

# 第一章 增材制造技术原理

## 一、什么是 3D 打印？

增材制造技术，又称 3D 打印，是将计算机辅助设计（CAD）、计算机数字控制（CNC）、激光加工、精密伺服和新材料等先进技术集成于一体，将 CAD 的三维图形直接输入增材制造机，运用粉末状金属或塑料等可粘合材料，通过逐层打印的方式来构造物体的技术，如图 1-1 所示。

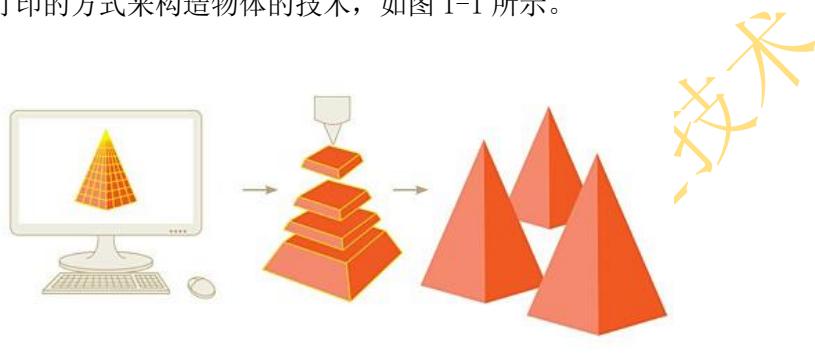


图 1-1 分层示意图

FDM 技术是把三维模型通过分层打印的方式，将材料累积、叠加成一个实物的过程，如图 1-2 所示。

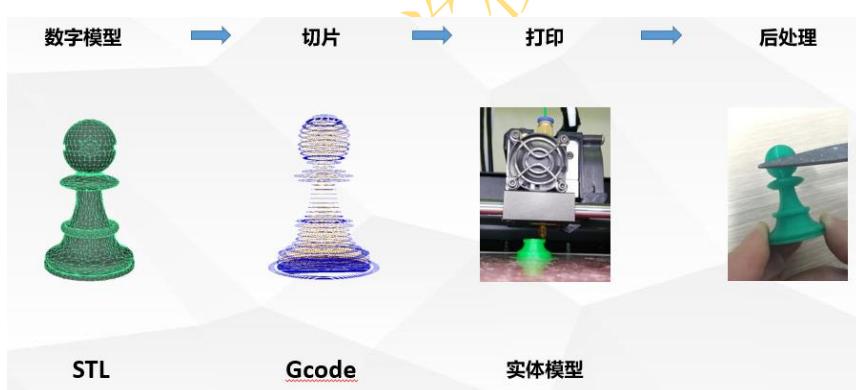


图 1-2 FDM 技术打印流程图

## 二、FDM 熔融沉积成型

### (一) FDM 工作原理

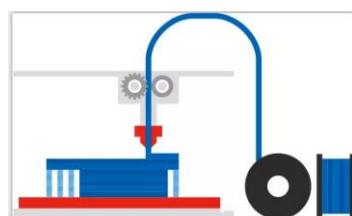


图 1-3 FDM 工作原理机简图

FDM 的工作原理是，如图 1-3 所示，将丝状的热塑性材料通过喷头加热熔化，喷头底部带有微细喷嘴（直径一般为 0.2~0.6mm），在计算机控制下，喷头根据 3D 模型的数据移动到指定位置，将熔融状态下的液体材料挤喷出来并最终凝固。材料被喷出后沉积在前一层已固化的材料上，通过材料逐层堆积形成最终的成品。

在打印机工作前，先要设定三维模型各层的间距、路径的宽度等数据信息，然后由切片引擎对三维模型进行切片并生成打印移动路径。在计算机控制下，打印喷头根据水平分层数据作 X 轴和 Y 轴的平面运动，Z 轴方向的垂直移动则由打印平台的升降来完成。同时，丝材由送丝部件送至喷头，经过加热、熔化，材料从喷头挤出黏结到工作台上，迅速冷却并凝固。这样打印出的材料迅速与前一个层面熔结在一起，当每一个层面完成后，工作台便下降一个层面的高度，打印机再继续进行下一层的打印，一直重复这样的步骤，直到完成整个物体的打印。

FDM 工艺的关键是保持从喷嘴中喷出的、熔融状态下的原材料温度刚好在凝固点之上，通常控制在比凝固点高 1℃左右。如果温度太高，会导致打印物体的精度降低，模型变形等问题；如果温度太低，则容易导致喷头被堵住，导致打印失败。

FDM 工艺的打印机会需要使用两种材料：一种用于打印实体部分的成型材料；另一种用于沉积空腔或悬臂部分的支撑材料。切片软件会根据待打印模型的外形，自动计算决定是否需要为其添加支撑。支撑还有一个目的是建立基础层。即在正式打印之前，先在工作平台上打印一个基础层，这样可以提供一个精准的基准面，还可以使打印完成后的模型更容易剥离。

## (二) FDM 打印材料

FDM 技术使用的材料主要包括实体材料和支撑材料。实体材料主要为热塑性材料，包括 PLA、ABS、人造橡胶、石蜡等。

FDM 技术的支撑材料较难去除，很容易在剥离过程中损坏模型表面，如图 1-4 所示。针对这样的问题，增材制造界巨头 Stratasys 公司在 1999 年开发了水溶性支撑材料，用溶液对打印后的模型进行冲洗，将支撑材料进行溶解而不损伤实体模型。



图 1-4 去除支撑材料前的打印作品（左）以及去除支撑材料后的作品（右）

在进行模型实体材料选择时，需要考虑以下几点因素：

- 1) 黏度低。黏度低阻力小，不容易堵喷头。
- 2) 熔点低。熔点温度低打印功耗小，却有利于提高机器使用寿命。
- 3) 黏结性高。黏结性决定了实体各层之间的黏结强度。
- 4) 收缩率小。挤出的材料丝会发生膨胀，收缩率越小，打印出来的物品精度越有保证。

根据以上特征，目前市场上主要的FDM材料包括ABS、PLA、PC、PP、合成橡胶等。

(1) ABS ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的三元共聚物，A代表丙烯腈，B代表丁二烯，S代表苯乙烯。ABS具有强度高、韧性好、稳定性高的特点，是一种用途极广的工程塑料。

(2) PLA PLA(聚乳酸)又名玉米淀粉树脂，是一种新型的生物降解材料，使用可再生的植物资源(玉米)所提取出的淀粉原料制备而成。除了具有良好的生物降解能力，其光泽度、透明性、手感和耐热性也很不错，目前主要用于服装、工业和医疗卫生等领域。

(3) PC PC即聚碳酸酯，是一种20世纪50年代末期发展起来的无色高透明度的热塑性工程塑料，具有耐冲击、韧性高、耐热性好且透光性好的特点，悬挂的PC材料板甚至可以抵挡一定距离的子弹冲击。PC材料的热变形温度为138℃，颜色比较单一，只有白色，但其强度比ABS材料高出60%左右。目前，美国通用公司是聚碳酸酯全球最大的生产企业。

(4) PP PP即聚丙烯，是由丙烯聚合而制得的一种热塑性树脂，其无毒、无味，强度、刚度、硬度耐热性均优于低压聚乙烯，可在100℃左右使用，具有良好的介电性能和高频绝缘性且不受湿度影响。缺点是不耐磨、易老化。适于制作一般机械零件、耐腐蚀零件和绝缘零件。常见的酸、碱等有机溶剂对它几乎不起作用，可用于食具。

(5) 合成橡胶 统一将用化学方法人工合成的橡胶称为合成橡胶，能够有效弥补天然橡胶产量不足的问题，合成橡胶一般在性能上不如天然橡胶全面，但它具有高弹性、绝缘性、气密性、耐高温等优势，因而广泛应用于工农业、国防、交通及日常生活中。

### (三) FDM的应用

FDM应用领域包括概念建模、功能性原型制作、制造加工、最终用途零件制造、修整等方面，涉及汽车、医疗、建筑、娱乐、电子、教育等领域。

#### 1. 建筑建模

如图1-5所示，传统建筑领域的可视化做法是使用木材或者泡沫制作模型。而增材制造能够有效降低设计成本和开发时间，建筑师可以通过实体的建筑模型对设计进行改良，大大增加了效率和合理性。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-5 建筑模型

## 2. 人体工程学设计

增材制造的模型在开发期间就可以对人体工程学性能进行测试，在测试期间可以对模型进行不断修改，从而实现将产品全面投入市场前对人体工程学进行优化如图 1-6、1-7 所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-6 符合人体工程学设计的医疗康复辅具



本章图文内容引用自  
南极熊3D打印公众  
号

图 1-7 符合人体工程学的运动跑鞋

## 3. 市场营销和设计

利用 FDM 技术制作的模型可以进行打磨、上漆等处理，从而达到与最终产品外观一致的目的。FDM 使用生产级的热塑性塑料（比 ABS），可以获得与最终产品相似的使用感受，如图 1-8 所示。



图 1-8 利用 FDM 技术制作的镜架

#### 4. 功能性原型制作

利用 FDM 技术获得的原型本身具有耐高温、耐化学腐蚀等性能，在产品设计初期就能够通过原型进行各种性能测试，以改进最终的产品设计参数，如图 1-9 所示。

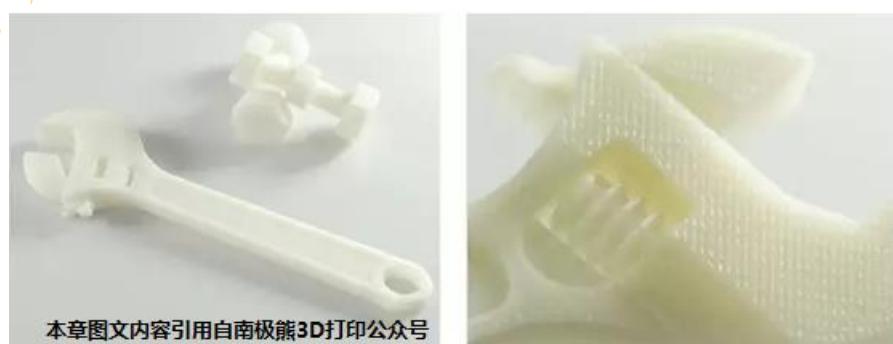


本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-9 利用 FDM 技术制作的功能性原型零件

#### 5. 制造加工

由于 FDM 技术可以采用高性能的生产级别材料，可以用来制造标准工具，并可进行小批量生产，通过小批量生产可以使用与最终产品相同的流程和材料来制作原型，如图 1-10 所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-10 利用 FDM 技术制作的标准工具

#### 6. 最终用途零件

FDM 技术可以直接制造最终用途零件，其精度可以媲美注塑成形。不过因为受材料和工艺限制，打印物品的受力强度低，主要用于民用消费级市场，在工业市场上最终用途零件的应用还不广泛，如图 1-11 所示。



本章图文内容引用自南  
极熊3D打印公众号

图 1-11 利用 FDM 技术制作的游戏手柄外壳

#### （四）FDM 优势&技术限制

由于 FDM 技术无需激光系统，因而价格低廉。现在市场上的桌面打印机大多采用 FDM 技术，最便宜的已经降至 1 万元以下。与其他增材制造技术路径相比，FDM 具有成本低、原料广泛等优点，同样存在成型精度低、支撑材料难以剥离等缺点，下面做简要分析。

##### 1. 优势

- 1) 成本低。FDM 技术不采用激光系统。
- 2) 成型材料范围较广。ABS、PLA、PC、PP 等热塑性材料均可作为 FDM 技术的成型材料。
- 3) 环境污染较小。在整个打印过程中不涉及高温、高压，没有有毒物质排放。
- 4) 设备、材料体积较小。便于搬运，适合于办公室、家庭等环境。
- 5) 原料利用率高。没有废弃的成型材料，支撑材料可以回收。

