

高等职业教育智能制造系列精品教材

# 3D 打印技术及应用

主 编 王姗姗 李子峰  
副主编 白 洁 徐秀英 谢传正



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内 容 简 介

本书共4章,内容包括3D打印技术基础、3D打印设备基础、3D打印处理基础、3D打印应用基础。

本书可作为高等职业学校增材制造技术、机械设计与制造、模具设计与制造、工业设计等专业的教材,也可供相关技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

策划编辑:张云鹏 责任编辑:高宇 封面设计:刘文东

---

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:三河市骏杰印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:295千字

版 次:2023年 月第1版

印 次:2023年 月第1次印刷

---

ISBN 978-7-5635-7023-2

定 价:45.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

服务电话:400-615-1233



# 前言

## PREFACE

3D 打印技术是信息业与制造业深度融合的典型示例。近年来,3D 打印技术不断成熟,其产业潜力快速释放,已经逐渐渗透到生活中的各行各业,“3D 打印+”模式正在为教育、医疗、食品、工业等越来越多的产业发展助力赋能,3D 打印技术正在被大家更广泛地认识、了解并应用。“3D 打印技术及应用”是高等职业学校增材制造技术、机械设计与制造、模具设计与制造、工业设计等专业的基础课程,它与后续核心课程有着紧密的联系,是一门实用性很强的认知类课程。

通过本课程的学习,学生能了解包括 3D 打印技术原理、工艺、材料、设备、前后处理、工业应用等相关基础知识,以及相应的操作技能。本书贯彻了“寓德于技”的基本理念,切实落实了“实用、够用”的指导思想,紧密联系生产实际,融通“1+X”证书认证要求,体现科学性、实用性和先进性。本书具有以下特点。

(1) 本书梳理了主流 3D 打印技术及应用的相关知识点、技能点,整合了包括 3D 打印技术基础、3D 打印设备基础、3D 打印处理基础和 3D 打印应用基础在内的四个部分,分设不同的学习内容,从旁征博引、知识储备、思维拓展等维度进行细分,融合课程思政元素,结合技术技能发展,由浅入深,理实一体,让学习者在使用过程中可以通过启发、了解、学习、发散的认知规律逐步掌握知识点,同时附加任务导学单和学习报告单,调动学习者自主学习的积极性,提高学习成果的可评价性。

(2) 本书在纸质教材的基础上增加数字化资源和网络学习平台,使纸质教材和数字化资源一体化,形成“纸质图书+数字课程+移动设备客户端数字教材”的新形态,将大大提升学生的学习兴趣,方便学生随时随地进行学习。

本书由长春职业技术学院王珊珊、黑龙江职业学院李子峰担任主编,唐山工业职业技术学院白洁、鄂尔多斯职业学院徐秀英、温州职业技术学院谢传正担任副主编,长春职业技术学院于洋、崔迪、刘宁参与编写。具体编写分工如下:王珊珊负责第一章、第四章第一节与第二节的

编写,李子峰负责第三章的编写,白洁负责第二章第一节的编写,徐秀英负责第二章第二节的编写,谢传正负责第二章第三节的编写,于洋负责第四章第三节与第三章数字化资源的编写,崔迪负责第一章数字化资源的编写,刘宁负责第四章数字化资源的编写。

在本书的编写过程中,得到北京了易博三维科技有限公司宋磊、梁磊的大力支持,他们提供了很多 3D 打印案例及技术资料;得到了北京德荟智能科技有限公司马洪伟、李旭鹏、赵庆鑫的鼎力帮助,他们协同完成了数字化资源制作,在此表示衷心的感谢。同时,编者在编写过程中查阅了大量相关资料,在此向参考文献的各位作者一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请读者给予批评指正。

编 者



# 目 录

## CONTENTS

<b>第一章 3D 打印技术基础</b> .....	<b>1</b>
第一节 3D 打印概述 .....	2
第二节 3D 打印的材料与优势 .....	24
第三节 3D 打印常见成型特点及应用 .....	38
<b>第二章 3D 打印设备基础</b> .....	<b>55</b>
第一节 熔融沉积成型(FDM)设备 .....	56
第二节 LCD 光固化设备 .....	79
第三节 激光选区熔化(SLM)设备 .....	103
<b>第三章 3D 打印处理基础</b> .....	<b>134</b>
第一节 3D 打印前处理 .....	135
第二节 3D 打印后处理 .....	156
<b>第四章 3D 打印应用基础</b> .....	<b>173</b>
第一节 3D 打印应用于工业领域 .....	174
第二节 3D 打印应用于文化创意与生物医疗领域 .....	182
第三节 3D 打印应用案例 .....	191
<b>参考文献</b> .....	<b>222</b>



# 第一章

## 3D 打印技术基础

### 学习导语

3D 打印是服务制造业新产品开发的关键技术,对产品创新及提高产品竞争力有着积极的推动作用,它已经越来越深刻地影响着我们的生活,接下来,你准备好开启奇幻的 3D 打印之旅了吗?(见图 1-1)

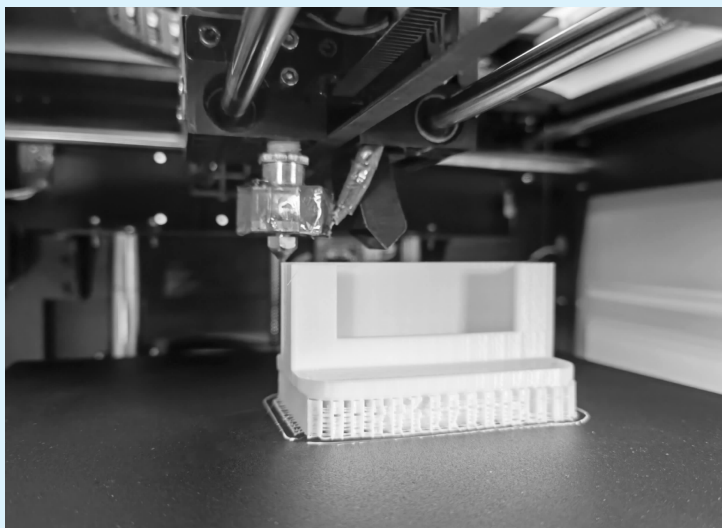


图 1-1 工作中的 3D 打印机

## 第一节 3D 打印概述

### 任务导学单

学习任务	学习目标	学习内容		考核指标	
		知 识	技 能		
1	3D 打印的概念	掌握 3D 打印的概念与应用领域	3D 打印与传统减材制造的优、缺点对比	能对给定零件准确判断选择制造工艺	完成学习后能阐述 3D 打印的概念
2	3D 打印的原理与分类	掌握 3D 打印的原理与常见工艺方法	3D 打印的原理及常见工艺方法的特点	能分析各种 3D 打印工艺方法的优、缺点	完成学习后能描述至少 4 种 3D 打印工艺方法
3	3D 打印的起源	了解 3D 打印发明人的故事	3D 打印的起源及国内外代表人物事迹	拓展并丰富学生的 3D 打印技术知识框架	完成学习后了解至少 3 位国内 3D 打印行业领军人物
4	3D 打印的发展趋势	了解 3D 打印技术带来的生产生活模式变革	3D 打印技术的发展阶段, 以及其给生产生活带来的变革	能阐述 3D 打印技术发展面临的机遇和挑战	完成学习后能描述 3D 打印发展展望

