

文章编号: 1002-6673 (2010) 05-014-03

金属粉末激光快速成形技术及发展现状

尚晓峰, 韩冬雪, 于福鑫

(沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 金属粉末激光快速成形技术是在快速原型技术和激光熔覆技术基础上发展起来的一项先进制造技术。鉴于它与传统制造相比所具有的突出优点, 各研究机构竞相研究。其中美国激光工程化近净成形 (LENS[®]) 快速制造技术、Lasform[™] 技术和金属直接沉积技术 (DMD) 代表了当今金属粉末激光快速成形技术发展趋势。论文介绍了我校实验室在这方面所做的一些研究工作。

关键词: 激光快速成形; 激光熔覆; 离散/堆积成形; 发展现状

中图分类号: TH-39 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1002-6673.2010.05.006

Metal Powder Laser Shaping Technology and Development Status

SHANG Xiao-Feng, HAN Dong-Xue, YU Fu-Xin

(Department of Mechanical & Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China)

Abstract: Metal powder laser shaping technology which developed on the basis of rapid prototyping and laser cladding technology is an advanced manufacturing technology. Considering its distinguished advantages compared with traditional manufacture, various research institutes compete to research. Among them, Laser Engineering Net Shaping developed by Sandia National Lab of the US, Laser Forming developed by AeroMet company of the US and Direct Metal Deposition developed by Department of mechanical engineering of University of Michigan represent nowadays development tendency of metal powder laser shaping technology. At last, this paper introduces the research of our lab in this field.

Key words: laser rapid forming; laser cladding; dispersed/accumulated forming; development status

0 引言

金属粉末激光快速成形技术, 又称激光直接金属快速成形技术, 它是在快速原型 RP (Rapid Prototyping) 技术和激光熔覆技术基础上发展起来的一项先进制造技术, 能将计算机生成的三维模型直接制造出来, 实现结构复杂、高性能金属零件的无模具快速成形。该技术不仅可用于直接快速制造具有一定机械强度、能承受较大力学载荷的金属零件, 也可用于零件上具有复杂形状、一定深度制造缺陷、误加工或服役损伤的修复和再制造, 以及大量投产前的设计修改, 显著地缩短了产品研

发周期、降低生产成本, 同时能提高材料的利用率、降低能耗^[1,2]。

1 金属粉末激光快速成形技术的基本原理

金属粉末快速成形技术的基本原理, 是先由 CAD 软件产生零件实体模型, 然后由分层软件对 CAD 实体模型按照一定的厚度进行分层切片处理, 获取各截面的几何信息, 然后根据切片轮廓设计出扫描轨迹, 并将其转化成 NC 工作台的运动指令。成形时具有一定功率密度的激光束照射到基材表面形成熔池, 同时金属粉末由送粉器送出, 经送粉管路输送到同轴送粉头并进入熔池形成熔覆层, 根据 CAD 给定的各层截面的路径规划, 在 NC 的控制下使送粉头相对于工作台运动, 将金属材料逐层扫描堆积, 最后制造出金属实体零件^[4]。为防止某些金属在成形的过程中氧化, 以上过程可在一个气氛可控的保护箱中进行, 或采用其它手段来进行保护, 使激光成形过程中的金属不被氧化。金属粉末激光快速成形

收稿日期: 2010-08-20

作者简介: 尚晓峰 (1972-), 男, 辽宁海城人, 博士后, 副教授, 研究生导师。主要从事金属激光快速成形技术研究, 发表论文三十多篇; 韩冬雪 (1985-), 男, 辽宁绥中人, 在读硕士研究生。主要从事激光快速原型与反求工程研究。