##### 2. 技术限制

(1) 精度低 温度对于 FDM 成型效果影响非常大，而桌面级 FDM 增材制造机通常都缺乏恒温设备，另外在出料部分缺少控制部件，致使难以精确地控制出料形态和成型效果。这些原因导致 FDM 的桌面级增材制造机的成品精度通常为 0.1~0.3 毫米。每层的边缘容易出现由于分层沉积而产生的“台阶效应”，导致很难达到所见即所得的增材制造效果。

(2) 强度低 受工艺和材料限制，打印物品的性能强度低，尤其是沿 Z 轴方向的材料强度比较弱，达不到工业标准。

(3) 打印时间长 需按横截面形状逐步打印，成型过程中受到一定的限制，制作时间长，不适于制造大型物件。

(4) 需要支撑材料 在成型过程中需要加入支撑材料，在打印完成后要进行剥离。随着技术的进步，

市面上已经有水溶性支撑材料，该缺点正在被逐步克服。

### 三、SLA 光固化成型

#### 1. 光固化工作原理

光固化成型 (Stereo Lithography Appearance, SLA 或 SL) 主要是使用光敏树脂作为原材料，利用液态光敏树脂在紫外激光束照射下会快速固化的特性。光敏树脂一般为液态，它在一定波长的紫外光 (250 nm~400 nm) 照射下立刻引起聚合反应，完成固化。SLA 通过特定波长与强度的紫外光聚焦到光固化材料表面，使之由点到线、由线到面的顺序凝固，从而完成一个层截面的绘制工作。这样层层叠加，完成一个三维实体的打印工作，如图 1-12 所示。

#### 2. 具体打印流程

- 1) 在树脂槽中盛满液态光敏树脂，可升降工作台处于液面下一个截面层厚的高度，聚焦后的激光束在计算机控制下沿液面进行扫描，被扫描的区域树脂固化，从而得到该截面的一层树脂薄片；
- 2) 升降工作台下降一个层厚距离，液体树脂再次暴露在光线下，再次扫描固化，如此重复，直到整个产品成型；
- 3) 升降台升出液体树脂表面，取出工件，进行相关后处理，通过强光、电镀、喷漆或着色等处理得到需要的最终产品。

需要注意的是，因为一些光敏树脂材料的黏度较大，流动性较差，使得在每层照射固化之后，液面都很难在短时间内迅速流平。因此大部分 SLA 设备都配有刮刀部件，在每次打印台下降后都通过刮刀进行刮切操作，便可以将树脂均匀地涂覆在下一叠层上。

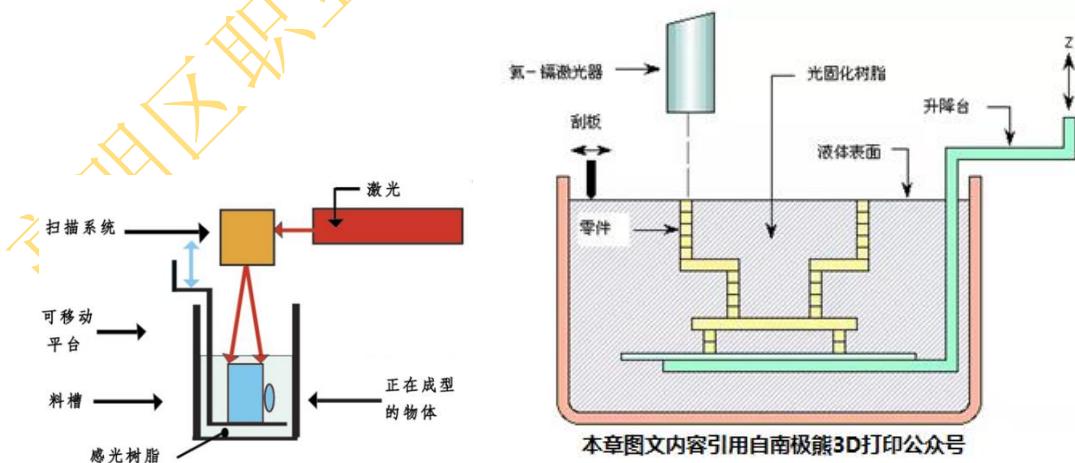


图 1-12 光固化工作原理

#### 3. SLA 主要优点

最早出现的快速原型制造工艺，成熟度高。由 CAD 数字模型直接制成原型，加工速度快，产品生产周

期短，无需切削工具与模具。成型精度高（在 0.1mm 左右）、表面质量好。

#### 4. SLA 主要缺点

SLA 系统造价高昂，使用和维护成本相对过高。工作环境要求苛刻。耗材为液态树脂，具有气味和毒性，需密闭，同时为防止提前发生聚合反应，需要避光保护。成型件多为树脂类，使得打印成品的强度和耐热性有限，不利于长时间保存。后处理相对繁琐。打印出的工件需用工业酒精和丙酮进行清洗，并进行二次固化。

光固化快速成型技术在世界范围内得到了迅速而广泛的应用，在概念设计的交流、单件小批量精密铸造、产品模型、快速工模具及直接面向产品的模具等诸多方面广泛应用于汽车、航空、电子、消费品、娱乐以及医疗等行业，如图 1-13 所示。



本章图文内容引用自南极  
熊3D打印公众号

图 1-13 光固化产品图

## 四、3DP 三维印刷成型

### 1. 3DP 技术原理

三维印刷成型 (Three Dimensional Printing, 3DP)，又称为喷墨粘粉式技术、粘合剂喷射成型，美国材料与测试协会增材制造技术委员会 (ASTM F42) 将 3DP 的学名定为 Binder Jetting (粘合物喷射)。3DP 技术由美国麻省理工大学的 Emanuel M. Sachs 和 John S. Haggerty 等人发明，1989 年提交专利申请，1993 年被授权专利。1995 年，麻省理工学院把 3DP 技术授权给 Z Corporation 公司进行商业应用。Z Corporation 公司在得到 3DP 技术的授权后，自 1997 年以来陆续推出了一系列 3DP 打印机，后来该公司被 3D Systems 收购，并被开发成为了 3D Systems 的 ColorJet 系列 (CJP) 打印机。

如图 1-14 所示为 Z Corp 的一款产品，以淀粉掺蜡或环氧树脂为粉末原料打印而成。

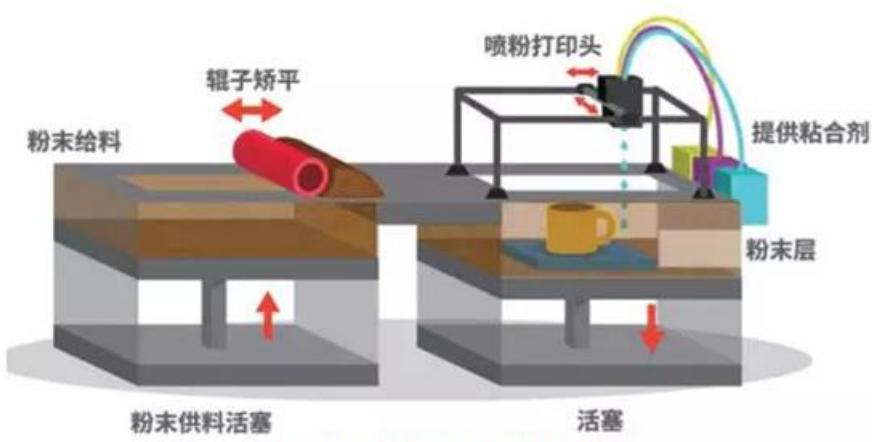


本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-14 3DP

3DP 打印技术使用的原材料主要是粉末材料，如陶瓷、金属、石膏、塑料粉末等。如图 1-15 所示，利用粘合剂将每一层粉末粘合到一起，通过层层叠加而成型。与普通的平面喷墨打印机类似，在粘合粉末材料的同时，加上有颜色的颜料，就可以打印出彩色的东西了。3DP 技术是目前比较成熟的彩色增材制造技术，其他技术一般难以做到彩色打印。和许多激光烧结技术类似，3DP 也使用粉床（powder bed）作为基础，但不同的是，3DP 使用喷墨打印头将粘合剂喷到粉末里，而不是利用高能量激光来融化烧结。

3DP 设备在控制系统的控制下，喷粉装置在平台上均匀地铺一层粉末，喷粉打印头负责 X 轴和 Y 轴的运动，按照模型切片得到的截面数据进行运动，有选择地进行粘合剂喷射，最终构成平面图案。在完成单个截面图案之后，打印台下降一个层厚单位的高度，同时铺粉辊进行铺粉操作，接着再次进行下一次截面的打印操作。如此周而复始地送粉、铺粉和喷射粘合剂，最终完成三维成型件。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-15 3DP 印刷成型技术原理图

## 2. 3DP 优势和技术限制

如今在众多金属激光烧结的增材制造机主导市场的情况下，3DP 技术虽然占有市场份额较小，但却依然在金属增材制造中扮演着重要角色。经常有声音质疑，在激光烧结等技术愈发成熟的情况下，3DP 技术是否还有竞争力。我们认为，3DP 技术很好的弥补了一些其他技术的不足，并填补了金属增材制造的一些空白。

### (1) 优势

1) 3DP 技术色彩丰富，可选择的材料种类很多，是一种具有 24 位全彩打印能力的技术。这也是该技术最具竞争力的特点之一。

2) 3DP 技术虽然有粉床但是没有粉床熔融的过程，在成型过程中不会产生残余应力，因此 3DP 便可完全通过粉床来支撑悬空结构，而不需要支撑结构（与 SLS 类似）。

3) 3DP 的喷头可以进行阵列式（2D array）扫描而非激光点扫描，因此打印速度快，能够实现大尺寸零件的打印。

4) 没有激光器，设备价格较为低廉。

### (2) 技术限制

1) 精度和光洁度不理想，多用于制作人偶和概念模型，不适合制作结构复杂和细节较多的薄型物件。

2) 利用 3DP 技术打印出的工件只能通过粉末粘结，粘结剂的粘结能力有限，其强度比较低，基本只能做概念原型。

3) 3DP 技术中需要经历繁琐的后处理过程，比如烧结。因此与很多金属直接制造成型技术相比可能没有优势。

### (3) 3DP 的应用

1) 原型全彩打印（代表公司：ZCorp）。

3DP 技术在 MIT 的实验室实现后便迅速转化为了专利，在 90 年代被多家公司根据不同材料获得使用权。在非金属材料比较有名的是 ZCorp 公司（现已被 3D Systems 收购），主要使用石膏作为原材料。ZCorp 产品的亮点当属全彩增材制造机，粘合剂可以被着色，从而制造出多彩的打印模型如图 1-16、1-17、1-18 所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-16 3DP 技术在多个结构件的机械产品上的应用



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-17 3DP 技术在全彩人像领域的应用



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-18 3DP 技术打印的全彩应用

2) 金属直接成型（代表公司：ExOne）。

ExOne 是纳斯达克上市公司，2005 年从有着 50 余年历史的精密特种加工和自动化解决方案供应商 Extrude Hone 公司独立出来，专注于增材制造业务。使用 3DP 打印金属的技术被 ExOne 公司商业化。

如今 ExOne 公司制造的产品材料包括金属、石英砂和陶瓷等多种工业材料，其中金属材料以不锈钢为

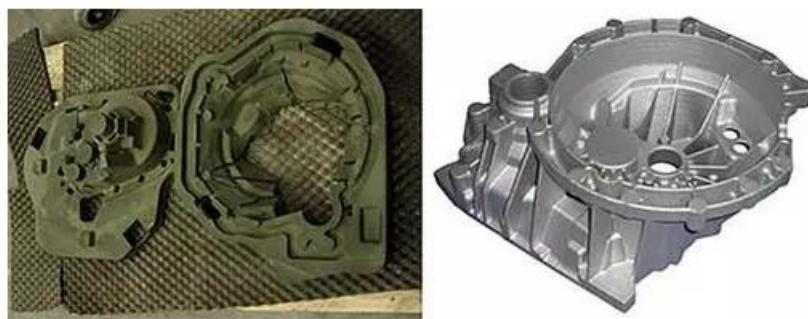
主。当利用 3DP 技术制造金属零件时，金属粉末被一种特殊的粘合剂所粘合而成型，然后从增材制造机中取出，放到熔炉中烧结得到金属成品。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-19 砂模铸造成型（代表公司：VoxelJet）

