

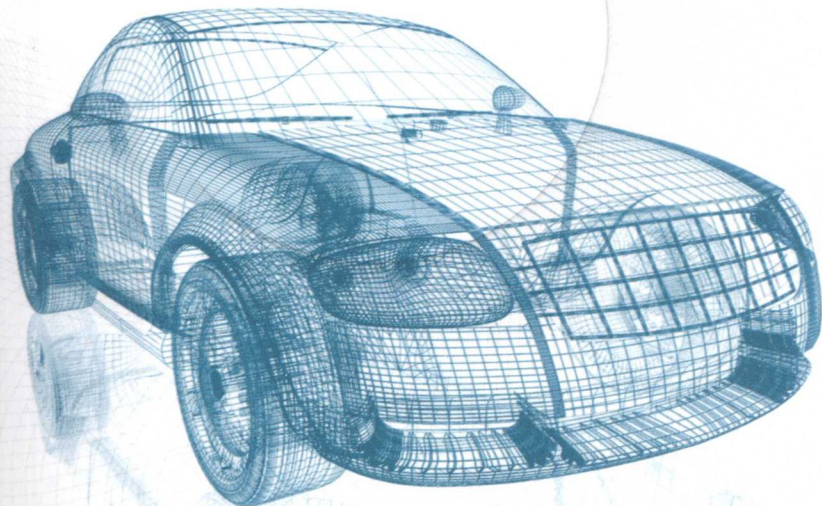
3D

打印

3D 打印 丛书

成型工艺及技术

冯春梅 杨继全 施建平 著
杨继全 主审



南京师范大学出版社
NANJING NORMAL UNIVERSITY PRESS

3D 打印丛书

3D 打印

成型工艺及技术

冯春梅 杨继全 施建平 | 著
杨继全 | 主审

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印成型工艺及技术 / 冯春梅, 杨继全, 施建平
著. — 南京: 南京师范大学出版社, 2016. 5
ISBN 978 - 7 - 5651 - 2376 - 4

I. ①3… II. ①冯… ②杨… ③施… III. ①立体印刷—印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 246366 号

书 名	3D 打印成型工艺及技术
著 者	冯春梅 杨继全 施建平
主 审	杨继全
责任编辑	濮长飞
出版发行	南京师范大学出版社
地 址	江苏省南京市宁海路 122 号(邮编:210097)
电 话	(025)83598919(总编办) 83598412(营销部) 83598297(邮购部)
网 址	http://www.njnup.com
电子信箱	nspzbb@163.com
照 排	南京理工大学资产经营有限公司
印 刷	扬中市印刷有限公司
开 本	787 毫米×960 毫米 1/16
印 张	12
字 数	203 千
版 次	2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978 - 7 - 5651 - 2376 - 4
定 价	30.00 元

出 版 人 彭志斌

南京师大版图书若有印装问题请与销售商调换

版权所有 侵犯必究

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。产品上市时间的迟早是制造业市场竞争的焦点,落后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,从而进行必要的功能验证,以保证制造企业的核心竞争力。

3D 打印技术能自动、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。3D 打印是集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一身的技术,是一门综合性和交叉性的前沿制造技术,是制造技术在制造理念上的一次革命性飞跃。总体看来,3D 打印技术的基本原理都是叠层制造,由光束或喷头在 $X-Y$ 平面内通过扫描运动形成工件截面,而在 Z 坐标上逐层叠加,最终形成三维零件。目前市场上 3D 打印主流技术包括 SL、SLS、3DP、FDM、LOM 等,本书将分别介绍。

本书共分 7 章。第 1 章简要介绍 3D 打印技术的基本知识,包括 3D 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 章介绍光固化 3D 打印成型工艺,主要介绍光固化工艺成型原理、成型设备的一般组成、成型设备的控制技术,以及成型工艺的质量影响因素等;第 3 章介绍选择性激光烧结 3D 打印成型工艺,主要介绍选择性激光烧结工艺的成型原理、成型设备的一般组成、成型设备的控制技术,以及各成型工艺参数对零件质量的影响等;第 4 章介绍 3D 印刷打印成型工艺,主要介绍 3D 印刷工艺的成型原理、成型设备的一般组成、成型设备的控制技术,以及各成型工艺参数对零件质量的影响等;第 5 章介绍熔融沉积制造 3D 打印成型工艺,主要介绍熔融沉积制造工艺的成型原理、成型设备的一般组成、成型设备的控制技术,以及各成型工艺参数对零件质量的



