



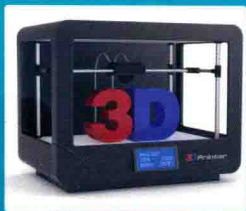
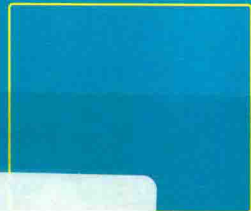
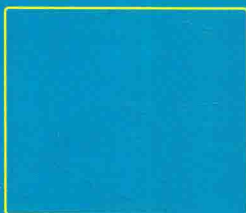
3D 打印

入门及案例详解

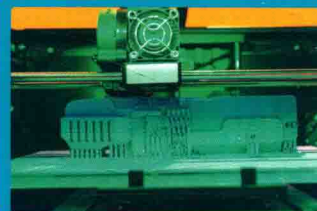
钟平福 编著

3D打印工艺与软件 / 3D打印材料 / 3D设备

丝状3D打印 / 液态3D打印 / 粉末3D打印



3D DAYIN
RUMEN JI
ANLI XIANGJIE



化学工业出版社

3D 打印

入门及案例详解

钟平福 编著



化学工业出版社

中国轻工业出版社分社 · 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

3D 打印入门及案例详解/钟平福编著. —北京: 化学工业出版社, 2019. 4
ISBN 978-7-122-33742-9

I. ①3… II. ①钟… III. ①立体印刷-印刷术-案例
IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 010098 号

责任编辑: 贾 娜
责任校对: 宋 夏

文字编辑: 陈 喆
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 9½ 字数 212 千字 2019 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888

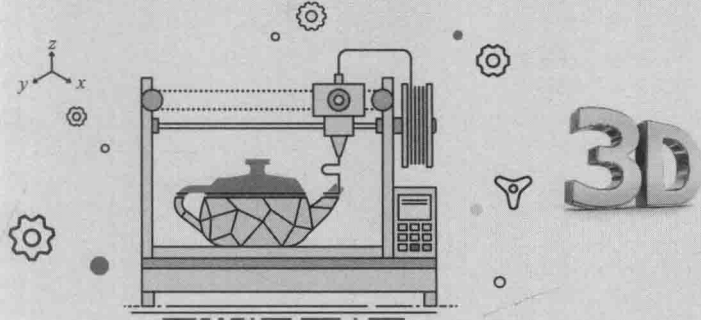
售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 49.80 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

3D 打印技术又称为快速成型技术 (rapid prototyping, RP), 也叫增材制造。3D 打印技术属于机械工程学科特种加工工艺范围, 是一项多学科交叉、多技术集成的先进制造技术。随着国家对 3D 打印技术的重视, 增材制造技术创新体系逐步建立, 具有较强研发和应用能力的增材制造企业开始发展, 并且全国形成了一批研发及产业化示范基地, 我国的 3D 打印产业迎来了快速发展期。为了帮助立志从事 3D 打印相关工作的技术人员尽快了解该技术, 我们编写了本书。

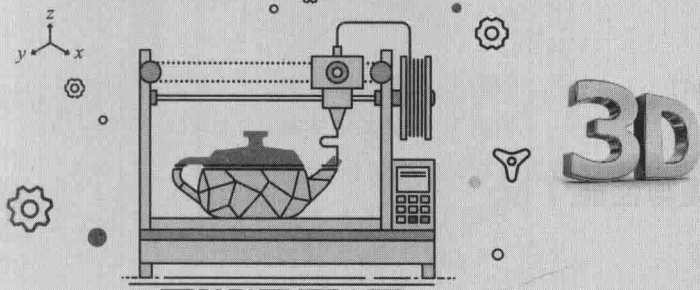
本书紧扣市场需要, 遵循实用、够用的原则, 减少理论性知识, 更多地从实际操作出发, 通过技术理论与实际操作相结合的方式, 更好地帮助读者提升操作技能。全书共 6 章, 第 1 章介绍 3D 打印技术工艺与软件, 第 2 章介绍 3D 打印材料的分类与性能, 第 3 章介绍 3D 设备的组装, 第 4 章介绍丝状 3D 打印设备及应用, 第 5 章介绍液态 3D 打印设备及应用, 第 6 章介绍粉末 3D 打印设备及应用。

讲解实体建模时, 采用了当前主流工程软件 UG NX8.5 软件; 而在讲解打印数据切片处理过程时, 则采用了 3DXpert、Client Manager、UP Studio 等切片软件, 为读者提供更多的软件选择。在快速成型制作过程中, 引入了北京太尔时代科技有限公司的 UP BOX+ 及美国 3D Systems 有限公司的 ProJet[®] MJP 3600 设备及 ProX300 设备。UP BOX+ 采用目前应用最广的 FDM 技术, ProJet[®] MJP 3600 采用目前较先进的多喷头喷射式技术, 而 ProX300 金属成型是 3D Systems 公司目前最大、技术最新的设备。不管是桌面级打印机还是工业级打印机, 本书都对其操作流程、后期处理做了详细介绍, 方便读者全面、快捷地掌握 3D 打印技术, 同时也为读者提供正确的产品制作过程和打印方式。

