



中国模具工业协会人才培训部推荐丛书

成形工艺与现代模具技术丛书

快速成形 及快速制模

莫健华 主编

Rapid Prototyping & Rapid
Tooling

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

中国模具工业协会人才培训部推荐丛书

成形工艺与现代模具技术丛书

快速成形及快速制模

Rapid Prototyping & Rapid Tooling

莫健华 主编

史玉升 叶春生 王从军 副主编
刘洁 张李超 杨劲松

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍快速成形信息处理技术,反求工程技术,四种快速原型制造技术及金属板材无模数控成形技术的原理、设备、制造工艺及其应用,快速制模技术和快速成形材料。这些技术在互联网支持下,可形成一套快速响应制造的系统技术,用于新产品的快速开发。

本书分 10 章阐述相关内容,包括:概述、快速成形系统的信息处理、反求工程、光固化成形技术、选择性激光烧结成形技术、薄材叠层成形技术、熔丝沉积成形技术、金属板材无模数控成形技术、快速制模技术和快速成形材料。

本书汇集了作者多年来的研究成果和国内外资料。本书可作为高等院校机械工程专业和材料工程专业、职业教育制造工程类的教材或参考书,也可作为制造业技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

快速成形及快速制模/莫健华主编. —北京:电子工业出版社, 2006.7

(成形工艺与现代模具技术丛书)

ISBN 7-121-02844-1

I. 快… II. 莫… III. ①金属压力加工—塑性变形—计算机辅助设计 ②制模工艺 IV. ①TG302-39
②TG241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 073211 号

责任编辑:何 雄

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:410 千字

印 次:2006 年 7 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

《成形工艺与现代模具技术丛书》编委会

- 顾问:** 阮雪榆 中国工程院院士、上海交通大学教授
(按姓氏笔画排列) 柳百成 中国工程院院士、清华大学教授
胡振寰 中国工程院院士、北京科技大学教授
- 名誉主任:** 褚克辛 中国模具工业协会理事长
- 主任:** 曹延安 中国模具工业协会秘书长
- 委员:** 王敏杰 大连理工大学教授
(按姓氏笔画排列) 王鹏驹 四川大学教授
李志刚 华中科技大学教授、中国模具工业协会副理事长
- 刘廷华** 四川大学教授
- 吴公明 上海交通大学教授
吴伯杰 清华大学副教授
肖祥芷 华中科技大学教授
张化明 西北光学仪器厂高级工程师
宋满仓 大连理工大学副教授
秦珂 中国模具工业协会副秘书长
莫健华 华中科技大学教授
黄树槐 华中科技大学教授
董祥忠 四川大学教授
廖宏谊 桂林电器科学研究所副总工程师
谭平宇 中国模具工业协会人才培训部秘书长
潘宪曾 西安仪表厂高级工程师
- 成 员:** 翁史振 赵红一 王义林 祝铁丽 于同敏 靳玉春
(排名不分先后) 史玉升 叶春生 陈军 赵震 于彦东 凌毅
郑志镇 周华民 董湘怀 梁培志 车万红 刘莹
姜开宇 赵丹阳 蔡玉俊 何雄

总 序

冲压、锻造、压铸、注塑（或压塑）、挤压（冷锻）、旋压等材料加工工艺属于少无切削加工工艺。该类成形工艺方法与切削加工相比，具有生产效率与材料利用率高、产品质量与稳定性好、能耗与成本低等显著特点，因而在电子信息、仪器仪表、交通、轻工、家电、航天航空、兵器等行业中得到广泛应用。上述各项成形工艺是通过模具实现材料成形并获得所需形状的半成品或成品零件。因此，模具是现代加工制造业规模生产不可或缺的工艺设备，材料成形工艺与模具在产品生产的各行各业中发挥着极其重要的作用。

近年来，随着我国经济的腾飞和产品制造业的蓬勃发展，模具制造业也相应进入了高速发展的时期。据中国模具工业协会统计，1995 年我国模具工业总产值约为 145 亿元，而 2003 年已达 450 亿元，年均增长 14%。另据统计，我国除台湾、香港、澳门地区外，现有模具生产厂点已超过 20 000 家，从业人员有 60 多万人，模具年产值在 1 亿元以上的企业已达十多家。可以预见，我国经济的高速发展将对模具提出更为大量、更为迫切的需求，特别需要发展大型、精密、复杂、长寿命的模具。同时要求模具设计、制造和生产周期达到全新的水平。我国模具制造业面临着发展机遇，无疑也面临着更大的挑战。