原理如图 1 所示^[5]。

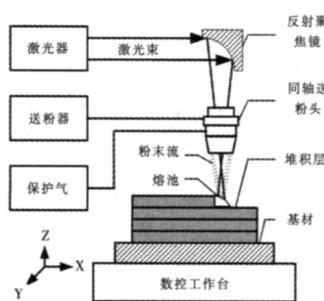


图 1 金属粉末激光快速成形原理
Fig.1 Theory of metallic powder
with laser rapid prototyping

2 金属粉末激光快速成形技术的特点

由于采用离散/堆积成形的思想，与其它传统制造技术相比，金属粉末激光快速成形技术有以下突出优点^[3,5]：①制造过程具有高度的柔性；②生产周期短，加工效率高；③具有很高的设计灵活性，真正意义上实现了数字化、智能化和并行化制造；④成形材料广泛，可实现多种材料以任意方式复合的成形技术；⑤所制造的零件具有较高的综合力学性能，强度高，耐腐蚀性好；⑥应用范围广，不仅可以用于金属零件的快速制造，而且还可用于再制造工程中大型金属零件的立体修复。

3 国内外研究现状

3.1 LENS 成形技术的研究

由美国 Sandia 国家实验室发展名为激光工程化近净成形 (Laser Engineering Net Shaping——LENS[®]) 的快速制造技术，其基本原理是先将 CAD 模型沿高度方向进行水平切片，四个喷嘴将粉末流直接汇聚到喷嘴下方的一个中心点，进入基材上由高能激光束加热熔化形成的熔池中，通过基材相对喷嘴的移动，层层堆积金属并最终形成零件。LENS 系统主要由四个部分组成：连续 Nd:YAG 固体激光器、可调整气体成分的手套箱、多轴数控系统和送粉系统。采用波长为 $1.064\mu\text{m}$ 的 YAG 激光器以利于金属元素对激光热辐射的吸收，使用焦距为 6 英寸的平凸透镜，将激光束聚焦到加工平面上，使能量集中在很小的光斑上，一方面减少了热影响区，另一方面提高加工精度；为了避免加工过程中金属材料与空气中的氧、氮等元素发生反应，整个加工过程均在惰性气氛保护下的手套箱中进行。通过工艺参数的调整，成形件最小特征尺寸可达 0.03 英寸；通过对控制软件进行研究和改进，有效地提高了该技术的加工精度，到 1999 年为止，其零件的加工精度在 X 和 Y 方向已达 0.05mm，Z 轴精度为 0.4mm，表面粗糙度达到 $6.25\mu\text{m}$ 。在送粉方面，通过调节送粉率，逐渐改变粉末的成分，在一个零件中实现了材料成分的变化，可进行功能梯度材料和复合材料的制造。如图 2 所示的样件展示了 Sandia 国家实验室 LENS 技术的制造灵活性。

通过 Sandia 国家实验室与其伙伴公司长期商业化推

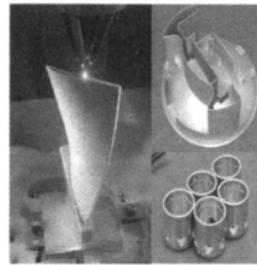


图 2 LENS[®]技术成形的典型零件

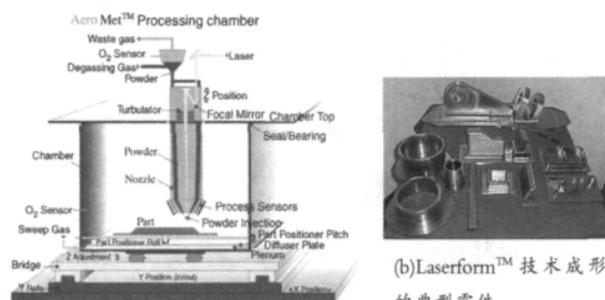


图 3 LENS[®] 850-R 成形装备
Fig.2 The typical parts of
LENS[®] technology forming
Fig.3 The equipment of
LENS[®] 850-R forming

