快速原型技术及其在模具中的应用

机械工业发展基金会（100823） 丁雪苇
机械科学研究院（100044） 单忠德

TG16 8

自美国 3D Systems 创始人 Cahrles Hull 于 1984 年在 San Garbriel CA. 设计了世界上第一个基于离散/堆积原理的 RP 装置起至今已有 19 年。快速原型技术（Rapid Prototyping，简称 RP）已从获得原型（Prototypes）朝着快速制造（Rapid Manufacturing，简称 RM）获得零件/模具（Final Parts、End - use Parts、Functional Parts）、实现产品批量定制的方向发展。

一、快速原型技术

1. 快速原型技术的定义与分类

快速原型技术是指通过特殊加工工艺实现的一种设计的物理模型。通过依据三维 CAD 模型数据、CT 和 MRI 扫描数据或由三维实物数字化系统创建的数据，通过各种使能方法，把液体、粉末或者薄片等形态的材料堆积起来制造物理实物。可用一句话表示：RP 技术是 CAD 模型直接驱动的任意复杂三维实体的制造方法。

快速原型技术有很多不同种类的分类方法，目前不断还有许多 RP 新工艺在推出。从使能的角度分析，RP 技术可以分为两大类：①基于激光技术（Laser Technology），例如：激光立体光刻（SL）、分层实体制造（LOM 或 SSM）、激光选区烧结（SLS）与形状沉积制造（SDM）等。②基于微滴喷射技术（Droplet Jetting Technology），例如：熔融沉积制造（FDM 或 MEM）、三维印刷（3DP、MJM）、多相喷射沉积（MJD）、冲击微粒制造（BPM）与实体磨削固化（SGC）等。

2. 快速原型技术的发展现状

为适应制造业的需要，RP 设备由通用型向概念型、生产型和专用型发展，RP 材料向最终零件的材料方向发展，RP 成形速度不断提高，功率不断加大，如美国 3D - SYSTEM 公司的 SLA 系列设备的功率增加了 16 倍，SLA5000 的成形速度是 SLA500 的两倍多，SLA7000 又是 SLA5000 的 8 倍多。

概念型 RP 设备是指利用 RP 工艺制造用于产品设计、测试或者装配等的原型，而不生产最终产品的设备。概念型 RP 设备主要特征是成形速度快、体积小（桌面办公设备）、价格便宜、运行成本低、操作、维护简单，适应于办公环境。所成形的零件主要用于形状、装配、色彩等外观设计校验。美国 Stratasys 公司和 Sanders Prototype 公司推出了各自的桌面系统。目前世界上已经开发的概念型设备如表 1。

生产型 RP 设备是指成形的零件可以直接用

三、863 中心提供的服务

国家 863 计划材料表面工程技术研究开发中心为科技部和深圳市政府批准，由国家 863 计划高技术新材料专家委员会和深圳市经济贸易局共同组建的国家级研发中心。中心现有各种离子注入、PVD、PCVD、深冷处理、微弧氧化等设备 9 台。我们的任务之一就是为企业提供整套表面工程设计，针对用户的具体问题，提供解决问题的技术方案，并提供具体的表面处理技术服务或设备研制。具有表面显微硬度计、划痕仪、摩擦磨损实验机、膜层测厚仪等常规表面性能测试仪器，且深圳市政府在 2002 年立项，一期投入 900 万元在本中心建立开放型表面分析测试实验室，拟购置高性能的扫描电镜（配能量色散谱仪 EDS、电子束背散射衍射仪 EBSD）、X 射线衍射仪、X 射线光电子谱仪（XPS）、原子力显微镜（AFM）、轮廓仪、色差仪、盐雾试验箱、电化学腐蚀仪、疲劳试验机等，以上所列仪器均在 2003 年安装调试完毕并对外开放。

现为诸多企业提供长期的塑胶模具表面处理服务，视具体材料和使用条件不同，模具使用寿命提高数倍到数十倍不等。 （收稿日期：20030415）
资料索取编号：SC1229

