90 年代中期,其实质是利用光固化和纸层叠等技术的最新快速成型装置。1999 年第一代原型机在德国被制造出来,并获得了专利。随着技术的不断进步,越来越多的科研机构加入到 3D 打印技术开发中来。3D 打印技术发展日新月异,在众多领域开发出许多工业应用的设备和工艺[2]。

3D 打印技术具有如下特点:

(1)速度快　可以实现无模生产,交货期从几周缩短到几天。

(2)适用于单件、小批量生产　成本、效益是决定 3D 打印技术竞争力的关键。受打印速度和材料成本的制约,3D 打印目前适用于单件、小批量生产。图 1 为 3D 打印的产量与成本关系图。将来随着技

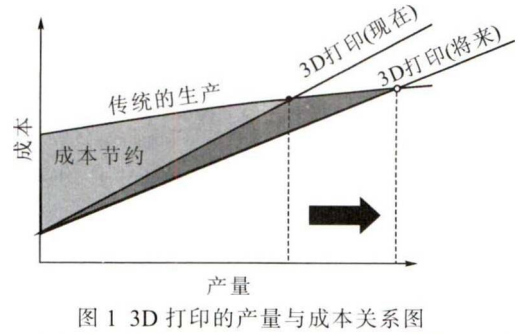


图 1 3D 打印的产量与成本关系图
Fig.1 Relationship between output and cost of 3D printing

收稿日期:2021-10-13
作者简介:卢宝胜(1972—),吉林长春人,硕士,研究员级高工.主要从事铸造工艺、技术及产品研发方面的工作.电话:15844085686,Email:lubs_fc@faw.com.cn

术的进步，其经济批量必将进一步拓展，进而实现大量生产。

(3)打印出的产品高度准确，细节突出　对于产品结构的复杂性不敏感，复杂结构成本并不增加。

可以预计，随着研发的进展，可应用材料广泛，在工业和商业应用前景广阔[3]。

1.1　砂型 3D 打印技术

喷墨砂型 3DP 打印机技术是喷墨粉体粘接 3D 打印技术的一种，它采用喷墨式砂型打印机，将三维数据转化为二维截面，利用喷墨打印头打印出黏接剂将砂粒黏接在一起，层层叠加，直接生产砂型/芯。较传统工艺，一是省略了制模环节，缩短了产品生产周期；二是可以直接制作任意复杂形状的砂型砂芯，不受模具加工工艺限制；三是保证了砂型精度。结合合理的浇注系统设计，可以大幅提高铸件成品率，降低生产成本[4]。

3D 砂型打印技术发展迅速，其技术日趋成熟。其常用的打印材料主要有砂(如硅砂、人造砂、铬铁矿砂)和塑料(如甲基丙烯酸甲酯)。图 2 为 3D 打印的零件和砂型实例。表 1 为 3D 砂型所用主要黏接剂的特点。

1.2　3D 打印设备

国外在 3D 打印技术方面起步早，技术相对成熟。代表厂家有德国维捷(Voxejets)和 Xone，国内厂家有宁夏共享公司、广东峰华卓立公司等。

维捷中国位于中国江苏省苏州汾湖高新产业区，是工业级 3D 打印设备与服务的完整解决方案提供商。除了为客户提供 3D 打印设备和耗材之外，还为客户提供复杂模具和模型定制。打印过程完全自动化，无需工装模具即可生产复杂结构的组件和产品原型。由于其连续打印工艺和极高的打印速度，它可以为工业领域提供灵活高速的产品生产。

表1 3D打印砂型用黏结剂
Tab.1 Binder for 3D printing sand mold

黏结剂	特点
呋喃黏结剂	高温时强度降低；打印后强度好
	黏接剂归为有毒类材料；砂回收困难
	材料成本低，材料选择范围宽，可用于大部分金属
	自硬化，无需后处理，脱芯方便
	金属针孔
酚醛黏结剂	工艺过程需要加热
	普通砂，无需处理
	打印后强度 0.240 MPa 处理后强度可达 0.5 MPa
	黏接剂含量低
	排气少，变形小，砂子可回用
	可打印空腔壳型
无机黏结剂	脱芯相对困难
	水玻璃黏接剂，黏接剂吸收潮气
	无危害材料，排气少，铸造过程无排放
	轻合金浇铸结果好
	未打印砂完全回收再用
	对高温金属敏感；复杂的后处理