我国加入世界贸易组织以来，模具制造业随之面临国际市场日益激烈的竞争局面。与国外模具企业相比，我国模具企业无论是在生产设备能力与先进技术应用方面，还是在人才的技术素质与培养方面，普遍存在差距。要改变这一现状，势必在增添先进设备及采用先进的模具制造技术（如 CAD/CAE/CAM、高速切削、快速原型制造与快速制模等）之外，更急需的是能掌握各种材料成形工艺和模具设计、制造技术，且能熟练应用这些高新技术的专业人才。为了适应我国当前的教育改革，一些高校已将原有的塑性成形、铸造、焊接等专业融入大口径的材料加工工程或机械工程专业，材料成形工艺与模具技术的研究向更高层次发展。同时，各大中专院校与技工学校纷纷开设材料成形与模具专业，积极培养不同层次、能熟练掌握各种成形工艺和模具设计与制造技术的专门人才，逐步形成了我国模具人才培养的基本格局。

为适应我国模具人才培养的需要，电子工业出版社与中国模具工业协会人才培训部合作，邀请一些多年从事材料成形与模具相关领域研究或教学工作的专家编写了《成形工艺与现代模具技术丛书》。这套丛书充分搜集和纳入了国内外有关材料成形工艺与模具技术方面的最新研究与应用成果，以及模具生产实践中的成熟经验。内容涵盖了材料成形原理、工艺设计计算、模具设计方法及应用实例，有一定的理论基础，更侧重于实际应用。

该系列丛书包括《模具 CAD/CAE/CAM》、《快速成形及快速制模》、《塑料成形与模具》、《冲压工艺与模具》、《金属体积成形与模具》、《压铸工艺与模具》、《模具制造技术》共 7 册，可作为高级模具设计与制造人员的培训教材，也可作为学校相关学科师生进行教学、科研的专业技术参考书。

我们认为，该系列丛书的出版为模具技术人员的培训提供了一套具有较高水平且学以致用用的教材，有利于我国模具制造业的人才培养，对于加快我国模具技术的发展将起到积极的促进作用。

书中可能有疏漏和不妥之处，敬请读者加以批评指正。



中国工程院院士、上海交通大学教授

前 言

21 世纪是以知识经济和信息社会为特征的时代，制造业面临瞬息万变的市场对小批量多品种产品要求的严峻挑战。在制造业日趋国际化的情况下，缩短产品开发周期和减小开发新产品投资风险，对市场能快速反应并不断推出新产品抢占市场，已成为企业赖以生存的关键。进入 21 世纪以来，在互联网支持下，由快速设计、反求工程、快速原型制造、快速模具制造等构成的快速响应制造技术取得很大进展。推广应用快速成形及快速制模技术将可增强制造业的新产品开发能力。

近年来，国内投入快速成形技术研究的单位逐年增加，许多企业开始认识到快速制造技术对企业发展的重要性，快速原型制造市场初步形成。随着我国市场经济不断完善和参与国际竞争，企业开发新产品的要求越来越迫切，渴望了解快速成形与快速制模技术的企业管理人员、技术人员及生产工人越来越多。为了适应发展的需要，已有许多大专院校、职业技术学校开设了快速成形技术课程。作者在本校也面向研究生和本科生开展了多年的快速成形与快速制模技术的教学工作，广大学生也迫切需要一本系统介绍快速成形与快速制模技术的教材。为此，在黄树槐教授的带领下，多位研究人员根据多年在快速成形技术方面的研究开发成果，汇集国内外许多大专院校、公司的研究人员发表的文献资料，写成了这本教材。其中，莫健华编写第 1, 4, 8 章，第 3 章的 3.1~3.4 节，第 6, 7 章部分内容，张李超编写第 2 章，王从军编写第 3 章的 3.5~3.7 节，史玉升编写第 5 章，叶春生编写第 6, 7 章，刘洁编写第 9 章，杨劲松编写第 10 章，周刚从国外文献中收集了第 1 章需要的部分数据。本书在撰写过程中，得到了所在单位其他研究人员及研究生的支持，在此一并表示感谢。