本书由钟平福编著。本书在编写过程中, 得到了深圳第二高级技工学校领导的大力帮助和支持, 同时也得到了马路科技顾问股份有限公司技术上的帮助和支持, 在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平所限, 书中难免有不妥之处, 恳请广大专家读者批评指正。

编著者



目录

CONTENTS

第 1 章 3D 打印技术工艺与软件 / 001

- 1.1 概述 / 001
- 1.2 快速成型的分类 / 001
- 1.3 光固化快速成型工艺 / 003
 - 1.3.1 光固化快速成型的基本原理和特点 / 003
 - 1.3.2 光固化快速成型的工艺过程 / 004
- 1.4 叠层实体快速成型工艺 / 006
 - 1.4.1 叠层实体制造工艺的基本原理和特点 / 006
 - 1.4.2 叠层实体制造工艺的过程 / 007
- 1.5 选择性激光烧结成型工艺 / 008
 - 1.5.1 选择性激光烧结工艺的基本原理和特点 / 008
 - 1.5.2 选择性激光烧结工艺的过程 / 008
- 1.6 熔融沉积快速成型工艺 / 012
 - 1.6.1 熔融沉积快速成型工艺的基本原理和特点 / 012
 - 1.6.2 熔融沉积快速成型工艺的过程 / 013
- 1.7 其他 3D 工艺 / 016
 - 1.7.1 电子束熔化 / 016
 - 1.7.2 喷射固化成型 / 018
 - 1.7.3 三维喷涂黏结 / 019
- 1.8 软件与数据处理 / 021
 - 1.8.1 3D 软件功能与构成 / 021
 - 1.8.2 3D 软件模型文件 / 023
 - 1.8.3 STL 文件的输出 / 027
- 1.9 Cura 软件的使用 / 029
 - 1.9.1 Cura 软件的安装 / 029
 - 1.9.2 Cura 软件启动的设置 / 030
 - 1.9.3 Cura 软件的应用 / 030
- 1.10 Client Manager 软件简介 / 037
 - 1.10.1 添加打印机 / 037
 - 1.10.2 Client Manager 软件基本操作 / 039

1.11 3DXpert 软件简介 / 041

第 2 章 3D 打印材料的分类与性能 / 043

- 2.1 3D 打印常用材料 / 043
 - 2.1.1 塑料 / 044
 - 2.1.2 3D 打印常用塑料 / 044
- 2.2 金属材料 / 048
 - 2.2.1 有色金属 / 048
 - 2.2.2 黑色金属 / 049
- 2.3 陶瓷材料 / 051
- 2.4 材料的生产方法 / 051
 - 2.4.1 丝材挤出成型 / 051
 - 2.4.2 粉末制造方法 / 052
- 2.5 材料发展趋势 / 053

第 3 章 3D 设备的组装 / 055

- 3.1 3D 打印机系统组成 / 055
- 3.2 3D 打印机的工作环境 / 055
- 3.3 3D 打印机的组装与调试 / 055
 - 3.3.1 3D 打印机械部分组装 / 056
 - 3.3.2 3D 打印电气部分安装 / 067
 - 3.3.3 打印调试 / 068

第 4 章 丝状 3D 打印设备及应用 / 072

- 4.1 丝状材料 / 072
- 4.2 丝状打印设备简介 / 073
 - 4.2.1 认识设备 / 073
 - 4.2.2 平台校正与喷嘴对高 / 075
 - 4.2.3 UP Studio 切片软件界面认识 / 076
- 4.3 上底座建模 / 078
- 4.4 FDM 快速成型制作与后期处理 / 085
 - 4.4.1 模型切片与打印参数设置 / 085
 - 4.4.2 模型拆卸与后期处理 / 087

第 5 章 液态 3D 打印设备及应用 / 091

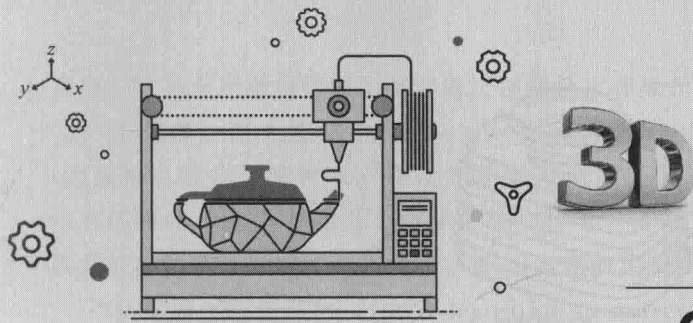
- 5.1 液态材料与应用设备简介 / 091

- 5.1.1 液态材料简介 / 091
- 5.1.2 液态设备简介 / 091
- 5.1.3 Project MJP 3600 打印前期准备 / 097
- 5.2 轮毂建模与 3D 打印 / 098
 - 5.2.1 轮毂建模 / 098
 - 5.2.2 轮毂 3D 打印 / 109
 - 5.2.3 产品后期处理 / 112

