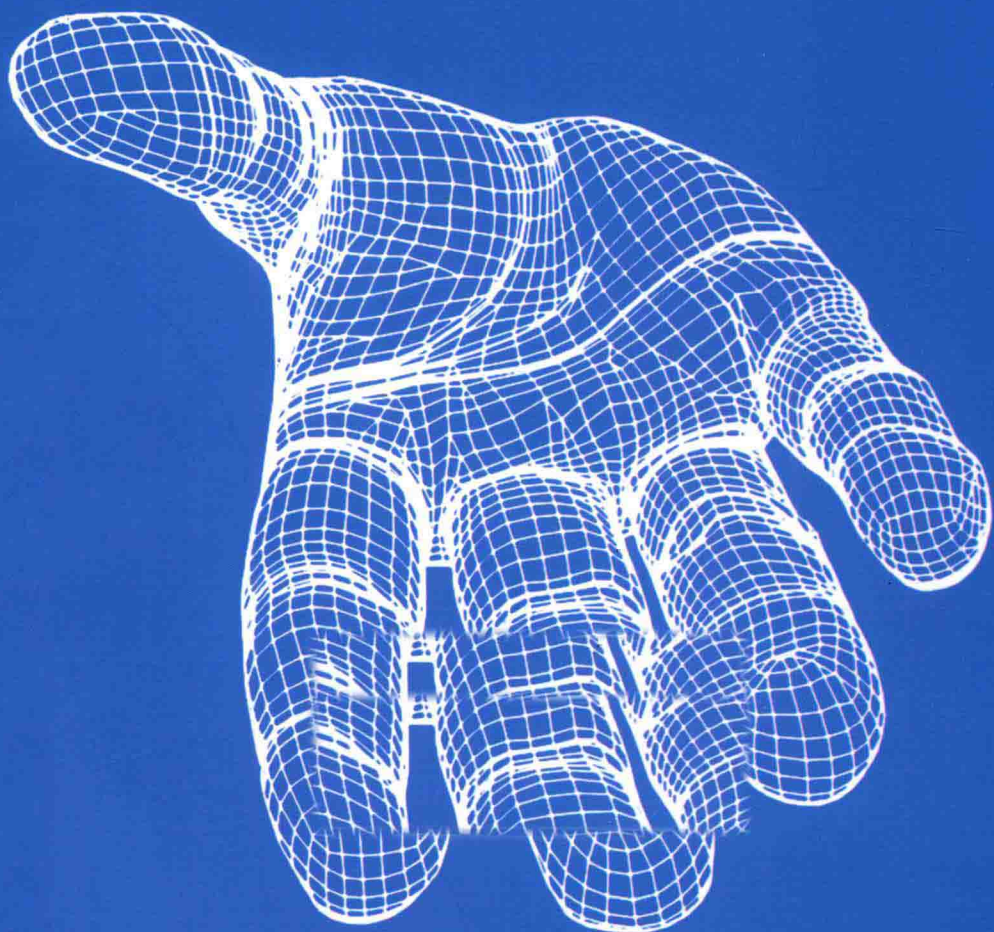


3D 打印个性化定制 应用案例教学

3D Printing Personalized Custom Application Case Teaching

刘杰 著



光明日报出版社

3D 打印个性化定制应用案例教学

刘杰 著

光明日报出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

3D 打印个性化定制应用案例教学 / 刘杰著. — 北京 :
光明日报出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5194-1201-2

I . ① 3… II . ① 刘… III . ① 立体印刷—印刷术—教
学研究 IV . ① TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 150804 号

3D 打印个性化定制应用案例教学

著 者: 刘 杰

责任编辑: 李 娟

责任校对: 闫 超

封面设计: 星海传媒

责任印制: 曹 净

出版发行: 光明日报出版社

地 址: 北京市东城区珠市口东大街 5 号, 100062

电 话: 010-67022197 (咨询), 67078870 (发行), 67019571 (邮购)

