

# 基于金属粉末的激光快速成型技术新进展\*

张永忠 石力开 章萍芝 徐 骏

(北京有色金属研究总院 北京 100088)

**摘 要** 金属粉末的激光快速成型技术是集计算机辅助设计、激光熔覆、快速成型于一体的先进制造技术,是传统加工成形方法的重要补充。本文系统介绍了金属粉末激光快速成型的原理、系统组成及最新研究进展,并对其发展前景进行了展望。

**关键词** 金属粉末 激光熔覆 快速成型

**中图分类号**: TH16, TG24, TP13

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1002-185X(2000)06-0361-05

## 1 引 言

快速成型技术(RP, Rapid Prototyping)是从1987年开始发展起来的一种先进制造技术。该技术最初用来制造铸造用模型,后来发展到制造原型零件,主要用于模型或零件的直观检验,其关键是要要求形状准确,而对其力学性能没有太高的要求,所采用的成型材料主要有液体光敏树脂、蜡、纸等替代材料。目前,美国、日本、德国已相继开发出多种快速成型技术,如液体光敏树脂固化、熔融沉积成型、实体叠层制造、分层固化、选择性激光烧结、3D喷射印刷等技术<sup>[1~5]</sup>。该技术在无需任何硬质工模具的情况下,可直接从计算机三维设计制造出实体零件,在机械制造等众多领域已得到广泛应用。

近年来,快速成型技术有了新的发展,已开始在金属材料、陶瓷材料的制备上得到应用,其主要目标是快速制造出满足使用性能的致密的金属零件。

传统的快速成型方法成型金属零件时,多采用树脂包覆的金属粉末作为原材料,通过激光扫描使树脂熔化将金属粉末固结在一起;也可采用喷射粘剂的方法将松散金属粉末粘结成型。在成型后要经过脱粘、浸渗塑料、低熔点金属或铜来加强,可制成镶块用在塑料注射模和压铸模中。如脱粘后经热等静压处理也可制成致密金属零件,但难以保证零件的尺寸精度<sup>[6,7]</sup>。目前,金属零件的快速成型方法主要有间接激光烧结<sup>[8]</sup>、直接激光烧结和液滴喷射沉积<sup>[9]</sup>,其中直

接激光烧结技术是目前快速制备致密金属零件的主要技术。本文将着重介绍基于金属粉末的直接激光烧结技术的最新进展情况。

## 2 成型原理

快速成型技术是一种基于离散/堆积成型原理的新型数字化成型技术。该技术利用CAD软件设计出零件的三维实体模型,然后根据具体工艺要求,按照一定的厚度对模型进行分层切片处理,将其离散化为一系列二维层面,再对二维层面信息进行数据处理并加入加工参数,生成数控代码输入成型机,控制成型机的运动顺序完成各层面的成型制造,直到加工出与CAD模型相一致的原型或零件<sup>[10,11]</sup>。

直接激光烧结技术基于一般快速成型原理,采用中、大功率激光器熔化同步供给的金属粉末或细丝,在沉积基板上逐层堆积而形成金属零件,其实质是计算机控制下的三维激光熔覆。激光束或沉积基板的运动通过实体模型(由CAD产生)经切片分层处理后形成的二维平面信息来控制,零件成型的关键在于精确连续地供应粉末,并控制金属粉末的熔化及随后的凝固过程,保证一定的熔池形状(熔池尺寸小且稳定)和连续的固/液界面,使得成型过程保持连续和一致<sup>[12]</sup>。

## 3 系统组成

金属粉末的激光直接快速成型系统主要由软件

收到初稿日期: 1999-12-09; 收到修改稿日期: 2000-07-26

基金项目: 国家“863”计划(863-715-014-0130)和国家“973”计划资助项目(G2000067205-1)

作者简介: 张永忠,男,1970年生,博士,北京有色金属研究总院复合材料中心,北京100088,电话:010-62014488-2821, E-mail: yzhang@mail.grimm.com.cn