第 6 章 粉末 3D 打印设备及应用 / 115

- 6.1 粉末材料与设备 / 115
 - 6.1.1 粉末材料简介 / 115
 - 6.1.2 设备简介 / 117
 - 6.1.3 机器操作界面简介 / 119
- 6.2 齿轮建模与 3D 打印 / 126
 - 6.2.1 齿轮建模 / 126
 - 6.2.2 齿轮金属打印 / 132

参考文献 / 143



第 1 章

3D打印技术 工艺与软件

1.1 概述

3D 打印技术又称快速成型 (rapid prototyping, RP) 技术。3D 打印技术属于机械工程学科特种加工工艺范围, 是一项多学科交叉、多技术集成的先进制造技术。

学科交叉是指机械工程、材料科学与工程、生物医学工程等学科, 技术集成包括计算机、CAD、激光、数控、材料等。快速成型技术是由 CAD 数字模型驱动的通过特定材料采用逐层累积方式制作三维物理模型的先进制造技术。

快速成型技术制作的原型 (模型) 可用于新产品的外观评估、装配检验及功能检验等, 作为样件可直接替代机加工或者其他成型工艺制造的单件或小批量的产品, 也可用于硅橡胶模具的母模和熔模铸造模具的消失型等, 从而批量地翻制塑料及金属零件。

与传统的实现上述用途的方法相比, 其显著优势是: 制造周期大大缩短 (由几周、几个月缩短为若干个小时), 成本大大降低。尤其是衍生出来的后续的基于快速原型的快速模具制造技术进一步发挥了快速成型制造技术的优越性, 可在短期内迅速推出满足用户需求的一定批量的产品, 大幅度降低了新产品开发研制的成本和投资风险, 缩短了新产品研制和投放市场的周期, 在小批量、多品种、改型快的现代制造模式下具有强劲的发展势头。

3D 打印技术的制作过程是与传统的材料去除加工方法截然相反的, 3D 打印是基于三维 CAD 模型数据、通过逐层增加材料的方式, 直接制造与相应 3D 模型数据完全一致的物理实体的制造方法, 如图 1-1 所示。

1.2 快速成型的分类

快速成型技术从广义上讲可以分成两类: 材料累积和材料去除 (DM)。但目前人们谈及的快速成型制造方法通常指的是累积式的成型方法, 而累积式的快速原型制造方法通常是依据原型使用的材料及其构建技术进行分类的, 如图 1-2 所示。