由于快速成形及快速制模技术还在不断发展，随着时间的推移，我们会不断总结整理最新的技术成果，更新本书的内容。本书内容难免存在不恰当之处，敬请读者批评指正。

作 者
于华工园

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 快速成形技术发展简史	1
1.3 快速成形技术的种类	2
1.3.1 光固化成形	2
1.3.2 纸叠层成形	3
1.3.3 选择性激光烧结成形	3
1.3.4 熔丝沉积成形	4
1.3.5 其他成形方法	4
1.3.6 RP 软件	5
1.4 快速制模、快速制造技术的发展	5
1.5 快速成形技术的应用	6
1.6 快速成形技术展望	8
第 2 章 快速成形系统的信息处理	10
2.1 STL 文件——RP 软件的标准数据输入格式	10
2.1.1 STL 模型的表示方法	10
2.1.2 STL 文件的存储格式	10
2.1.3 STL 文件的一致性规则及错误	12
2.1.4 STL 文件的错误处理方法	14
2.1.5 STL 格式的优缺点及其改进格式	16
2.2 RP 软件的信息处理流程	17
2.2.1 二维层面数据生成	18
2.2.2 STL 文件的切片技术	19
2.2.3 不同 RP 加工方式的加工路径生成	21
2.2.4 切片轮廓的偏置算法	24
2.2.5 变网格划分算法	27
2.2.6 便宜算法——RP 常用的一种路径优化算法	29
2.3 RP 软件介绍	30
2.3.1 独立的第三方 RP 软件	30
2.3.2 RP 系统制造商开发的专用 RP 软件	32
2.3.3 PowerRP 简介	32
第 3 章 反求工程	34
3.1 概述	34
3.1.1 反求工程的意义	34

3.1.2	反求工程测量方法	35
3.2	接触式测量	35
3.2.1	三坐标测量机的主机	36
3.2.2	三维测头	37
3.2.3	控制系统	38
3.3	非接触式测量	38
3.3.1	激光三角法	38
3.3.2	结构光法	40
3.4	接触式与非接触式测量方法的优缺点	41
3.4.1	接触式测量方法的优缺点	41
3.4.2	非接触式测量方法的优缺点	41
3.5	数据处理和产品建模	43
3.6	点云数据处理	44
3.6.1	Surfacer 软件简介	44
3.6.2	点云数据的预处理	44
3.6.3	点云数据的拼合	48
3.7	三维曲面反求	51
3.7.1	概述	51
3.7.2	Pro/E 软件中曲面造型的基本概念及方法介绍	51
3.7.3	应用实例	55
第 4 章	液态树脂光固化成形	64
4.1	光固化成形原理	64
4.1.1	基本原理	64
4.1.2	光扫描曝光原理	65
4.2	光敏树脂的固化特性	67
4.2.1	光固化成形对树脂材料的要求	67
4.2.2	光固化的特性	68
4.3	光固化成形系统及成形工艺	72
4.3.1	成形系统及工作原理	72
4.3.2	成形过程	73
4.3.3	成形工艺	75
4.3.4	成形时间	76
4.3.5	成形件的后处理	77
4.4	光固化成形的精度	78
4.4.1	影响精度的因素	79
4.4.2	衡量精度的标准	81
4.4.3	使用标准测试件进行测量	82
4.4.4	提高精度的方法	83
4.5	应用案例	83

4.5.1	在制造业中的应用	83
4.5.2	在生物制造工程和医学中的应用	83
4.5.3	在模具制造中的应用	85
4.5.4	其他应用案例	85
第 5 章	选择性激光烧结成形技术	89
5.1	成形原理	89
5.2	SLS 成形机理	90
5.2.1	粉末特性	90
5.2.2	SLS 的基本理论	91
5.2.3	传统烧结理论	97
5.2.4	SLS 和传统烧结理论的联系和区别	99
5.3	SLS 成形工艺	99
5.3.1	SLS 材料概况	100
5.3.2	成形过程	101
5.3.3	高分子粉末材料的成形工艺	103
5.3.4	金属粉末材料的成形工艺	104
5.3.5	陶瓷粉末材料的成形工艺	107
5.4	影响 SLS 成形质量和成形效率的主要因素	108
5.4.1	零件造型的影响	108
5.4.2	粉末材料的影响	109
5.4.3	成形工艺参数的影响	112
5.4.4	扫描方式	117
5.4.5	成形方向	120
5.4.6	后处理工艺	120
5.5	SLS 成形系统	121
5.5.1	硬件	121
5.5.2	软件	124
5.5.3	商品化 SLS 成形设备及其主要性能参数	126
5.5.4	SLS 快速成形设备的选型原则	127
5.6	SLS 应用案例	129
5.6.1	在精密铸造中的应用	129
5.6.2	在制造塑料件中的应用	130
5.6.3	在制造金属零件/模具中的应用	131
第 6 章	薄材叠层快速成形技术	133
6.1	工作原理	133
6.2	薄材叠层成形系统的结构	135
6.3	控制系统	137
6.3.1	虚拟 PLC 的体系结构	139
6.3.2	虚拟 PLC 的编程环境	140

