

3D 打印技术在航空发动机换热器研制中的应用展望

Application Prospect of 3D Printing Technology on Aeroengine Heat Exchanger Development

中航工业沈阳发动机设计研究所 于 霄 吕 多 赵 孟 姜 楠 李洪莲 夏 梦
 中航工业发动机控股有限公司 姜向禹
 西安铂力特激光成形技术有限公司 王俊伟

[摘要] 简要介绍了 3D 打印技术的发展历程和国内外的研究现状,重点介绍了 3D 打印技术的特点及其应用于航空发动机换热器研制的原因,分析了相关应用实例,最后对 3D 打印技术的应用前景进行了展望。

关键词: 3D 打印 增材制造 换热器 航空发动机

[ABSTRACT] With the development of additive manufacturing, 3D printing technology has become a powerful tool for manufacturing of aeroengine. In this paper, the application of 3D printing technology in different fields is discussed. The aeroengine heat exchanger with 3D printing technology accords with the special features of aeroengine. The outlook of 3D printing technology is also addressed.

Keywords: 3D Printing Additive manufacturing Heat exchanger Aeroengine

3D 打印技术是增材制造技术(Additive Manufacture)的通俗名称^[1],有别于传统的去除材料加工技术,它是数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过连续的物理层叠加,逐层增加材料来生成三维实体的技术。

1979 年日本就提出了“快速原型”的概念,这是 3D 打印技术的雏形。1984 年,美国人查尔斯·赫尔提出了一种称为“立体光刻”(Stereo Lithography)的技术,即利用紫外线照射将树脂凝固成形以制造物体,该项技术于 1986 年获得专利。1993 年,美国麻省理工学院多名技术专家发明并申请了 3D 打印技术专利。自此之后,3D 打印技术开始突飞猛进,3D 打印的材料和产品的范围大大拓宽,大型工业打印机除了塑料之外还可以打印金属、橡胶和陶瓷。不管是零部件还是新设计的产品,不管是惰性的还是有机的材料,也不管是显微镜下才能看见的物体还是一幢很大的房子,不管是在地面上还是在太空中,都可以通过 3D 打印实现,3D 打印的产品覆盖了许多行业。

3D 打印技术作为一种新的快速成形制造技术^[2],经

历了技术潜伏期,现在已经进入快速发展阶段。据估计,2016 年 3D 打印市场规模将达到 44.5 亿美元,市场发展潜力巨大。

1 国内外发展现状

目前 3D 打印技术主要应用于产品模型模具制造、航空航天、文化创意、生物医疗、艺术创作以及个性化定制等领域,如图 1 所示。3D 打印技术不仅为创新设计开拓了广阔的空间,同时也对传统的加工技术提出了巨大的挑战。

在航空航天等高端制造业领域^[3-4],其加工制造有许多特殊和专业要求,如复杂结构、减轻重量、延长使用寿命、缩短研制周期、提高经济可承受性等,3D 打印技术正好可以解决高加工难度问题,满足设计要求。

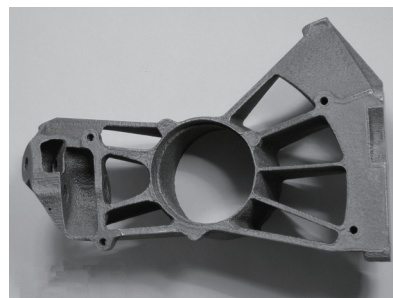
目前,美国 GE 公司、普惠公司和英国罗·罗公司这全球 3 大航空发动机工业巨头^[5-6]均已开展 3D 打印技术



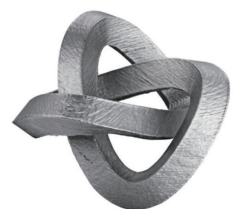
(a) 涡轮叶片



(b) 人工脊柱



(c) 加强组件



(d) 莫比乌斯环

图1 3D打印技术的应用实例

Fig.1 Application cases of 3D printing technology

在航空发动机上的应用研究,以提高公司产品在航空发动机领域的技术领先优势。

GE 公司作为全球最大的航空发动机制造公司,其产品占全球市场的 70% 以上。2013 年,GE 公司通过收购 Morris Technologies、RQM 等 3D 打印增材制造商,提高了航空发动机的生产能力。3D 打印技术赋予了 GE 公司在发动机上减少成本和重量的机遇。有报道称,GE 公司已经开始采用 3D 打印技术制造波音 747 和空客 320 所用发动机的燃油喷嘴。

