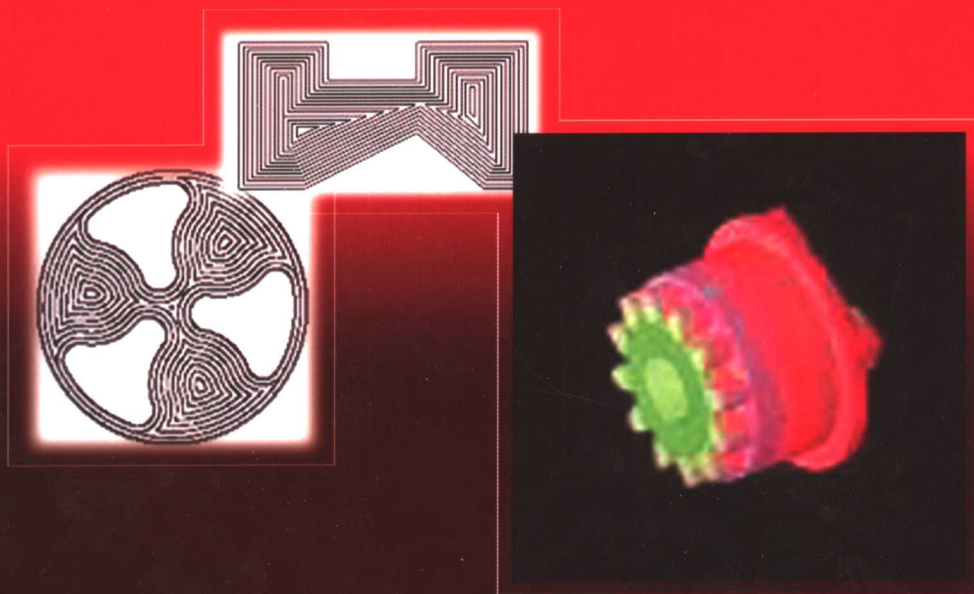




快速成型技术及应用

刘伟军 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



现代加工技术丛书

快速成型技术及应用

刘伟军 等编著



机械工业出版社

本书论述了快速成型技术中的数据处理方法,给出了一些典型的算法及实现策略。从工艺原理和系统组成等方面系统详细地介绍了快速成型技术中的典型工艺,分析了各典型工艺的具体特点和存在的问题,阐述了各典型工艺的发展方向。分析了快速成型典型工艺影响成型精度的主要因素,提出了相应的对策。从验证概念设计、确认设计、性能测试、制造模具的母模和靠模等各个方面系统阐述了快速成型技术的应用。介绍了快速成型技术中材料的应用、开发和研究。最后,阐述了功能梯度材料、纳米材料和金属材料的快速成型技术的最新研究进展。

本书可作为从事相关技术与开发的科技人员的参考书,同时也可供高等院校机械类和材料加工类高年级本科生和研究生作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

快速成型技术及应用/刘伟军等编著. —北京:机械工业出版社, 2005.1

(现代加工技术丛书)

ISBN 7-111-15558-0

I. 快... II. 刘... III. 工程材料—成型 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 114488 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:李万字 责任编辑:赵浩杰 版式设计:霍永明

责任校对:罗莉华 封面设计:陈沛 责任印制:施红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·8.25 印张·320 千字

0 001—4 000 册

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

前 言

快速成型(Rapid Prototyping)技术是20世纪80年代后期发展起来的一种新型制造技术。被认为是近20年制造技术领域的一次重大突破,其对制造业的影响可与数控技术的出现相比。快速成型技术的巨大优点及其发展速度已经引起各国政府的高度重视,国内外众多著名科研机构 and 大学都在进行这个学科的研究。

我国于20世纪90年代初开始从事快速成型技术的研究工作,在国家科技部、国家基金委及部分地方政府与科技部门的大力支持下,目前在快速成型工艺、材料、软件等方面取得了丰硕的成果,这些成果部分已经实现商品化。同时,许多单位购进了先进的快速成型及相关设备和软件,建立了相应的服务机构,开展快速成型及相关技术的推广应用和社会服务工作,取得了良好的经济和社会效益。