6.4	局域网内部远程监控系统	142
6.4.1	远程监控方式	142
6.4.2	远程监控系统分析	143
6.4.3	远程监控系统的设计	145
6.4.4	远程监控实例	149
6.5	原型件的后处理	150
6.6	大尺寸薄壁工件的制造	151
6.7	材料的利用率	152
6.8	LOM 技术应用案例	152
第 7 章	熔丝沉积成形	155
7.1	国内外发展概况	155
7.2	FDM 的工作原理	156
7.3	成形过程	156
7.4	FDM 系统结构	158
7.5	FDM 系统的控制软件	161
7.5.1	软件系统总体结构	162
7.5.2	应用层软件结构	162
7.5.3	驱动程序结构	165
7.5.4	应用程序与驱动程序的通信	171
7.6	FDM 设备简介	173
第 8 章	金属板材数控无模单点成形技术	175
8.1	前言	175
8.2	金属板材无模单点成形原理	175
8.3	板材数控单点渐进成形设备	177
8.4	金属板材数控无模单点成形工艺	180
8.5	应用	181
8.5.1	新车型开发应用	181
8.5.2	快速制模的应用	183
第 9 章	快速制模技术	185
9.1	软模技术	185
9.1.1	工艺路线	186
9.1.2	原型件的准备	186
9.1.3	制造硅橡胶模具	186
9.1.4	浇注品的制造	188
9.2	过渡模技术	190
9.2.1	铝填充环氧树脂模	190
9.2.2	SLA 成形的树脂壳—铝填充环氧树脂背衬模	192
9.3	硬模技术	195
9.3.1	直接加工金属模具	196

9.3.2	用 SLS 方法烧结铸型	203
9.3.3	基于快速原型的喷涂法	203
9.3.4	陶瓷壳砂型法	204
9.3.5	石墨研磨法	204
9.4	金属薄板成形模具的快速制造	205
9.4.1	采用填充法制造金属板料拉深模	205
9.4.2	采用芯体表层浇铸法的制模技术	214
第 10 章	快速成形材料	218
10.1	薄材叠层成形 (LOM) 材料	218
10.1.1	纸基材	218
10.1.2	陶瓷带材	219
10.2	选择性激光烧结成形 (SLS) 材料	219
10.2.1	选择性激光烧结成形对材料的要求	219
10.2.2	选择性激光烧结材料的种类和性能	220
10.2.3	粉末特性对选择性激光烧结的影响	224
10.2.4	选择性激光烧结成形件的后处理	225
10.2.5	粉体材料的制备	226
10.3	液态树脂光固化成形材料	228
10.3.1	光敏树脂概述	228
10.3.2	光固化反应原理	229
10.3.3	SLA 用光敏树脂	231
10.4	熔丝沉积成形材料	238
10.5	快速成形材料的发展趋势	238
10.5.1	快速成形及快速制模材料	238
10.5.2	组织工程材料	238
参考文献	240