传 真: 010-67078227, 67078255

网 址: <http://book.gmw.cn>

E-mail: gmcbs@gmw.cn lijuan@gmw.cn

法律顾问: 北京德恒律师事务所龚柳方律师

印 刷: 北京朗翔印刷有限公司

装 订: 北京朗翔印刷有限公司

本书如有破损、缺页、装订错误, 请与本社联系调换

开 本: 787 × 1092 1/16

字 数: 180 千字

印 张: 9.625

版 次: 2016 年 8 月第 1 版

印 次: 2016 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5194-1201-2

定 价: 42.00 元

版权所有 翻印必究

前言

目前，3D 打印这项前沿性的先进制造技术，正持续引起社会各界的广泛关注，并成功应用到人们生产生活的方方面面。

本书首先从设备运动行为这一全新角度对现有 3D 打印技术进行了分类介绍，期望能够有更多新型 3D 打印技术及设备被发明出来。然后通过笔者平时带学生课程设计、毕业设计等积累的一个个现实素材，介绍了 3D 打印技术应用的一些可能性，希望通过抛砖引玉，扩大 3D 打印的应用领域。

本书的相关内容可供机械制造、材料成型、医疗等领域专业人士和跃跃欲试的 DIY 爱好者参考。

本书由来自佛山科学技术学院的刘杰执笔主编。由于时间比较仓促，加上编者水平有限，在编写的过程中难免出现纰漏之处，敬请读者谅解。

目录

3D 打印个性化定制应用案例教学.....	1
第 1 章 3D 打印技术简介.....	1
1.1 3D 打印的基本原理.....	3
1.2 预置材料固化型工艺.....	3
1.3 预置材料去除型工艺.....	9
1.4 同步固化型工艺.....	12
第 2 章 反求设计案例.....	15
案例 1: 个性化眼镜框的设计及快速制造.....	16
1. 案例背景.....	16
2. 设计原理.....	16
3. 设计过程.....	19
4. 眼镜架的 3D 打印制造.....	32
案例 2: 个性化戒指的设计及快速制造探索.....	33
1. 案例背景及思路.....	33
2. 个性化戒指的设计.....	33
3. 个性化戒指的 3D 打印制造.....	41
案例 3: 个性化舌侧牙套.....	45
1. 案例背景.....	45
2. 个性化牙套的设计.....	47
案例 4: 颅骨修补片.....	60
1. 案例背景.....	60
2. 设计思路.....	61
3. 数据处理.....	62
4. 颅骨修补片的 3D 打印制造.....	67
案例 5: 牙齿.....	73
1. 案例背景.....	73

2. 设计流程.....	74
3. 牙齿的 3D 打印.....	83
案例 6: 膝关节假体.....	85
1. 案例背景.....	85
2. CT 数据处理.....	86
第 3 章 二次开发设计案例.....	103
案例 1: 个性化印章的设计及快速制造.....	104
1. 案例背景.....	104
2. 设计思路.....	104
3. 个性化印章程序开发过程.....	106
4. 个性化印章的 3D 打印制造.....	114
案例 2: 中国象棋的设计及快速制造.....	121
第 4 章 数据的特殊处理案例.....	131
案例 1: 金属浮雕的快速制造.....	132
1. 案例背景.....	132
2. 浮雕的 3D 打印制造流程.....	133
3 面向二维浮雕图像的 3D 打印数据处理方法研究.....	135
案例 2: 空心浮雕的制造.....	144
1. 案例背景.....	144