砂模铸造成型是一种间接制造金属产品的方式。利用 3DP 技术将铸造用砂制成模具，之后便可用于传统工艺的金属铸造。专门用 3DP 技术生产模具的公司是德国的 VoxelJet，如图 1-19 所示，VoxelJet 生产的设备能够用于铸造模具的生产，如图 1-20 所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-20 砂模铸造产品

## 五、DLP 数字光处理

### 1. DLP 技术原理

数字光处理技术(Digital Light Processing, DLP)与 SLA 光固化成型技术比较相似，打印材料同为光敏树脂，工作原理都是利用液态光敏树脂在紫外光照射下固化的特性，如图 1-21 所示。不同的是，DLP 是一下子可以成型一个面，而 SLA 只可以成型一个点，再由点到线、由线到面进行固化，故 DLP 比 SLA 要快。二者本质的差别在于照射的光源：SLA 采用激光点聚焦到液态光聚合物，而 DLP 成型技术是先把影像信号经过数字处理，然后再把光投影出来固化光聚合物。

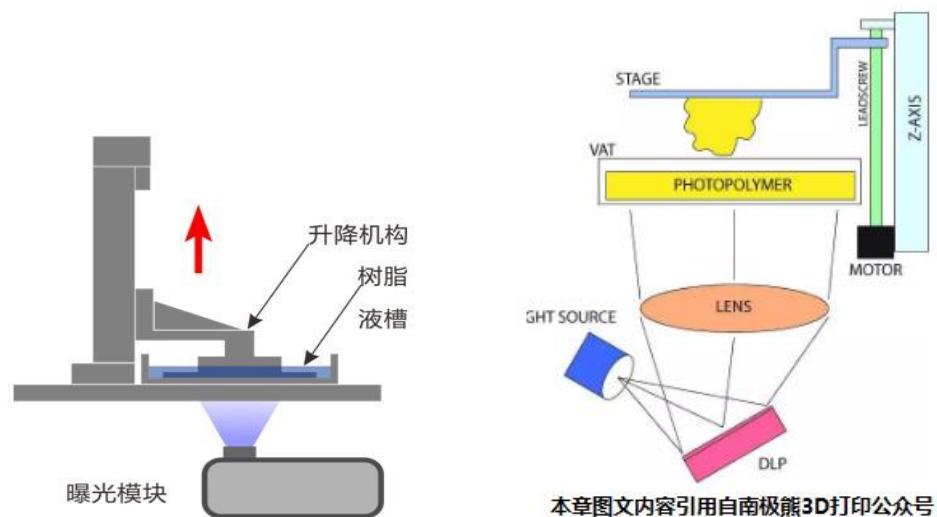


图 1-21 DLP 工作原理示意图

基于 DLP 技术的增材制造机免去了逐层构建的复杂操作，可以实现一次成形，因而节省了很多时间。具备一次成形的能力意味着，实物的复杂结构和尺寸对总体构建时间并没有丝毫的影响。如果打印机的构建区域可以容纳 10 个部件，则这 10 个部件可以同时构建，如图 1-22 所示。



图 1-22 增材制造机“Solidator”及其打印成品

## 2. DLP 与 SLA 对比

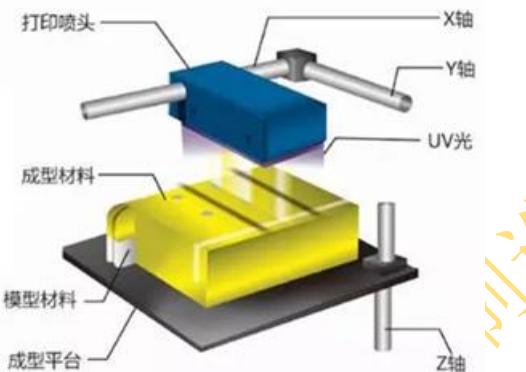
在成型时，SLA 一般是由点到线、再由线到面，而 DLP 则是一层一层地成型。因此，DLP 成型的速度要比 SLA 快。普遍来说，由于造价较高，基于 DLP 技术的增材制造机价格要比 SLA 机型高。

- (1) DLP 技术的主要优点      打印速度快，固化速率高于 SLA 技术、打印精度高、打印分辨率高，物体表面光滑。
- (2) DLP 技术的主要缺点      机型造价相对 SLA 设备高、加工尺寸受限，主要用于小体积物品的打印、DLP 技术使用的液态树脂材料具有一定的毒性，使用时需密闭。

## 六、PolyJet 聚合物喷射

### 1. 聚合物喷射原理

聚合物喷射 (PolyJet, PJ) 技术是由以色列 Objet 公司（于 2012 年并入 Stratasys 公司）在 2000 年初推出的专利技术。PolyJet 打印技术与传统的喷墨打印机类似，由喷头将微滴光敏树脂喷在打印底部上，再用紫外光层层固化，如图 1-23 所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-23 聚合物喷射原理

上图为 PolyJet 聚合物喷射系统结构，其成型原理跟 SLA、DLP 一样，由光敏树脂在紫外光照射下固化。具体打印流程：

- 1) 喷头沿 X/Y 轴方向运动，光敏树脂喷射在工作台上，同时 UV 紫外光灯沿着喷头运动方向发射紫外光对工作台上的光敏树脂进行固化，完成一层打印；
- 2) 之后工作台沿 Z 轴下降一个层厚，装置重复上述过程，完成下一层的打印；
- 3) 重复前述过程，直至工件打印完成。
- 4) 去除支撑结构。

对比 SLA 打印技术，其使用的激光光斑在 0.06–0.10 毫米，打印精度远高于 SLA。PolyJet 可以使用多喷头，在打印光敏树脂的同时，可以使用水溶性或热熔型支撑材料。而 SLA/DLP 的打印材料与支撑材料来源于同一种光敏树脂，所以去除支撑时容易损坏打印件。

由于可以使用多喷头，可以实现不同颜色和不同材料的打印。

### 2. Polyjet 技术的优点

- 1) 打印精度高。高达  $16 \mu\text{m}$  的层分辨率和  $0.1\text{mm}$  的精度，可确保获得光滑、精准部件和模型。
- 2) 保持环境清洁。适合于办公室环境，采用非接触树脂载入/卸载，支撑材料的清除很容易。
- 3) 打印速度快。得益于全宽度上的高速光栅构建，可实现快速的打印，并且无需二次固化。
- 4) 用途广。由于打印材料品种多样，可适用于不同几何形状、机械性能及颜色的部件。此外，所有

类型的模型均使用相同的支撑材料，因此可快速便捷地变换材料。

### 3. Polyjet 技术的缺点

- 1) 需要支撑结构。
- 2) 耗材成本相对较高。尽管与 SLA 一样均使用光敏树脂作为耗材，但价格比 SLA 的高。
- 3) 成型件强度较低。PolyJet 需要特别研发的光敏树脂，成型后的工件强度、耐久性都不是太高。

### 4. PolyJet 应用

PolyJet 3D 打印技术具有快速加工和原型制造的诸多优势，甚至能快速、高精度地生成具有卓越的精致细节、表面平滑的最终用途零件。因此 PolyJet 技术应用广泛，在航空航天、汽车、建筑、军工、商业品、消费品、医疗等行业具有很好的应用前景，如图 1-24 所示。

PolyJet 增材制造技术使用的光敏聚合物多达数百种。从橡胶到刚性材料，从透明材料到不透明材料，从无色材料到彩色材料，从标准等级材料到生物相容性材料，以及用于在牙科和医学行业进行增材制造的专用光敏树脂。

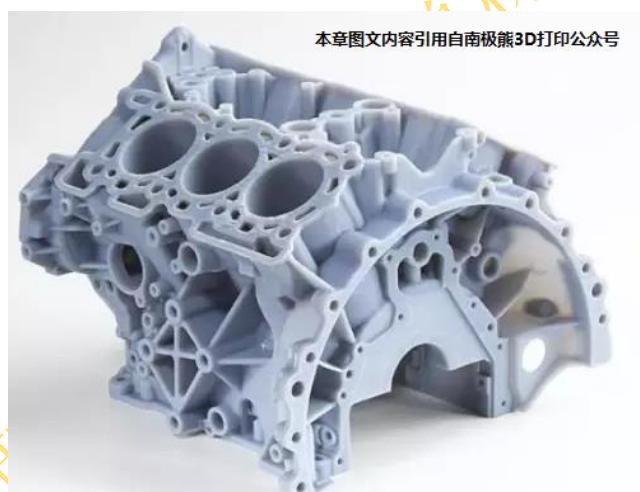


图 1-24 用 Objet 的数字 ABS 材料打印的工业制品

## 七、CLIP 连续液界结

连续液界制造技术，也就是 CLIP 技术（Continuous Liquid Interface Production），由北卡罗来纳大学教堂山分校化学教授、Carbon3D 的 CEO 约瑟夫·德西蒙尼（Joseph M. DeSimone）与他的同事兼 Carbon3D 的首席技术官亚历克斯·叶尔莫什金（Alex Ermoshkin）以及北卡罗来纳大学的化学教授爱德华·萨穆尔斯（Edward T. Samulski）合作发明。基于此技术，他们获得了 2.55 亿元风投，成立了 Carbon 公司。

CLIP 技术就是基于传统的桌面级 SLA 技术，并且利用了丙烯酸酯的氧阻聚效应：使用一种透明透气的特氟龙膜作为树脂槽底部，供光和氧气通过。由于氧阻聚效应，进入树脂槽的氧气会抑制离底部最近的一

部分树脂固化，形成几十微米厚的“盲区”（dead zone）。同时，紫外光会固化盲区上方的光敏树脂。也就是说固化的打印件并没有像传统的 SLA 打印机那样黏在树脂槽底部，所以打印时无需缓慢剥离，从而可以做到连续打印，实现比普通光固化快 10 倍到 100 倍的打印速度，如图 1-26 所示。

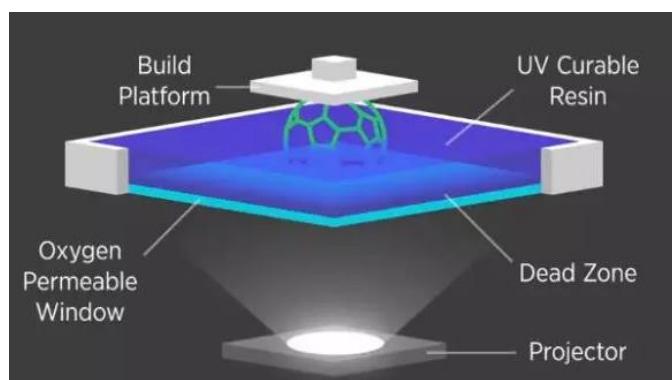


图 1-26 连续液界制造技术原理

CLIP 技术利用了通常人们希望避免的氧阻聚效应，从而达到了突破性的打印速度。但是这也限制了其只能使用丙烯酸酯类的光敏树脂，而无法利用到环氧类光敏树脂的优势。同时，CLIP 连续打印没有刮刀涂覆的步骤，这就要求光敏树脂黏度低，有较好的流动性，因此对 CLIP 技术使用的光敏树脂提出了更高的要求。

传统的 SLA 技术采用逐层固化、层层叠加的方式来构造三维物体，层与层之间需中断光照射，然后在已固化区域表面重新覆盖光敏树脂，再进行光照射形成新的固化层，这种方式相对来说比较耗时。CLIP 技术最重要的两个优势，一个是之前提到的打印速度，比传统的增材制造机要快 10 倍到 100 倍；另一个是分层理论上可以无限细腻：传统 3D 打印需要把 3D 模型切成很多层，这就决定了粗糙无法消除，而连续液面生产模式在底部投影的光图像可以做到连续变化，在工艺上与浇筑零件更为相似。如图 1-27 所示，右边传统的增材制造物体因为层状结构，抗剪切性能很差；而 CLIP 技术制造的物体表面细腻，表现出良好的机械性能。