系统、激光器、数控系统及工作台、粉末输送系统及保护气氛装置组成(如图 1)<sup>[13~15]</sup>。

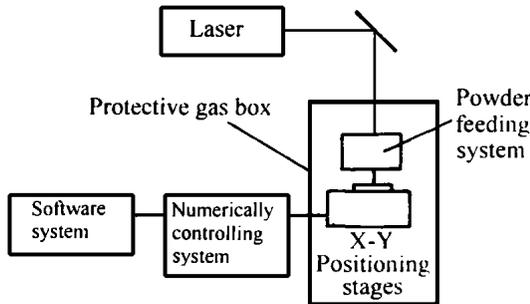


图 1 金属粉末激光快速成型系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser rapid prototyping system based on metallic powders

软件系统主要包括造型、数据处理及工艺监控 3 部分。造型软件负责完成零件的三维 CAD 造型设计, 并生成 STL 文件格式, 目前 RP 所使用的造型软件主要有 Pro/E, Unigraphics, Solidworks, AutoCAD 等, 快速成型也可使用 CT, MRI 扫描数据及三维数字化系统创建的模型数据; 数据处理软件负责对模型的 STL 文件数据进行诊断检验及修复、插补、显示、分层切片, 完成轮廓的偏置、扫描路径生成、填充线的优化、支撑的生成及加入加工参数等; 工艺监控软件负责数据处理所生成的数控信息对成型系统运动的控制, 完成成型制造过程<sup>[16,17]</sup>。

激光器提供成型时金属粉末熔化所需的能量, 目

前主要使用 CO<sub>2</sub> 激光器和 Nb:YAG 固体激光器。金属粉末快速成型所使用激光器的功率一般在几百瓦到几千瓦, 激光功率的大小及金属粉末对激光的吸收将影响成型的速度。数控系统及工作台实现成型时的运动扫描, z 轴的升降, 在工艺监控软件支持下完成对激光器开关、激光功率大小、扫描运动速度、送粉器开关、送粉量及保护气等的控制和调节, 实现激光功率密度、扫描速度、送粉量之间的相互匹配, 完成零件的制造, 为保证成型零件质量, 最好能实现对成型过程的闭环控制<sup>[13,18]</sup>。

稳定可靠的粉末输送系统是金属零件精确成型的重要保证。粉末输送的波动将使成型过程失去平衡, 并最终可能导致零件制备的失败。送粉系统由送粉器及送粉喷嘴组成, 目前送粉器主要是采用等离子喷涂用送粉器, 利用载气来输送粉末, 送粉量通过调节送粉转盘的转速来控制, 具有较高的送粉精度及稳定性, 但由于载气流量大, 粉末运动速度过高, 而降低了粉末的沉积率。针对激光熔覆时粉末流量较低的特点, 已开发出专门的送粉器<sup>[19]</sup>。送粉方式有侧向送粉和同轴送粉, 因同轴送粉能克服因激光束和材料引入的不对称而带来对扫描方向的限制, 而在金属粉末快速成型系统中得到较多采用, 图 2a 为激光头周围多个(一般为 4 个)喷嘴的同轴送粉装置<sup>[20]</sup>, 图 2b 为通过共形截面锥来实现同轴送粉的喷嘴示意图<sup>[21,22]</sup>。一般将同轴送粉装置与激光头固定在一起, 完成 z 轴运动, 且送粉喷嘴与光头(光斑)相对位置可以调节。