影响等;第6章介绍叠层实体制造3D打印成型工艺,主要介绍叠层实体制造工艺的成型原理、成型设备的一般组成、成型设备的控制技术,以及各成型工艺参数对零件质量的影响等;第7章介绍几种新型的3D打印成型工艺,如形状沉积制造、数字投影成型、喷墨技术等。

由于3D打印技术涉及的学科和知识面很广泛,远非作者的知识、能力和经验所能覆盖,因而结合我们自身的科研经历,书中引用了经过我们消化的、许多专家和学者的创新思想、精辟理论和出色应用。本书在编写过程中,参考了大量的相关资料,除书中注明的参考文献外,其余的参考资料主要有:公开出版的各类报纸、刊物和书籍;因特网上的检索。本书中所采用的图片、模型等素材,均为所属公司、网站或个人所有,本书引用仅为说明之用,绝无侵权之意,特此声明。在此向参考资料的各位作者表示谢意!

本书由南京师范大学的杨继全负责总体规划并编写第1、5章,东南大学的施建平负责编写第2、3章,东南大学的林圣业负责编写第4、7章,南京师范大学的冯春梅负责编写第6章。

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郑梅、郭爱琴、程继红、王琼、杨建飞、邱鑫、朱莉娅、陈玲、褚红燕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、李永超、王森、于佳佳、李客楼、徐荣健、陈慧芹等研究生做了大量的资料查阅和汇总等工作,最后衷心感谢南京师范大学出版社在本书出版过程中给予的大力支持。

本书得到国家自然科学基金(61273243、51175268、11102090)、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、BE2014009)、江苏省科技成果转化专项资金重大项目(BA20130518)等的支持。

由于作者水平有限,书中的疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正,多提宝贵意见,使之不断完善,作者在此预致谢意。

目 录

前 言	1
第 1 章 3D 打印成型工艺及技术概述	1
1.1 3D 打印浪潮	1
1.1.1 汽车制造	2
1.1.2 航空航天	3
1.1.3 建筑	4
1.1.4 教育	6
1.1.5 卫生医疗	7
1.1.6 文化创意	8
1.2 3D 打印的发展历程	9
1.3 3D 打印成型工艺过程	12
1.4 3D 打印成型工艺分类	14
1.4.1 按成型方法分类	14
1.4.2 按成型材料分类	17
1.4.3 按材料堆积方式分类	18
1.5 3D 打印装置的技术实现	18
1.5.1 控制器及 PID 控制理论	19
1.5.2 电机控制	20



1.5.3	温度控制	26
1.5.4	喷墨控制	26
1.5.5	通信接口	27
1.6	3D 打印的优势	28
	思考题	29
第 2 章	光固化成型	30
2.1	概述	30
2.2	SL 成型过程	32
2.2.1	SL 成型工艺	32
2.2.2	SL 后处理	35
2.2.3	支撑结构	36
2.3	SL 系统组成	37
2.3.1	光源系统	38
2.3.2	光学扫描系统	43
2.3.3	托板升降系统	45
2.3.4	涂覆刮平系统	46
2.4	SL 系统控制技术	47
2.4.1	基本原理及工作过程	47
2.4.2	SL 控制系统硬件	49
2.4.3	SL 控制系统软件	55
2.5	SL 工艺成型质量影响因素	57
2.5.1	数据转换	57
2.5.2	设备机械精度	58
2.5.3	成型材料	58
2.5.4	成型参数	59
2.5.5	SL 的效率	62
2.6	SL 的应用	64
	思考题	66



第 3 章 选择性激光烧结	67
3.1 概述	67
3.2 SLS 成型过程	69
3.2.1 SLS 成型工艺	69
3.2.2 烧结机理	70
3.2.3 SLS 后处理	72
3.3 SLS 系统组成	73
3.3.1 光学扫描系统	74
3.3.2 供粉及铺粉系统	77
3.4 SLS 控制技术	78
3.4.1 SLS 控制系统硬件	78
3.4.2 SLS 控制系统软件	80
3.5 SLS 工艺成型质量影响因素	82
3.5.1 烧结机理影响分析	82
3.5.2 工艺参数	85
3.5.3 制件的缺陷及改进措施	89
3.6 SLS 的应用	90
思考题	92
第 4 章 三维印刷成型	93
4.1 概述	93
4.2 3DP 成型过程	95
4.2.1 3DP 成型工艺	95
4.2.2 3DP 后处理	95
4.3 3DP 系统组成	96
4.3.1 喷墨系统	97
4.3.2 XYZ 运动系统	100
4.3.3 其他部件	101