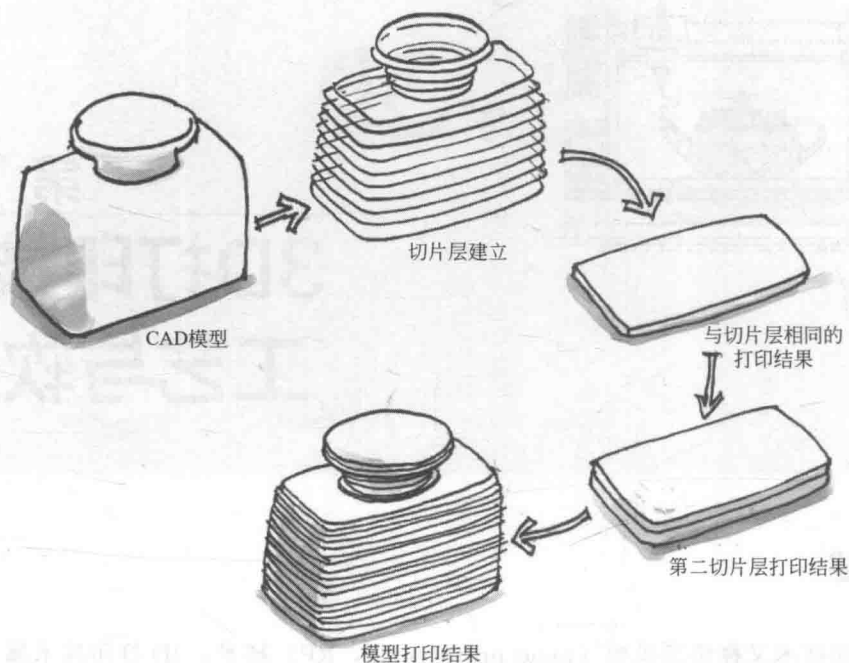


图 1-1 3D 打印过程

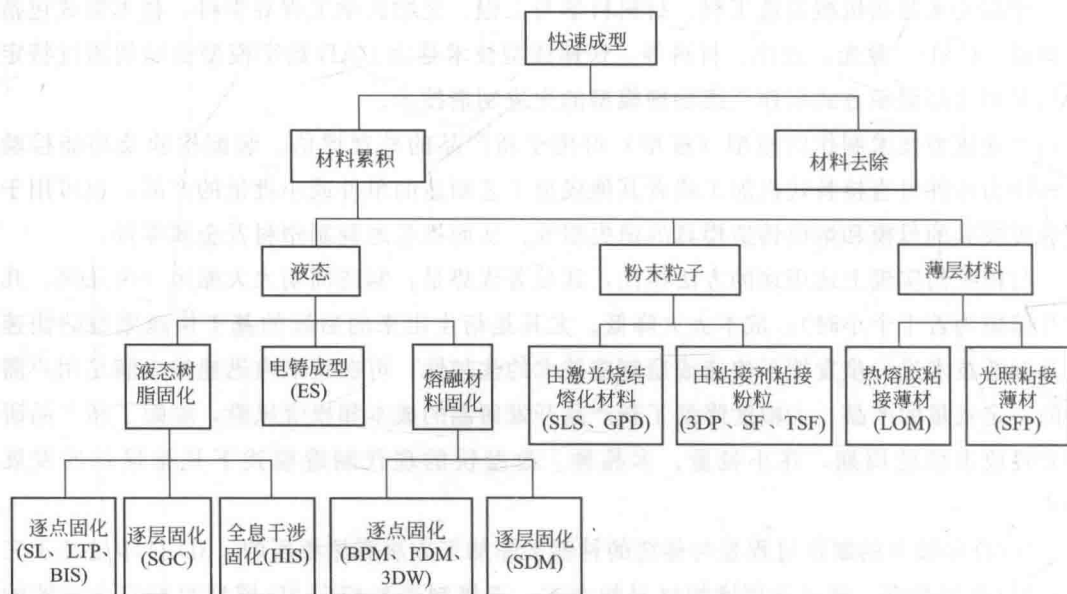


图 1-2 快速成型工艺方法的分类

目前应用比较广泛的方法有以下四种。

① 光固化成型法 (stereo lithography apparatus, SLA)。该工艺由 Charles Hull 于 1984 年获得美国专利, 是最早发展起来的快速成型技术。它是采用光敏树脂材料通过激光照射逐层固化而成型的。

② 叠层实体制造法 (laminated object manufacturing, LOM)。叠层实体制造技术是比较成熟的快速成型制造技术之一。这种制造方法和设备自 1986 年问世以来, 得到迅速

发展。它是采用纸材等薄层材料通过逐层粘接和激光切割而成型的。

③ 选择性激光烧结法 (selective laser sintering, SLS)。SLS 工艺是利用粉末材料 (金属粉末或非金属粉末) 在激光照射下烧结的原理, 在计算机控制下层层堆积成型。SLS 的原理与 SLA 十分相似, 主要区别在于所使用的材料及其形状不同。SLA 所用的材料是液态的紫外光敏可凝固树脂, 而 SLS 则使用粉状的材料。

④ 熔融沉积制造法 (fused deposition manufacturing, FDM)。熔融沉积制造法是继光固化快速成型和叠层实体快速成型工艺后的另一种应用比较广泛的快速成型工艺方法。它是采用熔融材料加热熔化挤压喷射冷却而成型的。

1.3 光固化快速成型工艺

自从 1988 年 3D Systems 公司最早推出 SLA 商品化快速成型机 SLA-250 以来, 光固化快速成型已成为目前世界上研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的快速成型工艺方法。它以光敏树脂为原料, 通过计算机控制紫外激光使其固化成型。这种方法能便捷、全自动地制造出表面质量和尺寸精度较高、几何形状复杂的工件。

1.3.1 光固化快速成型的基本原理和特点

(1) 光固化快速成型的基本原理

光固化快速成型 (SLA) 工艺的成型过程如图 1-3 所示。液槽中盛满液态光敏树脂, 紫外激光器发出的激光束在控制系统的控制下按零件的各分层截面信息在光敏树脂表面进行逐点扫描, 使被扫描区域的树脂薄层发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, 刮板将黏度较大的树脂液面刮平, 然后进行下一层的扫描加工, 新固化的一层牢固地黏结在前一层上, 如此重复直至整个零件制造完毕, 得到一个三维实体物件。

(2) 光固化快速成型的特点

光固化快速成型具有以下优缺点。

- ① 成型过程自动化程度高。SLA 系统非常稳定, 加工开始后, 成型过程可以完全自动化, 直至原型制作完成。
- ② 尺寸精度高。SLA 原型的尺寸精度可以达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- ③ 优良的表面质量。虽然在每层固化时侧面及曲面可能出现台阶, 但是上表面仍可得到玻璃状的效果。
- ④ 能直接制作模型。可以制作结构十分复杂的模型、尺寸比较精细的模型, 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, 制作的原型可以一定程度地替代塑料件。
- ⑤ 制件易裂和变形。成型过程中材料发生物理和化学变化, 塑件较脆, 易断裂性能尚不如常用的工业塑料。
- ⑥ 设备运转及维护成本较高。液态树脂材料和激光器的价格较高。
- ⑦ 使用的材料较少, 有局限性。目前可用的材料主要为感光性的液态树脂材料。液

