

第一章 3D 打印的时光隧道

“3D 打印”这个词越来越频繁地出现在人们的视野中，大部分人或许知道目前 3D 打印能够打印手枪，但对于 3D 打印技术的发展历程却不甚清楚，本章将带你一起穿梭 3D 打印的时光隧道。

一、3D 打印的前世

提起 3D 打印，大部分人认为这是一项新的技术，但事实并非如此。3D 打印的思想源于 19 世纪末的美国，并在 20 世纪 80 年代得以发展和推广，被人称作“上上个世纪的思想，上个世纪的技术，本世纪的市场”。长久以来在传统制造业里，复杂结构的产品制造难度大、开模费用高、制造时间长等问题非常严重。种种问题和不方便引发人们去思考一种快速成形的方法，经过不断的探索和研究，人们终于实现了一次新的跨越——发明了 3D 打印技术。

1982 年，在紫外线设备生产商 UVP 任副总裁的查尔斯·胡尔（Charles W. Hull）试图将光学技术应用于快速成形领域。他将一种可被紫外光固化的液态感光树脂放在一个大容器中，并在容器里放置一个可上下移动的升降平台，容器上方安装一个紫外激光器。升降平台最初与液体上表面平行，紫外激光器射出的紫外线照射到液体表面指定的位置，将液体固化，即完成一层打印；随后升降平台向下移动一层的高度（0.05~0.15mm），紫外激光器用同样的方法打印下一层；随着升降平台的不断下移，物体被一层一层地打印出来，并最终“累积”成三维物体；将物体从液体中取出，并去除掉升降平台上用于固定的支撑物，便可以得到与计算机中的 CAD 模型相同的真实物体。

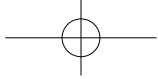
胡尔的这种方法突破了当时快速成形的工艺限制，不但提升了物体打印的速度，而且打印体积也可以变得很大。1986 年，胡尔申请了该项技术专利，随后他成立了 3DSystems 公司，致力于将该技术商业化。1988 年，3DSystems 公司推出了世界上第一台基于立体光固化（Stereo Lithography Appearance, SLA）技术的商用 3D 打印机，如图 1.1 所示，标志着 3D 打印商业化的起步。同时，为了提高 3D 打印机对于 CAD 模型的精确识别和打印，胡尔又研发了 STL 文件格式。该文件格式将 CAD 模型进行三角化处理，将三维物体用许多散乱无序的三角形小平面来表示，如今它已成为 3D 打印的通用格式。

然而，SLA 技术受到使用材料种类和设备价格的限制，无法得到快速普及。此时，另一项 3D 打印技术应运而生。

20 世纪 80 年代中期，传感器制造商 IDEA 的联合创始人斯科特·克伦普（Scott Crump）在测试产品的设计时发现通过 CAD 设计的模型很难被转化成真实的样品。为解决这一问题，克伦普决定采用添加制造技术设计一个能快速生产模型的机器。克伦普以热塑性塑料为制造原料，将高温熔化后的液态塑料放在容器中，并由一个或多个喷头根据 CAD 模型的数据喷射到承载物体的平台上的指定位置，材料在



图 1.1 查尔斯·胡尔与世界上第一台 SLA 商用打印机



喷出后迅速固化；喷头或平台在计算机的操控下水平移动完成一层物体的打印，反复这一过程可堆积成完整的物品，冷却定型后物品便可投入使用。

克伦普将这一技术命名为熔融沉积成形（Fused Deposition Modeling, FDM），并于1989年获得专利；同年，他和妻子丽莎·克伦普（Lisa Crump）一同创立了Stratasys公司，制造3D打印机。1992年，第一台基于FDM技术的商用3D打印机——“3D造型者（3D Modeler）”诞生于Stratasys公司，这标志着FDM技术步入了商用阶段。

1986年美国德克萨斯大学奥斯汀分校的研究生C.R.Dechard提出了选择性激光烧结（Selective Laser Sintering, SLS）的思想，并于1989年研制成功了SLS技术，稍后组建了DTM公司，并于1992年开发了基于SLS的商业成形机（Sinterstation）。选择性激光烧结是将粉末材料进行烧结成形的一种工艺方法，目前SLS技术应用广泛并支持多种材料成形，例如尼龙、蜡、陶瓷、金属等，SLS技术的发明让3D打印生产走向多元化。