4.4	3DP 系统控制技术	101
4.4.1	3DP 控制系统硬件	101
4.4.2	3DP 控制系统软件	105
4.5	3DP 工艺成型质量影响因素	111
4.6	3DP 的应用	113
	思考题	115
第 5 章	熔融沉积制造	116
5.1	概述	116
5.2	FDM 成型过程	118
5.2.1	FDM 成型工艺	118
5.2.2	FDM 后处理	120
5.3	FDM 系统组成	121
5.3.1	供料机构	122
5.3.2	喷头	124
5.3.3	运动系统	126
5.4	FDM 系统控制技术	127
5.4.1	FDM 控制系统硬件	127
5.4.2	FDM 控制系统软件	128
5.5	FDM 工艺成型质量影响因素	131
5.5.1	FDM 机器误差	131
5.5.2	CAD 模型误差	132
5.5.3	切片引起的误差	132
5.5.4	喷丝宽度引起的误差	133
5.5.5	材料的收缩引起的误差	134
5.6	FDM 的应用	135
	思考题	137



第 6 章 叠层实体制造	138
6.1 概述	138
6.2 LOM 成型过程	140
6.2.1 LOM 成型工艺	140
6.2.2 LOM 后处理	140
6.3 LOM 系统组成	144
6.3.1 切割系统	144
6.3.2 升降系统	149
6.3.3 加热系统	150
6.3.4 原料供应与回收系统	155
6.4 LOM 系统控制技术	157
6.4.1 LOM 控制系统硬件	157
6.4.2 工艺参数匹配控制	158
6.5 LOM 工艺成型质量影响因素	159
6.5.1 分层制造引起的台阶效应	160
6.5.2 CAD 模型 STL 格式拟合精度对成型精度的影响	160
6.5.3 分层方法对成型精度的影响	160
6.5.4 成型机对成型精度的影响	161
6.5.5 成型材料的热湿变形对成型精度的影响	161
6.6 LOM 的应用	162
思考题	163
第 7 章 其他 3D 打印工艺技术	164
7.1 形状沉积制造工艺	164
7.2 数字投影成型工艺	169
7.3 喷墨技术工艺	174
思考题	176
参考文献	177

第 1 章 3D 打印成型工艺及技术概述

3D 打印(three dimensional printing, 3DP)作为战略新兴产业,近年来受到了广泛的关注与重视。3D 打印,又可称为“增材制造(additive manufacturing, AM)”技术,是一种综合了计算机、材料、机械、控制及软件等多学科知识的先进制造技术。美国材料与试验协会(american society for testing and materials, ASTM),给出了 3D 打印的明确定义:“Process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies.”即一种与传统的材料去除加工方法截然相反的,通过增加材料、基于三维 CAD 模型数据,通常采用逐层制造方式,直接制造与相应数学模型完全一致的三维物理实体模型的制造方法。

3D 打印作为第三次工业革命最具标志性的一个生产工具,时下已成为全球最热门的技术之一。3D 打印是一种集计算机辅助设计(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、新材料等先进技术于一体的加工方法。目前,3D 打印已发展了许多成型工艺,包括:光固化成型、选择性激光烧结、三维印刷成型、熔融沉积制造和叠层实体制造等。3D 打印成型工艺及技术的飞速发展,为世界带来了颠覆性的变革。

1.1 3D 打印浪潮

随着相关技术的不断发展,3D 打印已不仅限于制造产品原型及模具,而是一步步走进人们的生活。3D 打印的主要应用领域见图 1-1,包括汽车制造、航空航天、建筑、教育、卫生医疗以及文化创意等领域。