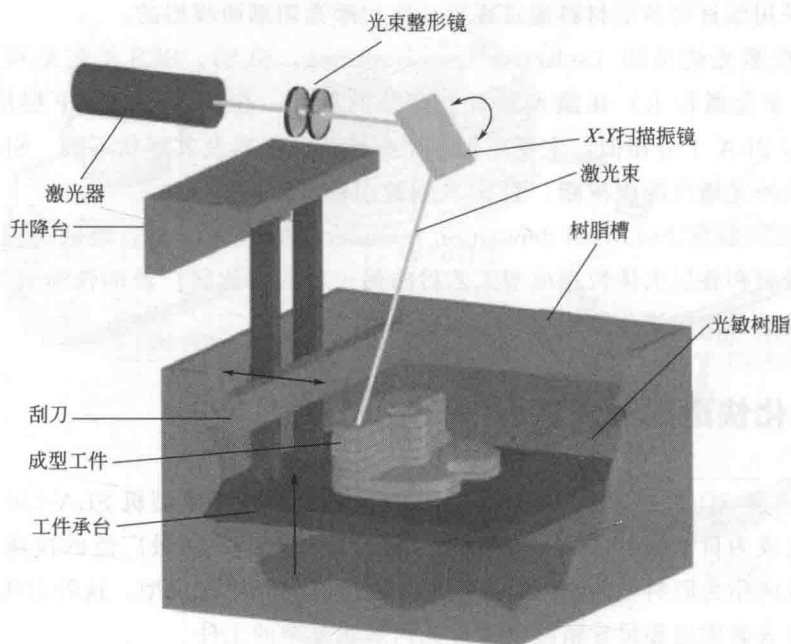


图 1-3 光固化快速成型工艺的成型过程

态树脂有气味和毒性，并且需要避光保护，以防止提前发生聚合反应，选择时有局限性。

⑧ 需要二次固化。经快速成型系统光固化后的原型树脂并未完全被激光固化，需要二次固化。

1.3.2 光固化快速成型的工艺过程

光固化快速原型的制作一般可以分为前处理、原型制作和后处理三个阶段。

(1) 前处理

前处理阶段主要是对原型的 CAD 模型进行数据转换、摆放方位确定、施加支撑和切片分层，实际上就是为原型的制作准备数据，如图 1-4 所示。

(2) 原型制作

光固化成型过程是在专用的光固化快速成型设备系统上进行的。在原型制作前，需要提前启动光固化快速成型设备系统，使树脂材料的温度达到预设的合理温度，激光器点燃后也需要一定的稳定时间。设备运转正常后，启动原型制作控制软件，读入前处理生成的层片数据文件。

在模型制作之前，要注意调整工作台网板的零位与树脂液面的位置关系，以确保支撑与工作台网板的稳固连接。当一切准备就绪后，就可以启动叠层制作了。整个叠层的光固化过程都是在软件系统的控制下自动完成的，所有叠层制作完毕后系统自动停止。

(3) 后处理

在快速成型系统中原型叠层制作完毕后，需要进行剥离等后续处理工作，以便去除废料和支撑结构等。对于光固化成型方法成型的原型，还需要进行固化后处理等，下面以某一 SLA 原型为例给出其后续处理的步骤和过程，如图 1-5 所示。



图 1-4 光固化快速原型前处理

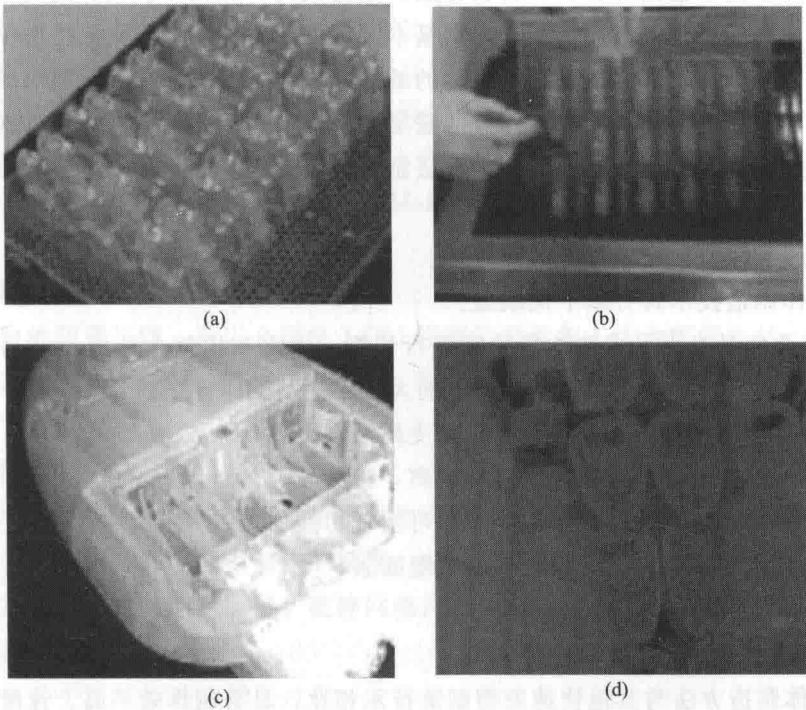


图 1-5 后处理流程

图 1-5(a) 原型叠层制作结束后, 工作台升出液面, 停留 5~10min, 以晾干多余的树脂。图 1-5(b) 将原型和工作台一起斜放晾干后浸入丙酮、酒精等清洗液体中, 搅动并刷掉残留的气泡, 持续 45min 左右后放入水池中清洗工作台约 5min。图 1-5(c) 是指从外向内从工作台上取下原型, 并去除支撑结构。图 1-5(d) 是对成型后的产品清洗后置于紫外烘箱中进行整体固化。

