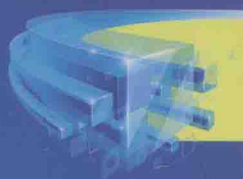


3D Printing



3D打印技术 · 修订版

3D PRINTING

王运赣 王 宣◎编著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

3D Printing

3D 打印技术

(修订版)

王运赣 王 宣 编著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书介绍近年来快速发展的3D打印技术,这种技术传承了增材制造法的基本思想,是快速成形技术的延续与发展。实现3D打印技术的关键是3D打印机和3D打印自由成形工艺。3D打印机和3D打印自由成形工艺特别适合于光电子材料、生物医学材料、航空航天材料等构成的功能件成形。

本书总结了编著者近年来有关3D打印技术的研究和实践成果,汇集了国内外大量有关文献中的精华,系统地阐述了3D打印机的原理和结构、3D打印自由成形工艺及其最新应用进展。全书分为两篇。上篇介绍3D打印机,共有7章:概述、黏结剂喷射式3D打印机、材料挤压式3D打印机、压电驱动式3D打印机、气动式3D打印机、电动式3D打印机和普及式3D打印机。下篇介绍3D打印自由成形工艺,共有5章:3D打印自由成形工艺流程、金属构件3D打印自由成形、机电器件3D打印自由成形、生物医学器件3D打印自由成形和3D打印自由成形的广泛应用。

本书可作为高等学校制造工程类、材料工程类、生命科学类 and 产品设计类专业的教材和参考书,也是从事有关研究、设计、制造的工程技术人员的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

3D打印技术/王运贇,王宣编著.——修订本.——武汉:华中科技大学出版社,2014.5

ISBN 978-7-5680-0079-6

I. ①3… II. ①王… ②王… III. ①快速成型技术 IV. ①TB4



中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 101878 号

3D 打印技术(修订版)

王运贇 王 宣 编著

策划编辑:徐正达

责任编辑:姚同梅 徐正达

封面设计:李 嫒

责任校对:李 琴

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:华中理工大学印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:21.25

字 数:450千字

版 次:2014年7月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

修订版前言

3D 打印技术是基于增材制造法原理的一种高新技术,是快速成形技术的延续与发展,实现 3D 打印技术的关键是 3D 打印机和 3D 打印自由成形工艺。3D 打印机用微喷射式喷头来配送和操控成形材料,按照预定的工件 CAD 模型,将材料一层层地逐步喷射于工作台上,最终堆积为 3D 工件。按照 3D 打印机出现的年代,可将其分为传统 3D 打印机、先进 3D 打印机和普及式 3D 打印机等三大类。3D 打印自由成形工艺将 3D 工件转化为 2D 截面薄片层的叠加,使复杂形体的成形大为简化。这种工艺及 3D 打印机特别适合于光电子材料、生物医学材料、航空航天材料等构成的功能件的成形,以便制作切实符合用户要求的真实功能构件,而不仅仅是只能用于形体观测的样品。

3D 打印技术是数字制造技术发展的典型产物,3D 打印技术应用领域的不断扩大,又将为数字制造技术开辟更广阔的新天地。可以相信,3D 打印技术不仅在科学研究和工业生产领域会有令人难以置信的作为,而且还会普及家庭,深入人们生活的方方面面。

根据近年来在 3D 打印技术方面研究与实践的体会,以及收集的国内外有关的先进经验,我们编著了这本书,着重介绍 3D 打印机的原理和结构、3D 打印自由成形工艺及其最新应用进展。

本书第一版得到了读者充分的肯定,编著者倍感欣慰。这次再版时根据有关术语标准,对增材制造和 3D 打印的定义进行了更明确的说明,并且更新了增材制造工艺和相应装备的名称,充实了一些实用的数据,希望能更好地满足读者的需求。