第 1 章 3D 打印技术简介

人类的进步是物质生产推动的,制造技术代表了当前人类所处时代的生产能力。在第一次工业革命前,人类的制造技术水平低下,多为简单的、个体的手工制作,是单件、小批量的生产方式,基本上适应了当时人类发展的需要。随着蒸汽机的发明,人类进入了工业时代,制造业成为了国民经济的支柱产业,制造技术的手段与水平有了很大提高,其特点是单一品种大批量生产、严格分工和生产进度形成了流水生产线。车床、刨床、磨床等机床在这一时期得到了广泛使用,从原材料开始,往往多个相同的零件在同一流水生产线上依次经过车、刨、铣、磨等工序,完成加工,然后再和其它零件组装起来,形成产品。这种制造方式在当前的国民经济中仍占主流。但随着人类生活水平不断提高和科学技术日新月异的发展,产品更新换代的速度不断加快,快速响应多品种单件小批量生产的市场需求就成为一个突出的矛盾。特别是从 20 世纪 90 年代开始,传统制造行业市场环境发生了巨大变化。一方面表现为消费者需求日益主体化、个性化和多样化;另一方面则是产品制造商们都必须面对全球市场的激烈竞争。因此,面对一个迅速变化且无法预料的买方市场,以往传统大批量生产模式对市场的响应就显得越来越迟缓与被动,快速响应市场需求已经成为制造业发展的重要走向。传统制造技术已不能满足这一需要。因此,为适应这一需求的先进制造技术的发展正如火如荼。

3D 打印是一种自 20 世纪 80 年代末、90 年代初发展起来的先进制造技术。它突破了传统零件依赖多工序结合进行制造的方式,基于“离散堆积”的思想,能根据零件的三维数字化模型直接制造出实体零件。在早期,3D 打印主要用于原型的制作,为零件功能分析和结构优化提供可视化模型,是产品开发过程的辅助工艺。随着科学技术的发展和推广应用的需求,利用 3D 打印技术直接制造功能零件越来越受到人们关注。在这样的市场需求背景下,利用 3D 打印直接制造金属功能零件成为了 3D 打印主要的发展方向。相比于传统的去除材料原理,3D 打印是采用添加材料原理,并且为了区别于过去的原型制作,3D 打印在近几年常被称为快速制造 (Rapid Manufacturing, RM) 或增材制造 (Additive Manufacturing, AM)。

我国自开展 3D 打印研究以来,取得了一系列丰硕的成果,许多科研机

构对 3D 打印在我国的发展及应用做出了不可磨灭的功勋。但是，由于科研环境等方面的限制，我国的研究与国外相比，在某些地方还存在较大的差距。而国外对一些先进的技术也进行了封锁。因此，在我国，对 3D 打印的研究将是一个长期的过程。

1.1 3D 打印的基本原理

3D 打印基于“离散堆积”的思想，通过材料的聚合反应、熔化或粘结，根据预制订的层厚逐层直接制造出功能件。从三维模型到实体零件，不同零件、不同材料、不同 3D 打印工艺的流程会略有差异，但根据 3D 打印的工作流程，总体上可归纳为以下步骤：

（1）数字化设计模型的获取。

所有的用于 3D 打印直接制造的零件都必须有一个能完全描述设计信息的数字化设计模型。数字化设计模型的一般是通过 CAD 软件建立，也可以是利用逆向工程从实物模型中获取，但最终都应得到一个实体或曲面壳体的数字化模型。

（2）数据处理。

零件的格式处理、模型检查、分层切片、路径规划等都需要根据零件结构、原材料、工艺需求等实际情况进行操作。

（3）直接制造和后处理。

一般情况下，3D 打印直接制造过程是无需人为干涉的，只要数据合理，则可直接制造出实体零件。后处理包含了支撑去除、表面处理，必要时还需要用到热处理工艺。

1.2 预置材料固化型工艺

预置材料固化型工艺是指在单层成型时，首先将成型使用的材料（液体、粉末等）预置到成型区域。然后，成型头根据成型路径的引导，选择性的将特定位置的材料固化（烧结、熔化等）成为零件的一部分。这类工艺所用的

材料往往能够回收再利用。相应设备的运动一般是三个步骤的循环：1) 分配成型空间（成型台下降一个切片厚度）。2) 材料预置。3) 单层固化。

（一）光固化成型

光固化成型（Stereolithography Apparatus, SLA）是最常见的一种预置材料固化型工艺，由 Charles W. Hull 于 1984 年获得美国专利，也是最早发展起来的 3D 打印工艺。自 1998 年美国 3D System 公司最早推出 SLA-250 商品化 3D 打印机以来，SLA 已成为目前世界上研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的一种 3D 打印工艺。它以光敏树脂为原料，通过计算机控制紫外激光使其逐层凝固成型。这种方法能简捷、全自动地制造出表面质量和尺寸精度较高、几何形状较复杂的原型。

