





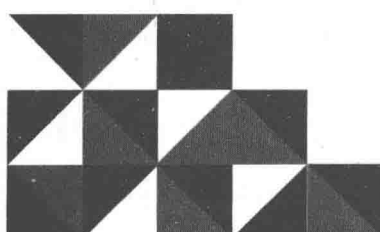
3D

打印技术概论

3D DAYING
JISHU GAILUN

史玉升◎主编

 长江出版传媒
 湖北科学技术出版社

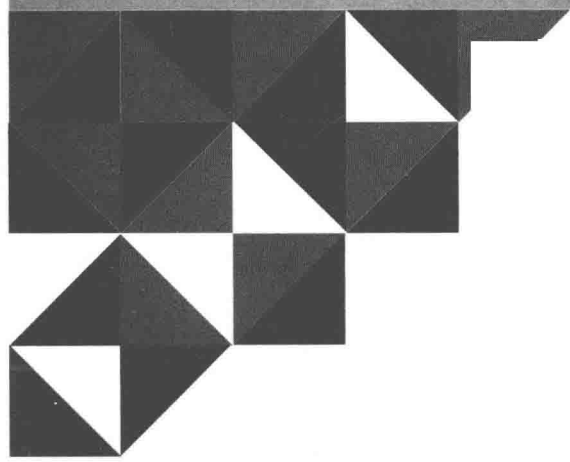


3D

打印技术概论

3D DAYING
JISHU GAILUN

史玉升◎主编



长江出版传媒
湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印技术概论 / 史玉升主编. — 武汉: 湖北科学技术出版社, 2016. 2

ISBN 978-7-5352-4762-9

I. ①3… II. ①史… III. ①立体印刷—印刷术
IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 033075 号

责任编辑: 高 然 刘 虹

封面设计: 胡 博

出版发行: 湖北科学技术出版社

电话: 027-87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号

邮编: 430070

(湖北出版文化城 B 座 13-14 层)

网 址: <http://www.hbstp.com.cn>

印 刷: 武汉市新华印刷有限责任公司

邮编: 430200

787×1 092 1/16

7.5 印张 146 千字

2016 年 2 月第 1 版

2016 年 2 月第 1 次印刷

定价: 38.00 元

本书如有印装质量问题 可找本社市场部更换

3D 打印技术系列丛书编委会

- 主任：湖北大学校长 熊健民
- 副主任(兼主编)：湖北3D打印产业技术创新战略联盟理事长、华中科技大学材料科学与工程学院教授 史玉升
- 副主任：湖北省教育科学研究院副院长 朱圣芳
湖北省普通教育干部培训中心主任 袁先澍
湖北科学技术出版社社长 何 龙
武汉邦联教育投资有限公司董事长、湖北嘉一三维高科股份有限公司董事长 黄东臣
- 委员：华中科技大学材料科学与工程学院副教授、湖北3D打印产业技术创新战略联盟秘书长 周 钢
湖北大学教育学院心理学系教授 刘启珍
湖北大学教育学院教育技术系副教授 邹军华
湖北省教科院科学课教研员、特级教师 郎盛新
湖北大学艺术学院动画与数字媒体系主任 余日季
武汉职业技术学院教师 朱 红
湖北嘉一三维高科股份有限公司副总经理兼技术总监 胡 斌

序 言

3D打印技术属于一种非传统加工工艺,也称为增材制造、快速成形等,是近30年来全球先进制造领域兴起的一项集光/机/电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术。与切削等材料“去除法”不同,该技术通过将粉末、液体、片状、丝状等离散材料逐层堆积,“自然生长”成三维实体,因此被通俗叫做“3D打印”。该技术将三维实体变为若干二维平面,大大降低了制造复杂度。理论上,只要在计算机上设计出结构模型,就可以应用该技术在无需刀具、模具及复杂工艺条件下快速地将设计变为实物,符合现代和未来制造业对产品个性化、定制化、特殊化需求日益增加的发展趋势。

3D打印技术将传统的复杂制造系统缩小到一台制造装备中,是制造技术的革命性变革。它将使制造活动更加简单,使得每个家庭、每个人都有可能成为创造的主人。这一发展方向将给社会的生产和生活方式带来新的变革。同时将对制造业的产品设计、制造工艺、制造装备及生产线、材料制备、相关工业标准、制造企业形态乃至整个传统制造体系产生全面、深刻的变革。3D打印技术是提升制造业创新能力的重要途径:①拓展产品创意与创新空间,优化产品性能;②极大地降低了产品研发创新成本、缩短了创新研发周期;③能制造出传统工艺无法加工的零部件,极大地增加了工艺实现能力;④3D打印技术与传统工艺的结合,能极大地优化和提升工艺能力。3D打印技术将是增强创新能力的工具,实现绿色发展的重要途径。3D打印技术将变革传统制造模式,促进制造与服务融合发展:①变革传统制造模式,形成个性化、高性能、复杂零部件的制造系统,全面变革产品研发、制造、服务模式;②支撑个性化定制等高级创新模式实现,并催生专业化创新服务模式;③带动相关支撑产业发展,促进高端制造业发展。