编著者

2014 年 1 月

目 录

上篇 3D 打印机

第 1 章 概述	(1)
1.1 增材制造、快速成形与 3D 打印	(1)
1.2 快速成形机	(3)
1.2.1 容器内光聚合式(SLA)成形机	(4)
1.2.2 粉末床烧结/熔化式成形机	(14)
1.2.3 片层压式(LOM)成形机	(37)
1.3 增材制造装备的佼佼者——3D 打印机	(40)
1.4 3D 打印与第三次工业革命	(43)
第 2 章 黏结剂喷射式 3D 打印机	(46)
2.1 黏结剂喷射式 3D 打印机工作原理	(46)
2.2 Z Printer 打印机	(48)
2.3 ExOne 打印机	(56)
2.4 Voxeljet 打印机	(58)
2.5 Therics 打印机	(60)
2.6 富奇凡 LTY 型打印机	(61)
2.7 NCKU 型打印机	(64)
2.8 黏结剂喷射式 3D 打印机使用的成形材料	(64)
第 3 章 材料挤压式 3D 打印机	(67)
3.1 材料挤压式 3D 打印机工作原理	(67)
3.2 Stratasys 打印机	(68)
3.3 富奇凡 HTS 系列打印机	(72)
3.4 六轴材料挤压式打印机	(75)
3.5 殷华公司的材料挤压式打印机	(76)
3.6 辊轮-螺杆式熔挤系统设计	(77)
3.7 材料挤压式 3D 打印机使用的成形材料	(79)
第 4 章 压电驱动式 3D 打印机	(84)
4.1 容积型压电喷头	(84)
4.2 OBJET 打印机	(89)
4.3 3D Systems 打印机	(98)

4.4	容积型压电喷头的供料系统和压力控制系统	(114)
4.4.1	供料系统	(114)
4.4.2	压力控制系统	(116)
4.5	拍击型压电喷头	(121)
4.6	拍击型压电驱动式打印机	(123)
4.7	开关型压电喷头与打印机	(126)
4.8	压电驱动式 3D 打印机使用的成形材料	(128)
第 5 章	气动式 3D 打印机	(130)
5.1	活塞开关型气动喷头与打印机	(130)
5.2	时间-压力型气动喷头与打印机	(131)
5.3	容积型气动喷头与打印机	(136)
5.3.1	压力助推微注射器型喷头	(136)
5.3.2	3D 生物打印机	(137)
5.3.3	富奇凡公司生产的 PAM 型打印机	(141)
5.4	气动膜片型喷头与打印机	(142)
5.5	雾化型气动喷头与打印机	(144)
5.5.1	雾化型气动喷头	(144)
5.5.2	Solidscape 蜡模打印机	(145)
5.5.3	华中科技大学研制的雾化型气动喷头	(150)
5.5.4	Optomec 雾化型气动喷头	(152)
5.6	粉粒流型气动喷头与打印机	(154)
5.6.1	同轴送粉激光熔覆式气动喷头	(155)
5.6.2	侧向送粉激光熔覆式气动喷头	(157)
5.6.3	同轴光内送粉激光熔覆式气动喷头	(158)
5.6.4	同步送粉激光熔覆式打印机	(160)
5.6.5	同步送粉焊接熔覆式打印机	(164)
5.6.6	送粉系统	(166)
5.6.7	熔覆过程检测和控制	(168)
5.7	气动式 3D 打印机使用的成形材料	(172)
第 6 章	电动式 3D 打印机	(173)
6.1	电磁阀操控型喷头与打印机	(173)
6.2	微注射器型电动喷头与打印机	(174)
6.3	电流体动力喷射喷头与打印机	(178)
6.4	电场偏转型喷头与打印机	(187)
6.5	电动螺杆型喷头与打印机	(195)
6.6	复合型 3D 打印机	(197)

6.7 电动式 3D 打印机使用的成形材料	(198)
第 7 章 普及式 3D 打印机	(200)
7.1 工程设计用普及式 3D 打印机	(200)
7.2 简易实验用普及式 3D 打印机	(204)
7.3 学生学习用普及式 3D 打印机	(205)
7.4 家用普及式 3D 打印机	(205)
7.5 普及式 3D 打印机的特点	(207)
7.6 普及式 3D 打印机的机身结构	(207)
7.7 普及式 3D 打印机的驱动控制系统	(213)
7.8 普及式 3D 打印机的应用前景	(216)
参考文献	(219)

下篇 3D 打印自由成形工艺

第 8 章 3D 打印自由成形工艺流程	(223)
8.1 3D 打印自由成形工艺流程概述	(223)
8.2 CAD 模型的建立	(224)
8.3 CAD 模型的近似处理	(228)
8.4 CAD 模型的分层切片	(230)
第 9 章 金属构件 3D 打印自由成形	(232)
9.1 金属构件黏结剂喷射式成形	(232)
9.2 金属构件激光烧结式成形	(234)
9.3 金属构件激光熔化式成形	(239)
9.4 金属构件激光熔覆式成形	(242)
9.4.1 激光熔覆式成形原理	(242)
9.4.2 激光熔覆式成形工艺研究	(245)
9.5 金属构件电子束熔化式成形	(251)
9.6 金属构件电子束熔覆式成形	(254)
9.7 金属构件微束等离子弧熔覆式成形	(258)
9.7.1 微束等离子弧熔覆式成形原理	(258)
9.7.2 微束等离子弧熔覆式成形工艺研究	(260)
9.8 金属构件熔化液滴喷射沉积式成形	(262)
9.8.1 熔化液滴喷射沉积式成形原理	(262)
9.8.2 熔化液滴喷射沉积式成形工艺研究	(263)
9.9 金属构件增材与减材复合式快速制造	(271)
9.9.1 沉积技术与计算机数控机加工复合式快速制造	(271)
9.9.2 片层压制与计算机数控机加工复合式快速制造	(275)
9.9.3 粉末床熔化技术与计算机数控机加工复合式快速制造	(278)