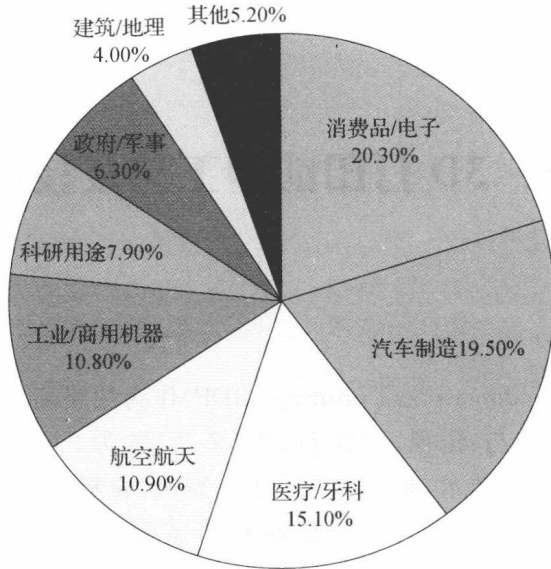


图 1-1 3D 打印的主要应用领域

1.1.1 汽车制造

比利时的 16 名工程师使用 Materialise 公司的“猛犸”3D 打印机制造了一辆全尺寸赛车——Arion。从车体外壳设计到打印出整个车身部分,共耗时 3 周,较传统制造工艺的数个月明显缩短了生产周期。不仅如此,从在德国霍根海姆赛道测试的情况看,Arion 的时速从零提升至 96 km/h 仅需 4 s,且最高时速可达到 141 km/h。

世界上首款全 3D 打印的混合动力汽车 Urbee 2 于生产车间 RedEye 面世,由设计公司 KOR Ecologic、直接数字制造商 RedEye On Demand 和 3D 打印制造商 Stratasys 合作完成。Urbee 2 见图 1-2,其车身由 3D 打印成一体式,除了底盘和引擎采用钢铁外,其他大部分组件选用 ABS 塑料分别打印,质量约为一辆典型汽车的一半。使用 Stratasys Fortus 900mc 3D 打印系统,整个生产过程耗时 2 500 小时。

在美国芝加哥举办的国际制造技术展览会(IMTS)上,美国亚利桑那州汽车制造商 Local Motors 首次现场 3D 打印了名为“Strati”的汽车,并成功进行了首次驾驶。除电池、电动机、导线和悬挂外,Strati 的所有零件制造和车辆组装过



程都采用直接数字化制造(DDM)技术。使用大尺寸增材制造(BAAM)设备,整个制造过程仅耗时 6 天。



图 1-2 Urbee 2——世界上首款全 3D 打印的混合动力汽车

我国首台 3D 打印汽车在海南发布。这台概念汽车由三亚思海三维技术有限公司开发研制,“土豪金”色车身部分是运用复合材料 3D 打印而成,重约 500 kg,其余为组装配件。该车从设计到组装完成仅耗时一个月,其中 3D 打印阶段仅耗时 5 天。

1.1.2 航空航天

3D 打印在航空航天领域的应用主要集中于外形验证、直接产品制造和精密熔模铸造的原型制造。欧美国家已将 3D 打印技术视为提升航空航天领域水平的关键支撑技术之一。英国南普敦大学工程师 3D 打印出世界首架无人驾驶飞机——SULSA,并试飞成功。采用激光烧结技术,SULSA 从设计到首航仅需要几天时间,较常规制造方法快 4 倍。此外,采用 3D 打印技术制造飞机的复杂结构将极大节约成本。

“国际空间站(ISS)”的航天员们在太空用 3D 打印机 Zero-G 成功地制造出



太空第一件 3D 物体——挤压机的外壳部件,开启了太空制造的新时代。图 1-3 为航天员展示的首个太空 3D 打印样品。



图 1-3 首个太空 3D 打印样品

我国在航空航天领域对 3D 打印技术的研究也取得了新的进展。中国航天科技集团公司上海航天技术研究院研制的航天专用 3D 打印机打印出了卫星星载设备的光学镜片支架、核电检测设备的精密复杂零件、飞机研制过程中用到的叶轮、汽车发动机中的异形齿轮等构件。

