



科技学术论文集2004

# 快速成型 与快速制造

Rapid Prototyping & Manufacture

原子能出版社

云南省科技学术交流中心



科技学术论文集2004

# 快速成型 与快速制造

Rapid Prototyping  
&  
Manufacture

ISBN 7-5022-3124-2



9 787502 231248 >

ISBN 7-5022-3124-2/TB3-53

定价：65.00元

科技学术论文集 ( 2004 )

# 快速成型与快速制造

Rapid Prototyping & Manufacture

主 编 徐人平

副 主 编 张人佶

原子能出版社





图书在版编目(CIP)数据

科技学术论文集. 2004年/云南省科技学术交流中心编.

北京: 原子能出版社, 2004. 3

ISBN 7-5022-3124-2

I. TU… II. 云… III. 工程材料—成型—文集

IV. TB3-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第011462号

科技学术论文集(2004年)

出版发行 原子能出版社(地址: 北京市海淀区阜成路43号 邮编: 100037)

责任编辑 王裕新

责任校对 余保云

封面设计 张安鸿

责任印制 杨厂生

印刷 云南师范大学教育学院印刷厂

开本 787×1092mm 1/16

字数 716千字

印张 28.375

版次 2004年3月第一版 2004年3月第一次印刷

书号 ISBN 7-5022-3124-2/TB3-53

印数 300

定价 65.00元

版权所有 侵权必究

# 序

三月春城嫣紫千红，春潮涌动，在昆明理工大学和云南省科技学术交流中心的努力下，第三届全国快速成形与快速制造技术学术研讨会在昆明胜利召开。这是全国性的快速成形领域的学术会议首次在我国西部的城市召开，对于我国的制造业腾飞以及西部大开发，具有重要的意义。我代表快速成形技术委员会对于大会的召开表示热烈的祝贺。

近年来，快速原型与快速制造(RP&RM)技术迅速发展，在国内外的推广应用呈现蓬勃的态势。为了进一步加速发展我国的快速成形与快速制造技术，更好地为发展生产力服务，为我国的西部开发作出更大贡献，经中国机械工程学会特种加工分会快速成形技术委员会决定，于2004年3月16日至19日在昆明召开第三届全国快速成形与快速制造学术会议，会议由昆明理工大学、清华大学和云南省科技学术交流中心承办，《机电产品开发与创新》杂志社协办。此次学术会议征集并优选了82篇论文，由原子能出版社出版。这次会议的主要内容包括：快速成形软件与数据处理技术、快速成形工艺与设备、快速成形与快速工模具技术(RP&RT)、快速制造新技术(RP&RM)、生物材料快速成形与生物制造、快速成形与新产品的创新设计和开发等。上述单位和全国同仁齐心协力，不仅使会议成功召开，也顺利出版了具有非常高的学术价值的专著，值此特向为本次会议与本专著作出贡献的单位和全体人员致以衷心的感谢。

为了顺应科技飞速发展的形势，中国机械工程学会特种加工分会于1997年成立了全国性的学术组织——快速成形技术委员会。自快速成形技术委员会成立之日起，就肩负了加强学术交流、推广科技应用的重任。每隔一年，或召开一次全国性学术会议，或召开一次国际学术会议，至此已经召开了两次国际会议，今年的全国性会议则是第三届。这些会议均受到中国机械工程学会的多次表彰。每年还有各种专业性、部门性或地方性的各类快速成形技术交流会、展示会等不断举行并且成果斐然。快速成形技术委员会还受中国机械工程学会批准，作为我国唯一代表，参加了国际性的学术组织——GARPA（全球快速成形协会联盟），出席了各次高峰论坛，并在该组织中发挥了积极的作用。另外，在快速成形技术的推广方面，快速成形技术委员会也作了大量的扎实的工作，目前我国从事快速成形设备制造的公司名列“Wohlers Report 2003”上的已达3家，而此前仅有1家。全国各地从事快速成形技术服务的公司已经达到数十家，各地还有为数不少的生产力促进中心也开展此项业务。快速原型(RP)技术及其设备（即RP机床）已被国家列为高新技术。快速成形技术委员会还与全国特种加工机床标准化技术委员会开展合作，根据2001年国家质量技术监督局《制、修订国家标准项目计划（一）（机械工业部分）》中的安排，快速成形机床的国家标准将由清华大学、苏州电加工机床研究所、西安交通大学、华中科技大学、北京隆源自动成型系统有限公司等制定。此项工作是长期的、细致的，对于规范快速成形技术、促进整体发展有重要作用。

近年来，快速原型(RP)技术的概念与内涵有了很大的发展，主要表现在如下三个方面：

(1) 基于离散/堆积成形原理的快速原型(RP)技术的主战场仍是概念模型的设计与成形制造，它包括三维CAD、三维重构和材料微单元的三维堆积等相关技术以及它们的技术集成。

功能更强大的 3D-CAD 和 3D 重构技术和软件与 RP 一起,形成了相互促进的局面。当前,新的 RP 成形原理的出现与原有的 RP 技术的改进和发展并存,但总体而言后者仍是主要方面。有的 RP 工艺由于其成形原理上的局限性逐渐退出了历史舞台;而得到用户欢迎、有明显市场价值的 RP 工艺更明确了自己的定位。正是由于市场定位所起的作用,使得各种 RP 工艺各得其所,这最终亦将形成各 RP 专业公司的定位,使得我国的 RP 行业的发展更加健康有序。另一方面,各种 RP 工艺的技术优势也不是一成不变的,精度低的可以提高精度,成本高的可以降低成本,只要紧紧依靠市场,技术发展的潜力是无穷无尽的。专用的 RP 材料是影响和制约其发展的关键因素,原有工艺的改进、应用面的扩大、成形件质量的提高和 RP 设备运行的可靠性保证,无不与 RP 材料有关。