第 1 章 概 述

1.1 引 言

快速成形 (Rapid Prototyping, RP) 技术自 20 世纪 80 年代问世以来, 在成形系统、材料方面有了长足的进步, 同时推动了快速制模 (Rapid Tooling, RT) 和快速制造 (Rapid Manufacturing, RM) 的发展。由于应用快速制造技术能显著地缩短新产品开发时间、降低开发费用, 在短短十几年间, 美国、日本及德国等国家花了大量财力资助研究、开发了以液态树脂光固化成形、选择性激光烧结成形、薄材叠层成形和熔丝沉积成形为主的快速原型制造技术。并出现了许多快速原型制造服务机构、设备制造商、材料供应商、专门的软件供应商、咨询机构和教育与科研机构。我国政府对快速制造技术也极为重视, 在国家科技部的领导和支持下, 先后成立了数十家旨在推广应用该技术的“快速原型制造技术生产力促进中心”。国家 863 计划还投入了大量资金支持快速成形技术的研究和开发。此外, 有相当一部分高校将快速成形技术列入了“211”规划, 并向学生开设了快速成形及快速制模的课程。

21 世纪将是以知识经济和信息社会为特征的时代, 制造业面临瞬息万变的市场对小批量多品种产品需求的严峻挑战。在制造业日趋国际化的状况下, 缩短产品开发周期和减少开发新产品投资风险, 已成为企业赖以生存的关键。因此, 快速成形、快速制模和快速制造技术将会得到进一步发展。

1.2 快速成形技术发展简史

RP 技术是一种用材料逐层或逐点堆积出制件的制造方法。分层制造三维物体的思想雏形, 最早出现在制造技术并不发达的 19 世纪。早在 1892 年, Blather 主张用分层方法制作三维地图模型。1979 年东京大学的中川威雄教授, 利用分层技术制造了金属冲裁模、成形模和注塑模。光刻技术的发展对现代 RP 技术的出现起到了催化作用。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初期, 美国 3M 公司的 Alan J. Hebert (1978)、日本的小玉秀男 (1980)、美国 UVP 公司的 Charles W. Hull (1982) 和日本的丸谷洋二 (1983), 在不同的地点各自独立地提出了 RP 的概念, 即利用连续层的选区固化产生三维实体的新思想。Charles W. Hull 在 UVP 的继续支持下, 完成了一个能自动制造零件的称之为“光固化成形” (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 的完整系统 SLA-1, 1986 年该系统获得专利, 这是 RP 发展的一个里程碑。同年, Charles W. Hull 和 UVP 的股东们一起建立了 3D Systems 公司, 随后许多关于快速成形的概念和技术在 3D Systems 公司中发展成熟。1984 年 Michael Feygin 提出了“分层实体制造”或称“纸叠层成形” (Laminated Object Manufacturing, LOM) 的方法, 并于 1985 年组建 Helisys 公司, 1990 年前后开发了第一台商业机型 LOM-1015。1986 年, 美国 Texas 大学的研究生 C. Deckard 提出了“选择性激光烧结” (Selective Laser Sintering, SLS) 的思想, 稍后组建了 DTM 公司, 于 1992 年开发了基

于 SLS 的商业成形机 (Sinterstation)。Scott Crump 在 1988 年提出了“熔丝沉积制造”(Fused Deposition Modeling, FDM) 的思想, 1992 年开发了第一台商业机型 3D-Modeler。自从 20 世纪 80 年代中期 SLA 光成形技术发展以来, 到 90 年代后期, 出现了十几种不同的快速成形技术, 除上述几种外, 典型的还有 3DP, SDM, SGC 等。但是, SLA, LOM, SLS 和 FDM 四种技术目前仍然是快速成形技术的主流。

20 世纪 90 年代中后期是 RP 技术蓬勃发展的阶段。我国华中科技大学、清华大学、西安交通大学、北京隆源公司和南京航空航天大学等单位, 于 90 年代初率先开展 RP 及相关技术的研究、开发、推广和应用。到 1999 年, 国内已有数十台引进或国产 RP 系统在企业、高校、研究机构和快速成形服务中心运行, 先后成立了近十家旨在推广应用 RP 技术的“快速原型制造技术生产力促进中心”。国内投入 RP 研究和应用的单位逐年增加, RP 市场初步形成。在成形系统商品化、材料开发等方面有了长足的进步, 同时推动了快速制模和快速制造的发展。

华中科技大学自 1991 年开展快速成形技术研究以来, 在国家自然科学基金委员会、国家科技部、湖北省及武汉市的支持下, 投入了大量人力物力, 在快速成形机主机、计算机控制系统及数据处理和控制软件、成形材料、快速制模和快速制造等多个方面, 取得了突破性创新成果, 开发出高可靠、高性能和低成本的 HRP 系列薄材叠层成形 (LOM) 快速成形系统、HRPS 系列选择性激光烧结成形 (SLS) 快速成形系统、液态树脂光固化快速成形 (SLA) 快速成形系统、金属材料无模数控单点渐进成形系统, 并配套开发出相应的成形材料和多种快速制模工艺。

