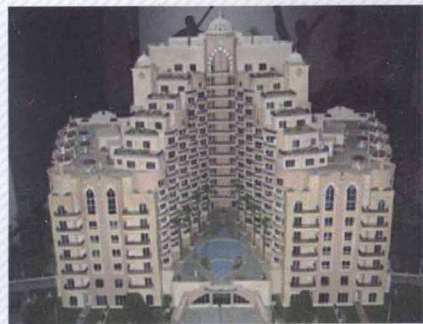
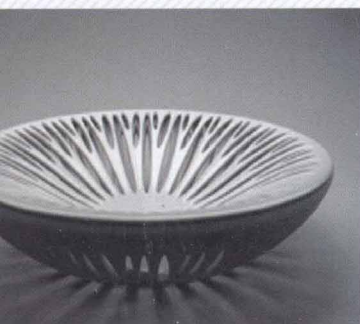
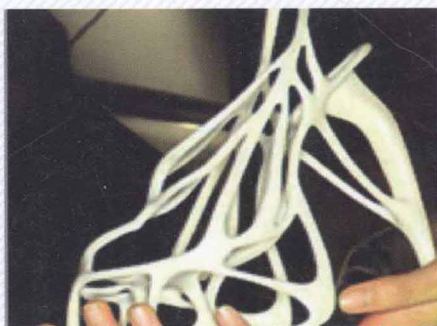


功能器件 自由成形

王运赣 王宣 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书介绍了近年来兴起的一项技术——功能器件自由成形，它是快速自由成形技术的新发展，突破了原有快速成形机适用原材料的限制，采用多种形式的精细微滴喷射喷头，使自由成形件不再是仅能用于形体观测的样品，而是真实可用的功能器件，其材质和机械、电气、力学、物理、化学、生物特性能够满足功能器件的要求。这项新技术已经在新材料的成形、高新机电器件的制造、现代生物医学器件的制造等领域获得了瞩目的应用，而且还将在更多领域发挥更大的作用。

本书总结了作者近年来有关功能器件自由成形技术的研究经验，汇集了国内外大量有关文献的精华，系统地阐述了功能器件自由成形的原理和应用。全书共分五章：概述、功能陶瓷器件自由成形、功能机电器件自由成形、功能梯度材料构件自由成形、功能生物医学器件自由成形。

本书可作为高等院校制造工程类、材料工程类、生命科学类院系的教材和参考书，也可作为从事有关新产品研究、设计、制造的工程技术人员参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

功能器件自由成形/王运赣、王宣编著. —北京：机械工业出版社，2012.8

ISBN 978-7-111-38982-8

I. ①功… II. ①王…②王… III. ①电子器件-研究 IV. ①TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 140966 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：曲彩云 责任编辑：曲彩云 杨明远 版式设计：霍永明

责任校对：肖琳 封面设计：赵颖喆 责任印制：张楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 12.75 印张 · 251 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-38982-8

定价：29.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：(010) 88361066

销售一部：(010) 68326294

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

前 言

功能器件自由成形是近年来在加成法快速自由成形技术的基础上发展起来的一种新工艺。它充分继承了加成法将复杂三维工件转化为简单二维截面组合的独特优势，不必采用传统的加工机床和工模具，根据工件的三维计算机辅助设计（CAD）模型，借助自由成形机就能直接制作复杂的三维结构，而且突破了原有快速成形机适用原材料的限制，采用多种形式的精细微滴喷射喷头，使自由成形件不再是仅能用于形体观测的样品，而是真实可用的功能器件，其材质和机械、电气、力学、物理、化学、生物特性能够满足功能器件的要求。

由于功能器件自由成形工艺及其相应成形机的上述显著进展，已使其成为先进制造领域的重点发展技术，并且已经在新材料的成形、高新机电器件的制造、现代生物医学器件的制造等领域获得了瞩目的应用，解决了传统制造工艺和装备中许多难以克服的问题。可以预见，这种先进制造方法还将在更多领域发挥更大的作用。

近年来，编者与有关同仁致力于功能器件自由成形工艺及其设备的研制，积累了一定的经验，同时也查阅了大量的文献资料，受益匪浅。为促进这项新技术在我国的进一步应用与发展，编者将自身体会与学习心得整理成本书，希望对从事有关工作的读者有所帮助。

