

三维

3D PRINTING DESIGN
AND MANUFACTURING

打印设计与制造

杨继全 戴 宁 侯丽雅 著



科学出版社

三维打印设计与制造

杨继全 戴 宁 侯丽雅 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

三维打印是基于数字化的先进设计与制造技术,广泛应用于工业产品开发、教育与科研、医疗卫生、建筑、军事、艺术等领域。三维打印也是一门涉及机械、电子、计算机、化学、物理、材料等多学科交叉技术,且其内容随着相关学科与专业的发展而不断丰富。

本书结合作者在三维打印领域从事多年科研、教育与产业转化等方面的成果,围绕三维打印技术各关键技术进行阐述,共分9章,分别为绪论、三维打印基础理论、三维打印材料技术、三维打印能源技术、三维打印数据反求技术、三维打印软件技术、异质材料三维打印技术、三维实体微打印技术及三维打印技术在快速模具制造、医疗工程等方面的应用。

本书可供机械工程、仪器科学与技术、电气工程、电子科学与技术、自动化、计算机、化学工程等专业的本科生、研究生作为专业教学用书,也可供其他涉及三维打印技术的教学与科研人员及工程技术人员等参考用。

图书在版编目(CIP)数据

三维打印设计与制造/杨继全,戴宁,侯丽雅著. —北京:科学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-03-038057-2

I. ①三… II. ①杨… ②戴… ③侯… III. ①三维-快速成型技术 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 250518 号

责任编辑:于盼盼 惠 雪/责任校对:桂伟利

责任印制:肖 兴/封面设计:许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2013年11月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2013年11月第一次印刷 印张:18 1/4 插页:6

字数:355 000

定价:69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着科学技术的发展和社会需求的多样化,全球统一市场和经济全球化的逐步形成,产品市场的竞争更加激烈。产品上市时间的迟与早是制造业市场竞争的焦点,落伍者将丧失市场现有份额,甚至被挤出市场,因此,要求设计者不但能根据市场的需求尽快设计出新产品,而且能在尽可能短的时间内制造出产品的原型,从而进行必要的测试。于是,产品快速开发的技术和手段便成为制造企业的核心竞争力。

三维打印技术就是顺应这一潮流而出现的先进制造技术。该技术能自动、直接、快速、精确地将设计思想物化为具有一定功能的原型或直接制造零件,它集成了机械科学、计算机科学、材料科学、物理科学等相关学科与技术。该制造技术既是综合性和交叉性的前沿制造技术,是先进制造技术的重要组成部分,也是制造技术在制造理念上的一次革命性的飞跃。三维打印技术目前在美国、欧洲、日本等地已被广泛应用于汽车制造、航空航天、建筑、教育科研、卫生医疗以及娱乐等领域,并受到制造业界及各类用户的普遍重视。

本书内容共分9章。第1章绪论,简要介绍三维打印技术的基本知识,包括三维打印成型原理、定义、特点、主要成型工艺及国内外发展现状等;第2章介绍三维打印技术的基础理论,主要介绍现代成型理论、三维打印零件的变形理论、零件的精度问题等;第3章介绍三维打印中的材料技术,包括各成型工艺材料的性能、供料系统、材料的后处理等;第4章介绍三维打印中的能源技术,包括各成型的光学技术、加热系统及喷墨系统;第5章介绍三维打印中的数据反求技术,包括其发展历史、原理、数据采集技术等;第6章介绍三维打印中的软件技术,包括三维设计技术、模型处理技术、三维打印成型工艺数据处理技术等;第7章介绍异质材料三维打印技术,包括其建模的理论基础、建模方法、成型方法等;第8章介绍三维实体微打印技术,包括微打印基础理论、微打印成型设备、各种微打印应用及发展趋势等;第9章介绍三维打印技术的应用,包括在模具制造方面的快速模具制造技术、在医疗工程方面的应用及新产品设计、建筑、艺术等方面的应用。

由于三维打印技术涉及的学科和知识面广泛,远非作者的知识、能力和经验所能完全覆盖,因而结合作者自身的科研经历,在书中引用了经过作者消化的、许多专家学者的创新思想、精辟理论和出色应用。本书在编写的过程中查阅了大量的文献,在此向原作者表示感谢!部分文献由于牵涉内容不多,有些文献由于

