

“十三五”改革创新规划教材

增材制造与 3D打印技术及应用

杨占尧 赵敬云 主编



清华大学出版社





增材制造与 3D打印技术及应用

杨占尧 赵敬云 主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

增材制造,也称为3D打印,是现代制造技术的革命性发明。本书对增材制造技术进行了系统、客观、全面、详实地介绍和论述。全书共分10章,分别介绍了增材制造技术的基本问题;增材制造的前处理;光敏材料选择性固化,粉末材料选择性烧结,丝状材料选择性熔覆,薄型材料分层切割等主要的增材制造技术;金属材料的增材制造;增材制造的后处理及技术选择;增材制造技术的应用;增材制造技术发展趋势等内容。

本书可作为高等学校机械、机电、汽车、材料成形及控制、管理工程、计算机等专业的专科和本科学 生教材,也可供从事计算机辅助设计与制造、模具设计与制造等工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

增材制造与3D打印技术及应用/杨占尧,赵敬云主编. —北京:清华大学出版社,2017

ISBN 978-7-302-46227-9

I. ①增… II. ①杨… ②赵… III. ①快速成型技术—高等学校—教材 ②立体印刷—印刷术—高等学校—教材 IV. ①TB4 ②TS853

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第019970号

责任编辑:田梅

封面设计:常雪影

责任校对:袁芳

责任印制:沈露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175-4278

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:10.75

字 数:242千字

版 次:2017年5月第1版

印 次:2017年5月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:46.00元

产品编号:072461-01



制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。18世纪中叶开启工业文明以来,世界强国的兴衰史和中华民族的奋斗史一再证明,没有强大的制造业,就没有国家和民族的强盛。打造具有国际竞争力的制造业,是我国提升综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路。随着全球市场一体化的发展,制造业的竞争从过去单纯的质量竞争,发展到产品全生命周期的全方位竞争——T(及时快速)、Q(高质量)、C(低成本)、S(优质售后服务)缺一不可。制造业既要满足日益变化的用户需要,又要有较强的灵活性。在这种形势下,能够以单件、小批量生产而又不增加产品成本的增材制造和3D打印技术得到了迅猛发展和越来越广泛的应用。

增材制造和3D打印技术是20世纪80年代出现的一种全新概念的制造技术,被认为是现代制造技术的革命性发明。李克强总理在《求是》杂志发表的署名文章中写道:“3D打印实现了制造方式从等材、减材到增材的重大转变,改变了传统制造的理念和模式,大幅缩减了产品开发周期与成本,也会推动材料革命,具有重大价值。”将增材制造和3D打印技术引入大学工科教学,作为对大学生进行现代制造工程技术培养的重要内容,可使学生对现代机械电子系统的集成性、综合性、交叉性等特点有深刻的感性认识,从而使学生拓宽视野、活跃思想、增强创新意识。

本书对增材制造和3D打印技术进行了系统、客观、全面、详实的介绍和论述,在对该技术的工艺、材料、装备、应用等进行详细介绍的同时,也不回避该技术的局限性、发展瓶颈,同样进行了细致的分析和论述。

本书的编写具有以下特点。

(1) 教材内容与技术发展同步。本书作者紧跟增材制造技术发展趋势,实时更新教材内容,并根据全国上百所用书学校的意见和建议,在作者主编的2001年航空工业出版社出版的《快速成型理论与技术》和2006年清华大学出版社《快速成型与快速模具制造技术》教材基础上修订而成,非常适合师生需要。

(2) 教材编写充分吸收近年来教育教学改革的重要成果,以及国家级教学资源库建设成果,内容丰富,适用性强,非常适合教学需要。

(3) 以模块化形式组织教材,使教材既保持了知识的完整性,又使各部分内容自成一体,相互独立,可灵活地各取所需,为己所用,因而可适用于不同学制、不同教学形式及生产一线的工程技术人员的需求。

