

激光快速成形技术在发动机上的应用

刘林波 张亮 邓德军

(北京动力机械研究所, 北京 100074)



摘要: 针对激光快速成形技术, 综述其原理、分类以及现阶段发展和应用情况, 分析了激光快速成形在新型发动机上的应用前景和推广应用面临的困难。

关键词: 激光快速成形; 发动机; 铺粉式; 送粉式

Application of Laser Rapid Forming in Engine

Liu Linbo Zhang Liang Deng Dejun

(Beijing Power Machinery Institute, Beijing 100074)

Abstract: The paper introduces the definition, theorem, classification and present development situation of LASER rapid forming and analyzes its potential application prospect in new engine and difficulty of extended application.

Key words: Laser rapid forming; engine; power spreading style; power feeding style

1 引言

近几年来,“3D 打印”号称引领制造业变革的新兴技术,尤其是金属材料的“3D 打印”,受到了国内外航空航天单位的广泛关注。在业内,金属材料的“3D 打印”应用最多的方法为“激光快速成形”,或称为“激光增材(增量)制造”(电子束快速成形也是金属材料“3D 打印”技术的一种,在本文中不做介绍),本文使用“激光快速成形”作为该技术的名称。从目前的发展情况来看,激光快速成形在航空航天、生物医学等领域有着比较好的前景,而航空航天发动机因其复杂结构,将成为该技术重点应用的方向。

2 综述

激光快速成形,是根据数字模型,利用激光熔化金属粉末,层层堆积来生产三维实体的技术。激光快速成形的原理为:在零件数字化模型基础上,将其按一定方向、一定厚度分层,得到一系列二维轮廓数据,采用激光束作为热源,沿二维轮廓扫描、熔化金属粉

末逐层堆积,最终获得组织致密的“近净形”零件。采用激光快速成形技术在一定程度上能够较好地解决传统工艺方法难以加工或加工周期漫长的问题,但仅限于目前已开发材料和一定尺寸的难加工结构件,并非适用于所有零件。

3 分类及特点

按金属粉末的提供方式不同激光快速成形可分为送粉式和铺粉式两类,也分别被称为激光沉积成形(Laser Solid Forming, LSF)和激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)^[1]。其流程分别如下:

送粉式:如图1所示,由左至右,首先在计算机中生成待加工零件的三维模型,该模型可以为理论模型,也可以为施加支撑的工艺模型,其具体形式需根据零件的实际结构确定,然后将该模型按一定角向和厚度分层,在数控机床的带动下,激光束逐层扫描,并将金属粉末同步送入激光光斑内熔化、堆积,最终形成三维实体零件或需进行少量加工的毛坯。

作者简介:刘林波(1964-),高级工程师,精密机械仪器专业;研究方向:航天发动机设计及制造研究。

收稿日期:2013-12-24

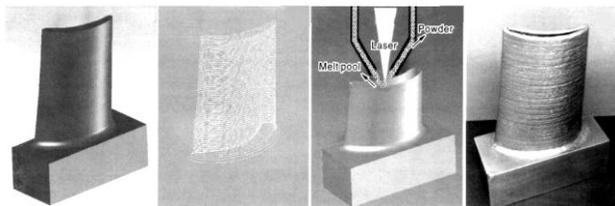


图1 送粉式激光快速成形流程示意图^[1]

铺粉式：如图2所示，与送粉式采用相同的三维建模和分层方式，所不同的是，金属粉末按照设定的层后首先在平台上预置并刮平，根据对应分层的二维轮廓使用激光束扫描熔化粉末，一层截面成形完成后，铺上新的一层材料粉末，按照新的轮廓继续扫描，使金属粉末与上一层截面牢固结合，如此逐层成形出三维实体零件。



图2 铺粉式激光快速成形流程示意图

送粉式成形的零件尺寸大、成形速度快，但对于多数航空航天零件，需进行全面的机械加工才能作为最终产品；铺粉式成形的零件精度高，除有极高精度要求的零件，进行简单的吹砂和抛光处理即可作为最终产品（一般情况下以上两种方式成形的产品均需退火热处理）。