作者疏忽，没有列举的，也向原作者表示歉意和敬意！

鉴于作者的学识有限，某些问题阐述和理解可能存在不足，敬请读者和专家批评指正。

本书由南京师范大学的杨继全负责总体规划并编写第1、2、3、4、9章，南京航空航天大学戴宁、崔海华负责编写第5、6章，南京师范大学的杨继全和朱玉芳负责编写第7章，南京理工大学的侯丽雅、王洪成负责编写第8章。南京理工大学的侯丽雅教授和章维一教授、南京航空航天大学的程筱胜教授、南京师范大学的彭晨教授等对本书进行了认真细致地审阅，并提出了许多宝贵建议。

本书得到国家自然科学基金（61273243、51175268、11102090）、国家863计划（2005AA420240）、江苏省重大科技支撑与自主创新基金（BE2012201）、江苏省科技支撑计划（工业）重点项目（BE2013012）、江苏省科技成果转化专项资金重大项目（BA20130518）等项目的支持。

在编写本书的过程中，南京师范大学和江苏省三维打印装备与制造重点实验室的莫志勇、冯春梅、郭爱琴、程继红、朱莉娅、王琼等老师给予了许多无私帮助与支持，尹亚楠、王璟璇、姜杰、吴静雯、李成、徐路钊、陆子渊、李永超等研究生做了大量的资料查阅和汇总等工作，作者的家人也付出了艰辛劳动，并给予了巨大支持，在此向以上单位和个人致以诚挚的谢意。最后衷心感谢科学出版社在本书出版过程中给予的大力支持。

著 者

2013年于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 三维打印技术概述	1
1.1.1 三维打印成型原理	1
1.1.2 三维打印定义	2
1.1.3 三维打印起源	3
1.1.4 三维打印技术分类	3
1.1.5 三维打印特点	5
1.1.6 三维打印技术应用	5
1.2 三维打印成型工艺	7
1.2.1 光固化成型	7
1.2.2 叠层实体制造	8
1.2.3 选择性激光烧结	10
1.2.4 熔融沉积制造	11
1.2.5 三维印刷成型	11
1.2.6 形状沉积制造	12
1.2.7 三维打印各成型工艺比较	12
1.3 三维打印技术的发展现状	14
1.3.1 国外三维打印发展水平	14
1.3.2 国内三维打印技术的发展现状	16
1.3.3 我国三维打印技术研究的不足及发展对策	17
1.4 三维打印发展的趋势	18
参考文献	20
第 2 章 三维打印基础理论	23
2.1 现代成型理论	23
2.2 三维打印的统一描述模型	24
2.2.1 三维打印零件的固化单元及 CAD 模型的实体点	25
2.2.2 离散-叠加过程的 3 个层次	25
2.3 三维打印零件的变形理论	26
2.3.1 三维打印零件的特点	26
2.3.2 三维打印零件变形的宏观表现	27

2.3.3	三维打印零件的层内应力分析	28
2.3.4	三维打印零件的层间应力分析	33
2.4	三维打印零件的精度研究	36
2.4.1	三维打印的精度分类	36
2.4.2	三维打印零件精度检测的测量次数的优化	37
2.4.3	影响三维打印零件精度的因素	39
2.5	异质材料三维打印的理论基础研究	41
2.5.1	STL 文件格式	41
2.5.2	STL 的细化	42
2.5.3	基于 STL 文件的微四面体的创建	42
2.5.4	微四面体创建流程	44
	参考文献	46
第 3 章	三维打印材料技术	47
3.1	概述	47
3.2	SL 工艺成型材料	47
3.2.1	概述	47
3.2.2	光敏树脂复合材料	53
3.2.3	发展与展望	55
3.3	SLS 工艺成型材料	58
3.3.1	高分子粉末材料	58
3.3.2	石蜡粉末材料	59
3.3.3	陶瓷粉末材料	59
3.3.4	覆膜砂粉末材料	60
3.3.5	塑料粉末材料	60
3.3.6	金属粉末材料	60
3.4	LOM 工艺成型材料	61
3.4.1	纸材	61
3.4.2	陶瓷	63
3.5	FDM 工艺成型材料	63
3.5.1	熔丝线材	64
3.5.2	FDM 陶瓷材料	64
3.5.3	木塑复合材料	65
3.5.4	FDM 支撑材料	65
3.6	3DP 工艺成型材料	66
3.6.1	塑料材料	66
3.6.2	金属材料	67
3.6.3	陶瓷材料	67