(4) 教材内容实用性强,既适合于应用型本科教学需要,又适应于高职高专院校教学需求,同时还可用于从事计算机辅助设计与制造、模具设计与制造等工程技术人员的参考书。

本书由河南工学院的国家级教学名师、河南省优秀专家、国家级精品课程主持人、国家级精品资源共享课程主持人杨占尧教授和赵敬云教授担任主编,并由杨占尧教授负责统稿。河南工学院王鹏飞、董二婷、丁海担任副主编。在与本书有关的课题研究过程中得到了河南省科技厅、河南省教育厅、河南工学院给予的大力支持,投入了大量的资金,创造了良好的软硬件环境。本书在编写过程中还得到了清华大学出版社、西安交通大学等单位的专家、教授的指导和帮助,对本书的指导思想和编写内容都提出了宝贵意见。同时,河南筑诚电子科技有限公司的吕益良董事长和李岗礼总裁对本书的编写给予了大力支持,提供了大量宝贵的核心技术参数和尚未公开的设备原型机供参考。此外,在编写过程中参考了有关兄弟院校的部分著作、论文和研究成果,在此向他们一并表示真诚的感谢!

由于作者水平有限,加之该技术在快速发展时期,许多问题有待进一步研究和探讨。因此,书中难免有不妥之处,望读者不吝赐教!

编者

2017年1月



第 1 章 概述	1
1.1 增材制造技术	2
1.1.1 增材制造技术的含义	2
1.1.2 增材制造与传统制造方法的区别	3
1.1.3 增材制造与传统制造方法的关系	3
1.2 增材制造过程	4
1.3 增材制造技术发展历史	6
1.3.1 国外增材制造技术的发展历史	6
1.3.2 国内增材制造技术的发展历史	8
1.4 增材制造技术的作用	9
1.4.1 使设计原型样品化	9
1.4.2 用于产品的性能测试	10
1.4.3 用作投标的手段	10
1.4.4 快速模具制造	11
1.4.5 增材制造为创新设计释放了巨大的空间	11
1.4.6 3D 打印是创新产品开发的利器	11
思考与练习	12
第 2 章 增材制造的前处理	13
2.1 三维模型构造的方法	13
2.1.1 用计算机辅助设计软件构造三维模型	14
2.1.2 利用反求工程构建三维模型	15
2.2 三维模型的 STL 格式化	21
2.2.1 STL 格式文件的规则	23
2.2.2 STL 格式文件的错误和纠错软件	24
2.3 三维模型的切片处理	27
2.3.1 成形方向的选择	27
2.3.2 增材制造中的主要切片方式	28
思考与练习	30

第3章 光敏材料选择性固化增材制造	31
3.1 SLA 增材制造的原理和分类	31
3.1.1 SLA 增材制造原理	32
3.1.2 SLA 增材制造分类	32
3.2 SLA 增材制造的基本过程及支撑结构	33
3.2.1 SLA 增材制造的基本过程	33
3.2.2 SLA 增材制造的支撑结构	35
3.3 SLA 增材制造的材料及选择	36
3.3.1 对 SLA 增材制造材料的要求	36
3.3.2 SLA 增材制造材料的分类	36
3.3.3 SLA 增材制造材料的选择	38
3.4 SLA 增材制造的优点与缺点	38
3.4.1 SLA 增材制造的优点	39
3.4.2 SLA 增材制造的缺点	39
3.5 SPS-600 型增材制造机简介	40
思考与练习	41
第4章 粉末材料选择性烧结增材制造	42
4.1 SLS 增材制造的原理	42
4.1.1 SLS 增材制造成形原理	43
4.1.2 SLS 增材制造烧结机理	43
4.1.3 激光扫描系统	44
4.2 SLS 增材制造的成形过程	44
4.2.1 SLS 增材制造的烧结	44
4.2.2 烧结件的后处理	46
4.2.3 SLS 增材制造工艺参数的影响	46
4.3 SLS 增材制造的材料及其选择	47
4.3.1 SLS 增材制造对材料性能的要求	47
4.3.2 SLS 增材制造材料的种类	48
4.4 SLS 增材制造的优缺点	49
4.5 3DP 打印技术	49
4.5.1 3DP 打印原理	49
4.5.2 3DP 打印头	50
4.5.3 国内常见的 3DP 打印机	50
思考与练习	51