编 者

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 自由成形的 20 年历程	1
1.2 自由成形面临的严峻挑战	2
1.3 再创自由成形的新辉煌——从“形似”到“神似”	4
参考文献	6
第 2 章 功能陶瓷器件自由成形	7
2.1 陶瓷器件的传统成形方法	7
2.2 陶瓷器件激光固化自由成形	9
2.2.1 激光固化自由成形原理	9
2.2.2 陶瓷器件激光固化自由成形工艺	10
2.3 陶瓷器件激光烧结自由成形	12
2.3.1 激光烧结自由成形原理	12
2.3.2 陶瓷器件激光烧结自由成形工艺	12
2.4 陶瓷器件激光切割自由成形	21
2.4.1 激光切割自由成形原理	21
2.4.2 陶瓷器件激光切割自由成形工艺	22
2.5 陶瓷器件三维打印自由成形	25
2.5.1 三维打印自由成形原理	25
2.5.2 陶瓷器件三维打印自由成形工艺	31
2.5.3 陶瓷悬浮液（浆料）的制备	44
2.6 陶瓷喷绘	46
2.6.1 瓷砖喷绘机	47
2.6.2 陶瓷墨水	51
参考文献	56
第 3 章 功能机电器件自由成形	60
3.1 印刷电路板自由成形	60
3.1.1 印刷电路板喷印自由成形及其喷印机	60
3.1.2 影响印刷电路板喷印自由成形性能的主要因素	68
3.1.3 印刷电路板激光烧结自由成形	79
3.2 电子元器件喷印自由成形	83
3.2.1 电子元件喷印自由成形	83

3.2.2 显示器喷印自由成形	85
3.2.3 太阳能电池喷印自由成形	86
3.2.4 印制电子中的喷印形态分析	89
3.3 电气互连金属焊料喷印自由成形	94
3.3.1 压电式焊料喷印成形	94
3.3.2 气压直接驱动式焊料喷印成形	95
3.3.3 气动膜片式焊料喷印成形	95
3.4 MEMS 自由成形	98
3.5 功能电子器件喷印自由成形的墨水	106
3.6 金属机械器件自由成形	113
3.6.1 金属机械器件激光烧结自由成形	113
3.6.2 金属机械器件电子束熔化自由成形	115
3.6.3 金属机械器件三维打印自由成形	118
3.6.4 超轻多孔金属机械器件自由成形	120
3.7 微机电器件激光固化自由成形	121
参考文献	124
第4章 功能梯度材料构件自由成形	129
4.1 功能梯度材料	129
4.2 功能梯度材料构件的建模	133
4.3 功能梯度材料构件的 CAD 信息表达方法	135
4.4 功能梯度材料的制备方法	136
4.4.1 本体型功能梯度材料的制备方法	136
4.4.2 表面型功能梯度材料的制备方法	136
4.5 功能梯度材料构件的自由成形方法	137
4.5.1 功能梯度材料构件激光熔覆自由成形	137
4.5.2 功能梯度材料构件三维打印自由成形	140
参考文献	145
第5章 功能生物医学器件自由成形	147
5.1 组织工程与支架	147
5.2 组织工程支架的 CAD 模型	148
5.3 支架直接自由成形	150
5.3.1 支架三维打印自由成形	151
5.3.2 支架激光烧结自由成形	163
5.3.3 支架激光固化自由成形	165
5.4 细胞打印自由成形	167
5.4.1 喷墨式细胞打印自由成形	169
5.4.2 机械压挤式细胞打印自由成形	171
5.4.3 电喷射式细胞打印自由成形	171

5.4.4 激光诱导式细胞打印自由成形	172
5.4.5 生物打印机	173
5.5 控释给药系统自由成形	177
5.5.1 控释给药系统	177
5.5.2 自由成形控释给药系统的过程	179
5.5.3 制作控释给药系统的自由成形机	180
5.6 植入体/假体与修复体自由成形	181
5.6.1 植入体/假体激光烧结自由成形	181
5.6.2 假体电子束熔化自由成形	183
5.6.3 假体三维打印自由成形	183
5.6.4 假肢自由成形	185
5.6.5 牙科钛修复体自由成形	187
5.7 生物微阵列自由成形	190
参考文献	192

第 1 章 概 述

1.1 自由成形的 20 年历程

20 世纪 80 年代之前，制造业制作工件的通常方法是采用体积大于工件的毛坯（原材料或铸造、锻压得到的坯料），通过车、铣、刨、钻、磨或电加工等工艺，切除毛坯上多余的材料形成工件。这种工艺属于减成制造法（简称减成法，Subtractive Fabrication），优点是工件精度高，可加工的原材料广泛，因此一直是制造业的主流工艺。

但是，减成法工艺也有明显的缺点：制作周期一般较长，成本较高，往往还需要制作模具的中间环节。随着社会的进步和科技的发展，产品的更新换代日新月异，减成法工艺难以缩短产品由设计到定型的过程。