1.4 叠层实体快速成型工艺

叠层实体制造技术 (laminated object manufacturing, LOM) 由美国 Helisys 公司于 1986 年研发成功, LOM 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 激光束在刚粘接的新层上切割出零件截面轮廓和工件外框。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。如此反复直至零件的所有截面粘接、切割完。最后, 去除多余部分, 得到分层制造的实体零件。叠层实体制造技术多使用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、快速制模母模以及直接制模等方面。

1.4.1 叠层实体制造工艺的基本原理和特点

(1) 叠层实体制造工艺的基本原理

叠层实体制造工艺由计算机、材料存储及送进机构、热粘压机构、激光切割系统、可升降工作台、数控系统和机架等组成。其基本原理如图 1-6 所示, 首先在工作台上制作基底, 工作台下落, 送纸滚筒送进一个步距的纸材, 工作台回升, 热压滚筒滚压背面涂有热熔胶的纸材, 将当前叠层与原来制作好的叠层或基底粘贴在一起, 切片软件根据模型当前层面的轮廓控制激光器进行层面切割, 逐层制作, 当全部叠层制作完毕后, 再将多余废料去除。

(2) 叠层实体快速成型技术的特点

叠层实体制造技术具有以下优缺点。

① 只需要使激光束沿着物体的轮廓进行切割、无需扫描整个断面。它是一个高速的快速原型工艺, 常用于加工内部结构简单的大型零件及实体件。

② 无需后固化处理, 无需设计和制作支撑结构。

③ 设备可靠性好, 寿命长, 废料易剥离, 精度高。

④ 操作方便, 热物性与力学性能好, 可实现切削加工。

⑤ 不能直接制作塑料工件, 工件易吸湿膨胀。

⑥ 工件的抗拉强度和弹性不够好。

⑦ 工件表面有台阶纹, 需打磨。

叠层实体制造方法与其他快速原型制造技术相比, 具有制作效率高、速度快、成本低等优点, 在我国具有广阔的应用前景。

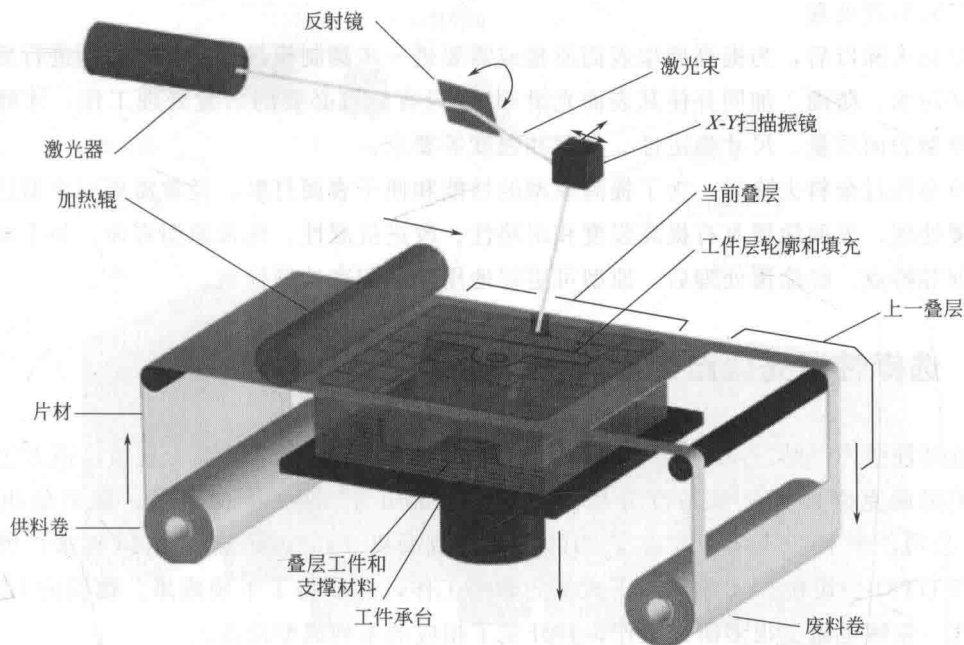


图 1-6 叠层实体制造技术的原理简图

1.4.2 叠层实体制造工艺的过程

叠层实体制造工艺的全过程可以归纳为前处理、分层叠加成型、后处理 3 个主要步骤。具体地说，叠层实体制造工艺过程大致如下。

(1) 图形处理阶段

制造一个产品，首先可通过三维造型软件（如 NX、SolidWorks、Pro/E、Catia、中望 3D 等）进行产品的三维模型构造，然后将得到的三维模型进行图形的转档，转换成 STL 格式的文档，接着将 STL 格式的模型导入到专用的切片软件（如华中科大的 HRP 软件、中国科学院广州电子技术研究所的 3D Maker、Ultimaker 公司 Cura 软件等）中进行切片。