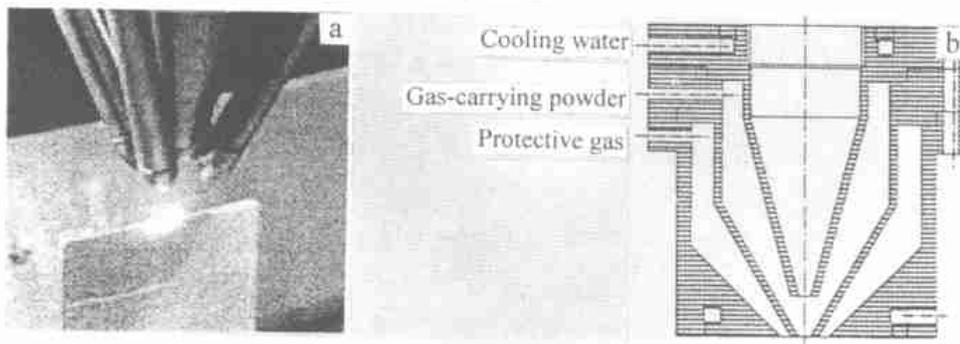


图 2 同轴送粉喷嘴

Fig. 2 Coaxial powder feeding nozzles: (a) Multi-nozzle coaxial powder feeding system and (b) Schematic diagram of a coaxial powder feeding nozzle

保护气氛系统是为防止金属粉末在激光成型过程发生氧化, 降低沉积层的表面张力, 提高层与层之间的浸润性, 同时有利于提高工作安全。为防止金属的氧化, 可采用专门设计的粉末输送系统<sup>[23]</sup>或在一密闭的手操箱内成型(一般要求氧含量低于  $1 \times 10^{-5}$ )<sup>[14,15]</sup>。

### 4 研究进展

快速成型技术经过十几年的发展, 正逐步走向成熟, 在提高零件成型精度、减少制造时间、降低制造成本等方面取得了显著进展。目前, 快速成型在原型

和模型的制造方面, 已成为一种不可替代的先进制造技术。据 Wohlers 统计报道, 到 1998 年全世界已有 3 300 多台快速成型设备投入使用<sup>[24]</sup>。与此同时, 利用快速成型系统进行工模具制造及陶瓷材料的成型也得到了很大发展<sup>[25, 26]</sup>。近年来, 随着大功率激光器的出现, 使得采用快速成型方法直接制造金属零件成为可能, 近几年来, 美国、德国、日本等国家的研究机构及大学在政府资助下对此进行了广泛研究。

美国 Sandia 国家实验室在能源部支持下, 与 Allied Signal Inc., Eastman Kodak Co., Hasbro Inc., Laser Fare Inc. 等合作, 研制开发出一种称作 LENS (Laser Engineered Net Shaping) 的金属零件快速成型技术, 可直接由 CAD 固体模型制造出致密金属零件。该方法采用一种环形粉末喷嘴(图 3a), 克服了因

激光束和材料引入的不对称而带来对扫描方向的限制, 所用激光器为 Nd:YAG 固体激光器, 并采用该方法已成功制造了 316, 304 不锈钢, 625, 690, 718 镍基高温合金, H13 工具钢, Ti-6Al-4V 钛合金以及镍铝金属间化合物零件, 零件致密度达到近乎 100%, 组织具有快速凝固特征, 性能较常规方法略有提高(见表 1)<sup>[12, 27]</sup>。

图 3b 为采用 LENS 制得的 316 不锈钢件, 零件长 150 mm, 沿长度方向按每毫米扭曲 1° 设计, 所制零件未发生变形<sup>[28]</sup>。此外, 还采用该方法制备了 316-304 不锈钢, 304 不锈钢-A 690 合金梯度材料零件, 显示出其在功能梯度材料制备方面的独特优势<sup>[15]</sup>。目前, Optomec Design Company 专门从事该技术的商业开发。

