

# 快速成形技术及其应用

## Rapid Prototyping Technology and Its Application

中国船舶重工集团公司第七二五研究所 张文毓



张文毓

毕业于西北工业大学金属材料及其热处理专业,高级工程师。现主要从事情报研究工作。

快速成形(Rapid Prototyping, RP)技术突破了传统的加工模式,是近20年制造技术领域的一次重大突破。快速成形技术与科学计算可视化和虚拟现实等技术相结合,为设计者、制造者与用户之间提供了一种可测量、可触摸的新手段。快速成形技术可以自动、快速、直接、精确地将设计思想转化为具有一定功能的原型或直接制造零件(模具),有效地缩短了产品的研发周期,是提高产品质量、缩减产品成本的有力工具。它的核心是基于数字化的新型成形技术。快速成形技术对制造企业的模型、原

快速成形技术与科学计算可视化和虚拟现实等技术相结合,为设计者、制造者与用户之间提供了一种可测量、可触摸的新手段。快速成形技术可以自动、快速、直接、精确地将设计思想转化为具有一定功能的原型或直接制造零件(模具),有效地缩短了产品的研发周期,是提高产品质量、缩减产品成本的有力工具。

型及成形件制造方式正产生深远的影响<sup>[1]</sup>。

### 快速成形技术及其特点

RP系统可分为两大类:基于激光或其他光源的成形技术,如立体光造型(Stereo Lithography, SL)、迭层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)、选择性激光烧结(Selected Laser Sintering, SLS)、形状沉积制造(Shape Deposition Manufacturing, SDM)等;基于喷射的成形技术,如熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)、三维打印制造(Three Dimensional Printing, 3DP)等。RP的特点是技术集成度高和生产柔性度高<sup>[2]</sup>。

### 国内外快速成形技术现状

#### 1 国外快速成形技术现状

美国是世界上最重要的RP设

备生产国,其RP发展水平及趋势基本代表了世界的RP发展水平及趋势。

#### 1.1 立体光造型

3DSystems公司推出的SLA27000机型扫描速度可达9.52m/s,层厚最小可达0.025mm。AUTOSTRAD公司(日本)开发了以680nm左右波长半导体激光器为光源的RP系统及针对该波长的可见光树脂。提供光固化树脂的有瑞士Ciba公司、日本旭电化公司、美国Dupont公司等。

#### 1.2 迭层实体制造

Helisys公司研制出多种LOM工艺用的成形材料,可制造用金属薄板制作的成形件。该公司还与Dayton大学合作开发基于陶瓷复合材料的LOM工艺。苏格兰的Dundee大学使用CO<sub>2</sub>激光器切割薄钢板,使用焊料或粘接剂制作成形。日本Kira公

司 PLT2A4 成形机采用超硬质刀具切割和选择性粘接的方法制作成形件。澳大利亚的 Swinburn 工业大学开发了用于 LOM 工艺的金属-塑料复合材料。

### 1.3 选择性激光烧结

DTM 公司推出系列 Sinterstation 成形及多种成形材料,其中 Somos 材料具有橡胶特性,耐热、抗化学腐蚀,用该材料制造出了汽车上的蛇形管、密封垫等柔性零件。EOS 公司研制了 PA3200GF 尼龙粉末材料,用其制作的零件具有较高的精度和表面粗糙度。

### 1.4 熔融沉积制造

Stratasys 公司推出 FDM 系列成形机,可使用 2 个喷头同时造形,制作速度快。该公司推出的使用热塑性塑料的 Genisys 成形并开发出水溶性支撑材料,解决了复杂及小型孔洞中的支撑材料难以去除的问题。

### 1.5 三维打印

美国的 Z Corp 与日本的 Riken Institute 研制出基于喷墨打印技术的、能制作出彩色原型件的 RP 设备。该系统采用 4 种不同的颜色,能产生 8 种不同的色调,原型件可表现出三维空间内的热应力分布情况,切割开原型即可发现原型内的温度和应力变化情况,这对于原型的有限元分析尤其实用。荷兰的 TNO 和德国的 BMT 也在研究 RP 彩色制造技术。

美国 Sanders Prototype Inc 基于热熔金属喷射技术的 Pattern Master 是制作速度最快的 RP 设备之一。制作范围为 300mm × 150mm × 220mm,用户可实时制作原型、验证设计,随后即可得到成形件。成形件的表面精度为 0.08~0.16mm。

三维打印(Three Dimensional Printing, 3DP)快速成形技术是一种基于微喷射原理,从喷嘴喷射出液态微滴,按一定路径逐层打印(堆积)成形的 RP 技术。3DP 被认为是 RP 行业中最有生命力的新技术之一,具