中国科学院沈阳自动化研究所从1999年开始从事该项技术的研究、开发和应用推广工作。一方面,在国家863计划先进制造及自动化领域机器人主题和中国科学院的支持下,开展快速成型、快速模具制造、三维测量及反求工程等技术的研究和开发工作,通过几年的努力,取得了一定的科研成果。另一方面,购进了先进的快速成型、反求工程等相关设备和软件,建立了快速成型技术服务中心,开展快速成型及相关技术的推广应用和社会服务工作,在为国内众多企业进行服务的同时,积累了许多有价值的经验。同时,在从事该项技术的研究、开发、推广应用和研究生教学过程中,也积累了较多的相关文献资料。

目前,越来越多的科研和工程技术人员都加入到该技术的研究、开发和应用工作中来,他们非常渴望能够更加系统深入地了解 and 掌握快速成型技术。然而,目前国内有关该技术方面的书籍较少,相关的文献资料又比较繁杂。为此,作者在总结归纳国内外现有快速成型技术的基础上,并结合所在单位多年来的科研、应用成果和研究生教学经验,编著了本书。其目的是系统深入地阐述快速成型技术的原理及典型应用,以供从事相关技术研究和应用工作的科研和工程技术人员参考。

本书第1章由刘伟军编写,第2章由赵吉宾、刘伟军编写,第3章由卞宏友编写,第4章由张凯、刘伟军编写,第5章由张嘉易编写,第6章由夏仁波编写,第7章由刘伟军、孙亦南、马永壮、岳震编写,第8章由刘伟军、赵吉宾、尚晓峰、吴晓军编写。全书由刘伟军主审,刘伟军、赵吉宾统稿。本书是作者所在的学科组集体智慧的结晶,在编写过程中得到了实验室工作人员和研究生们的

IV

大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免有不恰当之处，敬请读者批评指正。

刘伟军

2004 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 快速成型技术概述	1
1.1 快速成型技术的原理	1
1.1.1 成型方式的分类	1
1.1.2 快速成型技术的原理	2
1.2 快速成型技术的分类	5
1.3 快速成型技术的国内外研究现状及发展趋势	8
1.3.1 快速成型技术的国内外研究现状	8
1.3.2 RPM 技术的工艺装备、材料及软件	9
1.3.3 快速成型技术的发展趋势	11
第 2 章 快速成型技术中的数据处理	14
2.1 快速成型技术中的数据接口及预处理	14
2.1.1 快速成型的数据来源	14
2.1.2 快速成型技术中的数据接口	15
2.1.3 STL 文件的缺陷分析	19
2.1.4 STL 文件的检测与修复	22
2.2 三维模型的分层处理	26
2.2.1 快速成型技术中的分层方法	26
2.2.2 基于 STL 模型的智能切片算法	28
2.2.3 CAD 模型的直接切片	31
2.2.4 适应性分层算法	36
2.3 扫描路径的生成技术	39
2.3.1 切片轮廓数据的生成	40
2.3.2 线宽补偿的生成算法	40
2.3.3 自交环及无效环的剔除	43
2.3.4 填充扫描矢量生成算法	43
第 3 章 快速成型制造的几种典型工艺	45
3.1 立体印刷成型	45
3.1.1 工艺原理	45
3.1.2 系统组成	46

3.1.3 工艺过程	48
3.1.4 研究现状	49
3.1.5 存在的问题	51
3.2 分层实体制造	52
3.2.1 工艺原理	52
3.2.2 系统组成	53
3.2.3 研究现状和存在问题	56
3.3 熔融沉积制造	59
3.3.1 工艺原理	59
3.3.2 系统组成	59
3.3.3 研究现状与存在问题	61
3.4 激光选区烧结	62
3.4.1 工艺原理	63
3.4.2 系统组成	64
3.4.3 工艺步骤	65
3.4.4 研究现状与存在问题	68
3.5 三维打印	70
3.5.1 三维喷涂粘接成型机	70
3.5.2 喷墨式三维打印	72
3.6 掩膜光刻	75
3.6.1 SGC 工艺原理与技术要求	76
3.6.2 工艺过程及应用	78
3.7 其他快速成型技术	79
3.7.1 多种材料组织的熔积成型	79
3.7.2 直接光成型	80
3.7.3 三维焊接成型	80
3.7.4 气相沉积成型	80
3.8 减式快速成型技术	80
第4章 快速成型采用的材料	82
4.1 概述	82
4.2 快速成型用材料种类及性能要求	82
4.2.1 快速成型材料的分类	82
4.2.2 快速成型工艺对材料性能的要求	83
4.3 快速成型工艺常用的材料	86
4.3.1 SLA 材料	86

