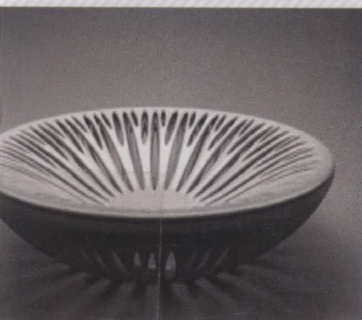


三维打印 自由成形

王运赣 王宣 孙健 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

三维打印自由成形

王运赣 王 宣 孙 健 编著



机械工业出版社

前 言

三维打印自由成形是一种具有代表性的基于加成制造原理的自由成形技术之一，实现这种成形的设备称为三维打印机。三维打印机采用多种多样的喷头操控和配送成形用原材料，使其按照预定的三维计算机辅助设计模型，一层层地沉积于工作台上，逐步堆积成三维工件。

按照三维打印机出现的年代，可将其分为传统三维打印机、先进三维打印机和普及式三维打印机等3类。由于这些类型的三维打印机可使用的成形原材料广泛，对材料的成分、形态、规格等几乎没有限制，因此非常适合快速制作各种功能器件。

由于三维打印自由成形具有显著优势，目前该工艺已经在生物医学、机电制造和新材料成形等领域的应用上取得了重大进展。随着3D时代的到来，三维打印自由成形的应用领域必将迅速扩展，甚至进入家庭，涉及生产、办公和日常生活的方方面面。因此，三维打印技术被称为“继蒸汽机、计算机和互联网后的又一项伟大发明”。

虽然三维打印自由成形技术发展迅速，但系统地介绍这项技术的专著很少。近年来，我们一直致力于三维打印机和三维打印自由成形工艺的研究，积累了较丰富的经验，同时也查阅了大量的文献，在此基础上编写了本书，希望以此促进三维打印技术在我国进一步发展与应用。

编 者

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 自由成形与自由成形机	1
1.2 三维打印自由成形及其发展历史	2
1.3 三维打印自由成形的新进展	5
参考文献	6
第2章 三维打印机	7
2.1 三维打印机的类型	7
2.2 喷墨粘粉式三维打印机	8
2.3 熔融挤压式三维打印机	10
2.4 压电喷墨式三维打印机	13
2.4.1 容积型压电喷墨式喷头与三维打印机	13
2.4.2 拍击型压电喷墨式喷头与三维打印机	18
2.4.3 开关型压电喷墨式喷头与三维打印机	19
2.5 气动式三维打印机	21
2.5.1 气动活塞操控型喷头与三维打印机	21
2.5.2 气压直接驱动型喷头与三维打印机	22
2.5.3 气动微注射器型喷头与三维打印机	24
2.5.4 气动膜片型喷头与三维打印机	29
2.5.5 气动雾化型喷头与三维打印机	32
2.6 电动式三维打印机	42
2.6.1 电磁阀操控型喷头与三维打印机	42
2.6.2 电动微注射器型喷头与三维打印机	44
2.7 电流体动力喷射式三维打印机	48
2.8 混合式三维打印机	57
2.9 工程设计用三维打印机	61
2.10 简易实验用三维打印机	65
2.11 学生学习用三维打印机	69
参考文献	71
第3章 生物医学中的三维打印自由成形	73
3.1 口腔修复体三维打印成形	73
3.1.1 口腔金属修复体蜡型打印成形	73
3.1.2 口腔金属修复体冰型打印成形	79
3.1.3 口腔陶瓷修复体直接打印成形	80

3.1.4 口腔颌面赝复体打印成形	83
3.2 植入体三维打印成形	88
3.2.1 生物陶瓷植入体三维打印成形	88
3.2.2 功能梯度材料植入体三维打印成形	90
3.3 组织工程支架三维打印成形	92
3.3.1 组织工程与支架	92
3.3.2 支架喷墨粘粉式打印成形	94
3.3.3 支架注射式打印成形	96
3.3.4 支架电流体动力喷射式打印成形	98
3.3.5 支架熔融挤压式打印成形	100
3.4 细胞三维打印成形	102
3.4.1 细胞喷墨式打印成形	103
3.4.2 细胞注射式打印成形	105
3.4.3 细胞气动雾化式打印成形	118
3.4.4 细胞电喷射式打印成形	118
3.5 控释给药系统三维打印成形	119
3.5.1 控释给药系统三维打印工艺	119
3.5.2 制作控释给药系统三维打印机	121
3.5.3 植入式给药系统三维打印成形	122
3.6 三维打印成形在外科手术中的应用	126
3.6.1 成形机的选择与三维打印成形工艺	126
3.6.2 三维打印成形件的精度	126
3.6.3 三维打印成形件的机械强度	127
3.6.4 三维打印成形件的消毒性能	128
3.6.5 三维打印成形应用范例	128
参考文献	135
第4章 机电制造中的三维打印自由成形	138
4.1 微型热管三维打印成形	138
4.2 曲面图形三维打印成形	140
4.3 金属焊料三维打印成形	142
4.4 金属器件三维打印成形	144
4.5 复杂器件三维打印折叠成形	147
4.6 铸造蜡模三维打印成形	150
参考文献	154
第5章 三维打印自由成形的应用与普及	156
5.1 陶瓷构件三维打印成形	156
5.2 珠宝蜡型三维打印成形	159
5.3 建筑模型与构件三维打印成形	161
5.4 食品三维打印成形	166