20 世纪 80 年代末期面世的快速成形（Rapid Prototyping, RP）工艺突破了减成法工艺的局限，采用堆积式自由成形（Free-Form Fabrication, FFF）技术，开创了加成制造法（简称加成法，Additive Fabrication）新工艺，它将计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、计算机数字控制（CNC）、激光、精密伺服驱动等先进技术和新材料融为一体。实现加成法工艺的快速成形机可依据计算机构成的工件三维 CAD 设计模型（见图 1-1a），首先用软件对设计模型进行分层切片，得到各层截面的二维轮廓图（见图 1-1b），然后按照这些轮廓图进行分层自由成形，构成各个截面轮廓层薄片（见图 1-1c，截面层厚度一般为 $0.05 \sim 0.20\text{mm}$ ），并将这些薄片逐步顺序堆积成三维工件（见图 1-1d）。

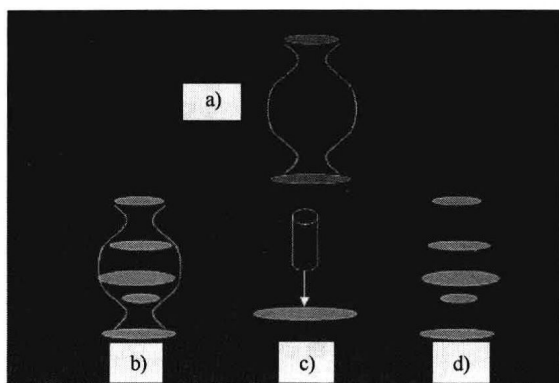


图 1-1 工件的自由成形（三维—二维—三维的转换）

- a) 三维设计模型 b) 模型分层切片
c) 分层成片 d) 堆积成体

自由成形将复杂的三维加工转化成简单的二维加工的组合，不必采用传统的加工机床和工模具，一般只需传统加工方法 30% ~ 50% 的工时和 20% ~ 35% 的成本，

就能直接制造出产品样品（原型件）或模具。由于自由成形具有上述突出优点，近 20 年来发展迅速，自由成形产品销售和服务总额的年平均增长率高达 26.4%，自由成形已成为现代先进制造技术中的一项支柱技术。

上述情况表明，针对由原材料至成品的整个工艺过程来看，自由成形节省了制作工模具的时间，因此可称其为“快速成形”。但自由成形工艺的核心是逐层制作薄片和层层堆积，这些工序本身比较费时，与减成法相比并非“快速”。基于这个原因，本书为避免误导，将这种加成制造法称为“自由成形”，或照顾到过去的习惯称为“自由快速成形”，而不称为“快速成形”。