3.6.4 其他成型材料	68
3.6.5 3DP 支撑材料	69
3.7 供料系统的设计	70
3.7.1 浸没式	70
3.7.2 喷涂式	70
3.7.3 辊刮式	72
3.7.4 辊卷式	72
3.8 材料的后处理	73
3.8.1 剥离	73
3.8.2 修补、打磨和抛光	73
3.8.3 表面涂覆	73
参考文献	78
第4章 三维打印能源技术	83
4.1 三维打印中的能源概述	83
4.2 SL 工艺中的光学技术	83
4.2.1 光源选择与设计的依据	83
4.2.2 光源比较与选择	84
4.2.3 SL 工艺中的紫外辐射光学系统	86
4.3 SLS 工艺中的光学系统	89
4.3.1 激光器	89
4.3.2 扫描方式	89
4.3.3 激光与金属粉末材料的相互作用	91
4.4 FDM 工艺中的加热系统	92
4.4.1 供料装置	92
4.4.2 成型工艺参数	93
4.5 LOM 工艺中的加热系统	94
4.5.1 加热系统分类	94
4.5.2 几种热压方式的比较	95
4.5.3 热压系统的组成	96
4.6 3DP 工艺中的喷墨系统	96
参考文献	99
第5章 三维打印数据反求技术	101
5.1 三维打印数据反求技术概述	101
5.1.1 三维打印数据反求技术起源	101
5.1.2 三维打印数据反求技术基本工作原理	102
5.1.3 三维打印数据反求技术分类	103
5.1.4 三维打印数据反求技术应用	103

5.1.5	国外三维反求技术的研究现状	106
5.1.6	国内三维反求技术的研究现状	107
5.2	体数据反求技术	107
5.2.1	体数据反求技术概述	107
5.2.2	典型的体数据反求技术——层去图像扫描测量法	110
5.3	面数据反求技术	112
5.3.1	面数据反求技术概述	112
5.3.2	典型的面数据反求技术 1——三坐标测量法	115
5.3.3	典型的面数据反求技术 2——结构光三维扫描法	118
参考文献		134
第 6 章	三维打印软件技术	137
6.1	概述	137
6.2	设计方法分类	139
6.2.1	正向设计	139
6.2.2	逆向设计	139
6.2.3	正逆向混合设计	140
6.3	正向设计技术	140
6.3.1	正向设计建模的发展	140
6.3.2	正向建模方法	142
6.3.3	典型的设计软件介绍	144
6.4	逆向设计技术	147
6.4.1	逆向设计概述	147
6.4.2	离散数据及其表示	147
6.4.3	数据预处理	153
6.4.4	离散曲面建模	156
6.4.5	典型离散建模设计软件	160
6.5	模型支撑添加技术	165
6.5.1	添加支撑的必要性	165
6.5.2	添加支撑的类型	166
6.5.3	支撑添加的途径	167
6.5.4	支撑与零件的合并	168
6.6	STL 切片技术	168
6.6.1	定层厚拓扑切片	169
6.6.2	定层厚容错切片	171
6.6.3	直接分层切片	172
6.7	三维打印成型工艺数据处理	174
6.7.1	文件数据结构	174