从成形过程的稳定性和成形精度来看，铺粉式优于送粉式：

a. 粉末粒度控制。铺粉式的金属粉末提前预置，可按配比将粒度大小不一的粉末进行混合，以填充间隙，保证致密，而送粉式粉末吹送时无法保证送出粉末的混合比例。

b. 激光扫描路径控制。铺粉式通过控制振镜的反射角度控制光束扫描路径，送粉式使用 CNC 机床直接带动激光头运动，从机械运动幅度方面来看铺粉式的激光扫描显然更稳定。

c. 飞溅控制。铺粉式设备舱内有“吸尘”功能，

能够将成形中产生的飞溅吸出舱外，送粉式舱体大而无法实现此功能，即使小舱体的设备也会受到送粉嘴吹出的气流影响。

d. 粉末流量控制。铺粉式预置粉末厚度可控制在单个粒度范围，送粉式送出的粉末处于复杂的流场环境，稳定的送粉流量及流量与激光功率间的配合极难控制，另外，送粉嘴受到粉末冲击和激光等离子体作用发生磨损或破坏，将直接导致送粉的不稳定。

基于激光快速成形两种方法的特点，送粉式激光快速成形适用于为大尺寸或常规机械加工去料量极大的结构件提供“毛坯”；铺粉式激光快速成形适用于较高精度小尺寸复杂结构件。从发动机的结构特征分析，铺粉式在该方向更有发展前景，主要适合于以下方面应用：

a. 小尺寸部件。目前，低速度和技术上的障碍将激光快速成形限制于相对较小的零部件领域。

b. 预研阶段产品。从预研阶段首次设计的产品快速制造方面，除结构非常简单的零件外，激光快速成形与传统加工方法相比有绝对优势，特别适合新型发动机研制阶段状态多变的重要结构件。

c. 高复杂性产品。从成本和生产周期考虑，结构简单的零件并不适合激光快速成形。目前高复杂性结构产品通常采用锻造或铸造的方法加工初始“坯料”，再经高自由度数控加工系统和电加工系统反复加工，或者在精密铸造的半成品基础上辅以机械加工而成，相比以上方法，激光快速成形有较大优势。

d. 设计思路的变革。每个时代的产品设计都是在当代流行的工艺技术基础上建立的，因为激光快速成形能在制造过程中将零件复杂的三维模型离散为二维图形，将“减”的加工思路转变为“加”，势必在未来高性能发动机的结构上引起设计思路的变革。

4 现状及应用前景

4.1 现有水平

4.1.1 送粉式

成形尺寸：最大可达到 4000mm×3000mm×2000mm；

成形精度：因零件尺寸而异，大尺寸零件成形坯料单边余量 3mm 以上；

材料性能：钛合金（主要为 TA15、TC4）成形经适当热处理后能达到锻件相当水平。

4.1.2 铺粉式

成形尺寸：250mm×250mm×320mm（标准化设备）；

最高成形精度：0.05mm；

最小成形壁厚：0.3mm；

最小孔径：0.1mm；

材料性能：个别牌号的钛合金（主要为TC4）、镍基合金、铝合金、不锈钢粉末成形经适当热处理后能达到锻件相当水平。

4.2 国内外应用现状

自进入 21 世纪以来，美国波音、洛马等公司，法国 SAFRAN 公司，英国罗罗公司，意大利 AVIO 公司等多家世界知名企业，以及多个国家实验室和高校都对该项技术及其在航空航天领域的应用，开展了大量研究工作。美国于 2000 年率先将这一技术实用化，应用目标包括飞机承力结构件、镍基高温合金单晶叶片、发动机燃烧室等。2013 年，美国宇航局采用激光快速成形技术制造了火箭发动机喷射器，并参与完成发动机热试车，与采用传统工艺加工的喷射器并无差异，而前者节约成本达 60%。欧洲宇航防务集团正致力于利用激光快速成形制造出飞机的整个机翼，澳大利亚某机构正致力于使用激光快速成形技术制造航天微型发动机零部件。