1.2 自由成形面临的严峻挑战

经过近 20 年的不懈努力，用来实现三维自由成形工艺的机器已有如下五种商品化的定型产品（见图 1-2）：激光固化自由成形机（SLA）、熔融挤压自由成形机

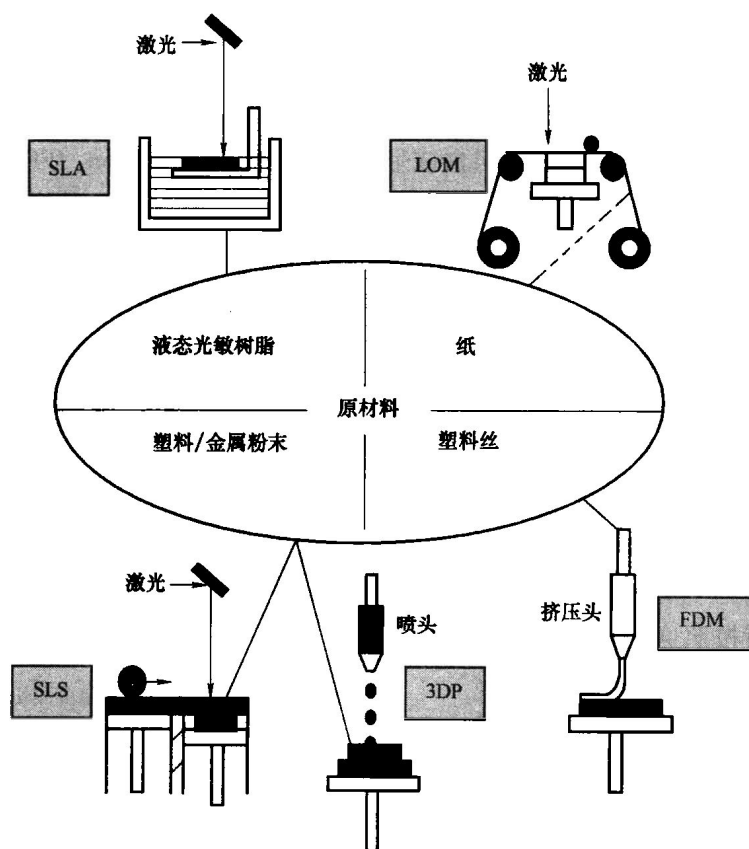


图 1-2 商品化的自由成形机

(FDM)、三维打印自由成形机(3DP)、激光烧结自由成形机(SLS)和激光切割自由成形机(LOM)。回顾这一阶段的进程,自由成形技术的研究人员主要致力于提高成形件的精度,试图使其具有与减成法竞争的能力。从努力的结果来看,工件精度确实有了长足的进步,但是还难以达到减成法的水平,特别是现有自由成形机制作的工件大多还是只能用于形体观测的样品,其机械、电气、力学、生物性能等与真实产品的要求相比还有较大的差距,只有少数成形件(如激光烧结的蜡模、树脂砂模)的功能满足相应真实产品的要求。通俗地说,目前商品化自由成形机制作的工件多数只能做到“形似”,而难以做到“神似”。

从工艺方法论来看,自由成形采用的加成法工艺有其独到的优点,但也有其固有的局限性,造成上述现象的主要原因是:

(1) 逐层堆积引起的台阶效应

自由成形的基本出发点是分层成片一堆积成体,因此,成形前必须对成形件的设计模型进行切片处理。由于受材料厚度、成形效率等因素的限制,切片层的层高不能太小(以免成形效率太低),这必然出现台阶效应,并引起误差(见图1-3)。

(2) 材料状态变化导致的翘曲变形

成形时,原材料由液态变为固态,或由固态变为液态再凝结成固态,而且可能同时伴随加热作用,这会引起工件的翘曲变形,造成形状和尺寸的变化。

(3) 适用原材料有限

现有商品化的自由成形机所能适用的材料类型和规格有限,例如,激光固化自由成形机(SLA)使用的原材料只能是液态光敏树脂,熔融挤压自由成形机(FDM)使用的原材料只能是给定直径和给定成分的塑料丝,三维打印自由成形机(3DP)使用的原材料只能是给定成分的石膏粉、陶瓷粉等粉材,激光烧结自由成形机(SLS)使用的原材料只能是给定成分的塑料粉、树脂砂和金属粉等粉材,激光切割自由成形机(LOM)使用的原材料只能是给定成分的纸材等。这些自由成形机适用的原材料通常不能由用户自行选定,并且与用户所需的最终材料可能有很大的差别。

另外,在基于加成法的自由成形技术(简称为加式快速成形)发展的同时,又出现了基于减成法的快速成形工艺(SRP,简称为减式快速成形),即首先将工件的设计图形分解为若干块,使每块能在三轴CNC机床上加工;其次,用高速三

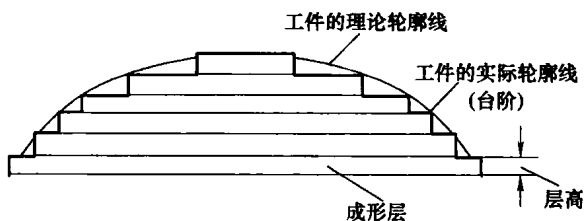


图 1-3 成形件的台阶效应

轴加工中心切削 ABS 塑料板（或铝合金板），成形工件的每一块；其次，用强力胶将若干块粘接成完整的工件。

减式快速成形只需采用比较廉价的三轴 CNC 机床高速铣削加工，就能使生产效率、制件精度和强度明显优于加式快速成形，因此对加式快速成形技术造成了极大的威胁，使加式快速成形只在一些特别复杂样品的制作方面才体现出较大的优势。

1.3 再创自由成形的新辉煌——从“形似”到“神似”

难道自由成形技术已走到尽头，再无前进的出路了吗？

美国、英国和德国的一些大学（如康奈尔大学）及研究机构在近几年进行了全新的探索，他们的研究方向不再局限于自由成形工件的形状与精度（“形似”），重点是使其“神似”——成为功能器件（functional device）。这些器件具有以下特征：

1) 功能性（functionality），成形的器具除形体结构与真实产品相似外，还必须具有近似的机械、电气、力学、光学、化学、生物等性能（或这些性能的组合），因此是能起作用的活性器件（active device）。

2) 完备性（completion），成形的器件是完整的器件（complete device），而不是单个零件，而且不拆分就直接整体自由成形。

3) 多种材料（multi-materials），由于必须达到上述要求，成形原材料通常有若干种。

4) 多重工艺（multi-processes），由于必须达到上述要求，成形时通常需采用多个成形头，用不同的材料和不同的工艺参数来成形器件的不同部分。

这种器件即使其尺寸精度目前暂时尚不能完全达到真实产品的要求，但是完全可用于产品功能的测试，所以能大大缩短新产品的研制周期，这是减成法工艺难以实现的。

用自由成形工艺直接制作功能器件的关键是：实现自由成形工艺的机器必须能采用成分、形态和规格广泛的多种成形原材料。美国等大学和研究机构解决的途径是：采用微滴喷射（Micro-droplet jetting）来制作自由成形所需的一层层小薄片截面，这种方法利用精细喷头喷射体积为微升[⊖]（ μL ）至飞升[⊖]（ fL ）的各种“墨水”微滴，此微滴沉积在基板上逐步堆积成三维结构。由于微滴喷射成形起始于三维打印快速成形（3D Printing），因此现在许多人将微