美国麻省理工学院的Emanuel Sachs教授于1989年申请了三维印刷技术（Three-Dimension Printing, 3DP）的专利。3DP工艺与SLS工艺类似，采用粉末材料成形，如陶瓷粉末、金属粉末，所以也称为粉末粘合工艺。但3DP是通过喷头用粘接剂（如硅胶）将材料粉末粘结成形，如图1.2所示。1993年，“3D打印（Three Dimensional Printing）”这个说法才由麻省理工学院提出并申请专利。

自20世纪90年代初以来，清华大学、北京航空航天大学、西北工业大学、西安交通大学、华中科技大学、华南理工大学等高校，在3D打印技术方面开展了积极的探索。我国已有部分技术处于世界先进水平，其中，激光烧结加工金属技术发展较快，已基本满足特种零部件的机械性能要求，率先应用于航空航天装备制造，如图1.3所示；生物细胞3D打印技术取得显著进展，如图1.4所示，已可以制造立体的模拟生物组织，为我国生物、医学领域尖端科学研究提供了关键的技术支撑。



图1.2 3D打印汽车Urbee2 (Euromold 2011)



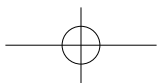
图1.3 中国用3D打印研制舰载机



图1.4 3D打印的肝脏组织细胞

二、3D打印的今生

2013年3月，英国《经济学人》杂志将3D打印技术评为“第三次工业革命最具标志性的生产工具”，声称3D打印技术即将引发新一轮的工业革命浪潮，并认为凡是能接上电源的任何计算机和3D打印机组合在一起都能成为灵巧的生产工厂。在未来的时代，大批3D打印机形成制造网络，并与互联网、物联网和物流网无缝连接，实时地满足人们的各种需求。届时，人类将以新的方式进行生产制造，制造过程与管理模式将发生深刻变革，目前的制造格局必将被打破。



随着3D打印技术的不断发展，越来越多的人加入3D打印产业，不断提升原有技术水平，不断提出新的技术方案，不断掀起行业发展的浪潮。目前3D打印技术正在被运用到越来越多的领域，例如：

- (1) 工业设计：进行产品概念设计、原型制作。
- (2) 航空航天、军工：进行复杂形状、特殊性能的零部件的直接制造。
- (3) 医疗：进行人造骨骼、牙齿磨具、助听器、假肢的直接制造。
- (4) 照相馆：进行彩色人像打印，如图1.5所示。
- (5) 建筑：进行建筑模型的打印，主要应用FDM技术，如图1.6所示。
- (6) 教育：学生打印设计模型、学生学习3D打印课程并DIY组装3D打印机、进行教具的打印、科研应用。
- (7) 艺术设计：进行服装、雕塑等艺术品的设计和打印，如图1.7所示。



图1.5 3D打印彩色人像



图1.6 3D打印技术在建筑设计的应用



图1.7 3D打印技术在时装设计领域的应用

针对以上领域，使用3D打印技术可大幅降低生产成本，缩短加工周期，提高原材料和能源的使用效率，减少对环境的影响，最重要的是使消费者能方便地根据自己的需求量身定制产品。

3D打印技术正在改变着我们的生产方式。从硬件的角度来看，全球3D打印研发水平较为领先的仍为美国、德国、日本等传统工业强国，但我国的研究实力也不容小觑，有部分技术已跻身世界一流水平，这也为技术投入生产打下了非常好的基础。

显然，人们已经从3D打印技术上看到了无限种可能，而“未来3D打印还能做什么”这一问题，也许只有时间能告诉我们答案。





第二章 3D 打印的技术详解

3D 打印的技术工艺包含多个种类,本章将详细介绍 3D 打印技术的基本原理。目前常用的技术工艺主要包括:光固化成形 (SLA)、熔融沉积成形 (FDM)、粉末粘合 (3DP)、选择性激光烧结 (SLS)、分层实体制造 (LOM) 等。下面将一一介绍。