### 一、3D 打印的概念

#### 旁征博引

《道德经》提到：“合抱之木，生于毫末；九层之台，起于累土；千里之行，始于足下。”意思是说合抱的大树，生长于细小的萌芽；九层的高台，筑起于每堆泥土；千里的远行，是从脚下第一步开始走出来的。这个描述和本章即将开始学习的 3D 打印的原理刚好吻合。3D 打印就是从“微小毫末处”开始，通过不断的积累堆叠，形成最终的特征。从这句话学习者可以了解到我国古代先贤对事物发展规律的观察总结凝练提升的能力，更进一步领会国学蕴藏的智慧与内涵。



## 知识储备

增材制造(additive manufacturing, AM)是 20 世纪 80 年代中期发展起来的高新技术,定义为“利用三维模型数据从连续的材料中获得实体的过程”;快速成型(rapid prototyping, RP)是基于一种离散后又进行堆积的快速成型思想,将复杂产品的三维加工首先离散成许多具有相同层厚的二维层片,然后进行逐点、逐线、逐面的堆积成型。通常情况下所说的增材制造技术、快速成型技术都指代 3D 打印技术。

3D 打印技术是一种以数字模型为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过逐层打印的方式来构造三维实体的技术。过去其常在模具制造、工业设计等领域被用于制造模型,现正逐渐用于一些产品的直接制造。

或许你没见过 3D 打印,但是你一定见过一层一层垒砌的砖墙(见图 1-2),以及一层一层的蛋糕(见图 1-3)。



图 1-2 一层一层垒砌的砖墙



图 1-3 一层一层的蛋糕

3D 打印就是将三维模型通过切片软件处理成二维层片,然后通过 3D 打印设备用可黏合材料将这些二维层片一层一层连续地打印出来,形成一个完整的三维实体的过程。

3D 打印有很显著的优势,它能够创建任何复杂的几何形状,这与传统机械加工(减材)工艺形成鲜明对比。3D 打印不需要工装夹具和刀具就能够制造传统机床无法加工的复杂形状或不可见区域等,同时还能缩短设计验证时间,从而降低成本,为设计师在实现复杂几何形状方面提供了极大的自由发挥空间。

在传统机械加工制造中,需要基于国家标准的一般尺寸公差和加工余量来保证零件的加工质量,而 3D 打印是与原始数模相比,尺寸精度(打印公差)决定了最终的成型模型,具有较高的形状精度,但就目前技术而言尺寸精度较差。

受传统加工工艺限制,很多产品需要由多个零部件组装而成,如果采用 3D 打印技术,那么理论上可以直接打印具有任何复杂轮廓或结构的产品,所以说 3D 打印技术更适合具有复杂几何形状零件的单件或小批量生产。同时,如图 1-4(a)所示,传统机械加工,也就是减材制造,在零件生产过程中,会产生大量切屑、边角余料等废料,造成材料的浪费。而通

过 3D 打印技术制作的零件,因为是材料叠层堆积成型的,如图 1-4(b)所示,打印过程中支撑结构和粉末回收会产生少量废料,材料利用率还是很高的。

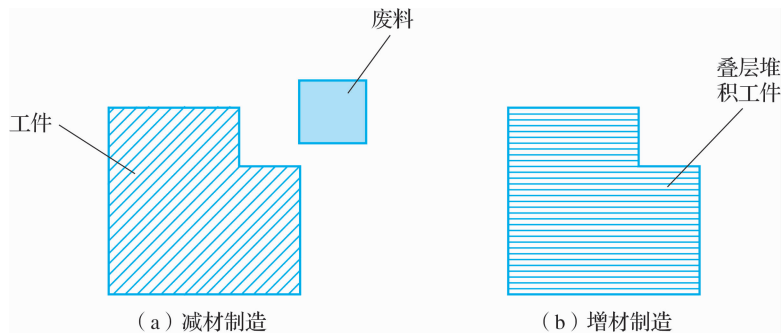


图 1-4 材料利用率对比

课堂讨论

试着总结增材制造和减材制造分别适合什么样的模型。

思维拓展

我们会遇到各种各样的产品和零件,可以采用各种加工方式完成加工,那么如何判断零件采用何种加工方式呢?让我们一起来分析对比一下 3D 打印技术与传统减材制造技术的优、缺点(见表 1-1)。

表 1-1 增、减材制造对比分析

对比指标	增材制造	减材制造
产品批量性	单件或小批量	大批量
零件复杂性	理论上可制造任意复杂形状的零件	受刀具或模具限制,无法制造太复杂的曲面或异形深孔等
材料利用率	利用率高,基本无浪费	产生切屑,利用率低
加工工具	光束、热束	切削刀具

学习报告单	
专业：_____ 学号：_____ 姓名：_____	
Q1	<p>按照自己的理解阐述 3D 打印技术的概念。</p> <p>答：_____</p>
Q2	<p>按照自己的理解描述什么样的零件适合采用 3D 打印技术加工。</p> <p>答：_____</p>
<p>学习随记</p> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/> <hr/>	

## 二、3D 打印的原理与分类

### 旁征博引

美国《时代》周刊将增材制造列为“美国十大增长最快的工业”，英国《经济学人》杂志认为增材制造将与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命。而且 3D 打印技术在军工领域大有作为。因为军事人员必须始终处于准备状态，装备的便携性和续航能力是重要考核指标。例如，作战时飞机可能无法始终在指定的机场降落，所以增加临时机场是必要的，而快速铺设跑道垫就非常重要了，而利用 3D 打印技术制造的跑道垫(见图 1-5)可在 60 天内支持 5 000 次着陆和起飞操作。



图 1-5 铺设利用 3D 打印技术制造的跑道垫

### 知识储备

3D 打印技术是集 CAD 技术、数控技术、材料科学、机械工程、电子技术、激光技术等于一体的综合技术，是实现零件或产品从二维到三维实体快速制造的一体化成型技术，属于添加成型，是一种增材制造技术。这种新技术随着发明者和制造工艺特点的不同而产生了许多名称，如自由成型制造(FFF)、实体自由成型制造(SFF)、直接 CAD 制造(DCM)、分层制造(LM)、添加制造(AM)、材料添加制造(MIM)、即时制造(IM)等。它在成型工艺上突破了传统的成型方法，通过快速自动的成型系统与计算机三维数据模型有机结合，无须任何附加的模具或机械加工，就能快速制造出各种形状复杂的原型或零件，可以使生产周期大大缩短，生产成本大幅降低。