⊖ $1\mu\text{L} = 1 \times 10^{-6}\text{L}$ 。

⊖ $1\text{fL} = 1 \times 10^{-15}\text{L}$ 。

滴喷射成形统称为三维打印自由成形（包括传统的熔融挤压自由成形）。目前，微滴喷射用的喷头主要有：热泡式喷头（thermal bubble jet）、压电式喷头（piezoelectric jet）、微注射器（micro syringe）式喷头、熔融挤压式喷头等几种。其中，热泡式喷头和压电式喷头是喷墨打印机上十分先进而成熟的产品，其喷嘴直径为微米级，每个喷头上的喷嘴数可达1000个以上，喷射液滴的分辨率 dpi（每英寸长度上可喷射的液滴数目）值可达到1000以上。因此，只需将喷墨打印机通常用的墨水（ink）变更为自由成形所需的特殊“墨水”，就能实现二维/三维的自由成形。

目前，典型的微喷自由成形功能器件可分为：功能陶瓷器件、功能机电器件、功能梯度材料构件和功能生物医学器件四大类。

据报道，针对功能器件的自由成形，国外还研制了相应的“墨水”，采用这些墨水和微喷自由成形系统直接成形了功能机电器件、功能陶瓷器件、功能梯度材料构件和功能生物医学器件等。其中，功能机电器件有：立体电路、场效应晶体管、电阻、电容、电感线圈、静电电动机、RFID（无线电射频识别）电子标签、有机电致发光显示器（PLED）、太阳能电池等，功能生物医学器件有组织工程支架（scaffold）等。

上述成果为自由成形技术开辟了全新的方向和途径，使得采用加成法工艺可以直接成形减成法所无法直接成形的一些功能器件，从而为蓬勃发展的新材料及其成形提供了一种便捷而低廉的有效手段，并且极有可能成为自由成形技术发展的第二个里程碑。

近年来，我国的一些高等院校也开展了有关微喷自由成形的研究，其中多数侧重于喷头的理论分析（例如数学建模和仿真分析），较少见到成熟的系统；有关“墨水”的研究论文不少，但其实用性尚未经证实，因此差距比较明显。

上海富奇凡机电科技有限公司经过多年的努力，利用热泡式喷头已研制和生产了具有自主知识产权的三维打印机，在此基础上又研制了一种可方便拆卸喷嘴的压电式喷头，以及商品化的微注射器式自由成形系统。该系统可以配置1~4个喷头，喷头为全不锈钢结构，喷射推力大；能喷射用户自行设计或选择的由聚合物、金属或陶瓷等构成的溶液（水溶液或溶剂溶液）、胶体、悬浮液、浆料或熔体；喷头中设有加热装置（最高可达200℃），能根据需要通过加热改变原材料的粘度，以便获得所需喷射性能的流体；喷嘴不易堵塞，可快速、方便地进行拆卸、清洗和安装；料筒易于清洗，可方便地更换其中的成形原材料；系统运行时，可实时在线调整喷头的加热温度、喷射流量和移动速度，以及工作台的移动速度，以便优化成形工艺；工作台上还可设置附加中空冷却/加热台，能通入循环冷却介质或加热介质，以便冷却/加热正在成形的工件。

参 考 文 献

- [1] 王运赣. 快速成形技术 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [2] 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.
- [3] 王运赣, 张祥林. 功能器件的自由成形——试论再创 RT 的新辉煌: 第 13 届全国特种加工学术会议论文集 [C]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2009.

第2章 功能陶瓷器件自由成形

2.1 陶瓷器件的传统成形方法

陶瓷的传统概念是指所有以粘土等无机非金属矿物为原料构成的材料，这种材料具有强度高、化学稳定性好、高温性能优良等优点，是一种典型的功能器件材料，因此在各种行业中得到了广泛的应用。

随着科技的进步，陶瓷的原料和用途不断发展，可将陶瓷按原料不同分为普通陶瓷和特种陶瓷。普通陶瓷又称传统陶瓷，其原料是天然的硅酸盐产物（如粘土、长石、石英等），这类陶瓷又称硅酸盐陶瓷，例如：日用陶瓷、建筑陶瓷、绝缘陶瓷、化工陶瓷等。特种陶瓷又称为近代陶瓷、先进陶瓷或高性能陶瓷，例如：氧化铝陶瓷、氮化硅陶瓷、碳化硅陶瓷和氮化硼陶瓷，其原料是人工合成的金属氧化物、碳化物、氮化物、硅化物、硼化物等，特种陶瓷具有一些独特的优异性能，可满足工程结构的特殊需要，成为航空、航天、能源、机械、电子信息、生物工程等高新技术的重要组成部分和不可缺少的物质基础。