3D打印技术除了对工业和人们的生活等领域产生革命性的影响以外,还有一个重要的影响就是将其用于教学,开发学生的创造力。

湖北,特别是武汉市是我国乃至国际上研发3D打印技术和生产3D打印装备的重地之一,已形成了一个3D打印产业集群,涵盖了3D打印产业链上中下游的各个环节。为了加快3D打印产业的发展,由华中科技大学牵头成立的湖北省3D打印产业技术创新战略联盟,由积极投身于3D打印技术进步、从事相关技术与产品的研究、开发、生产、制造、应用、服务的、具有行业与领域代表性的企业、大专院校和科研单位等相关机构组成,以技术创新需求为纽带,以契约关系为保障,有效整合及协调政、产、学、研、用各方资源,充分发挥自身优势,通过对3D打印共性核心基础技术的研究及自主创新,形成具有自主知识产权的产业标准、专利技术和专有技术,加快创新成果转化为技术标准,组织重大标准化技术联合攻关,带动重大应用示范,推动湖北3D打印产业的发展,实现3D打印技术的推广和应用。同时,通过协同合作,降低风险和成本,提升联盟成员在3D打印相关领域的研究、开发、制造、应用、服务水平,实现共赢共荣。

为进一步普及3D打印技术,推广3D打印技术的应用,由湖北省3D打印产业技术创新战略联盟组织,湖北大学、武汉邦联教育投资有限公司、湖北嘉一三维高科股份有限公司等单位联合发起,组建了“3D打印技术系列教材编委会”,湖北大学校长熊健民教授任主任,以华中科技大学在3D打印技术领域多年的科研和教学成果为基础,集合了联盟多家成员单位的力量,编写了《3D打印技术》系列教材,以便将3D打印技术推广到大中小学的教学过程中,以提高学生的创新能力。

我们希望该教材能够比较科学、客观地向读者介绍和讲述3D打印技术这一新兴技术,使读者对该技术的发展有一个比较全面的认识,也为推动我国3D打印技术与产业进步贡献一分力量。本书可作为高等院校机械工程专业、材料工程专业、职业教育制造工程类的教材与参考书,也可作产品开发和制造业技术人员的参考书。

我们尽量想使本书能够满足不同层次人员的不同需要,涉及的内容非常广泛,但是由于我们的水平和能力所限,编写过程中的错误和缺陷在所难免,殷切地希望同行专家和读者批评指正。

史玉升(湖北省3D打印产业技术创新战略联盟理事长 华中科技大学教授)

2015年11月于华中科技大学

目 录

第一章 3D 打印技术综述

1.1 3D 打印技术的基本原理及起源	1
1.2 3D 打印技术的分类及特点	2
1.2.1 液态树脂光固化技术(SLA)	3
1.2.2 薄材叠层制造技术(LOM)	4
1.2.3 激光选区烧结技术(SLS)	4
1.2.4 丝材熔融挤出成形技术(FDM)	5
1.2.5 三维印刷成形技术(3DP)	5
1.3 3D 打印技术国内外发展现状	6
1.3.1 国外3D打印技术发展现状	6
1.3.2 国内3D打印技术发展现状	6
1.3.3 3D打印技术发展趋势	8
1.4 3D 打印技术的意义	9
1.4.1 3D打印技术的特点	9
1.4.2 3D打印技术在未来工业中的优势和意义	10
1.4.3 3D打印技术在未来医疗和个性创意等领域中的优势和意义	11

第二章 创新设计方法

2.1 正向工程	13
2.1.1 正向工程的原理及意义	13
2.1.2 正向工程的案例:地球仪拼图	13
2.2 逆向工程	15
2.2.1 逆向工程的原理及意义	15
2.2.2 逆向工程测量方法	16
2.2.3 逆向工程的数据处理和建模	21
2.3 正向逆向混合设计	22

