

柴油机主轴承盖增材制造技术研究及验证

宋明忠, 陈志林, 殷 筱

(上海船用柴油机研究所, 上海 201108)

摘 要: 以某船用柴油机主轴承盖的制造为例, 从材料的选取、打印成型、检测以及匹配加工工艺验证等方面介绍了增材制造技术。和传统铸造工艺相比, 增材制造技术有效解决了传统工艺引起的内部质量不稳定、尺寸控制差的问题。经验证, 增材制造技术可用于柴油机主轴承盖的制造。

关键词: 柴油机; 增材制造; 主轴承盖

中图分类号: TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0050-04

Research and Verification of Additive Manufacturing Technology for Main Bearing Caps of Diesel Engines

Song Mingzhong, Chen Zhilin, Yin Xiao

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The additive manufacturing technology was introduced based on the manufacturing of the main bearing cap of a diesel engine, including material selection, printing and forming, inspection and matching processing technology. Compared with traditional foundry technology, additive manufacturing technology solves the problems of unstable inner quality and bad parameter control. The additive manufacturing technology was verified to be applicable in the manufacturing of main bearing caps of diesel engines.

Key words: diesel engine; additive manufacturing; main bearing cap

0 引言

增材制造技术(俗称 3D 打印)在国内各个行业发展势头强劲,特别是在航天航空业的一些应用已取得显著成果^[1-2]。相比之下,在船用柴油机领域的应用还存在较大差距,主要应用尚集中在砂芯打印等方面^[3]。随着柴油机各项技术指标的提升,采用传统制造方式的零部件已难于满足集成化、轻量化、高性能的设计需求,迫切须要改变一些固有模式,对传统制造技术进行改进优化,以解决传统成形工艺繁琐、投入成本大、消耗高、制造周期长等问题^[4]。因此,针对船用柴油机重要零件开展增材制造技术工艺研究及验证,以提升关键零部件制造能力具有十分重要的意义^[5]。本文以柴油机主轴承盖为例,通过对材料、热处理及可制造性几

方面的研究及验证,阐明增材制造技术应用于柴油机零部件制造领域的可行性。

1 主轴承盖增材制造技术可行性分析

主轴承盖是柴油机的重要承载结构件,与机体联接,支撑曲轴运动。主轴承盖承受交变载荷应力,材料多为球墨铸铁,毛坯成型采用铸造方式。由于传统铸造工艺本身不可控因素较多,主轴承盖等厚大铸件内部极易产生缺陷,毛坯成型可靠性及产品稳定性差。因此,以主轴承盖成型为例,针对性地开展增材制造技术应用研究,对解决传统工艺难点具有代表性。

1.1 主轴承盖主要技术要求

某主轴承盖形状如图 1,外形尺寸:560 mm ×

370 mm×100 mm，净重约 100 kg。原设计材料选用球墨铸铁 QT500-7A，要求各区域材料分布均匀、密实，不允许存在热裂、裂纹等影响强度和致密性的缺陷。同时，专门对材料化学成分中的硫、磷质量分数提出了严格的控制要求。材料须达到如表 1 规定的力学性能。

表 1 主轴承盖本体力学性能

试样	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	硬度 HBW
本体试样	420	290	5	170~230

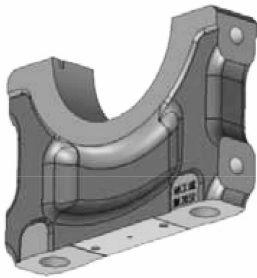


图 1 主轴承盖成品

1.2 增材打印技术应用分析

综合分析主轴承盖结构和材料性能要求，以及增材制造金属成型技术特点，确定采用电熔增材成型结合常规机械加工的技术路线。主轴承盖电熔增材成型方法如图 2 所示。通过专用设备，采用电弧热和电阻热快速熔化金属原材料，形成小熔池，继而快速凝固，逐层堆积，连续“生长出”主轴承盖毛坯。

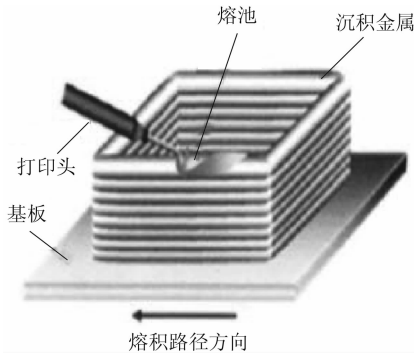


图 2 电熔增材制造

1.3 主轴承盖增材制造技术验证

经电熔增材获得的主轴承盖毛坯，还须对其材料性能和加工性能进行深入分析与验证，才能确定其工程应用的可行性。

1.3.1 材料性能验证

样块用 EAM235 材料打印而成，为 300 mm×120 mm×120 mm 的立方体。在样块上本体取样，

试样力学性能检测结果见表 2，满足要求。同时，化学成分检测结果显示硫和磷的质量分数也满足要求。金相检测（图 3）显示：熔池区主要由先共析铁素体、无碳贝氏体、针状铁素体和少量珠光体组成；热影响区主要由细小铁素体和少量珠光体组成。综合上述结果分析，用 EAM235 打印材料替换常规球墨铸铁 QT500-7A 完全可以满足主轴承盖材料设计性能要求。