5.5 时尚品三维打印成形	172
5.6 科教模型三维打印成形	177
5.7 三维打印自由成形的普及	180
参考文献	186

第 1 章 概 述

1.1 自由成形与自由成形机

自由成形 (Free Form Fabrication, FFF) 起源于 20 世纪 80 年代后期间世的快速成形 (Rapid Prototyping, RP)。快速成形方法的原理属于加成制造 (Additive Fabrication, AF), 即不必采用传统的加工机床和工模具, 而是依据工件的三维计算机辅助设计 (CAD) 模型 (见图 1-1a), 在计算机控制的自由成形机上直接成形三维工件。成形过程如下: ①利用自由成形机的软件对 CAD 模型进行分层切片, 得到各层截面的二维轮廓图 (见图 1-1b)。②按照这些轮廓图进行分层自由成形, 制成各个截面轮廓薄片 (见图 1-1c)。③将这些薄片逐步顺序叠加堆积成三维工件实体 (见图 1-1d)。

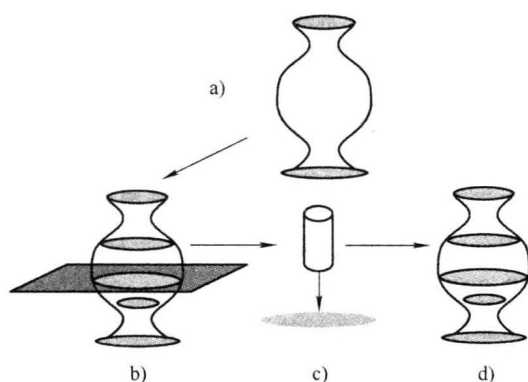


图 1-1 工件的三维 - 二维 - 三维的转换

- a) 三维设计模型 b) 模型分层切片
c) 分层制片 d) 堆积成实体

自由成形只需传统加工方法 30% ~ 50% 的工时和 20% ~ 35% 的成本, 就能直接制作复杂的三维工件, 因此在工业和生物医学等领域中获得了广泛的应用。经过近 20 年的持续努力, 实现三维自由成形工艺的机器已有 5 种商品化的定型产品 (见图 1-2), 即激光固化 (SLA)、激光切纸 (LOM)、激光烧结 (SLS)、三维打印 (3DP) 和熔融挤压 (FDM) 等自由成形机 (一般称为“快速成形机”)。

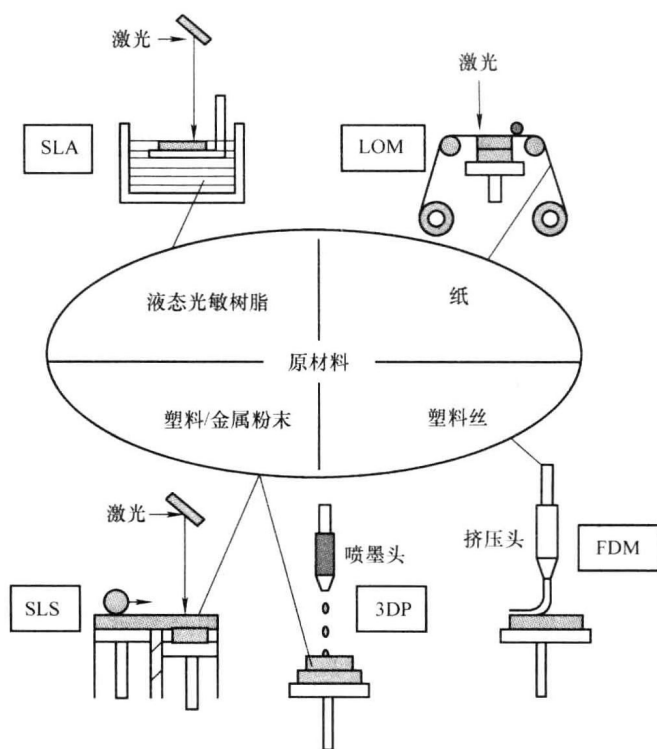


图 1-2 商品化的自由成形机

1.2 三维打印自由成形及其发展历史

1993 年，麻省理工学院（MIT）发明了基于喷墨打印原理的三维打印自由成形和三维打印机（3D Printer, 3DP），随后于 1997 年成立 Z Corporation 公司，开始生产 Z 系列喷墨式三维打印机。