4.3.2 LOM 材料	88
4.3.3 SLS 材料	90
4.3.4 FDM 材料	101
4.3.5 TDP 材料	102
4.4 几种特殊材料在快速成型工艺中的应用	102
4.4.1 组织工程材料在快速成型中的应用	102
4.4.2 聚合物材料在快速成型中的应用	105
4.4.3 复合材料在快速成型中的应用	109
4.4.4 反应成型塑料在快速成型中的应用	111
4.5 快速成型材料的技术进步及其成型性问题	113
4.5.1 快速成型材料的技术进步	113
4.5.2 快速成型材料的成型性问题	115
4.6 快速成型材料的产品、用途及发展趋势	117
4.6.1 国内外快速成型材料的产品及用途	117
4.6.2 快速成型材料研究发展的趋势	120
第 5 章 影响快速成型精度的主要因素分析	122
5.1 分层制造原理性台阶误差	123
5.2 数据处理过程对成型精度的影响	123
5.2.1 STL 文件切片误差	124
5.2.2 STL 文件切片截面的曲线拟合	124
5.3 实际加工时设备工艺条件对成型精度的影响	128
5.3.1 扫描线(直径)宽的限制及过烧	128
5.3.2 不同成型加工系统对成型精度的影响	137
5.4 提高数控路径插补技术、改善 RP 制件表面质量简介	148
5.4.1 自适应式插补	148
5.4.2 三次样条插补	149
5.4.3 微线段连续高速高精度插补	149
5.5 小结	151
第 6 章 快速成型技术的应用	152
6.1 快速成型在产品原型制造中的应用	152
6.1.1 模型、零件的观感评价	153
6.1.2 结构设计验证与装配校核	154
6.1.3 性能和功能测试	155
6.2 快速成型在模具制造中的应用	156
6.2.1 直接制模	158

6.2.2 间接制模	162
6.2.3 直接模具与间接制模的比较	168
6.2.4 快速模具技术的发展趋势	169
6.3 快速成型在精密铸造中的应用	170
6.3.1 直接制造精铸母模	170
6.3.2 硅橡胶-石膏型精密铸造	170
6.3.3 制造精铸型壳	171
6.3.4 功能零件无模具快速精铸	172
6.4 快速成型在汽车行业中的应用	173
6.4.1 零件设计原型的快速制造	173
6.4.2 汽车车身设计与开发	174
6.4.3 快速成型用于发动机试验研究	176
6.5 快速成型在医学领域中的应用	178
6.5.1 RP 技术在医疗诊断、教学和外科学领域的应用	178
6.5.2 RP 技术在生物力学领域的应用	181
6.5.3 RP 技术在法医学领域的应用	181
6.5.4 RP 技术在组织工程学领域的应用	181
6.5.5 材料和 RP 机器的选择	183
6.5.6 将来的应用	183
6.6 快速成型在仿生学中的应用	184
6.6.1 目前仿生制造的发展状况	185
6.6.2 基于 RP 的仿生制造方法	186
6.7 快速成型在艺术领域中的应用	188
第 7 章 三维测量与反求工程	190
7.1 反求工程技术概述	190
7.1.1 反求工程的基本概念	190
7.1.2 反求工程的应用	191
7.1.3 反求工程与快速成型的集成	192
7.2 三维曲面测量技术	193
7.2.1 接触式测量	193
7.2.2 断层扫描式测量	196
7.2.3 非接触式测量	199
7.2.4 总结	206
7.3 三维曲面重构技术	207
7.3.1 NURBS 曲面构造	207

