

# 快速制造技术及其应用发展之路

## Development of Rapid Manufacturing Technology and Its Application

清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室 颜永年 张人佶 林峰



颜永年

清华大学机械工程系教授、博士生导师。主要从事快速成形制造技术和制造工程的研究工作,发表论文 170 多篇,著书 7 册。

进入 21 世纪,制造业的竞争更趋激烈,全球市场一体化进一步形成与完善,产品的开发速度往往成为关系到竞争成败的主要因素。制造业需要满足多样化且日益变化的用户需求,又要求制造技术具有很强的灵活性,能够以小批量甚至单件生产而不增加产品的成本。因此,产品开发的快速性和制造技术的柔性就变得十分关键。

快速原型(Rapid Prototyping,

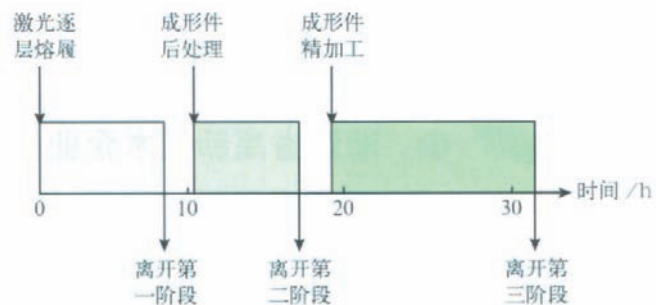
RM 与 RP 成形方法的核心均是材料的离散(计算机中) / 堆积(成形机中)过程,从技术上看是一样的,不同之处在于 RM 获得的往往是直接最终产品,或者是近净成形的半成品,在成形技术上更加复杂,加工的环节和遇到的困难也更多,特别是在材料的选用上会受到很大的限制。

RP) 制造技术产生 20 多年来,基于“离散-堆积”原理和增材制造的方法,具有高度柔性的制造思想已经被企业界广泛接受,其应用已从最初的设计原型和测试原型制造向最终产品制造的方向发展。这项技术已经扩展为快速制造(Rapid Manufacturing, RM)<sup>[1-4]</sup>。快速制造作为一种新的生产模式,可分为直接快速制造与间接快速制造两大类。其中,直接快速制造指的是通过快速

制造直接完成功能零件或具有完全功能的结构件;间接快速制造是指通过 RM 完成工、模具制造,再采用工模具进行零件的制造,又称快速工模具制造(Rapid Tooling, RT)。本文主要

讨论零部件的直接制造。

全球范围的厂商纷纷采用 RP 和 RM 技术来简化产品的开发过程,提高生产效率,增强产品竞争力,RP 和 RM 技术呈现波浪式前进的势头。从国际市场来看,RP 市场正逐渐向 RM 市场发展,RP 市场本身已进入成熟的商业化阶段,各种工艺以及相应的设备均具有比较固定的应用对象,有关 RP 设备制造厂商和 RP 技术服务厂商各在其领域内有相当程



色块: 每一阶段平均占用时间

激光近净成形制造技术工作流程

度的知名度,如美国的 3D Systems、Stratasys、Z Corp 公司,德国的 EOS 公司,以色列的 Objet 公司,瑞典的 Arcam 公司等;而 RM 技术日趋成熟,明显具有潜在的市场,已开始引发生产厂商极大的重视, RM 技术的每一点进步都被他们收入眼帘,并且对于其产品化的前景给予关注, RM 技术已处于形成新产业的前夜。上述 RP 领域的知名公司,相当一部分亦开发出属于 RM 领域的新技术、新工艺和新设备。

中国的 RP 市场已经度过了启蒙期,正处于快速发展的阶段,国内众多用户群为国外 RP 厂商所艳羡,纷纷寻找商机进入中国市场。从第十届北京国际机床博览会反映的情况来看,南方市场和华东市场的发展最为迅速;北方以北京为 RP 和 RM 科技研发中心,既促进了此领域技术的高速发展,亦带动了对于 RP 设备的需求。业界一般认为,目前国内 RP 行业的规模大约从 2000 年占全球的 1%,发展到 2007 年的 5% 左右,发展势头远远快于国际平均水平。其中国产 RP 设备在国内市场份额进一步提高,并且已经有出口记录,表明我国民族 RP 产业在健康地发展。在国际 RP 领域知名的美国 Wohlers Associates Inc 公司按年出版的 Wohlers Report 中,自