维捷的一款特色 3D 打印机是 VX4000，堪称 3D 打印机中的巨无霸，成型体积大，可以持续的不间断工作，可以批量打印，具备“强大的工业级体能和极高的科技性”。

同时，厂家不断地根据市场的需要进行研发。下一步，我们将看到打印解决方案将扩展到更多材料领域。随着技术进步，3D 打印的生产效率也在不断

(a)钢质艺术品　(b)硅砂型　(c)铝合金艺术品　(d)铝合金机箱

图 2 3D 打印的零件和砂型
Fig.2 3D printed parts and sand molds

地提高，如图 3。设备的自动化水平和可靠性日趋完善。

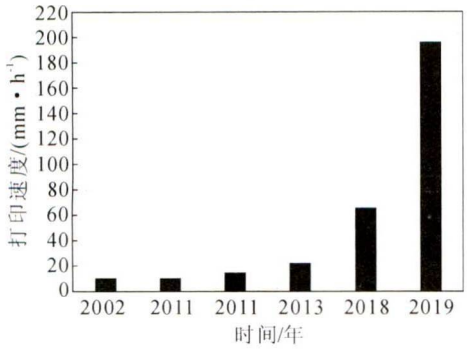


图 3 3D 打印速度的增长趋势
Fig.3 Growth trend of 3D printing speed

2 3D 打印在汽车铸件开发中的应用

针对汽车复杂铸件的设计开发及生产中存在的传统工艺限制结构自由度、产品开发周期长、模具成本高、砂芯数量多、定位累积误差导致的组芯精度低等问题。3D 打印技术的出现，为汽车铸件开发提供了一种新的思路。其特点如下：

(1)产品结构设计更自由。产品结构可自由设计，无需考虑原模具制造工艺性的限制，充分发挥优异结构为产品性能带来的提升。

(2)集成、简化砂芯设计。无需考虑拔模分型，减少砂芯数量，简化设计过程。

(3)可实现复杂多层结构的砂芯制造。依据产品结构需求，可设计多层复杂结构内腔，3D 打印可实现集成制造，减少后续组装，保证位置精度。

(4)砂芯的数字化开发制造。无需模具设计、制造及制芯机制芯，最短几小时便能将砂芯设计图纸变为砂芯实物。

采用 3D 打印，可以优化产品开发流程，加快开发速度和质量，见图 4。

一汽铸造公司产品技术部通过合作和引进的方式，开展 3D 打印材料、工艺优化研究，确定砂芯强度、发气量等性能指标，满足汽车铸铁、铸铝产品生产需求。开展针对 3D 打印砂型技术的铸造工艺、分型工艺研究，全面提升产品开发 QCD 水平，最大限度发挥 3D 打印砂型技术优势。

利用 3D 打印砂型铸造技术完成红旗 V12 发动机缸体、缸盖、红旗 160KW、M190 电机壳样件开发；完成红旗 V8TD 缸体、缸盖工艺开发，提交首批样件，并将在 V8T 缸体批量生产中进行应用。表 2 为乘用车发动机缸体样件开发对比的各项对比。小批量开发的情况下，采用 3D 打印砂芯工艺具有很大的优势。