广，至今已推出了三代 LENS[®] 装备，图 3 所示为第三代成形机 850-R，由 1~2kW 的光纤激光器、5 轴联动龙门式数控系统、双料送粉系统和惰性气体手套箱组成，能够实现钛合金、不锈钢和镍基合金等金属材料的快速成形，为了提高成形精度，LENS[®] 装备集成了沉寂高度控制系统和熔池闭环控制系统，通过对成形过程中的热效应和几何效应进行补偿，使零件成形精度得到提高，表面粗糙度可达 $4.68\sim 11.7\mu\text{m}$ ，沉积率为 0.5kg/h 。LENS 装备以其技术先进性和良好的稳定性，在国际市场上已占有一定地位^[6]。

3.2 Laserform 成形技术的研究

美国 AeroMet 公司发展的 Lasform[™] (Laser Forming) 技术是基于约翰·霍普金斯大学、宾州大学和 MTS 公司共同进行的“钛合金的柔性制造”研究^[7-9]，其主攻方向是实现高性能大体积钛合金零件的制造，尤其是大型整体带筋加强结构钛合金零件的快速成形。Lasform[™] 的技术原理与 LENS 相似，如图 4 (a)，该系统采用功率达 14kW 和 18kW 的 CO₂ 激光器为光源，以提高金属粉末的激光沉积速率，而用于保护成形零件不受氧、氮、氢等气体元素侵害的惰性气体保护箱的尺寸也达到了能够制造实用零件的程度，实际使用空间达 $(3\times 0.91\times 0.91)\text{m}$ ，为了进一步提高沉积率，该公司安装的第二台 Lasform[™] 加工系统使用了 30kW 的激光器，在进行 Ti-6Al-4V 激光快速成形时沉积率达到 $0.9\sim 6.8\text{kg/h}$ 。



(a) Laserform[™] 技术原理图

(b) Laserform[™] 技术成形的典型零件

图 4 Laser form[™] 成形技术

Fig.4 The Laser form[™] forming technology

近年, AeroMet 公司生产的三个 TC4 激光快速成形件已获准在实际飞机上使用, 其制造成本降低 20%~40%, 生产周期也缩短 80%。

3.3 DMD 成形技术的研究

美国密歇根大学 Mazumder 等人研究开发了金属直接沉积技术 DMD[®], 它是一种由 CAD 文件驱动的金属沉积方法, 集成了 CAD、CAM、工业激光、粉末冶金技术、计算机数控等多种技术, 能直接制造出近形金属零件。在成形精度控制方面, DMD[®]专门配备有光学反馈控制系统^[10], 其原理如图 5 所示, 通过三个夹角为 120° 的 CCD 摄像机, 从成形件的不同角度来监控熔池信息(包括熔池的形状、温度等), 将实际尺寸与理想尺寸对比和计算, 来调整送粉率、扫描速度和激光功率等工艺参数, 保证成形件质量和精度的稳定性。DMD[®]成形材料的种类范围很广, 包括不锈钢、工具钢、镍基合金以及其它高温合金等, 其成形效率如表 1^[10]所示。

1998 年, 美国 Michigan 大学成立了 POM (Precision Optical Manufacturing) 公司, 专门从事 DMD[®]技术在商业

表 1 DMD 成形效率

Tab.1 The efficiency of DMD forming

项目	参数
沉积率	24~160 cm ³ /h
沉积速度	500~1800 mm/min
光斑直径	1~5 mm
单层厚度	0.1~1.6 mm
成形件硬度	整体硬度达到淬火级
粉末利用率	50%~70% (根据不同零件变化)
对比工艺	数控铣/电火花/磨削

和国防等领域的应用推广工作。

POM 公司开发的最新设备 DMD5000 使用功率达 6KW 的 CO₂ 激光器, 最大扫描速度达到 170mm/s, 加工零件体积范围为 (1×0.5×0.5)m³, 采用 5 轴数控加工中心, 可以灵活沉积金属粉末以成形复杂的功能零件。

3.4 基于 SDM 原理的成形材料及零件的研究

中国科学院沈阳自动化研究所将材料去除加工和堆积加工的原理相结合, 开展了基于形状沉积制造 SDM (Shape Deposition Manufacturing) 原理的金属粉末激光成形技术 MPLS (Metal Powder Laser Shaping) 研究工作,