列表中我国公司的数目排在美、日之后,列第三位<sup>[5]</sup>。

相比之下,我国的 RM 技术受重视的程度较差,一方面相关研究的投入不够,仅由国家自然科学基金对部分项目给予资助,而资助力度仅够完成一些原理性的研究,无法向产品化、产业化的方向发展;另一方面,相关的普及工作也做得不够,许多人都认为, RM 所需的投入大,见效慢,技术的成熟度低,不能很快用于实际生产,所以思维呈现滞后的状态。RM 处于仅有零星研究,没有形成气候的阶段,这对于发展形成新产业的确是十分不利的,并且有可能影响我国在向制造强国方向发展的步伐。

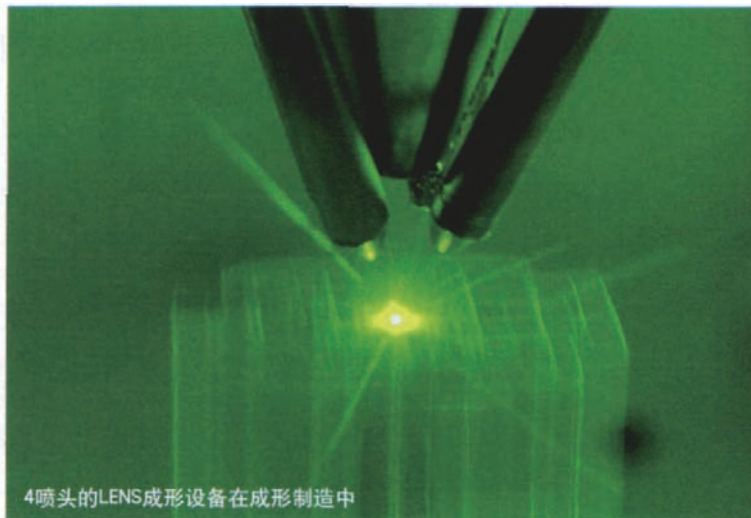
### 快速制造工艺发展及存在问题

由于 RP 源于“离散-堆积”的特殊成形思想,拥有能同时处理多种材料和复杂结构的功能,所以已成为制造领域的一个独特分支。RP 发展到 RM 新阶段,其主要应用已从产品设计和测试转向产品直接快速制造, RM 工艺的发展呈现出与当初 RP 工艺的发展十分不同的特点,应给予足够的重视。

#### 1 RM 的工艺特点

与 RP 相比, RM 工艺的主要特点表现在微滴性和组装性上<sup>[6]</sup>。为了保证 RM 技术生产的零部件具有足够高的精度,能够用于实际生产,

参与组装的材料单元应当尽可能地小,此即 RM 工艺的微滴性。组装性是指无需改变工装或模具,只要改变 CAD 模型,便可组装(制造)一个零件,它是制造柔性的根本保证。微滴性和组装性,影响到制造过程的速度。制造速度的快与慢,不仅取决于



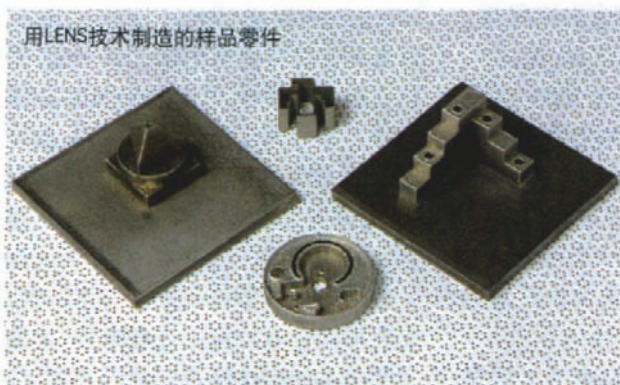
4喷头的LENS成形设备在成形制造中

组装速度,还包括零件相关信息传递的速度,设计和分析的速度,工装和专用工模具的需要量和设计、制造速度,成形后后处理的难易程度及处理速度等,它们的总和才是零部件的制造速度。