一、光固化成形

光固化成形是最早的 3D 打印技术,主要使用液态的光敏树脂作为材料,这种液态材料在一定波长的紫外光照射下能迅速发生聚合反应,从液态转变为固态。图 2.1 所示为 SLA 技术的原理图,激光器通过扫描系统照射光敏树脂,当一层树脂固化完毕后,可移动平台下移一个层厚的距离,刮板将树脂液面刮平然后再进行下一层的激光扫描固化,循环往复最终得到完整的产品,如图 2.2、图 2.3 所示。

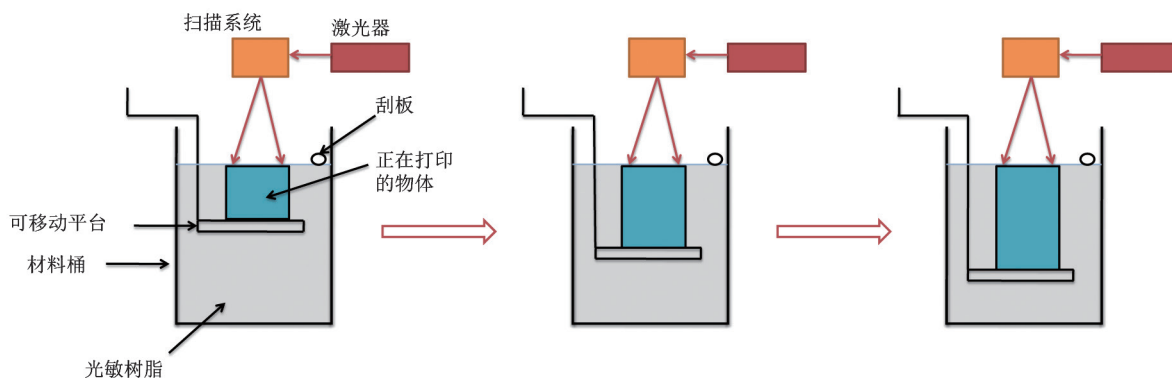


图2.1 光固化成形工艺

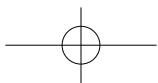


图2.2 SLA技术打印埃菲尔铁塔等



图2.3 SLA技术打印的零件

光固化成形是成形技术中精度最高的,成形速度较快,表面也是最光滑的。但是光固化快速成形技术也有两个不足:首先光敏树脂原料有一定毒性,操作人员使用时需要注意防护;其次强度方面尚不能与真正的制成品相比,一般主要用于原型设计验证方面。SLA 的成形精度虽然高,但成形尺寸也有较大的限制而不适合制作



体积庞大的工件。同时还需要设计工件的支撑结构，以确保在成形过程中制作的每一个结构部位都能可靠定位。此外，SLA 技术的设备成本（低端的几万元，高端的几十万元）、维护成本和材料成本（2000 元 / 千克以上）都远远高于 FDM。

二、熔融沉积成形

熔融沉积成形工艺是普及最广的 3D 打印技术，主要使用 ABS、PLA 等材料，其工作原理是将 ABS、PLA 等材料通过加热熔化，再凝固成形，如图 2.4 所示。材料通过挤出机构被送进热熔喷头，在喷头内被加热融化，喷头根据集成化电路系统，让喷头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动，同时将半熔融状态的材料按软件分层数据控制的路径挤出并沉积在指定的位置凝固成形，并与周围的材料粘结，层层堆积成形。