7.3.2	三角曲面的构造	208
7.3.3	对象检验与修正	209
第 8 章	快速成型技术的一些新进展	211
8.1	功能梯度材料的快速成型技术	211
8.1.1	功能梯度材料简介	211
8.1.2	功能梯度材料特性分析	213
8.1.3	传统的功能梯度材料制备方法	215
8.1.4	基于 RP 的功能梯度材料零件制备方法	216
8.1.5	功能梯度材料/零件的 CAD 信息表达方法	217
8.2	纳米晶材料快速成型技术	223
8.2.1	纳米晶金属的快速成型技术	224
8.2.2	纳米晶陶瓷的快速成型技术研究	228
8.3	金属直接成型技术	230
8.3.1	选择性激光烧结	231
8.3.2	直接金属沉积	233
8.3.3	激光工程化净成型	237
8.3.4	激光快速柔性制造	240
8.3.5	金属粉末激光成型	241
8.3.6	其他金属直接成型工艺	243
参考文献		245

第1章 快速成型技术概述

20世纪90年代以后,制造业的外部形势发生了根本的变化。用户需求的个性化和多变性,迫使企业不得不逐步抛弃原来以“规模效益第一”为特点的少品种、大批量的生产方式,进而采取多品种、小批量、按定单组织生产的现代生产方式。同时,市场的全球化和一体化,更要求企业具有高度的灵敏性,面对瞬息万变的市场环境,不断地迅速开发新产品,变被动适应用户为主动引导市场,这样才能保证企业在竞争中立于不败之地。可见,在这种时代背景下,市场竞争的焦点就转移到速度上来,能够快速提供更高性能/价格比产品的企业,将具有更强的综合竞争力。快速成型技术是先进制造技术的重要分支,无论在制造思想上还是实现方法上都有很大的突破,利用快速成型技术可对产品设计进行迅速评价、修改,并自动快速地将设计转化为具有相应结构和功能的原型产品或直接制造出零部件,从而大大缩短新产品的开发周期,降低产品的开发成本,使企业能够快速响应市场需求,提高产品的市场竞争力和企业的综合竞争能力。

1.1 快速成型技术的原理

快速成型是20世纪80年代末期产生和发展起来的一种新型制造技术,是计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机数字控制(CNC)、激光、新材料、精密伺服等多项技术的发展和综合。快速成型(Rapid Prototyping)又称自由制造(Freeform Fabrication)、添加成型(Additive Fabrication)、桌面制造(Desk-Top Manufacturing)及三维打印(3D Printing)等。

1.1.1 成型方式的分类

根据现代成型学的观点,可把成型方式分为以下几类:

1) 去除成型(Dislodge Forming)。去除成型是运用分离的方法,按照要求把一部分材料有序地从基体上分离出去而成型的加工方式。传统的车、铣、刨、磨等加工方法均属于去除成型。去除成型是目前制造业最主要的成型方式。

2) 添加成型(Additive Forming)。添加成型是指利用各种机械的、物理的、化学的等手段通过有序地添加材料来达到零件设计要求的成型方法。快速成型技术是添加成型的典型代表,它从思想上突破了传统的成型方式,可快速制造出任意复杂程度的零件,是一种非常有前景的新型制造技术。

3) 受迫成型(Forced Forming)。受迫成型是利用材料的可成型性(如塑性等)在特定外围约束(边界约束或外力约束)下成型的方法。传统的铸造、锻造和粉末冶金等均属于受迫成型。目前受迫成型还未完全实现计算机控制,多用于毛坯成型、特种材料成型等。

4) 生长成型(Growth Forming)。生长成型是利用生物材料的活性进行成型的方法,自然界中生物个体的发育均属于生长成型,“克隆”技术是在人为系统中的生长成型方式。随着活性材料、仿生学、生物化学、生命科学的发展,这种成型方式将会得到很大的发展和应用。