工业用陶瓷器件的传统生产过程主要包括以下工序：

(1) 坯料准备

它是利用物理、化学等方法对瓷料进行处理获得所需要规格的粉体，然后按照瓷料的成分，将各种原料进行称量配料，并混合制备成不同形式的坯料。

(2) 坯体成形

它是将坯料制成具有一定形状和规格的坯体，传统的坯体成形方法有浇注成形、压制成形和挤压成形等。

(3) 烧结

它是对成形坯体进行高温加热，使其内部的粉体产生粘结，实现致密化和高强度化。

(4) 后续加工

陶瓷经成形、烧结后，还可根据需要进行后续精密加工，使之符合表面粗糙度、形状、尺寸等精度要求，如磨削加工、研磨与抛光、超声波加工、激光加工等。

在上述生产过程中，坯体成形是一个关键步骤。图2-1是浇注成形坯体的原理图，它是将陶瓷原料粉体悬浮于水中制成料浆，然后注入模具内成形。

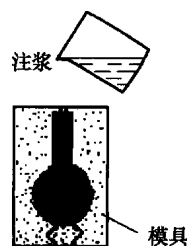


图2-1 浇注成形坯体

图 2-2 是压制成形坯体的原理图，它是将经过造粒的粒状陶瓷粉料，装入模具内直接在压力的作用下成形。

挤压成形坯体是将经真空炼制的可塑泥料置于挤坯机的模具内，以便挤压出各种形状、尺寸的坯体。

从上述传统的坯体成形方法可见，一般都需要首先制作模具，才能进行坯体成形。因此，对于结构和形状复杂的工业陶瓷器件，模具便成为制约其生产的主要障碍。

陶瓷材料的另一个重要应用是用于制作浇注熔化金属的模具（见图 2-3），其工艺过程是，首先用压型（模具）注射蜡模，将若干蜡模装配成蜡模树，再在蜡模的表面涂覆多层陶瓷砂浆（又称挂浆），然后，对其加热，熔化并去除蜡模，焙烧砂浆，获得与蜡模形状相应的陶瓷型壳（模具），再用此型壳浇注熔化的金属，最终得到金属工件。

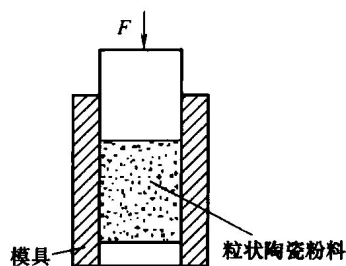


图 2-2 压制成形坯体

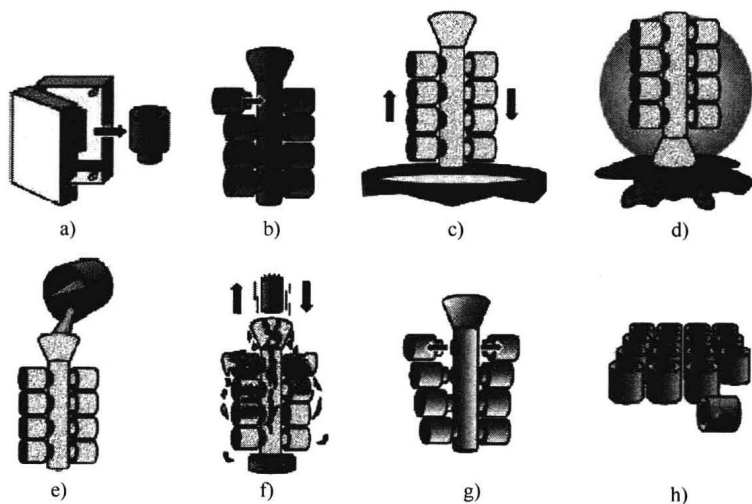


图 2-3 传统失蜡铸造工艺过程

- a) 用压型注射蜡模 b) 装配蜡模树 c) 挂浆 d) 脱蜡、焙烧
e) 浇注熔化金属 f) 清除型壳 g) 分离铸件 h) 铸件

上述工艺称为失蜡铸造，是铸造金属工件的一种传统方法，它有许多优点，但是也存在如下几个问题：

(1) 金属压型的机械加工

通常，注射蜡模用的金属压型必须用切削加工机床加工，对于形状较复杂、精度要求较高的压型还需用 CNC 机床加工，相当麻烦和费时。

(2) 砂浆的涂覆与结壳

浇注熔化金属的壳型为薄壳状结构,在蜡模表面逐层涂覆砂浆后,必须首先在空气中干燥(每层需几小时),然后在加热炉中焙烧成壳,因此十分费时,往往需要若干天时间和占用大量的车间面积。

