

# 增材制造技术在F级燃气轮机燃烧器开发中的应用

颜伟, 汝东, 陈明敏

(上海电气燃气轮机有限公司, 上海 200240)

**摘要:** 为了缩短重型燃气轮机燃烧器修复和低氮燃烧技术开发周期, 打破F级重型燃气轮机热部件制造技术壁垒, 基于增材制造技术, 开发出了一套完整的F级燃气轮机燃烧器加工工艺, 成功实现了标准产品旋流器的试制。在此基础上, 利用增材制造技术生产的燃烧器, 完成了在役燃气轮机燃烧器的服务修复; 在新型低氮燃烧技术开发中成功试制出多款自主开发的新型低氮燃烧器, 并通过了全温、全压、全尺寸实验验证; 批量生产了产品级新型低氮燃烧器, 贯通了F级重型燃气轮机燃烧器从设计开发到工艺开发的全部流程。实践表明, 运用增材制造技术可助力企业在燃气轮机服务、研发和生产等方面实现快速创新。

**关键词:** 增材制造技术; F级燃气轮机; 燃烧器

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2021.10.029

[引用本文格式] 颜伟, 汝东, 陈明敏. 增材制造技术在F级燃气轮机燃烧器开发中的应用[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 222-227. YAN Wei, RU Dong, CHEN Ming-min. Application of additive manufacturing technology in the development of F-class gas turbine burner[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 222-227.

## Application of Additive Manufacturing Technology in the Development of F-class Gas Turbine Burner

YAN Wei, RU Dong, CHEN Ming-min

(Shanghai Electric Gas Turbine Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract:** In order to shorten the development cycle of burner repair and low  $\text{NO}_x$  emission combustion technology for heavy-duty gas turbine, and to break the technical barrier of manufacturing hot parts, a complete set of processing technology of the F-class burner was developed by using additive manufacturing technology. The standard hydrocyclone has been successfully trail-produced. On this basis, damaged burners on units has been replaced by using the burners made by additive manufacturing technology. In the development process of new low  $\text{NO}_x$  emission combustion technology, a number of burners have been produced and verified by full temperature, full pressure and full-scale experiments. the new type of low  $\text{NO}_x$  emission burner has been successfully produced in batch. From concept design to manufacturing, the development process of F-class heavy duty gas turbine burners has been thoroughly opened up. These applications show that additive manufacturing technology has great potential to bring substantial values to enterprises in gas turbine service, R&D and manufacture.

**Key words:** additive manufacturing technology, F-class gas turbine, burner

## 引 言

F 级燃气轮机燃烧器属于燃气轮机核心技术部件之一。其结构复杂、表面质量要求高,一般采用精密铸造工艺。采用传统精铸工艺,生产和采购周期长、制造成本高,严重制约了机组成本控制和电厂服务备件供应,不能满足燃气轮机服务中的快速备件和紧迫需求。因此,灵活实现设计方案、加快设计流程和快速生产出轴向旋流器的备件成为亟待解决的问题。

增材制造(3D 打印)技术作为最具有前沿性、先导性的新兴制造技术,对传统的加工方式和工艺产生了革命性的影响。金属增材制造技术最大的特点和优势就在于其一体化生产和快速制造,耗能小,资源利用率极高。相比传统机加工方法,增材制造技术降低了生产过程中所需的材料消耗,过程中剩余金属粉末可以很容易地回收和再次利用,是一种更可持续的生产方式<sup>[1-3]</sup>。目前,主流增材制造技术有分层实体制造(LOM)、光固化立体成型(SLA)、选择性激光烧结(SLS)、激光选区熔化(SLM)和熔融沉积成型(FDM)等。金属增材制造一般选择激光选区熔化(SLM)技术,即选区激光熔化技术。基本思想是基于微分原理,将三维模型通过 CAD 降维处理,通过切片分层制造并最终组合成型<sup>[4]</sup>。