3 应用 3D 打印砂芯进行气缸盖铸件的开发

气缸体、气缸盖类的铸造产品，由于产品结构复杂，砂芯数量多，需要的工装相应也多，导致铸件的产品开发投入大，周期长。铸件的调试过程复杂，开

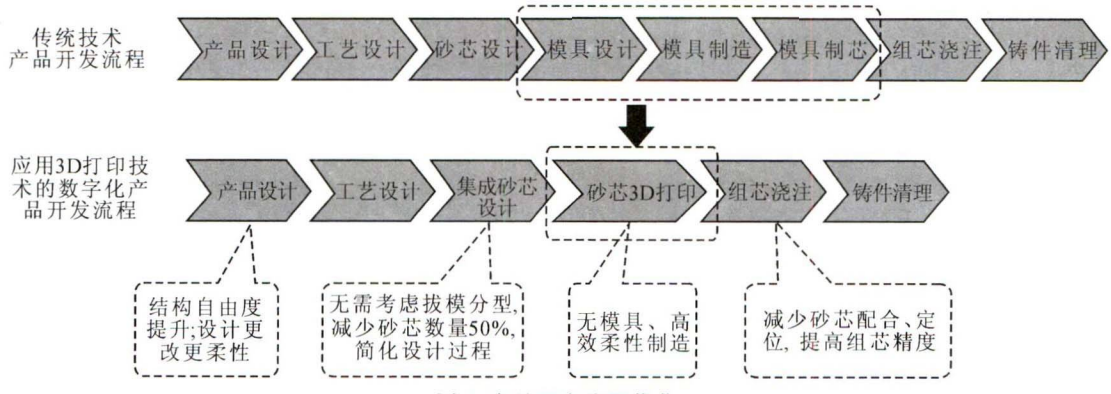


图 4 产品开发流程优化
Fig.4 Optimization of product development process

表 2 乘用车发动机缸体样件开发对比
Tab.2 Comparison of passenger car engine cylinder block sample development

对比项	传统工艺	3D 打印	效果
砂芯数量	10~13 件	3~5 件	砂芯数量减少 50%以上
周期(样件)	首件 70 天 2 件 / 天	首件 7 天 2 件 / 天	缩短开发周期 63 天
成本(10 件)	试制模具费用 40 万元 单件总计成本 4.2 万元	试制模具费用 0 单件总计成本≤0.9 万元	V12 缸体为例，单件成本降低 3.61 万元，10 件降成本 36.1 万元。
质量	产品尺寸精度 CT9 表面粗糙度满足 *Ra*25	产品尺寸精度 CT9 表面粗糙度满足 *Ra*25	产品外观及内部质量满足产品标准要求，披缝减少 50%

发难度大。另外，由于新产品结构的不确定性，一旦产品更改，将导致一系列的工装更改，也造成了产品开发的投入大，周期长。

3D 打印砂芯的出现，使无模制造成为可能。由于 3D 打印砂芯不需要考虑起模问题，相应的砂芯的设计及装配设计也有了根本性的变化。

3.1　气缸盖铸件基本情况

图 5 为气缸盖铸件结构示意图。气缸盖为六缸、四气门柴油机气缸盖。铸件轮廓尺寸为：1 090 mm×337 mm×151 mm，铸件重 157 kg。未注明铸造壁厚(5±0.5) mm。铸造公差 CT8～CT9级。铸件材质为 HT250，本体试棒的抗拉强度≥250 MPa。