(2) 快速制造(RM-Rapid Manufacturing)是 RP 概念与内涵符合逻辑的重要发展的结果。在不断强调 RP 工艺的改进、RP 材料的改进和创新以实现成形件的使用功能时,RP 实际上已经向 RM 的方向发展了。从广义上说,RM 就是完成具有使用功能的成形件的 RP 技术。快速工模具(RT-Rapid Tooling)、生物制造(OM-Organism Manufacturing)等,虽然都是属于某种形式的交叉学科,它们与其他学科相结合而形成丰富多彩的新的学科领域,但是从制造科学的角度看,它们仍然属于 RM 的范畴。改进材料,使成形件具有使用功能;通过激光束、电子束或等离子束使金属粉末熔化并三维堆积而成形,是当前 RM 发展的两大主要研究方向。

(3) 根据 RP 的离散/堆积成形原理,将用于堆积的成形材料的概念扩大至生物材料,甚至将具有代谢能力的活的细胞(包括细胞外基质)也视为一种“材料”,通过受控组装,将此类特殊材料(材料微滴)形成三维结构,并进一步培养为活的组织,用以修复损伤的器官或形成具有生理生化功能的组织或器官,这就是生物制造(OM-Organism Manufacturing)。这方面的研究在国内外几乎是同时起步的,各有优势,我们的差距不大。生物制造正面临着我国经济飞速增长、社会快速发展、人民生活不断提高、国防安全需要增长的情况,因此其研究的急迫性非常明显。由于它在生物医学方面有着广泛的应用前景,如何更好地进行规划,开展研究,也是我们必须加以充分注意的。

中国机械工程学会的领导曾在南京召开的第二届全国快速成形与快速制造学术会议上提出了四点建议,即今后发展我国的 RP 技术,应当做到“集中扶植、形成特色;开发应用,齐头并进;注重集成,资源共享;规范标准,实现产业”。四年来,遵循这个指示,我国的 RP 技术又有了长足的发展,本次会议的召开,就是我们取得丰硕成果的一个很好的检验。让我们增进共识,增强团结,提高信心,克服困难,为使我国的 RP 技术达到世界水平,并在我国制造业腾飞中起到重要作用而顽强拼搏。

祝大会取得圆满成功,让我们在 2008 奥运之年,再次聚首,共庆胜利。

中国机械工程学会特种加工分会理事长 王至尧

中国机械工程学会特种加工分会快速成型技术委员会主任 颜永年

2004 年 2 月 6 日

# 目 录

## · 综 述 ·

快速原型技术的发展与未来 .....	颜永年 张人佶 林峰 卢清萍 吴任东 熊卓 王小红(1)
基于快速原型的快速制造技术 .....	张人佶 颜永年 卢清萍 林峰 吴任东(6)
熔融挤压(MEM)大型原型制造技术研究 .....	张磊 陈晟 唐果林 颜永年 吴任东(12)
六轴机器人激光快速制造系统 .....	陈继民 王颖娜 左铁钊(17)
喷墨打印成形技术研究状况 .....	江连会 贾振元 郭东明 王东兴(21)
基于激光引导的材料微粒堆积成形方法 .....	陈立峰 颜永年 张人佶(27)
金属板料数字化渐进成形工艺规划研究 .....	毛锋 莫健华(29)
金属零件薄壁结构的激光熔覆成形工艺研究 .....	刘继常 李力钧(35)
高温合金构件快速成形及后处理工艺技术研究 .....	刘斌 白培康 党惊知(42)
微滴喷射式快速成型系统及其在金属粉末注射成形中的应用 .....	刘斌(47)
压电喷射装置在低温冰型快速成形工艺中的应用 .....	魏大忠 张人佶 吴任东(54)
快速成形中压电微滴喷射驱动元件的力—位移模型 .....	刘丰 魏大忠 张人佶 颜永年(59)
非均质实体模型的材料特征表达 .....	程捷 林峰(63)
快速成型零件的层间应力分析 .....	杨继全(76)
论快速成形与技术创新 .....	徐人平 舒晓楠 王坤茜(81)

## · 快速成型软件与数据处理技术 ·

反应注射成型过程的计算机模拟 .....	冯小军 李爱平 陈剑松(94)
基于快速模具的计算机仿真与实验 .....	刘力松 关玉明 孙立新 卢顺杰(101)
三维实体零件分层处理软件的研究与开发 .....	李爱平 刘光富 王东立(106)
基于SolidWorks API的快速成型分层软件设计 .....	张立强 李金花 王斌修(111)
基于新LOM原理的自适应性分层技术研究 .....	周六刚 易树平(116)
一种实现新型RP装置的PLC与计算机串行通讯的程序设计方法 .....	马德毅 宋丹路(124)
基于分布式计算技术的RP通用软件系统的应用研究 .....	沈理达 黄因慧 田宗军 赵剑峰(129)
等离子喷涂涂层的数值模拟 .....	范群波 王鲁 王富耻 王全胜(136)
等离子熔积直接制造高温合金隔热内环的热力学数值模拟 .....	熊新红 张海鸥 王桂兰(145)✓
薄板多工步成形快速分析仿真关键技术 .....	李靖宜 叶福民 陈明和 张中元(150)
数控机床虚拟仿真系统 .....	胡岩 黄克正(158)