1.1.3 建筑

用 3D 打印机来造房,是世界各国建筑师的梦想。当前应用于建筑领域的 3D 打印技术主要有 3 种:D 型工艺(D-Shape)、轮廓工艺(contour craftings)和混凝土打印(concrete printing)。D 型工艺由意大利 Enrico Dini 发明,使用的材料为氯氧镁水泥。3D 打印机利用数百个喷嘴,可喷射出镁质黏合物,通过一层层黏合物和砂子的结合,最终形成石质建筑物。轮廓工艺是由美国南加州大学工业与系统工程教授 Behrokh Khoshnevis 提出的。与 D 型工艺不同的是,轮廓工艺的材料都是从喷嘴中挤出的,喷嘴两侧附带的刮铲会自动伸出,规整混凝土的形状。这样一层的建筑材料砌上去就形成了外墙,再扣上屋顶,一座房子就建好了。混凝土打印由英国拉夫堡大学建筑工程学院提出,该技术与轮廓工艺相似,使用喷嘴挤压出混凝土,再通过层叠法建造构件。3 种工艺的对比见表 1-1。



表 1-1 应用于建筑领域的三种 3D 打印技术之间的对比

参数 \ 工艺	D 型工艺	轮廓工艺	混凝土打印
是否使用模板	否	否	否
使用材料	含有氧化镁的粉末	使用砂浆制作轮廓	高性能打印混凝土
		胶凝材料作为填充	
黏接剂	氯化镁水溶液	不需要	不需要
喷嘴直径	0.15 mm	15 mm	9~20 mm
喷嘴数量	6 300	1	1
单层厚度	4~6 mm	13 mm	6~25 mm
抗压强度	235~242 MPa	未知	100~110 MPa
抗折强度	14~19 MPa	未知	12~13 MPa

俄罗斯曾发布一幢 3D 打印建筑,其原理是打印一个个像乐高积木一样的配件,然后通过组装做成建筑的墙体。2013 年 1 月,荷兰建筑师 Janjaap Ruijsenaars 与意大利发明家 Enrico Dini 合作,计划 3D 打印名为“Landscape House”的建筑。

2014 年,盈创装饰工程有限公司采用一台长 150 米、宽 10 米、高 6.6 米的 3D 打印机打印如图 1-4 所示的建筑模型,用时不足 24 小时。打印所采用的原料由拆建的建筑材料和水泥混合制成,平均造价只有传统建筑的 30%,其生产中几乎不产生建筑垃圾,非常环保。

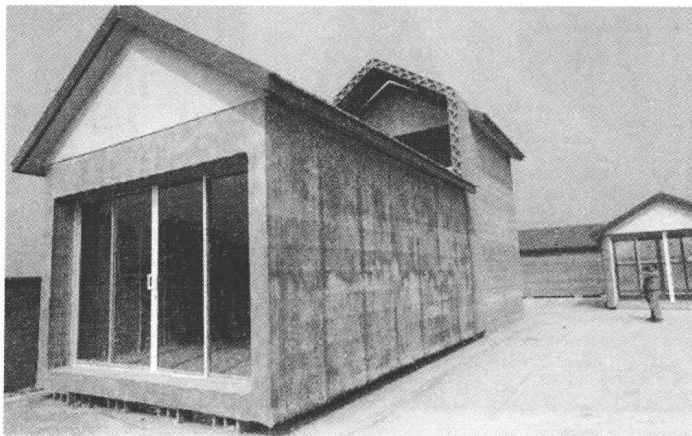


图 1-4 3D 打印建筑的实物图



1.1.4 教育

3D 打印技术本质上是多媒体技术的延伸,是虚拟现实技术的延伸,它拓展了人的感觉和知觉,促进了人的思维能力的进一步发展。近年来,很多的高等教育专业将 3D 打印与教学体系相结合,摸索创新教学模式。随着 3D 打印机逐步降低门槛及应用领域扩大,其在欧美大学里几乎成为设计物理模型必不可少的工具,而在国内也已经进入基础教育领域。3D 打印在教学中的应用主要包括:

- ① 数学系,可以将“问题”打印出来寻找答案,比如打印出一个几何体,更直观地去了解几何体内部各元素之间的联系,如图 1-5 所示。
- ② 机械系,将电脑中的数字影像完整地转换为实物模型,这样能够更好地评估设计成果。
- ③ 化学系,可以直接打印出分子模型来观察。
- ④ 建筑系,快速、经济地打印出建筑物模型,以三维的方式呈现出来,而不单单是平面展示设计模型。
- ⑤ 生物医药系,打印出全色彩的三维模型,方便研究者准确地判断研究课题的方向。
- ⑥ 历史系,复制有考古意义的物品,方便进一步地观察。
- ⑦ 地理系,绘制真实的地势图、人口分布图等。