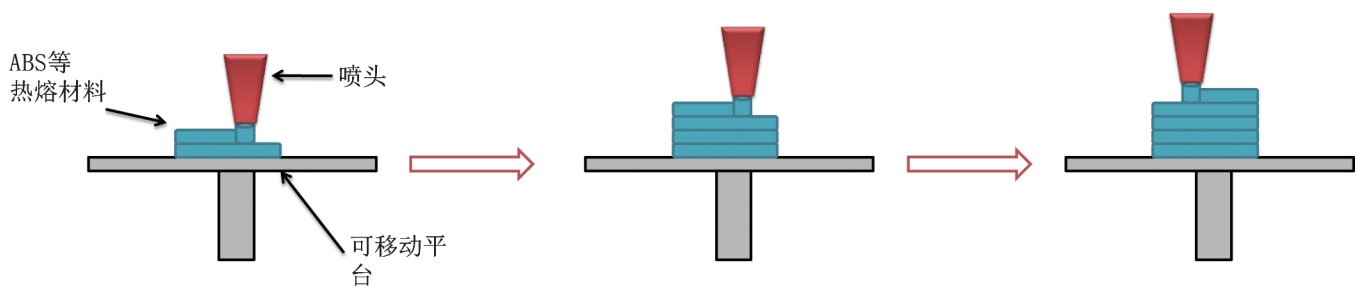


图2.4 熔融沉积成形工艺

在 3D 打印技术中，FDM 的机械结构最简单，设计也最容易，制造成本、维护成本和材料成本也最低，而且操作环境干净安全，可在办公环境下进行，原材料易于搬运和快速更换。因此桌面级 3D 打印机使用最多的技术原理是 FDM。FDM 工艺的成品精度通常为 0.2~0.3mm，高端机型能够达到 0.1mm 精度，较多应用在建筑、艺术、工业设计、玩具等模型制作领域，如图 2.5、图 2.6 所示。

但是 FDM 技术也有不足：① 成形后表面精度有待改进；② 打印速度较慢；③ 需要浪费材料来做支撑。



图2.5 FDM技术打印的机器人



图2.6 FDM技术打印的奖杯

三、粉末粘合

粉末粘合成形工艺（3DP）是实现全彩打印最好的工艺，使用石膏粉末、陶瓷粉末、塑料粉末等作为材料。其原理是，先铺一层粉末，然后使用喷嘴将粘合剂（胶水）喷在需要成形的区域，让材料粉末粘接形成一层截面，然后不断重复铺粉、喷涂、粘接的过程，层层叠加，最终打印出完整的零件，如图 2.7 所示。

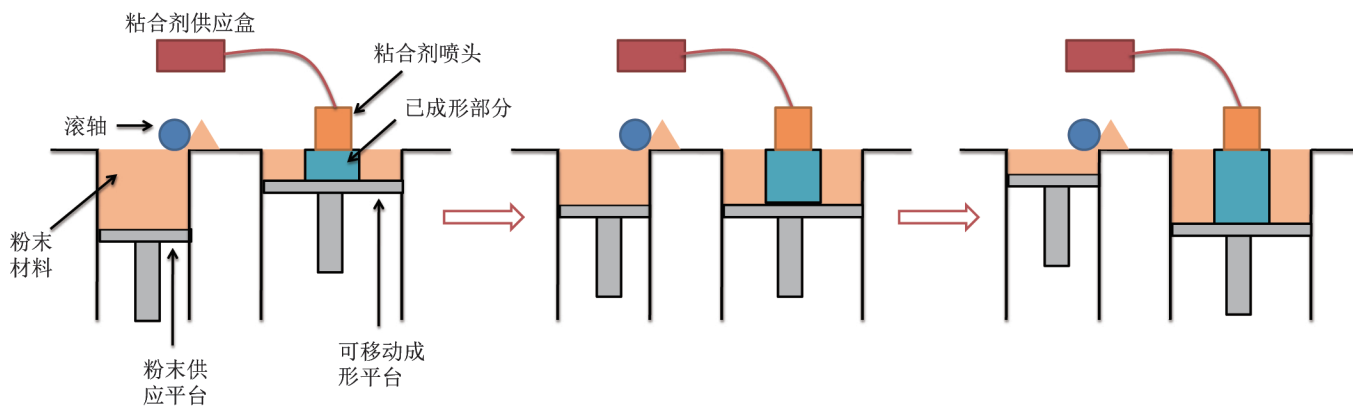


图2.7 粉末粘合成形工艺



图2.8 3DP技术打印的全彩人像



图2.9 3DP技术打印的全彩汽车组件

3DP 技术的优势在于成形速度快、无需支撑结构，而且能打印全彩色产品（胶水的颜色为彩色），如图 2.8、图 2.9 所示，这是其他技术原理都比较难以实现的。

但是 3DP 技术也有不足之处。首先粉末粘接的直接成品强度并不高，只能作为测试原型；其次粉末粘接的工作原理使得其成品表面不如 SLA 产品光洁，精细度也有劣势。此外，制造相关材料粉末的技术比较复杂，成本较高，也是造成 3DP 技术应用不够广泛的原因。