普惠公司认为,3D 打印技术能够完成薄壁、轻质、复杂结构件的高精度制造,这将给航空航天制造带来新的技术革命,而飞行器中很多关键部件制造技术也因此需要重新进行全面评估和工艺改进。为此,普惠公司于 2008 年成立了专门的技术部门,从德国 EOS 公司引进设备,对飞行器常用金属材料的成形工艺和性能进行全面分析,积累相应的工艺数据,加快推进 3D 打印技术在航空航天制造领域的应用。

英国罗·罗公司也宣布将采用 3D 打印技术制造喷气发动机的金属零部件。2014 年 3 月,波音公司与谢菲尔德大学(University of Sheffield)先进制造研究中心(AMRC)合作设计研发了一架创新小型无人驾驶飞机,制造过程采用了 3D 打印技术。

中国从 20 世纪 90 年代开始研究 3D 打印技术(当时称为快速原型技术(Rapid Prototyping)),与具有世界先进技术国家几乎同时起步,现已初步建立了以北京航空航天大学、西北工业大学、华中科技大学、西安交通大学、清华大学等高校和中科院、西北有色金属研究院等科研机构为研发核心的 3D 技术培育基地,推动 3D 打印技术从实验室研究逐步向工程化、产品化转化。其中,北京航空航天大学与中航工业成立了专门的 3D 打印企业;西安交通大学侧重于应用 3D 打印技术加工制作模具和航空航天零部件;华中科技大学开发了不同的 3D 打印设备;清华大学将快速成形技术转移到企业后,把研究重点放在了生物制造领域;西北工业大学以凝固技术国家重点实验室为技术依托,成立了西安铂力特激光成形技术有限公司,在 3D 打印技术研究、设备开发和产业化应用方面均实现了全面发展。