- 3D 机械手计算机控制系统设计及控制仿真 ..... 何邦贵 徐瑞余 段振华 何伟 (163)
- 快速成形中大尺寸零件的一种处理方法 ..... 许平 顾红 李莎 陈磊 朱龙 (167)
- 基于 OpenGL 的 STL 文件显示核心技术与实现 ..... 宋丹路 金恒瑞 (171)

## · 快速成型与材料科学 ·

- 快速成型技术中先进材料的应用 ..... 唐光昕 张人佶 林峰 颜永年 (176)
- 等原子比 NiNi 多晶在高应变速率下的超塑性行为 ..... 杜兴嵩 郭建亭 李谷松 (182)
- 选择性激光烧结直接在形金属件强度的影响因素研究 ..... 史玉升 陈森昌 卢锡龙 黄树槐 (187)
- 光固化快速成形件表面质量研究 ..... 张定军 张人佶 王青岗 颜永年 (200)
- 金属粉末物性对选区激光烧结件质量的影响 ..... 欧阳鸿武 何世文 刘咏 (204)
- 激光选区烧结快速成形用高温合金熔覆料的研究 ..... 郑运荣 郑亮 阮中慈 (210)
- 可见激光快速成形光固化树脂的研究 ..... 甘志伟 莫健华 黄树槐 (215)
- 适用 LOM 法的陶瓷膜研究 ..... 严继康 甘国友 孙加林 杜景红 史庆南 孙勇 (219)
- 利用激光快速成型技术制造功能梯度材料 ..... 杨海欧 杨健 陈静 林鑫 黄卫东 (225)
- 超细锌粉自修复性能研究的初探 ..... 张继辉 陈国需 杨汉民 (232)
- 均匀设计法在超音速电弧喷涂 Ti-Al 复合涂层表面质量控制中的应用 ..... 李平 王汉功 (237)
- 压铸陶瓷纤维增强铝基复合材料及其应用 ..... 曾涛 吴申庆 李军 (242)

## · 快速成型与快速制造 ·

- 机器人熔射快速制模中熔射路径与熔射层质量的关系 ..... 韩光超 张海欧 王桂兰 刘辉祥 文少波 (248)
- 快速模具制造 ..... 闫双景 姜不居 吕志刚 崔旭龙 (253)
- 快速金属模具的电弧喷涂制造工艺 ..... 谷净巍 张人佶 颜永年 (260)
- 内外层同时强化的 SiCp/Al 功能梯度复合管的离心铸造法成型  
..... 秦孝华 范存淦 韩维新 戎利建 李依依 (265)
- 机械密封的三维建模与快速制造 ..... 赵越 宋鹏云 (268)
- 基于 RP 技术的柴油机离合器壳体模具制造 ..... 李淑兰 李卫平 徐人平 (272)
- RE 在产品快速成形中的应用 ..... 戴德山 何玉林 郑太雄 (277)
- 基于激光测量/加工一体化的快速制造技术 ..... 杨晓京 王猷 (282)
- 基于快速原型技术的轮胎模具数字化制造 ..... 钱荣芳 胡国军 冯方 吴建益 朱富康 (286)
- 喷涂成形在快速制模中的应用 ..... 刘峰 张元好 曾大新 (290)
- 快速成形制造技术在并行设计中的应用 ..... 葛茂忠 祁红志 徐人平 (296)

## · 快速成型与生物制造 ·

- 快速成型技术在生物医学工程中的应用 ..... 沈兴全 王爱玲 (301)
- 点群数据的三维重建及其在医学模型中的应用 ..... 程晓民 陈炳森 徐鲁平 (307)



快速成形技术在股骨头坏死的临床应用研究 ……严继康 史庆南 常敏 郭英 邓乐巧 刘波 赵晋济 (312)  
羟基磷灰石/超高分子量聚乙烯复合骨片的制备及兔眶植入实验观察

……………陈德夫 高志忠 范丽娟 董春生 宋正孝 李冬梅 (316)

RPM 技术的医学应用 ……………张天会 王坤茜 徐人平 (321)

## · 快速成型与新产品的创新设计和开发 ·

陶瓷洗手盆参化 CAD 系统与基于 RP 的快速制模技术的开发

……………马志国 孙友松 章争荣 潘晓涛 刘易凡 刘明俊 徐延华 周正付 (327)

快速成型技术在卫生装备研制中的应用 ……………杜振杰 田丰 宁洁 (332)

Rhino+快速成型技术——企业产品设计的法宝 ……………陈志斌 (336)

快速成型与 Rhinoceros 建模相结合进行创新设计 ……………朱怡芳 徐人平 李竹芬 (343)

快速原型在产品创新设计中信息传递的研究 ……………朱怡芳 孙培福 徐人平 (349)

快速原型与设计评价 ……………张安鸿 孙培福 徐人平 (357)

快速成形中的个性因子 ……………张安鸿 李华 徐人平 (363)

快速成型技术与市场创新 ……………索昕煜 徐人平 乐超 (369)

基于快速成型技术的新产品创新设计 ……………李淑兰 段小建 李卫平 (375)

手机的快速成型技术应用初探 ……………李捷 黎敬霞 潘琦英 (379)

## · 其他 ·

快速原型制造技术与绿色制造 ……………王坤茜 林捷晖 (382)

利用快速成形技术实施产业制胜战略 ……………唐嘉庚 徐人平 王榕 (387)