四、选择性激光烧结

选择性激光烧结工艺（SLS）是最高端的 3D 打印技术，简称激光烧结技术，主要以金属粉末等作为材料，其原理是激光烧结粉末材料，使粉末材料结合成形，如图 2.10 所示。SLS 技术同样使用层叠堆积成形原理，不同的是，它首先铺一层粉末材料，将材料预热到接近熔点，再使用激光在该层截面上扫描，使粉末温度升至熔点，然后烧结形成粘接，接着不断重复铺粉、烧结的过程，直至整个模型成形。

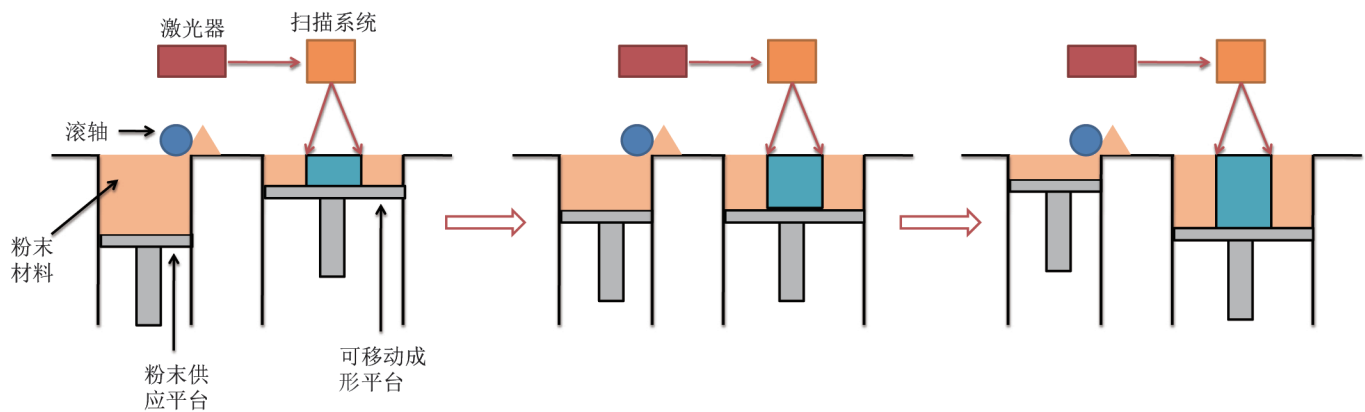


图2.10 选择性激光烧结成形工艺

激光烧结技术可以使用非常多的粉末材料，如石蜡、聚碳酸酯、尼龙、纤细尼龙、合成尼龙、陶瓷甚至还可以是金属，并可以将其制成相应材质的成品。同时，所有没用过的粉末都会成为实物的支撑并在下次打印中循环利用。激光烧结的成品精度高、成形时间短、强度高，但是其最主要的优势还是在于金属成品的制作，如图 2.11、图 2.12 所示。激光烧结可以直接烧结金属零件，也可以间接烧结金属零件，最终成品的强度远远优于其他 3D 打印技术。SLS 技术在精密制造行业的应用前景非常广阔，例如飞机的某些零部件已经逐步使用 3D 打印技术来进行生产。

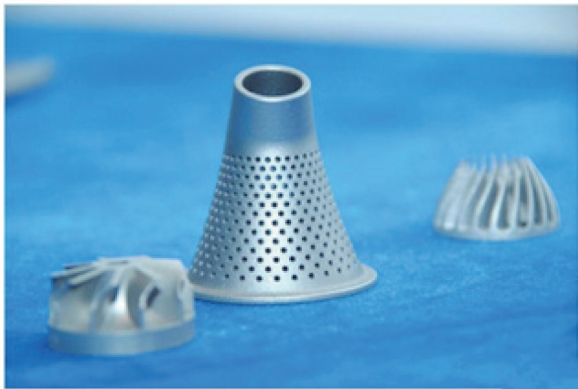


图2.11 SLS技术打印的零件



图2.12 SLS技术打印的手枪

激光烧结技术也同样存在缺陷。首先粉末烧结的表面粗糙，需要后期处理；其次生产过程中需要用到的大功率激光器，除了本身的设备成本（国产低端的几十万元，高端的几百万元），还需要很多辅助保护工艺，整体技术难度较大，制造和维护成本非常高，普通用户无法承受。所以应用范围主要集中在高端制造领域。