(2) 基底制作

由于工作台的频繁起降，所以必须将 LOM 原型的叠件与工作台牢固连接，这就需要制作基底，通常设置 3~5 层的叠层作为基底。为了使基底更牢固，可以在制作基底前给工作台预热。

(3) 原型制作

制作完基底后，快速成型机就可以根据事先设定好的加工工艺参数自动完成原型的加工制作，而工艺参数的选择与原型制作的精度、速度以及质量有关，其中重要的参数有激光切割速度、加热辊温度、激光能量、破碎网格尺寸等。

(4) 余料去除

余料去除是一个极其烦琐的辅助过程。它需要工作人员仔细、耐心，并且最重要的是要熟悉制件的原型，这样在剥离过程中才不会损坏原型。



(5) 后置处理

余料去除以后,为提高原型表面质量或需要进一步翻制模具,则需对原型进行后置处理(如防水、防潮、加同并使其表面光滑等),只有经过必要的后置处理工作,才能满足快速原型表面质量、尺寸稳定性、精度和强度等要求。

原型经过余料去除后,为了提高原型的性能和便于表面打磨,经常需要对原型进行表面涂覆处理,表面涂覆具有提高强度和耐热性、改进抗湿性、延长原型寿命、易于表面打磨处理等特点。经涂覆处理后,原型可更好地用于装配和功能检验。

1.5 选择性激光烧结成型工艺

选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)又称为选区激光烧结,该方法最初是由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的C. R. Dechard于1989年提出的,随后他组建了DTM公司,于1992年开发了基于SLS的商业成型机(sinterstation)。20年来,奥斯汀分校和DTM公司在SLS领域做了大量的研究工作,并取得了丰硕成果。德国的EOS公司在这一领域也做了很多研究工作,并开发了相应的系列成型设备。

1.5.1 选择性激光烧结工艺的基本原理和特点

(1) 选择性激光烧结工艺的基本原理

选择性激光烧结工艺的基本原理如图1-7所示。其加工过程是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结点的某一温度,控制系统控制激光束按照该层的截面轮廓在粉层上扫描,使粉末的温度升至融化点进行烧结,并与下面已成型的部分实现粘接。当一层截面烧结完后,工作台下降一个层的厚度,铺料辊又上面铺上一层均匀密实的粉末,进行新一层截面的烧结,如此反复直至完成整个模型。在成型过程中,未经烧结的粉末对模型的空腔和悬臂部分起着支撑作用,不必像SLA和FDM工艺需要生成支撑工艺结构。

(2) 选择性激光烧结工艺的特点

选择性激光烧结工艺具有以下优缺点。

- ① 制造工艺比较简单,可直接制作金属制品。
- ② 可采用多种材料,材料利用率高。
- ③ 无需支撑材料。
- ④ 烧结过程中挥发异味,原型表面粗糙。
- ⑤ 有时需要比较复杂的辅助工艺。