进入 21 世纪以来,以中航工业为代表的工业部门开始研究和应用 3D 打印技术,尤其在航空发动机的复杂部件加工中已开展大范围 3D 打印技术研究和产品加工。

2 3D 打印的技术特点

(1)减轻重量,节省材料。

与一些传统机器加工的零件相比,3D 打印技术生产

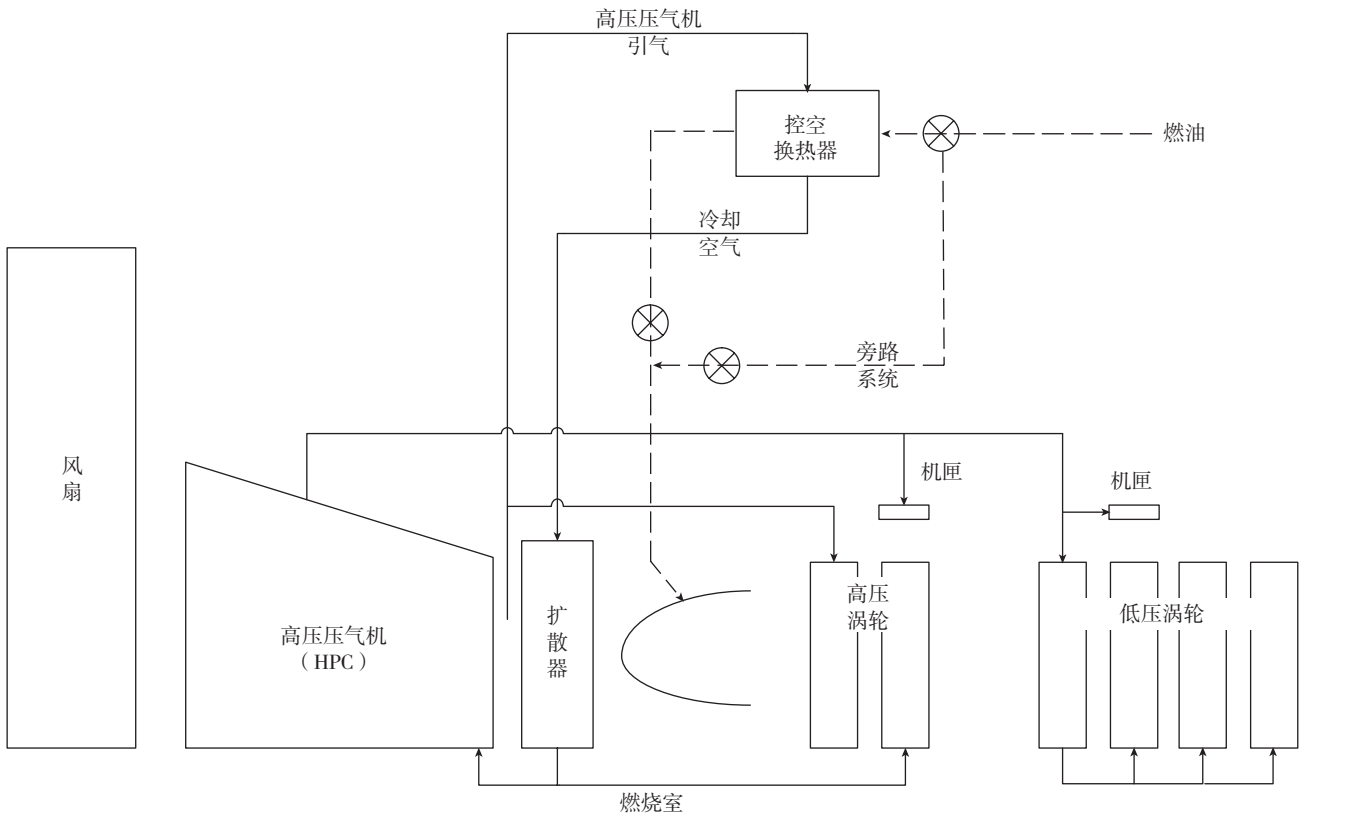


图2 冷却冷却空气示意图

Fig.2 Sketch map cooled cooling air

出的零件更加精细,重量更轻。同时,作为增材制造技术,较传统的切削加工技术节省材料,尤其是航空材料。据统计,很多情况下 3D 打印技术只需要传统制造法 1/10 的材料。

(2) 提高复杂程度,优化结构。

很多航空部件结构复杂,需要模具加工,而 3D 打印技术则跨越了造模这个环节,无需刀具、模具及工装卡具,即可将任意复杂形状的设计方案通过计算机图形数据快速加工生成实体产品,加工成本和周期均有很大改善,并使产品的不断优化变为可能。

(3) 降低成本。

通过 3D 印刷机制造的每件产品都是单独成形,而非从一个模子里复制出来,使复杂的设计不再造成额外成本增加;同时与传统制造技术相比,3D 打印技术通过摒弃生产线而降低了成本。从产品的全过程分析,3D 打印使一些产品零部件的库存只需要保留电子文档,而无需制造出来存在仓库,一旦有需要,直接打印即可,从而减少库存和物流工作。

3 换热器需求

航空发动机应用的换热器主要实现如下功能^[7-10]:

(1) 冷却冷却空气系统(Cooled Cooling Air)。

通过冷却冷却空气,提高冷却空气的品质来进一步降低热端部件的温度,如图 2 所示。

(2) 间冷回热系统(Intercooled and Recuperated System)。

主流气体通过间冷器与外涵空气进行热交换,空气温度降低后进入高压压气机,增加进气流量,减小压气机的压缩功;同时通过回热环节,回收涡轮出口排气的热量,增大能量的利用率(图 3)。

(3) 预冷系统(Pre-cooling System)。

预冷系统是在常规涡轮发动机的压气机前部加装预冷换热器,冷却进气道中的气流,使气流温度下降,扩展涡轮发动机的可工作范围(图 4)。

航空发动机换热器的设计有如下基本要求:首先要保证发动机的正常工作,其次是本身的良好运转,在此基础上要追求尺寸小、质量轻以及高可靠性,并以最优化的方式来实现动力传动整体结构和性能要求。因此,在换热器设计中,应从结构、能耗、可靠性、运行以及工艺等方面进行要求:

- 换热器结构紧凑、尺寸小、重量轻;
 - 在所有可能出现的负荷及外部条件下,换热器都能可靠地工作并达到发动机工作要求;
 - 满足发动机工作环境下的强度和可靠性要求;
 - 换热器在系统中布置合理,便于安装、拆卸和监测。
- 简单来说,就是轻质、高效、高可靠性、耐高温高压的换热器设计技术。