有良好的发展潜力和广阔的应用前景。在生物医学工程、制药工程和微型机电制造等领域有着广阔的应用前景。

### 1.6 其他 RP 技术

美国 Michigan 的 Precision Optical Manufacturing (POM)公司正在研制直接金属成形(Direct Metal Deposition, DMD)技术,用激光融化金属粉末能一次制作出质地均匀、强度高的金属零件。

由美国国家航空航天局(NASA)资助而开发的精密 RP 设备可用来加工航空、医疗等领域用的精密零件,制造尺寸范围为 450mm × 300mm × 300mm,零件的细微特征可小于 12 μm,表面精度小于 1 μm,售价为 150000 美元左右。

德国的研究机构则利用 SL 与真空注塑相结合制造微陶瓷零件,精度为 0.1mm。Oxford 大学和 Ford Motor 公司正研制通过在低成本的陶瓷模具上喷射熔融的合金钢而制作大型零件的 RP 设备, Ford 公司宣称该新型喷射成形工艺将缩短产品研发的工序(从 12 个工序到 5 个工序)和时间(从 15~25 周到 3~5 周)。

### 1.7 RP 软件

RP 软件主要具备 CAD 模型数据处理及成形机控制功能,它对成形零件的精度、系统的性能等方面都有很大影响。几乎每一套商用 RP 系统都有自己的 RP 软件。因此,市场上的 RP 软件多种多样<sup>[3]</sup>。

## 2 国内快速成形技术现状

国内有多所高校自 20 世纪 90 年代初开始进行 RP 技术的研究开发。清华大学主要研究 RP 方面的现代成型学理论、SSM (Slicing Solid Manufacturing)、FDM 工艺,并开展了基于 SL 工艺的金属模具的研究;华中科技大学研究 LOM 工艺,推出了 HRP 系列成形机和成形材料;西安交通大学开发出 LPS 和 CPS 系列的光固化成形系统及相应树脂, CPS

系统采用紫外灯为光源,成形精度 0.2mm。

香港较内地 RP 技术起步较早,香港生产力促进局和香港科技大学、香港理工大学、香港城市大学等都拥有 RP 设备,但其重点是 RP 技术应用与推广而不是研制 RP 设备。台湾大学拥有 LOM 设备,台湾各单位及军方安装多台进口 SL 系列设备。

目前国内在 RP 技术的研究应用上存在着研究队伍比较薄弱,资金投入有限,应用普及范围不够,没有统一协调的管理机制等缺陷<sup>[4]</sup>。

## 快速成形技术的发展

快速成形制造(RPM)技术正向着 2 个研究方向深入发展:一个是零件直接制造的方向,称之为快速制造(RM)技术;另一个是与生命科学技术相结合,称之为生物制造(BM)技术。当前, RM 和 BM 技术均展现出广阔的发展前景,为 RPM 开辟了新的应用领域。最近随着新材料技术、新工艺及信息化等方面的进步,许多新快速成型制造技术不断涌现并应用在各领域,主要出现在快速模具、纳米制造、仿生制造和集成制造等领域<sup>[5]</sup>。

### 1 开发概念模型机或台式机

目前, RP 技术向 2 个方向发展:工业化大型系统,用于制造高精度、高性能零件;自动化的桌面小型系统,此类系统称为概念模型机或台式机,主要用于制造概念原型。开发小型 RP 设备,并极有可能进入家庭。美国通用汽车公司也计划为其每位工程师配备一台此类设备。采用桌面 RP 系统制造的概念原型,可用于展示产品设计的整体概念、立体形态布局安排,进行产品造型设计的宣传,作为产品的展示模型、投标模型等使用。

### 2 开发新的成形能源

SL、LOM、SLS 等快速成形技术大多以激光作为能源,而激光系统

(包括激光器、冷却器、电源和外光路)的价格及维护费用昂贵,致使成形件的成本较高,于是许多 RP 研究集中于新成形能源的开发。目前已有采用半导体激光器、紫外灯等低廉能源代替昂贵激光器的 RP 系统,也有相当多的系统不采用激光器而通过加热成形材料堆积出成形件。

### 3 开发性能优越的成形材料

RP 技术的进步依赖于新型快速成形材料的开发和新设备的研制。发展全新的 RP 材料,特别是复合材料,如纳米材料、非均质材料、其他传统方法难以制作的复合材料已是当前 RP 成形材料研究的热点。目前国外 RP 技术的研究重点是 RP 成形材料的研究开发及其应用,美国许多大学里进行 RP 技术研究的科技人员多数来自材料和化工专业。