直接从计算机模型产生三维物体的快速成形技术, 涉及机械工程、自动控制、激光、计算机、材料等多个学科, 是由于现代设计和现代制造技术迅速发展的需求应运而生的。近年来, 该技术迅速在工业造型、制造、建筑、艺术、医学、航空、航天、考古和影视等领域得到较好的应用。

1.3 快速成形技术的种类

1.3.1 光固化成形

该方法的基本原理如图 1-1 所示, 是目前世界上研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的一种快速成形方法。目前, 采用 SLA 方法的有 3D Systems 公司、EOS 公司、F&S 公司、CMET 公司、D-MEC 公司、Teijin Seiki 公司、Mitsui Zosen 公司、西安交通大学等。美国 3D Systems 公司的 SLA 技术在国际市场上所占比例最大, 该公司自 1988 年推出 SLA-250 机型以后, 又于 1997 年推出 SLA-250HR, SLA-3500, SLA-5000 三种机型, 在技术上有了长足进步。其中, SLA-3500 和 SLA-5000 使用半导体激励的固体激光器, 扫描速度分别达到 2.54m/s 和 5m/s, 成形层厚最小可达 0.05mm。此外, 还采用了一种称之为 Zephyer Recoating System 的新技术, 该技术是在每一成形层上, 用一种真空吸附式刮板在该层上涂一层

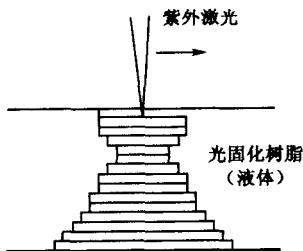


图 1-1 光固化成形

0.05~0.1mm 的待固化树脂,使成形时间平均缩短了 20%。该公司于 1999 年推出的 SLA-7000 机型与 SLA-5000 机型相比,成形体积虽然大致相同,但其扫描速度却达 9.52m/s,平均成形速度提高了 4 倍,成形层厚最小可达 0.025mm,精度提高了一倍。国内外研究者在 SLA 技术的成形机理、控制制件变形、提高制件精度等方面,进行了大量研究。

SLA 成形技术的材料主要有 4 大系列: Ciba 公司生产的 CibatooolSL 系列、DuPont 公司的 SOMOS 系列、Zeneca 公司的 Stereocol 系列和 RPC 公司(瑞典)的 RPCure 系列。CibatooolSL 系列有以下新品种:用于 SLA-3500 的 CibatooolSL-5510,这种树脂可以达到较高的成形速度和较好的防潮性能,还有较好的成形精度;CibatooolSL-5210,主要用于要求耐热、防潮的环境,如水下作业条件。SOMOS 系列也有新品种 SOMOS-8120,该材料的性能类似于聚乙烯和聚丙烯,特别适合于制造功能零件,也有很好的防潮、防水性能。

日本方面打破了 SLA 技术使用紫外光源的常规,在日本化药公司开发新型光敏树脂的协作下,由 Denken Engineering 公司和 AUTOSTRADE 公司率先使用 680nm 左右波长的半导体激光器作为光源,大大降低了 SLA 设备的价格。特别是 AUTOSTRADE 公司的 E-DARTS 机型,采用一种光源从下部隔着一层玻璃往上照射的约束液面型结构,使得该设备价格降到了 298 万日元。华中科技大学推出了 HRPL 系列 SLA 成形机和相应的光敏树脂,西安交通大学也推出了 LPS 和 CPS 系列 SLA 成形机和光敏树脂,其中, CPS 成形机采用了紫外灯作为成形能源。国内开发出 SLA 成形机的还有上海联泰科技有限公司。

在提高制品精度方面,DeMontfort 大学发展了一种称之为“Meniscus Smoothing”的技术,旨在改善制件表面质量。Clemson 大学开发了一种旋转工件造型平台,可消除分层造型中的台阶问题。