在气缸盖内腔有隔板，将水套芯分为双层(仅在出气面侧水套芯有连接)。气缸盖水套砂芯采用了分体水套，中间有隔板。这种结构削弱了水套砂芯的强度。

新产品要求喷油器套一体铸出，这增加了铸造的难度。

3.2　气缸盖铸件试制工艺方案

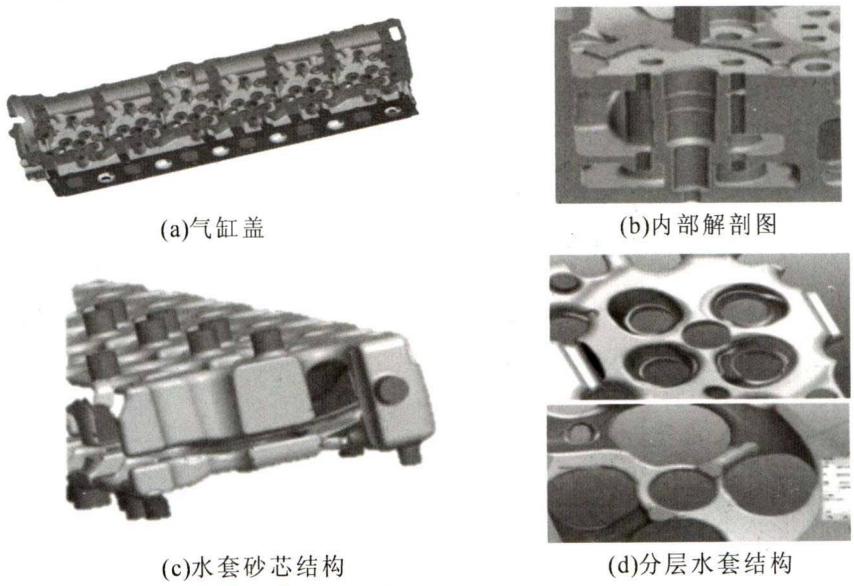
采用组芯造型方式，主要砂芯采用冷芯 / 自硬砂芯，熔化采用中频炉，检测采用三维扫描比对及解剖检测。

传统的组芯造型，气缸盖大致分为顶盖芯、底板芯、上 / 下水套芯、进 / 排气道芯、侧边芯等 7 个主要砂芯。气缸盖铸件结构复杂，需要砂芯数量众多。而且水套砂芯、气道砂芯的结构复杂，难以采用手工制芯方式生产。

采用 3D 打印砂芯，可以实现无模制造。可以节约模具成本，减少了调试的时间。采用 3D 打印砂芯将砂芯集成在一起，见图 6。新的工艺方案主要采用了 4 种砂芯。重新划分砂芯的分型：将底板芯、进 / 排气道芯、下水套芯组合在一起，形成一个砂芯。将顶盖芯及原装配芯组芯在一起。铸型采用自硬砂造型。新的工艺方案，减少了砂芯的数量，相应地减少了砂芯之间的定位和配合位置，提高了铸件的尺寸精度。

3.3　铸件的试制

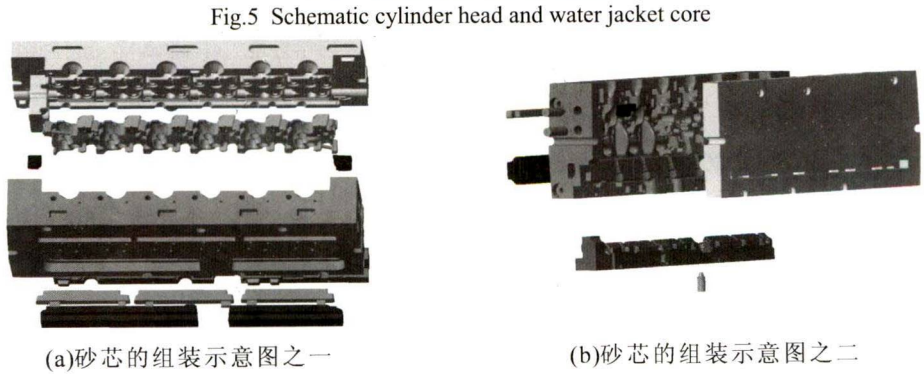
对于 3D 打印的砂芯，重点关注砂芯的强度及其发气量指标。经检测，其发气量≤10 mL/g，抗拉强度≥1.75 MPa，抗弯强度≥2.75 MPa。



(a)气缸盖　(b)内部解剖图　(c)水套砂芯结构　(d)分层水套结构

图 5　气缸盖及水套砂芯示意图

Fig.5　Schematic cylinder head and water jacket core



(a)砂芯的组装示意图之一　(b)砂芯的组装示意图之二

图 6　铸件成型工艺方案

Fig.6　Casting molding process plan

（下转第 1037 页）

上、中、下 3 层，下层内浇道位于横浇道上，与铸件油底壳面相连；上、中两层内浇道由分浇道与横浇道相连，通向瓦座两侧。该浇注系统有利于撇渣、控制铁液流量，铁液温度在型腔内分布也较为均匀[6]。

4 调试过程中的问题

调试过程中仍存在一些问题，上箱靠近两端头有气孔和冷隔，主体芯局部黏砂。分析原因，主体芯局部小芯头疏松不容易射实，从主体芯的生产、芯砂种类及涂料等方面入手，进行攻关。