表 1 概念型 RP 设备的主要机型

单位名称	设备型号	成形工艺	典型特点
Z - CorpP	Z400	3D - P	单色机，128 个喷嘴
	Z406	3D - P	1600 个喷嘴，600 万种颜色
Objet	Quadr	3D Ink - Jet 与 SL	1536 个喷头，厚度小至 0.02mm
Solidimension	3D 300e	LOM	刀切塑料薄膜，机器重量 31kg
3D systems	Thermojet	3D - P	350 个喷嘴阵列分层喷蜡
Stratasys	Prodigy	FDM	双丝盘、变层厚成形
清华大学	Gemini - 300	FDM	双喷头

于产品制造的设备。该设备的特点是设备和材料的价格高、材料性能要求高、成形速度快，成形精度需要满足零件要求。如 Stratasys 的基于 FDM 工艺的 Titan 设备，直接使用 ABS、PC (Polycarbonate) 和 PPSF (Polyphenylsulfone) 等材料，可直接用于制造设备的外壳等。

专用型 RP 设备是指专门用于成形某一类特定结构的零件/模具而开发的设备。如清华大学采用喷射方法，将生物材料在低温环境下堆积成形，制造大段人工骨的细胞载体框架；美国麻省理工学院采用 3D - P 工艺成形骨头的框架结构等。

2000 年全球的 23 个 RP 制造厂商共出售 1 320台 RP 设备，比上年增长 12.1%，累计全球 RP 设备已达6 755台，分散在 58 个国家。美国是世界上最重要的 RP 设备生产国，1999 年美国生产 RP 设备占全世界的 81.5%。在国内，中国的 RP 市场已经度过了启蒙期，处于快速发展阶段。

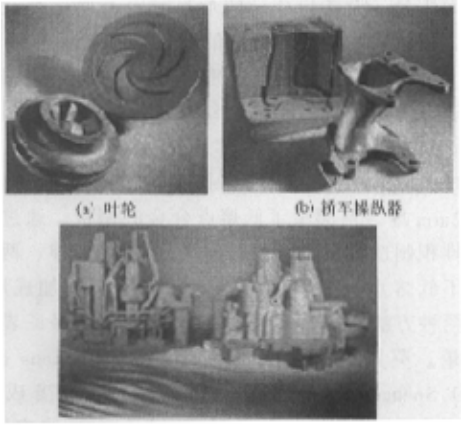
二、快速模具制造技术

基于 RP 原型的模具制造技术是快速制造的重要发展方向，使单件、小批量零件低成本、短周期的制造成为可能。目前主要由 20 多种快速制模工艺，从工艺转化上可以将这些工艺分为直接制模和间接制模两大类；从模具寿命上，这些制造工艺可以分为软模具、硬模具和金属模具。目前在生产中广泛应用的主要是间接模具制造工艺，但是 CAD 驱动的直接模具制造技术是目前研究的热点之一。

1. 基于 RP 的直接非金属零件/模具制造技术

直接采用快速原型机制造出 LOM、FDM、SL 等工艺的原型，可以用于铸造中的模样，可以直接用于设计校验、翻制硅橡胶模具、环氧树脂模具。也可以采用 CAD 直接驱动成形机制造出砂型如直接壳型制造、无木模成形。

以铸造用的陶瓷粉末或型砂为原料，可以直接制成铸造用的型壳。在 CAD 环境中，直接将零件模型转换为壳型，再配以浇冒口系统。型壳的厚度可取 5 ~ 10mm，烧结或粘接过程中，非零件部分进行烧结或粘接，零件部分仍是粉末。造型完成后将粉末倒出，再经固化处理就获得铸造用的型壳。用此方法，省去传统精密铸造过程中蜡型、泡沫塑料模、木模的制作等多种工艺过程，是传统铸造过程的重大变革。一般一个壳型只能使用一次。目前典型的 CAD 直接铸型工艺主要有 PCM (Patternless Casting Modeling) 工艺、SLS (Selective Laser Sintering) 工艺、3D - P (3 - Dimensional Printing) 工艺和 GS (Generis sand) 工艺。图 1 为采用 SLS 工艺直接制造的铸型，其中图 1c 为美国 Woodward Governor 公司采用该技术 (使用 DTM 公司的设备) 制造的复杂飞行器燃烧系统。传统的工艺至少需要 245 天制造模具，84 天制造金属零件，采用 RP 技术仅仅 60 天就制造出金属零件，费用仅仅是传统工艺的 20%。图 2 和图 3 分别是采用 3D - P 工艺和 GS 工艺制造的铸型与铸件。