## 1. 3D 打印的原理

3D 打印机与普通打印机的工作原理基本相同,只是打印材料不同。3D 打印机内装有金属、陶瓷、塑料、砂等不同的打印材料,是实实在在的原材料,通过计算机控制可以把打印材料一层层叠加起来,最终把计算机上的蓝图变成实物。通俗地说,3D 打印机是可以打印出真实的 3D 物体的一种设备,如打印机器人、玩具车、各种模型甚至食物等。之所以通俗地称其为“打印机”,是因为 3D 打印机参照了普通打印机的技术原理,分层加工的过程与喷墨打印十分相似。3D 打印的原理被称为“离散-堆积(数据的离散和材料的堆积)”的原理。通过离散可以获得堆积的顺序和方式,通过堆积可以将材料构成三维实体。通俗地说,3D 打印就是利用三维 CAD 数据,通过打 3D 印机,将一层层的材料堆积成实体原型,如图 1-6 所示。

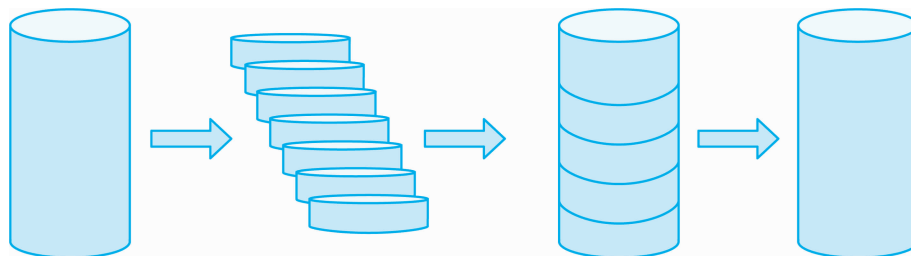


图 1-6 3D 打印原理示意图

## 2. 3D 打印的常见工艺方法

### 1) 熔融沉积成型技术

熔融沉积成型又称熔丝沉积成型(fused deposition modeling, FDM)是采用热熔材料,利用具有加热功能的喷头装置,使熔融状态的 ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)、PLA(聚乳酸)等丝状材料按模型分层数据控制的路径挤出,并在指定位置逐层沉积和凝固成型,最终形成完整的模型,如图 1-7 所示。

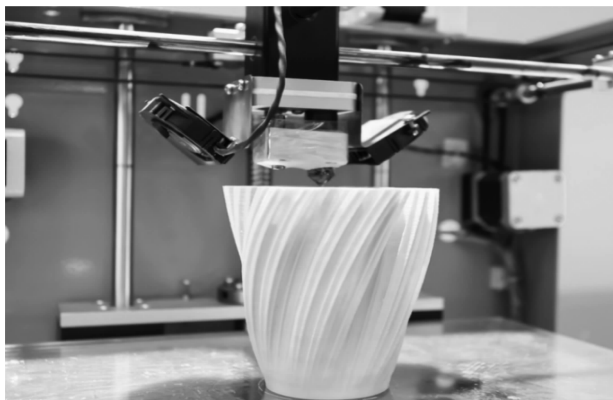


图 1-7 熔融沉积成型打印零件

## 2) 光固化成型技术

光固化成型(stereo lithography apparatus, SLA)是以光敏树脂为原料,在计算机控制下,紫外激光光束按照分层截面的二维轮廓轨迹进行逐点扫描,被扫描区域内的光敏树脂薄层在激光照射下产生光聚合反应后固化,形成一个层面。每固化一个层面,工作台向下移动一个层厚,在刚刚固化的树脂表面再铺上一层新的光敏树脂,开始新一轮的扫描固化,新固化的薄层牢固地黏结在前一层上。如此往复循环,层层堆积,完成整个产品的三维成型,如图 1-8 所示。



图 1-8 光固化成型零件

## 3) 分层实体制造技术

分层实体制造(laminated object manufacturing, LOM)是采用激光器和加热辊,按照二维分层模型数据,采用激光束将单面涂有热熔胶的纸、塑料带、金属带等切割为成品模型的内、外轮廓,同时加热含有热熔胶的纸等材料,使刚刚切好的一层和下面的已切割层黏在一起,如此循环,逐层反复切割和黏合,最终叠加成整个产品原型,可用于快速制造新产品样件、模型或铸造用木模,如图 1-9 所示。

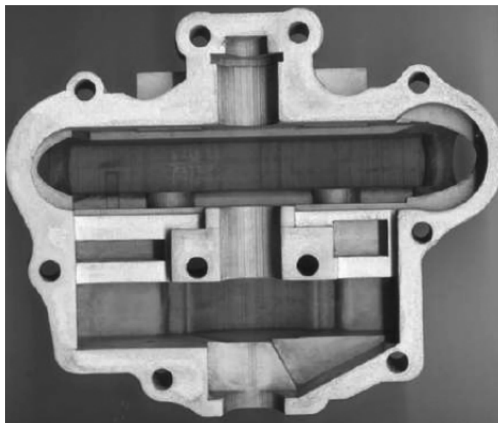


图 1-9 分层实体制造零件

#### 4) 激光烧结技术

激光选区烧结(selective laser sintering, SLS)是按照计算机输出的产品模型的分层轮廓,采用激光束按照指定路径在选择区域内扫描和熔融工作台上均匀铺好的材料粉末,处于扫描区域内的粉末被激光束熔融后形成一层烧结层,逐层烧结后,再去掉多余的粉末,获得产品原型。SLS 技术可以成型复杂结构,包括镂空结构、空心结构,其材料利用率高,未使用过的粉末还可以继续利用,但粉末烧结的表面粗糙,需后续处理,如图 1-10 所示。

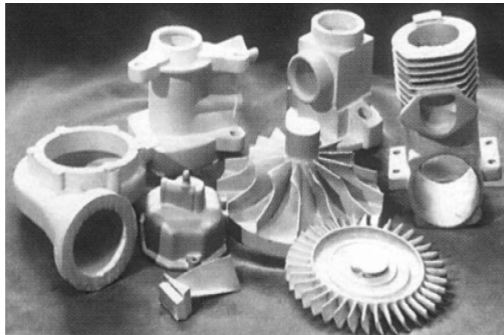


图 1-10 激光选区烧结零件

#### 5) 三维打印技术

三维打印(3 dimensional printing, 3DP)原理与喷墨打印机打印的原理相似,先在工作空间中均匀铺粉,再利用喷头按照系统指定的轮廓路径将液态的黏结剂喷涂在指定区域上,黏结剂固化后,除去多余的粉尘材料,得到所需原型,如图 1-11 所示。三维打印完成后,主要通过静置、强制固化、去粉、包覆等后续处理步骤来达到加强成型强度及延长保存时间的目的。后续处理时零件产生的收缩、变形甚至微裂纹均会影响最后零件的精度,所以三维打印后处理的关键技术是控制零件产生的收缩和变形。