上述几种成型方式中,去除成型与受迫成型均属于传统的成型方式。添加成型是 20 世纪 80 年代末出现的成型方式,从成型材料的组织情况、产品的精度和性能、可加工零件的形状等进行比较,结果如表 1-1 所示:

表 1-1 各种成型方法的比较

	去 除 成 型	受 迫 成 型	添 加 成 型
材料利用率	产生切屑,材料利用率低	产生工艺废料,如浇冒口,飞边等	材料利用率高,大多数工艺可达到 100%
产品精度与性能	通常为最终成型,精度高	多用于毛坯制造,属净成型或近净成型范畴	属于净成型范畴,精度较好
可制造零件的复杂程度	受刀具或模具等的形状限制,无法制造太复杂的曲面和异形深孔等	受模具等工具的形状限制,无法制造太复杂的曲面	可制造任意复杂形状的零件

目前快速成型技术已经逐步得到我国制造业企业的普遍重视,并在机械、汽车、国防、航空航天及医学领域得到了非常广泛的应用。从材料上看,添加成型可以制造光敏树脂、塑料、纸、特种蜡及聚合物包金属粉末等,陶瓷材料、复合材料、金属材料的快速成型技术也正在研制之中。不久的将来,快速成型技术必将直接完成从 CAD 模型到金属零件的直接制造。

1.1.2 快速成型技术的原理

笼统地讲,快速成型属于添加成型,严格地讲,快速成型应该属于离散/堆积成型。它从成型原理上提出一个全新的思维模式,即将计算机上制作的零件三维模型,进行网格化处理并存储,对其进行分层处理,得到各层截面的二维轮廓信息,按照这些轮廓信息自动生成加工路径,由成型头在控制系统的控制下,选择性地固化或切割一层层的成型材料,形成各个截面轮廓薄片,并逐步顺序叠加成三维坯件,然后进行坯件的后处理,形成零件,如图 1-1 所示。

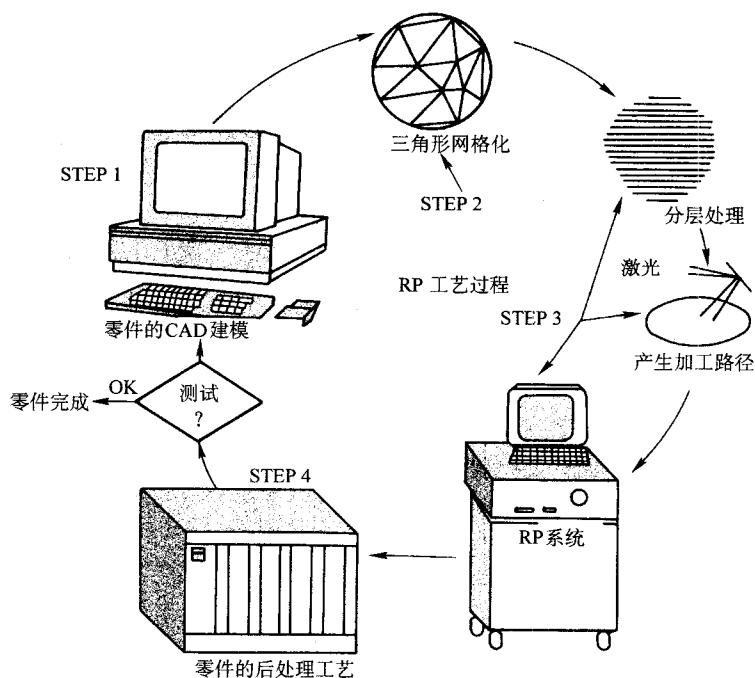


图 1-1 快速成型技术原理

1.1.2.1 快速成型的工艺过程

快速成型的工艺过程具体如下：

1) 产品三维模型的构建。由于 RP 系统是由三维 CAD 模型直接驱动，因此首先要构建所加工工件的三维 CAD 模型。该三维 CAD 模型可以利用计算机辅助设计软件(如 Pro/E, I-DEAS, Solid Works, UG 等)直接构建，也可以将已有产品的二维图样进行转换而形成三维模型，或对产品实体进行激光扫描、CT 断层扫描，得到点云数据，然后利用反求工程的方法来构造三维模型。