针对冷隔和气孔，提高浇注温度，加大顶端溢流。①对主体芯射不实的部位增加射嘴，增加排气，减短油孔芯头，解决砂芯疏松问题；②浇注温度提高 10 ℃，由 1 380~1 410 ℃提高为 1 390~1 420 ℃；③优化浇注系统，增大内浇道，对横浇道末端增加溢流块，排冷铁，减少气孔；④加长上箱法兰面靠近端面的排气片，解决法兰气孔；⑤底法兰侧增加排气销，加大排气面积由 480 mm^2 增到 840 mm^2；⑥对主体芯油孔芯头组芯后刷南华涂料，炉后刷防黏砂涂料，解决油孔黏砂问题。

5 生产结果

新工装 2018 年 6 月开始调试，8 月投入批量使用，2018 年 12 月加工 500 件，综合废品率 6.28%，与 2017 年综合废品率 24.6%相比，废品率下降 74.5%。对废品率进行统计分析：①砂眼缺陷废品率由 10.77%下降为 3.98%；②气孔缺陷废品率由 3.62%下降至 1.5%；③渗漏率由 4.5%下降为 0.8%；④黏砂问题彻底解决。

参考文献：

[1] 李传新，齐培花，高存贞. MK554 前箱铸造工艺设计[J]. 铸造，2018(1)：79-81.

[2] 康宽滋. 缸体铸造工艺—车用小型发动机灰铸铁缸体缸盖铸件生产工艺(2) [J]. 现代铸铁，2007(5)：8-12.

[3] 赵群宪，王光见，孙志瑞，等. 灰铸铁发动机缸体常见铸造缺陷及解决措施[J]. 现代铸铁，2014(1):44-50.

[4] 李魁盛. 铸造工艺设计基础[M]. 北京：机械工业出版社，1981.[5] 程俊伟. 柴油机缸体气孔缺陷成因分析及对策 [J]. 铸造技术，2009, 30(10):1347-1349.

[6] 中国铸造协会. 铸造工程师手册 [M]. 北京：机械工业出版社，2010.

(上接第 1029 页)

由于 3D 打印砂芯的表面粗糙度与采用工装制芯相比，其粗糙度等级较差，需要采用浸涂涂料才能达到铸件的质量要求。在工艺设计时，需要考虑到涂料对铸件尺寸的影响。

铸件的浇注工艺为：浇注温度 1 440~1 460 ℃，浇注时间 16~18 s，浇注铁水量(参考)：200 kg。

铸件清理后，进行铸件的扫描检测及解剖检查。铸件的尺寸、材质等均达到了设计要求。由于减少了砂芯的数量，提高了装配精度，铸件的尺寸精度达到了 CT8 级水平。

4 结论

(1)采用 3D 打印成型设计自由度大，砂芯可以集成设计，减少了砂芯的装配误差，有利于保证铸件的尺寸精度。

(2)采用砂芯 3D 打印替代传统的砂芯生产方式，不需要生产试制工装，节约了成本，加快了开发进度。

(3)铸件产品结构的更改，采用 3D 打印成型仅更改 3D 数据即可实现新砂芯的生产，不需要更改工装。

(4)充分发挥 3D 砂芯打印的特点，可简化工艺，实现铸件的快速开发。

参考文献：

[1] 卢秉恒，李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化，2013，42(4)：1-4.

[2] 张雨明，吴锐. 我国 3D 打印技术研究及产业化发展现状[J]. 中国材料进展，2018，37：237-240.

[3] 何志明. 3D 打印技术对产品的影响[J].包装工程，2018，39(10)：188-193.

[4] 姚清. 3D 打印技术对机械制造业的影响分析[J]. 中国新技术新产品，2018，(18)：13-14.

[5] 扈恩同. 3D 打印技术在机械制造中的应用研究[J]. 世界有色金属，2018(1)：42-43.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2022 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号：52-64　国外发行号：M855　国内定价：25 元/本　海外定价：25 美元/本