图 1-11 三维打印零件

#### 6) 激光选区熔化技术

激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术是金属增材制造技术的一种,其成型的零件如图 1-12 所示。通常,SLM 和直接金属激光烧结(direct metal laser sintering, DMLS)可以互换使用,但是,这两种技术略有不同,SLM 技术熔化纯金属,而 DMLS 技术

熔化金属合金。SLM 技术的工作原理与 SLS 技术相似,主要区别在于所用原料或粉末的类型不同,SLS 主要使用尼龙(PA)聚合物材料,而 SLM 专门使用金属材料。

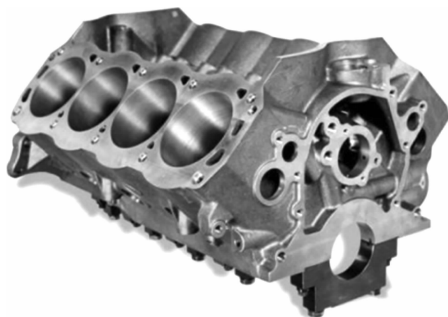


图 1-12 激光选区熔化零件

SLM 和 SLS 之间还有一个很大的区别。由于工艺本身的限制和材料的质量要求,SLM 成型需要在零件的任何悬垂特征部位都添加上支撑结构,而 SLS 成型周围的粉末材料可以提供足够的支撑,从而可以实现自由形状和特征的无支撑成型。

#### 7) 电子束熔炼技术

电子束熔炼(electron beam melting,EBM)技术的制作过程需要在真空环境中进行,这样一方面可以防止电子散射,另一方面还可以防止金属氧化。电子束的能量转换效率极高,远远超过激光,因此成型速度更快,它能够熔化熔点在 3 000 °C 以上的金属,扫描速度快,且无须热处理。

#### 8) 激光近净成型技术

激光近净成型(laser engineered net shaping,LENS)技术能够实现梯度材料、复杂曲面修复,在大型器件的修复上正不断地发挥作用,是连接传统制造与 3D 打印的桥梁。LENS 技术主要应用于航空航天、汽车、船舶等领域,可以实现金属零件的无模制造,节约成本,缩短生产周期。

激光近净成型又称激光熔化沉积(laser melting deposition,LMD),美国密歇根大学称其为直接金属沉积(direct metal deposition,DMD),英国伯明翰大学称其为直接激光成型(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型(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直接能量沉积制造(direct energy deposition,DED)技术的一部分。

在 LENS 技术制造过程中,计算机首先将三维 CAD 模型按照一定的厚度切片分层,每层的二维平面数据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,使之按照由点到线、由线到面的顺序凝固,从而完成一个层面的打印工作,如图 1-13 所示。这样层层叠加,制造出近净成型的零部件实体。LENS 技术主要用于打印比较成熟的金属合金粉末材料,包括不锈钢、钛合金、镍基合金等。

LENS 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



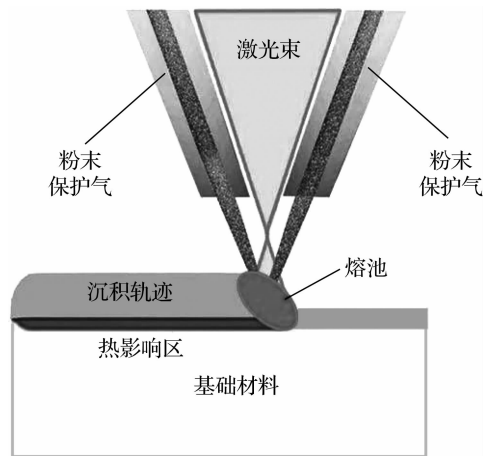


图 1-13 激光净近成型原理示意图

量大、刀具磨损严重等一系列问题。LENS 技术是无须后处理的金属直接成型方法，成型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、成型过程中热应力大、成型件容易开裂、成型件的精度较低等，可能会影响零件的质量和力学性能。由于受到激光光斑大小和工作台运动精度等因素的限制，直接制造的功能件的尺寸精度和表面质量较差，往往需要后续的机加工才能满足使用要求。

#### 9) 数字化光照加工技术

数字化光照加工(digital lighting processing, DLP)是光固化成型(SLA)的一种，打印材料也是光敏树脂，与 SLA 不同的是，DLP 能一次成型一个层面，而 SLA 只能逐点、逐线、逐面地进行固化，如图 1-14 所示。两者之间还有一个本质区别：SLA 采用的成型介质是激光，而 DLP 采用的成型介质是卤素灯泡、LED、紫外光源等。DLP 技术制造精度高，制件表面质量好，更适合尺寸小、成本高的应用环境，目前多数被应用于珠宝首饰、动漫手办等领域。

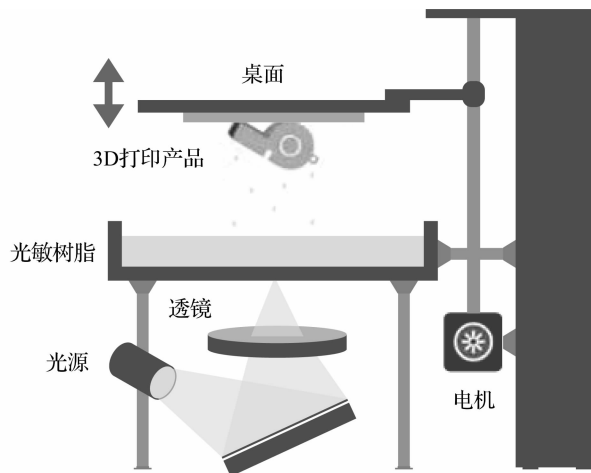


图 1-14 数字化光照加工原理示意

 思维拓展

不同形式的 3D 打印技术的原理大致相似,工艺过程都包括前处理、成型、后处理三个阶段,具体过程如下。

### 1. 产品三维数字模型的构建

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### 2. 三角网格的近似处理

构成产品的数模表面往往有一些不规则的自由曲面,加工前要对模型进行三角网格的近似处理。

### 3. 三维模型的切片处理

根据需要选择合适的加工方向,在成型高度方向上用一定间隔的平面切割近似后的模型,提取出二维截面的轮廓信息。

### 4. 叠层成型制造

根据二维切片轮廓信息,在成型系统中,打印头按照各截面轮廓信息做二维扫描运动,同时工作台做纵向运动,从而在工作台上一层层地堆积材料,同时将各层黏结起来,最终得到产品原型。