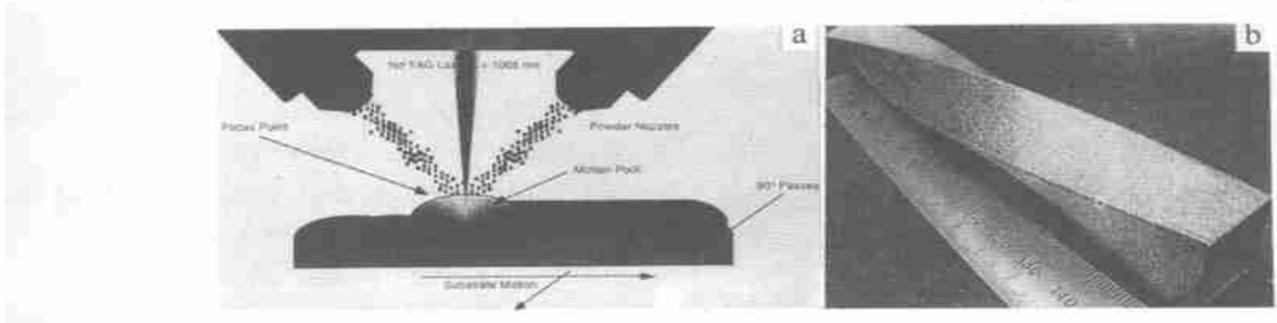


图 3 LENS 沉积过程(a)及所制备的零件(b)

Fig. 3 LENS deposition process(a) and the fabricated part(b)

表 1 LENS 方法所制造拉伸试样的力学性能数据

Table 1 Mechanical properties of LENS manufactured tensile specimens

Material	Plane orientation with respect to tensile direction / $\mu\text{m}$	Ultimate strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
316SS	< 48 Perpendicular	793	448	66
	150~ 47 Perpendicular	793	448	51
	< 47 Parallel	807	593	33
	Annealed bar	586	241	50
Inconel 625	150~ 47 Parallel	931	634	38
	150~ 47 Perpendicular	931	517	37
	Annealed bar	834	400	40

美国 Los Alamos 国家实验室同样在能源部支持下, 与 SyntheMet 合作, 基于与 LENS 相似的原理, 发展了称作 DLF (Directed Light Fabrication) 的金属零件快速成型技术, 进行了铝基、铁基、镍基材料, 铌、钽、钨等难熔金属, 不锈钢、工具钢、银-铜合金, 钛合金, NiAl, MoS<sub>2</sub> 等材料的零件直接成型研究,

性能与常规方法相当<sup>[14, 29~ 31]</sup>。采用 1 kW 左右的 Nd

YAG 激光器和同轴粉末输送系统, 沉积速率 12 cm<sup>3</sup>/h, 表面粗糙度与熔模铸造相当。图 4 为 DLF 方法所制 316 不锈钢薄板的截面组织及沉积示意图, 其锯齿状组织是由于沉积时激光的往复扫描及沉积层的外延生长造成的, 同时可以看出, 所得零件组织致密, 在每一扫描层之间有约 2  $\mu\text{m}$  厚的热影响区。并通过二次枝晶臂间距计算出成型过程中的平均冷速为, 杆: 10<sup>2</sup> K/s, 板: 10<sup>4</sup> K/s<sup>[29]</sup>。目前, SyntheMet 正致力于该技术的商业开发。

美国 AeroMet Corp. 与 John Hopkins U., Penn State U., MTS Systems Corp. 合作, 在 Defense Advanced Research Projects Agency 及 Office of Naval Research 联合资助下, 采用 14 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器和稳定的快速供粉系统, 发展了钛合金 (Ti-5Al-2.5Sn, Ti-6Al-4V) 的柔性制造技术, 其工作空间为 3 m  $\times$  3 m  $\times$  1.2 m, 产品达到近终形, 成份和力学性能均达到 ASTM 标准。采用该系统可进行大型钛合金结构件的快速制造, 可显著降低制造时间及成本, 同时可制备功能梯度材料及进行大型金属零件的修复<sup>[32]</sup>。