图 1-27 CLIP 技术在牙科（左）和人造支架（右）方面的应用

## 八、SLS 激光烧结

### 1. 选择性激光烧结工作原理

选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 技术由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C. R. Dechard 发明，主要是利用粉末材料在激光照射下高温烧结的基本原理，通过计算机控制光源定位装置实现精确定位，然后逐层烧结堆积成型。

SLS 的工作过程与 3DP 相似，都是基于粉末床进行的，区别在于 3DP 是通过喷射粘结剂来粘结粉末，而 SLS 是利用红外激光烧结粉末。先用铺粉滚轴铺一层粉末材料，通过打印设备里的恒温设施将其加热至恰好低于该粉末烧结点的某一温度，接着激光束在粉层上照射，使被照射的粉末温度升至熔化点之上，进行烧结并与下面已制作成形的部分实现黏结。当一个层面完成烧结之后，打印平台下降一个层厚的高度，铺粉系统为打印平台铺上新的粉末材料，然后控制激光束再次照射进行烧结，如此循环往复，层层叠加，直至完成整个三维物体的打印工作，如图 1-28 所示。

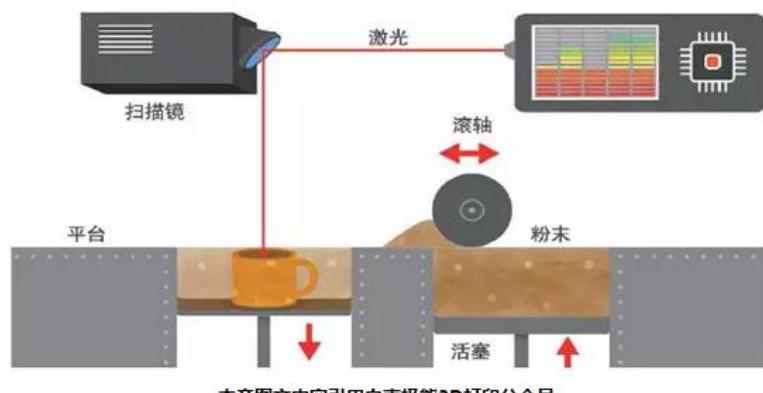


图 1-28 选择性激光烧结工作原理

激光烧结技术是成型原理最复杂，条件最高，设备及材料成本最高的增材制造技术之一，但也是目前对增材制造技术发展影响最为深远的技术。从理论上来说，任何加热后能够形成原子间黏结的粉末材料都可以被用来作为 SLS 的成型材料，目前，已可成熟运用于 SLS 设备打印的材料主要有石蜡、尼龙、金属、陶瓷粉末和它们的复合材料。

### 2. SLS 优势

- 1) 可使用材料广泛。可使用的材料包括尼龙、聚苯乙烯等聚合物，铁、钛、合金等金属、陶瓷、覆膜砂等；
- 2) 成型效率高。由于 SLS 技术并不完全熔化粉末，而仅是将其烧结，因此制造速度快；
- 3) 材料利用率高。未烧结的材料可重复使用，材料浪费少，成本较低；

4) 无需支撑结构。由于未烧结的粉末可以对模型的空腔和悬臂部分起支撑作用，不必像 FDM 和 SLA 工艺那样另外设计支撑结构，可以直接生产形状复杂的原型及部件；

5) 应用面广。由于成型材料的多样化，可以选用不同的成型材料制作不同用途的烧结件，可用于制造原型设计模型、模具母模、精铸熔模、铸造型壳和型芯等。

### 3. SLS 技术限制

1) 原材料价格及采购维护成本都较高。

2) 机械性能不足。SLS 成型金属零件的原理是低熔点粉末粘结高熔点粉末，导致制件的孔隙度高，机械性能差，特别是延伸率很低，很少能够直接应用于金属功能零件的制造。

3) 需要比较复杂的辅助工艺。由于 SLS 所用的材料差别较大，有时需要比较复杂的辅助工艺，如需要对原料进行长时间的预处理（加热）、造成完成后需要进行成品表面的粉末清理等。

### 4. SLS 的应用

#### (1) 金属粉末的烧结

用于 SLS 烧结的金属粉末主要有三种：单一金属粉末、金属混合粉、金属粉加有机物粉末。相应地，SLS 技术在成型金属零件时，主要有三种方式：

#### (2) 单一金属粉末的烧结

例如铁粉，先将铁粉预热到一定温度，再用激光束扫描、烧结。烧结好的制件经热等静压处理，可使最后零件的相对密度达到 99. 9%。

#### (3) 金属混合粉末的烧结

主要是两种金属的混合粉末，其中一种粉末具有较低的熔点，另一种粉末的熔点较高。例如青铜粉和镍粉的混合粉。先将金属混合粉末预热到某一温度，再用激光束进行扫描，使低熔点的金属粉末熔化（如青铜粉），从而将难熔的镍粉粘结在一起。烧结好的制件再经液相烧结后处理，可使最后制件的相对密度达到 82%。

#### (4) 金属粉末与有机黏合剂粉末的混合体

将金属粉末与有机黏合剂粉末按一定比例均匀混合，激光束扫描后使有机黏合剂熔化，熔化的有机黏合剂将金属粉末黏合在一起（如铜料和有机玻璃粉），如图 1-29 所示。烧结好的制件再经高温后续处理，一方面去除制件中的有机黏合剂，另一方面提高制件的力学强度和耐热强度。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-29 利用 SLS 技术制成的金属艺术品

#### (5) 陶瓷粉末的烧结

与金属合成材料相比，陶瓷粉末材料有更高的硬度和更高的工作温度，也可用于复制高温模具。由于陶瓷粉末的熔点很高，所以在采用 SLS 工艺烧结陶瓷粉末时，需要在陶瓷粉末中加入低熔点的黏合剂。激光烧结时首先将黏合剂熔化，然后通过熔化的黏合剂将陶瓷粉末黏结起来成型，最后通过后处理来提高陶瓷零件的性能，如图 1-30 所示。

目前所用的纯陶瓷粉末原料主要有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiC}$ ，而粘结剂有无机粘结剂、有机粘结剂和金属粘结剂三种。由于工艺过程中铺粉层的原始密度低，因而制件密度也低，故多用于铸造型壳的制造。



本章图文内容引用自  
南极熊3D打印公众号

图 1-30 Shapeways 公司利用 SLS 技术制成的陶瓷花瓶

#### (6) 高分子材料的烧结

在高分子材料中，经常使用的材料包括聚碳酸酯（PC）、聚苯乙烯粉（PS）、ABS、尼龙（PA）、尼龙与玻璃纤维的混合物、蜡等。高分子材料具有较低的成形温度，烧结所需的激光功率小，熔融黏度较高，

没有金属粉末烧结时较难克服的“球化”效应，因此，高分子粉末是目前应用最多也是应用最成功的 SLS 材料，如图 1-31 所示。

尼龙材料因具有强度高、耐磨性好、易于加工等优点使其在 SLS 增材制造领域得到了广泛应用。同时，可以在尼龙材料中加入玻璃微珠、碳纤维等材料，从而提高尼龙的机械性能、耐磨性能、尺寸稳定性能和抗热变形性能。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-31 高分子材料的烧结

#### (7) SLS 的应用可大体归纳为六个方面

- 1) 快速原型制造。SLS 工艺能够快速制造模型，从而缩短从设计到看到成品的时间，可以使客户更加快速、直观的看到最终产品的原型。
- 2) 新型材料的制备及研发。采用 SLS 工艺可以研制一些新兴的粉末颗粒以加强复合材料的强度。
- 3) 小批量、特殊零件的制造加工。当遇到一些小批量、特殊零件的制造需求时，利用传统方法制造往往成本较高，而利用 SLS 工艺可以快速有效的解决这个问题，从而降低成本。
- 4) 快速模具和工具制造。目前，随着工艺水平的提高，SLS 制造的部分零件可以直接作为模具使用。
- 5) 逆向工程。利用三维扫描工艺等技术，可以利用 SLS 工艺在没有图纸和 CAD 模型的条件下按照原有零件进行加工，根据最终零件构造成原型的 CAD 模型，从而实现逆向工程应用。
- 6) 在医学上的应用。由于 SLS 工艺制造的零件具有一定的孔隙率，因此可以用于人工骨骼制造，已经有临床研究证明，这种人工骨骼的生物相容性较好。

## 九、SLM 激光熔化

### 1. 选择性激光熔融技术工作原理

选择性激光熔融（Selective Laser Melting, SLM）技术由德国 Froounholfer 研究院于 1995 年首次提出，工作原理与 SLS 相似。SLM 是将激光的能量转化为热能使金属粉末成型，其主要区别在于 SLS 在制

造过程中，金属粉末并未完全熔化，而 SLM 在制造过程中，金属粉末加热到完全熔化后成型。

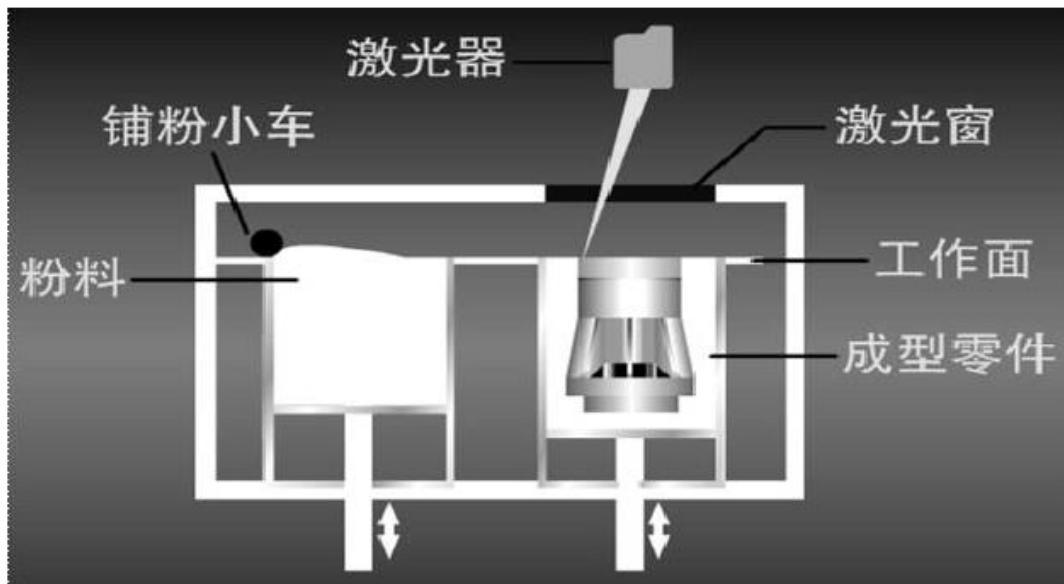


图 1-32 SLM 工作原理

如图 1-32 所示，SLM 工作流程为，打印机控制激光在铺设好的粉末上方选择性地对粉末进行照射，金属粉末加热到完全熔化后成型。然后活塞使工作台降低一个单位的高度，新的一层粉末铺撒在已成型的当前层之上，设备调入新一层截面的数据进行激光熔化，与前一层截面粘结，此过程逐层循环直至整个物体成型。SLM 的整个加工过程在惰性气体保护的加工室中进行，以避免金属在高温下氧化。

## 2. SLM 优势和技术限制

### (1) SLM 主要优点

- 1) SLM 成型的金属零件致密度高，可达 90%以上，如图 1-33 所示；
- 2) 抗拉强度等机械性能指标优于铸件，甚至可达到锻件水平。显微维氏硬度可高于锻件；
- 3) 由于是打印过程中完全融化，因此尺寸精度较高；
- 4) 与传统减材制造相比，可节约大量材料。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-33 SLM 成型的金属零件