加强 RE/RP 技术推广应用, 提高制造企业竞争力 ……………杨晓京 (391)

快速成型技术的现状及发展趋势 ……………顾红 祝琳华 李华 (395)

柔性加工生产线计算机控制系统的设计与控制的快速实现研究 ……何邦贵 徐瑞余 何伟 段振华 (398)

太阳能集热板快速安装工程计算机模拟 ……………杨玉芬 沈容 (403)

锥齿轮数控快速插削加工的研究 ……………李晋 杜远东 (406)

磨料水射流切割加工技术研究 ……………陆国胜 龚烈航 陈宁 王宏伦 (410)

浅谈喷丸强化在制造业中的地位和作用 ……………高玉魁 (417)

加铁粉对碱性焊条交流焊接熔化过程的影响 ……………熊征 陈德斌 洪江波 桂赤斌 (421)

乳化液的润滑特性研究 ……………朱世远 成崇远 唐德刚 吴江 张书 程华生 (425)

铝冷轧乳化液的特性及研制 ……………宋世远 姜伟 成崇远 黎勇 张杰 (428)

钢管成型油的研制 ……………成崇远 宋世远 唐得刚 蒲改霞 张杰 杨靖 张晶 (434)

传感器新材料新技术的展望 ……………沈容 杨玉芬 (438)

快速成型技术与企业竞争优势 ……………曾进 (441)

# 快速原型技术的发展与未来

颜永年 张人佶 林峰 卢清萍 吴任东 熊卓 王小红

(清华大学机械工程系 北京 100084)

**摘 要** 本文概略地介绍了国内外快速成形和快速制造方面的最新发展,特别是在新兴的生物制造方面的发展,指出了本领域未来的发展趋势,综合情况表明,通过不懈的努力,我国在快速成形技术上可望有更大的进步,在国际先进制造方面占据重要地位。

**关键词** 快速成形 快速制造 生物制造

## 1 引言

随着全球市场一体化的形成,制造业的竞争十分激烈,产品的开发速度日益成为竞争的主要矛盾。同时,制造业需要满足日益变化的用户需求,又要求制造技术有较强的灵活性,能够以小批量甚至单件生产而不增加产品的成本。因此,产品开发的速度和制造技术的柔性就变得十分关键了。市场对于快速成形(RP)技术的需求非常旺盛,特别是在制造业处于腾飞阶段的中国。当前,基于RP,快速制造(RM)的发展尤为引人注目,通过RM,使企业可以采用批量定制(MC—Mass Customisation)的生产模式组织生产——以大批量生产之成本完成个性化和小批量生产。RM可分为直接快速制造和间接快速制造。前者通过RM直接完成功能零件;后者通过RP完成工、模具制造,再采用工、模具进行批量生产。另一方面,基于RP,生物制造(Bio—Manufacturing)亦是今后制造技术最重要的制高点,是21世纪制造业竞争的主战场之一。本文集中在快速成形、快速制造和生物制造三个方面加以介绍。

## 2 快速成形技术的发展<sup>[1,2]</sup>

从制造目标来说,采用RP技术可快速获得:(1)用于概念设计的原型;(2)用于功能测试的原型;(3)用于制造模具的原型;(4)功能零件。用于概念设计的原型(Concept Modeler)对精度和物理化学特性要求不高,主要要求成型速度快,精度适中,设备小巧,运行可靠、清洁、无噪声,操作简便。现在出现的桌面型系统如3D SYSTEM的Actua2100系统,EOS的DESKTOP200系统、我国殷华公司的MEM-200等就是典型的快速概念型制造系统。用于功能测试的原型对强度、刚度、耐温性、抗蚀性及精度等有一定要求,以满足测试要求,因而要研制和开发适当的材料。

由于快速概念型制造和快速模具型制造的巨大市场和技术可行性,这两个方面将是 RP 研究和商业化的重点,且两者呈相对独立发展的态势。

### 2.1 RP 设备大型化与微型化

RP 原型的制造尺寸呈大型化和微型化的趋势,导致其设备趋向大型化和微型化。在大型化方面,美国、日本作了较多的工作,例如美国南加州大学的 CC-Contour Crafting 工艺等。与此成鲜明对比的将是 RP 向微型制造领域的进军。如 SL 的一个重要发展方向是微米印刷 (Microlithography),以制造微米零件 (Microscale Parts)。日本名古屋大学的研究中,激光光斑直径可达  $5\mu\text{m}$ ,成形时原型件不动,激光束通过透明板精密聚焦在被成形的原型上。X-Y 扫描停位精度为  $0.25\mu\text{m}$ ,Z 向停位精度为  $1\mu\text{m}$ ,可制造  $5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$  的零件如静脉阀,集成电路零件等。

### 2.2 RP 原型制造精度及可靠性

从现在的各大 RP 生产商的发展策略来看,在推出新的型号,新的机种的同时,仍将很大一部分力量投入现有工艺设备材料、软件、机电系统的不断改进上,以追求更快的制造速度、更高的制造精度、更高的可靠性或是几者之间的适当平衡。这一趋势会继续保持下去。另外,从 RP 的制造过程来看,有着不少策略选择如支撑形式、扫描方式的选择,多零件排样,大零件分割等以及各种参数的设定。随着人工智能技术的迅速发展和人们对 RPM 认识的不断加深,RP 技术的智能化不会太遥远,RP 设备的功能将更加强大,使用也将更加方便。