这种最早出现的三维打印机是借助热泡式喷头喷射粘结剂来使粉材选择性粘结成形（见图 1-3 和图 1-4），因此简称为喷墨粘粉式三维打印机。其工作过程如下：

1) 铺粉辊将供粉活塞上方的一层粉材（如石膏粉）铺设至成形活塞上方（见图 1-4a）。

2) 喷头按照 CAD 设计的工件截面层轮廓信息，在水平面上沿 X 方向和 Y 方向运动，并在铺好的一层粉材上，有选择性地喷射粘结剂，粘结剂渗入部分粉材的微孔中并使其粘结，形成工件的第一层截面轮廓（见图 1-4b）。

3) 一层成形完成后，成形活塞下降一截面层的高度（一般为 0.1 ~ 0.2mm），供粉活塞上升一截面层的高度，再进行下一层的铺粉（见图 1-4c）。

4) 在下一层上喷射粘结剂，形成工件的下一层截面轮廓（见图 1-4d）。如此循环，直到完成最后一层的铺粉与粘结（见图 1-4e），形成三维工件（见图 1-4f 和图

1-5)。

在这种自由成形机中,未粘结的粉材自然构成支撑,因此,不必另外制作支撑结构,成形完成后也可免除剥离支撑结构的麻烦。此外,喷头还可以喷射多种颜色的粘结剂,以便成形彩色工件。