第 10 章 机电器件 3D 打印自由成形	(281)
10.1 电子元器件打印成形	(281)
10.2 太阳能电池打印成形	(284)
10.3 曲面天线打印成形	(285)
10.4 电气互连金属焊料打印成形	(287)
10.5 铸造蜡模打印成形	(288)
10.6 复杂器件 3D 打印折叠成形	(289)
10.7 梯度材料构件打印成形	(291)
第 11 章 生物医学器件 3D 打印自由成形	(297)
11.1 组织工程支架打印成形	(297)
11.1.1 支架黏结剂喷射式打印成形	(298)
11.1.2 支架 MAM/PAM 式打印成形	(299)
11.1.3 支架 E-jet 式打印成形	(301)
11.2 细胞打印成形	(302)
11.2.1 细胞压电喷射式打印成形	(302)
11.2.2 细胞 MAM/PAM 式打印成形	(303)
11.2.3 细胞气动雾化式打印成形	(304)
11.2.4 细胞 E-jet 式打印成形	(305)
11.3 口腔修复体打印成形	(305)
11.3.1 口腔金属修复体蜡模打印成形	(305)
11.3.2 口腔陶瓷修复体 MAM 式打印成形	(306)
11.3.3 口腔陶瓷修复体复合式打印成形	(307)
11.3.4 口腔金属修复体 DMD 式打印成形	(307)
11.4 控释给药系统打印成形	(308)
第 12 章 3D 打印自由成形的广泛应用	(310)
12.1 陶瓷构件打印成形	(310)
12.2 珠宝与首饰蜡模打印成形	(312)
12.3 建筑模型与构件打印成形	(313)
12.4 食品打印成形	(315)
12.5 时尚品打印成形	(319)
12.5.1 时装打印成形	(319)
12.5.2 时尚家庭用品打印成形	(319)
12.5.3 时尚工艺品打印成形	(320)
12.6 科教模型打印成形	(321)
参考文献	(322)
附录 A 常用材料英中文名称对照	(326)
附录 B 本书英中文术语对照	(328)

上篇 3D 打印机

第 1 章 概 述

1.1 增材制造、快速成形与 3D 打印

增材制造(additive manufacturing, AM)是不同于减材制造(subtractive manufacturing, SM)的一种新型制造方法。

在机械制造业,长期以来最常用的一种成形方法是减材制造法,即用刀具从较大的毛坯上逐步切除无用材料来制作工件的方法(见图 1.1a),传统的车、铣、刨、钻、磨等切削加工,以及现代的电火花成形和激光切割等,都属于减材制造。

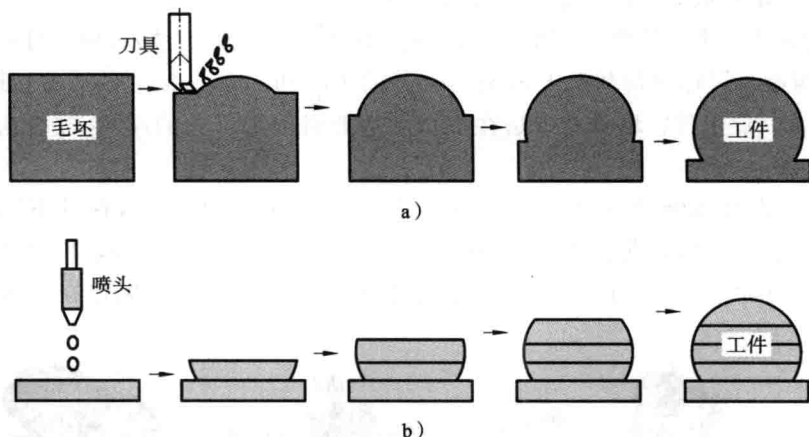


图 1.1 机械制造方法

a) 减材制造法 b) 增材制造法

减材制造的工件精度高,表面品质好,成形材料与加工机床之间通常不存在从属依存关系,因此适用材料广泛,不需要机床制造厂商研制、提供专用成形材料。但是,它采用的毛坯通常必须由铸造或锻造而成,并且往往还需用模具预成形,其加工周期较长,材料利用率较低,成本较高,此外,还受刀具或模具的限制,一些内部形状很复杂的工件有时甚至无法成形。