第三章 3D 打印中的数据处理及软件

3.1 STL 文件简介	23
3.1.1 STL模型的表示方法	23
3.1.2 STL文件的存储格式	24

3.1.3 STL文件的优缺点及其改进格式	25
3.2 AMF 文件简介	27
3.2.1 AMF文件格式的历史	27
3.2.2 AMF文件的标准	28
3.3 3D 打印制造中的数据处理流程	29
3.3.1 数据分层切片技术	30
3.3.2 扫描路径生成及填充技术	31
3.3.3 支撑生成及优化算法	32
3.4 3D 打印数据处理系统软件介绍	32
第四章 FDM——丝材熔融挤出成形 3D 打印技术	
4.1 FDM 技术的发展概述	34
4.2 FDM 技术的工艺原理	35
4.3 FDM 技术的特点	36
4.4 FDM 技术的应用	37
4.5 丝材的种类及特点介绍	38
第五章 SLS——选择性激光烧结 3D 打印技术	
5.1 SLS 技术的发展历程	40
5.2 SLS 技术的工艺原理	41
5.2.1 SLS的振镜激光扫描系统	42
5.2.2 选择性激光烧结系统的温度控制	44
5.2.3 SLS扫描成形方式	45
5.3 SLS 技术的特点	46
5.4 SLS 技术的应用	46
第六章 SLM——金属粉末激光选区熔化 3D 打印技术	
6.1 SLM 技术的发展概述	48
6.2 SLM 技术的工艺原理	48
6.3 SLM 技术的特点	49
6.4 SLM 技术的应用	51
6.4.1 SLM成形航空航天零件	51
6.4.2 SLM成形生物零件	52
6.4.3 SLM成形随形冷却模具	52
6.5 金属粉末材料的种类及特点介绍	53
第七章 SLA——液态树脂光固化 3D 打印技术	
7.1 SLA 技术的发展概述	55

7.2 SLA 技术的工作原理	55
7.2.1 点扫描成形方式	55
7.2.2 线扫描成形方式	58
7.2.3 面成形方式	59
7.2.4 其他分类方式	59
7.2.5 小结	61
7.3 SLA 技术的特点	61
7.4 液态树脂的种类及特点介绍	61
7.5 SLA 技术的应用	63

第八章 LOM——薄材叠层制造 3D 打印技术

8.1 LOM 技术的发展概述	64
8.2 LOM 技术的工艺原理	64
8.3 LOM 技术的特点	68
8.4 薄层材料的种类及特点介绍	68
8.5 LOM 技术的应用	68

第九章 其他 3D 打印技术简介

9.1 3DP 技术——三维打印技术	70
9.2 DLP——光成型技术	71
9.3 EBM——电子束选区熔化 3D 打印技术	71
9.4 CLIP——连续液态界面制造 3D 打印技术	72

第十章 快速制模技术

10.1 软模技术	74
10.1.1 原型件的准备	74
10.1.2 制作硅橡胶模具	74
10.1.3 浇注品的制作	77
10.1.4 硅胶膜应用实例	80
10.2 过渡模技术	80
10.2.1 铝填充环氧树脂模	81
10.2.2 SLA 成形的树脂壳-铝填充环氧树脂背衬模	83
10.3 硬模技术	86
10.3.1 直接加工金属模具	86
10.3.2 用 SLS 方法烧结铸型	90
10.3.3 基于快速原型的喷涂法	91
10.3.4 陶瓷壳砂型法	91
10.3.5 石墨研磨法	92

第十一章 桌面式 3D 打印机 (FDM) 使用及操作指南

11.1 认识桌面式 3D 打印机 (FDM)	93
11.2 桌面式 3D 打印机首次安装及使用指南	94
11.2.1 安装注意事项	94
11.2.2 基本界面操作指南	94
11.3 桌面式 3D 打印机——打印机核心软件介绍	97
11.3.1 主界面	98
11.3.2 打印机设置	98
11.3.3 加载模型及模型操作	100
11.3.4 切片	103
11.3.5 打印预览	103
11.3.6 手动控制	104
11.3.7 SD 卡功能	107
11.4 3D 打印模型设计的技巧及注意事项	107
后记	109

第一章 3D 打印技术综述

3D 打印技术不需要传统的刀具、夹具及多道加工工序,利用三维设计数据在一台设备上由程序控制自动、快速和精确地制造出任意复杂形状的零件,从而实现设计和数字化“自由制造”。该技术可以实现许多过去难以制造的复杂结构零件的成形,并大大减少加工工序,缩短加工周期。如同蒸汽机、福特汽车流水线引发的工业革命,3D 打印技术被视为“一项将要改变世界的技术”而引起全球关注。3D 打印技术正在改变我们传统的生产方式和生活方式。随着3D 打印技术应用的不断拓展,它将不再局限在制造技术领域,而将成为社会创新的工具,使得人人都可以成为创造者,支撑创新型社会的发展。

1.1 3D 打印技术的基本原理及起源

3D 打印技术属于非传统加工工艺,也称为增材制造技术、快速成形技术、快速原型制造技术等,是近30年来全球先进制造领域兴起的一项集光/机/电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术,名称各异的叫法从不同方面表达了该技术的特点。