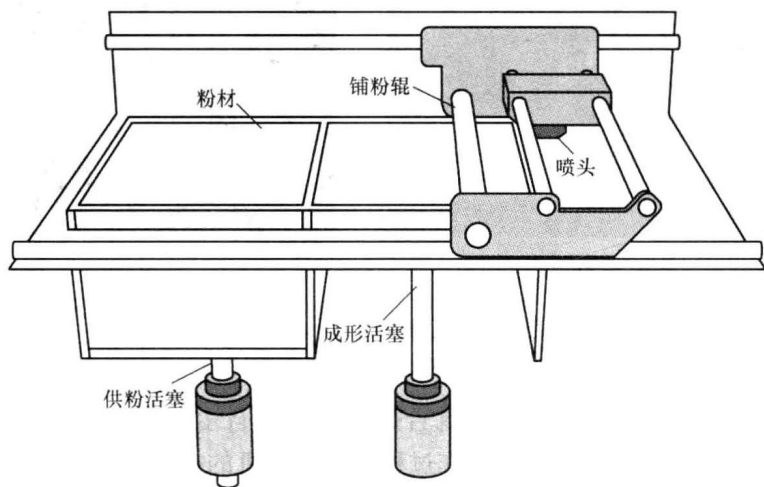


图 1-3 喷墨粘粉式三维打印机

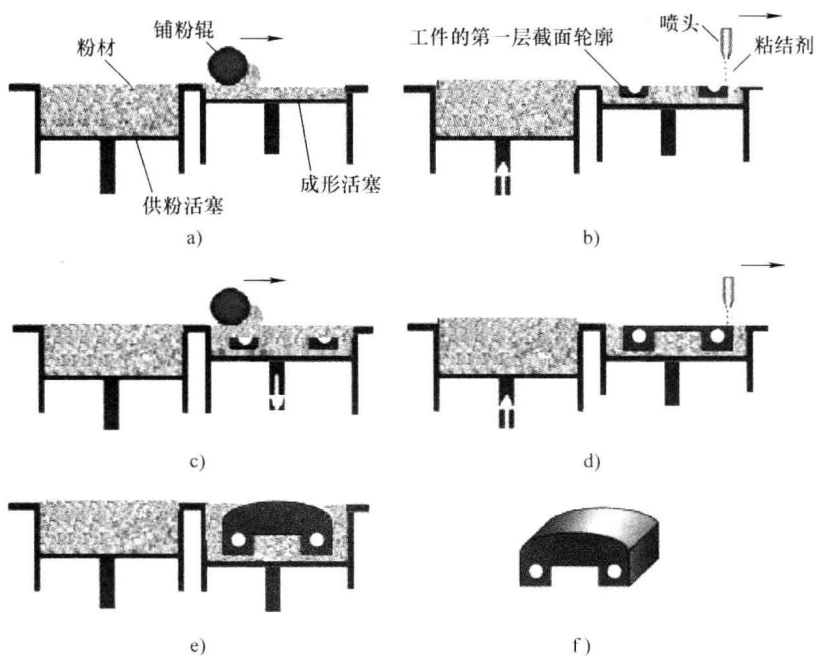


图 1-4 喷墨粘粉式三维打印机的工作过程

a) 铺粉 b) 喷射粘结剂 c) 再铺粉 d) 再喷射粘结剂 e) 成形完成 f) 三维工件

在上述喷墨粘粉式三维打印机发明的同时(1993年),美国 Stratasys 公司发明

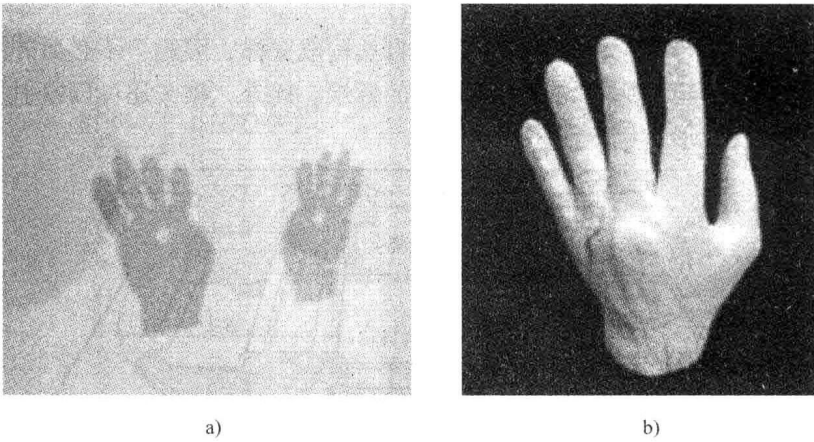


图 1-5 三维打印成形的工件
a) 工件的一层截面轮廓 b) 打印完成的三维工件

了熔融挤压自由成形工艺并研制了首台熔融挤压式自由成形机（Fused Deposition Modeling, FDM），见图 1-6a。其工作过程：在计算机的控制下，按照 CAD 设计的工件截面层轮廓信息，挤压式喷头做水平 X 方向的运动，同时工作台做水平 Y 方向的运动。缠绕在供丝辊上的热塑性塑料丝（如 ABS、尼龙丝等）由辊轮式送丝机构送入喷头，在喷头中加热至熔融态，然后通过喷嘴挤出并沉积在工作台上（见

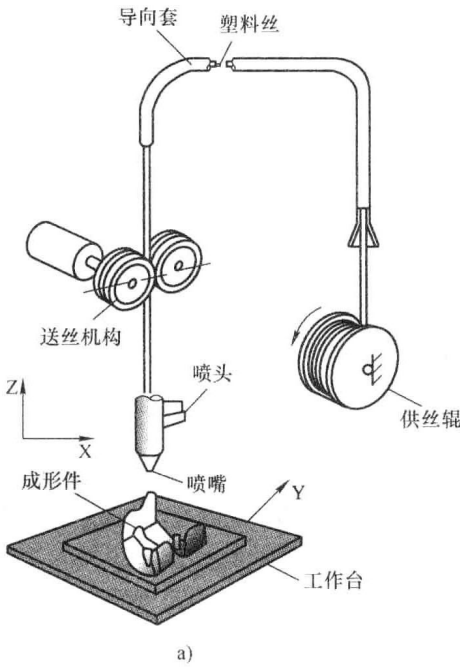


图 1-6 熔融挤压式自由成形机原理图
a) 组成示意图



图 1-6 熔融挤压式自由成形机原理图 (续)

b) 熔挤成形 c) 成形件和支撑结构

图 1-6b), 快速冷却固化后形成截面轮廓和支撑结构 (见图 1-6c)。工件的一层截面成形完成后, 喷头上升一个截面层的高度 (一般为 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$), 再进行下一层截面的沉积, 如此循环, 最终形成三维工件。