增材制造法(见图 1.1b)出现于 20 世纪 80 年代,按照美国材料与试验协会(American Society for Testing and Materials, ASTM)国际标准组织 F42 增材制造技术

委员会(ASTM International Technical Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies)的定义^[61],增材制造是根据 3D CAD 模型数据,通常用材料的层层连接来制作物体的工艺(a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer)。其核心是将所需成形工件的复杂 3D 形体通过切片处理转化为简单的 2D 截面的组合,因此不必采用传统的加工机床和工具、模具,而是依据工件的 3D 计算机辅助设计(CAD)模型(见图 1.2a),在计算机控制的增材制造装备上直接成形 3D 工件。成形过程如下:① 利用增材制造装备中的软件,沿工件模型的高度方向对模型进行分层切片,得到各层截面的 2D 轮廓图(见图 1.2b)。② 增材制造装备按照这些轮廓图,分层沉积材料,成形一系列 2D 截面薄片层(见图 1.2c)。③ 增材制造装备使片层与片层之间相互黏结,将这些片层顺序堆积成 3D 工件实体(见图 1.2d)。

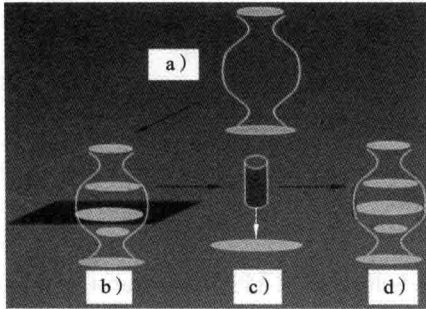


图 1.2 工件的 3D—2D—3D 转化

- a) 3D 设计模型
- b) 模型分层切片
- c) 分层制片
- d) 堆积成体

增材制造法采用转化 3D 物体为 2D 图形组合的降维处理技术,使工件的成形大为简化,因此只需传统切削加工 30%~50%的工时和 20%~35%的成本,就能直接制作复杂的 3D 工件。增材制造法在机械制造业引起了巨大的反响,被誉为制造业的一场革命。

增材制造技术涉及一组子技术(分支技术, sub-technologies),在其不同的发展阶段有不同的子技术(见图 1.3),快速成形(rapid prototyping, RP)是增材制造在其出现初期(20 世纪 80 年代)开始产生的子技术,3D 打印是增材制造在当今发展的子技术。

增材制造技术涉及一组子技术(分支技术, sub-technologies),在其不同的发展阶段有不同的子技术(见图 1.3),快速成形(rapid prototyping, RP)是增材制造在其出现初期(20 世纪 80 年代)开始产生的子技术,3D 打印是增材制造在当今发展的子技术。

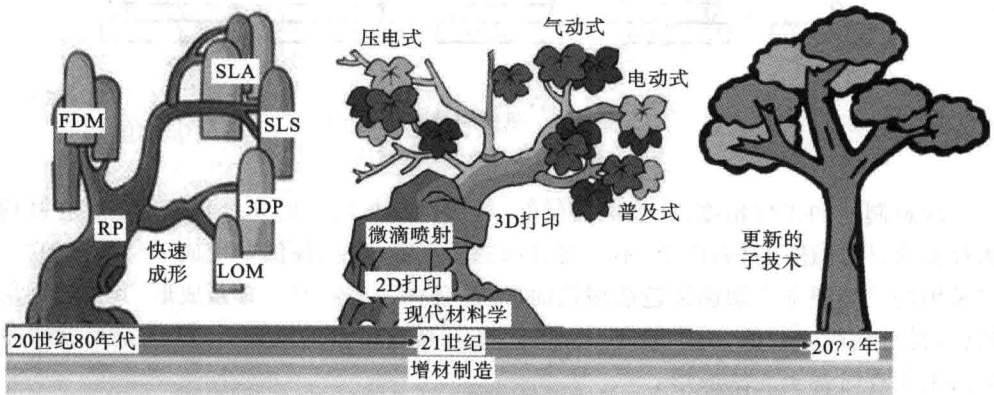


图 1.3 增材制造及其子技术

快速成形侧重的是成形用于形体观测的样品。3D 打印是在 2D 打印、微滴喷射和现代材料学基础上发展起来的快速制造(rapid manufacturing, RM), 侧重的是成形功能构件, 构件的材质与力学、电气、化学性能等极大地趋近真实可用工件。但是, 现在也有人将快速成形与 3D 打印统称为广义 3D 打印。