6.7.2	层片截面内外轮廓的识别	175
6.7.3	光斑半径补偿	176
6.7.4	扫描工艺	178
6.7.5	仿真与加工	181
参考文献		182
第7章 异质材料三维打印技术		186
7.1	概述	186
7.1.1	异质实体分类	186
7.1.2	异质材料零件应用	188
7.1.3	异质材料零件的发展现状	189
7.2	静态型异质材料建模理论研究	190
7.2.1	HEO CAD 材料空间描述	190
7.2.2	HEO 静态建模方法的研究现状	192
7.2.3	基于微四面体的 HEO 内外表面材料设计	194
7.2.4	HEO 内部材料设计	195
7.2.5	总结	196
7.3	基于空间点云数据的异质材料零件动态建模方法	196
7.3.1	基于特征节点的动态 HEO 材料建模	197
7.3.2	设计实例	198
7.4	基于微滴喷射的 HEO 零件的成型方法研究	200
7.4.1	多材料成型技术的研究现状	200
7.4.2	利用彩色 STL 模型表示零件的材料信息	200
7.4.3	多材料模型的切片	201
7.4.4	基于材料特征节点的 HEO 彩色模型数据处理	201
7.4.5	异质材料模型的设计和制造流程	206
参考文献		212
第8章 三维实体微打印技术		214
8.1	概述	214
8.2	三维实体微打印基础理论	214
8.2.1	微立体光刻三维实体微打印基础理论	214
8.2.2	液滴微喷射三维实体微打印基础理论	216
8.3	三维实体微打印成型设备	224
8.3.1	液料光固化微立体光刻设备	225
8.3.2	粉末热烧结微立体光刻设备	230
8.3.3	激光微熔覆设备	231
8.4	三维实体微打印应用	233
8.4.1	微立体光刻三维微打印应用	233

8.4.2 液滴微喷射三维微打印应用	238
8.5 三维实体微打印发展趋势	246
8.5.1 开发新型微打印材料	246
8.5.2 开发新的成型能源	247
8.5.3 新型液滴微喷射方法的研究	247
8.5.4 数据采集、处理和监控软件的研发	248
8.5.5 应用领域的拓展	248
参考文献	248
第9章 三维打印技术应用	253
9.1 三维打印技术在快速模具制造中的应用	253
9.1.1 快速模具制造技术的产生	253
9.1.2 快速模具制造技术的应用	253
9.1.3 快速模具制造在国内外的研究现状	254
9.1.4 快速模具的发展趋势	255
9.1.5 快速模具制造的分类	256
9.2 三维打印技术在医疗工程中的应用	259
9.2.1 三维打印医学模型的作用	259
9.2.2 用3DP工艺制作释放药物系统	260
9.2.3 用三维打印技术制作人工骨	262
9.2.4 三维打印医学模型的有效性考查	264
9.2.5 三维打印技术在医学应用方面的发展趋势	266
9.3 三维打印技术在建筑行业的应用	269
9.4 三维打印技术在其他领域中的应用	272
9.4.1 新产品开发	272
9.4.2 艺术创作	274
9.4.3 原型设计	274
参考文献	276
附录	278
彩图	

第 1 章 绪 论

在制造业日趋国际化的 21 世纪，缩短产品开发周期和减少开发新产品投资风险，已成为企业赖以生存的关键，因而也相继涌现出大量的先进制造理念及制造技术，其中典型的是 20 世纪 80 年代末、90 年代初发展起来的三维打印（three dimensional printing，也称 3D 打印、快速成型、增材制造等）技术，它突破了传统的加工模式，不需机械加工设备即可快速地制造形状极为复杂的工件，被认为是近 20 年制造技术领域的一次重大突破，众多国内外媒体称其为“第三次工业革命”的代表性技术。作为与科学计算可视化和虚拟现实相匹配的高新技术，三维打印技术提供了一种可测量、可触摸的手段，是设计者、制造者与用户之间的新媒体。三维打印技术综合了机械、电子、光学、材料等学科，可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转化为具有一定功能的原型或直接制造零件/模具，从而有效地缩短了产品的研究开发周期。三维打印是当前世界上先进的产品开发与快速工具制造技术，其核心是基于数字化的新型成型技术。它对于制造企业的模型、原型及成型件的制造方式正产生深远的影响^[1,2]。