西北工业大学、北京航空航天大学自二十世纪九十年代中期即开始致力于激光快速成形技术研究，目前在送粉式激光快速成形方面处于世界领先水平，近期两家高校采用送粉式激光快速成形为大型客机 C919 分别制造了钛合金主挡风窗框和钛合金缘架，单向尺寸 3m 左右。

铺粉式激光快速成形这一方向在国内发展相对较晚，目前西北工业大学、清华大学、哈尔滨工业大学、航空某研究所和无锡飞而康公司所已购置或开发了铺粉式激光快速成形系统，致力于小型复杂结构件的制造工艺研究和产品开发。

总的来说，激光快速成形技术已用于制造产品零件甚至关键结构件，但绝大部分尚处于试验验证阶段。

4.3 在发动机上的应用前景

新型航空航天发动机因其特殊功能和减重的目的，往往需要设计出空间结构极其复杂的零件，具有典型特点的为整体叶轮结构、喷油结构和冷却通道类结构。以上结构不仅内、外部轮廓复杂，且存在空间变化的狭窄细长流道，给加工带来极大的挑战。

针对以上复杂结构，传统的加工方式大致分为两

种：锻造+数控加工和精密铸造+精加工。

a. 对于锻造+数控加工的方法，存在以下困难：粗加工中材料去除量很大，约占到整个锻坯的 70% 左右；闭式流道扭曲度大，粗加工型腔时需从两侧分别加工，至少经历两次装夹，工装及装夹方案复杂；粗加工需采用定轴开粗或五轴开粗的策略，编程及加工过程繁琐；受到几何流道的约束，刀具、刀柄干涉现象严重，需要使用多种特殊刀具，刀具选用、设计及零件加工程序编制困难，另外加工时摆角范围大，干涉区域多，对数控机床要求极高。

b. 对于精密铸造+精加工的方法，存在以下问题：铸造型腔复杂，壁厚小，连接处结构突变，液态合金流动性较差，极易出现因液体充盈不足造成的局部缺肉、气孔、凹陷等问题；铸造涉及液态→固态等一系列相变过程，相变前后材料热物理性能参数有较大差异，体积变化较大，易因变形造成局部工艺余量不足或超差问题；合金材料铸造形成的粗大晶粒和各向异性织构组织，使其整体力学性能差，韧性损失尤其严重；熔模铸造工艺流程复杂，蜡模制备、型壳制备、熔炼浇注、精整修补四大部分工作繁琐，产品制造周期漫长。

c. 与以上两种传统方法比较，铺粉式激光快速成形有以下优势：使用尺寸小于 50 μ m 的细小金属粉末逐层堆积，致密度超过 99.8%，最小成形壁厚可达 0.3mm 以下；与铸造整体成形相比，激光快速成形的逐层堆积不涉及整体冷却变形，尺寸精度可控性强；扫描激光束功率密度高，光斑面积小，整体热输入量小，在激光作用下粉末颗粒经历快速熔化和冷却的过程，形成细小的晶粒组织，力学性能优良；激光增量制造无需制模或制坯，产品制造周期大大缩短；能成形不规则狭长内部流道结构，解脱传统工艺对此种设计思想的禁锢。

因此，激光快速成形技术与新型航空航天发动机研制是相互促进的，一方面，激光快速成形技术解放了设计思想，解决了新型发动机研制上的短板；另一方面，新型发动机的研制为激光快速成形技术提供了很好的平台，促进技术系统提升和工艺完善成熟。激光快速成形技术在航空航天发动机上有很好的应用前景。

4.4 技术难点

虽然激光快速成形技术有传统加工方式无法比拟的优势，但其后续的广泛应用仍面临很大的挑战，

（下转第 14 页）