(a) 叶轮　(b) 舱军操纵器

(c) 飞行器燃烧系统

图 1 基于 SLS 工艺的快速铸造

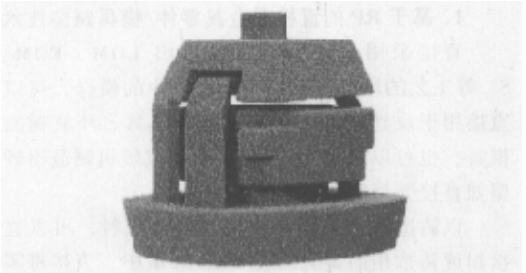


图 2　直接壳型铸造制造的铸型（3D－P）

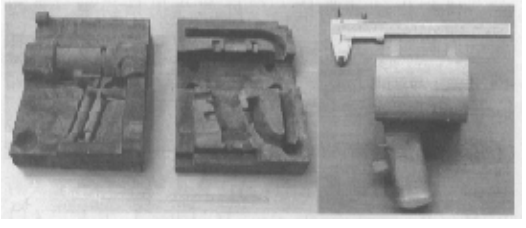
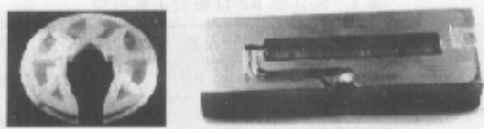


图 3　GS 工艺制造的铸型与铸件

2. 基于 RP 的直接金属零件/模具制造工艺

直接金属零件/模具的快速制造技术，目前研究集中在如何从已有的 RP 工艺中直接得到金属型以及开发新的适合于金属直接成形的工艺。目前国内外主要有以下几种：金属板材叠加制造、金属粉末堆积成形、金属丝材熔融堆积、金属微滴沉积成形和气相沉积成形这些工艺的特点是 CAD 模型直接驱动工具成形金属零件或模具，不需要经过中间工艺转化环节。虽然目前在精度、表面质量、设备价格、成形尺寸等方面还存在不足，但该技术是快速制造的发展方向之一。

（1）金属板材叠加制造　直接采用金属片材，通过激光切割、焊接或粘结金属片材制造金属模具。典型的研究有：日本 Tokyo Institute of Technology 大学的 T.Obikawa 等人研究使用 0.2mm 厚、两面涂了低熔点合金的钢板，通过焊接堆积制造金属模具；日本采用 2.5mm 厚、两面涂了低熔点的材料的铝合金板，层层叠加成形。这两种方法最后都需要机加工处理，以保证表面质量。英国 Nottingham 大学的 PhilDickens and J.D.Spencer 提出了一种基于三维焊接成形（Three－Dimensional Welding Shaping）的方法，利用焊接机器人制造金属模具。图 4 为板材叠加制造的零件和模具 。



(a) 陶瓷零件　　(b) 金属零件

图 4　板材叠加制造

（2）金属粉末堆积成形　主要是采用激光烧结或利用粘接剂粘结金属粉末，层层堆积制造制品。典型的工艺是 SLS 工艺、3D－P 工艺和激光加工净成形（Laser Engineering Net Shaping）。间接 SLS 工艺采用激光逐点照射烧结粉末材料，使包在粉末材料外的固体粘接剂熔融实现材料的连接，得到半成品零件后烧结并经浸渗等后处理以得到满意的零件性能，该工艺首先由美国 DTM 公司商品化。直接 SLS 工艺采用激光逐点照射粉末材料，使粉末材料熔融实现材料的连接，直接制造出金属零件/模具，不需要经过浸渗等后处理，德国 EOS 公司在此工艺方面做出了很大的成绩。该工艺是最早用于制造金属型的 RP 工艺，也是最早制造金属型商品化的 RP 成形方法。它使用的原材料主要是合金钢粉，线收缩率为 0.12%，成形空间可以达到 250mm × 250mm × 185mm。图 5 为 EOS 公司金属烧结模。