### 2.3 RP 行业标准化及与整个产品制造体系的融合

RP 各种工艺方法是各自独立发展起来的,因此在许多方面缺乏标准。随着 RP 的迅速发展而成为一个行业,制定合理的行业标准是必要的,否则对 RP 的推广应用不利。现在已经存在的事实上的 RP 行业标准只存在于产品数据交换领域,即 STL 文件。但也有不少用 CLI,HPGL,DXF 等取代 STL 文件的,这表明,认真对待标准化工作已经是十分现实的问题。另外,材料和设备型号等方面的标准化也会得到进一步发展。中国目前正在开展 RP 的标准化工作。

### 2.4 成型材料

新工艺的出现往往与新材料的应用有关,成型材料是 RP 技术发展的关键环节。它直接影响新工艺的产生,还会影响原型的成型速度、精度和物理、化学性能,直接影响到原型的二次应用和用户对成型工艺设备的选择。国内外现在所应用的成型材料种类已经较为丰富。

与 RP 制造的四个目标(概念型,测试型,模具型,功能零件)相适应,对成型材料的要求也不同。概念型对材料的要求主要体现在成型速度快和成型件残余应力小等方面。如对光固化树脂,要求较低的临界曝光功率、较大的穿透深度和较低的黏度。测试型对于材料成型后的强度、刚度、耐温性、抗蚀性等有一定要求,以满足测试要求。如果用于装配测试,则对于材料成型的精度还有一定要求。模具型要求材料适应具体模具制造要求,如对于消失模铸造用原型,要求材料易于去除。快速功能零件要求材料具有较好的力学性能和化学性能。从解决的方法看,一个是研究专用材料以适应专门需要;另一个是根据用途分类,研究几类通用材料以适应多种需要。

例如,SL 工艺现在占据着国际 RP 市场一半以上的份额,采用的材料是光固化树脂。国外生产用于 SL 工艺光固化树脂的公司主要有 SOMOS、Ciba-Geigy、Asahi Denka、Du Pont、联合西格诺公司等。

在金属型制造方面,国内外也有不少研究,现在发展成为快速制造新的领域。许多网站提供了关于 RP 的各种信息,列于<sup>[3]</sup>中。

### 3 快速制造技术的发展<sup>[4]</sup>

快速制造(RM-Rapid Manufacturing)是 RP 发展的直接结果,它们都是基于离散/堆积成形原理,而 RM 强调的是成形件的使用功能。RM 是精密制造技术的重要组成部分,精密制造技术如失去了其快速制造的特性,其先进性将受到影响。快速制造不仅是制造得快的技术,它还具有极其深刻的内涵,是制造概念与方法由传统制造方法向生长成形(生物制造技术)发展的过渡性制造概念和方法,是制造科学技术发展的重要里程碑。快速制造的技术核心包括制造信息过程与制造物理过程的统一和材料制备过程与材料成形过程的统一。当前快速制造的特点是结构梯度与材料梯度同时完成,特别是可以更自由地考虑材料的优化,其中之一就是实现比较复杂材料梯度。

国外近年来在快速制造领域的发展非常快。例如,DTM 的 Rapid Tool 系统采用 LM-6000 制造金属型,所用材料由直径约 50  $\mu\text{m}$  的低碳钢颗粒涂以热熔性塑料。EOSINT-M 所使用的材料不是涂覆粘接剂的钢粉,而是一种黄铜-镍的混合粉末,由芬兰的公司生产。这种材料制造出的原型可充填低熔点金属如锡,或是环氧树脂,则硬度、刚度、可加工性都很好,可以作为小型注射模,但显结构疏松。Lone Peak Engineering Inc. 为美国联邦海军研制了金属型 RM 系统。这个系统采用 LOM 工艺,其材料为用涂覆有机粘接剂的不锈钢粉末所制成的箔。当模型制造完成后,加热驱除粘接剂,金属粉末被熔结在一起。然后将该半成品在黄铜液中浸渍,以充填晶粒间隙。Soligen 至今已经成功进行了铝、不锈钢、锡、锌等金属的消失模铸造。

目前除个别领域外, RM 要达到实际工业应用还有一定的距离,特别是微滴组装等方面,但我们可以预测,本世纪内,这些技术困难将会被克服,通过数据驱动直接堆积材料单元而制造产品的时代一定会到来。

#### 3.1 高能束流金属直接熔敷/烧结成形

国际上最著名的是 LENS<sup>TM</sup> 工艺(Laser Eng. Net Shaping)、DMD 工艺(Direct Metal Deposition)和 Aero Met Corporation 的 Laser Additive Manufacturing 工艺<sup>1</sup>。采用上述工艺已经制造出铝合金、钛合金、钨合金等半精化的毛坯,精度已超过传统闭式模锻的水平,而金属内部质量也达到甚至超过整体锻压所达到的质量,在宇航、航空、造船/国防等领域具有极大的应用前景。它将引起重型锻、铸业,特别是特殊性能(如高温、高强度等)材料坯件成形的新一期变革,另一方面,它也是对于直接金属快速模具的有力的技术支持。

#### 3.2 光固化快速制造功能零件

改进光固化树脂,在保留其高精度的同时,大大提高其强度和韧性,采用固体激光器大大提高其功率,从而增加固化扫描速度大大提高生产率。国内最近开发出 UV 固体激光器为 1000mW,扫描速度达 7m/s 的大功率、高扫描速度、高生产率的光固化设备,在国际上亦属于先进之列,我国上海联泰、西安恒通、北京殷华等的新产品均达到此项技术指标。