### (2) SLM 技术限制

- 1) 成型速度较低，为了提高加工精度，需要用更薄的加工层厚。加工小体积零件所用时间也较长，

因此难以应用于大规模制造；

- 2) 设备稳定性、可重复性还需要提高；
- 3) 表面粗糙度有待提高；
- 5) 整套设备昂贵，熔化金属粉末需要比 SLS 更大功率的激光，能耗较高；
- 6) SLM 技术工艺较复杂，需要加支撑结构，考虑的因素多。因此多用于工业级的增材制造。

SLM 过程中，金属瞬间熔化与凝固（冷却速率约  $10000\text{K/s}$ ），温度梯度很大，产生极大的残余应力，如果基板刚性不足则会导致基板变形。因此基板必须有足够的刚性抵抗残余应力的影响。去应力退火能消除大部分的残余应力。

### 3. SLM 应用

#### (1) SLM 材料

可用于 SLM 技术的粉末材料主要分为三类，分别是混合粉末、与合金粉末、单质金属粉末。

- 1) 混合粉末。混合粉末由一定比例的不同粉末混合而成。现有的研究表明，利用 SLM 成型的构件机械性能受致密度、成型均匀度的影响，而目前混合粉的致密度还有待提高；
- 2) 预合金粉末。根据成分不同，可以将预合金粉末分为镍基、钴基、钛基、铁基、钨基、铜基等，研究表明，预合金粉末材料制造的构件致密度可以超过 95%；
- 3) 单质金属粉末。一般单质金属粉末主要为金属钛，其成型性较好，致密度可达到 98%。

#### (2) 应用

目前 SLM 技术主要应用在工业领域，在复杂模具、个性化医学零件、航空航天和汽车等领域具有突出的技术优势。

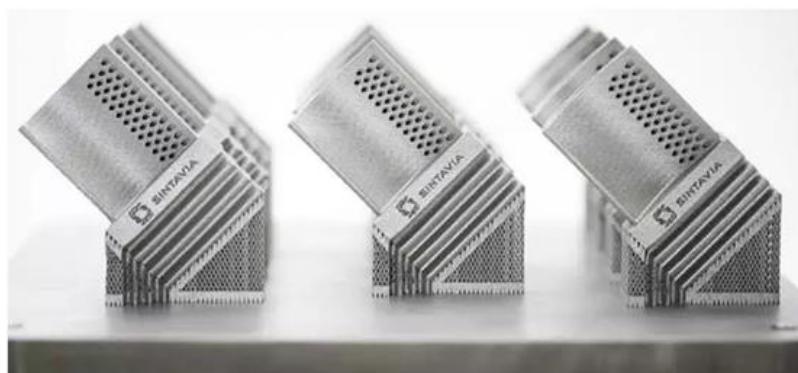
##### 1) 航空航天

如图 1-34 所示，美国航天公司 SpaceX 开发载人飞船 SuperDraco 的过程中，利用了 SLM 技术制造了载人飞船的引擎。SuperDraco 引擎的冷却道、喷射头、节流阀等结构的复杂程度非常之高，增材制造很好地解决了复杂结构的制造问题，如图 1-35 所示。SLM 制造出的零件的强度、韧性、断裂强度等性能完全可以满足各种严苛的要求，使得 SuperDraco 能够在高温高压环境下工作。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-34 SpaceX 公司利用 SLM 技术制造的载人飞船引擎



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-35 利用 SLM 技术打印的钛合金叶片

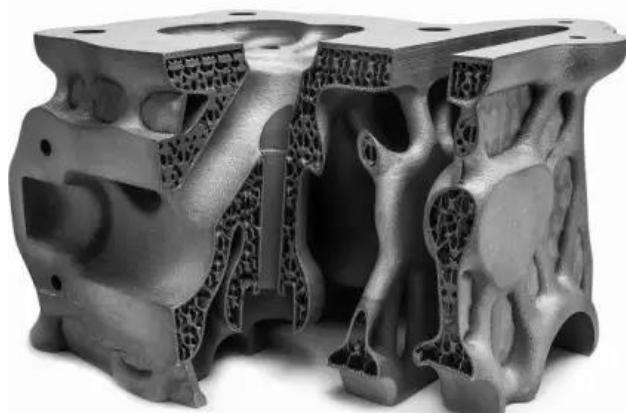
## 2) 汽车

在增材制造技术众多的应用领域中，汽车行业是增材制造技术最早的应用者之一。利用 SLM 技术制造的汽车金属零件，如图 1-36、1-37 所示，在降低成本、缩短周期、提高工作效率、生产复杂零件等方面具有优势，能够使车身设计、结构、轻量化等性能更优异。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-36 利用 SLM 技术打印的 V8 引擎实体模型



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-37 利用 SLM 技术打印的用于 F1 赛车的气缸盖

### 3) 生物医疗

如图 1-38 所示, 利用 SLM 技术, 可以应用于制造下颌骨、脊柱融合矫正、义齿等。2011 年, 荷兰医生给一名 83 岁的老妪安装了一块增材制造的金属下颌骨, 为全球首例, 标志着增材制造移植植物开始进入临床应用。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-38 SLM 技术生物医疗应用案例

## 十、惠普 MJP 多射流熔融

### 1. 惠普打印机成型原理

惠普所用的增材制造技术为多射流熔融 (MultiJet Fusion), 其成形步骤如下图所示。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-39 成形步骤图示

- (1) 铺设成形粉末;
- (2) 喷射熔融辅助剂 (fusing agent);
- (3) 喷射细化剂 (detailing agent);
- (4) 在成形区域施加能量使粉末熔融; (注意: 喷射细化剂的区域并没有被熔融)

重复 1-4 步骤直到所有的层片成形结束。

### 2. 惠普打印机优势

1) 速度快, 超过普通技术的 10 倍。如图 1-40 所示就是以打印齿轮为例的速度对比, 可以看到同样耗费 3 小时, 惠普多喷射熔融 (MJF) 技术足足打印出了 1000 个, 远超过 FDM 以及 SLS 技术



图 1-40 速度对比图

2) 打印件质量高。如图 1-41 所示就是一个小小验证，用打印的椭圆形结构吊起了一辆汽车。这个结构打印只用了 30 分钟，重 1/4 磅（约 113 克），却可提起最高 5 吨的重量。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-41 打印件承重图

3) 高精度。打印机喷头可以达到 1200dpi 的精度，考虑到粉末的扩散，在 XY 方向的精度可以达到约 40 微米。

### 3. 技术限制

#### 1) 材料限制

现在可用材料为尼龙 12 (PA12)，而更多可用材料取决于 HP 对于细化剂的开发；对于金属器件的打印，可能无法使用一体机，因为直接在设备内部进行烧结/熔融需要的高温会影响电子器材包括喷头的运行。

#### 2) 材料污染

在喷射了细化剂的区域，粉末并没有被烧结，有可能造成粉末的污染（因为这些喷射了细化剂的粉末

如果被后续用在成形区域可能不会被熔融)。

### 3) 可选颜色

HP 所用的熔融辅助剂包含了可以吸收光波的物质(可能为炭黑等深色材料),因而所展示的样品为深色;而打印白色等浅色可能会降低能量吸收,从而会增加成形时间,有可能导致无法成形;对于全彩器件的打印,同时需要考虑色素的耐高温能力。

## 十一、UAM 超声波制造

### 1. 超声波增材制造工作原理

超声波增材制造是一种基于传统加工工艺“超声波焊接”的技术。超声波焊接是指利用超声波的振动能量使两个需要焊接的表面摩擦,形成分子间融合的一种焊接方式。UAM 则是将这种焊接方式应用到增材制造机上形成新的增材制造工艺。

如图 1-42 所示,在连续的超声波振动压力下,两层金属箔之间会产生高频率的摩擦,而在摩擦过程中金属表面覆盖的氧化物和污染物被剥离,露出纯金属。进而通过超声波的能量辐射(或外部加热)将较为纯净的金属材料软化填充至已焊接完毕的金属箔片的表面,在这个过程中,两片金属箔片的分子会相互渗透融合,进一步提高焊接面的强度,而后周而复始,层层叠加,最终成型。

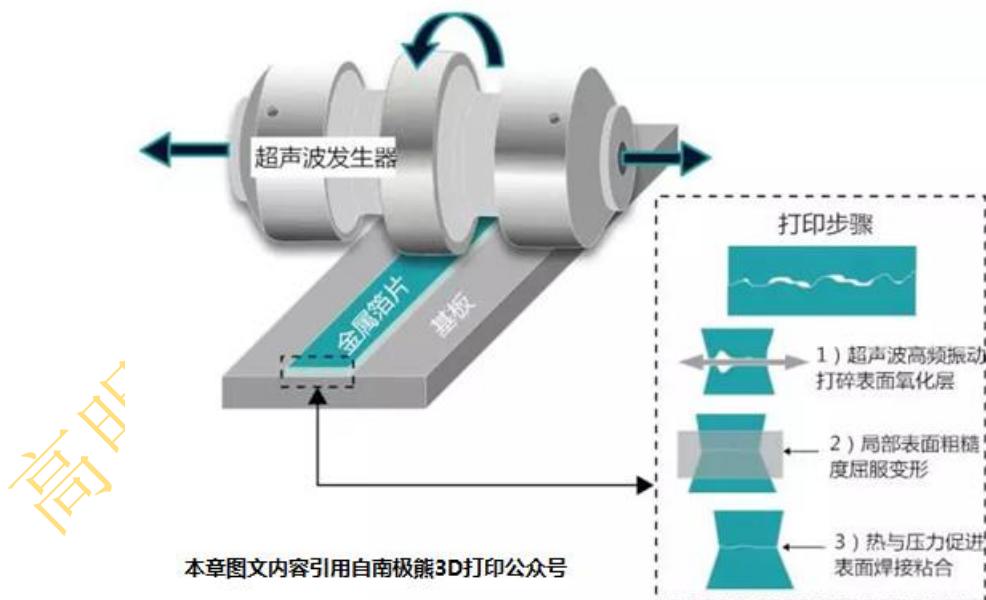


图 1-42 超声波工作示意图

### 2. 优势

低温这是 UAM 技术的最大优势。整个打印过程的初始温度是 150° C,焊接过程中摩擦和塑性变形的产热可使局部温度达到 200° C 上下,比起其他通常要将金属加热至熔点的增材制造技术,温度要低上很多。而低温带来的好处有:

1) 具有将多种金属类型连接在一起的能力，允许温度敏感材料的嵌入。可在增材过程中嵌入传感器，合金纤维，以及其他低熔点材料或电子器件

2) 几乎没有热残余应力与热变形。其生产的零件内部不会产生热应力，也就不需要对零件进行后处理。

3) 保留了原材料机械性能。例如，在加工铝的过程中，最高温度低于 120℃，由于材料仅被稍微加热，所以材料不会改变晶粒尺寸或产生相应的变化。

(2) 打印尺寸大。用 UAM 打印的最大工件尺寸可以达到 6 英尺 x6 英尺 x3 英尺，明显大于其他金属打印技术的工件尺寸。

(3) 加工表面光洁度较高。由于 UAM 增材中加入了数控减材加工工序，工件表面（特别是内部结构表面）的光洁度可以通过加入磨削工序加以控制。

(4) 打印速度快。一般增材制造速度在  $5\text{mm/s}$ - $300\text{mm/s}$ ，而超声波增材制造机可达  $100\text{mm}^3/\text{s}$ 。SLM 或 SLS 技术若要实现高精度，打印速度会进一步降低，而超声波增材制造技术不存在这个问题，他的高精度是由后期的数控加工来实现的。