1.1 三维打印技术概述

1.1.1 三维打印成型原理

三维打印技术经过 20 年左右的发展，其工艺已经逐步完善，发展了许多成熟的加工工艺及成型系统。

三维打印各成型工艺都是基于离散-叠加原理而实现快速加工原型^①或零件^②的，见图 1-1。首先建立三维 CAD（computer aided design，计算机辅助设计）模型，然后对其切片分层（一般为 Z 向），得到许多离散的平面，再把这些平面的数据信息传给成型系统的工作部件，控制成型材料有规律地、精确地、迅速地层层堆积起来而形成三维的原型，经后处理便成零件。从成型的角度，零件可视为一个空间实体，它是点、线、面的集合。三维打印的成型过程是体-面-线的离散与点-线-面的叠加的过程，即三维 CAD 模型—二维平面（实体）—三维原型的过程^[3]。

① 原型：是指能基本代表一切性质和功能的试验件，一般数量较少，常作评价之用。

② 零件：是指最终产品，具有最佳特性、功能和成本。

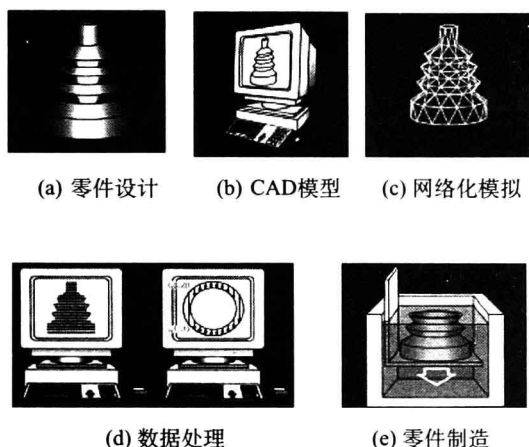


图 1-1 三维打印运行流程

1.1.2 三维打印定义

随着各种新型三维打印技术的出现,“three dimension printing”一词已无法充分表达出各种成型系统、成型材料及成型工艺等所包含的内容。因此,关于什么是“three dimension printing”,目前有多种定义。

Terry Wohlers 和美国制造工程师协会(SME)对三维打印技术进行如下定义:三维打印系统依据三维 CAD 模型数据、CT^①与 MRI^②扫描数据以及由三维实物数字化系统创建的数据,把所得数据分成一系列二维平面,又按相同序列沉积或固化出物理实体^[4,5]。

颜永年等^[6]对三维打印的描述为:三维打印技术是基于离散/堆积成形原理的新型数字化成形技术,是在计算机的控制下,根据零件的 CAD 模型,通过材料的精确堆积,制造原形或零件。

三维打印是一种以数字模型文件为基础,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物体的技术^[7]。

因此,该词已变得较为模糊和不明确,于是,有些文献用其他词语来表示其原来的含义,如:free form fabrication, solid freeform fabrication, automated fabrication, solid imaging, additive manufacturing, layered manufacturing, direct CAD manufacturing, material increase manufacturing, instant manufacturing 等,但都因未得到像三维打印这样被广泛认可而较少有人采用。

本书对该词分别从广义角度及狭义角度作如下定义。

(1) 针对工程领域而言,其广义上的定义为:通过概念性的具备基本功能的

① CT: computerized tomography, 计算机断层扫描。

② MRI: magnetic resonance imaging, 核磁共振成像。

模型快速表达出设计者意图的工程用方法；

(2) 针对制造技术而言，其狭义上的定义为：一种根据 CAD 信息数据把成型材料层层叠加而制造零件的工艺过程。

其具体成型过程是：首先用 CAD 软件设计出零件的 CAD 模型，然后根据具体工艺要求，将其按一定厚度分层，即将其离散为一系列二维层面，将这些离散信息同加工参数相结合，驱动成型机顺序加工各单元层面并彼此黏合，从而得到与 CAD 模型对应的三维实体，即物理模型或原型，原型再经过打磨等处理后即成零件。该成型过程可用图 1-2 表示。