LENS (Laser Engineered Net Shaping) 称为激光近净成形制造技术,该工艺采用激光熔敷的方法层层堆积金属成形,它由美国 Sandia 国家实验室的 David Keicher 发明,并由 Optomec Design 公司于 1997 年开始商业化运行,它兼具快速性和精密性,是近年来运行最为成功的 RM 技术之一。其主要特点有:

(1) 采用大功率激光器进行附加值极高的专用金属成形材料逐层熔敷堆积,既保证了成形的快速性,所得到的又是具有一定精度的近净成形件,随后只需少量的加工;

(2) 在后续的加工处理中,实际上包括了两个不同性质的工作,一个是成形件的后处理,它既可以看作是对于近净成形件的延续加工,又可以



2002 年起,在 RP 设备制造厂家列表中,开始引入中国 RP 公司的名字,至 2006 年,共引入 6 家公司的名字,涵盖 25 种不同类型及型号的设备,

看作是进行精密切削加工的预加工。在3个相互衔接的工步中,最终成形的精密加工占据了最多的时间,很好地体现了快速性和精密性。

美国军方提出将LENS技术应用于战场环境下武器装备的快速修复,正在建立的“移动零件医院”就主要包括了这个技术,它能帮助军方减少备用零件总量、降低后勤成本和

RM堆积成形过程都伴随着材料的相变和温度变化,对于RM生产的金属零件,其残余应力难以消除,这是一个影响成形件翘曲和变形的关键问题。因此,RM技术的发展离不开材料研究的新进展。

熔融沉积成形技术不需要使用激光束,设备价格较低,使用工程塑料ABS丝材的工艺已经十分成熟。

改进材料和成形工艺,提高成形件的强度和精度,使之达到直接制造功能零件的目的,工业应用前景十分诱人。国内在开发MEM熔融挤压快速制造系列设备的基础上,在成形材料方面的攻关取得了重要进展,完成了新型精密喷头、新型支撑软件的开发,成形件的强度和精度大大提高,成形的零件不但可以进行装配,而且可以进行功能试

一方面,台阶效应是造型中固有的问题;另一方面,在目前的工艺水平下所操作的单元尺寸还远未能满足高精度的要求。由于精度不够造成的对后处理的依赖性,也降低了制造过程的柔性和自动化水平。减小堆积单元的尺寸是提高精度的直接手段。在个别场合也可采用一些特殊工艺来保证局部精度要求。清华大学采用曲面分层技术在FDM设备上制造的样品,较好地保证了小曲率表面的精度。

为了提高精度,往往需要降低单元的尺寸,如采用更小直径的喷头、更薄的分层和更小的激光光斑等手段。对于一个固定的零件来说,单元个数与其尺寸的三次方成反比,因而单元尺寸略微降低,可能导致成形时间的大大增长。克服这个矛盾的思路之一是通过技术进步实现又好又快的制造。例如目前喷射技术的发展,可以把成千个喷嘴(喷头)设计成为一个喷射阵列,使用数字打印机“drop-on-demand”的喷射原理制造层片,可同时提高成形精度和效率。

另一个思路是将RM的增材过程与通常的铣削加工在同一台设备上联动。例如,美国斯坦福大学Prinz教授提出的控形沉积制造(Shape Deposition Manufacturing, SDM)技术,就是将激光束使材料逐层熔融沉积下来,然后通过机加工获得所需形状的金属零件。华中理工大学的研究人员采用低成本等离子束作热源进行增材堆积,并且将数控铣削减材复合直接制造金属零件<sup>[7]</sup>。他们探讨了铣削光整与熔积成形复合加工的可行性,优化得到合理的铣削光整参数,开发了低成本直接快速制造满密度、综合力学性能高、表面质量好的金属/难熔难加工材料的零件或模具的技术。

4 开发RM新技术、新工艺的经济性



Stratasys公司的FDM 900mc设备

增加“医院”移动的灵活性。

## 2 RM应力突破材料的限制

RM与RP成形方法的核心均是材料的离散(计算机中)/堆积(成形机中)过程,从技术上看是一样的,不同之处在于RM获得的往往是直接最终产品,或者是近净成形的半成品,在成形技术上更加复杂,加工的环节和遇到的困难也更多,特别是在材料的选用上会受到很大的限制。材料本身的性能对RM工艺的实现有着决定性的意义,材料的适用面受到限制。例如许多RM工艺(例如电子束选区熔化),虽然可以以高速生产零部件,但是其中往往会产生残余应力,如果残余应力过大,则不能达到合格的要求。由于绝大多数