1.3.2 纸叠层成形

纸叠层成形又称 LOM,如图 1-2 所示,是先将单面涂有热熔胶的纸通过加热辊加压黏结在一起,此时,位于其上方的激光器按照三维 CAD 模型的切片数据,将该层纸切割成所制零件的内外轮廓,如此多次重复上述过程,直至完成整个原型的制造。目前,研究 LOM 工艺的有 Helisys 公司、华中科技大学、清华大学、Kira 公司、Sparx 公司和 Kinergy 公司。Helisys 公司 1992 年推出 LOM-1015(台面为 380mm×250mm×350mm)机型后,于 1996 年又推出台面达 815mm×550mm×508mm 的 LOM-2030H 机型,成形时间比原来缩短了 30%。Helisys 公司除原有的 LPH, LPS 和 LPF 三个系列纸材品种以外,还开发了塑料和复合材料品种。日本 Kira 公司的 PLT-A4 机型采用了一种超硬质刀切割和选择性黏结的方法。清华大学推出了 SSM 系列成形机及成形材料。华中科技大学推出的 HRP 系列成形机和成形材料,具有较高的性能价格比。

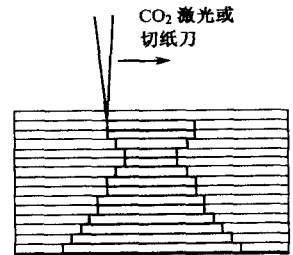


图 1-2 纸叠层成形

1.3.3 选择性激光烧结成形

该技术又称 SLS,其原理如图 1-3 所示。该方法使用粉状材料作为加工物质,并用激

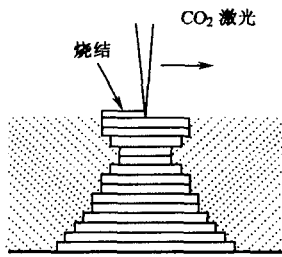


图 1-3 选择性激光烧结成形

光束分层扫描烧结。研究 SLS 的有 DTM 公司、EOS 公司、北京隆源公司、南京航空航天大学 and 华中科技大学等。DTM 公司于 1992 年、1996 年和 1999 年先后推出了 Sinterstation 2000, 2500 和 2500Plus 机型。其中, 2500Plus 机型的成形体积比过去增加了 10%, 同时, 通过对加热系统的优化, 减少了辅助时间, 提高了成形速度。北京隆源公司推出了 AFS 系列成形机及数种材料, 华中科技大学开发出 HRPS 系列成形机及材料。在材料方面, DTM 公司每年有数种新产品问世, 其中, DuraForm GF 材料生产的制件, 精度更高, 表面更光滑。最近开发的弹性聚合物

Somos201, 具有橡胶特性, 并可耐热和抗化学腐蚀, 用该材料造出了汽车上的蛇型管、密封垫和门封等防渗漏的柔性零件。用 RapidSteel 2.0 不锈钢粉制造的模具, 可生产 100 000 件注塑件。RapidTool 2.0 这种材料的收缩率只有 0.2%, 其制件可以达到较高的精度和表面质量, 几乎不需要后续抛光工序。DTM Polycarbonate 铜-尼龙混合粉末, 主要用于制造小批量的注塑模。EOS 公司发展了一种新的尼龙粉末材料 PA3200GF, 类似于 DTM 的 DuraForm GF, 用这种材料制造的零件精度和表面质量都较好。

1.3.4 熔丝沉积成形

熔丝沉积制造又称 FDM, 该技术的成形原理如图 1-4 所示。采用丝状材料作为加工物质, 通过两个喷头分别挤出熔融态的成形材料和支撑材料, 扫描二维截面, 形成实体。它与前三种工艺不同的是成形过程不需要激光器, 因而设备价格便宜。研究 FDM 的主要有 Stratasys 公司和 MedModeler 公司。Stratasys 公司于 1993 年开发出第一台 FDM-1650 (台面为 250mm×250mm×250mm) 机型后, 先后推出了 FDM-2000, FDM-3000 和 FDM-8000 机型。其中, FDM-8000 的台面达 457mm×457mm×610mm。清