综合增材制造技术的优势和企业发展需求,利用增材制造技术来制备燃烧器成为比较热门的选择。GE 公司收购了 Morris 公司和意大利 Avio 公司,开展航空发动机零件的选区激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)制造研究<sup>[5]</sup>。西门子利用增材制造技术,成功制造出低排放预混合器(DLE),完成了 SGT-700/SGT-800 燃烧器喷嘴的修复工作和 SGT-1000F 的备件制造<sup>[6-7]</sup>。

上海电气 F 级燃气轮机为环形燃烧室结构,1 台燃气轮机配置 24 套 HR3 燃烧器。该燃烧器为组合燃烧器形式,由值班燃烧器和预混燃烧器装配而成。中心值班燃烧器为扩散燃烧模式,主要起到稳定燃烧作用;预混燃烧器为主燃烧器,火焰为预混燃

烧模式。HR3 燃烧器结构如图 1 所示。对于值班燃烧器,头部旋流器为镍基合金精密铸造成型,国内目前暂未国产化成功。

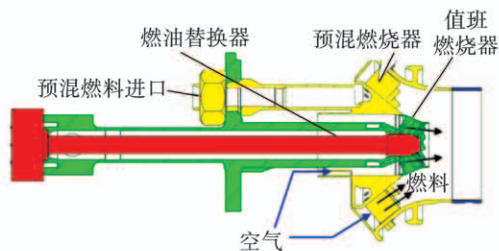


图 1 HR3 燃烧器结构示意图

Fig.1 HR3 burner sketch

上海电气在燃烧器开发中主要针对值班燃烧器的头部旋流器进行优化,将增材制造技术用在以下 3 个方面:

(1) HR3 燃烧器快速修复服务。在役机组燃烧器长期运行在恶劣的工作环境中,燃烧器头部旋流器出现疲劳损伤后整体更换成本太高。采用增材制造技术打印出旋流器头部进行更换,可以极大减少维修备件成本和检修周期。

(2) 研发原型件快速试制。低氮燃烧技术研发主要集中在燃烧旋流器的研究上,开发过程中需要设计制造若干原型旋流器。利用增材制造技术可以快速生产出各种原型燃烧器进行燃烧实验。

(3) 产品短期内批量生产。利用增材制造技术可以在试制阶段快速筛选供应商的技术成型能力,实现快速成型,进行稳定成本小批量产品制造。

## 1 增材制造技术在燃烧器修复服务中的应用

燃气轮机作为调峰型机组,经常处于快速启停的状态,热部件更是长期工作在冷热交替环境中。尽管 HR3 值班燃烧器使用了高温镍基合金材料,但运行工况的不确定性和偶发事故还是会导致燃烧器出现各种损伤,如燃烧器烧蚀、配合面开裂和拆装误伤等。各类损伤案例如图 2 所示。损伤超过一定标准,常规做法是替换整根燃烧器。作为备件采购,其进口价格几乎是新机采购价格的 3 倍,且采购周期较长,很难做到及时响应。若企业为了快速服务,随

时准备一定数量的备件,会对企业造成相当大的库存压力。根据评估,损伤的燃烧器往往仅旋流器失效,主杆部分可以继续使用,更换旋流器是最经济的方法。

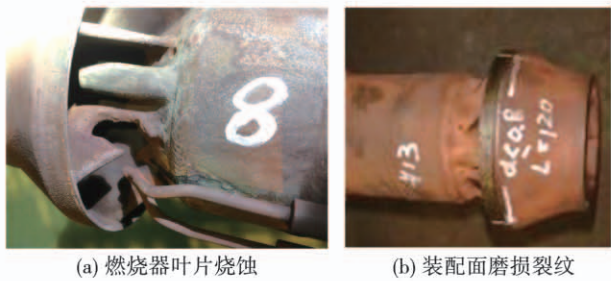


图 2 HR3 燃烧器损伤案例  
Fig.2 HR3 burner damage cases

增材制造用于服务维修时,模型为 HR3 值班燃烧器结构,打印的成品如图 3 所示。通过对增材制造的零件进行各项分析,其力学性能参数及零件致密度高于熔模铸造,致密度高达 99.9%,符合产品的各项指标要求。目前,上海电气已成功将增材制造的 HR3 轴向旋流器用于宜兴某燃气轮机电厂的燃烧器修复工作中。