第 5 章 丝状材料选择性熔覆增材制造	52
5.1 FDM 增材制造的工作原理和成形过程	52
5.1.1 FDM 增材制造的工作原理	52
5.1.2 FDM 增材制造的成形过程	53
5.1.3 FDM 增材制造装备构成	53
5.2 FDM 增材制造的材料及选择	54
5.2.1 FDM 增材制造对成形材料的要求	55
5.2.2 FDM 增材制造对支撑材料的要求	55
5.3 FDM 增材制造的优点与缺点	56
5.4 FDM 增材制造常用控制软件	56
5.5 典型 FDM 增材制造装备简介	57
思考与练习	59
第 6 章 薄型材料分层切割增材制造	60
6.1 LOM 增材制造的工作原理	60
6.2 LOM 增材制造的工艺参数和后处理	62
6.2.1 LOM 增材制造的工艺参数	62
6.2.2 LOM 增材制造的后处理	63
6.2.3 易于去除废料的 LOM 增材制造工艺	63
6.3 LOM 增材制造的材料及选择	64
6.3.1 纸的性能	64
6.3.2 热熔胶	64
6.3.3 涂布工艺	65
6.3.4 KINERGY 公司的纸基卷材	65
6.4 LOM 增材制造的优点与缺点	66
6.5 其他增材制造技术	66
6.5.1 掩膜光刻成形技术	67
6.5.2 弹道微粒制造技术	67
6.5.3 三维焊接成形技术	67
6.5.4 数码累积成形技术	67
思考与练习	68
第 7 章 金属材料的增材制造	69
7.1 选区激光熔化制造技术	70
7.1.1 SLM 的成形原理	70
7.1.2 SLM 的成形工艺过程	71
7.1.3 SLM 的成形特点	73

7.1.4	SLM 技术的应用及发展趋势	74
7.2	激光立体成形制造技术	74
7.2.1	LSF 的成形原理	74
7.2.2	LSF 技术的成形工艺过程	74
7.2.3	LSF 的主要特点	75
7.2.4	LSF 技术的应用及发展趋势	76
7.3	电子束选区溶化制造技术	77
7.3.1	EBSM 成形的原理	77
7.3.2	EBSM 成形工艺	77
7.3.3	EBSM 成形特点	78
7.3.4	EBSM 技术的应用及发展趋势	78
7.4	电子束熔丝沉积制造技术	79
7.4.1	EBF3 的成形原理	79
7.4.2	EBF3 的成形特点	80
7.4.3	EBF3 技术的应用及发展趋势	80
	思考与练习	81
第 8 章	增材制造的后处理及技术选择	82
8.1	增材制造的后处理	82
8.1.1	剥离	83
8.1.2	修补、打磨和抛光	83
8.1.3	表面涂覆	85
8.2	增材制造的精度分析	86
8.2.1	增材制造精度的概念	86
8.2.2	零件误差形成机理及影响因素分析	88
8.2.3	增材制造制件的表面粗糙度	92
8.3	主要增材制造技术的比较与选用	94
8.3.1	主要增材制造技术的比较	94
8.3.2	主要增材制造技术的选用原则	97
	思考与练习	99
第 9 章	增材制造技术的应用	100
9.1	在模具领域的应用	102
9.1.1	硅橡胶快速制模	103
9.1.2	金属电弧喷涂快速制模	111
9.1.3	金属树脂快速制模	116
9.1.4	等离子喷涂快速制模	120
9.1.5	铸造模的快速铸造技术	122

9.2 在生物医学领域的应用	124
9.2.1 医学模型快速建造	125
9.2.2 组织器官代替品制作	125
9.2.3 脸部修饰与美容	126
9.3 在航空航天领域的应用	126
9.4 在艺术设计领域的应用	130
9.4.1 在产品设计中的应用	130
9.4.2 在雕刻创作中的应用	131
9.4.3 在建筑行业中的应用	132
9.4.4 在影视产业中的应用	133
9.5 在其他领域的应用	133
9.5.1 汽车制造领域	133
9.5.2 考古文物	135
9.5.3 配件饰品	135
9.5.4 食品产业	136
思考与练习	137
第 10 章 增材制造技术发展趋势	138
10.1 增材制造技术创新需求分析	139
10.1.1 生产成本过高	139
10.1.2 可选用的材料十分有限	140
10.1.3 工艺及装备尚不成熟	141
10.1.4 数据库、标准/认证体系缺乏	141
10.1.5 商业推广障碍	142
10.2 发展原则与发展目标	143
10.2.1 发展原则	143
10.2.2 发展目标	143
10.3 增材制造技术的发展方向	144
10.3.1 着力突破增材制造专用材料	144
10.3.2 加快提升增材技术水平制造工艺	144
10.3.3 加速发展增材制造装备及核心器件	145
10.3.4 建立和完善产业标准体系	146
10.3.5 大力推进应用示范	146
10.4 增材制造技术的发展趋势	146
思考与练习	147
附录 A 增材制造技术职业技能大赛	148
附录 B 教材中英文缩写对照及注释	156
参考文献	158