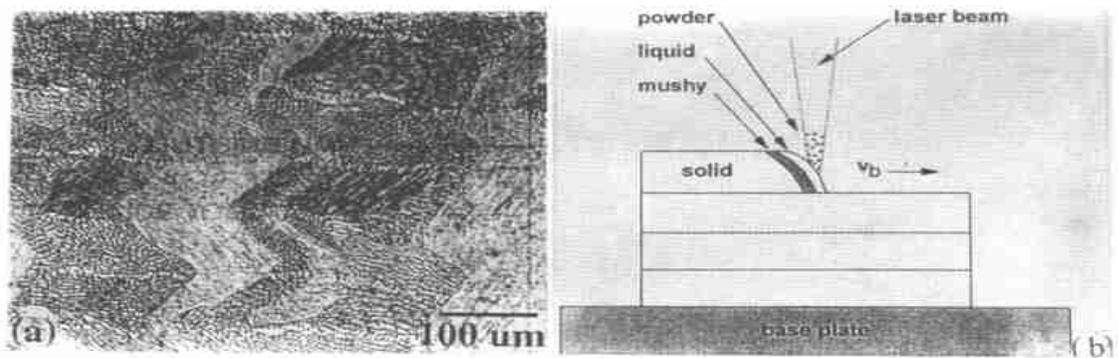


图4 DLF方法所制316不锈钢薄板的截面组织 (a)及沉积示意图 (b)

Fig.4 Cross-sectional microstructure of the type 316 stainless steel plate fabricated by DLF (a) and schematic of the DLF process (b)

Stanford 大学将去除法和添加法结合在一起, 形成自己的形状沉积制造技术 (Shape Deposition Manufacturing), 所用材料包括成形材料和支撑材料, 所成型的零件具有很高的精度<sup>[32]</sup>。此外, University of Central Florida, University of Michigan, 德国的 Fraunhofer Institute for Production Technology, University of Birmingham 等在政府资助下, 研究了不锈钢、H13 工具钢、镍基合金、金属间化合物、生物陶瓷、复合材料以及功能梯度材料零件的近形制造<sup>[33~35]</sup>。

## 5 展 望

综上所述, 金属粉末的激光快速成型技术集计算机辅助设计、激光熔覆、快速成型于一体, 在无需任何硬质工模具或模型的情况下, 能快速制备出不同材料的复杂形状零件, 缩短制造周期, 增强产品竞争优势, 特别有利于复杂形状、多品种、小批量零件的生产。所成型零件致密度高, 具有快速凝固组织特征, 能满足直接使用要求, 在航天器件、飞机发动机零件及武器零件的制备上具有广阔的应用前景。此外, 还可以通过改变成型材料, 得到不同部位由不同材料组成的零件, 与材料设计相结合, 可发展材料的智能制备系统。我国清华大学、西安交通大学、华中理工大学、北京隆源自动成形公司等相继开展了快速成型理论、工艺方法、设备、软件、材料等方面的研究, 并在工业造型设计、新产品样件制造、快速注塑模具及压铸模制造中得到应用, 但采用快速成型方法直接制备致密金属零件方面的工作还没有真正开展, 因此需大力加强对该技术的研究。

### 参考文献 References

- Cox G M A. *Foundryman* [J], 1996; (10): 331~ 337
- Stephen J *et al*. *The International Journal of Powder Metallurgy* [J], 1997; 33(6): 37~ 44
- William S R E *et al*. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 1996; 61: 173~ 178
- Paul B K, Baskaran S. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 1996; 61: 168~ 172
- Huang Shuhuai (黄树槐) *et al*. *China Mechanical Engineering* (中国机械工程) [J], 1997; 8(5): 8~ 12
- Phan D T, Dimov S, Lacan F. *Proc Instn Mech Engrs* [J], 1998; 212B: 269~ 277
- Luca Luca, Settineri Luca, Gatto Andrea. *Proc PRICM 3* [C]. USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1998: 1 631~ 1 636
- Suman Das *et al*. *JOM*, 1998; (12): 17~ 20
- Tseng A A, Lee M, Zhao B. *Proc PRICM 3* [C]. USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1998: 1 611~ 1 618
- Yan Yongnian (颜永年), Zhang Wei (张伟), Lu Qingpin (卢清萍). *China Mechanical Engineering* (中国机械工程) [J], 1994; 5(4): 64~ 66
- Pacabs P. *Stereolithography and Other RP&M Technologies: From Rapid Prototyping to Rapid Tooling* [M]. Fairfield, NJ: ASM E Press, 1995
- Keicher D M, Smugersky J E. *JOM* [J], 1997; (5): 51~ 54
- Mazumder J, Schifferer A, Choi J. *Mat Res Symp Proc* [J], 1999; 542: 51~ 63
- Lewis G K, Milewski J O, Thomas D B. *DE 98000262/XAB* [R], 1998
- Schlienger E, Dimos D, Griffith M *et al*. *DE 98005030/XAB* [R], 1998
- Ensz M T, Griffith M L, Hawell L D. *DE 98006168/XAB* [R], 1998
- Thomas D J, Lewis G K, Nemec R B. *DE 96001379* [R], 1996
- Grenaud M *et al*. *Surface Engineering* [J], 1996; 12