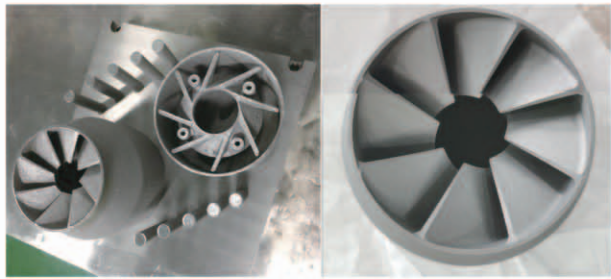


图 3 增材制造 HR3 值班燃烧器  
Fig.3 HR3 burner produced by additive manufacturing technology

2 增材制造技术在燃烧器研发中的应用

2.1 应用背景

随着国家碳中和目标的提出,环保压力越来越大,很多地方的标准已经将氮氧化物排放限值降低到国标的一半甚至更低。江苏对已有固定式燃气轮机发电机组氮氧化物排放提出 2023 年 1 月 1 日前实现 30 mg/m<sup>3</sup> 要求新建固定式燃气轮机排放实现

15 mg/m<sup>3</sup><sup>[8]</sup>,这对燃气轮机燃烧性能提出了极高的挑战,超低排放新型燃烧器的研发迫在眉睫。

低氮燃烧技术开发主要集中在燃烧掺混模式的优化和热声稳定性的研究中。利用数值分析筛选出优选方案后,需进一步试验验证才能保证设计的可靠性,此时需要加工出很多不同的燃烧器原型件。在方案多样、单件试制的需求下,无论采用机加工或者精密铸造方法都无法避开高昂的试制费用和加工周期长等困难。对于增材制造技术来说,由于其独特的分层成形原理,无论简单的或复杂的形态,只需将多款原型件同时放在基板上便可一起打印出来,价格并不会因为方案不同而大幅波动,可较好解决研发单件试制问题。

2.2 增材制造技术对燃烧器设计的影响

虽然金属增材制造已经发展了很多年,技术也日趋成熟。然而在实践过程中,采用金属增材制造来生产带复杂型线和小孔特征的燃烧器并不如想象中那样简单。在加工过程中需考虑上下游工作才能做出满足实际需求的产品。增材制造技术用于研发设计时,流程如图 4 所示。

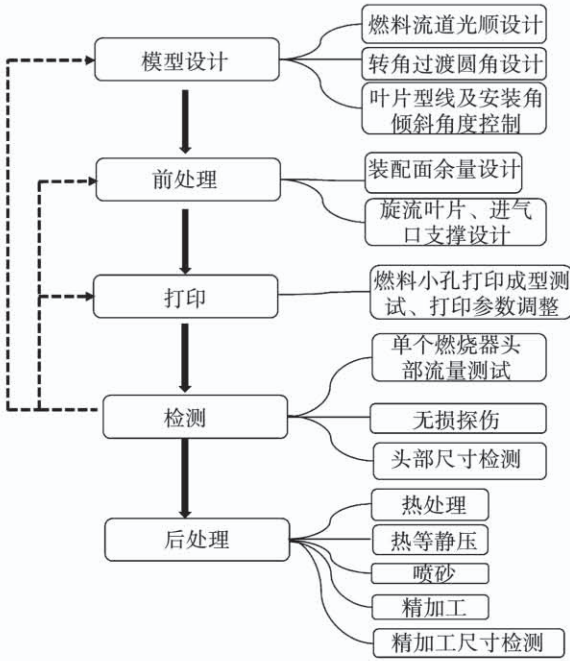


图 4 研发原型试验件 3D 打印流程  
Fig.4 Process of 3D printing for R & D prototype trial production