(5) UAM 技术可以通过调整超声波的频率与幅度，对摩擦损坏的表面或者裂缝进行裂缝超声波焊修复，从而达到工件的重复使用，进而节省成本。

2016 年，NASA 兰利研究中心与 Fabrisonic 公司合作，如图 1-43 所示，将 FBG 传感器嵌入到金属零件中，以长期监测零件的温度、速度等变量。FBG 是一种可以精准地测量位移、速度、加速度、温度的传感器，广泛应用于桥梁建筑、航空航天、石油化学工业等领域。普通的金属增材制造会产生高温，导致嵌入的 FBG 传感器失去敏感性。而利用 UAM 技术，温度始终低于 94℃，从而避免了传感器的损坏。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-43 光纤嵌入金属图

图中光纤完美地嵌入在金属中。打印好的光纤完全被金属包裹，提高了光纤的安全性，就算在恶劣的环境下也不易损坏。

### 3. 技术限制

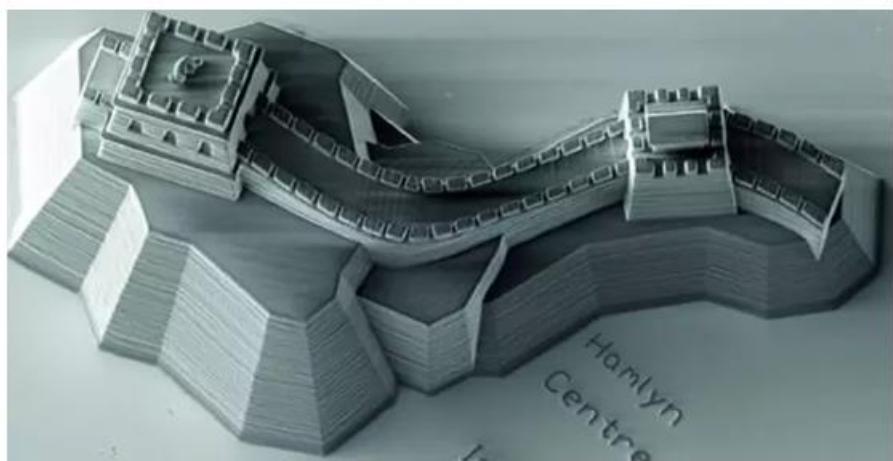
目前超声波增材制造技术基本上由 Fabrisonic 所垄断。之所以在制造业还没有产生颠覆性的影响，在于一些技术层面上的限制：

- 1) 超声波换能器的功率限制。由于转换效率的制约，实际输出的超声能量难以大幅提高，超声波发生器的频率一般在 20kHz 左右。
- 2) 超声波所带来的机械共振。由于超声波发生器一般在 20kHz，而工件很容易在 20kHz 频率上发生共振，共振会导致工件基板与上层金属箔片的摩擦显著减弱，从而引发焊接质量降低。
- 3) 无法自动放置/取出支撑结构。超声波粘合的过程需要适当的压力，而在制造大面积的悬空结构时，缺乏支撑将直接导致压力无法施加和制造困难。因此 UAM 对悬空结构尺寸有严格的要求。
- 4) 数控加工精度限制制造精度。UAM 的制造精度可以达到  $100\mu\text{m}$  级别，主要受限于数控加工的精度。这一限制使得尺寸低于  $100\mu\text{m}$  的精细结构无法使用 UAM 进行制造。

## 十二、TPP 双光子技术

### 1. 双光子增材制造原理

双光子增材制造 (Two-photon Polymerization, TPP)，学名为双光子激光直写技术、双光子聚合光固化成形技术。常见的增材制造机工作原理都是分层制造，层与层之间的精度很受限，存在所谓的“台阶效应”。这使得增材制造机难以制造低粗糙度、高精度的器件如图 1-44 所示，如各种光学元件、微纳尺度的结构器件等等。而双光子增材制造技术的出现有望完美解决这个问题。

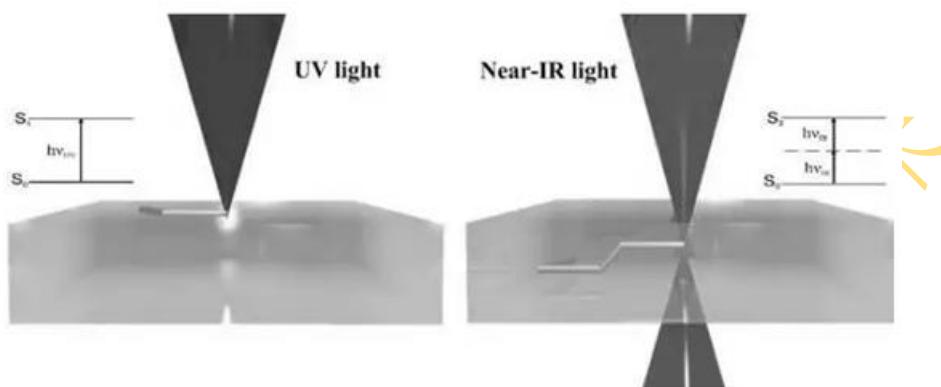


本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-44 增材制造长城（长度 100 微米）

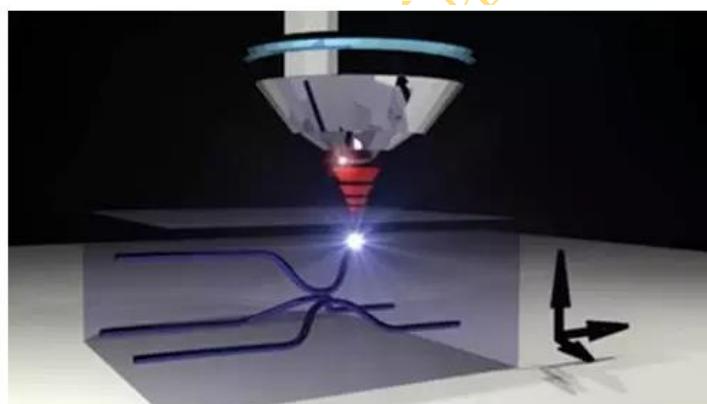
首先要知道什么叫做“双光子吸收效应。”SLA、DLP 或是 PolyJet 技术所利用的都是单光子聚合，将一个光子作为基础单位进行吸收，一次只能通过一个光子。但是实际上，极少

数情况下，由于物质中存在特殊的能级跃迁模式，也会出现同时吸收两个光子的情况，这就是“双光子吸收效应”，如图 1-45 所示。但双光子吸收的条件非常苛刻，它要求特定的物质和极高的能量密度。只有在高度聚焦的激光中心部位，才会有足够的辐照度来确保有两个光子同时被吸收。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-45 单光子聚合（左）与双光子聚合（右）对比示意图



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

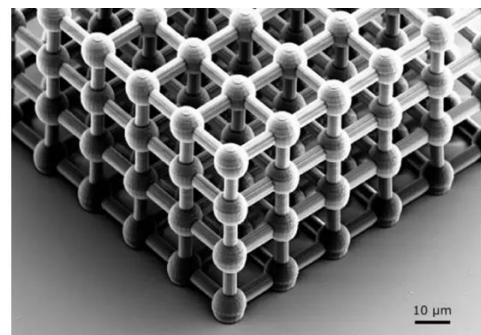
图 1-46 PP 双光子增材制造技术原理示意图

利用了 TPP 双光子增材制造技术，打印精度可以达到纳米级。如图 1-46 所示，通过将激光聚焦在光敏树脂内，计算机控制移动纳米级精密移动台，焦点经过的位置，光敏树脂会变性、固化，从而可以打印任意形状的三维物体。由于双光子聚合发生的固化只发生在激光聚焦的光敏树脂槽中央，而不是像 SLA/DLP 一样发生在树脂槽液面或者树脂槽底部，因此，使用 TPP 技术的增材制造机无需将打印件从树脂槽底部剥离，也无需安装刮刀进行光敏树脂液面的涂覆。

TPP 技术是现在市面精度最高的增材制造技术。TPP 技术广泛应用于微光学，微电子，微流控，微器件等领域如图 1-47、1-48 所示，它给增材制造从业者和科学家提供了一种强有力

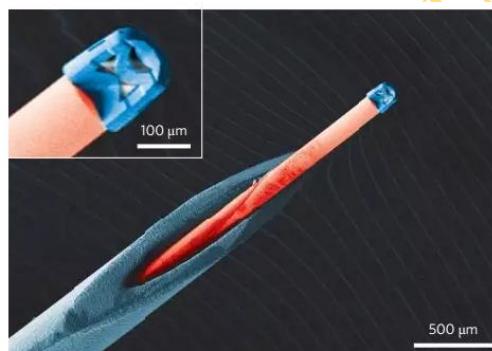
的解决方案，来设计和加工多种多样的微纳结构。

TPP 技术最典型的应用是在科研领域。光子晶体（Photonic Crystal）的单元结构极其微小，加工起来非常困难。使用 TPP 技术则可以非常方便地加工出这种周期性排列的微纳结构。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

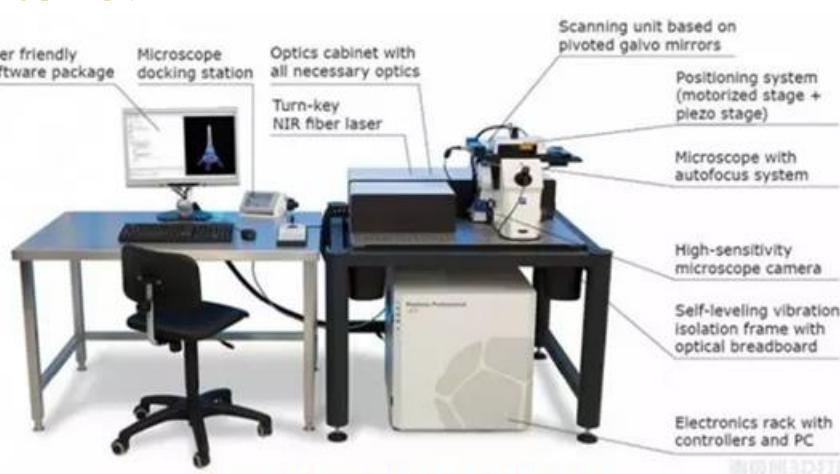
图 1-47 利用 TPP 技术加工的三维光子晶体



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-48 科学家利用 TPP 技术在光纤顶端加工的内窥镜

## 2. 典型的 TPP 打印系统基本配置（如图 1-49 所示）



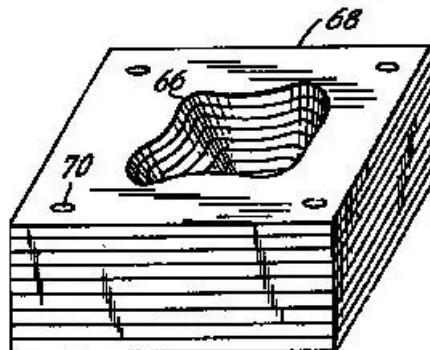
本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-49 TPP 打印系统基本配置图

### 十三、LOM 层叠实体制造

#### 1. LOM 层叠实体制造技术原理

1976 年, Paul L DiMatteo 在他的专利中提出: 利用轮廓跟踪器, 将三维物体转换成许多的二维薄片, 然后用激光切割这些薄片, 再利用螺钉、销钉等将这一系列的薄片连接成三维物体, 如图 1-50 所示。该设想便是 LOM 技术的雏形。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-50 DiMatteo(1974)利用分层堆叠技术设计的模具

LOM 技术的成形原理如图 1-51 所示。激光切割系统按照计算机提取的横截面轮廓线数据, 将背面涂有热熔胶的片材进行切割。切割完一层后, 送料机构将新的一层片材叠加上去, 利用热粘压装置将已切割层粘合在一起, 然后再次重复进行切割。通过逐层地黏合、切割, 最终制成三维物件。目前, 可供 LOM 设备打印的材料包括纸、金属箔、塑料膜、陶瓷膜等。