- (3): 251~ 259
- 19 Grunenwald B *et al*. *ICAL EO 93-Laser Materials Processing* [C]. Bingham: SPIE-International Soc Optical Engineering, 1994: 934~ 944
- 20 Hofmeister W *et al*. <http://www.tms.org/pubs/journals/IOM/9907/Hofmeister/Hofmeister-9907.html> [EB]
- 21 Murphy M, Lee C, Steen W M. *ICAL EO 93-Laser Materials Processing* [C]. Bingham: SPIE-International Soc Optical Engineering, 1994: 882-892
- 22 Freneaux O *et al*. *US Patents* 5418350 [P]
- 23 Jolys P, Lagain P. *US Patents* 5111021 [P]
- 24 Wholers Terry T. *Rapid Prototyping & Tooling, State of the Industry (1998 Worldwide Progress Report)* [R]. Wholers Associates, 1998
- 25 Link G R *et al*. *Materials and Manufacturing Processes* [J], 1998; 13(2): 263~ 274
- 26 Gao Ruiping (高瑞平), Wu Houzheng (吴厚政). *Materials Review (材料导报)* [J], 1998; 12(4): 13~ 17
- 27 Keicher D M *et al*. *SPIE* [J], 1993: 91~ 97
- 28 Schlienger E *et al*. *PRICM 3* [C]. USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1998: 1 581~ 1 586
- 29 Thomas D J, Lewis G K, Milewski J O, Nemec R B. *Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference* [C]. Nice, France, 1998: 1 205~ 1 210
- 30 Lewis G K, Nemec R B, Milewski J O, Thomas D J. *DE98001532/XAB* [R], 1998
- 31 Milewski J O, Thomas D J, Fonseca J C, Lewis G K. *Materials and Manufacturing Processes* [J], 1998; 13(5): 719~ 730
- 32 Abbott D H, Arcella F G. *Advanced Materials & Processes* [J], 1998; (5): 29~ 30
- 33 Link G R, Fessler J, Nickel A, Prinz F. *Materials and Manufacturing Processes* [J], 1998; 13(2): 263~ 274
- 34 Sankaranarayanan S, Guo W, Kar A. *Materials and Manufacturing Processes* [J], 1998; 13(4): 537~ 554
- 35 Mazumder J *et al*. *JOM* [J], 1997; (5): 55~ 60

## The Newest Advance in Laser Rapid Forming of Metallic Powders

Zhang Yongzhong, Shi Likai, Zhang Pingzhi, Xu Jun  
(General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088)

**Abstract** Laser rapid prototyping based on metallic powders is a new manufacturing technology, which combines with computer aided design, laser cladding and rapid prototyping. The deposition mechanism, deposition system as well as the newest advance in this technology are presented. Some prospects are also predicted.

**Key words** metallic powder, laser cladding, rapid prototyping

**Biography:** Zhang Yongzhong, Ph. D., Center for Composites, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, Tel: 0086-10-62014488-2821, E-mail: yzhang@mail.grimm.com.cn