验。

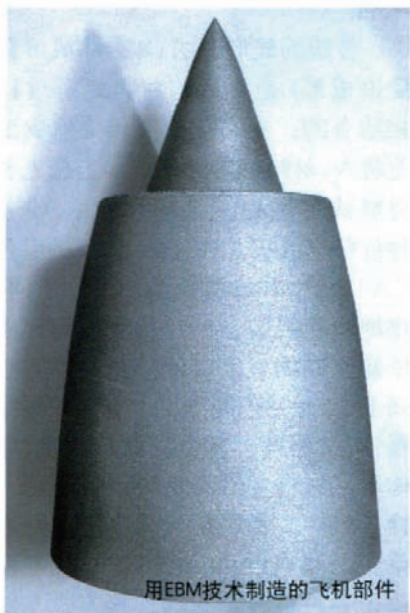
使用高强度的聚碳酸酯(PC)丝材,或者PC与ABS复合的材料,并采用高温喷头,可以制造出高强度、高性能的功能零件。例如,美国一家公司采用Stratasys公司的FDM Titan设备和PC线材制造的皮带滑轮代替生产线上破损的铝制皮带滑轮,皮带滑轮能正常运行。我国北京殷华公司已完成PC和PC+ABS丝材的开发和生产,正在大力推广采用MEM-350等设备用于快速制造。

## 3 解决RM成形精度与速度上的矛盾

RP和RM在数据处理和工艺过程中都对材料进行单元化处理,这两个过程都会对产品精度造成影响。

RM 是材料科学、信息科学和自动化技术及其他一些支撑技术的集成,属制造领域中的高新技术,所需的研究开发成本高。一旦工艺成熟,开发厂商必须使用专利来保护自身利益。因此, RM 设备与工艺的研发成本是必须考虑的,应当按步骤系统地展开 RM 新工艺的研究。首先可偏重于基础性的研究,然后考虑如何与生产实际相结合,最后应针对性地直接制造市场急需的、具有高附加值的特殊材料的零件。相关的产业部门应当对于 RM 技术有比较深入的了解,国家各类研究基金应当给予一些具有自主知识产权的 RM 新技术以重点支持。

无模铸造工艺(Patternless Casting Manufacturing, PCM)就是在多方支持下完成的,它采用逐点喷射粘接剂和催化剂(即两次同路径扫描的方法)来实现铸造用树脂砂粒间的粘接,完成铸型制造<sup>[8]</sup>。高校在 RP 和 RM 的研究中,提出了这个新工艺,并且申请了专利。在基金项目的资助下,逐步完善了 PCM 工艺。当前定型产品正由我国佛山峰华自动成形设备有限公司以及美国 Extrude Hone 集团的子公司 Prometal 公司进行产业化运作。



用EBM技术制造的飞机部件

## 快速制造设备 研发现状及展望

RP 成形设备已经产业化,世界上已有数十家公司生产不同工艺、不同型号的 RP 成形设备。其发展除了向概念模型转变之外,正向生产和专用型设备分化,后者主要属于 RM 设备。RM 设备本身是一种小批量的生产,因此每台设备承担的固定成本较高。由于专用的成形材料价格亦较高,加之 RM 设备的价格居高不下,极大地影响了 RM 技术形成强有力的需求旺盛的市场。