五、分层实体制造

分层实体制造工艺（LOM）其实是一种减材制造技术，可以使用的材料有纸材、PVC 薄膜等，其基本原理是使用激光切割系统将背面涂有热熔胶的纸切割出工件的内外轮廓。切割完一层后，送料机构将新的一层纸叠加上去，利用热粘压装置将已切割层粘合在一起，然后再进行切割，这样一层层地切割、粘合，最终成为三维工件。如图 2.13 所示。

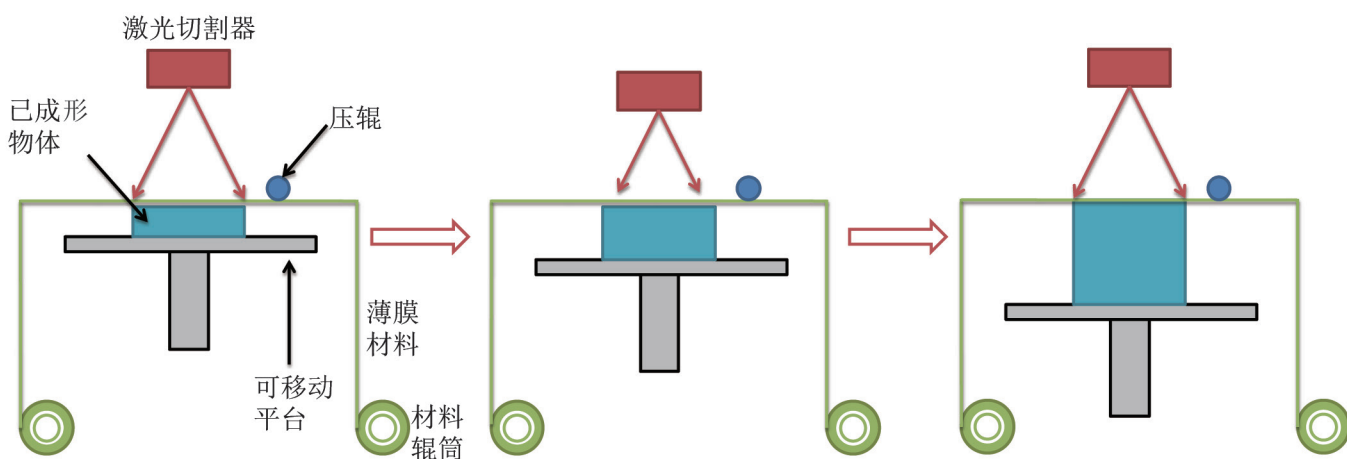


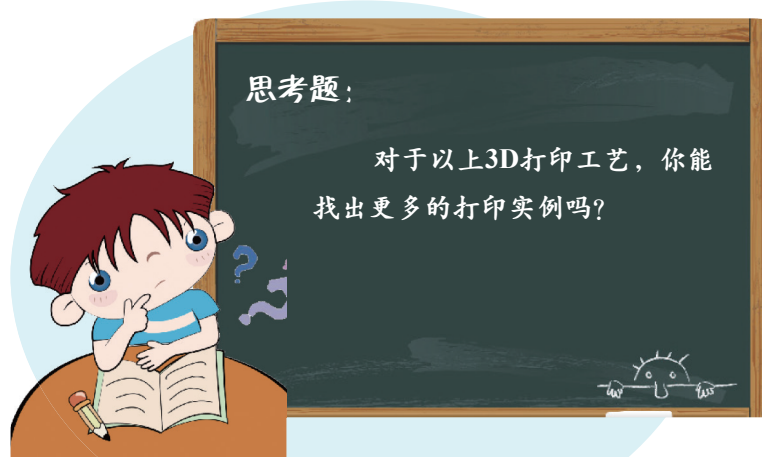
图2.13 分层实体制造工艺

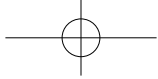
由于分层实体制造多使用纸材、PVC 薄膜等材料，价格低廉且成形精度高，适用于大尺寸工件的成形，成形过程无需设置支撑结构，多余的材料也容易剔除，因此受到了较为广泛的关注，在产品概念设计可视化、造型设计评估、装配检验、熔模铸造等方面应用广泛。