(3) 环境污染

由于传统的失蜡铸造的熔模粉制备、蜡模挂浆和浇注多数都是在敞开环境下进行的,有大量的烟尘和辐射热,污染严重。

从以上失蜡铸造工艺过程可见,为了获得能浇注熔化金属的陶瓷模(壳型),必须首先制作压型(模具),因而造成诸多问题。

显然,模具制造已成为发展陶瓷器件(包括陶瓷模)的主要障碍,陶瓷无模成形技术是克服此障碍的最有效办法,自由成形工艺使这种技术的实现成为可能。

2.2 陶瓷器件激光固化自由成形

2.2.1 激光固化自由成形原理

激光固化自由成形采用的设备是激光固化自由成形机(Stereo Lithography Apparatus, SLA, 见图 2-4),它是最

早出现的一种商品化自由成形机。激光固化自由成形机由液槽、可升降工作台、激光器及扫描系统、计算机数控系统等组成。其中,液槽中盛满液态光敏树脂,带有许多小孔洞的工作台浸没在液槽中,并由步进电动机在升降臂的驱动下能沿高度 Z 方向作往复运动。激光器为紫外(UV)激光器,如固体 Nd:YVO_4 (半导体泵浦)激光器、氦镭(He-Cd)激光器和氩离子激光器,激光的波长为 $320 \sim 370\text{nm}$ (处于中紫外至近紫外波段)。

扫描系统为一组 X - Y 扫描振镜,它根据控制系统的指令,按照成形件截面轮廓图形要求作高速往复摆动,从而使激光器发出的激光束反射并聚焦于液槽中光敏树脂的上表面,并沿此表面作 X - Y 方向的扫描运动。在这一层液态光敏树脂受到紫外激光束照射的部位,液态光敏树脂发生聚合反应而快速固化,形成相应的一层固态的成形件截面轮廓和支撑结构。

激光固化自由成形的工作过程如下(见图 2-5):开始时,工作台的上表面处

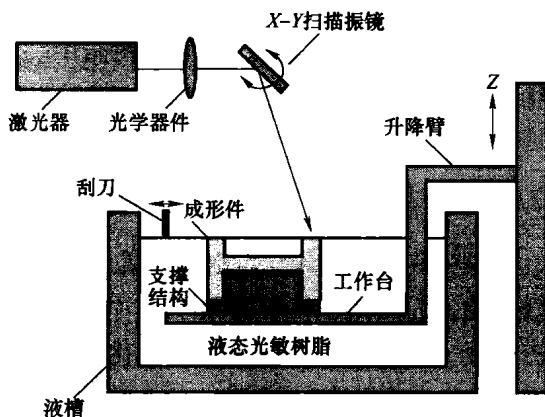


图 2-4 激光固化自由成形机原理图

于液面下一个截面层厚的高度（例如 0.1mm），该层液态光敏树脂被激光束扫描而固化，并形成所需第一层固态截面轮廓图形后（见图 2-5a），工作台下降一层高度，液槽中的液态光敏树脂流过已固化的截面轮廓层（见图 2-5b），刮刀按照设定的层高作往复运动，刮去多余的液态树脂，再对新铺上的这一层液态树脂进行扫描固化，形成第二层所需固态截面轮廓图形，新固化的一层能牢固地粘接在前一层上，如此重复直到整个制件成形完毕（见图 2-5c）。

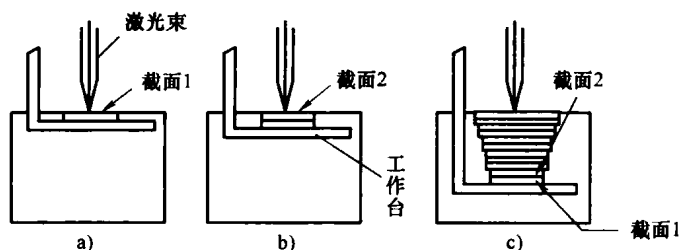


图 2-5 激光固化自由成形过程

a) 固化第一层 b) 固化第二层 c) 固化最后一层

这种自由成形机使用的光敏树脂通常有环氧树脂和丙烯酸酯两种类型，这些树脂由可进一步聚合的低聚体（oligomer）、活性单体（monomer）、光引发剂（photoinitiator）及其他助剂组成。经过适当波长的光（如紫外光）照射后，它们发生聚合反应，迅速固化成形。在光敏树脂中一般含有 2% ~ 5% 的光引发剂，它在光的辐射作用下，由基态变为激发态，然后再生成活性自由基，引发低聚体和活性单体进行聚合固化反应。