本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

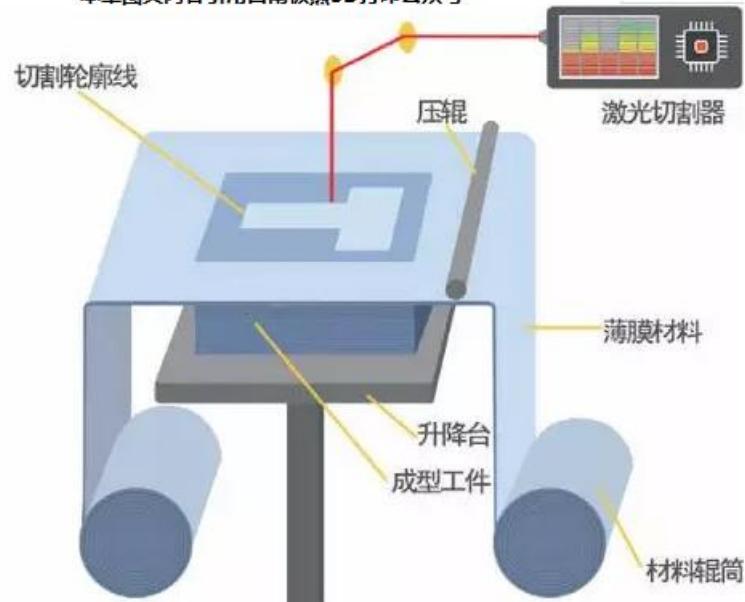
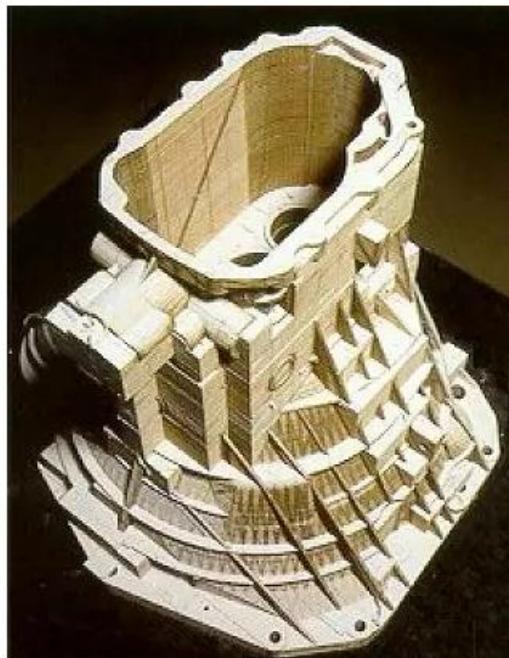


图 1-51 LOM 分层实体制造技术原理图

我们不难发现，LOM 工艺其实还是具有传统切削工艺的影子。但只不过它不是用大块原材料进行切割，而是将原来的零部件模型分割成多层，然后进行逐层切割。需要注意的是，尽管 LOM 工艺支持多种材料，但市面上大多使用纸张作为其原材料如图 1-52 所示，因此在打印完成后都需要使用砂纸进行磨光，并用密封漆来进行防潮处理，否则打印物件容易受到水分渗透影响。



本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

图 1-52 采用 LOM 工艺打印的纸质物品

## 2. LOM 优势和技术限制

### (1) 优势

目前 LOM 技术能成熟使用的材料相比 FDM 设备要少很多，最为成熟和常用的材料是涂有热敏胶的纤维纸。由于原材料的限制，导致打印出的最终产品在性能上仅相当于高级木材，一定程度上限制了该技术的推广和应用。普遍来说，LOM 打印技术的优点主要有以下几个方面。

- 1) 成型速度较快。由于 LOM 无需打印整个切面，只需要使用激光束将物体轮廓切割出来，所以成型速度较快，常用于加工内部结构简单的大型物件；
- 2) 成本低。因为没有涉及化学反应，所以可以满足大型物件的制作；
- 3) 不存在收缩和翘曲变形，无须设计和构建支撑结构。
- 4) 精度较高。制件在 Z 方向的精度可达  $0.2\sim0.3\text{ mm}$ ，X 和 Y 方向的精度可达  $0.1\sim0.2\text{ mm}$ 。

### (2) 技术限制：

- 1) 受原材料限制，成型件的抗拉强度和弹性较差；
- 2) 不能制造中空结构件。难以构建精细形状的物件，仅限于结构简单的物件；

- 3) 后处理工艺繁琐。原型易吸湿膨胀，需进行防潮等处理流程；
- 4) Z 轴精度受材质层厚决定，难以直接构建精细的物件。
- 5) 需要专门的实验室环境，且维护费用高昂。

### 3. LOM 技术应用

由于 LOM 技术本身的缺陷，致使采用该技术的产品较少，应用的行业也比较狭窄。目前多用于以下几个领域：

- 1) 直接制作纸质或薄膜等材质的功能制件，用在新产品开发中的外观评价、结构设计验证。
- 2) 通过真空注塑机制造硅橡胶模具，试制少量新产品。
- 3) 快速制模，包括铸造用金属模具、铸造用消失模、石蜡件的蜡模等。

## 十四、EBM 电子束熔炼

### 1. EBM 电子束熔炼工作原理

电子束熔炼 (Electron Beam Melting, EBM) 是一种金属增材制造技术，最早由瑞典 Arcam 公司研发并取得专利。EBM 的工作原理与 SLM 相似，都是将金属粉末完全熔化后成型。其主要区别在于 SLM 技术是使用激光来熔化金属粉末，而 EBM 技术是使用高能电子束来熔化金属粉末。

本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

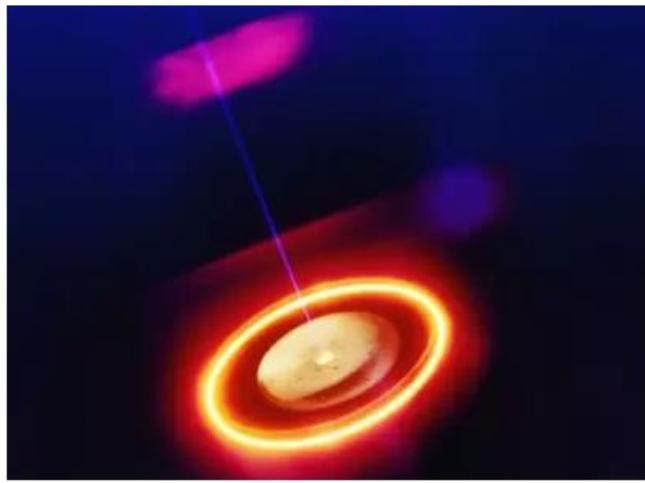


图 1-53 高能电子束熔化金属粉末

EBM 技术在打印之前，铺设好一层粉末后，电子束会多次地快速扫描粉末层使其预热，粉末处于轻微烧结状态而不至于被熔化。这是 EBM 技术独有的一个步骤。SLM 最多可预热温度 300℃，而 EBM 技术可采用电子束扫描对每一层金属粉末进行预热，使零件在 600~1200℃范围内加工成形，如图 1-53 所示。

如图 1-54 所示，具体的打印过程为，计算机将物体的三维数据转化为一层层截面的 2D 数据并传输给打印机，打印机在铺设好的粉末上方选择性地向粉末发射电子束，电子的动能转换为热能，选区内的金属

粉末加热到完全熔化后成型，加工成当前层。然后活塞使工作台降低一个单位的高度，新的一层粉末铺撒在已烧结的当前层之上，设备调入新一层截面的数据进行加工，与前一层截面粘结，此过程逐层循环直至整个物体成型。

本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

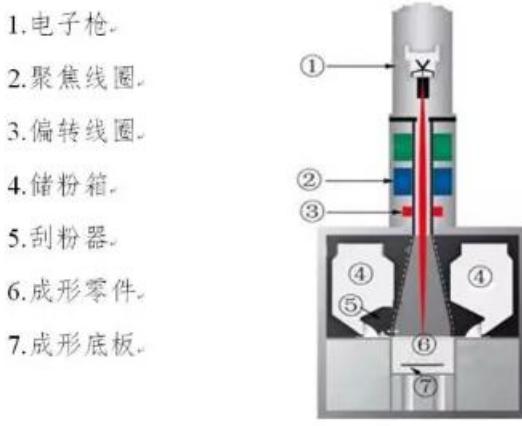


图 1-54 EBM 设备结构图

SLM 和 EBM 设备都是以高能束流为热源，根据 CAD 分层数据选择性的扫描熔化粉床上的金属粉末，层层叠加来形成金属零件。二者的差异主要有三方面：

- 1) 热源不同。SLM 采用激光为热源，EBM 采用电子束作为热源；
- 2) 成形工作环境不同。SLM 技术在惰性气体条件下熔化成形，EBM 技术在真空条件下熔化成形；
- 3) 工作成形热温度不同。SLM 最多可预热温度 300℃，EBM 技术可采用电子束扫描对每一层金属粉末扫描预热，使零件在 600~1200℃ 范围内加工成形；
- 4) 铺粉厚度不同。EBM 的粉末层厚度在 50~150um 之间。粉末厚度大，零件就可以在更短的时间内制造完成，因而更加高效。通常 EBM 的效率是 SLM 的 3 倍。
- 5) 粉末粒径不同。EBM 的粉末粒径相对较粗，分布在 45~105um。而对于 SLM 工艺，过粗的粉末有不能熔透的风险。粉末粒径越细，价格越高，因此 EBM 的耗材更加经济。

## 2. EBM 优势

- 1) 电子束的能量转换效率非常高，远高于激光，因此能量密度高，粉末材料熔化速度更快，因此可以得到更快的成型速度，且节省能源；
- 2) 高能量密度能够熔化熔点高达 3400 摄氏度的金属；
- 3) 电子束的扫描速度远高于激光，因此在造型过程中可利用电子束对每一层金属粉末扫描预热以提高粉末的温度。经过预热的粉末在造型后残余应力较小，在特定形状的制造上会有优势，且无需热处理。

## 3. EBM 技术限制

- 1) 金属粉末被电子束进行预热后会变成轻微烧结的状态，制造结束后，EBM 的未造型粉末需要通过喷砂等工艺去除，若是复杂造型内部会有难以去除的问题；
- 2) 需要额外的系统设备以制造真空工作环境，因此设备较为庞大；
- 3) EBM 技术成形的零件表面粗糙度大于 SLM 技术。

#### 4. EBM 应用

- 1) EBM 的材料一般为多金属混合粉末合金材料，如目前主流的 Ti6Al4V、钴铬合金、高温铜合金等等。这些材料具有自己独有的一些特征，如高温铜合金具有高相对强度、潜在的用于高热焊剂的应用、极好的升高的温度强度、极好的热传导性、好的抗蠕变性等特征，如图 1-55、1-56 所示。
- 2) 目前已经商业化应用的 EBM 材料有：CoCrMo 合金，纯铜，纯铁，316L 不锈钢，H13 工具钢，金属铌，镍基合金，纯钛，钛合金，TiAl 基合金。



图 1-55 EBM 技术在骨科的应用

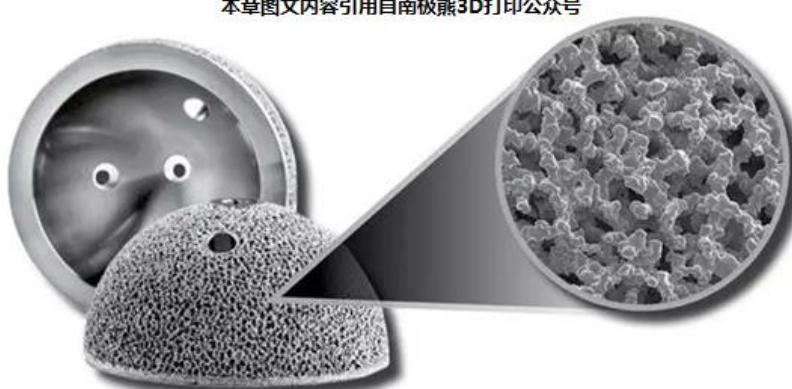


图 1-56 EBM 制造的具有多孔表面的髋臼杯

### 十五、LENS 激光近净成型

## 1. LENS 技术原理

近净成形技术是指零件成形后，仅需少量加工或不再加工，就可用作机械构件的成形技术。激光近净成型（Laser Engineered Net Shaping, LENS）通过激光在沉积区域产生熔池并持续熔化粉末或丝状材料而逐层沉积生成三维物件，如图 1-57 所示。LENS 技术由美国桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratory）于上世纪 90 年代研制，随后美国 Optomec 公司将 LENS 技术进行商业开发和推广。