概 述

本章重点

1. 掌握增材制造技术的成形原理。
2. 熟悉增材制造的流程。
3. 掌握增材制造的过程。
4. 了解增材制造技术的发展历史。

本章难点

1. 增材制造方法与传统制造方法的区别与联系。
2. 增材制造技术的作用。

20 世纪末,由于信息技术的飞速发展,形成了统一的全球市场,越来越多的企业加入竞争行列,加大了竞争的激烈程度。用户可以在全球范围内选择自己所需要的产品,对产品的品种、价格、质量及服务提出了更高的要求。产品的批量越来越小,产品的生命周期越来越短,要求企业市场响应速度越来越快。面对日趋激烈的市场竞争,制造业的经营战略,从 20 世纪 50~60 年代的“规模效益第一”和 70~80 年代的“价格竞争第一”转变为 90 年代以来的“市场响应速度第一”,时间因素被提到了首要地位,增材制造与 3D 打印技术就是在这种需求下研究发展起来的,应用这项技术能够显著地缩短产品投放市场的周期,降低成本,提高质量,增强企业的市场竞争能力。一般而言,产品投放市场的周期由设计(初步设计和详细设计)、试制、试验、征求用户意见、修改定型、正式生产和市场推销等环节所需的时间组成。由于采用增材制造与 3D 打印技术之后从产品设计的最初阶段开始,设计者、制造者、推销者和用户都能拿到实实在在的样品和小批量生产的产品,因而可以及早地、充分地进行评价、测试、

反复修改和分析工艺过程。因此,可以大大减少新产品试制中的失误和不必要的返工,从而能以最快的速度、最低的成本和最好的品质将新产品迅速投放市场。

制造技术从制造原理上可以分为三类:第一类技术为等材制造,是在制造过程中,材料仅发生了形状的变化,其质量(重量)基本上没有发生变化;第二类技术为减材制造,是在制造过程中,材料不断减少;第三类技术为增材制造,是在制造过程中,材料不断增加,如激光快速成型、3D打印等。等材制造技术已经发展了几千年,减材制造发展了几百年,增材制造仅仅是30年的发展史。从分类可知,增材制造技术相对于等材制造技术、减材制造技术就是制造技术三足鼎立的一大发明,是制造的一个重大突破,是现代制造技术的革命性发明。

1.1 增材制造技术

1.1.1 增材制造技术的含义

增材制造技术是20世纪80年代中期发展起来的一种高、新技术,是造型技术和制造技术的一次飞跃,它从成形原理上提出一个分层制造、逐层叠加成形的全新思维模式,即将计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机数字控制(CNC)、激光、精密伺服驱动和新材料等先进技术集于一体,依据计算机上构成的工件三维设计模型,对其进行分层切片,得到各层截面的二维轮廓信息,增材制造机的成形头按照这些轮廓信息在控制系统的控制下,选择性地固化或切割一层层的成形材料,形成各个截面轮廓,并逐步顺序叠加成三维工件。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是通过CAD设计数据采用材料逐层累加的方法制造实体零件的技术,相对于传统的材料去除(切削加工)技术,是一种“自下而上”材料累加的制造方法。自20世纪80年代末增材制造技术逐步发展,期间也被称为“材料累加制造”(Material Increase Manufacturing)、“快速成型”(Rapid Prototyping)、“分层制造”(Layered Manufacturing)、“实体自由制造”(Solid Freeform Fabrication)、“3D打印”(3D Printing)等。名称各异的叫法分别从不同侧面表达了该制造技术的特点。