表 2 样块本体试样力学性能检测

试样	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_5 /%	硬度 HBW
本体试样 1	541	443	28	171~174
本体试样 2	537	441	24	

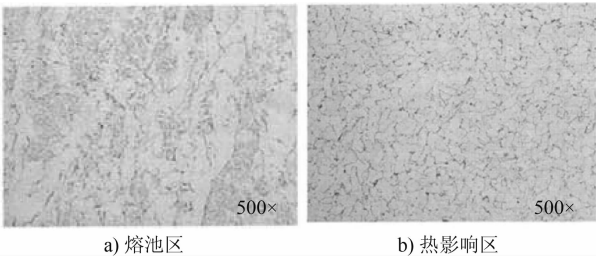


图 3 样块金相检测

1.3.2 机加工性能验证

对样块进行多端面机械加工（包含铣、钻、镗等常规工序），如图 4。整个加工过程平稳，出屑、断屑情况正常；机床加工负载力显示在合理区间；加工刀具无异常磨损；加工后的表面质量满足预期要求。表明：由 EAM235 材料打印而成的零件具有良好的机加工性能，同时也验证了该材料内部组织具备各向同性的特点。

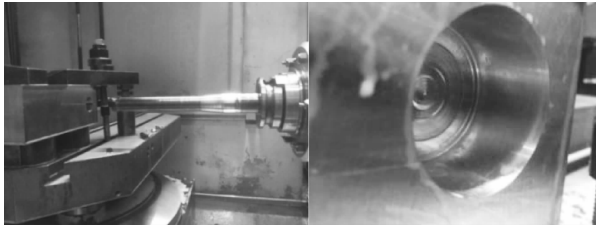


图 4 样块切削加工验证

2 主轴承盖增材制造

主轴承盖增材制造的主要流程如图 5 所示，分为 5 个环节。打印过程从基体开始逐层向上。



图 5 主轴承盖打印制造流程

(1) 基体及打印材料准备

基板选用硫、磷质量分数在一定范围内的金属板材,打印完成后,采用冷加工方式去除基板。打印设备具备三轴数控驱动功能。打印材料选用直径为 4.0 mm 的 EAM235 金属原丝,干伸长为 10 ~ 15 mm (相当于电阻)。打印线速度为 500 ~ 600 mm/min,送丝速度控制在 1 500 ~ 2 000 mm/min。

(2) 电熔成型打印

打印时采用同时整体打印 4 件的方式,如图 6 所示。打印头在基座板上启弧,设置电流、电压、打印线速度等参数。送丝方式为变速送丝,连续走“口”形。打印过程中为保证材料性能,采用气冷+风冷的方式对主轴承盖进行冷却,保证打印前一定时间内的温度小于设定值。打印过程中,监测工作区域的环境湿度,环境湿度应小于 80%;当湿度超过要求时,采取隔离或干燥措施。打印高度、宽度通过在设备上设置参数自动控制。垂直度偏差主要由打印过程的变形引起,所以在打印过程中,为控制垂直度,须同步采用激光检测仪与基准线进行比较,若偏离,须调整相应的工艺参数进行控制。

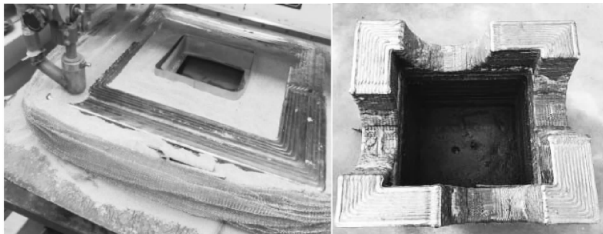


图 6 主轴承盖打印

(3) 消除应力热处理

打印成型后须进行必要的热处理,以消除打印应力,同时也可以在一定程度上调整材料的力学性能。热处理控制如图 7 所示。温度达到 500 ~ 550 °C 时进行应力消除热处理;控制升温、降温速率小于一定数值,同时注意控制保温时间。

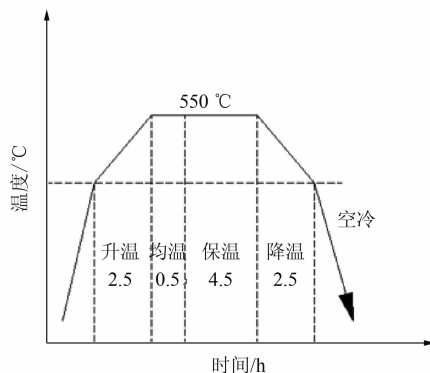


图 7 热处理温度曲线

(4) 分切加工及检测

热处理后,采用机械冷加工方式在样件顶部切出试料,送检测机构取样并检测。力学性能、成分、硬度等检测结果全部满足主轴承盖要求。同时,经宏、微观金相观察,材料内部无裂纹、气孔未熔合等缺陷。如图 8 所示,将构件分切成四件进行常规加工,然后进行整体超声波检测,以 1 级指示数据进行评定,结果表明内部无任何缺陷。