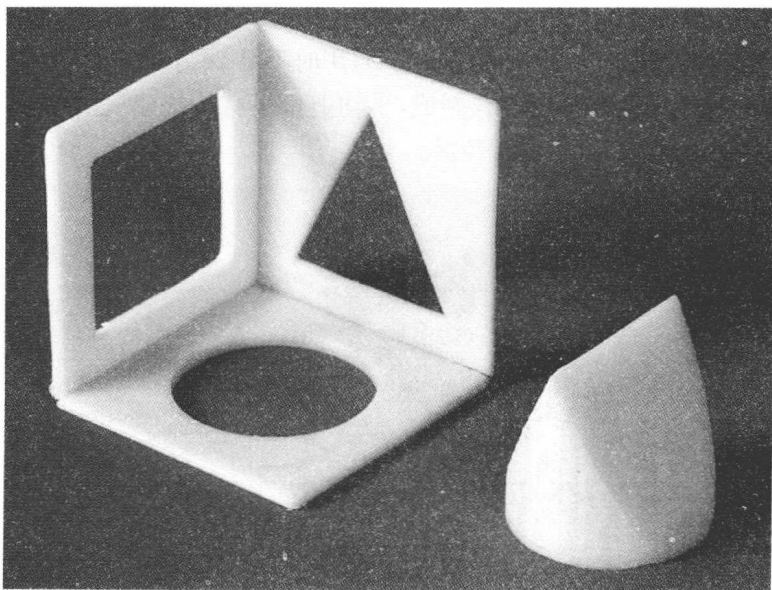


图 1-5 设计的一个能紧贴边缘穿过方形、圆形和三角形孔洞的物体



1.1.5 卫生医疗

在医疗领域,尤其是修复性医学领域,个性化定制需求显著,而个性化、小批量和高精度恰是3D打印技术的优势所在。目前,3D打印在医疗生物行业的应用主要包括3个方面:①体外医疗器械制造,如假肢、助听器、齿科手术模板等;②个性化永久植入物;③细胞3D打印。2012年,比利时哈塞尔特大学的科研人员成功地为一位83岁的老妇人植入3D打印而成的下颌骨,这是世界上首次完全使用定制植入物代替整个下颌。图1-6为3D打印的下颌骨。

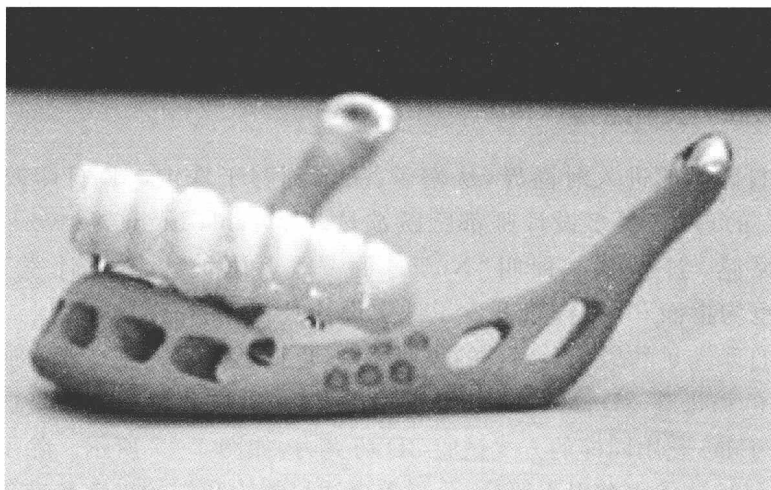


图1-6 3D打印的下颌骨

美国密歇根州有一个两个月大的婴儿,因为患有气管支气管软化,导致气管坍塌,氧气无法顺畅地进入肺部,随时面临窒息的危险。在手术之前,只能依靠插入气管维持通气。在征得婴儿父母以及密歇根大学相关机构的允许后,密歇根大学的研究人员利用3D打印机,根据患者胸部的CT影像,打印出了气管的形状以及一块夹板。然后将夹板放入患者胸部,支撑起坍塌的气管,从而让气流畅通。手术完成后婴儿使用了21天呼吸机,随后便痊愈出院。

北京大学第三医院骨科专家刘忠军教授带领的团队在脊柱及关节外科领域研发出了几十个3D打印脊柱外科植入物,其中包括颈椎椎间融合器、颈椎人工椎体及人工髋关节在内的多个产品。