2) 三维模型的近似处理。由于产品往往有一些不规则的自由曲面，加工前要对模型进行近似处理，以方便后续的数据处理工作。由于 STL 文件格式简单、实用，目前已经成为快速成型领域的准标准接口文件。它是用一系列的小三角形平面来逼近原来的模型，每个小三角形用 3 个顶点坐标和一个法向量来描述，三角形的大小可以根据精度要求进行选择。STL 文件有二进制码和 ASCII 码两种输出形式，二进制码输出形式所占的空间比 ASCII 码输出形式的文件所占用的空间小得多，但 ASCII 码输出形式可以阅读和检查。典型的 CAD 软件都带有转换和输出 STL 格式文件的功能。

3) 三维模型的切片处理。根据被加工模型的特征选择合适的加工方向，在

成型高度方向上用一系列一定间隔的平面切割近似后的模型,以便提取截面的轮廓信息。间隔一般取 $0.05 \sim 0.5\text{mm}$,常用 0.1mm 。间隔越小,成型精度越高,但成型时间也越长,效率就越低,反之则精度低,但效率高。

4) 成型加工。根据切片处理的截面轮廓,在计算机控制下,相应的成型头(激光头或喷头)按各截面轮廓信息做扫描运动,在工作台上一层一层地堆积材料,然后将各层相粘结,最终得到原型产品。

5) 成型零件的后处理。从成型系统里取出成型件,进行打磨、抛光、涂挂,或放在高温炉中进行后烧结,进一步提高其强度。

快速成型工艺流程如图 1-2 所示。

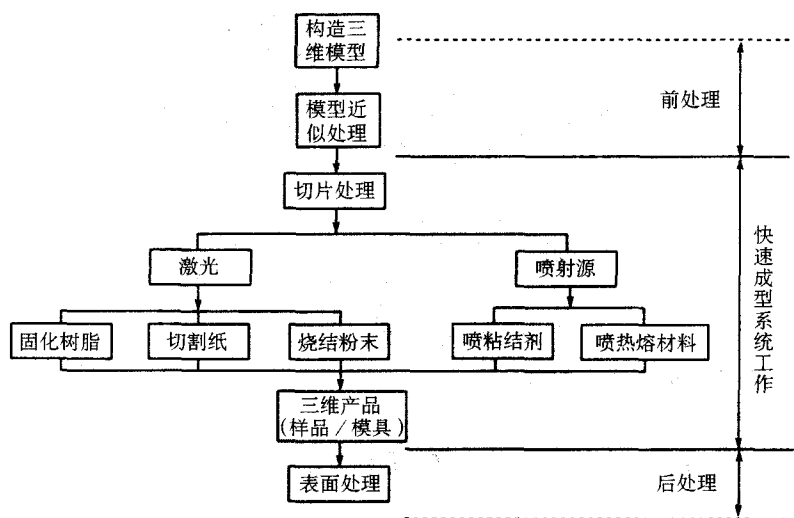


图 1-2 快速成型的成型过程

1.1.2.2 快速成型技术的特点

快速成型技术具有以下几个重要特征：

1) 可以制造任意复杂的三维几何实体。由于采用离散/堆积成型的原理,它将一个十分复杂的三维制造过程简化为二维过程的叠加,可实现对任意复杂形状零件的加工。越是复杂的零件越能显示出 RP 技术的优越性。此外, RP 技术特别适合于复杂型腔、复杂型面等传统方法难以制造甚至无法制造的零件。