3D 打印技术与切削等材料“去除法”不同,它是一种以数字三维CAD模型文件为基础,运用高能束源或其他方式,将液体、熔融体、粉末、丝、片等特殊材料进行逐层堆积粘结,最终叠加成型,直接构造出实体的技术,因此被通俗叫做“3D 打印”。该技术将三维实体变为若干二维平面,大大降低了制造复杂度。理论上,只要在计算机上设计出结构模型,就可以应用该技术在无需刀具、模具及复杂工艺条件下快速地将设计变为实物。该技术特别适合于航空航天、武器装备、生物医学、模具等领域中批量小、结构非对称、曲面及内空结构零部件(如航空发动机空心叶片、人体骨骼修复体、随形冷却水道)的快速制造,符合现代和未来制造业的发展趋势。

3D 打印技术的基本原理是:由设计者首先在计算机上绘出所需零件的三维模型(图 1-1a),对其进行分层切片,得到各层截面的二维轮廓(图 1-1b)。按照这些轮廓,成形头通过激光扫描(图 1-1c)选择性地固化一层层液态树脂(或切割一层层纸,或烧结一层层粉末材料,或喷涂一层层热熔材料或粘结剂等),形成各个截面轮廓,并逐步顺序叠加成三维制件(图 1-1d)。整个制造过程

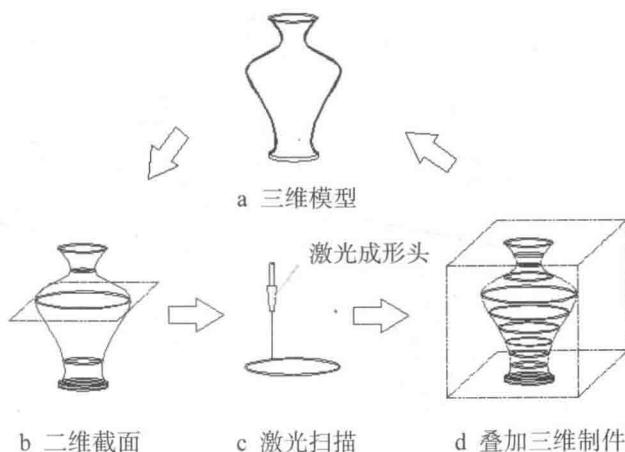


图 1-1 3D 打印技术的基本原理

可以比喻为一个“积分”的过程。

3D 打印技术的核心制造思想最早起源于美国。早在 1892 年, J. E. Blather 在其专利中, 曾建议用分层制造法构成地形图。1902 年, Carlo Baese 的专利提出了用光敏聚合物制造塑料件的原理。1940 年, Perera 提出了在硬纸板上切割轮廓线, 然后将这些纸板粘结成三维地形图的方法。20 世纪 50 年代之后, 出现了几百个有关 3D 打印技术的专利。20 世纪 80 年代末之后 3D 打印技术有了根本性的发展, 涌现出十余种 3D 打印的新方法和新工艺, 注册了更多的 3D 打印技术方面的新专利。在欧美成立了多家利用这些专利技术生产 3D 打印设备的公司, 推出了不同类型的商用 3D 打印设备。

总体上, 美国在设备研制、生产销售方面占全球的主导地位, 其发展水平及趋势基本代表了世界的发展水平及趋势。欧洲各国和日本也不甘落后, 纷纷进行相关技术研究和设备研发。香港和台湾比内地起步早, 台湾各大学安装多台进口 3D 打印设备, 在军事领域也有所应用, 香港生产力促进局和香港科技大学、香港理工大学、香港城市大学等都拥有 3D 打印设备, 其重点是有关技术的应用与推广。

国内自 20 世纪 90 年代初开始进行研究, 华中科技大学、清华大学、西安交通大学自主开发了 3D 打印设备并实现产业化, 这三家大学是我国最早开展 3D 打印技术研发和产业化的单位。随后, 北京航空航天大学、西北工业大学等在航空航天大型复杂金属构件直接 3D 打印技术方面展开研究, 并取得实质性进展。

随着 3D 打印技术工艺、材料和装备的逐渐成熟, 3D 打印技术由快速成形阶段发展进入新的快速制造阶段。而快速成形技术以“3D 打印”这一更加亲民的概念被越来越多的人熟知。如今由于诸多快速成形和快速制造等 3D 打印设备均以 3D 打印机示人, 最早的 3D 打印已可被称为“经典 3D 打印技术”。“新兴的 3D 打印技术”可以直接制造为人所用的功能零件和传统工艺使用的工具, 包括电子产品绝缘外壳, 金属结构件, 高强度塑料零件, 劳动工具, 橡胶减震制件, 汽车航空工业中一些耐高温的陶瓷部件、各类模具等。



图 1-2 Empire 试制了一辆仅供展示的 3D 打印钛金属自行车车架

1.2 3D 打印技术的分类及特点

自 20 世纪 80 年代美国出现第一台商用 3D 打印设备后, 在近 30 年时间内 3D 打印技术得到了快速发展。根据所用材料及生成片层方式的区别, 3D 打印技术不断拓展出新