### 5. 后处理

后处理是从成型系统中取出原型件,进行工件的剥离、后固化、修补、打磨、抛光、涂挂等处理,降低其表面粗糙度,或放入高温炉进行烧结,进一步提高其强度。

学习报告单	
专业：_____ 学号：_____ 姓名：_____	
Q1	按照自己的理解描述 3D 打印技术的原理。
	答：
Q2	请试着绘制 3D 打印制作的工艺流程图。
	答：
学习随记	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	
_____	

### 三、3D 打印的起源

#### 旁征博引

3D 打印技术的核心思想起源于美国。1892 年, J. E. Blather 在其专利中曾建议用分层制造法构成地形图(见图 1-15)。1940 年, Perera 提出了在硬纸板上切割轮廓线, 然后将这些纸板黏结成三维地形图的方法。

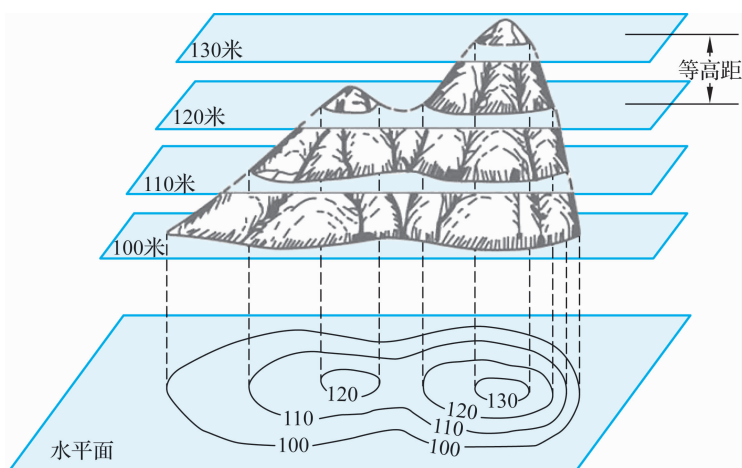


图 1-15 等高线地形图

#### 知识储备

从产品的有模制造到无模制造, 3D 打印技术为制造业带来革命性的变革, 因此被认为是制造领域的一项重大成果。

虽然 3D 打印技术起源很早, 但是受限于当时的材料技术与计算机技术等, 并没有实现广泛应用与商业化。3D 打印技术的正式研究开始于 20 世纪 70 年代, 直到 20 世纪 80 年代才得以实现。

2014 年, 美国南加州大学“轮廓工艺”3D 打印技术项目实现了 24 h 内就可以打印出大约 232 m<sup>2</sup> 的两层楼房, 如图 1-16 所示; 全球首款 3D 食物打印机 Foodini 能“打印”出巧克力、面包棍、馄饨、蛋糕、披萨饼、意大利面等松软食物, 如图 1-17 所示。

关于 3D 打印技术的发展历程, 我们要从 19 世纪说起。3D 打印技术的核心思想起源于 19 世纪的照相雕塑技术和地貌成型技术。按照时间节点简述发展历程如下。

1892 年, Blather 首次在公开场合提出使用层叠成型方法制作地形图的构想。

1940 年, Perera 提出沿等高线轮廓切割硬纸板层叠制作三维地形图的方法。

1972 年, Matsubara 在纸板层叠技术基础上首先提出可以尝试使用光固化材料。

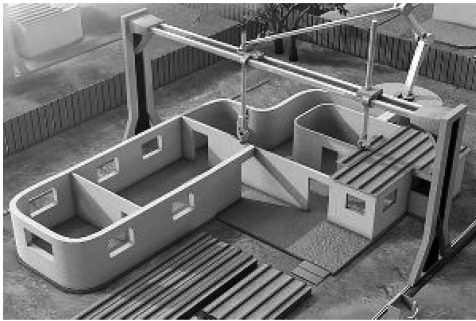


图 1-16 轮廓打印机

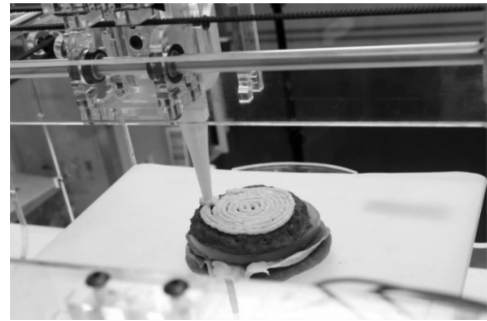


图 1-17 食物打印机

1977 年,Swainson 提出可以通过激光选择性照射光敏聚合物的方法直接制造立体模型。

1979 年,日本东京大学的 Nakagawa 教授开始使用薄膜技术制作实用的工具。

1981 年,Hideo Kodama 首次提出功能感光聚合物快速成型系统的设计方案。

1982 年,Charles W. Hull 试图将光学技术应用于快速成型领域。

1986 年,Charles W. Hull 成立了 3D Systems 公司,研发了著名的 STL 文件格式。

1988 年,3D Systems 公司推出了世界上第一台基于 SLA 技术的商用 3D 打印机 SLA-250。

1988 年,Scott Crump 发明了熔融沉积成型技术并成立了 Stratasys 公司。

1989 年,C. R. Dechard 发明了激光选区烧结工艺,让 3D 打印生产走向多元化。

1992 年,Stratasys 公司推出第一台 FDM 设备,标志着 FDM 技术步入商用阶段。

1993 年,美国麻省理工学院的 Emanuel Sachs 教授发明了三维打印技术。

1995 年,快速成型技术被列为我国未来十年十大模具工业发展方向之一。

1996 年,快速成型技术有了更加通俗的称谓——3D 打印。

2002 年,Stratasys 公司推出 Dimension 系列桌面级 3D 打印机。

2005 年,世界上第一台高精度彩色 3D 打印机让 3D 打印走进彩色时代。

2007 年,3D 打印服务创业公司 Shapeways 正式成立,建立 3D 打印设计在线交易平台,为用户提供个性化的 3D 打印服务,深化了社会化制造模式。

2008 年,第一款开源的桌面级 3D 打印机 RepRap 发布,为新一轮的 3D 打印浪潮翻起了暗涌。

2009 年,Bre Pettis 带领团队创立了著名的桌面级 3D 打印机公司,3D 打印技术在成型精度、打印尺寸等指标上都有长足的进步。

2012 年,英国著名经济学杂志《经济学人》一篇关于第三次工业革命的封面文章全面地掀起了新一轮的 3D 打印浪潮。

2012 年 9 月,3D 打印的两家领先企业美国的 Stratasys 和以色列的 Objet 宣布进行合并,交易额为 14 亿美元,合并后的公司名称仍为 Stratasys,进一步确立了 Stratasys 在高速发展的 3D 打印及数字制造业中的领导地位。