若干年后, 也许会出现另一种更新的增材制造子技术, 其功能与 3D 打印比较又有显著的进步。

按照 ASTM F42 的分类^[61], 增材制造技术有 7 种成形工艺, 如表 1.1 所示。其中, 前五种是根据增材制造初期出现的子技术(快速成形)产生和发展的工艺, 后两种是根据增材制造当今发展的子技术(3D 打印)产生的工艺。

表 1.1 增材制造工艺分类

序号	成形工艺	原用名	代表性公司
1	容器内光聚合(vat photopolymerization)	SLA	3D Systems, Envision TEC
2	粉末床烧结/熔化(powder bed fusion)	SLS/SLM /EBM	EOS, 3D Systems, Arcam AB
3	片层压(sheet lamination)	LOM	Solido, Fabrisonic
4	黏结剂喷射(binder jetting)	3DP	3D Systems, ExOne, Voxeljet
5	材料挤压(material extrusion)	FDM	Stratasys, RepRap, Bits from Bytes
6	材料喷射(material jetting)	—	OBJET, 3D Systems, Solidcape
7	定向能量沉积(directed energy deposition)	—	Opotomec, POM

1.2 快速成形机

经过二十多年的努力, 实现五种快速成形工艺的关键装备——快速成形机已有五种相应的商品化定型产品(见图 1.4):

- ① 容器内光聚合式(SLA)成形机, 用激光束使液态光敏树脂固化成形;
- ② 粉末床烧结/熔化式(SLS/SLM/EBM)成形机, 用激光束/电子束烧结/熔化粉材成形;
- ③ 片层压式(LOM)成形机, 用激光束、刻刀或超声波使片材成形;
- ④ 黏结剂喷射式(3DP)成形机, 用喷头喷射黏结剂使粉材成形;
- ⑤ 材料挤压式(FDM)成形机, 用喷头挤压熔融塑料成形。

其中, 3DP 成形机和 FDM 成形机是最初出现的 3D 打印机, 因此又称为黏结剂喷射式(3DP) 3D 打印机和材料挤压式(FDM)3D 打印机。

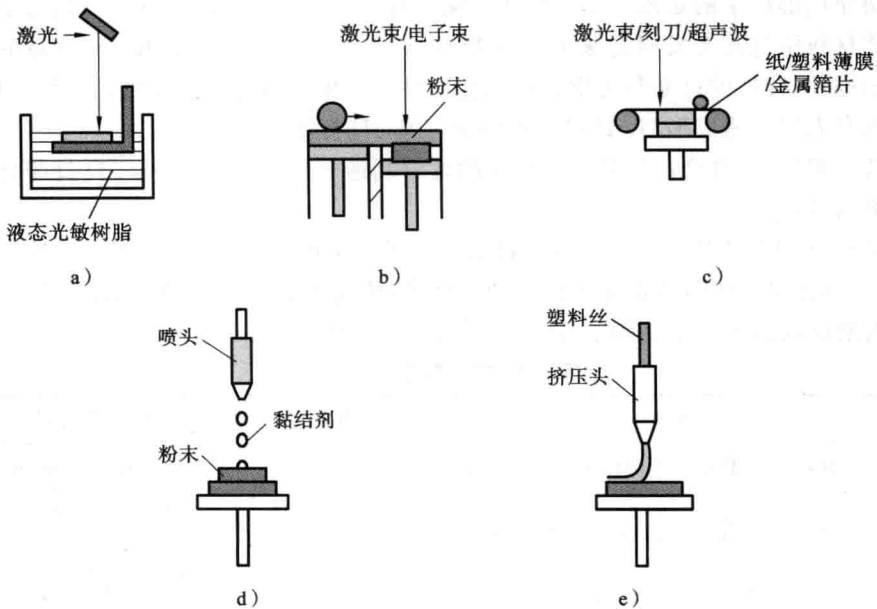


图 1.4 商品化的快速成形机

a) SLA b) SLS/SLM/EBM c) LOM d) 3DP e) FDM

1.2.1 容器内光聚合式(SLA)成形机

SLA 成形机按英文全称“stereo lithography apparatus”可直译为“立体平版印刷设备”，我国通常称之为立体光固化成形机。它是实现容器内光聚合式工艺的一类增材制造装备。