光固化成型工艺的原理如图 1-1 所示，液槽中盛满液态光敏树脂，激光器发出的紫外激光束在控制设备的控制下按零件的各分层截面信息在光敏树脂表面进行驻点扫描，使被扫描区域的树脂薄层产生光聚合反应而固化，形成零件的一个薄层。一层固化完毕后，工作台下移动一个层厚的距离，以使在原先固化好的树脂表面再敷上一层新的液态树脂，刮板将粘度较大的树脂液面刮平，然后进行下一层的扫描加工，新固化的层牢固地粘结在前一层上，如此反复直到整个零件制造完成。

光固化成型工艺具有以下特点：

- （1）尺寸精度高，可达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- （2）表面质量优良，上表面可得到玻璃状的效果。
- （3）可以制作结构十分复杂、尺寸比较精细的模型。尤其是对于内部结构十分复杂、一般切削刀具难以进入的模型，能轻松一次成型。
- （4）可以直接制作面向熔模精密铸造的具有中空结构的消失型。
- （5）制作的原型可以在一定程度上替代塑料件。

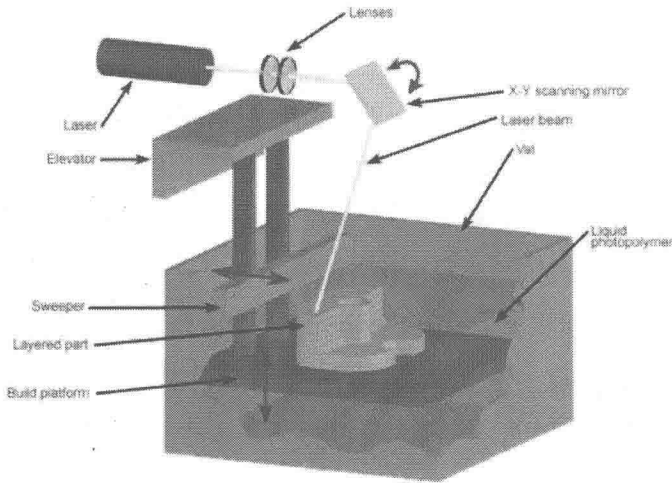


图 1-1 光固化成型的原理示意图

(二) 选区激光烧结

选区激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 工艺最初是由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Carl Deckard 于 1989 年在其硕士论文中提出的, 稍后组建成 DTM 公司, 并于 1992 年开发了商业成型机 (Sinterstation)。选区激光烧结工艺是利用粉末材料 (金属或非金属) 在激光照射下烧结的原理, 在计算机控制下层层堆积成型。其原理与光固化成型十分相似, 主要区别在于所使用的材料及其形状不同。使用粉末材料是选区激光烧结的主要优点之一, 理论上任何可熔粉末都可以用来制造真实的原型制件。

选区激光烧结工艺的原理如图 1-2 所示, 采用铺粉辊将一层粉末材料平铺在已成型零件的上表面, 并加热至恰好低于该粉末烧节点得某一温度, 控制系统控制激光束按照该层的截面轮廓在粉层上扫描, 使粉末的温度升至熔化点, 进行烧结并与下面已成型的部分实现粘接。当一层截面烧结完成后, 工作台下下降一个层的厚度, 铺粉辊又在上层铺上一层均匀密实的粉末, 进行新一层截面的烧结, 直到完成整个模型。

选区激光烧结工艺具有以下特点:

(1) 可采用多种材料。从原理上说, 选区激光烧结可采用加热时粘度

降低的任何粉末材料，通过材料或各类含粘结剂的涂层颗粒制造出任何实体，适应不同的需要。

(2) 制造工艺比较简单。由于可用多种材料，选区激光烧结工艺按采用原料不同，可以直接生产复杂形状的原型、型腔模三维构件或部件及工具。例如：制造概念原型，可安装为最终产品模型的概念原型，蜡模铸造模型及其它少量母模生产，直接制造金属注塑模等。