2.2.2 陶瓷器件激光固化自由成形工艺^[4-6]

用激光固化（SLA）自由成形机直接成形陶瓷器件时，置于液槽中的不是液态光敏树脂，而是光固化陶瓷悬浮液（photocurable ceramic suspension），其中含有容积占 50% ~ 65% 的固态陶瓷（如氮化硅、氧化铝）粉，它悬浮在低粘度丙烯酸酯单体中（内有适当的光引发剂）。经过激光束扫描之后，引发丙烯酸酯单体进行聚合固化反应，成为粘接陶瓷粉的粘结剂，因此逐步形成陶瓷生坯件（green body），然后在 250 ~ 500℃ 下缓慢加热生坯件，烧除其中的丙烯酸酯粘结剂，再在高温（如 1650℃）下将其烧结成最终的陶瓷件，其抗弯强度可近似于传统方法成形的陶瓷件。

为提高陶瓷器件的成形分辨率，可以在树脂中加入紫外吸收剂（absorber），以便降低陶瓷颗粒的散射效应（scattering effect）。例如，加入 0.3% 的吸收剂时，分辨率可达 2.6 μm。

用激光固化法成形陶瓷器件时，原材料还可以不是光固化陶瓷悬浮液，而是光固化陶瓷浆料，它由陶瓷粉、丙烯酸酯单体、光引发剂、分散剂（dispersant）和增稠剂（thickening agent）组成。

用激光固化法直接成形陶瓷器件有两个局限性：

(1) 难以成形高折射率的陶瓷器件

这与浓悬浮液的光学特性有关。例如，用 23mW 的 He-Cd 激光器扫描低折射率的陶瓷材料（如二氧化硅、氧化铝和羟基磷灰石）时，可以容易地达到所需的固化深度（100 ~ 300 μm ）；但是，对于折射率太高的陶瓷材料（如锆钛酸铅陶瓷，PZT），则不能用上述激光器使其直接成形。

(2) 难以成形小特征结构

成形特征的最小值取决于 Z 向的层高和 X-Y 向的固化线宽度，后者又取决于聚焦激光束的光斑尺寸，以及由陶瓷颗粒引起的侧向角散射（side scatter）导致的紫外辐射扩展。通常，激光固化法难以成形小于 600 μm 的陶瓷特征结构。

图 2-6 ~ 图 2-8 是用激光固化自由成形机直接成形的一些陶瓷件。

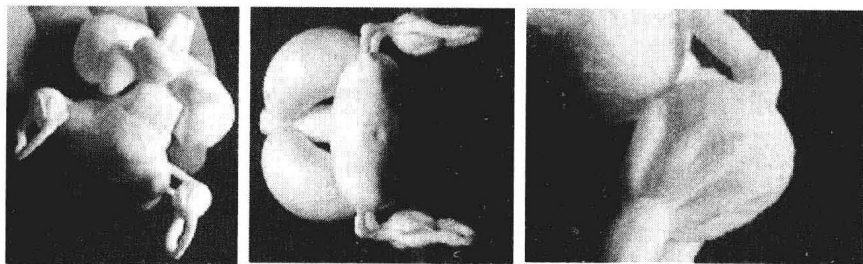


图 2-6 用激光固化自由成形机直接成形的陶瓷雕塑件

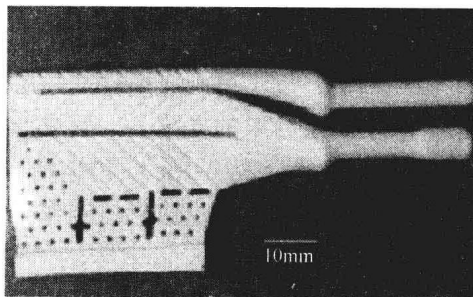


图 2-7 用激光固化自由成形机直接成形的熔模铸造陶瓷型芯

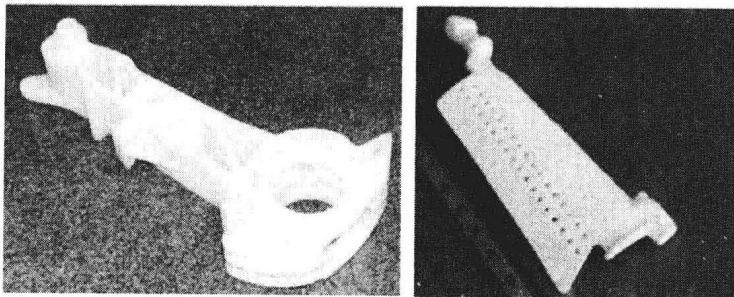


图 2-8 用激光固化自由成形机直接成形的陶瓷件