尽管如此，由于 LOM 技术成形材料的利用率不高，材料浪费严重，随着新技术的发展，LOM 工艺将有可能被逐步淘汰。

● 小结

随着时代的进步，各项 3D 打印技术都在不断的改进与发展，未来 3D 打印技术将走进越来越多的人的生活，改变人们的生活方式，让我们共同期待这一天的到来。





第三章 3D 打印机的结构

创想者 3D 打印机属于桌面级 FDM 3D 打印机，机器实物如图 3.1 所示。在本书第二章中已经介绍了该种技术的成形原理。在本章中将结合原理知识，详细介绍创想者 3D 打印机的结构。

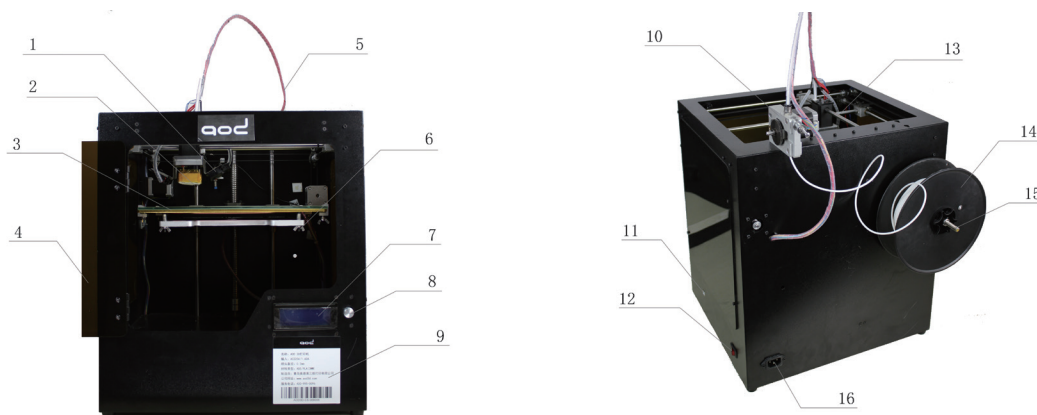


图3.1 创想者3D打印机

- 1- 喷头散热风扇；2- 打印喷头；3- 加热平台；4- 防护门；5- 喷头电子线路及输料管；
6- 加热平台调平旋钮；7- 显示屏；8- 控制旋钮；9- 产品标签；10- 进（退）料机；
11-USB 线接口；12- 稳压电源开关；13- 十字交叉轴；14- 料盘；15- 料盘架；16- 电源线接口

创想者 3D 打印机由钢制框架、打印喷头、送料机构、加热平台、螺纹紧固件、传动系统、控制系统等几部分组成。控制电路读取三维模型数据，并根据模型数据控制步进电机的转动、加热装置的运行。通过步进电机的转动及轴、同步轮、同步带、丝杠的传动，实现喷头在 X 、 Y 平面的运动，加热平台在 Z 方向运动，从而实现喷头相对平台原点的三维运动。同时，在步进电机控制下打印耗材通过送料器，按照一定的速度送入喷头，喷头通过加热将耗材融化、挤出，以完成打印。

一、认识创想者 3D 打印机

1. 钢制框架

钢制框架作为 3D 打印机的支撑主体，起着支撑和固定零部件的作用，其质量决定了机器装配后的使用性能。图 3.2 为创想者 3D 打印机钢制框架的三维模型。

钢框材料为 DCO1 2.0mm 厚钢板，采用激光切割、数控折弯、机器人焊接等加工工艺，经打磨、喷漆防锈工艺处理而成。钢框最主要的定位尺寸集中在固定 X 、 Y 、 Z 轴的孔位上。和普通木质框架相比，钢框具有结构稳定、尺寸精度高、不易损坏等优点。