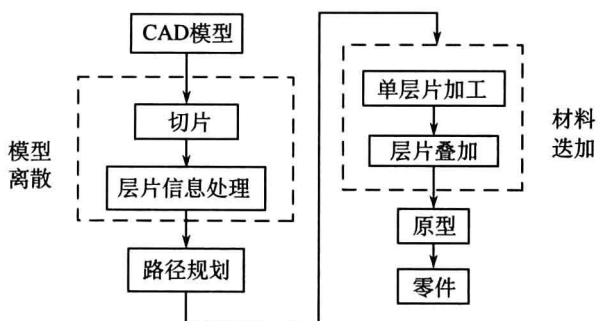


图 1-2 三维打印的离散-叠加过程

1.1.3 三维打印起源

分层制造三维物体的思想雏形，作者认为可追溯到 4000 年前，中国出土的漆器用黏结剂把丝、麻黏结起来铺敷在底胎（类似三维打印的基板）上，待漆干后挖去底胎成型。世界上也发现古埃及人在公元前就已将木材切成板后重新铺叠制成像现代胶合板似的叠合材料^[8]。

1892 年，Blanthier^[9] 主张用分层方法制作三维地图模型。1979 年东京大学的中川威雄教授，利用分层技术制造了金属冲裁模、成形模和注塑模^[10]。20 世纪 70 年代末到 80 年代初，美国 3M 公司的 Alan J. Hebert（1978 年）、日本的小玉秀男（1980 年）、美国 UVP 公司的 Charles（1982 年）和日本丸谷洋二（1983 年）^[11]，各自独立地首次提出了三维打印的概念，即利用连续层的选区固化制作三维实体的新思想。Charles 在 UVP 的资助下，完成了第一个三维打印系统——stereolithography apparatus（SLA）^[12]，并于 1986 年该系统获得专利，这是三维打印发展的一个里程碑。随后许多三维打印的概念、技术及相应的成型机也相继出现。

1.1.4 三维打印技术分类

三维打印工艺有多种，有按材料分类的，有按成型方法分类的。图 1-3 是文献^[13]按材料分类的示意图。

这里按成型方法对三维打印工艺分类,可分为两大类:基于激光或其他光源的成型技术,如立体光造型(stereolithography, SL, 从该技术成型过程角度而言,应称之为光固化成型)^[14-17]、迭层实体制造(laminated object manufacturing, LOM)^[18-22]、选择性激光烧结(selected laser sintering, SLS)^[23-26]、形状沉积制造(shape deposition manufacturing, SDM)^[27-29]等;基于喷射的成型技术,如熔融沉积制造(fused deposition modeling, FDM)^[30,31]、三维印刷成型(three dimensional printing, 3DP)^[32,33]等。

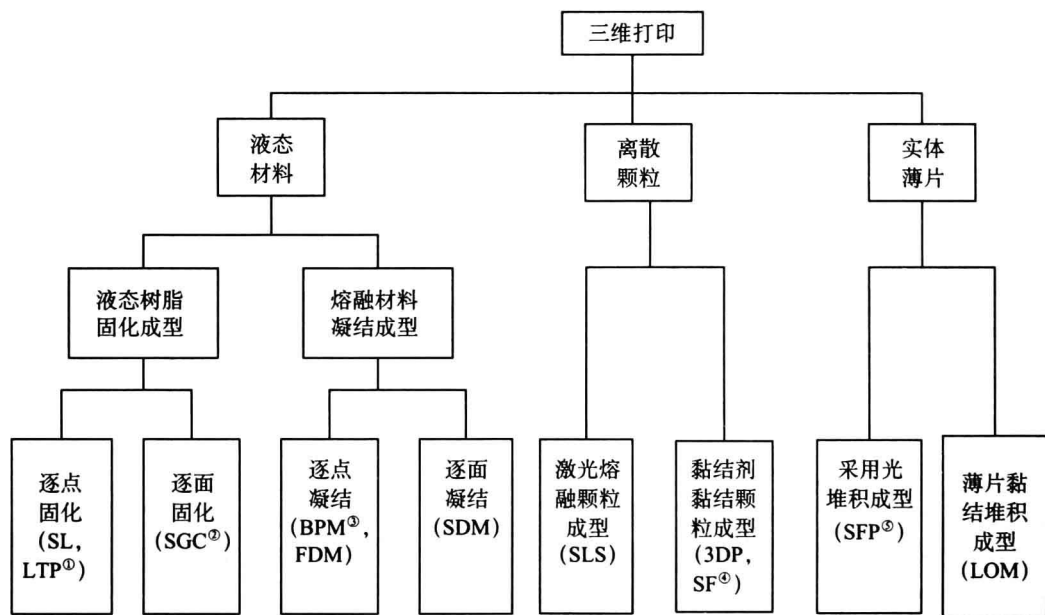


图 1-3 三维打印技术按材料分类

① LTP: liquid thermal polymerization, 树脂热固化成型。它是一种用红外激光器固化热性光敏树脂的成型工艺, 成型过程与 SL 相同。