为优化掺混效果,实现预混燃烧降排放的目的,设计的新型低氮燃烧器旋流叶片内部增加了燃料通道和燃料小孔,燃烧从扩散模式变成预混模式。新型低氮燃烧器传统加工方法需要 3 组零件,通过焊接进行组装,设计如图 5(a) 所示。通过实际操作发现,传统方法存在 3 个难点:旋流叶片安装定位困难;零件小,焊工操作困难,薄壁焊接容易焊穿;焊接收缩无法保证装配尺寸,难以做出和设计相符的合格品。改用一体设计大大减少了工序,并将内部流道优化成光滑过渡的形式,如图 5(b) 所示。燃料流动压损相较于传统机械加工结构降低了 17%。

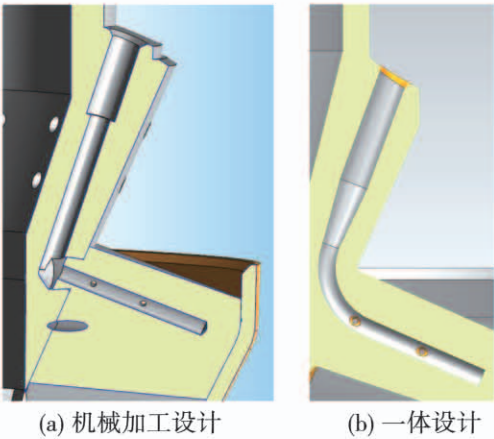


图 5 增材制造和传统加工在模型设计上的区别  
Fig.5 Comparison of AM and traditional processing in mechanical design

增材制造的本质是一种微型铸造方式,由一层一层粉末铺垫熔结,生长具有“方向性”,即从基板开始往上生长,如果结构不规则,轮廓悬空太多或者拐角过于剧烈,成型效果会变差,甚至坍塌失败。图 6 为尝试单独打印一个燃烧器叶片后做的检测对比,虚线为模型的截面型线,实线为打印件用三坐标扫描后所得的截面型线。可以看出,在上部叶片扭转处,打印件明显向下“坍塌”。所以,在燃烧器设计阶段需考虑增材制造技术的特点,尽量减少剧烈拐角或者悬空结构,使扭转光滑过渡,轮廓四周尽量有约束。

2.3 余量和支撑设计

对于圆度和直径精度有要求的零件,需要丰富

的打印经验和极其精良的设备,无需凭借机加工做到真正地一次成型。传统机加工在尺寸精度方面有无可替代的复现度和准确度,两种工艺结合起来是最佳选择。

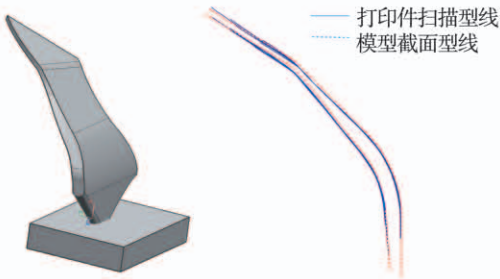


图 6 单独打印悬空弯扭叶片  
Fig.6 Printing of suspended twisted blade

打印的燃烧器头部需要和燃烧器主杆焊接在一起,所以需要制造焊接坡口。由于增材制造对于圆形部件的圆度控制和直径控制相较传统机加工还是有差距,所以在打印燃烧器时需要将焊接坡口处抹平,后期再采用机加工的形式做出焊接坡口,余量添加方式如图 7 所示。