### 4 研究新的成形方法与工艺

在现有的基础上,拓宽 RP 技术的应用,开展新的成形技术的探索。新的成形方法层出不穷,如三维微结构制造、生物活性组织的工程化制造、激光三维内割技术、层片曝光方式等。对于 RP 微型制造的研究主要集中于 RP 微成形机理与方法、RP 系统的精度控制、激光光斑尺寸的控制以及材料的成形特性等方面。目前制作的微零件仅是概念模型,并不能称之为功能零件,更谈不上微机电系统(MEMS)。要达到 MEMS 还需克服很多的问题,如随着尺寸的减小,表面积与体积之比相对增大,表面力学、表面物理效应将起主导作用;微摩擦学、微热力学、微系统的设计、制造、测试等。

电弧喷涂成形是新近发展起来的一项重要金属快速成形技术。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(Laser Direct Metal Rapid Prototyping and Manufacturing, LDMP)是快速成形技术要实现的最重要目标之一,能直接或间接制造具有完全使用功能

的金属零件和模具,已成为快速成形技术发展的必然趋势<sup>[6]</sup>。

### 5 集成化

生物科学、信息科学、纳米科学、制造科学和管理科学是 21 世纪的 5 个主流科学,与其相关的五大技术及其产业将改变世界,制造科学与其他科学交叉是其发展趋势。RP 与生物科学交叉的生物制造、与信息科学交叉的远程制造、与纳米科学交叉的机电系统等都为 RP 技术提供了发展空间。并行工程(CE)、虚拟技术(VT)、快速模具(RT)、反求工程(VR)、快速成形(RP)、网络(Internet、Intranet)相结合而组成的快速反应集成制造系统,将为 RP 的发展提供有力的技术支持<sup>[7]</sup>。

## 快速成形技术的应用

目前,快速成形技术已在航空航天、工业造型、机械制造(汽车、摩托车)、军事、建筑、影视、家电、轻工、医学等领域得到了广泛应用。

### 1 在航空航天技术领域的应用

在航空航天领域中,空气动力学地面模拟实验(即风洞实验)是设计性能先进的天地往返系统(即航天飞机)所必不可少的重要环节。该试验中所用的模型形状复杂、精度要求高、又具有流线型特性,采用 RP 技术,根据 CAD 模型,由 RP 设备自动完成实体模型,能够很好地保证模型质量<sup>[8]</sup>。

对航空、航天、国防、汽车等制造行业,其基础的核心部件大多是非对称的,具有不规则自由曲面或内部含有精细结构的复杂金属零件(如叶片、叶轮、进气歧管、发动机缸体、缸盖、排气管、油路等),其模具制造过程难度非常大,因此迫切需要 RP 技术在快速制模方面发挥更大的优势。利用快速成形技术直接或间接制造铸造用消失模、消失模凹模、铸造模样、模板、铸型、型芯或型壳等,然后结合传统铸造工艺,快捷地制造金属

零件。

### 2 在新产品造型设计过程中的应用

快速成形技术为工业产品的设计开发人员建立了一种崭新的产品开发模式。运用 RP 技术能够快速、直接、精确地将设计思想转化为具有一定功能的实物模型(样件),这不仅缩短了开发周期,而且降低了开发费用,也使企业在激烈的市场竞争中占有先机。

### 3 在机械制造领域的应用

由于 RP 技术自身的特点,使得其在机械制造领域内获得广泛的应用,多用于制造单件、小批量金属零件的制造。有些特殊复杂制件,由于只需单件生产或少于 50 件的小批量,一般均可用 RP 技术直接进行成型,成本低、周期短。

### 4 在模具制造中的应用

目前的快速制模方法大致有间接制模法和金属直接制模法。常用的快速制模方法有软模、桥模和硬模。

软模(Soft Tooling)通常指的是硅橡胶模具。用 SLA、FDM、LOM 或 SLS 等技术制作的原型,再翻成硅橡胶模具后,向模中灌注双组份的聚氨酯,固化后即得到所需的零件。

桥模(Bridge Tooling)通常指的是可直接进行注塑生产的环氧树脂模具。采用环氧树脂模具与传统注塑模具相比,成本只有传统方法的几分之一,生产周期也大大减少。

硬模(Hard Tooling)通常指的是用间接方式制造金属模具和用快速成形直接加工金属模具。目前有用 SLA、FDM 和 SLS 方法加工出蜡或树脂模型,利用熔模铸造的生产金属零件;还有利用 SLS 方法,选择合适的造型材料,加工出可供浇铸的铸造型腔。

多年来金属直接成型和快速制模技术,主要是选择性激光烧结(SLS)直接制作金属模具。

这种烧结件往往都是低密度的

多孔状结构,可将低熔点相的金属渗入后直接形成金属模具。

用 SLA、SLS、FDM 或 LOM 方法加工熔模铸造中的蜡模,这是目前生产金属零件和金属模具最主要的途径之一。对快速造型得到的原型表面进行特殊处理后代替木模,直接制造石膏型或瓷型,或是由 RP 原型经硅橡胶模过渡转换得到石膏或陶瓷型,再由石膏型或陶瓷型浇注出金属模具。这也是行之有效的方法之一<sup>[8]</sup>。