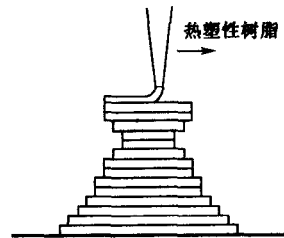


图 1-4 熔丝沉积成形

华大学推出了 MEM 机型。引人注目的是 1998 年 Stratasys 公司推出的 FDM-Quantum 机型, 最大造型体积为 600mm×500mm×600mm。由于采用了挤出头磁浮定位 (magna drive) 系统, 可在同一时间独立控制两个挤出头, 因此, 其造型速度是过去的 5 倍。Stratasys 公司于 1998 年与 MedModeler 公司合作开发了专用于一些医院和医学研究单位的 MedModeler 机型, 使用 ABS 材料, 并于 1999 年推出可使用聚酯热塑性塑料的 Genisys 型改进机型 Genisys Xs, 造型体积达 305mm×203mm×203mm。

熔丝线材主要是 ABS、人造橡胶、铸蜡和聚酯热塑性塑料。1998 年, 澳大利亚的 Swinburn 工业大学, 研究了一种金属-塑料复合材料丝。1999 年, Stratasys 公司开发出水溶性支撑材料, 有效地解决了复杂、小型孔洞中的支撑材料难以去除或无法去除的难题。

1.3.5 其他成形方法

1997 年, Z 公司推出 Z-402 机型, 该设备以淀粉掺蜡或环氧树脂为原料, 将黏合剂喷

射到粉末上的方法制造零件。1998年, ProMetal 公司推出 RTS-300 机型, 以钢、钢合金、镍合金和钛铝合金粉末为原料, 同样采用将黏合剂喷到粉末上的技术, 可直接快速生产金属零件。1999年, 3D Systems 公司开发了一种使用热塑性塑料的多喷头式热力喷射实体打印机 (ThermoJet solid object printer), 成形速度更高 (见图 1-5)。

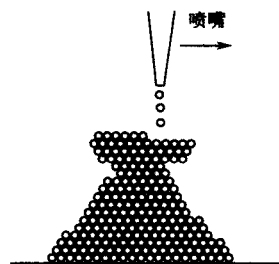


图 1-5 热喷打印法

美国新泽西工学院 1998 年提出了一种快速冰冻成形 (RFP) 的新技术, 以纯水作为原型材料, 用冰点较低的盐水作为支撑材料, 通过选区沉积和快速冰冻制造原型零件。

1998 年以来, 微制造技术也是 RP 技术一个较为活跃的研究方向, 美国的一个研究小组利用 CVD 技术制造了直径只有 $100\mu\text{m}$ 的高密度零件。另一研究小组则研究了一种新的微制造方法, 类似于固体光固化 (SGC) 技术, 据称该技术可制造分子水平的零件, 层厚仅 $2\mu\text{m}$ 。

1.3.6 RP 软件

Stratasys 公司开发了针对 FDM 系统的 Quick Slice 6.0 和针对 Genisys 系统的 Auto Gen 3.0 软件包, 采用了触摸屏, 使操作更加直观。Helisys 公司开发了面向 Windows NT 4.0 的 LOM Slice 软件包新版本, 增加了 STL 可视化、纠错、布尔操作等功能, 故障报警更完善。3D Systems 公司开发了针对 Actua 概念机的新操作软件 Allegro 2.0, 用于 SLA-7000, 其 3D Lightyear 软件不仅操作简便 (easy-to-use), 而且文件的确认速度提高了 150 倍, 着色速度提高了 6 倍, 文件的准备速度提高了两倍多, 而文件的存储空间则减少了 50%。Solid Concepts 公司开发了 Solid View 3.0 软件包。Clemson 大学研究了通过对参数曲面的切片, 产生参数曲线的分层边界, 利用这种参数曲线控制快速成形机。国内有关研究单位也开发了多种 RP 软件, 并达到实用水平。

1.4 快速制模、快速制造技术的发展

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 等技术制造的原型, 再翻成硅橡胶模具后, 向模中灌注双组分的聚氨酯, 固化后即得到所需的零件。调整双组分聚氨酯的构成比例, 可使所得到的聚氨酯零件的机械性能接近 ABS 或 PP。

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。模具寿命不及钢模, 但比硅胶模高, 可达 1000~5000 件, 可满足中小批量生产的需要。瑞士的 Ciba 精细化工公司开发了树脂模具系列材料 CibaTool。

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, 利用熔模铸造的方法生产金属零件; 也有利用 LOM 加工模型及其他方法加工的制件作为母模来制造硅橡胶