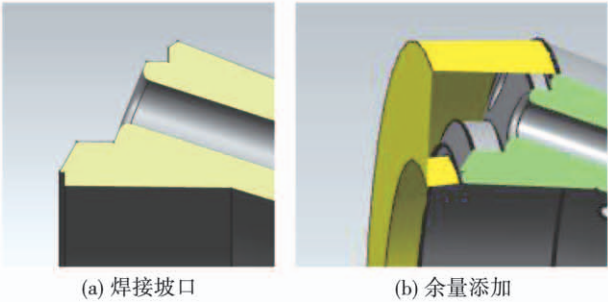


图 7 焊缝处余量设计  
Fig.7 Magine design for welding groove

燃烧器外锥圆柱面的直径,如图 8 所示。此位置需要和别的部套进行装配,间隙要求严格,应添加余量。尝试了两种余量添加方法:第一种是仅在装配圆柱面处添加余量,但实践证明,这种添加方法需要非常精确地控制打印参数才能保证一次成型。如果打印参数不适合,打印收缩后,圆锥面相对于理论圆锥面已经有一定程度的收缩,车掉圆柱面上添加的余量至理论尺寸后,圆柱面与圆锥面出现了一个明显的台阶,如图 9(a) 所示。为避免出现台阶,第二

种是将圆柱面和圆锥面一起添加余量,之后精加工外锥面可使其光滑,如图 9(b)所示。

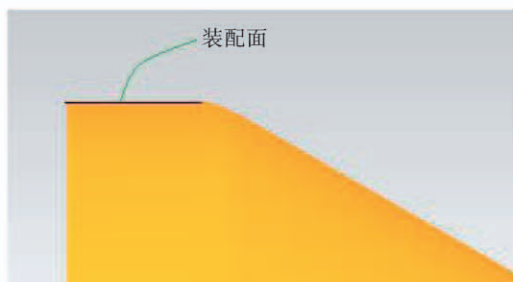


图 8 理想模型

Fig. 8 Ideal model

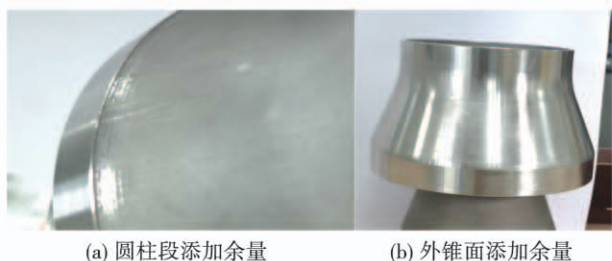


图 9 圆柱面两种添加余量的方法

Fig. 9 Two ways to add allowance for cylindrical surface

总体来说,采用增材制造技术,在前处理时需要优先明确关键尺寸,即装配尺寸、过渡结构和后处理装夹面基准等。明确关键尺寸和后处理工艺对零件本身的影响后,再开始打印,会消除很多后期发现的工作隐患。

## 2.4 全压试验

研发设计筛选出两款值班燃烧器进行了燃烧试验,结构如图 10 所示。

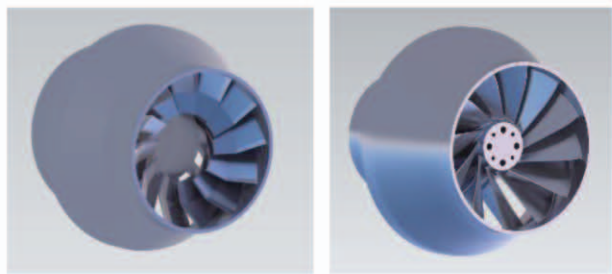


图 10 新型低氮燃烧器原型

Fig. 10 Prototype of new type of  $\text{NO}_x$  emission burner

一款旋流叶片为折弯叶片,一款为弯扭叶片。

两种结构用传统制造方法均难以实现,用 3D 打印配合相应的流量测试检测,快速做出了与设计相符的试验件。两款燃烧器均在全温、全压、全尺寸试验台(图 11(a))进行了验证,实验结果与预期效果一致,能有效实现低排放。

## 3 增材制造技术在小批量加工中的应用

采用传统精铸工艺制作燃烧器,开模时间需要半年至一年,采购周期约 3~6 个月,且每批次生产数量高于 30 件。电厂服务备件根据机组的不同损伤程度需求数量不定,一般为 1~5 个,紧急程度高,无法提前计划。无论是从价格,还是前期投入来说,增材制造试制小批量热部件无疑是非常合适的选择。