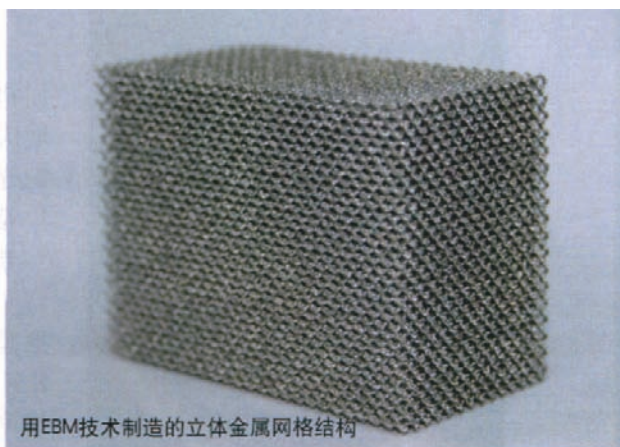
### 1 主要的 RM 技术与设备

目前,面世最多的是采用激光器的众多技术,除了采用金属粉末的激光选区烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术和前面提到的 LENS 技术之外,还有德国 F&S/MCP 公司开发的激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术,美国 Las Alamos 国家实验室开发的直接光制造(Directed Light Fabrication, DLF)技术,美国 AeroMet 公司开发的激光添加制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)技术,美国 POM 公司开发的直接金属沉积(Direct Metal Deposition, DMD)技术等。上述技术均已推出相应设备,有些已经完成了产业化的工作。

此外,采用电子束作为使能技术的也非常多。例如,瑞典 Arcam 公司推出电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)技术,我国清华大学开展了电子束选区熔化(Selective Electron Beam Melting, SEBM)技术的研究。

采用气相沉积法或者喷射技术的有:美国康涅狄格大学材料科学研究所提出的激光气相化学沉积快速成形技术(Rapid Prototyping

of Laser-Induced Chemical Vapor Deposition, LCVD-RP),以及激光液相化学沉积快速成形(Rapid Prototyping of Laser-Induced Chemical Liquid Deposition, LCLD-RP)技术,美国密歇根理工大学提出的激光引导直写(Laser guided Direct Writing, LGDW)技术,美国海军研究实验室提出的基材辅助脉冲激光蒸发直写(Matrix-Assisted Pulsed Laser Evaporation Direct Writing, MAPLE DW)技术等。我国清华大学研制成功



用EBM技术制造的立体金属网格结构

采用喷射技术的低温沉积制造(Low-Temperature Deposition Manufacturing, LDM)技术,并且相继推出用于生物材料成形制造的两种型号的设备。

### 2 从工艺、材料研究至 RM 设备开发的完整研究链

总结上述 RM 技术与设备的研发情况可知,虽然研究各有侧重,显示出多彩多姿的状态,但是仔细分析其成功的经验,最重要的是必须形成从工艺、材料研究至 RM 设备开发的完整研究链。其原因主要是:

(1) RM 的任务是提供最自由的物理实现设备,满足不同材料、不同形状、不同功能的要求,工程师、科研工作者、工业界、最终用户都能够在 RM 设备上制造出他们想要的“零件”,因此,工艺、材料、设备(硬件)的研究不能偏废;

(2) RM 是建立从零件成形信息及材料功能信息数字化到物理实现数字化之间的直接映射,这种从概念到实践都充满创新的先进制造技术的研究,必须采用“一体化”的研究方法;

(3) 从制造的信息过程来看, RM 可视为一种将源于产品数字模型的层面数据转换为物理结构的通道——数据通道的技术,它需要相关的研究以形成完整研究链。



由此可见,在研究中,必须既保证每个时间点有其重点,又必须兼顾各方面的研究齐头并进。发展 RM 技术时,还要考虑与高速铣工艺相结合,与虚拟现实技术相结合,与材料科学和工程同步发展,统一解决成形精度/成形速度间的矛盾等问题。

### 3 RM 设备的市场定位

RM 技术应该进入到各个行业和各个学科,提供针对各个行业和学科的个性化 RP+RM 技术,这首先是通过 RP+RM 设备来实现的,因此 RP+RM 领域的研究者必须通过 RP+RM 设备的市场定位来切入本领域。RM 从使能系统中输出物理量,作用于材料系统,将产生出的一个个材料微滴单元实时输送到预先规划好的精确的位置,并最终形成三

维的物理构件。这需更深刻的理解和了解各制造业分支的全面的专门知识,以及它们所涉及各类市场的具体情况。既不能将 RM 设备视作无所不能的“万能”型设备,又不能仅仅认为它们是可以用来“做做实验,得点数据”的系统。紧紧把握住 RM 可制造采用特殊材料,具有特殊结构的各种零部件的特点,着重强调其生产性,才是 RM 设备的取胜之道。