2012年10月,来自麻省理工学院媒体实验室(Media Lab)的团队成立 Formlabs 公司,发布了世界上第一台廉价的高精度 SLA 消费级桌面 3D 打印机 Form 1,此后国内的生产商也开始了基于 SLA 技术的桌面级 3D 打印机研发。

2012年,国内由亚洲制造业协会联合华中科技大学、北京航空航天大学、清华大学等权威科研机构和 3D 行业领先企业共同发起的中国 3D 打印技术产业联盟正式宣告成立。

2013年,《环球科学》杂志一月刊邀请科学家经过数轮讨论评选出 2012 年最值得铭记的对人类社会产生深远影响的十大新闻,其中 3D 打印位列第九。

## 思维拓展

### 1. 3D 打印的发明人——查尔斯·胡尔

查尔斯·胡尔(Charles W. Hull)1939年出生于美国科罗拉多州的克里夫顿市,他于1961年从科罗拉多大学获得工程物理学学士学位。

1983年,胡尔在紫外线设备生产商 UVP 公司担任副总裁,这家公司利用紫外光来硬化家具和纸制品表面的涂层。胡尔每天在公司里拨弄着各种各样的紫外线灯,看到那些原本是液态的树脂一碰到紫外线就凝固的过程。某一天他突然意识到,如果能够让紫外线一层一层地扫在光敏聚合物的表面,使其一层一层地变成固体,将这成百上千的薄层叠加在一起,就能制造任何可以想象的三维物体了。在美国,个人工作期间发明的专利最终属于公司所有,但是胡尔的老板没有更多的能力来支持开发这门新技术。于是,胡尔从 UVP 公司离开,于1986年在加利福尼亚州成立了 3D Systems 公司(现今全球最大的两家 3D 打印设备生产商之一),致力于将 SLA 技术商业化。1988年,3D Systems 公司生产出第一台自主研发的 3D 打印机 SLA-250,采用的材料是光学照相用的丙烯酸树脂。SLA-250 的面世成为 3D 打印技术发展史上的一个里程碑事件,其设计思想和风格几乎影响了后续所有的 3D 打印设备。但受限于当时的工艺条件,其体型十分庞大,有效打印空间却非常狭窄。

### 2. 3D 打印的发明人——斯科特·克伦普

斯科特·克伦普(Scott Crump)1954年出生于美国康涅狄格州,拥有华盛顿州立大学机械工程学士学位和加州大学洛杉矶分校的硕士学位,是美国 Stratasys 公司的创始人、FDM 技术的发明者。克伦普曾在美国国家制造科学中心(NCMS)的董事会任职,并多次在机械工程教育领域的活动中发表演讲。1982年,作为联合创始人之一的克伦普创立了 IDEA 公司,并担任该公司的销售副总裁,一直到1988年。IDEA 公司是一家压力传感器的领先制造商,后来更名为 SI Technologies 公司。

1988年的一天,克伦普决定亲手为女儿做一只玩具青蛙,这对学过机械工程、做过焊接工作的他来说并不是难事。他把聚乙烯和石蜡混合物装进喷胶枪,通过一层一层堆叠做出青蛙形状。由此得到启发,于是克伦普有了更远大的目标,那就是让工程师能够通过 CAD 文件数据直接创建真实物体。随后在妻子的鼓励下,他花费 1 万美元购买了一台数

字制图设备,待在工作室里潜心研发。经过一年时间的研究,他发明了 FDM 技术,获得了 FDM 技术的专利。这项技术几十年后成为消费级桌面 3D 打印机的核心技术,是 3D 打印技术发展的里程碑。作为 FDM 的发明人,他与妻子丽萨·克伦普(Lisa Crump)于 1989 年联合创立了 Stratasys 公司。

### 3. 3D 打印的发明人——伊曼纽·萨克斯

伊曼纽·萨克斯(Emanuel Sachs)1954 年出生于美国纽约,麻省理工学院教授,美国替代能源的主要研发者,3DP 技术的发明者,被誉为 3D 打印与光伏产业的先驱。1975 年,萨克斯获得了麻省理工学院机械工程学士学位,随后在第二年获得机械工程硕士学位。1977—1979 年,他加入了美孚泰科(Mobil Tyco)太阳能公司,从事新型温度测量法和炉膛相关技术的研究。1983 年,他获得了麻省理工学院机械工程博士学位。

1988—2002 年,萨克斯致力于 3D 打印领域的研究。1993 年,他与同事研发了 3DP 技术。3DP 技术与 SLS 技术相似,使用粉末材料,但不用激光来熔化烧结,而是利用黏合剂将金属、陶瓷等粉末黏结在一起成型。萨克斯在 3D 打印领域获得了 40 多项专利,并开创了一个全新的产业。如今 3DP 技术可选择的成型材料种类很多,主要有塑料粉末、金属粉末、石膏粉末、淀粉粉末等,此外还包括各种填充和复合材料、陶瓷及陶瓷金属的混合物和其他新型材料。3DP 技术还能实现 24 位全彩打印,这也是该技术最具竞争力的特点之一。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 公司收购。Z Corporation 于 2005 年基于 3DP 技术推出世界第一台彩色 3D 打印机 Spectrum Z510,标志着 3D 打印从单色开始迈向多色时代。

### 4. 3D 打印的发明人——卡尔·德卡德

卡尔·德卡德(Carl Deckard)出生于 1961 年,拥有美国德克萨斯大学机械系的博士学位,是 SLS 技术的发明人。德卡德的父母都拥有博士学位,他从小就受到了良好的家庭教育。因为对科学发明具有浓厚的兴趣,他大学时选择了机械工程专业。在暑期实习期间,他开始考虑一种新的方法,利用激光将零件形状的粉末熔在一起,一层接一层地制作零件,从而直接制造零件。1984 年,他决定在 UT 攻读硕士学位。他找了几位教授,最终找到了年轻的机械工程助理教授乔·比曼博士,比曼支持德卡德的想法,并同意指导他的研究生学习。他们共同开发了 SLS 技术,这是最早也是应用最持久的增材制造技术之一。1986 年 5 月,德卡德获得了硕士学位,在比曼的指导下继续攻读博士学位,并获得了美国国家科学基金会(NSF)30 000 美元的资助。同年 10 月,德卡德提交了 SLS 技术专利后,受到不少投资人的青睐。工程院助理院长 Paul McClure 博士和企业家 Harold Blair 会见了德卡德,提出把这项专利实现商业化的构想。之后他们共同成立了全球首家激光选区烧结公司 Nova Automation。1987 年,德卡德成功研发出了一台名为 Besty 的激光选区烧结 3D 打印机,并凭借这项机器的发明于 1988 年获得了博士学位。