1.5.2 选择性激光烧结工艺的过程

选择性激光烧结工艺使用的材料一般有石蜡、高分子、金属、陶瓷粉末和它们的复合粉末材料。材料不同,其具体的烧结工艺也有所不同,具体工艺流程如图1-8所示。

(1) 图形处理与分层切片处理

CAD模型的建立:通过三维CAD设计软件(如NX、SolidWorks、Pro/E、Catia、

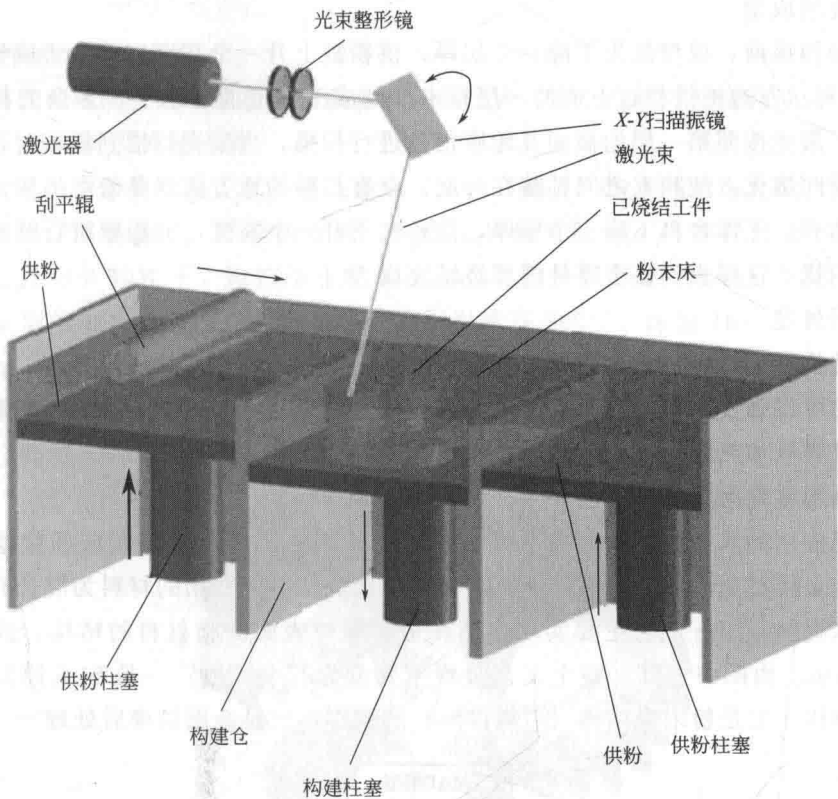


图 1-7 选择性激光烧结工艺的基本原理

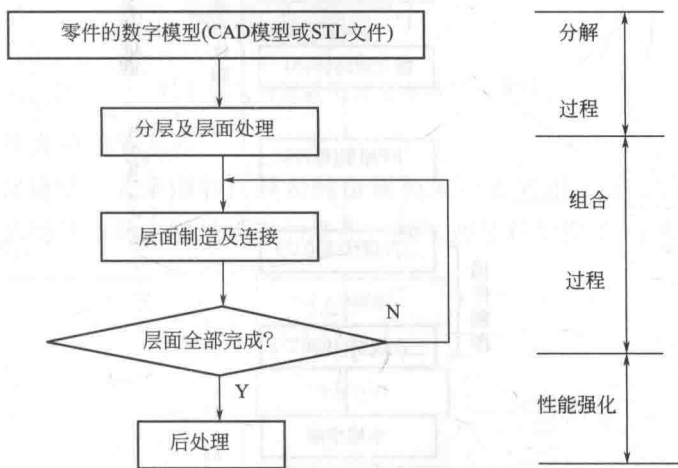


图 1-8 选择性激光烧结工艺流程

中望 3D 等) 进行产品的三维模型构造, 然后将得到的三维模型进行图形的转档, 转换成 STL 格式的文档, 接着将 STL 格式的模型导入到专用的切片软件 (如华中科大的 HRP 软件、中国科学院广州电子技术研究所的 3D Maker、Ultimaker 公司 Cura 软件等) 中进行切片。一般的分层是按 Z 方向进行分层处理的, 形成一层层的截面和轮廓信息, 最后把这些信息转化成激光的扫描轨迹。



(2) 烧结成型

在开始扫描前，成型缸先下降一个层厚，供粉缸上升一个高度（略大于成型缸下降距离），铺粉辊从左边把供粉缸上面的一层粉末推到成型缸上面并铺平，多余的粉末落入粉末回收槽。激光按照第一层的截面及轮廓信息进行扫描，当激光扫描到粉末时，粉末在高温状态下瞬间熔化，使相互之间粘接在一起，没有扫描的地方依然是松散的粉末。当完成第一层烧结后，工作台再下降一个层厚，供粉缸上升一个高度，铺粉辊进行铺粉，激光进行第二层扫描，这样直到整个零件模型烧结完成。

(3) 后处理

当零件烧结完成后，升起成型缸取出零件，用气枪清理表面的残余粉末。一般通过激光烧结后的零件强度比较低，而且是疏松多孔的，根据不同的需要可以进行不同后处理，常用的后处理有加热固化、热等静压、渗蜡等。

(4) 金属零件间接烧结工艺

在广泛应用的几种快速成型技术方法中，只有 SLS 工艺可以直接或间接地烧结金属粉末来制作金属材质的原型或零件。金属零件间接烧结工艺使用的材料为混合有树脂材料的金属粉末材料，SLS 工艺主要实现包裹在金属粉粒表面树脂材料的粘接。其工艺过程如图 1-9 所示。由图中可知，整个工艺过程主要分为三个阶段：一是 SLS 原型件（“绿件”）的制作，二是粉末烧结件（“褐件”）的制作，三是金属熔渗处理后。

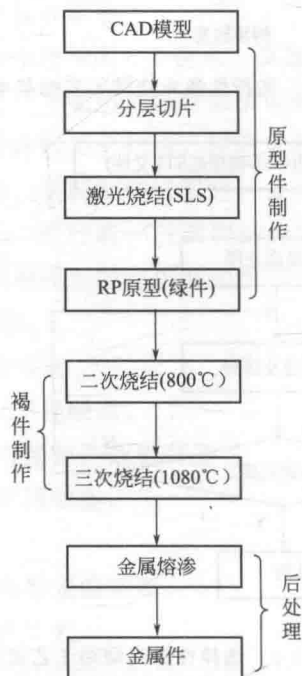


图 1-9 SLS 工艺金属零件间接制造工艺流程

(5) 金属零件间接烧结工艺过程中的关键技术

① 原型件制作关键技术

选用合理的粉末配比：环氧树脂与金属粉末的比例一般控制在 1:5~1:3 之间。

加工工艺参数匹配：粉末材料的物性、扫描间隔、扫描层厚、激光功率以及扫描速