美国材料与试验协会(ASTM)F42国际委员会对增材制造和3D打印有明确的概念定义。增材制造是依据三维CAD数据将材料连接制作物体的过程,相对于减法制造它通常是逐层累加过程。3D打印是指采用打印头、喷嘴或其他打印技术沉积材料来制造物体的技术,3D打印也常用来表示“增材制造”技术,在特指设备时,3D打印是指相对价格或总体功能低端的增材制造设备。

从广义的原理来看,以设计数据为基础,将材料(包括液体、粉材、线材或块材等)自动化地累加起来成为实体结构的制造方法,都可视为增材制造技术。

通过离散获得每一层面的制造信息和堆积的顺序,通过堆积将材料构成三维实体。因此增材制造的全过程可由图1-1表示。

增材制造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可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,从而实现“自由制造”,解决许多过去难

以制造的复杂结构零件的成形,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期。而且越是复杂结构的产品,其制造的速度作用越显著。近年来,增材制造技术取得了快速的发展。增材制造原理与不同的材料和工艺结合形成了许多增材制造设备。目前已有的设备种类达到二十多种。该技术一出现就取得了快速的发展,在各个领域都得到了广泛的应用。例如在消费类电子产品、汽车、航天航空、医疗、军工、地理信息、艺术设计等。增材制造的特点是单件或小批量的快速制造,这一技术特点决定了增材制造在产品创新中具有显著的作用。美国《时代》周刊将增材制造列为“美国十大增长最快的工业”;英国《经济学人》杂志则认为它将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”。认为该技术改变未来生产与生活模式,实现社会化制造,每个人都可以成为一个工厂,它将改变制造商品的方式,并改变世界的经济格局,进而改变人类的生活方式。



图 1-1 增材制造流程图

1.1.2 增材制造与传统制造方法的区别

传统制造方法根据零件成形的过程可以分为两大类型：一类是以成形过程中材料减少为特征,通过各种方法将零件毛坯上多余材料去除掉,如切削加工、磨削加工、各种电化学加工方法等,这些方法通常称为材料去除法;另一类是材料的质量在成形过程中基本保持不变,如采用各种压力成形方法以及各种铸造方法的零件成形,它在成形过程中主要是材料的转移和毛坯形状的改变,这些方法通常称为材料转移法。这两种方法是目前制造领域中普遍采用的方法,也是非常成熟的方法,能够满足加工精度等各种要求。然而,随着市场日新月异的变化以及产品生命周期的缩短,企业必须重视新产品的不断开发和研制,才能在竞争不断激烈的市场中立于不败之地。传统的制造方法无法很好地满足新产品快速开发的要求,促使在制造领域中发生了一场大的变革,这就是增材制造技术的出现。增材制造方法与传统制造方法的比较如图 1-2 所示。

1.1.3 增材制造与传统制造方法的关系

从以上对增材制造方法与传统制造方法的论述可以知道,它们两者之间的关系是相辅相成、相互补充、密不可分的。增材制造技术主要是制造样品,也就是将设计者的设计思想、设计模型迅速转化为实实在在的、看得见、摸得着的三维实体样件。它生产的是单个样件或是小批量样件,它的精髓是在极短的时间之内,不使用刀具、夹具、模具和辅具,将设计思想实体化,主要应用于新产品的快速开发。而真正的大批量生产,包括中批量生产还是要采用传统制造方法来实现,由于在新产品开发中首先采用了增材制造技术,再采