轻质与高效、高可靠性与耐高温高压从设计本身的

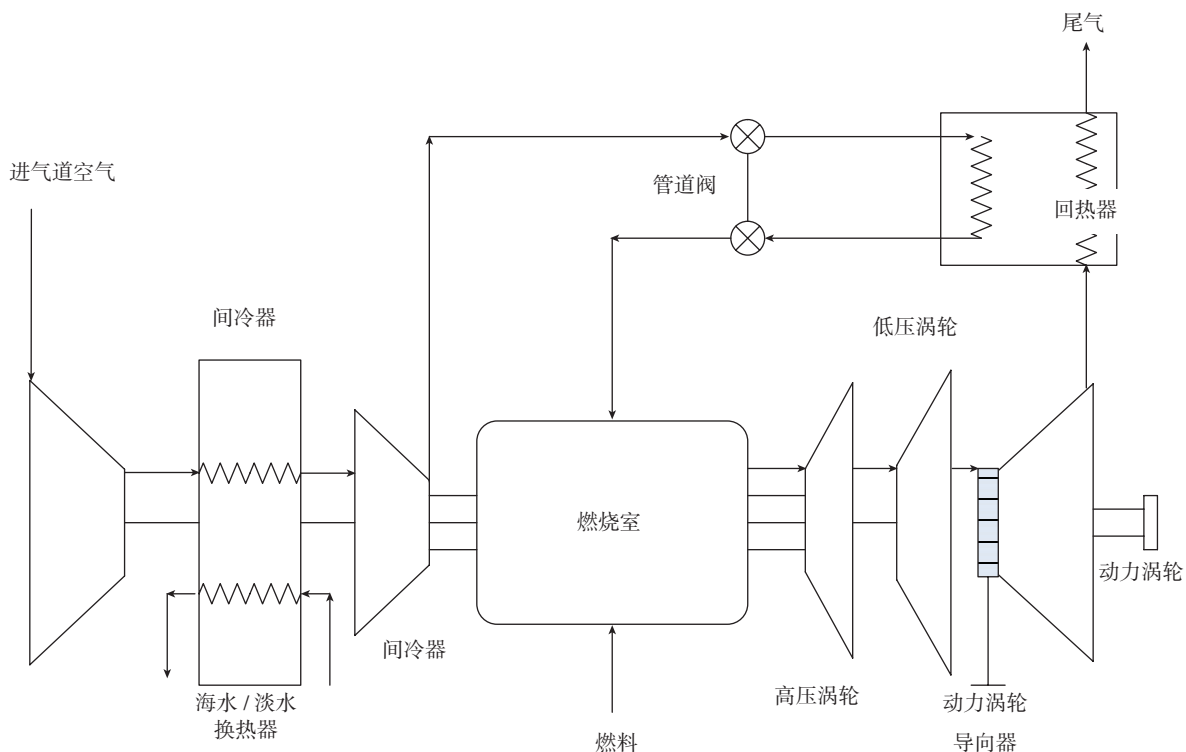


图3 间冷回热系统示意图

Fig.3 Sketch map intercooled and recuperated system

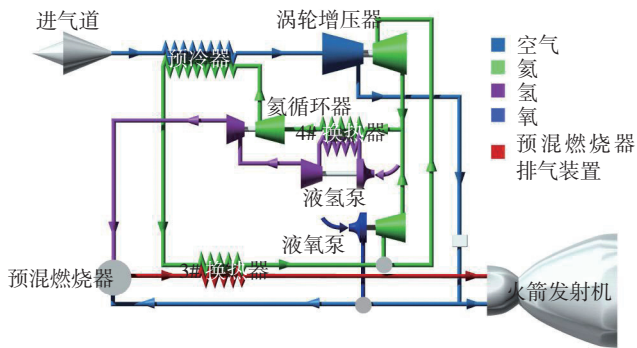


图4 预冷系统示意图
Fig.4 Sketch map pre-cooling system

角度来说的矛盾的,这样的设计要求使 3D 打印技术在航空发动机用换热器的设计制造中得到应用。首先,3D 打印使钛等耐腐蚀、轻质的材料在换热器的加工上成为可能;其次,复杂结构的实现使高效换热器得以加工;最后,一次成形技术解决了传统焊接技术造成的低可靠性问