(3) 高精度。依赖于用的材料种类和粒径、产品的几何形状和复杂程度，该工艺一般能够达到工件整体范围内 $\pm(0.05 \sim 2.5)\text{mm}$ 的公差。当粉末粒径为 0.1mm 以下时，成型后的原型精度可达 $\pm 1\%$ 。

(4) 无需支撑结构。和叠层实体制造工艺类似，选区激光烧结工艺也无需设计支撑结构，叠层过程中出现的悬空层面可直接由未烧结的粉末来实现支撑。

(5) 材料利用率高。由于选区激光烧结不需要支撑结构，也不像叠层实体制造工艺那样出现许多工艺废料，也不需要制作基底支撑，所以该工艺在常见的几种 3D 打印工艺中，材料利用率是最高的，可认为是100%。

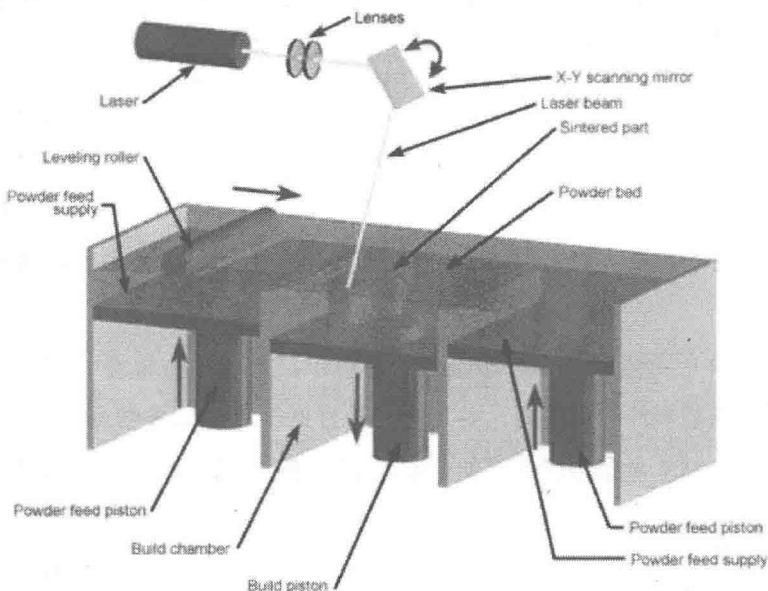


图 1-2 选区激光烧结的原理示意图[18]

(三) 选区激光熔化

选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 是由德国 Fraunhofer 激光技术研究所在二十世纪九十年代首次提出的一种能够直接成型金属零件的 3D 打印工艺。在原理上, 选区激光熔化与选区激光烧结相似, 但因为采用了较高的激光能量密度和更细小的光斑直径, 成型件的力学性能、尺寸精度等均较好, 只需简单后处理即可投入使用, 并且成型所用原材料无需特别配制。

选区激光熔化工艺的原理如图 1-3 所示, 采用铺粉装置将一层粉末材料平铺在已成型零件的上表面, 控制系统控制激光束按照该层的截面轮廓在粉层上扫描, 使粉末完全熔化并与下面已成型的部分实现熔合。当一层截面熔化完成后, 工作台下降一个层的厚度, 铺粉装置又在上层铺上一层均匀密实的粉末, 进行新一层截面的熔化, 直到完成整个模型。为防止金属氧化, 整个成型过程一般在惰性气体的保护下进行。