的技术路线和实现方法。较成熟的技术主要有以下四种方法：液态树脂光固化（Stereolithography Apparatus，简称SLA技术）、薄材叠层制造（Laminated Object Manufacturing，简称LOM技术）、激光选区烧结（Selective Laser Sintering，简称SLS技术）、丝材熔融挤出成形（Fused Deposition Modeling，简称FDM技术），每种类型又包括一种或多种技术路线。目前LOM技术逐渐消落，其他几种方法逐渐向低成本、高精度、多材料方面发展。

随着3D打印技术工艺和设备的成熟，新材料、新工艺的出现，该技术由快速原型阶段进入快速制造和普及化新阶段，最显著地体现在金属零件直接快速3D打印制造以及桌面型3D打印设备。

目前，可直接制造金属零件的3D打印技术有基于同轴送粉的激光近成形技术（Laser Engineering Net Shaping，简称LENS技术）和基于粉末床的激光选区熔化技术（Selective Laser Melting，简称SLM技术）及电子束熔化制造技术（Electron Beam Melting，简称EBM技术）。激光近成形LENS技术能直接制造出大尺寸的金属零件毛坯；激光选区熔化SLM技术和电子束熔化制造EBM技术可制造复杂精细金属零件。

由于系统成本较高、材料特殊以及操作复杂，在目前阶段3D打印技术主要应用于科研以及工业应用。随着FDM 3D打印技术的发展和推出的价格低廉的桌面型3D打印机，3D打印技术的应用范围得到了极大扩展。

1.2.1 液态树脂光固化技术(SLA)

SLA技术的工作原理如图1-3所示。光固化成形是一种用紫外线照射液态的光敏树脂使其固化成所需形状的技术。首先，在计算机上用三维CAD系统构成产品的三维实体模型，然后对其进行分层切片，得到各层截面的二维轮廓数据。依据这些数据，计算机控制紫外激光束在液态光敏树脂表面扫描，光敏树脂中的光引发剂在紫外光的辐射下，裂解成活性自由基，引发预聚体和活性单体发生聚合，扫描区域被固化，产生一薄固化层。然后将已固化层下沉一定高度，让其表面再铺上一层液态树脂，用第二层的数据控制激光束扫描，这样一层层地固化，逐步顺序叠加，最终形成一个立体的原型。

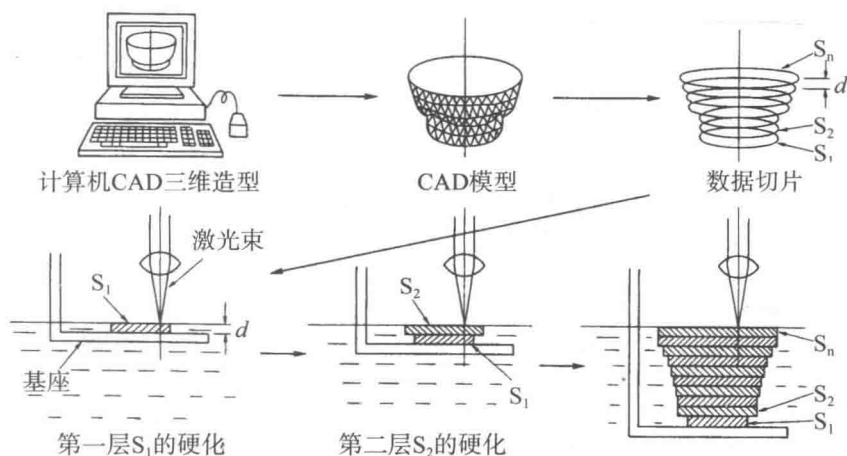


图1-3 SLA技术工作原理图

该方法是目前世界上研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的一种3D打印方法。目前，

研究和开发SLA技术的有3D System公司、EOS公司、F&S公司、CMET公司、D-MEC公司、Teijin Seiki公司、Mitsui Zosen公司、华中科技大学、西安交通大学等。国内外研究者在SLA技术的成形机理、控制制件变形、提高制件精度等方面,进行了大量研究。

1.2.2 薄材叠层制造技术(LOM)

LOM技术的工作原理如图1-4所示。薄层材料(纸、塑料薄膜或复合材料)单面涂敷一层热熔胶,通过热压装置使材料表面达到一定温度,薄层之间粘合在一起。随后位于其上方的激光器按照CAD模型切片分层所获得的数据,将薄层材料切割出零件该层的内外轮廓。激光每加工完一层后,工作台下降相应的高度,然后再将新的一层薄层材料叠加在上面,重复前述过程。如此反复,逐层堆积生成三维实体。非原型实体部分被切割成网格,保留在原处,起支撑和固定作用,制件加工完毕后,可用工具将其剥离。