② SGC: solid ground curing, 实体掩模成型。该技术与 SL 工艺一样, 也采用光敏树脂和紫外光, 但其成型时, 把每层的 CAD 数据制成一掩模, 覆盖在树脂的上方, 通过在掩模上方的 UV 光源发出的平行光束, 把该层的图形迅速固化, 未固化的树脂被清洗掉, 接着用蜡填充该层未被固化的区域, 随后蜡在成型室内较低的温度下凝固, 再铣平该层蜡。如此层层叠加成型。

③ BPM: ballistic particle manufacturing, 弹射颗粒成型。融化的成型材料由喷嘴喷射到冰冷的平台上被迅速凝固成型。

④ SF: spatial forming, 空间成型。该技术一开始主要用于制作金属医疗器械的原型, 用来加工尺寸在 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 30\text{mm}$ 范围的精密零部件。每层切片的负型用有颜色的有机墨打印到陶瓷基体上, 随后被紫外光固化。约 30 层后, 用含有金属颗粒的另一种墨填充未被有机墨喷射的区域, 随后该种墨被固化, 并铣平。反复以上过程, 直至零件制造完成。

⑤ SFP: solid foil polymerisation, 实体薄片成型。该技术用半固化的薄片叠加成型, 先用某种光源固化树脂形成一半固化薄层, 再用 UV 光源在该半固化层上固化出该层的形状, 未被 UV 固化的区域可以作为支撑, 并且能够去除。如此层层叠加成型。

1.1.5 三维打印特点

三维打印技术较之传统的诸多加工方法展示了以下的优越性：

(1) 可以制成几何形状任意复杂的零件，而不受传统机械加工方法中刀具无法达到某些型面的限制；

(2) 曲面制造过程中，CAD 数据的转化（分层）可百分之百地全自动完成，而不是依靠数控切削加工中需要高级工程人员数天复杂的人工辅助劳动才能转化为完全的工艺数控代码；

(3) 不需要传统的刀具或工装等生产准备工作，任意复杂零件的加工只需在一台设备上完成，因而降低了新产品的开发成本，大大缩短开发周期，其加工效率亦远胜于数控加工；

(4) 属于非接触式加工，没有刀具、夹具的磨损和切削力所产生的影响；

(5) 加工过程中无振动、噪声和切削废料；

(6) 设备购置投资低于数控机床。

1.1.6 三维打印技术应用

目前，三维打印技术在国外已取得较广泛应用，主要用于政府军事、建筑、汽车、教育科研、医疗、航空、消费品、工业等行业，并取得巨大的经济效益。如美国 PRATT5C WHITENCY 公司采用三维打印技术快速制造了 2000 个铸件，如按常规方法每个铸件约需要 700 美元，而用此技术每个铸件只需 300 美元，同时，生产时间节约 70%~90%。

又如美国 Ready Com 公司在推出其新产品 ReadTalk 传呼机时，先用 HP 公司的 Solid Designer 软件设计了全套传呼机机械零件，用三维打印技术加工出母模，制得硅胶模，然后用快速固化氨基甲酸乙酯注入硅胶膜制得 60 个传呼机外壳，共用了 7 天时间。外壳实测满意后，又采用 Pro-Engineer、Pro-Mold、Pro-Manufacturing 等软件将外壳的 IGES 文件转换成数控代码生产注塑模，加工了 1450 套实用传呼机机械零件。从设计到产品投放市场共用了 7 周时间。有关专家认为，如果用传统的二维制图、机械加工，即使不出现差错返工，至少也要半年时间才可能完成^[34]。