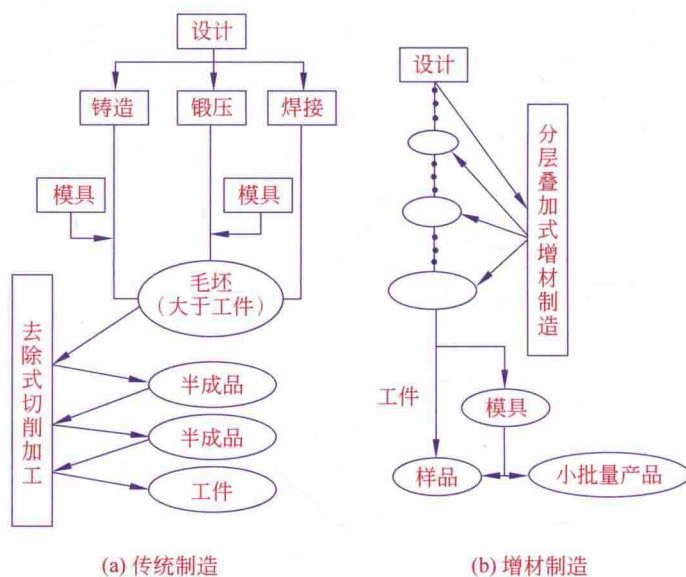


图 1-2 传统制造与增材制造方法的比较

用传统制造方法进行大批量生产时,就避免了因多次试制而出现不必要的返工,从而降低了生产成本,缩短了新产品试制的时间,使新产品能够尽早上市,提高了企业对市场响应的速度,使企业在激烈的市场竞争中占得先机。

1.2 增材制造过程

增材制造技术自诞生以来,经过三十多年的发展,根据不同成形材料已经开发出数十种成形方法,目前比较成熟、应用比较普遍的增材制造技术有以下几种。

- ① 光敏材料选择性光固化(SLA)增材制造。
- ② 粉末材料选择性激光烧结(SLS)增材制造。
- ③ 丝状材料融化沉积成形(FDM)增材制造。
- ④ 薄型材料分层切割(LOM)增材制造。
- ⑤ 金属材料的增材制造。

以上各种增材制造技术,将分别在第3~7章中进行详细的论述和讲解。

虽然增材制造技术有很多种工艺方法,但所有的增材制造工艺方法都是一层一层地制造零件,不同的是每种方法所用的材料不同,制造每一层添加材料的方法不同。增材制造的工艺过程一般为以下3个步骤,如图1-3所示。

1. 前处理

前处理包括产品三维模型的构建、三维模型的近似处理、增材制造方向的选择和三维模型的切片处理。

(1) 产品三维模型的构建。由于增材制造装备是由三维CAD模型直接驱动,因此首先要构建所加工工件的三维CAD模型。该三维CAD模型可以利用计算机辅助设计软

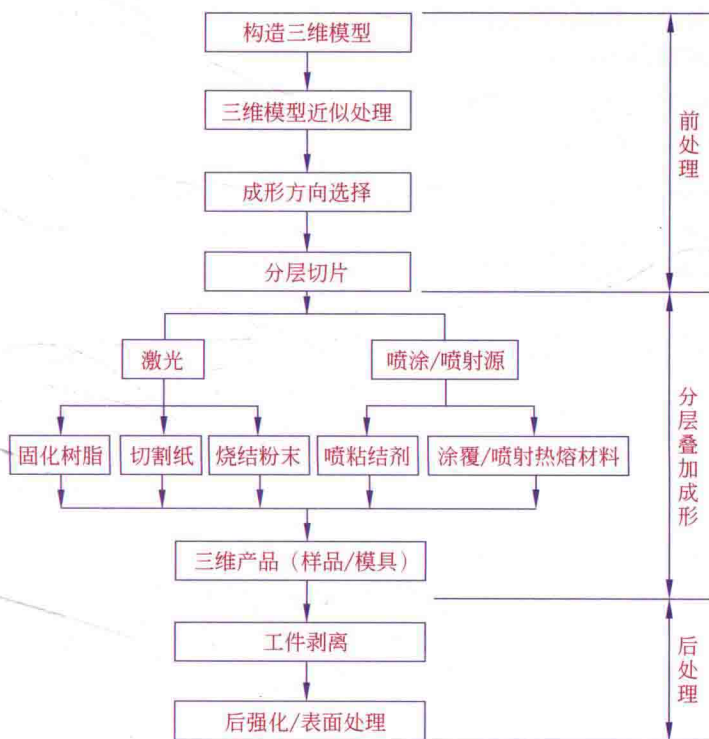


图 1-3 增材制造的全过程

件(如 Pro/E, I-DEAS, Solid Works, UG 等)直接构建,也可以将已有产品的二维图样进行转换而形成三维模型,或对产品实体进行激光扫描、CT 断层扫描,得到点云数据,然后利用反求工程的方法来构造三维模型。