开发了能同时输送三种不同金属粉末并且粉末比例实时可调的新型送粉器, 构建了附带层面磨削机构的金属零件激光快速成形专用实验系统, 对金属材料激光快速成形过程中温度场、应力场合加工过程中的实时闭环控制系统进行了大量的研究, 研究了不锈钢、镍基合金和钴基

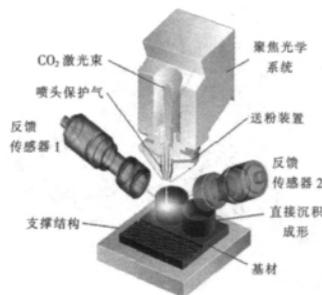


图 5 DMD[®]工艺监控系统
Fig.5 The Process Control System of DMD[®]

合金三种金属材料的加工工艺, 并成功地制备出具有一定复杂外形且能满足直接使用要求的金属零件^[11-13]。

沈阳航空航天大学激光快速成形实验室, 全面系统地研究了金属粉末激光成形 (MPLS) 技术, 并且开发了结构完整、功能完善、可靠性高、可以加工成形全密度金属功能近成形零件的 MPLS 系统, 该系统以 5KW 横流 CO₂ 激光器为基础, 采用单聚焦光路系统在气氛保护箱内进行金属零件的激光快速成形。同时研制了具有良好送粉精度 (相对误差小于 3%), 新一代的载气刮吸式送粉器; 具有良好聚焦性、工作稳定、粉末流量均匀、冷却效率高、使用寿命长的同轴送粉头; 能够在 10min 内获得真空度小于 2×10⁻³Pa 的真空系统, 其能加工零件最大成形尺寸为 (200×200×100)mm, 成形精度达到 0.1mm。以此为基础研究了 MPLS 成套工艺实验方案, 进行了详细全面的工艺试验研究, 并承担了国防科工委等部门的重大科研项目, 取得了一定的成绩。

4 结论

随着激光技术的快速发展和激光器系统成本的降低, 激光加工技术已在汽车、航空、船舶、国防装备等行业发挥着重要作用, 而在众多激光加工技术中, 金属粉末激光快速成形技术以其独特的技术优势和巨大的发展潜力将备受瞩目。

参考文献:

- [1] 黄卫东. 高性能复杂结构致密金属零件的激光快速成形[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 3.
- [2] Anonymous. Laser Forms and Repairs Workpieces[J]. Manufacturing Engineering, 2008, 2.
- [3] 王华明. 航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展[J]. 航空制造技术, 2005, 12.
- [4] 邓琦林, 等. 激光近形制造技术[J]. 电加工, 1999, 6.
- [5] 杨森, 等. 金属零件的激光直接快速制造[J]. 粉末冶金技术, 2002, 4.
- [6] Optomec Corporation. <http://www.optomec.com>. [2009-11-10].
- [7] Arcella F G, Abbott D H, House M A. Rapid laser forming of titanium structures[C]. Proceedings of the Powder Metallurgy World Conference, Granada, Spain, 18~22 October 1998.
- [8] Abbott D H, Arcella F G. Laser forming titanium components[J]. Advanced Materials and Processes, May 1998.
- [9] Arcella Frank, Abbott D H, House M A. Titanium alloy structures for airframe application by the laser forming process. Proceeding of The 41st AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. Alexandria: AIAA2000-1465.
- [10] POM Group, Inc. <http://www.pomgroup.com>. [2009-11-10].
- [11] 张凯, 等. 激光直接快速成形金属材料及零件的研究进展(下)——国内篇[J]. 激光杂志, 2005, 5.
- [12] 尚晓峰, 等. 激光工程化净成形技术的研究[J]. 工具技术, 2004, 1.
- [13] 姜淑娟, 等. 金属粉末激光成形过程中的闭环控制研究[C]. 2007.