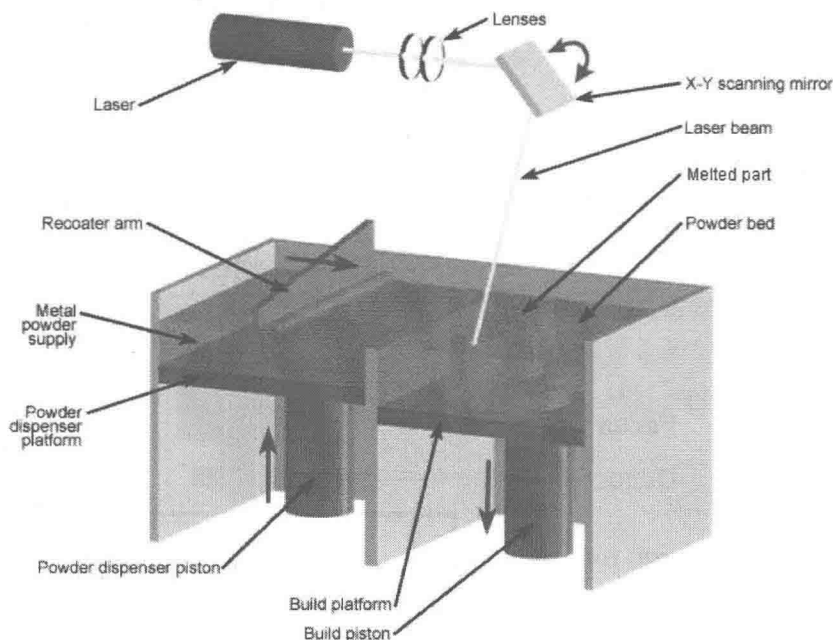


图 1-3 选区激光熔化的原理示意图[21]

选区激光熔化工艺具有以下特点:

- (1) 直接制造金属功能件, 无需中间工序。

(2) 良好的光束质量，可获得细微聚焦光斑，从而可以直接制造出较高尺寸精度和较好表面粗糙度的功能件。

(3) 金属粉末完全熔化，所直接制造的金属功能件具有冶金结合组织，致密度较高，具有较好的力学性能，无需后处理。

(4) 粉末材料可为单一材料也可为多组元材料，原材料无需特别配制。

(5) 可直接制造出复杂几何形状的功能件。

(6) 特别适合于单件或小批量的功能件制造。

(四) 电子束选区熔化

电子束选区熔化 (Electron Beam Selective Melting, EBSM) 也称电子束熔化成型 (Electron Beam Melting, EBM) 等，是由瑞典的 Arcam AB 公司研制的一种直接成型金属零件的 3D 打印工艺。其工作原理与选区激光熔化类似，只是熔化金属粉末的能量源为电子束。电子束功率密度大，粉末对电子束能量吸收率高、吸收稳定，适合成型金属零件，特别是其它工艺难以成型的高反射率、高熔点金属零件，如钛、铝合金。

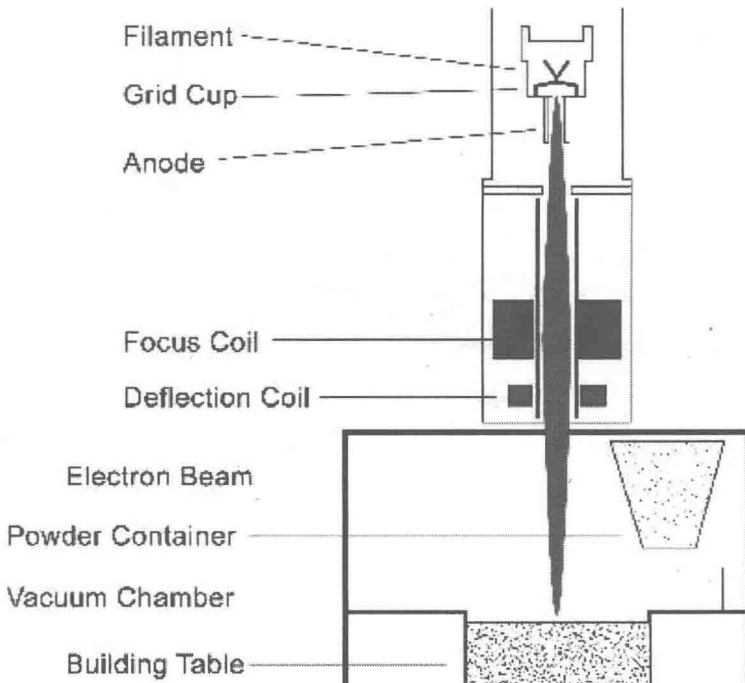


图 1-4 电子束选区熔化的原理示意图[24]