(2) 三维模型的近似处理。由于产品往往有一些不规则的自由曲面,加工前要对模型进行近似处理,以方便后续的数据处理工作。由于 STL 格式文件的格式简单、实用,目前已经成为增材制造领域的准标准接口文件。它是用一系列的小三角形平面来逼近原来的模型,每个小三角形用 3 个顶点坐标和一个法向量来描述,三角形的大小可以根据精度要求进行选择。STL 文件有二进制码和 ASCII 码两种输出形式,二进制码输出形式所占的空间比 ASCII 码输出形式的文件所占用的空间小得多,但 ASCII 码输出形式可以阅读和检查。典型的 CAD 软件都带有转换和输出 STL 格式文件的功能。

(3) 增材制造方向的选择。按照产品的三维 CAD 模型,结合增材制造装备的特点,对制件的成形方向进行选择。

(4) 三维模型的切片处理。根据被加工模型的特征选择合适的加工方向,在成形高度方向上用一系列一定间隔的平面切割近似后的模型,以便提取截面的轮廓信息。间隔一般取 0.05~0.5mm,常用 0.1mm。间隔越小,成形精度越高,但成形时间也越长,效率就越低,反之则精度低,但效率高。

2. 分层叠加成形加工

分层叠加成形加工是增材制造的核心,包括模型截面轮廓的制作与截面轮廓的叠合。也就是增材制造设备根据切片处理的截面轮廓,在计算机控制下,相应的成形头(激光头

或喷头)按各截面轮廓信息做扫描运动,在工作台上一层一层地堆积材料,然后将各层相粘结,最终得到原型产品。

3. 成形零件的后处理

从成形系统里取出成形件,进行剥离、打磨、抛光、涂挂、后固化、修补、打磨、抛光和表面强化处理,或放在高温炉中进行后烧结,进一步提高其强度。

1.3 增材制造技术发展历史

1.3.1 国外增材制造技术的发展历史

1892年到1988年属于初期阶段。从历史上看,很早以前就有“材料叠加”的制造设想,1892年,J. E. Blather在他的美国专利(#473901)中,曾建议用分层制造法构成地形图。这种方法的原理是,将地形图的轮廓线压印在一系列的蜡片上,然后按轮廓线切割蜡片,并将其粘结在一起,熨平表面,从而得到三维地形图。1902年,Carlo Baese在他的美国专利(#774549)中提出了用光敏聚合物制造塑料件的原理,这是现代第一种增材制造技术——立体平板印刷术(Stereo Lithography)的初步设想。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,出现了几百个有关增材制造技术的专利,其中 Paul L Dimatteo在他1976年的美国专利(#3932923)中,进一步明确地提出:先用轮廓跟踪器将三维物体转化成许多二维轮廓薄片(图1-4),然后用激光切割这些薄片成形,再用螺钉、销钉等将一系列薄片连接成三维物体。