#### 3.3 熔融挤压快速制造功能零件

改进熔融挤压的材料和成形工艺,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。国内在开发 MEM 熔融挤压快速制造系列设备的基础上,完成了新型无堵喷头、新型支撑界面结构的开发,在成形材料方面的攻关取得了重要进展,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,而且可以进行功能实验。

### 3.4 管/板液压成形

管材和板料液压成形(Hydro-Foming)仅需半个模具(通常是采用凸模),其制造成本仅为一套模具的10~35%。由于采用半个模具,则制模过程中无模具研配之需要因而制造周期进一步缩短,无需技术高超的模具研配钳工,无需研配液压机等专用机床。目前德国开发出卧式1000合模力,2000kgf/cm<sup>2</sup>成形工作压力的液压成形设备,在德国2002年汉诺威展览会上引起轰动。

金属管/板液压成形工艺最大的应用领域为汽车工业领域,我国是国际上最大的汽车市场,金属管/板液压成形工艺具有极好的前途。采用异型管结构后,车架的刚性可提高70%而不增加其重量。在保证原设计强度刚度的情况下,管材液压成形件的重量比原设计件平均轻40%~50%。将快速工模具(RT-Rapid Tooling)技术与新型液压成形技术结合起来,可以使其技术与经济优势进一步得到发挥。

## 4 生物制造(OM-Organism Manufacturing)技术的发展<sup>[5,6]</sup>

世纪之交,在制造科学和生命科学的交叉领域产生了生物制造的新的方向,它基于快速成形和快速制造的理念,在宏观尺度、细胞尺度和分子尺度的科学层次上,通过受控组装完成组织、器官与仿生产品的组装制造和组织工程培养,与此相关涉及了从设计、制造、材料、工艺和设备到信息化等各项技术。我国是人口大国,对于无排异,具有良好的生理、生化功能,可植入患者体内用于器官替代和修复的活体器官或功能体,有着巨大的需求,目前供需矛盾极大。生物制造正面临着我国经济飞速增长、社会快速发展、人民生活不断提高、国防安全巨大需求的压力,因此,研究的急迫性是很显然的。特别是先进国家已经在细胞组装等方面开展了许多基础性研究,我们必须牢牢把握时机,从基础研究抓起,从开展多学科相互渗透、密切协调、配合研究做起。目前已经开始用于辅助诊断和手术规划的体外人体器官、组织模型设计与制造;人体器官和组织的再生修复;以及在生理环境下组装成生物活体、组织等广泛的领域。与生物制造工程相关的组装技术包括:微滴组装,属宏观尺度的操作,单元尺度为数百微米;b)细胞组装,属微观组装范畴,单元(细胞)尺度为数微米,单元为类三维实体,组装形成分级空间结构。

生物制造并非合成生命、制造生命,而是采用有生命的细胞以及生物材料,采用RP的成形原理(离散/堆积成形),并在RP工艺的支持下,组装有生命的特定功能的组织和器官以及活性或非活性功能体,这是生物制造当前最关注的目标。材料单元和材料-细胞单元受控组装的机理、条件和功能实现为当前生物制造的主要科学问题。并由此可认识生物制造的内涵,即通过制造科学与生命科学相结合,在微滴、细胞和分子尺度的科学层次上,通过受控组装完成器官和功能体的制造科学和技术。生物制造的研究以各类人工器官或组织的制造作为其最终目标,当前目标是提供具有一定生理、生化功能的功能体,并且能够初步用于临床。因此,需要我们各学科领域的专家学者一起共同为发展生物制造贡献力量。

从生物制造设备及工艺研究来看,目前的主要应用包括:

- (1) 可应用在人体假肢制造和手术规划的病人个性化的模型;
- (2) 可应用在病人康复和矫形过程中使用的连续矫正模型的批量定制制造;
- (3) 分级多孔结构制造则可以提供组织工程三要素之一的三维立体支架;
- (4) 材料梯度和结构梯度的非均质制造则可以使各种生物制品的材料分布,力学性能,

微观结构和生物医学功能更加优良,更加合理;

(5) 细胞-材料单元和细胞直接操作三维堆积则可以提供对细胞进行三维空间排列的直接操控手段,将为生物组织的人工构建奠定基础,为人类开辟一个崭新的生物实验方法。

## 5 结束语

近年来,快速成形(RP)技术的概念与内涵有了很大的发展,基于RP的快速制造(RM)和生物制造(OM)的发展表明:

RM是RP发展的直接结果;

微滴性和组装性是快速制造和生物制造的两大重要特征;