结合试验件试制和服务备件的打印经验,按照工程产品要求,采用增材制造技术批量生产,最主要的问题是保证产品的打印稳定性,对于通流结构,可通过流量测试和尺寸检测来保证流道一致性。小批量试制的新型低氮燃烧器如图 11(b)所示。

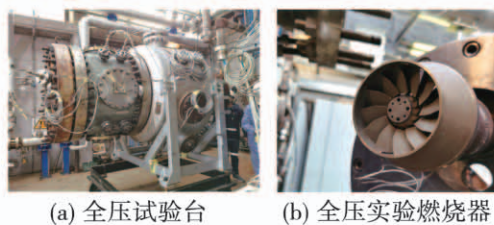


图 11 燃烧器批量加工

Fig. 11 Batch burner manufacturing

## 4 结 论

金属增材制造技术在 F 级燃气轮机燃烧器开发上可以运用在以下 3 个方面:

(1) 燃烧器快速修复服务。采用增材制造技术打印出旋流器头部进行燃烧器修复可以极大减少维修备件成本和缩短检修周期,并能减轻工厂备件库存压力。

(2) 研发原型件快速试制。利用增材制造技术可以快速生产出各种原型燃烧器进行燃烧实验。在燃烧器结构设计阶段,以性能第一,加工第二的思维

来进行结构设计,模型设计需考虑成型坍塌问题;打印前处理时需考虑到零件的应用场景和零件之间的装配关系,梳理清楚关键位置和非关键位置,并在关键位置处设计余量,后期再采用精加工的方法保证尺寸精度。添加余量需要结合增材制造收缩效应一起考虑,以保证零件最终状态为设计状态。

(3) 产品批量生产。利用增材制造技术可以在试制阶段快速筛选打印供应商的技术成型能力,实现快速成型,进行稳定成本小批量产品制造,克服了传统加工方式的不足。但是增材制造需要通过严格的工艺固化流程和检验手段保证批量产品的一致性。

综上,增材制造技术用在重型燃气轮机热部件制造中将成为主流趋势,可助力企业在燃气轮机服务、研发和生产等方面实现快速创新。

参考文献:

[1] LIPSON H, KURMAN M. Fabricated: The new world of 3D printing [M]. New Jersey: Wiley Publishing, 2013.

[2] WALTERS P, DAVIES K. 3D printing for artists: research and creative practice[J]. Rapport; Journal of the Norwegian Print Association, 2010(1): 12-15.

[3] RAMOSOEU M E, CHIKWANDA H K, BOLOKANG A S, et al. Additive manufacturing: Characterization of Ti-6Al-4V alloy in-

tended for biomedical application [M]. Riode Janeiro: Mem Inst Oswaldo Cruz, 2010.

[4] 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.

LU Bing-heng, LI Di-chen. Development of the additive manufacturing(3D printing) technology[J]. Machine Building Automation, Jun 2013, 42(4): 1-4.

[5] GE Aviation. Additive Manufacturing[EB/OL]. (2015-7-29). <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>.

[6] 吴宏超, 袁浩, 魏佳明, 等. 增材制造在燃气轮机研发及生产中的应用[J]. 航空动力, 2020, 13(2): 26-28.

WU Hong-chao, YUAN Hao, WEI Jia-ming, et al. The application of additive manufacturing technology in gas turbine research, development and manufacture[J]. Aerospace Power, 2020, 13(2): 26-28.

[7] 徐文涛. 增材制造在燃气轮机中的应用[J]. 燃气轮机技术, 2017(3): 61-64.

XU Wen-tao. Application of additive manufacturing in the manufacture of gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2017(3): 61-64.

[8] DB 32/3967-2021, 固定式燃气轮机大气污染物排放标准[S].

DB 32/3967-2021, Emission Standard of Air Pollutants for Stationary Gas Turbine[S].

(丛敏编辑)