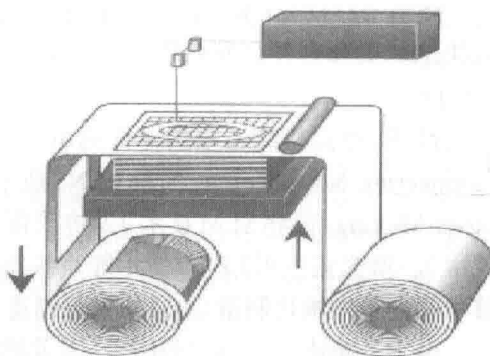


图1-4 LOM技术工作原理图

LOM方法具有系统及成形材料价格低廉、制件精度高、成形速度快、成形时无须特意设计支撑等优点。

1.2.3 激光选区烧结技术(SLS)

SLS技术的工作原理如图1-5所示。该方法使用粉状材料作为加工物质,并用激光束分层扫描烧结。成形时,在事先设定的预热温度下,先在工作台上用辊筒铺一层粉末材料,然后,激光束在计算机的控制下,按照截面轮廓的信息,对制件的实心部分所在的粉末进行扫描,使粉末的温度升至熔点,于是粉末颗粒交界处熔化,粉末相互粘结,逐步得到各层轮廓。在非烧结区的粉末仍呈松散状,作为工件和下一层粉末的支撑。一层成形完成后,工作台下下降一个截面层的高度,再进行下一层的铺料和烧结,如此循环,最终形成三维工件。三维工件完成后,未熔化的粉末可以被刷掉或刮离制件。研究和开发SLS技术的有华中科技大学、3D System公司、EOS公司、北京隆源公司、湖南华曙公司、南京航空航天大学等。

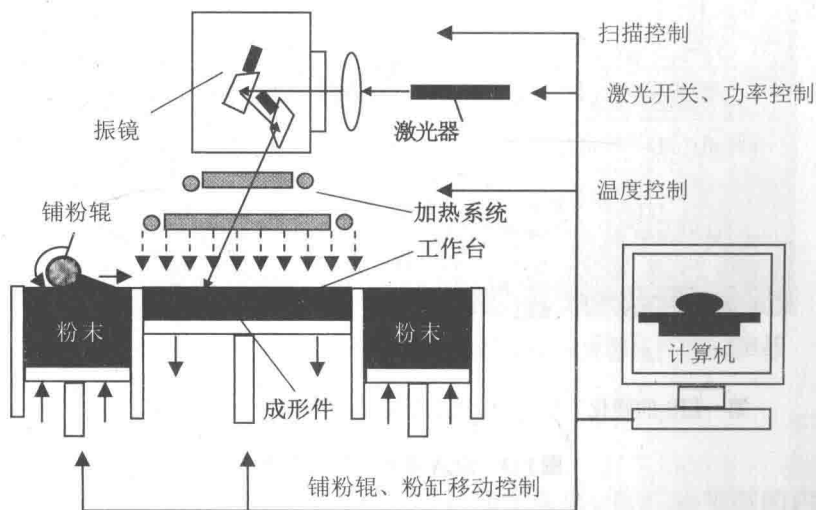


图1-5 SLS技术工作原理图

1.2.4 丝材熔融挤出成形技术(FDM)

FDM技术的工作原理如图1-6所示。采用丝状材料作为加工物质,喷头装置在计算机的控制下,可根据加工工件截面轮廓的信息做X、Y方向的平面运动,而工作台作息做Z方向(垂直高度)的运动。丝状热塑性材料(如塑料丝、蜡丝、聚烯烃树脂丝、尼龙丝、聚酰胺丝)由供丝机构送至喷头,并在喷头中加热至熔融态,然后被选择性地涂覆在工作台上,快速冷却后形成加工工件截面轮廓。当一层成形完成后,工作台下降一截面层的高度,喷头再进行下一层的涂覆,如此循环,最终形成三维产品。它与前三种工艺不同的是成形过程不需要激光器,设备价格便宜。

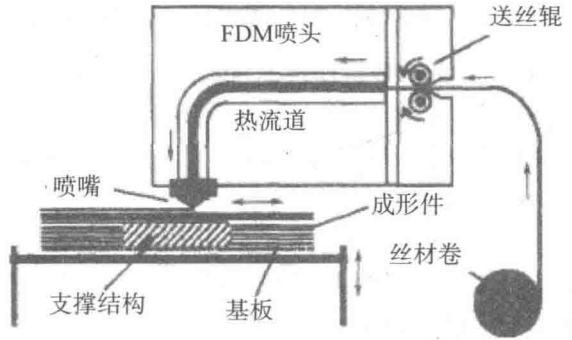


图1-6 FDM技术工作原理图

熔丝材料主要是ABS、人造橡胶、铸蜡和聚酯热塑性塑料。1998年澳大利亚的Swinburn工业大学,研究了一种金属-塑料复合材料丝。1999年Stratasys公司开发出水溶性支撑材料,有效地解决了复杂、小型孔洞中的支撑材料难于或无法去除的难题。