容器内光聚合式(SLA)成形机有上光束扫描式(见图 1.5a)和下光束扫描式(见图 1.5b)两种。上光束扫描式 SLA 成形机由液盒(容器)、工作台、激光器、扫描振镜和计算机数控系统等组成。其中,液盒中盛满液态光敏树脂,有许多小孔的工作台浸没在液盒中,并可沿高度方向作往复运动。激光器为紫外(UV)激光器,如固体 Nd:YVO₄(半导体泵浦)激光器、氦镭(He-Cd)激光器和氩离子激光器。扫描振镜能根据控制系统的指令,按照成形件截面轮廓的要求作高速往复摆动,从而使激光器发出的激光束反射至液盒中光敏树脂的上表面,并沿此面作 X、Y 方向的扫描运动。在这一层受到紫外激光束照射的部位,液态光敏树脂发生聚合反应而快速固化,形成相应的一层固态的成形件截面轮廓薄片层和支撑结构。

激光固化成形过程如下(见图 1.6):开始时,工作台的上表面处于液面下一个高度,称为分层厚度(通常为 0.10 mm 左右),该层液态光敏树脂被激光束扫描而固化,并形成所需第一层固态截面轮廓薄片层(见图 1.6a),然后工作台下下降一个分层厚度,液盒中的液态光敏树脂流过已固化的截面轮廓层(见图 1.6b),刮刀按照设定的分层厚度作往复运动,刮去多余的液态树脂,再对新铺上的一层液态树脂进行激光束

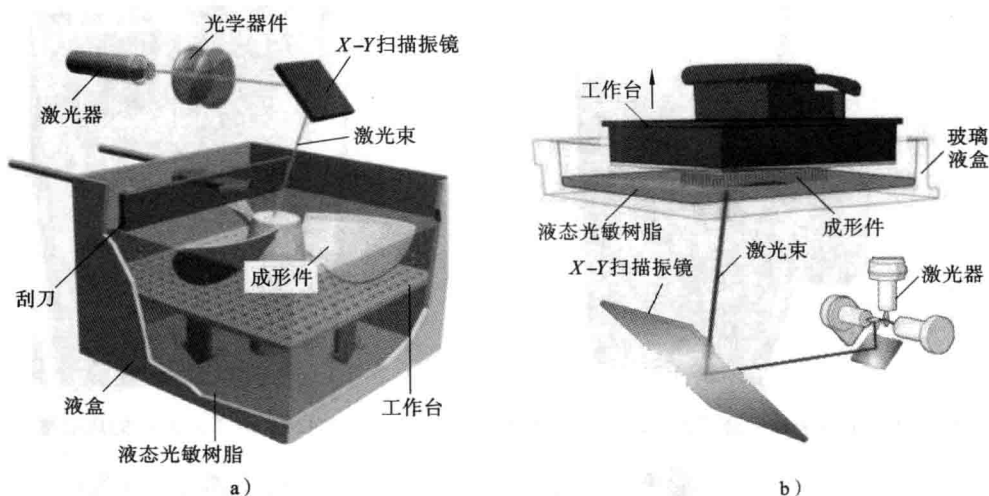


图 1.5 容器内光聚合式(SLA)成形机原理

a) 上光束扫描式 b) 下光束扫描式

扫描固化,形成第二层所需固态截面轮廓薄片层,新固化的一层能牢固地黏结在前一层上。如此重复,直到整个工件成形完毕为止(见图 1.6c)。

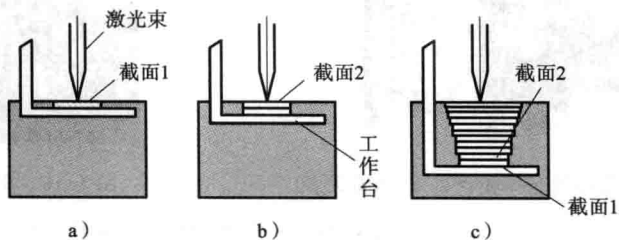


图 1.6 激光固化成形过程

a) 固化第一层 b) 固化第二层 c) 固化最后一层

在下光束扫描式 SLA 成形机上,激光束自下而上照射透明玻璃液盒中的液态光敏树脂,并使其第一层固化成形,然后工作台上升一个分层高度,激光束使液盒中的第二层液态光敏树脂固化成形,这样,工件由上向下逐层成形,直到整个工件成形完毕为止。