## 坚持以应用促进快速制造技术发展

基于上述对 RM 技术在工艺层面和设备层面的现状分析,可以清楚地认识到,必须坚持以应用促进快速制造技术高速且健康有序地发展。

### 1 应用的关键是解决重要零部件的制造

RP 最初是作为一种复杂形状原型的成形方法出现的。发展到 RM,使这项技术真正具有了制造最终产品或者其零部件的功能。2000 年 12 月在德国法兰克福召开了主题为“RP = Rapid Production: An International Conference”的国际会议上,RP 的概念被认为已从 Rapid Prototyping 转变为 Rapid Production。如美国波音公司近年来已采用 Rapid Production 概念来制造国际空间站的零件和 F-18 至最新式的 F-22 战斗机的零件。

进入 21 世纪后,国外已逐步流行 RM 这个新概念,在航天、汽车、医学应用和家用电器生产领域上得到大量的实践。其关键是 RM 可以解决其他技术很难甚至根本无法完成的重要零部件的制造。例如,德国 EOS 公司推出 M 型 SLS 设备,采用金属混合粉末 DirectSteel 20-V1 进行成形,低熔点的组元首先成形,且润湿高熔点粉末,由液相烧结机制将这些高熔点的金属粉末黏结在一起,其最小层厚已经降低到小于

20 μm,致密度达 98%,可以制造出精度很高的含内流道的金属零件。美国 3D Systems 公司将烧结件经浸渗及热等静压、液相烧结、高温烧结等后处理工艺,得到性能符合要求的金属零件,其 LaserForm A6 金属粉末不仅具有较高的强度和表面精度,而且还具有较高的成形效率及优良的加工性能。

### 2 RM 与制造业网络技术同步发展

RM 技术是全数字化的制造技术, RM 设备具备三维成形功能,这是它区别于一般数控设备之处。随着信息技术的发展,网络正在进入千家万户,基于网络的信息交流将更加通畅。企业提供在线个性化设计与制造的平台,能够与用户交互地进行零件及产品定制,是极具挑战性的课题。为企业提供展示个性的 RP 和 RM 服务站,其制造的概念从原来的生产厂家集中式制造发展为分散到各个制造分单元的分布式制造<sup>[9]</sup>,这需要每个制造分单元都具备一定的计算能力和 RM 能力。例如,加州大学伯克利分校进行 cybercut 的交互式网上在线设计和制造的研究,能够接受用户的个性化需求,采用 RM 方法制造零件和产品。

### 3 RM 成形过程与材料制备过程相结合

传统的成形方法(如去除成形和受迫成形)是无法与材料制备过程相结合的。在去除成形和受迫成形范畴内,材料制备过程基本上总先于材料成形过程。而在 RM 中,将各种材料离散成各种材料单元,然后在 CAD 模型和材料模型的控制下,有序地堆积组装各种材料单元而形成任意复杂的三维实体。在实体的空间上,任意一点既体现了零件的拓扑属性,又体现了零件的材料属性,即体现了材料成形和材料制备的统一性。零件的材料属性取决于各材料单元的材料性质;其拓扑属性则取决于各种材料单元的连接方式与定

位精度等。这样就有可能实现成形过程与材料制备过程的统一。例如,在采用 RM 技术进行非均质材料的成形制造时,实际上还是边进行材料制备,边进行材料组装,两个过程在时序上有很大程度是重叠的。

#### 4 RM 向生物医学制造领域拓宽

随着生命科学研究的深入,与制造科学的交叉使得 RM 可向生物医学制造领域拓宽。在 RM 领域,采用微机械手段或者高能量密度束流作为使能机制,利用微尺度物质运输和



采用立体金属网格结构的热交换容器

相互作用过程中的一些特殊性,在计算机的控制下对多种材料进行组装,在生物医学工程中引起极大的关注。RM 技术能够兼顾结构和功能的需要,同时建立了概念信息到物理实现的最直接的方式,非常适合生物制造。它已经在医疗诊断、假体制造方面获得成功的应用,MIT 采用 3D-P 方法制备组织工程支架和能够控制缓释的药物缓释装置<sup>[10]</sup>,清华大学采用数字化喷射技术制造出多种组织工程支架,并进行了动物实验<sup>[11]</sup>。目前可用的 RM 手段包括:光钳(Laser trapper)、光镊(Laser tweezers)、微笔(Micropen)、喷墨打印(Ink jet)、