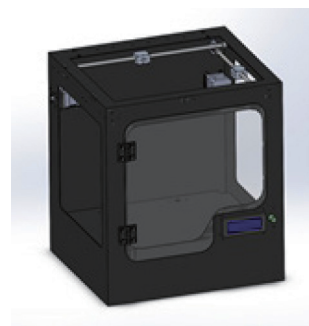


图3.2 钢制框架模型

2. 打印喷头

喷头部分作为 3D 打印机的重要组成部分，具有加热，将耗材融化、挤出等功能。喷头部分由导管固定块、十字滑块、特氟龙夹板、特氟龙垫片、PEEK 固定块、PEEK、喷头固定块、喷头、特氟龙管、加热棒、温度检测棒、风扇组成，其结构示意图如 3.3 所示。

打印机工作时，在电路的控制下，加热棒通过温度检测棒反馈的温度信号对喷头温度进行控制和调节，一般工作温度为 180~220℃，并通过喷头固定块向喷头传输热量。

十字滑块通过十字交叉轴与 X、Y 轴的连接，带动喷头整体运动，实现打印功能。材料在喷头内受热成熔融状态，并从喷嘴连续流出。为保证熔融状态材料流动顺畅，在喷头内插入特氟龙管。为避免环境对喷头温度的影响，常用耐高温胶带、聚四氟乙烯等耐高温材料将喷头固定块抱住，减小热量的散发。由于喷头温度较高，为避免材料在未进入喷头部分时就已融化，使用 PEEK 和特氟龙垫片隔热。

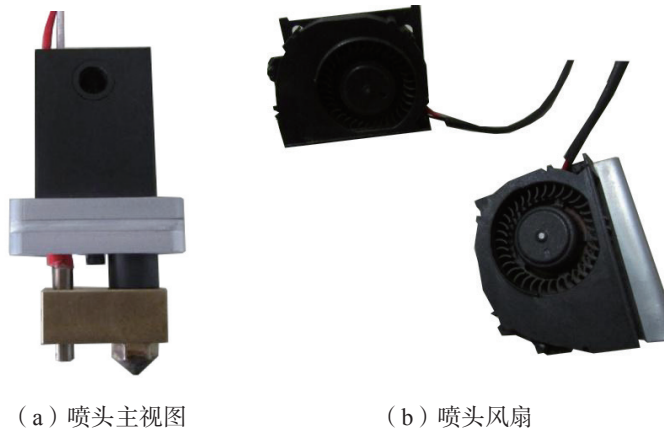


图3.3 打印喷头



图3.4 蛋糕制作过程

3. 送料机构

送料机构通过电机控制齿轮传动，使材料以特定的速度进入喷头。送料结构由固定块、耗材夹紧装置、小齿轮、大齿轮、牙型齿轮组成，如图 3.5 所示。

送料机与喷头之间连接一根尼龙导管，打印原材料在送料机构的驱动下通过导管进入喷头部分。

送料机工作原理是：由电机驱动小齿轮，大齿轮在小齿轮传动下，带动牙型齿轮转动。耗材夹紧装置上带有从动轮，调节卡扣上弹簧的松紧将牙型齿轮与从动轮之间的耗材夹紧。喷头与送料机构使用导管连接。电机转动时，送料机构将耗材连续地送入喷头内。

目前创想者 3D 打印机使用的材料为直径是 3.0mm 的 PLA 线条，一般牙型齿轮与从动轮之间的距离为 2.7~2.8mm，齿轮之间的距离过大或过小，都会对材料的顺利输送带来影响。该 3D 打印机可打印的材料直径为 2.9~3.2mm。随着材料直径的变化，可通过调节卡扣弹簧的松紧，以调节

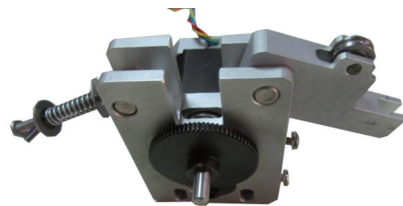


图3.5 送料机构