熔融挤压式自由成形机和喷墨粘粉式三维打印机有一个明显的相同点, 即都是用喷头来操控和配送成形材料 (虽然喷头的工作原理和结构有所不同), 这和二维喷墨打印机极其相似, 但与激光固化 (SLA)、激光切纸 (LOM) 和激光烧结 (SLS) 等 3 种自由成形机完全不同。因此, 近年来在加成法自由成形领域, 将熔融挤压式自由成形机归并入三维打印机, 并称其为熔融挤压式三维打印机。

1.3 三维打印自由成形的新进展

喷墨粘粉式和熔融挤压式两种传统三维打印机都有一定的局限性, 这主要是可用原材料有较大的限制。例如, 热泡式喷头能喷射的粘结剂有限, 特别是难以喷射粘度较大的粘结剂以及非水溶液性粘结剂; 熔融挤压式喷头只能使用一定直径的可熔融塑料丝材。这种状况显然无法满足新材料成形的需求, 特别是生物医学领域、机电制造领域和其他一些新发展领域的成形需求。

为突破这些限制, 近年来已经开展了自由成形关键技术——先进喷头的研制, 特别是关于压电喷墨式喷头、微注射器式喷头和电流体动力喷头的研制。这些喷头的共同特点是采用微滴喷射技术, 从而不仅使自由成形的可用原材料 (“墨水”) 范围大大扩展 (几乎无限制), 而且使成形件的精度也有大幅度的提高, 并且在这些先进喷头的基础上出现了一些全新的自由成形机。由于这些自由成形机采用喷头来操控和配送成形材料, 可以制作三维工件, 因此统称为三维打印机。为区别于传统的三维打印机, 将新出现的这些三维打印机称为 “先进三维打印机” (advanced 3D printers), 并将这些打印机及其所使用原材料与相关工艺统称为 “先进三维打印技术”。先进三维打印技术可以成功地解决生物医学和机电制造等领域新材料