微滴喷射(Droplet jet)、螺杆挤压(Pressurized extruder)、气动挤压(Pneumatic extruder)、等离子喷涂(Plasma spraying)、激光粉末引导(Laser particle guidance)、基质脉冲激光蒸发(Matrix-assisted pulsed-laser evaporation)、激光化学气相沉积(Laser chemical vapor deposition)、电子束(E-beam)、聚焦离子束(Focused ion beam)等。将生物高分子材料实现微米级甚至纳米级的运输与分配,是人工制造的组织前体离散堆积成形的关键。

#### 5 RM 向微纳制造领域拓宽

微纳米制造是制造科学中的一个热点问题,根据 RP&RM 的原理和方法制造 MEMS 是一个有潜力的方向。目前,常用的微纳加工方法属于通过减少材料而“由大到小”的去除成形工艺,难以加工三维异形微结构,深宽比的进一步增大受到了限制。而 RM 根据离散-堆积的降维制造原理,能制造任意复杂

形状的零件。已有采用快速成形工艺如 3D-P, SLS 制备微细结构的报道,如美国南加州大学采用分层实体制造原理,每一层的形状用电化学方法获得,通过这种方法加工出一条 290 μm 宽的金属链。采用快速成形原理通过化学气相沉积方法制备的微机械也有报道<sup>[12]</sup>。日本科学家使用激光技术,用合成树脂制成了长 10 μm,高 7 μm 的牛<sup>[13]</sup>,其结构的细节尺寸达到了 nm 级。另外, RM 对异质材料的控制能力也可以制造出复合材料或功能梯度材料的微机械。

总之,只有经过认真深入的分析,并采取正确的应对措施,才能使

RM 在诸多先进成形制造技术中脱颖而出。

#### 参考文献

- [1] Rafiq Noorani. Rapid prototyping: principles and applications. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [2] Hilton P D, Jacobs P F. Rapid tooling: technologies and industrial Applications. New York: Marcel Dekker Inc, 2000.
- [3] 颜永年, 林峰, 张人佶, 等. 快速制造技术的最新进展及其发展趋势. 电加工与模具, 2006: s12-s21.
- [4] 颜永年, 张人佶, 林峰, 等. 快速制造技术的发展道路与发展趋势, 电加工与模具, 2007: s25-s29.
- [5] Terry Wohlers. Rapid prototyping, tooling & manufacturing: state of the industry annual worldwide progress Report. USA: Wohlers Associates Inc, 2007.
- [6] 颜永年. 中国材料工程大典, 第 25 卷材料特种成形工程(下). 北京: 化学工业出版社, 2006: 308-312.
- [7] 张海鸱, 熊新红, 王桂兰, 等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术. 中国机械工程, 2005, 16(20): 1863-1866.
- [8] 高上, 张人佶, 杨伟东, 等. 基于 PMAC 的无模铸造工艺的控制系统设计. 组合机床与自动化加工技术, 2004(10): 51-52.
- [9] Marshall Burns. Atoms from bits: the digital revolution in manufacturing. 8th European Conference on Rapid Prototyping, Paris, 2000: 26-32.
- [10] Katstra W, Cima M. Engineering of complex oral drug delivery devices using three dimensional printing<sup>TM</sup>. Annals of Biomedical Engineering, 28 Suppl, 2000.
- [11] 刘利, 张人佶, 熊卓, 等. 组织工程支架的快速制造及脊柱融合实验研究. 工程塑料应用(第四届全国快速成形与快速制造学术会议论文专辑), 34B. 2006: 126-129.
- [12] Fan H, Lu Y F, Stump A, et al. Rapid prototyping of patterned functional nanostructures. Nature, 2000, 405(6782): 56-60.
- [13] Satoshi Kawata, Hong-Bo Sun, Tomokazu Tanaka. Finer features for functional microdevices. Nature, 2001, 412: 697-698.

(责编 晓霖)