1989 年,Nova Automation 公司正式更名为 Desk Top Manufacturing(DTM)公司。

2001年,3D Systems公司以4500万美元的估值收购了该公司。德卡德于2019年12月23日去世。除了最初的SLS专利之外,他还拥有27项专利,并被《财富》杂志评选为五位现代技术先驱之一,被*Industry Week*引入制造名人堂,并被美国制造工程师协会任命为制造硕士。

## 5. 国内3D打印行业领军人物

从2011年开始,国内3D打印行业爆发式发展。其中,清华大学、北京航空航天大学、华中科技大学、西安交通大学、西北工业大学等高校是国内3D打印技术的重要科研基地。国内3D打印行业领军人物如图1-18所示。

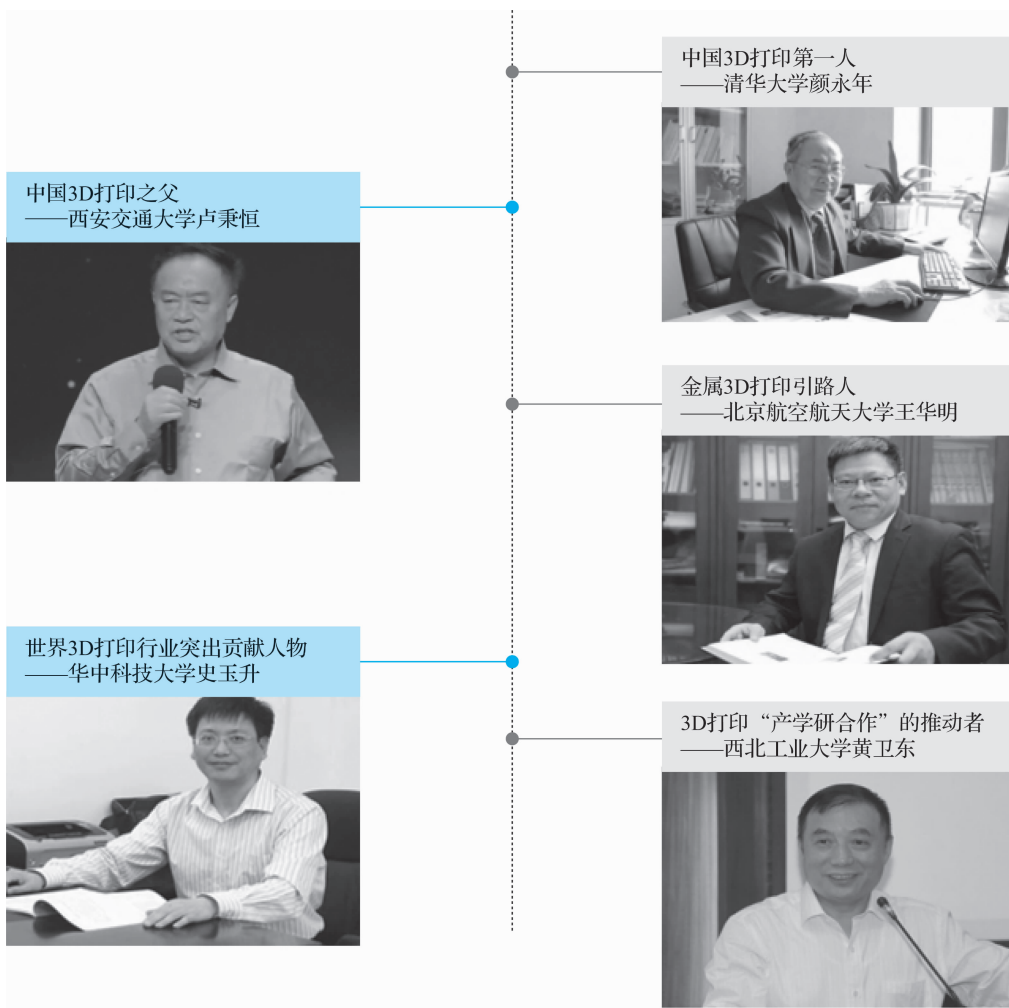


图 1-18 国内 3D 打印行业领军人物





## 四、3D 打印的发展趋势

### 旁征博引

中国 3D 打印技术联盟是全球首家 3D 打印产业联盟,标志着我国从事 3D 打印技术的科研机构和企业从此改变了“单打独斗”的不利局面,有利于尽快建立行业标准,集中展示我国 3D 打印技术的良好形象,也便于加强与政府间或国际间的广泛交流。

2016 年 10 月 19 日,中国增材制造产业联盟成立大会在北京举行。工业和信息化部总工程师张峰出席大会并讲话。原航空航天工业部部长林宗棠、中国工程院院士卢秉恒以及增材制造产业领域的 200 余名代表参加了大会。中国增材制造产业联盟的成立初步建立了产业支撑体系,推进了我国增材制造产业的发展。

### 知识储备

西安交通大学卢秉恒院士将 3D 打印技术的发展分为三个阶段,分别是创形、创材、创生。康奈尔大学 Hold Lipson 教授在《3D 打印颠覆狂潮》中将 3D 打印技术的发展分为三个阶段:第一阶段,自由创造新形状;第二阶段,3D 打印创造新的材料;第三阶段,3D 打印创造新的活性物质和有源系统。

当前新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,新技术突破加速带动产业变革,对世界经济结构和产业竞争格局必将产生重大影响。世界许多国家高度重视增材制造发展,将其作为实现智能制造、推动生产方式变革、抢占先进制造业竞争制高点的重要内容。我国正处于结构调整、动能转换的关键时期,加快增材制造产业的创新发展,将有力促进制造业供给侧结构性改革,为我国经济发展注入新动能。

3D 打印的发展趋势如下。

#### 1. 设备向大型化发展

纵观航空航天、汽车制造及核电制造等工业领域,对钛合金、高强钢、高温合金及铝合金等大尺寸复杂精密构件的制造提出了更高的要求。现有的金属 3D 打印设备成型空间难以满足大尺寸复杂精密工业产品的制造需求,这在某种程度上制约了 3D 打印技术的应用范围。因此,开发大幅面金属 3D 打印设备将成为一个发展方向。

#### 2. 材料向多元化发展

3D 打印材料的单一性在某种程度上制约了 3D 打印技术的发展。以金属 3D 打印为例,能够实现打印的材料仅为不锈钢、高温合金、钛合金、模具钢及铝合金等几种常规的材料。3D 打印仍然需要不断开发新材料,使 3D 打印材料向多元化发展,并能够建立相应的材料供应体系,这将极大地拓宽 3D 打印技术的应用场合。