2) 快速性。通过对一个 CAD 模型的修改或重组就可获得一个新零件的设计和加工信息。从几个小时到几十个小时就可制造出零件,具有快速制造的突出特点。

3) 高度柔性。无需任何专用夹具或工具即可完成复杂的制造过程,快速制

造工模具、原型或零件。

4) 快速成型技术实现了机械工程学科多年来追求的两大先进目标, 即材料的提取(气、液、固相)过程与制造过程一体化和设计(CAD)与制造(CAM)一体化。

5) 与反求工程(Reverse Engineering)、CAD 技术、网络技术、虚拟现实等相结合, 成为产品快速开发的有力工具。

因此, 快速成型技术在制造领域中起着越来越重要的作用, 并将对制造业产生重要影响。

1.2 快速成型技术的分类

快速成型技术根据成型方法可分为两类: 基于激光及其他光源的成型技术(Laser Technology), 例如: 光固化成型(SLA)、分层实体制造(LOM)、选域激光烧结(SLS)、形状沉积成型(SDM)等; 基于喷射的成型技术(Jetting Technology), 例如: 熔融沉积成型(FDM)、三维印刷(3DP)、多相喷射沉积(MJD)。下面对其中比较成熟的工艺作简单的介绍。

1. SLA (Stereolithography Apparatus)工艺 SLA 工艺也称光造型或立体光刻, 由 Charles Hull 于 1984 年获美国专利。1988 年美国 3D System 公司推出商品化样机 SLA-I, 这是世界上第一台快速成型机。SLA 各型成型机占据着 RP 设备市场的较大份额。

SLA 技术是基于液态光敏树脂的光聚合原理工作的。这种液态材料在一定波长和强度的紫外光照射下能迅速发生光聚合反应, 分子量急剧增大, 材料也就从液态转变成固态。如图 1-3 所示为 SLA 工作原理图。液槽中盛满液态光固化树脂, 激光束在偏转镜作用下, 能在液态表面上扫描, 扫描的轨迹及光线的有无均由计算机控制, 光点打到的地方, 液体就固化。成型开始时, 工作平台在液面下一个确定的深度, 聚焦后的光斑在液面上按计算机的指令逐点扫描, 即逐点固化。当一层扫描完成后, 未被照射的地方仍是液态树脂。然后升降台带动平台下降一层高度, 已成型的层面上又布满一层树脂, 刮板将粘度较大的树脂液面刮平, 然后再进行下一层的扫描, 新固化的一层牢固地粘在前一层上, 如此重复直到整个零件制造完毕, 得到一个三维实体模型。

SLA 方法是目前快速成型技术领域研究中研究得最多的方法, 也是技术上最为成熟的方法。SLA 工艺成型的零件精度较高, 加工精度一般可达到 0.1mm, 原材料利用率近 100%。但这种方法也有自身的局限性, 比如需要支撑、树脂收缩导致精度下降、光固化树脂有一定的毒性等。

2. LOM (Laminated Object Manufacturing, LOM)工艺 LOM 工艺称叠层实体制造或分层实体制造, 由美国 Helisys 公司的 Michael Feygin 于 1986 年研制成功。LOM

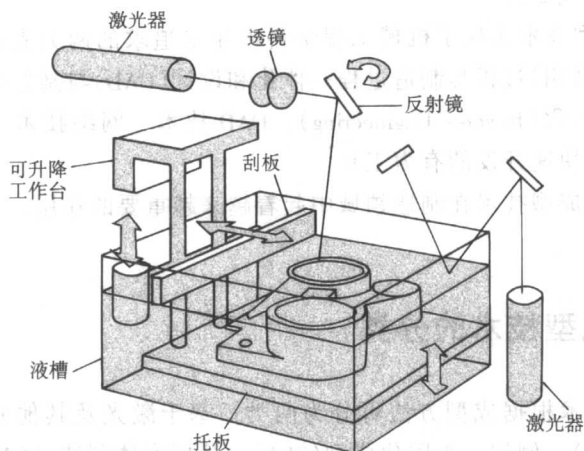


图 1-3 光固化成型机的原理图

工艺采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等。片材表面事先涂覆上一层热熔胶。加工时，热压辊热压片材，使之与下面已成型的工件粘接。用 CO_2 激光器在刚粘接的新层上切割出零件截面轮廓和工件外框，并在截面轮廓与外框之间多余的区域内切割出上下对齐的网格。激光切割完成后，工作台带动已成型的工件下降，与带状片材分离。供料机构转动收料轴和供料轴，带动料带移动，使新层移到加工区域。工作台上升到加工平面，热压辊热压，工件的层数增加一层，高度增加一个料厚。再在新层上切割截面轮廓。如此反复直至零件的所有截面粘接、切割完。最后，去除切碎的多余部分，得到分层制造的实体零件，如图 1-4 所示。