(特别是微纳米材料)的复杂功能器件的成形难题,因此正在成为发达国家争先发展的一项高新技术。

在大力发展上述高端三维打印机的同时,人们也十分重视普及式三维打印机的发展。按照这类打印机目前的售价范围和主要用途,可以将其分为工程设计用、简易实验用和学生学习用3种。其中,工程设计用三维打印机的售价范围是10000~20000美元,主要用于三维工程设计,以便部分取代现有设计用二维打印机;简易实验用三维打印机的售价范围是1000~4000美元,主要用于一般的三维成形实验,特别是学生的课程实验;学生学习用三维打印机的售价为几百美元,适合大专院校学生用标准模块自行组装三维打印机,借此掌握三维打印机的原理和基本操作,以及三维打印自由成形工艺基础。

参 考 文 献

- [1] 王运赣. 功能器件自由成形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 王运赣, 张祥林. 微滴喷射自由成形 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [3] 李宝, 王运赣. 快速成形技术 (高级) [M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2006.
- [4] 王运赣. 快速成形技术 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.

第 2 章 三维打印机

2.1 三维打印机的类型

三维打印机是实现三维打印自由成形工艺必需的机电一体化装备，按照三维打印机出现的时间，可以将其分为 3 个阶段并据此进行分类（见图 2-1）。

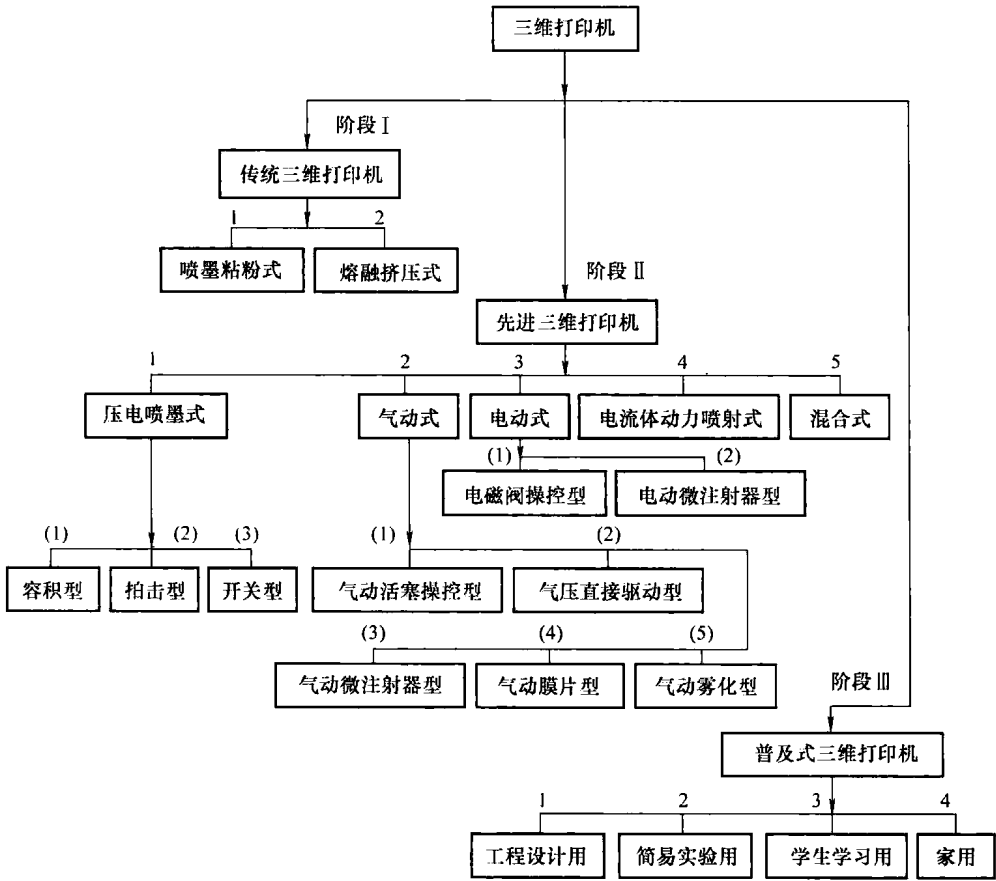


图 2-1 三维打印机的发展阶段及其分类

(1) 传统三维打印机

出现于 20 世纪 90 年代，包括喷墨粘粉式（3DP）和熔融挤压式（FDM）等两种三维打印机。

(2) 先进三维打印机

近年来出现的新型三维打印机，包括压电喷墨式、气动式、电动式、电流体动力喷射式和混合式等 5 种三维打印机。

(3) 普及式三维打印机

正在发展或将要发展的大众化三维打印机，包括工程设计用、简易实验用、学生学习用和家用等 4 种三维打印机，其中家用三维打印机目前还处于设计阶段。

2.2 喷墨粘粉式三维打印机

传统喷墨粘粉式三维打印机（见图 1-3 和图 1-4）用水性溶液作为粘结剂（统称为“墨水”），采用热泡式（Thermal Bubble）喷头喷射水性墨水。喷头的工作原理是（见图 2-2），通过对其腔内的加热电阻（约 90Ω ）施加短脉冲信号，使靠近的 0.1mm 厚的墨水薄层在 $3\mu\text{s}$ 内急速加热到 300°C ，汽化并形成蒸汽泡（见图 2-2a，压力可达 4.5MPa ），此气泡将加热电阻与其他墨水隔离，避免使喷头内全部墨水加热。加热信号消失后，开始降温，但残留余热仍会促使气泡在 $10\mu\text{s}$ 内迅速膨胀到最大，由此产生的压力迫使一定量的墨水克服表面张力，以 $5\sim 12\text{m/s}$ 的速度快速从喷嘴挤出（见图 2-2b）。随着温度继续下降，气泡开始呈收缩状态，原挤出于喷嘴外的墨水受到气泡破裂力量的牵引而形成分散墨滴，并因墨水的收缩使后端墨水开始分离（见图 2-2c）。气泡消失后墨滴与喷头内的墨水完全分开，在 $10\sim 20\mu\text{s}$ 内墨水由供液装置补入喷头，从而完成一个喷射过程。热泡式喷头的喷射频率可达到 20kHz ，喷射墨滴直径可小于 $35\mu\text{m}$ ，喷射墨水的粘度一般为 $1\times 10^{-3}\sim 3\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

热泡式喷头的结构比较简单，易于用半导体加工工艺制造，便于集成，价格较便宜，分辨率很高。热泡式喷头的缺点：

1) 只能用于喷射可被热量蒸发的水溶液。

2) 喷头中存在热应力，电极始终受电解和腐蚀的作用，这些对使用寿命有影响（通常为几十小时），因此，喷头通常与墨盒做在一起，更换墨盒时即同时更新喷头，这样一来用户不必为喷头堵塞而担心。

3) 在工作过程中，液体受热（约 300°C ），易发生化学、物理变化，使一些热

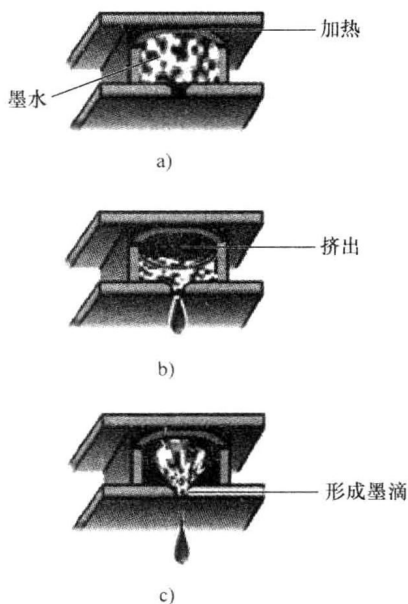


图 2-2 热泡式喷头工作原理图
a) 加热墨水 b) 挤出墨水 c) 形成墨滴

敏感液体的使用受到限制。例如，若用热泡式喷头喷射纳米金，当金的微粒足够小时，它能在 120°C 左右烧结，因此，喷射液蒸发造成的高温会导致纳米金烧结在加热电阻上。当烧结其上的金层达到一定的厚度时，会使加热电阻的阻值下降，从而不能产生足够的温度。

图 2-3 是 Z Corporation 公司生产的 Z 系列喷墨粘粉式三维打印机，它采用供粉活塞供给粉材。图 2-4 是上海富奇凡机电科技有限公司生产的 LTY-200 型喷墨粘粉式三维打印机，它用料斗供给粉材（见图 2-4b 和图 2-4d），结构更紧凑。图 2-5 是 NCKU 型喷墨粘粉式三维打印机，它采用热泡式喷头或压电式喷头。