1.2.5 三维印刷成形技术(3DP)

三维印刷成形技术(Three Dimension Printing, 简称3DP技术)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。所不同的是材料粉末不是通过烧结连接起来的,而是通过喷头用粘结剂(如硅胶)将零件的截面“印刷”在材料粉末上面,工作原理如图1-7所示。用粘结剂粘接的零件强度较低,还须后处理。先烧掉粘结剂,然后在高温下渗入金属,使零件致密化,提高强度。

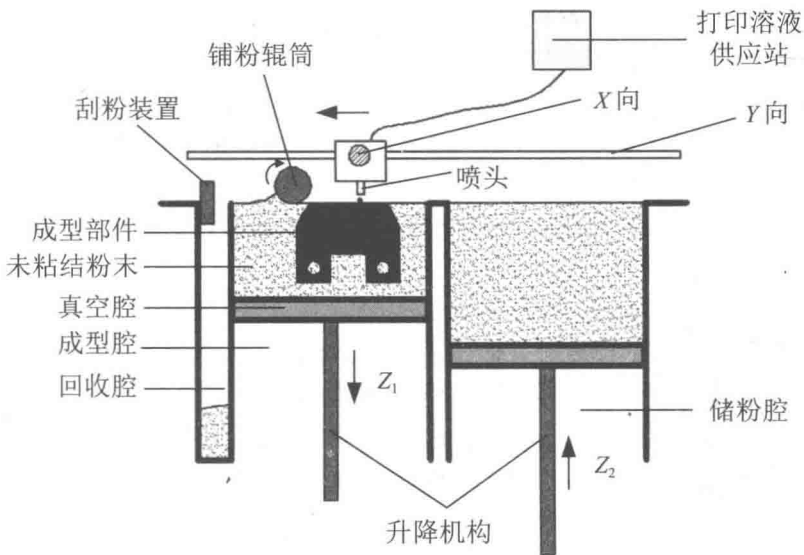


图1-7 3DP技术工作原理图

该工艺已被美国的 Soligen 公司以 DSPC(Direct Shell Production Casting) 名义商品化, 用以制造铸造用的陶瓷壳体和芯子。

1.3 3D 打印技术国内外发展现状

1.3.1 国外 3D 打印技术发展现状

3D 打印技术的核心为成形装备。德国、美国和日本在该领域处于世界领先水平, 并已形成了多家专业化、规模化研制和生产 3D 打印装备的知名企业, 如德国 EOS、美国 3D Systems 以及日本 CMET 等公司。

美国 3D Systems 公司生产的 SLA 装备在国际市场上占最大比例。该企业自 1988 年推出首台 SLA-250 型商品化装备后, 又相继推出 SLA-250HR、SLA-3500、SLA-5000、SLA-7000 以及最新的 Viper Pro system 等型号 SLA 装备(最大成形空间达到 1500 mm × 750 mm × 550mm)。其主要的技术创新表现在: ①利用半导体泵浦的三倍频 Nd: YVO₄(钕钒钷酸盐)固体激光器替代 He-Cd 激光器, 将装备使用寿命增长至 5000 小时以上; ②采用被称为 Zephyr™ Recoating System 的专利涂层技术替代普通的刮板涂层技术, 使最小涂层厚度由约 0.1mm 减至 0.025mm, 大大提高制件成形精度; ③将扫描速度提高至约 10m/s, 大大提高了制件成形效率。

日本的 DENKEN 工程公司和 AUTOSTRADE 公司打破 SLA 装备使用紫外光源的常规, 率先使用 680nm 左右波长的半导体激光器作为光源, 大大降低了 SLA 装备的成本。

在 SLS 装备方面, 德国 EOS 公司和美国 3D Systems 公司是世界上该技术的主要提供商。成形材料由早期的高分子材料拓展至金属、陶瓷等功能材料, 成形精度约为 0.1 ~ 0.2mm, 成形空间逐渐增大, 最大台面超过 700mm。

在金属直接 3D 打印方面, 世界范围内已经有多家成熟的装备制造厂商, 包括德国 EOS 公司(EOSING M270)、美国 MCP 公司(Realizer 系列)、德国 Concept laser 公司(M Cusing 系列)。瑞典 Acram 公司的 EBM 装备也占有重要地位。

目前 3D 打印技术的应用范围和领域非常广泛, 除了辅助更新换代快的家电、数码新产品开发外, 还在航空航天、船舶、武器装备、生物制造等领域获得了成功的工程应用。例如, 美国波音公司应用 3D 打印技术与传统铸造技术相结合, 制造出铝合金、钛合金、不锈钢等不同材料的货舱门托架等制件; 著名的 GE 公司应用 3D 打印技术制造航空航天与船舶用叶轮等关键制件。美国军方应用 3D 打印技术辅助制造导弹用弹出式点火器模型, 取得了良好效果。