电子束选区熔化工艺的原理如图 1-4 所示，采用铺粉装置将一层粉末材料平铺在已成型零件的上表面，控制系统控制电子束偏转，按照该层的截面轮廓在粉层上扫描，使粉末完全熔化并与下面已成型的部分实现熔合。当一层截面熔化完成后，工作台下降一个层的厚度，铺粉装置又在上表面铺上一层均匀密实的粉末，进行新一层截面的熔化，直到完成整个模型。为防止金属氧化，整个成型过程一般在真空环境中进行。

电子束选区熔化具有以下特点：

(1) 在真空环境下电子束成型材料不会被氧化，不像激光一样会被反射。

(2) 电子束的最大功率能达到激光的数倍，其连续热源功率密度要比激光高，成型速度更快。

(3) 电子束的焦点半径比激光小，因而能够激起微细地聚焦，加工出的零件或模具精度和细微特征要比激光加工的好，减少了加工余量和后处理工序。

(4) 电子束可控的高速扫描速度能达到 900m/s，成型时同一层上材料的熔凝几乎能够同时完成，因而制件的内应力必会相应减少。

1.3 预置材料去除型工艺

预置材料去除型工艺是指在单层成型时，首先将成型使用的材料预置到成型区域。然后，成型头根据成型路径的引导，选择性的将特定位置的材料去除。这类工艺所用的材料往往无法回收再利用。相应设备的运动一般是三个步骤的循环：1) 分配成型空间。2) 材料预置。3) 材料去除。

(一) 叠层实体制造

叠层实体制造 (Laminated Object Manufacturing, LOM) 是最早出现的一种预置材料去除型工艺，1991 年问世以来，得到迅速的发展。由于叠层实体制造工艺多使用纸材，成本低廉，制件精度高，而且制造出来的木质原型具有外在的美感性和一些特殊的品质，因此受到了较为广泛的关注，在产品概念设计可视化、造型设计评估、装配检验、熔模铸造型芯、砂型铸造木模、快速制母模以及直接制模等方面得到了迅速应用。

叠层实体制造工艺的原理如图 1-5 所示，供料机构将存于其中的原材料（如底面有热熔胶和添加剂的纸），逐步送至工作台的上方。热粘压机构将一层层材料粘合在一起。激光切割系统按照计算机提取的横截面轮廓线，逐一在工作台上方的材料上切割出轮廓线，并将无轮廓区切割成小方网格以便在成型之后能剔除废料。网格的大小根据被成型件的形状复杂程度选定，网格越小，越有利于剔除废料，但切割网格花费的时间就越长。可升降工作台支撑成型的工件，并在每层成型之后，降低一个材料厚度（通常为 0.1-0.2mm），以便送进、粘合和切割新的一层材料。

叠层实体制造工艺具有以下特点：

- (1) 原材料价格便宜，原型制作成本低。
- (2) 制件尺寸大。
- (3) 无需后固化处理。
- (4) 无需设计和制作支撑结构。
- (5) 废料易剥离。
- (6) 制件能承受高达 200°C 的温度，有较高的硬度和较好的力学性能，可进行各种切削加工。
- (7) 原型精度高。