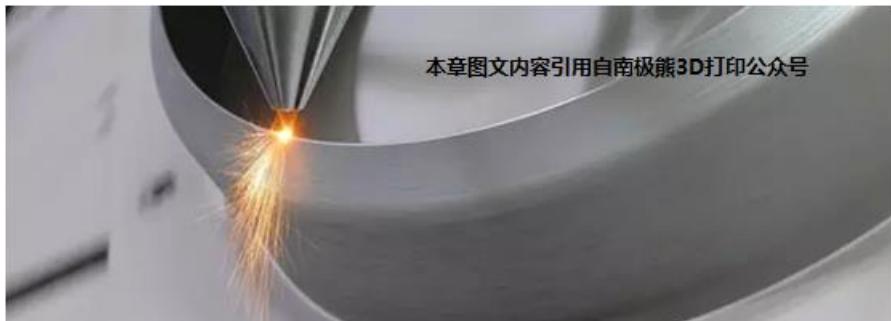


图 1-57 LENS 近净成型工作示意图

因为 LENS 技术是由许多大学和机构是分别独立进行研究的，因此这一技术的名称繁多。LENS 技术也叫激光熔化沉积（Laser Metal Deposition, LMD），美国密歇根大学称为直接金属沉积（Direct Metal Deposition, DMD），英国伯明翰大学称为直接激光成型（Directed Laser Fabrication, DLF），中国西北工业大学黄卫东教授称其为激光快速成形（Laser Rapid Forming, LRF）。美国材料与试验协会（ASTM）标准中将该技术统一规范为金属直接沉积制造（Directed Energy Deposition, DED）技术的一部分。

在 LENS 技术过程中，计算机首先将三维 CAD 模型按照一定的厚度切片分层，每一层的二维平面数据并转化为打印设备数控台的运动轨迹。高能量激光束会在底板上生成熔池，同时将金属粉末同步送入熔池中并快速熔化凝固，使之由点到线、由线到面的顺序凝固，从而完成一个层截面的打印工作。这样层层叠加，制造出近净形的零部件实体。

LENS 技术主要用于打印比较成熟的商业化金属合金粉末材料，包括不锈钢、钛合金、镍基合金等。

## 2. LENS 优势和技术限制

LENS 技术可以实现金属零件的无模制造，节约成本，缩短生产周期。同时该技术解决了复杂曲面零部件在传统制造工艺中存在的切削加工困难、材料去除量大、刀具磨损严重等一系列问题。LENS 技术是无需后处理的金属直接成形方法，成形得到的零件组织致密，力学性能很高，并可实现非均质和梯度材料零件的制造。

LENS 技术也遇到了一些瓶颈，包括粉末材料利用率较低，成形过程中热应力大，成形件容易开裂，成形件的精度较低，可能会影响零件的质量和力学性能。

## 3. LENS 应用

LENS 技术主要应用于航空航天、汽车、船舶等领域，用于制造或修复航空发动机和重型燃气轮机的叶片以及轻量化的汽车零部件等，如图 1-58 所示。LENS 技术可以实现对磨损或破损的叶片进行修复和再制造的过程，从而大大降低叶片的制造成本，提高生产效率，如图 1-59 所示。

本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号

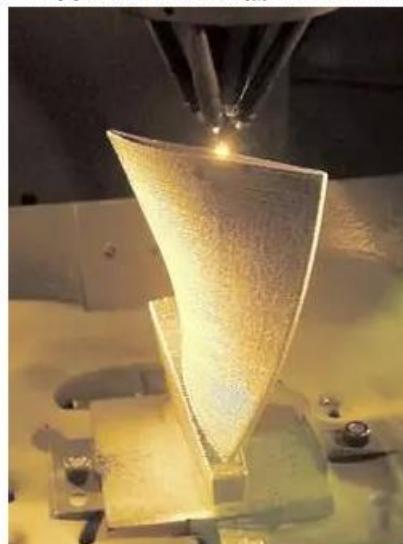


图 1-58 用 LENS 技术制造发动机叶片

本章图文内容引用自  
南极熊3D打印公众  
号



图 1-59 LENS 技术对破损的零件进行修复

如图 1-60 所示，德国 O.R. Laser 公司使用 LENS 技术在传感器表面制造出一个硬合金熔覆层，为石油和天然气行业的传感器元件提供可靠保障，显著延长传感器的寿命。该方法能使材料精确沉积、低热渗透，最终为传感器镀上一层不失真、无裂纹的涂层。

本章图文内容引用自南极熊3D打印公众号



图 1-60 在传感器表面制造硬合金熔覆层

## 十六、DMLS 直接金属激光烧结

### 1. DMLS 原理

金属激光烧结 (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) 又称金属激光烧结、金属直接表面烧结或者激光熔覆成形，由德国 EOS 公司于 1994 年获得第一个 DMLS 技术专利，现在 EOS 是世界最大的 DMLS 系统制造商之一。DMLS 技术作为 SLS 技术的一个分支，是一种新的金属表面改性技术，原理是通过在基材表面覆盖熔覆材料，利用激光使其与基材一起熔凝在一起，并逐层堆叠的方法。



图 1-61 金属激光烧结图 1

激光熔覆按熔覆材料的供给方式可分为两大类，即预置式激光熔覆和同步式激光熔覆。如图 1-61 所示，预置式激光熔覆是将熔覆材料事先置于基材表面的熔覆部位，然后采用激光束辐照扫描熔化，熔覆材料以粉、丝、板的形式加入，其中以粉末的形式最为常用。

同步式激光熔覆则是将熔覆材料直接送入激光束中，使供料和熔覆同时完成，如图 1-62 所示。熔覆材料主要也是以粉末的形式送入，有的也采用线材或板材进行同步送料。



图 1-62 金属激光烧结图 2

这种方法的优点是工艺过程简单,合金材料利用率高,可控性好,容易实现自动化。因此,同步法是激光技术的首选方法,国内外实际生产中采用较多。

## 2. DMLS 优势和技术限制

### (1) DMLS 的主要优势

- 1) 对基材改变较小。DMLS 技术对基材的热影响程度较小,引起的变形程度也较小;
- 2) 激光熔覆层与基体为冶金结合,结合强度不低于原基体材料的 95%;
- 3) 材料范围广泛,如镍基、钴基、铁基合金、碳化物复合材料等,可满足工件不同用途要求,兼顾性能与表面特性;
- 4) 熔覆层及其界面组织致密,晶粒细小,无孔洞,无夹杂裂纹等缺陷;
- 5) 提高部件使用寿命。可对局部磨损或损伤的大型设备贵重零部件、模具进行修复,延长使用寿命;
- 6) 降低成本。可以快速修复受损部件,减少因设备损坏造成的停工时间,从而降低维护成本。

### (2) DMLS 的技术限制

DMLS 的缺点基本与 SLM 工艺相同,主要是成型速度较低,设备稳定性、可重复性还需要提高,零件表面的粗糙度高等。DMLS 技术精确成形形状复杂的金属零部件有较大难度,归根结底,主要是由于金属粉末在 DMLS 中的“球化”效应和烧结变形。为克服单组元金属粉末 DMLS 中的“球化”现象,以及由此造成的烧结变形、密度疏松等工艺缺陷,目前一般可以通过使用熔点不同的多组元金属粉末或使用预合金粉末来实现。

## 3. DMLS 应用

DMLS 技术的材料主要包括自熔性合金粉末、碳化物复合粉末、自粘结复合粉末、氧化物陶瓷粉末等,如图 1-63、1-64、1-65、1-66 所示。

常用激光熔覆材料介绍:

### (1) 自熔性合金粉末

自熔性合金粉末可分为镍基自熔合金、钴基自熔合金、铁基自熔合金，其主要特点是含有硼和硅，因而具有自我脱氧和造渣的性能，即所谓自熔性。其中，以镍基材料应用最多，与钴基材料相比，其价格便宜。

### (2) 碳化物复合粉末

碳化物复合粉末系由碳化物硬质相与金属或合金作为粘结相所组成的粉末体系。这类粉末中的粘结相能在一定程度上使碳化物免受氧化和分解，特别是经预合金化的碳化物复合粉末，能获得具有硬质合金性能的涂层。

### (3) 自粘结复合粉末

自粘结复合粉末是指在热喷涂过程中，由于粉末产生的放热反应能使涂层与基材表面形成良好结合的一类热喷涂材料，其最大的特点是具有工作粉和打底粉的双重功能。

### (4) 氧化物陶瓷粉末

氧化物陶瓷粉末具有优良的抗高温氧化能力，还有隔热、耐磨、耐蚀等性能，是一类重要的热喷涂材料，也是目前极受重视的激光熔覆材料。

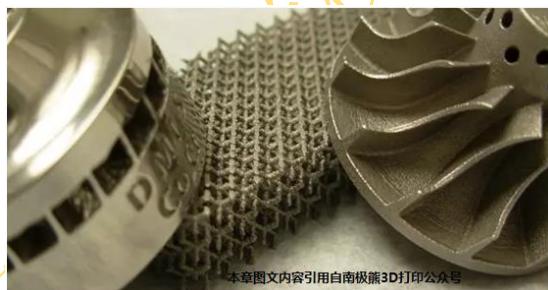


图 1-63 利用 DMLS 技术制造的金属部件



图 1-64 利用 DMLS 技术制造的金属零件

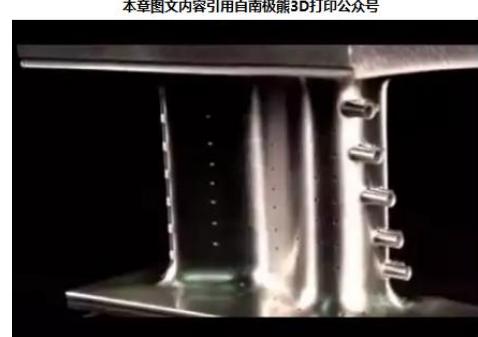


图 1-65 利用 DMLS 技术制成的航天零部件



图 1-66 利用 DMLS 技术制成的发动机喷嘴

### (5) 激光熔覆修复

目前 DMLS 主要用于受损零件的修复，可对大型转动设备重要零部件如轴、叶片、轮盘、曲轴、泵轴、齿轴以及模具、阀门等进行腐蚀、冲蚀和磨损后的激光熔覆修复。

#### 1) 激光熔覆前(如图 1-67 所示)待修复工件表面

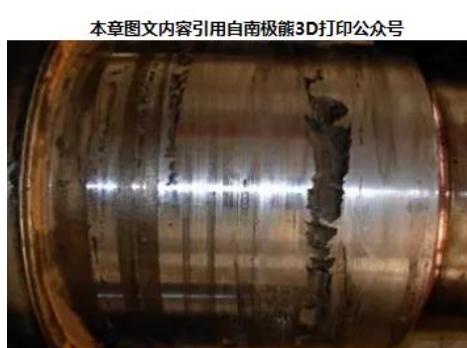


图 1-67 激光熔覆前



图 1-68 激光熔覆修复中

#### 2) 激光熔(如图图 1-68 所示)覆修复中

#### 3) 激光熔覆后(如图 1-69 所示)未机加工表面



图 1-69 激光熔覆后



图 1-70 机加工处理后

4) 激光熔覆后机加工处理后(如图 1-70 所示)表面

玻璃模具使用寿命为 30 万次/件，经过模具内腔表面熔敷处理后达到 130 万次/件

高明区职业技术学校增材制造技术