在生物 3D 打印制造方面, 欧美等发达国家研究较多、范围较广且已获得了临床应用。例如, 美国 Espersen 等人利用生物相容性树脂, 通过 SLA 技术成形医用助听器模型; 美国 Andino 等人利用 SLA 技术为特殊病人制作眼睛水晶体模型; 美国 Culp 等人使用 SLA 技术根据病人牙齿的 3D 图形制造人工牙齿; 并研究牙齿排列和修复等医疗问题; 意大利 Martinetti 等人使用生物相容性的陶瓷粒子改性光敏树脂, 利用 SLA 技术制造了人体骨骼修复体, 并进行了临床应用。

1.3.2 国内 3D 打印技术发展现状

我国国内从事商品化 SLA 装备研制的主要有陕西恒通智能机器有限公司(技术依托于

西安交通大学)、武汉华科三维科技有限公司(技术依托于华中科技大学)、北京殷华激光快速成型与模具技术有限公司(技术依托于清华大学)和上海联泰科技有限公司等。其中,陕西恒通智能机器有限公司的SLA装备代表了该种技术国内的最高水平。该单位于1993年在国内率先开展SLA技术的研究,先后研制成功了使用He-Cd气体激光器的LPS系列和使用Nd:YVO₄半导体泵浦紫外固体激光器的SPS系列SLA装备。为了降低成本,该单位于1996年推出了一种采用特殊紫外灯光源替代激光器的CPS系列低成本SLA装备。该装备采用大功率紫外灯光源经椭球面反射罩实现反射聚焦,聚焦后的紫外光经光纤耦合传输,再经过透镜聚焦,最后将紫外光传到树脂液面上。2001年该单位又研制出HLPS250型高分辨率SLA装备,采用f- θ 镜实现平面聚焦,使最小激光光斑直径约为10 μ m,采用约束液面法涂层,使最小涂层厚约为10 μ m,成形制件精度达到 ± 0.01 mm。

我国国内从事商品化SLS装备研制和生产的单位主要有武汉华科三维科技有限公司和通过引进、消化、吸收再创新的北京隆源自动成型系统有限公司等。华中科技大学于20世纪90年代初在国内率先开展LOM、SLA、SLS与SLM技术的研究。以SLS技术为例,在2000年左右研制成功了基于CO₂激光器的SLS装备,成形台面达到了400mm \times 400mm,制件精度约为0.2mm。通过对成形材料、智能预热、扫描工艺、关键机构等内容的自主创新研究,于2005年左右研制成功了成形台面达500mm的新型SLS装备,可广泛应用于高分子、金属、陶瓷、覆膜砂等功能材料的3D打印制造,整机性能接近国外先进水平。与此同时,还研制了国产化的三维振镜系统,配以国产化的激光器使SLS装备的成本降低了50%以上,大大提高了产品的市场竞争力。2005年以后,为了满足大尺寸制件的整体3D打印制造,该单位研制了当时具有世界最大工作台面(1000mm \times 1200mm \times 1400mm)的大型SLS装备,为我国大型飞机、船舰和机床等装备制件的快速开发提供了重要的技术平台。在SLS技术基础上,华中科技大学从2003年开始研发直接制造金属零部件的SLM技术与装备,目前的工作台面达500mm \times 500mm,拥有自主知识产权,已通过武汉华科三维科技有限公司产业化,并投放市场。

北京航空航天大学与西北工业大学研制了可用于航空航天复杂结构件快速制造的LENS装备,并较为系统地研究了金属零件激光3D打印材料、工艺及零件性能。目前已制造了专用LENS成形装备,可直接成形具有较复杂外形的不锈钢、镍基高温合金、钛及钛合金零件。研究成果已在我国多个机型上实现了装机应用。

随着我国经济的快速发展,3D打印技术的应用范围日益广泛,应用领域不断拓展。首先,在行业层面我国许多制造企业先后引入3D打印技术,辅助自主品牌产品的快速和自主开发。如汽车制造企业分别建立了3D打印部门,利用3D打印技术完成新车型模型的制作,并辅助相关关键制件的功能验证与快速制造。在沿海及其他经济发达地区,如上海、深圳、天津、青岛、东莞等地相继建立了3D打印技术服务中心,利用多种3D打印技术辅助该地区多领域企业的新产品快速开发,为个性化突出的家电、数码等产品的快速更新换代提供了重要的技术支撑。其次,在科研和技术研发层面,我国在生物制造、功能制件快速制造等先进应用领域也开展了众多的应用研究与推广工作。

在上述各类工业级3D打印设备发展的同时,从2011年开始,国内也开始陆续出现桌面级的3D打印机,早期是仿制国外的开源FDM打印机(基于RepRap),然后开始有了自己的