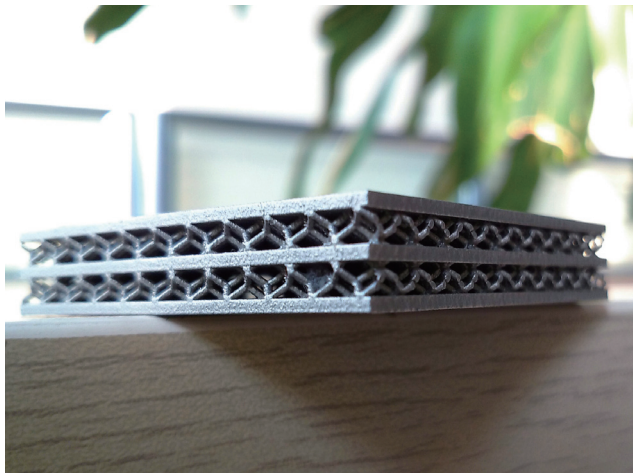


图5 3D打印的空气-空气换热器试件
Fig.5 Air-air heat exchanger sample by 3D printing

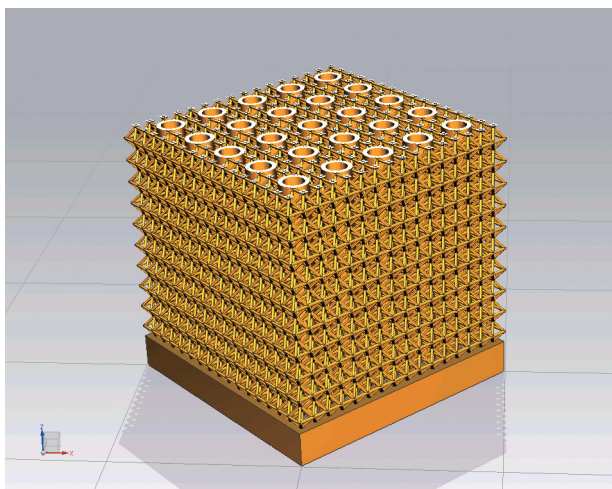


图6 3D打印的空气-燃油换热器试件
Fig.6 Air-fuel heat exchanger sample by 3D printing

题。

可见,3D 打印技术使轻质、高效、高可靠性、耐高温高压的换热器设计生产成为可能,为各种换热器在航空发动机上的大规模应用提供了技术保障。

4 设计实例

按照航空发动机用换热器的设计要求,完成了空气-空气换热器(图5)和空气-燃油换热器(图6)的设计,并应用 3D 打印技术加工了样件。

以上应用 3D 打印技术制造的换热器模型,获得了传统方法不能得到的复杂结构,简化了加工工艺,并减少了过多接口引起的重量和尺寸偏差,可见 3D 打印技术在航空发动机上的应用前景非常广阔。

5 结论

3D 打印技术虽然应用前景广阔,但从技术角度分析,仍有许多不足之处需要完善。未来更好地提高 3D 打印技术的应用范围,还有如下工作需要逐步开展:

- (1) 突破材料的选择性,扩大可应用材料范围,提高应用的适应性;
- (2) 突破尺度限制,增加打印产品体积;
- (3) 突破精确控制技术,实现薄壁件(0.2mm 以下)和精确温控件的加工。

特别感谢西安铂力特激光成形技术公司在换热器 3D 技术加工上的合作探索。

参考文献

- [1] 古良玲,全晓莉. 3D 打印技术在电子元器件研制中的应用. 电子元件与材料,2014,33(1):67-68.
- [2] 张征,马洁萍,涂凯. 3D 打印技术在航空制造领域应用展望. 中国民用航空,2013(10):61-62.
- [3] A A 茹卡乌斯卡斯. 换热器内的对流传热. 北京:科学出版社,1986.
- [4] E.U. 施林德尔. 换热器设计手册. 北京:机械工业出版社,1989.
- [5] 王补宣. 工程传热传质学. 北京:科学出版社,1998.
- [6] 杨世铭,陶文铨. 传热学. 北京:高等教育出版社,1998.
- [7] Parsons F, Meenaksh R, Murthy S N B. Three-fluid fuel-air heat exchanger. ISABE paper 99-7204.
- [8] Ribaud Y. Compact heat exchanger fitted to engines of the inverted type. ISABE 93-7120.
- [9] Saidi A, Sunden B, Eriksson D. Intercoolers in gas turbine systems and combi-processes for production of electricity. ASME paper 2000-GT-0234.
- [10] Yoshida T, Taki M, Mimura F, et al. A new cooling system for ultra high temperature turbines. ISABE 93-7073.

(责编 谷雨)