## 5 激光快速成形技术的应用

激光快速成形(Laser Rapid Prototyping, LRP)是将 CAD、CAM、CNC、激光、精密伺服驱动和新材料等先进技术集成的一种全新制造技术。与传统制造方法相比具有原型的复制性、互换性高;制造工艺与制造原型的几何形状无关;加工周期短、成本低,一般制造费用降低 50%,加工周期缩短 70% 以上;高度技术集成,实现设计制造一体化。

近期发展的 LPR 主要有:立体光造型(SLA)技术、选择性激光烧结(SLS)技术、激光熔覆成形(LCF)技术、激光近形(LENS)技术、激光薄片叠层制造(LOM)技术、激光诱发热应力成形(LF)技术及三维印刷技术等。

(1) 立体光造型(SLA)技术,又称光固化快速成形技术。美国、日本、德国、比利时等都投入了大量的人力、物力研究该技术,并不断有新产品问世。我国西安交通大学也研制成功了立体光造型机 LPS600A。目前,全世界有 10 多家工厂生产该产品。

(2) 选择性激光烧结(SLS)技术,与 SLA 技术很相似。在汽车模具制造中应用,美国德克萨斯州立大学研究的 SLS 技术已由美国 DTM 公司商品化。目前该公司已研制出 SLS2000 系列第三代产品。

(3) 激光熔覆成形(LCF)技术,

其工作原理与其他快速成形技术基本相同,区别在于激光熔覆成形能制成非常致密的金属零件,其强度达到甚至超过常规铸造或锻造方法生产的零件,因而具有良好的应用前景。

(4) 近形(LENS)技术,将 SLS 技术和 LCF 技术相结合并保持了这 2 种技术的优点。

(5) 激光薄片叠层制造(LOM)技术,是一种常用来制作模具的新型快速成形技术。LOM 技术制作冲模,其成本约比传统方法节约 1/2,生产周期大大缩短。用来制作复合模、薄料模、级进模等,经济效益也甚为显著。技术在国外已经得到了广泛的使用。

(6) 激光诱发热应力成形(LF)技术,原理是基于金属热胀冷缩的特性,即对材料进行不均匀加热,产生预定的塑性变形。德国学者 M.Geiger 及 F.Vollertsen 等在激光成形与其他加工方法的复合化加工等方面进行了大量研究,目前该技术已被运用于汽车覆盖件的柔性校平和其他异形件的成形等<sup>[11]</sup>。

其他应用有:激光快速成形技术在功能梯度材料制备上的应用;金属材料激光表面改性与高性能金属零件激光快速成形技术的应用。基于快速凝固新材料合成与制备的激光表面合金化及激光熔覆表面改性新技术,是提高钛合金等航空金属材料及其高温运动副零部件高温耐磨耐蚀等高温性能的最有效方法之一。

国外金属零件激光直接快速成形技术的研究包括激光工程化净成形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)成形工艺的研究;激光成形(Laser Forming, Lasform)技术成形工艺的研究;直接光学制造(Directed Light Fabrication, DLF)技术成形工艺的研究;形状沉积制造技术(Shape Deposition Manufacturing, SDM)成形工艺的研究;直接金属沉积技术(Direct Metal

Deposition, DMD)成形工艺的研究;控制金属堆积技术(Controlled Metal Buildup, CMB)成形工艺的研究;激光辅助制造工艺(Laser Aided Manufacturing Process, LAMP)成形工艺的研究。金属零件激光直接快速成形工艺技术在国际上的广泛应用和迅猛发展,展现了该技术的广阔发展前景,代表了 RP 技术发展的方向<sup>[12]</sup>。

国内金属零件激光直接快速成形技术的研究包括基于 LENS 和 DLF 原理的成形工艺的研究;基于 DMD 原理的成形工艺的研究;基于 SDM 原理的成形工艺的研究;其他激光直接成形工艺的研究。激光熔覆直接快速制造技术将选择性激光烧结技术和激光熔覆技术相结合,能快速成形全密度高性能的金属功能零件,以其独特的优势正引起研究人员和业界人士越来越广泛的关注,具有极其广阔的市场需求与应用前景<sup>[13]</sup>。

激光快速成形技术的最新进展,主要包括金属零件直接成形技术、微纳激光三维成形技术、激光直写三维堆积技术、复合材料光固化成形技术等。

## 结束语

快速成形技术是一种具有广泛应用前景的正在不断完善的高新技术。随着市场竞争的日趋激烈,该技术将会被越来越多的企业所采用,对企业的发展,发挥越来越重要的作用,并将给企业带来巨大的经济效益。同时,快速成形技术作为一门多学科交叉的专业技术,其本身的发展,也将推动相关技术、产业的发展。

本文共有参考文献 13 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)