图 5　EOS 公司金属烧结模
（左：模具；右：注塑件）

美国麻省理工学院基于 3DP（Three Dimensional Printing）工艺采用不锈钢金属粉，在保证金属粉对所喷射的化学粘结剂具有较好的湿润性的条件下，便可制造出金属零件，经去除粘结剂和渗铜处理，便可得到致密件，对其表面进行抛光打磨处理后就可作模具使用。半成品零件后经烧结、浸渗等后处理得到金属零件。美国 Sandia National Lab 提出的激光加工净成形技术（Laser Engineering Net Shaping），其方法是使用聚焦的 Nd.YAG 激光在金属基体上熔化一个局部区域，同时喷嘴将金属粉末喷射到熔融焊池里，

如此层层叠加制作金属原型零件。目前这种技术已经制作出不锈钢、工具钢、钛合金等零件，通过改变粉末供应系统中金属粉末的配比，可制造出镍基超合金等零件/模具。

(3) 金属丝材熔融堆积　主要是用 FDM (Fused Deposition Modeling) 工艺成形，将金属粉与粘结剂混合均匀，然后挤压成具有足够弯曲强度和粘着度的丝，供 FDM 设备成形使用，制造出不锈钢、钨及碳化钨材料的零件。

(4) 金属微滴沉积成形　主要采用金属液滴沉积/喷射的方式直接成形金属零件/模具。国内有色金属研究总院、625 所和清华大学在激光同轴和偏轴粉末熔覆直接金属堆积成形方面，做了许多高水平的工作。美国 Carnegie Mellon 大学的 L.E.Weiss 和 Stanford 大学 R.Merz 提出的多相组织的沉积制造方法 (Shape Deposition Manufacturing of Heterogeneous Structures)，采用多个喷头沉积不同材料来制造微机械和小型模具。美国 MIT 的 Jun－Hoon Chun 提出的液态金属微滴沉积技术 (Liquid Metal Droplet Ejection and Deposition Techniques)，是通过利用自行开发的一种金属微粒均匀加热和喷射装置，通过控制金属喷射时的振动频率可以控制微滴的尺寸轮廓和特定的微粒结构，并通过电场偏转控制金属微滴直接成形生成金属零件。该技术被认为是很有前途的金属直接快速成形的工艺。

(5) 气相沉积制造　是一种基于活性气体分解沉淀的成型技术。使用高能量激光的热能或光能分解一种活性气体，这种活性气体在激光的作用下发生分解，沉积出一个材料的薄层进行逐层制造，通过改变活性气体的成份和温度以及激光束的能量，可以沉积出不同材料的零件，包括成型陶瓷和金属零件/模具。

3. 基于 RP 的间接金属零件/模具快速制造工艺

基于 RP 的间接金属零件/模具制造技术，主要是 RP 技术与传统的成形技术相结合，二者相互补充，可以实现金属零件/模具的快速制造。目前的间接的零件/模具制造工艺概括起来主要可以分为精密铸造成形制造、电铸成形制造、粉末冶金成形制造和金属喷涂沉积成形。在这些制造工艺中，RP 技术与铸造技术相结合，是最直接、成本最低、性能最好的工艺方法。图 6 为金属喷涂制造的叶轮模具；图 7 为采用精密铸造工艺制造的白塔模具。

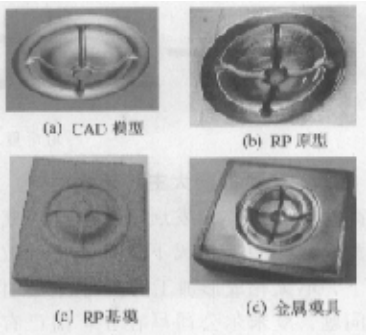


图 6　金属喷涂制造的叶轮回模



(c) 白塔注塑模　(d) 白塔工艺品

图 7　白塔模具的快速制造

三、结论

RP 技术将成形的信息过程与物理过程统一起来，将材料制备与材料成形过程统一起来，模具的制造费用降低，零件的设计更加自由，任意材料梯度的工件成为可能，产品的开发周期将缩短。RP 技术已从获得原型朝着获得零件/模具的快速制造技术的方向发展，成为产品批量定制生产的主要工艺手段，是一种行之有效的快速模具制造技术。但是如何进一步提高成形速度、降低制造成本、提高成形精度是快速原型技术广泛推广应用中所面临的问题。

(收稿日期：20030508)

资料索取编号：SC1237