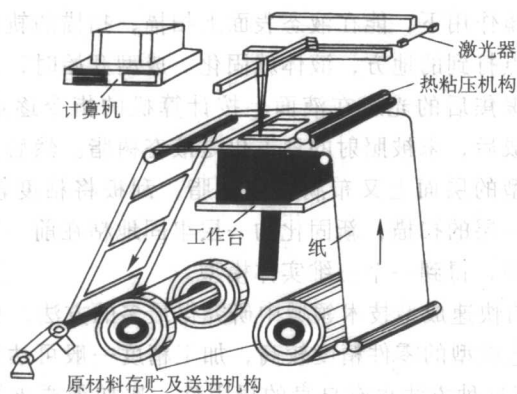


图 1-4 分层实体制造系统原理图

LOM 工艺只需在片材上切割出零件截面的轮廓，而不用扫描整个截面。因此成型厚壁零件的速度较快，易于制造大型零件。工艺过程中不存在材料相变，因此不易引起翘曲变形。工件外框与截面轮廓之间的多余材料在加工中起到了支撑作用，所以 LOM 工艺无需加支撑。缺点是材料浪费严重，表面质量差。

3. SLS (Selective Laser Sintering) 工艺 SLS 工艺称为选域激光烧结，由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C.R. Dechard 于 1989 年研制成功。SLS 工艺是利用粉末状材料成型的。将材料粉末铺洒在已成型零件的上表面，并刮平，用高强度的 CO_2 激光器在刚铺的新层上扫描出零件截面，材料粉末在高强度的激光照射下被烧结在一起，得到零件的截面，并与下面已成型的部分连接。当一层截面烧结完后，铺上新的一层材料粉末，有选择地烧结下层截面，如图 1-5 所示。烧结完成后去掉多余的粉末，再进行打磨、烘干等处理得到零件。

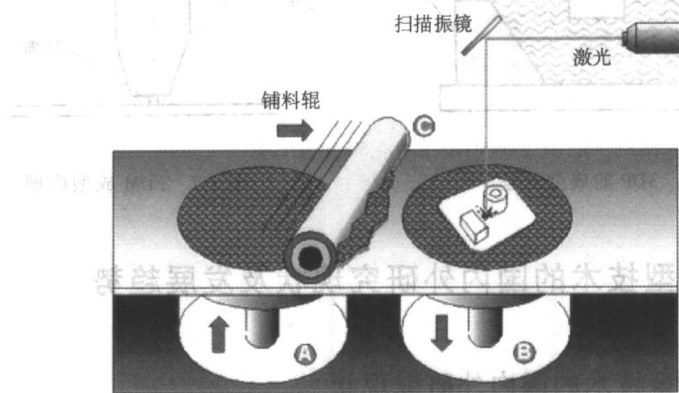


图 1-5 SLS 成型原理

SLS 工艺的特点是材料适应面广，不仅能制造塑料零件，还能制造陶瓷、蜡等材料的零件，特别是可以制造金属零件。这使 SLS 工艺颇具吸引力。SLS 工艺无需加支撑，因为没有烧结的粉末起到了支撑的作用。

4. 3DP (Three Dimension Printing) 工艺 三维印刷工艺是美国麻省理工学院 E-manual Sachs 等人研制的。已被美国的 Soligen 公司以 DSPC (Direct Shell Production Casting) 名义商品化，用以制造铸造用的陶瓷壳体和型芯。

3DP 工艺与 SLS 工艺类似，采用粉末材料成型，如陶瓷粉末、金属粉末。所不同的是材料粉末不是通过烧结连结起来的，而是通过喷头用粘结剂(如硅胶)将零件的截面“印刷”在材料粉末上面(见图 1-6)。用粘结剂粘接的零件强度较低，还须后处理。先烧掉粘结剂，然后在高温下渗入金属，使零件致密化，提高强度。