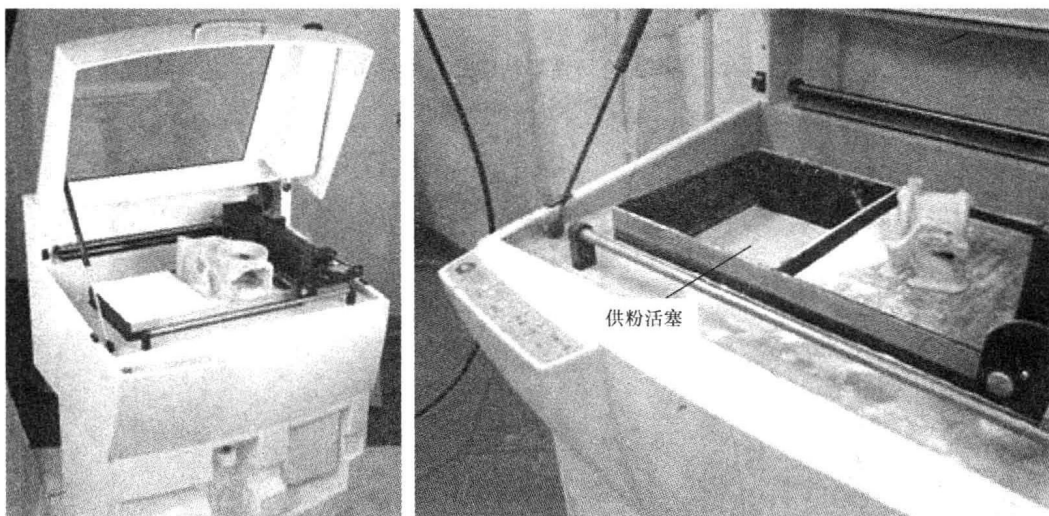


图 2-3 Z Corporation 公司喷墨粘粉式三维打印机

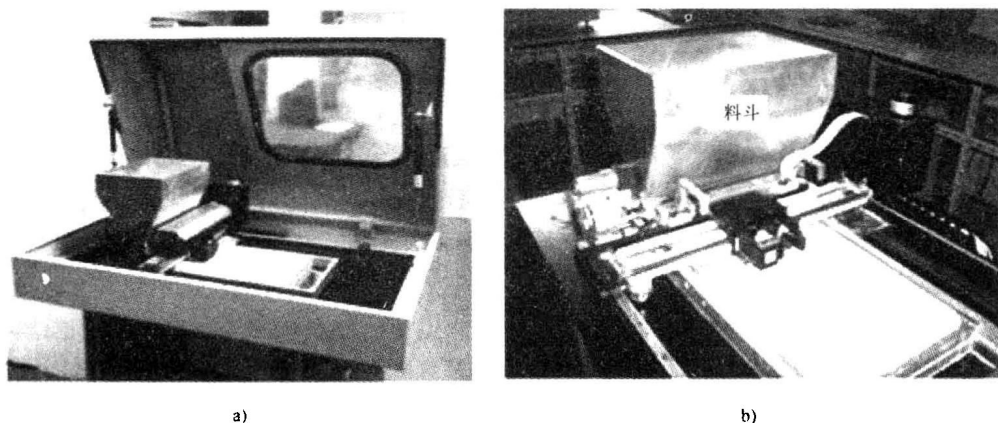


图 2-4 富奇凡公司喷墨粘粉式三维打印机

a) 整机外观 b) 工作台

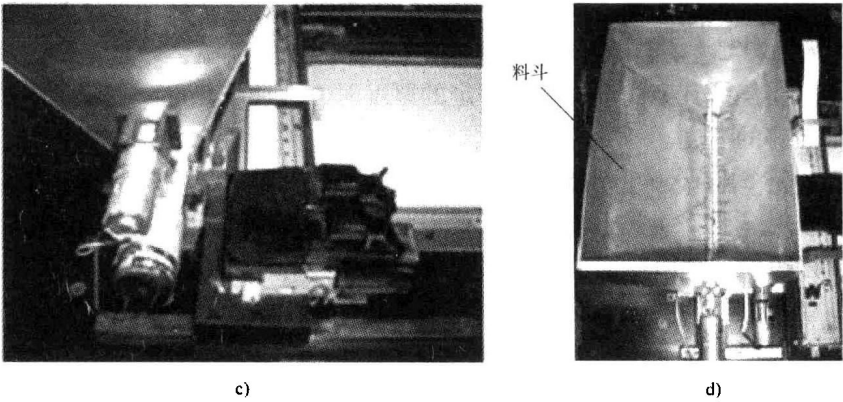


图 2-4 富奇凡公司喷墨粘粉式三维打印机（续）
c) 喷头 d) 铺粉装置

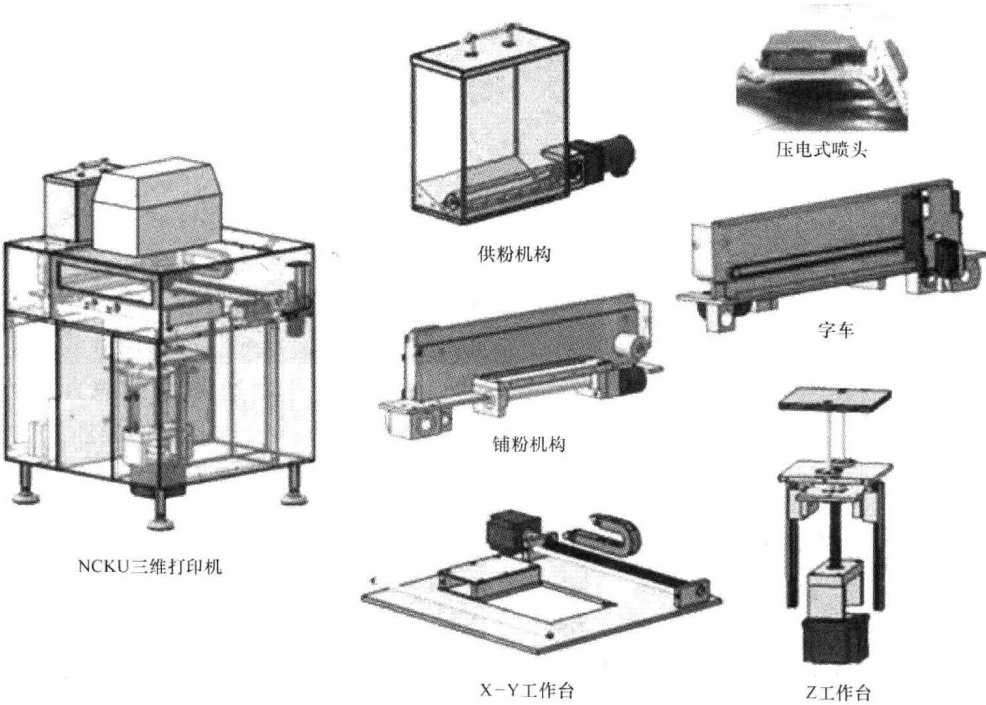


图 2-5 NCKU 型喷墨粘粉式三维打印机

2.3 熔融挤压式三维打印机

图 2-6 是 Stratasys 公司生产的熔融挤压式三维打印机，这种打印机采用两个熔融挤压式喷头，其中，一个喷头用于沉积成形材料，另一个用于沉积水溶性支撑材

料，用辊轮式送丝机构供给和推挤丝料（见图 1-6a）。图 2-7 是熔融挤压式三维打印机的成形件。