图 1.7 所示是 3D Systems 公司生产的 SLA 成形机,图 1.8 所示是 SLA 成形机的成形室。图 1.9 所示是陕西恒通智能机器有限公司(简称陕西恒通公司)生产的 SLA 成形机。图 1.10 所示是 SLA 成形件。表 1.2 所示是 3D Systems 公司生产的 SLA 成形机的主要技术参数。表 1.3 所示是 3D Systems 公司生产的 SLA 成形机使用的 Accura 系列成形材料特性。表 1.4 所示是陕西恒通公司生产的 SLA 成形机的主要技术参数。



图 1.7 3D Systems 公司生产的 SLA 成形机

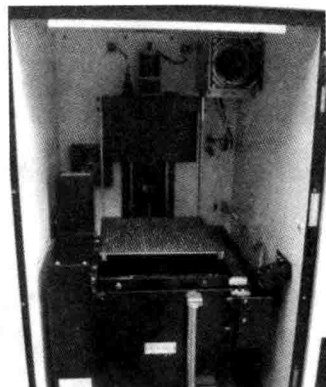


图 1.8 SLA 成形机的成形室



图 1.9 陕西恒通公司生产的 SLA 成形机

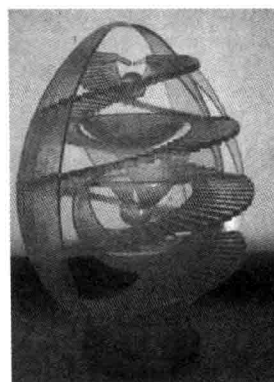


图 1.10 SLA 成形件

表 1.2 3D Systems 公司生产的 SLA 成形机的主要技术参数

项 目	成形机型号		
	iPro 8000	iPro 8000MP	ProX 950
激光器	3 倍频固体激光器, 波长 354.7 nm, 功率 1450 mW		
分层厚度/mm	0.05~0.15		
扫描系统	用直径为 0.13 mm 的光斑成形轮廓时, 最大扫描速度为 3.5 m/s; 用直径为 0.76 mm 的光斑填充时, 最大扫描速度为 25 m/s		
成形室 尺寸/mm	RDM 650M	650×350×300	—
	RDM 750SH	650×750×50	—
	RDM 750H	650×750×275	—
	RDM 750F	650×750×550	—
	RDM 1500XL	—	1500×750×550
外形尺寸/mm	1260×2200×2280		2200×1600×2260
质量/kg	1590		2404

表 1.3 Accura 系列成形材料特性

项 目		材 料 牌 号					
		25 plastic	48HTR plastic	55 plastic	60 plastic	ABS Black (SL 7820)	ABS White (SL 7810)
密度/ (g/cm ³)	液态	1.13	1.17	1.13	1.13	1.08	1.13
	固态	1.19	1.23	1.20	1.21	1.16	—
30℃黏度/(mPa·s)		250	200~250	155~185	150~180	210	210
拉伸模量/MPa		1590~1660	2800~3980	3200~3380	2690~3100	1890~2440	2290~2400
抗拉强度/MPa		38	64~67	63~68	58~68	45~47	46~48
断后伸长率/%		13~20	4~7	5~8	5~13	6~13	8~14
缺口冲击强度/(J/m)		19~24	22~29	12~22	15~25	39~56	24~47
弯曲模量/MPa		1380~1660	2760~3400	2690~3240	2700~3000	2260~2370	2040~2120
抗弯强度/MPa		55~58	105~118	88~110	87~101	75~78	74~76
热变形 温度/℃	0.45 MPa 下	58~63	65	55~58	53~55	51	51
	1.8 MPa 下	51~55	57	51~53	48~50	—	—
玻璃化转变温度/℃		60	62	56	58	62	—
硬度/HSD		80	86	85	86	86	—

项 目		材 料 牌 号					
		Amethyst	Bluestone	CastPro	CastPro Free (SL7800)	CeraMAX	ClearVue
密度/ (g/cm ³)	液态	1.10	1.70	1.08	1.15	1.59	1.10
	固态	1.23	1.78	1.17	—	1.62	1.17
30℃黏度/(mPa·s)		350	1200~1800	240~260	205	1500~2000	235~260
拉伸模量/MPa		3514~3996	7600~11700	2490~2620	2075~2400	9460~98680	2270~2640
抗拉强度/MPa		22~38	66~68	52~53	41~47	78~87	46~53
断后伸长率/%		0.56~1.04	1.4~2.4	4.1~8.3	10~18	1.0~1.5	3~15
缺口冲击强度/(J/m)		9~12	13~17	43~49.5	37~58	14.5~17.9	40~58
弯曲模量/MPa		3652~3721	8300~9800	2310~2340	2280~2650	8270~8370	1980~2310
抗弯强度/MPa		87~125	124~154	82~84	69~74	137~145	72~84
热变形 温度/℃	0.45 MPa 下	77	65~66	51	62	220	51
	1.8 MPa 下	62	65	50	—	97	50
玻璃化转变温度/℃		103	71~83	70	57	108~110	62
硬度/HSD		87	92	85	87	89	80