### 3. 从地面到太空

NASA 是美国政府机构中较早研究使用 3D 打印技术的部门,其已利用 3D 打印技术生产了用于执行载人火星任务的太空探索飞行器(SEV)的零部件,并且探讨在该飞行器上搭载小型 3D 打印设备,实现“太空制造”。“太空制造”是 NASA 在 3D 打印技术方向的重点投资领域。为实现“太空制造”,美国已在太空环境的 3D 打印设备、工艺及材料等领域开展了多个研究项目,并取得多项重要成果。

### 4. 助力深空探测

3D 打印技术的快速发展和远程控制技术为空间探测提供了新的思路。月面设施构件 3D 打印技术是利用月球原位资源,采用 3D 打印技术就地生产月面设施构件,是未来建立大型永久性月球基地的有效途径。该方法能够最大限度地利用原位资源制造 3D 打印所需的粉末材料,继而采用 3D 打印设备直接打印出月面设施构件,能大大降低自地球发射成本,并可利用月球基地的原位资源探索更远的空间目标。

### 5. 走入千家万户

随着 3D 打印技术的不断发展与成本的降低,3D 打印技术走入千家万户不无可能。也许,未来的某一天,你便可以在家里给自己打印一双鞋子;在你的车子里就放着一台 3D 打印机,汽车的某个零件坏了,可以及时打印一个重新装上。

#### 思维拓展

目前,增材制造成型可以用于尺寸从微纳米的元器件到 10 m 以上的大型航空结构件,为现代制造业的发展及传统制造业的转型升级提供了巨大契机。2018 年,全球增材制造产业产值达到 97.95 亿美元,较 2017 年增加 24.59 亿美元。全球工业级增材制造装备的销量近 20 000 台,同比增长 17.8%。欧盟“地平线 2020”计划 7 年内(2014—2020)投资 800 亿欧元,其中选择 10 个增材制造项目,总投资 2 300 万欧元。2019 年,德国《国家工业战略 2030》草案中,将增材制造列为十个工业领域“关键工业部门”之一。

3D 打印技术发展迅速,其在航天、医学、建筑、电子等领域都有很好的潜在应用价值。所有与 3D 打印技术相关的材料也为我们带来无限可能,并有一天可能会重新塑造我们的世界。材料的伟大变革正在发生。

### 1. 4D 打印形状记忆材料

4D 打印由麻省理工学院与 Stratasys 教育研发部门合作研发,是一种无须打印机器就能让材料快速成型的革命性新技术。4D 打印比 3D 打印多了一个“D”,也就是时间维度,人们可以通过软件设定模型和时间,变形材料会在设定的时间内变形为所需形状。准确地说,4D 打印技术的核心是一种能够自动变形的材料,直接将设计内置到材料中,

不需要连接任何复杂的机电设备,就能按照产品设计自动折叠成相应的形状。

作为 4D 打印热潮的一部分,麻省理工学院和新加坡科技设计大学(SUTD)的工程师在 *Nature* 杂志上发表了标题为 *Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers* (复合材料 4D 打印与可塑形状记忆聚合物)的文章。他们对热敏聚合物进行了研究。可塑形状记忆聚合物可以在弯曲或暴露于极端的压力的条件下以不同的方式成型,其在环境刺激下(受热)可以恢复为原来的形状(见图 1-19)。

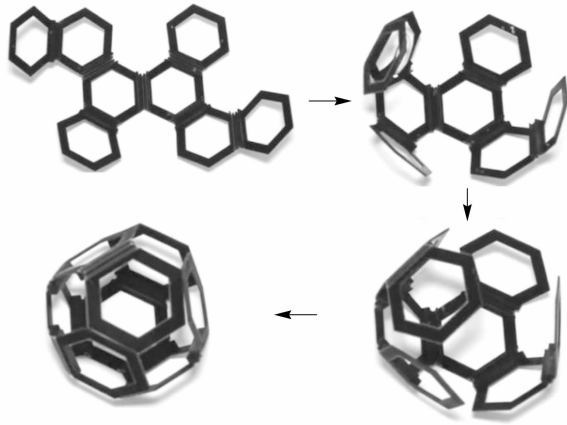


图 1-19 4D 打印形状记忆材料自恢复

## 2. 3D 打印分子

一组伊利诺伊大学的化学家在医学博士 Martin Burke 的带领下,已经研制出通过焊接预先做好的组件就能自动合成新的有机小分子的机器。这些组件可以以任何配置组装。目前,已经存在 200 个这样的组件。这意味着这种机器有能力 3D 打印出数十亿种不同的小分子有机化合物,它们随后可作为新的药物或其他用途进行测试。

## 3. 3D 打印环保材料

德国慕尼黑 Additive Elements 公司致力于安全的生物基材料研究,并认为这是这个行业的未来。他们正在开发一种材料,其完全由惰性材料和食品级的原料组成。未印刷的粉末可完全回收,最终产物可与其他废物一起处理,无毒、无害。



## 第二节 3D 打印的材料与优势

### 任务导学单

学习任务	学习目标	学习内容		考核指标	
		知 识	技 能		
1	3D 打印的分类	了解目前比较流行的 3D 打印技术种类	主流 3D 打印技术的工艺分类	能判断给定零件所用的工艺类型	完成学习后能阐述 3D 打印的工艺分类
2	3D 打印的材料	掌握不同类型 3D 打印所需的不同种类材料	3D 打印材料的分类与选用	能区分不同类型 3D 打印所使用的材料	完成学习后能描述至少 4 种类型 3D 打印所选用材料的特性
3	3D 打印的优势	了解 3D 打印技术在加工制造中的优势	3D 打印技术在生产制造过程中的优势	能明确 3D 打印技术给生产过程带来的好处	完成学习后能阐述 3 种以上 3D 打印技术的优势

### 一、3D 打印的分类

#### 旁征博引

“君子和而不同”这句话出自《论语·子路》，意思是说君子在人际交往中能够与他人保持一种和谐友善的关系，但在对具体问题的看法上却不必苟同于对方。这个描述用来形容 3D 打印技术的分类刚好吻合。随着 3D 打印技术的日益发展，越来越多的工艺形式被开发出来，虽然它们有各自的特点、优势及应用领域，但都遵循离散堆积思想将材料叠加制造最终成型，说一样却有各自属性，说不一样却同属大类。

#### 知识储备

ASTM 标准是由美国材料与试验协会 (ASTM) 组织发布的。ASTM 是美国最老的国际化标准组织之一，早于其他类似组织，包括国际标准化组织 (ISO) 和国际电工委员会 (IEC)。

3D 打印如今已从小众市场迅速发展为快速加工制造及个性化设计制造的主流趋势，其真正的优势在于打印材料，理论上来说，如果没有材料限制，万物皆可打印。目前，主流的 3D 打印材料包括工程塑料、光敏树脂、橡胶类材料、金属材料 and 陶瓷材料等，在这里我