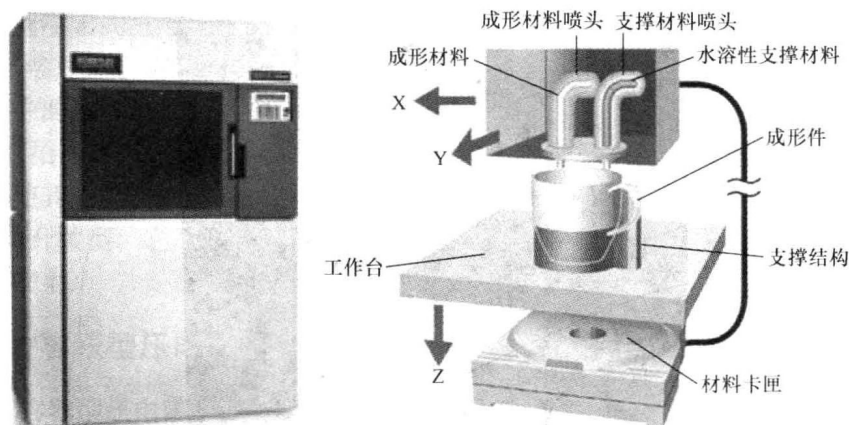


图 2-6 Stratasys 公司熔融挤压式三维打印机

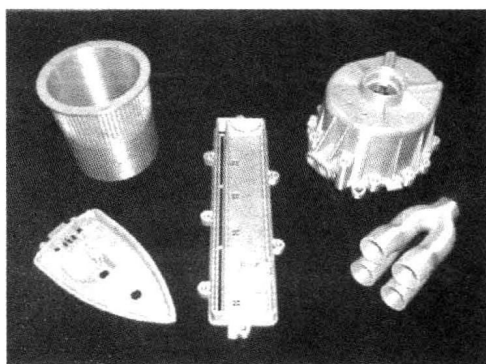
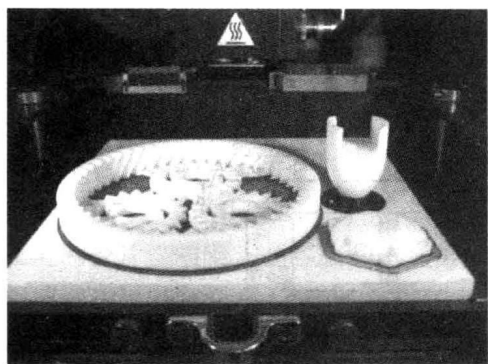


图 2-7 熔融挤压式三维打印机的成形件

上海富奇凡公司生产的熔融挤压式三维打印机（见图 2-8）采用辊轮 - 螺杆式熔挤系统（见图 2-9），挤压头内的螺杆和送丝机构用可沿 R 方向旋转的同一步进电动机驱动，送丝机构由传动齿轮和两对送丝辊组成。外部计算机发出控制指令后，步进电动机驱动螺杆，同时，又通过传动齿轮驱动送丝辊，将直径 4mm 的塑料丝送入挤压头。在挤压头中，由于电热棒的加热作用，塑料丝呈熔融状态，并在变截面螺杆的推挤下，通过直径为 0.2 ~ 0.5mm 的可更换喷嘴沉积在工作台上，并在冷却后形成工件的截面轮廓。这种熔挤系统可以看成是“螺杆式无模注射成形机”，驱动步进电动机的功率大，能产生很大的挤压力，因此，能采用粘度很大的熔融材料，成形工件的截面结构密实，品质好。