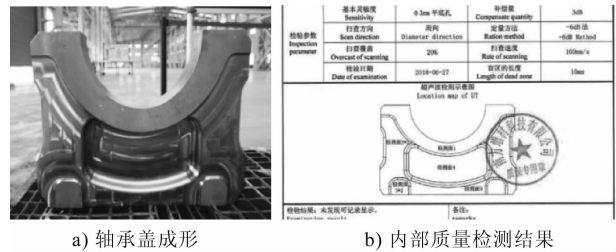


图 8 主轴承盖成形及内部质量检测结果

(5) 匹配加工工艺性验证

按照制造工艺流程,主轴承盖必须严格按照要求与机体拼装成一个整体后再进行组合精加工。机体的材料为 QT400,其属性和原主轴承盖材料 QT500 差异性小,组合加工在尺寸及形位公差保证、变形控制等方面相对容易实现。而打印的主轴轴盖材料属性和机体材料属性差异性大,因此匹配组合加工的工艺性须实际验证。把加工后的主轴承盖安装于机体第 2、9 档轴承座,如图 9 所示,按机体工艺与机体同镗至图纸尺寸。精加工后拆除主轴承盖并重新复装,测量孔径、直线度、平行度、圆度等,并与之前精加工后的尺寸进行对比分析,如表 3。确认复装前后数据几乎没有差异,证明匹配加工工艺性满足要求。

表 3 增材打印主轴承盖复装对比数据

测量位置	第 2 档		第 9 档	
	加工前测量值/mm	复装后测量值/mm	加工前测量值/mm	复装后测量值/mm
天地推力端	315.010	315.015	315.010	315.010
天地自由端	315.015	315.015	315.015	315.015
三弯 1 推力端	315.010	315.010	315.010	315.010
三弯 1 自由端	315.010	315.010	315.010	315.010
三弯 2 推力端	315.010	315.010	315.010	315.010
三弯 2 自由端	315.010	315.010	315.010	315.010

注:主轴承孔直径设计值为 $\Phi 315H6 (+0.032/0)$ mm。

3 结论

本文采用电熔增材成型技术打印主轴承盖,通过对打印材料、打印成形及成形后特性等的研究及验证表明:采用 EAM 235 打印材料打印的主轴承

盖，其内外部质量完全满足柴油机主轴承盖的设计使用要求。

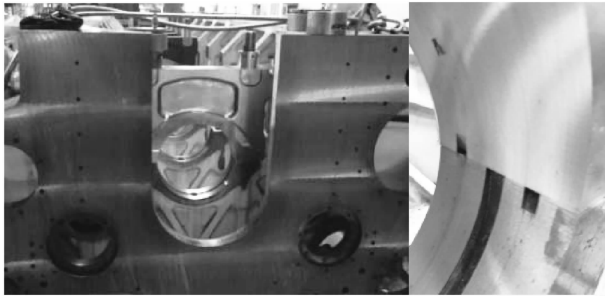


图9 增材打印主轴承盖复装

结合实际应用得到如下结论：金属增材制造形成小熔池，产生缺陷的几率小；对比传统成形技术，材料的结构强度得到提高，但应力消除非常关键。相比传统常规工艺，增材制造技术在个性化定制及简化生产制造流程等方面具有突出优势。从目前技术发展来看，传统的数控加工精度依然高于 3D 打

印。因此，将 3D 打印与传统数控加工相结合是一种合理和经济的制造方式。增材制造与传统加工工艺在技术上有互补性。

参考文献

- [1] WOHLERS T, CAFFREY T. Wohlers report 2013-annual worldwide progress of additive manufacturing and 3D printing state of the industry [R]. Fort Collins : Wohlers Associates, 2013.
- [2] 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 (4): 1-4.
- [3] 李琛, 欧阳清. 基于金属增材制造的船舶结构设计应用展望 [J]. 兵器装备工程学报, 2018 (1): 173-178.
- [4] 周长平, 琳枫, 杨浩, 等. 增材制造技术在船舶制造领域的应用进展 [J]. 船舶工程, 2017 (2): 80-87.
- [5] 李佳, 张纪可, 冯明志. 3D 打印技术在船用柴油机领域的应用前景分析 [J]. 柴油机, 2015 (2): 1-5.

《柴油机》编辑部公告

《柴油机》投审稿系统现已正式开通，系统网址为 <http://cyj.csic-711.com>。即日起，请作者、审稿专家和读者登录网站后，通过各自端口注册后投稿、审稿或查阅过刊。系统使用中如遇到问题，请与编辑部联系。

另，随着系统的上线，编辑部正式启用新邮箱：cyj711@vip.163.com，请使用该邮箱与编辑部联系。原邮箱 dieselengine@sina.com 已停止使用。

《柴油机》编辑部

地址：上海市闵行区华宁路 3111 号

邮编：201108

电话：021-51711743

传真：021-51711700（请注明编辑部收）