截止到 2013 年 5 月，三维打印在各主要应用领域的分布主要为消费品、医疗、工业航空、汽车等 5 大领域，约占 80%，如图 1-4 所示^[35]。从每个国家和地区在三维打印全球市场所占份额来看（图 1-5），美国占据绝对的优势，占 38% 的市场，其次是日本占 9.7%，德国占 9.4%，中国大陆占 8.7%，而中国大陆和中国台湾地区的市场共占 10.2%，仅次于美国。可以肯定地说，未来几年中国将稳居全球第二的位置，但是从绝对数量来看，中国与美国仍然有非常大的差距^[35,36]。

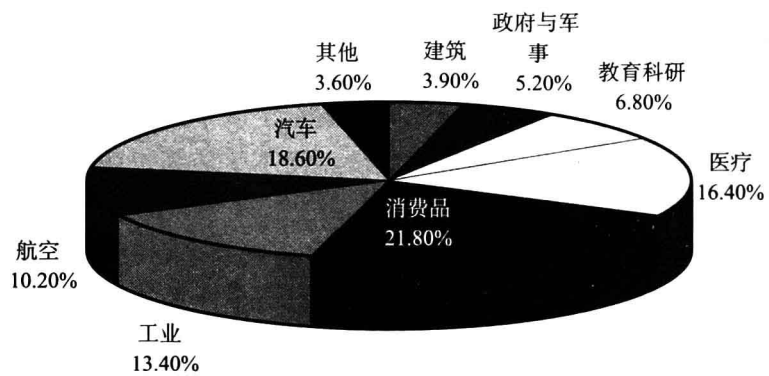


图 1-4 三维打印在各领域的分布情况

数据来源：Wohlers Associates, Inc.

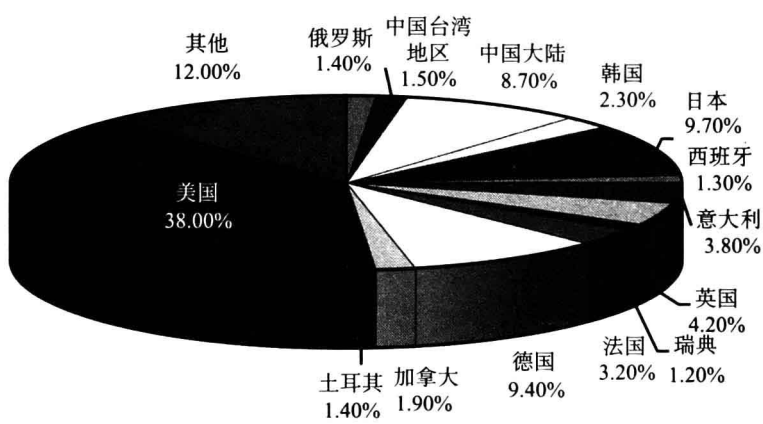


图 1-5 各国和地区在全球三维打印产业中所占的份额

数据来源：Wohlers Associates, Inc.

从亚洲地区来看（图 1-6），中国大陆占 33.3% 的市场，与日本有一定的差距，其次是韩国、中国台湾地区和澳大利亚等国家和地区。

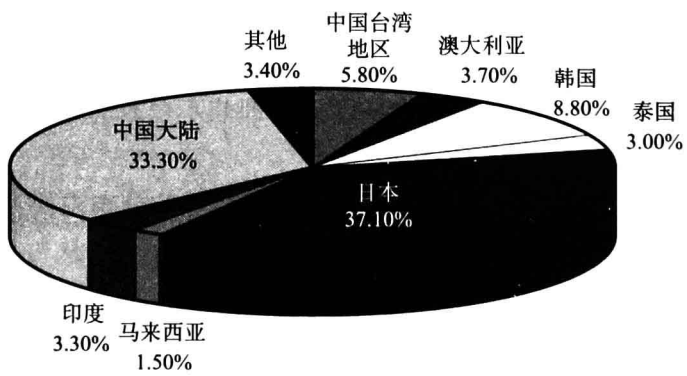


图 1-6 亚洲国家和地区在亚洲三维打印产业中所占的份额

数据来源：Wohlers Associates, Inc.