续表

项 目		材 料 牌 号					
		ClearVue Free (SL 7870)	Peak plastic	Sapphire plastic	SL 7840	Xtreme	Xtreme White 200 plastic
密度/ (g/cm ³)	液态	1.13	1.32	1.10	1.13	1.13	1.12
	固态	—	1.36	1.18	1.16	1.19	1.18
30℃黏度/(mPa·s)		180	605	160~200	270	250~300	650~750
拉伸模量/MPa		1920~2010	4220~4790	910~1110	1700~2200	1790~1980	2300~2630
抗拉强度/MPa		38~42	57~78	20~24	36~45	38~44	45~50
断后伸长率/%		10~22	1.3~2.5	9~16	11~17	14~22	7~20
缺口冲击强度/(J/m)		23~51	21.3~27.3	29~40	37~60	35~52	55~66
弯曲模量/MPa		1940~2250	4180~4790	1080~1420	1600~2200	1520~2070	2350~2550
抗弯强度/MPa		73~76	77~126	28~38	65~80	52~71	75~79
热变形 温度/℃	0.45 MPa 下	48	78	38	48	62	47
	1.8 MPa 下	41	59	33	—	54	42
玻璃化转变温度/℃		—	104	58	58	—	52
硬度/HSD		—	86	72	86	—	78~80

表 1.4 陕西恒通公司生产的 SLA 成形机的主要技术参数

项 目	成形机型号			
	SPS 250J	SPS 250E	SPS 250M	SPS 350B
激光最大扫描速度 (m/s)	6	5	5	10
激光光斑直径/mm	≤0.10	—	—	≤0.15
成形室尺寸/mm	250×250×100	250×250×150	250×250×250	350×350×350
分层厚度/mm	0.04~0.20	0.07~0.20	—	0.06~0.20
成形件精度	±0.08 mm (L≤100 mm) 或±0.08% (L>100 mm)	±0.12 mm (L≤100 mm) 或±0.12% (L>100 mm)	±0.10 mm (L≤100 mm) 或±0.10% (L>100 mm)	±0.10 mm (L≤100 mm) 或±0.10% (L>100 mm)
质量成形率/(g/h)	—	—	—	80
外形尺寸/mm	—	—	1265×815×1705	1565×995×1930
设备功率/kW	—	2.5	2.5	3

续表

项 目	成形机型号		
	SPS 450B	SPS 600B	SPS 800B
激光最大扫描速度 /(m/s)	10	10	10
激光光斑直径/mm	≤0.15	≤0.15	≤0.15
成形室尺寸/mm	450×450×350	600×6000×400	800×600×400
分层厚度/mm	0.06~0.20	0.06~0.20	0.06~0.20
成形件精度	±0.10 mm (L≤100 mm) 或±0.10% (L>100 mm)	±0.10 mm (L≤100 mm) 或±0.10% (L>100 mm)	±0.10 mm (L≤100 mm) 或±0.10% (L>100 mm)
质量成形率/(g/h)	80	80	80
外形尺寸/mm	1665×1095×1930	1865×1245×1930	2065×1245×2220
设备功率/kW	3	3	6

表 1.5 所示是广州市文博实业有限公司销售的 SLA 成形机用光敏树脂的特性。

表 1.5 广州市文博实业有限公司销售的 SLA 成形机用光敏树脂的特性

项 目	树脂牌号	
	WBSLA2820	WBSLA2822
密度/(g/cm ³)	1.13	1.12
30℃黏度/(mPa·s)	270	260
弹性模量/MPa	2650~2880	2550~3000
抗拉强度/MPa	41~50.6	45~54
断后伸长率/%	15~25	11~23
缺口冲击强度/(J/m)	0.27~0.45	0.27~0.45
弯曲模量/MPa	1640~2270	1740~2470
抗弯强度/MPa	68.1~80.16	62~80.16
热变形温度/℃	0.45 MPa 下	60~85
	1.8 MPa 下	55~75
玻璃化转变温度/℃	52~58	52~58
颜色	无色,透明	白色