分析RM和BM的信息过程和物理过程表明,信息过程的核心为建立数据通道;物理过程的核心是数据的直接驱动下的材料微滴单元的获取与组装。

RP/RM/OM在制造业和生物医学方面有着广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 T. T. Wohlers. Wohlers Report 2003, Publ. Wohlers Associates, Inc., 2003
- 2 Proceedings of The 24<sup>th</sup> Rapid Prototyping Symposium in Japan, Org. RP Japan and Japanese Society of Die and Mold Technology, Tokyo, Japan, June 24~27, 2003
- 3 ①<http://www.wohlersassociates.com>  
②[http://home.att.net/~castleisland/tl\\_tab0.htm](http://home.att.net/~castleisland/tl_tab0.htm)  
③<http://home.att.net/~castleisland/acro.htm>  
④<http://home.att.net/~castleisland/fag/fag100.htm>  
⑤[http://home.att.net/~castleisland/rp\\_int.htm](http://home.att.net/~castleisland/rp_int.htm)  
⑥<http://home.att.net/~castleisland/tech.htm>  
⑦[http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/rp\\_for\\_arch\\_short\\_guide.htm](http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/rp_for_arch_short_guide.htm)  
⑧<http://home.att.net/~edgrenda/pow/pow2.htm>
- 4 Worldwide Advances and Setbacks in Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing, Proc. of EuroMold 2003, Frankfurt, Germany, December 5, 2003
- 5 Yongnian Yan, Renji Zhang, Feng Lin. Research and Application on Bio-manufacturing, in Proceedings on International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, eds. Paulo J. Bartolo et al., Publ. by Escola Superior de Tecnologia e Gestao de Leiria, Oct. 1-4, 2003, Leiria, Portugal, pp 23-30
- 6 张人佶、颜永年、林峰、熊卓, 制造科学与技术的新兴领域: 生物制造, 电加工与模具, No.6, 1-4, 2003

# 基于快速原型的快速制造技术

张人佶 颜永年 卢清萍 林 峰 吴任东  
(清华大学机械工程系 北京 100084)

**摘 要** 基于快速原型 (Rapid Prototyping-RP) 的快速制造 (Rapid Manufacturing-RM) 仍属于离散/堆积范畴, 其本质是微滴组装。微滴性和组装性是快速制造的两大重要特征: 微滴性是快速制造质量的保证, 是组装性的前提; 组装性是快速制造的高柔性和快速性的基础。本文介绍了国外各种基于 RP 的 RM 技术的发展, 指出应当大力发展具有我国自主知识产权的 RM 技术。

**关键词** 快速制造 离散/堆积成形 微滴组装

## 1 快速制造技术的内涵

上世纪 80 年代中发展起来的快速原型 (Rapid Prototyping -RP) 技术是制造科学上制造理念的突破, 是制造技术发展的重要里程碑。RP 基于离散/堆积原理, 是与信息技术密切相关的先进制造技术, 即通过分层软件将所成形件进行分层离散处理, 并获得层内扫描的路径和各种工艺参数, 这些数据处理之结果输入快速成形设备控制材料堆积制造一个层面, 然后又制造一个层面, 层面与层面堆积, 如此反复, 最后形成一个三维实体。它将三维实体的制造, 变成准 2 维制造, 即所谓的分层制造 (Layered Manufacturing), 也称为降维制造 (Reducing Dimension Manufacturing)<sup>[1]</sup>。传统数控加工中随着被加工件形状之复杂, 加工维数  $n$  的增加, 加工时间及成本增长与维数呈  $n$  次方的关系。而 RP 技术则完全突破了这个关系。目前已发展为成熟的 RP 工艺近十种, 各种新兴的工艺有数十种之多<sup>[2]</sup>。RP 技术广泛用于各工业领域的原型制造, 成为设计部门和产品试制部门不可缺少的技术。

RP 的实践表明, 影响成形件性能和精度的最大问题是逐层堆积时的残余应力 (Residual Stress), 这是相变和各种物理化学变化引起的应力, 随着成形件尺寸之扩大, 巨大的残余应力将引起严重的变形、翘曲致使成形制造失败。减小堆积单元的尺寸, 就可以解决这个问题。例如, 在 SSM 工艺 (即 LOM 工艺) 中采用预切割方法<sup>[3]</sup>, 将 SSM 的各个层面分割成若干切割图形, 即减小单元尺度, 则残余应力大大下降, 顺利地一次成形制造了 1400mm 的大型 SSM 原型。因此, 堆积单元应朝微小化方向发展——即是朝微滴组装 (Droplet Assembling) 发展。与此同时, 随着信息技术和成形材料技术的发展, RP 发展到 RM (Rapid Manufacturing)。

制造过程由制造的信息过程与制造的物理过程组成。传统的制造技术中此两个过程是分离的, 而快速制造则是将它们初步结合在一起。比较几种成形技术: 去除成形——信息只驱动刀

具，而不驱动材料；受迫成形——信息驱动刀具加工模具，材料在模具内成形；而 RM 与 RP 技术一样，均属于离散/堆积成形：堆积过程中，数控系统不仅驱动工具运动，而且驱动材料完成单元的形成和输送并控制堆积过程——因而还要驱动材料。RM 对信息的运用程度达到并超过了 RP，它强调了如下三个统一：制造过程中的信息过程与物理过程相统一，制造过程中的材料制备与材料成形相统一，以及制造过程中的结构梯度与材料梯度相统一。由于制造工艺的限制，传统设计往往仅能注重结构的优化；而 RM 为了获得优越的功能，可以在考虑结构优化的同时更自由地考虑材料的优化，实现比较复杂的结构梯度和材料梯度。

## 2 快速制造的微滴性和组装性

快速制造的最基本的特点就是它的微滴性和组装性。RM 的微滴性具有如下特点：

(1) 整体铸锻的制造工艺所需功率总体而言比较大，而制造一个微滴单元所消耗的功率极小，因而设备功率要小若干个数量级；

(2) 整体铸锻加工的热效率很低，浪费严重，而微滴体积小，其能源利用率极高，相应地各种浪费大大减少；

(3) 整体铸锻加工的成分偏析严重，需要大型热处理炉和大型锻造设备才能在一定程度上消除偏析，而在微滴的微小体积内凝固或相变时，偏析是可以忽略的（此即粉末冶金的优点），当然微滴制造过程中的结构梯度与材料梯度相结合所表现出来的成分不均匀则是人们所特别根据性能需要而引入的；