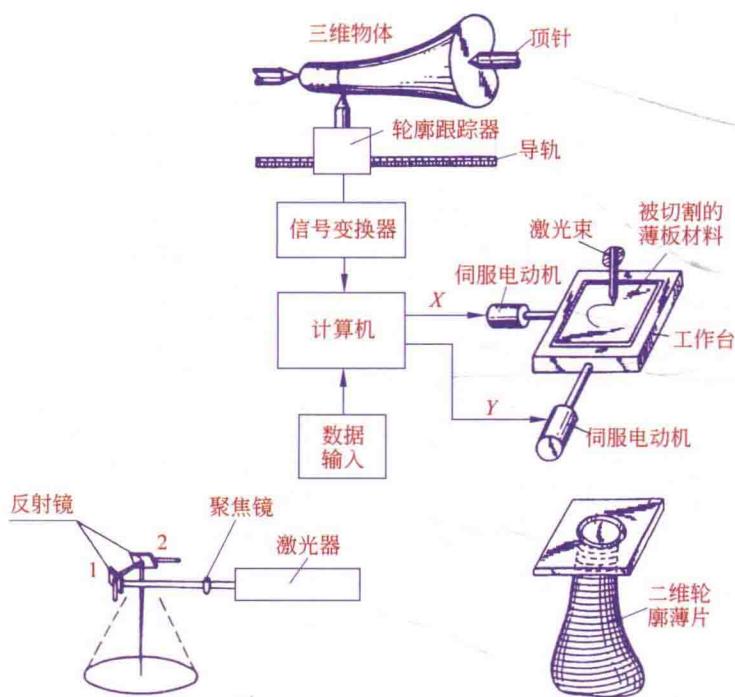


图 1-4 Paul 的分层成形法

1986 迈克尔·费金 (Michael Feygin) 研制成功分层实体制造 (Laminated Object Manufacturing, LOM), 如图 1-5 所示为 LOM 的工作示意图, 工作原理是根据零件分层几何信息切割箔材和纸等, 将所获得的层片粘结成三维实体。其工艺过程是首先铺上一层箔材, 如纸、塑料薄膜等, 然后用激光在计算机控制下切出本层轮廓, 非零件部分全部切碎以便于去除。当本层完成后, 再铺上一层箔材, 用滚子碾压并加热, 以固化粘结剂, 使新铺上的一层牢固地粘结在已成形体上, 再切割该层的轮廓, 如此反复直到加工完毕, 最后去除切碎部分以得到完整的零件。具有工作可靠、模型支撑性好、成本低、效率高的优点。但是前、后处理费时费力, 且不能制造中空结构件。由于该工艺材料仅限于纸或塑料薄膜, 性能一直没有提高, 因而逐渐走入没落。

1988 年到 1990 年属于快速原型技术的阶段。1988 年, 美国 3D Systems 公司推出世界上第一台商用快速成型机——立体光刻 SLA-1 (SLA-Stereolithography Apparatus) 机, 成为现代增材制造的标志性事件。其原理如图 1-6 所示, 快速原型阶段开发了多种增材制造技术。

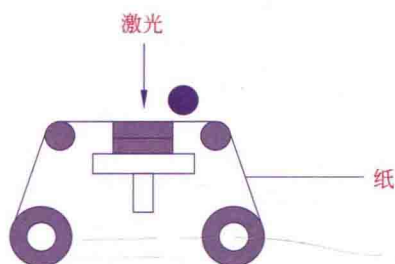


图 1-5 LOM 的工作示意图

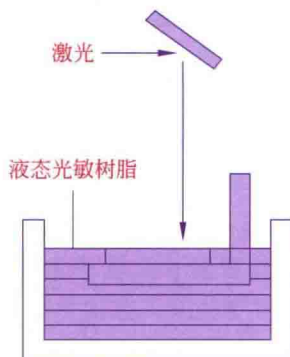


图 1-6 SLA 示意图

伊曼纽尔·萨发明三维打印 (3DP) 工艺, 将零件的截面“印刷”在材料粉末上面, 如图 1-7 所示。

1989 年美国得克萨斯大学奥斯汀分校提出选择性激光选区烧结 (Selected Laser Sintering, SLS), 如图 1-8 所示为工作示意图。该工艺常用的成形材料有金属、陶瓷、ABS 塑料等粉末。其工艺过程是先在工作台上铺上一层粉末, 在计算机控制下用激光束有选择地进行烧结, 被烧结部分便固化在一起构成零件的实心部分。一层完成后再进行下一层, 新一层与其上一层被牢牢地烧结在一起。全部烧结完成后, 去除多余的粉末, 便得到烧结成的零件。该工艺的特点是材料适应面广, 不仅能制造塑料零件, 还能制造陶瓷、金属、蜡等材料的零件。选区激光烧结技术 (SLS) 通过计算机将 3D 模型处理成薄层切片数据, 切片图形数据传输给激光控制系统。激光按照切片图形数据进行图形扫描并烧结, 形成产品的一层层形貌。SLS 技术成形件强度接近相应的注塑成形

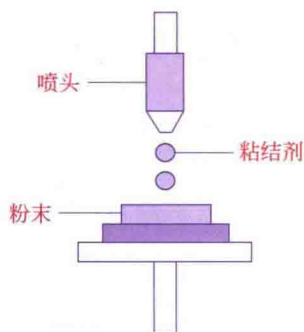


图 1-7 3DP 示意图