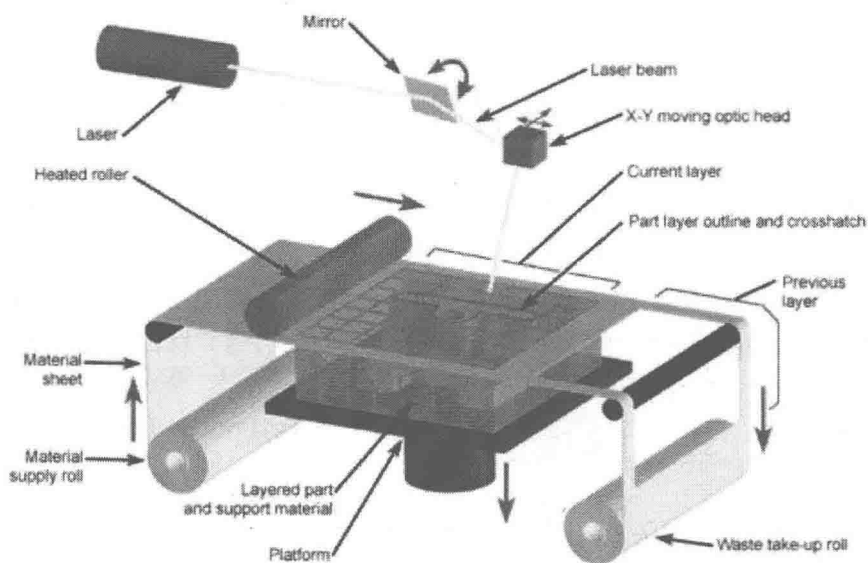


图 1-5 叠层实体制造的原理示意图

(二) 光掩模成型

光掩模成型 (Solid Ground Curing, SGC) 是以色列 Cubital 公司开发出的一种 3D 打印工艺。与光固化成型相似, 该设备同样利用紫外光来固化光敏树脂, 但光源曝光是采用光学掩膜技术。与光固化成型相比, 光掩膜成型每层的固化是瞬间完成的, 因此效率更高; 而且, 光掩膜成型的范围更大, 可以制作大零件。

光掩膜成型的工艺原理如图 1-6 所示: 1) 用光敏树脂均匀喷涂工作平面。2) 利用 Cubital 公司的专利印刷技术进行光掩膜。3) 用强紫外灯将暴露在外的光敏树脂进行一次固化。4) 未固化的树脂被真空抽走, 固化的树脂在一个更强的紫外灯下得以二次固化。5) 用蜡填充被真空抽走的区域, 通过冷却使蜡变硬, 形成支撑。6) 将蜡、树脂层压平以便进行下一层的制作。7) 零件制作完成后, 将蜡去掉, 打磨, 得到模型。

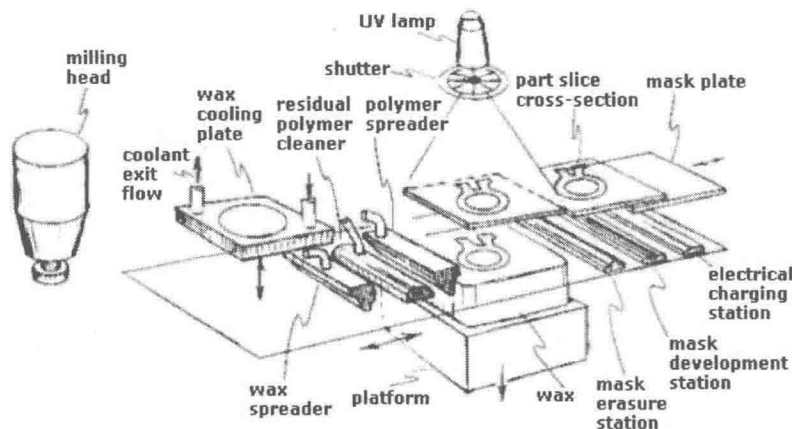


图 1-6 光掩模成型的原理示意图

光掩膜成型工艺具有以下特点:

- (1) 不需要设计支撑结构。
- (2) 零件的成型速度不受复杂程度的影响, 只与体积有关。树脂瞬时曝光, 速度更快, 整层一次成型, 效率更高。
- (3) 精度高。相对精度约在 0.1% 左右。
- (4) 最适合制作多件原型。制作过程中可以随意选择不同零件的制作次序; 一个零件未制作完成时, 可以先做另一个零件, 再回过头来继续做未完零件。
- (5) 模型内应力小, 变形小, 适合制作大型件。
- (6) 制作过程中如发现错误, 可以把错误层铣掉, 重新制作此层。