(4) 整体铸锻加工时，材料要发生相变（从液相凝固成固相）及温度变化，凝固收缩及与此相关的残余应力是人们难以控制与补偿的，这是无法提高整体铸锻零件的精度根本原因；微滴组装中的凝固限制在一个微滴尺度内，微滴凝固后的组装的精度很高；

(5) 大型整体铸锻需要巨大的机械设备和重型模具，巨大的厂房和大型运输工具；而采用微滴组装概念来制造大型零件毛坯，各种设备和工具的投资相应地大大减少。

RM 的组装性的特点是无需改变工装或模具，只要改变 CAD 模型，即可制造（自动组装）成另一个零件，即快速制造是 CAD 模型直接驱动的数字制造方法，这种高柔性是快速制造从 RP 概念中延续下来的主要优点。

微滴性和组装性最终导致制造全过程的快速性。从材料组装的角度上分析，显然微滴越小组装速度越慢，加大微滴之尺度可以获得高的成形效率。然而加大微滴尺寸，会遇到零件的质量问题以及包括后处理的困难等问题。另外，制造的速度并不完全取决于组装的速度。零件设计和分析的速度，工装和专用工模需要量和设计、制造速度，成形后后处理的难易程度及处理速度，以及检测零件获得修改信息反馈给零件设计和工装设计并重新制造的速度都会大大影响制造的速度。RM 的快速性主要来自其组装性决定的高柔性；而微滴性又是组装性的前提，没有微滴就无从谈到组装，同时也失去了质量保证。由此可见，所谓快速制造就是根据离散/堆积的原理，充分发挥微滴性与组装性之优势，组装金属、高分子、陶瓷和生物活性等材料，形成具有特定机械功能、特种物理化学性能的功能零件之先进制造技术。RM 是 RP 的发展，它不但继承了 RP 中堆积层面成形的内核（在 CAD 模型直接驱动下组装材料成形），更强调被组装的材料的微滴性，由此引发一系列重要特性。



### 3 国外基于 RP 的 RM 技术的发展

英国的 Loughborough 大学是十分有名的研究 RP 技术的大学，P. M. Dickens 教授领导的研究组拥有各类 RP 设备，并在 RP 应用研究方面走在国际的前列。最近，他们将自己的研究组改称为快速制造研究组。图 1 是他们对于采用不同的制造方法获得塑料成形件产品的比较图<sup>[4]</sup>。由图 1 可见，由于 SL（立体光刻）、FDM（熔融堆积成形）和 SLS（激光选区烧结）三种 RP 工艺的设备、材料的成本不同，因此它们的单件成形件产品的成本也不同。而如果采用注塑模技术，当成形件产品的批量很大时，显然分摊到单件上的成本很低；而如果所需的件数比较小时，其分摊到单件上的成本就很高。例如，对于 SLS 工艺，当成形件的产量低于 14000 件时，它们的成本将低于采用注塑模技术。对于 FDM 工艺，这个值是 6500 件；对于 SL 工艺，这个值是 5000 件。由于近年来，专用的 RP 材料的改进非常大，这三种工艺所使用的材料虽然有所不同，但是它们在材料研究粉末的进展都非常大。SL 使用光固化树脂，目前已经有了高强度树脂；FDM 使用丝材，目前已经有了聚碳酸酯丝材；SLS 使用粉末材料，目前已经有了专用工程塑料粉末，它们的成形件完全可以作为工程上实际使用的零件。人们对于 RP 已经有了观念上的变化，这也促进了基于 RP 的 RM 技术的发展。

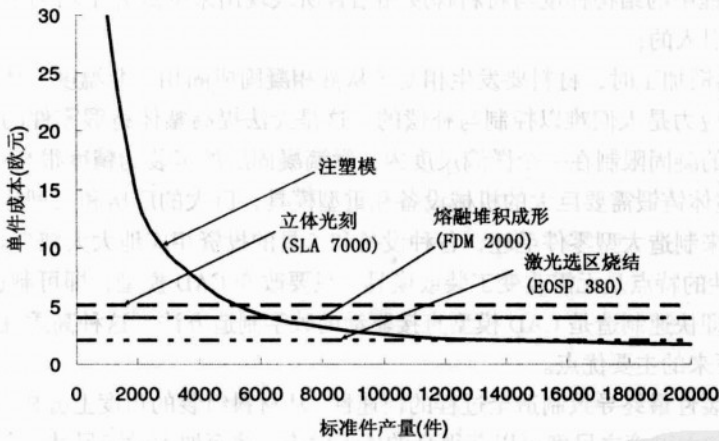


图 1 不同 RP 工艺与注塑模技术成本比较图

RM 技术是近年来国际上的研究热点。从产品到市场的时间长短决定了该产品是否能够占据市场的关键，因此，各工业发达国家均对 RM 给予高度重视。按照 GARPA（国际 RP 协会联盟）主席 Wohlers 先生的估计，到 2008 年，采用 RM 生产的零件数大约是采用 RP 生产的原型数的一倍，而在 2002 年，后者大约是前者的 4-5 倍，可见 RM 的发展速度要高得多<sup>[5]</sup>。他在 2003 年的 RP 的年度报告中，用一章的篇幅给予介绍。例如，当前国际航空航天业存在激烈的竞争。美国 Boeing 的 Rocketdyne 公司（位于加州 Canoga Park）就采用 RM 技术（主要是 3D Systems 公司的玻璃颗粒增强尼龙粉末的 SLS 工艺）为国际空间站和航天飞机生产了几百个