

高等学校
现代工程技术训练
系列教材

快速原型 制造技术

卢清萍 主编



高等教育出版社

30
34

高等学校现代工程技术训练系列教材

快速原型制造技术

卢清萍 主编

唐一平 副主编

傅水根 系列教材策划

高等教育出版社

内容提要

快速原型制造技术又称快速成形技术。作为一种先进制造技术,自 20 世纪 80 年代问世以来得到了迅速发展并在工程领域得到广泛应用。该技术打破了传统的制造模式,利用离散/堆积的原理,无需任何工、模具,由模型直接驱动,快速完成任意复杂形状的原型和零件,从而大大缩短了新产品开发的周期,极大增强了企业市场竞争力。

本书主要介绍了快速成形技术的定义、特征和几种典型的快速成形工艺,快速成形软件系统,四种国产快速设备的结构、特点、工艺操作过程和原型制造实例,快速成形技术在新产品设计、快速工模具及生物医学组中的应用。

本书是现代制造工程技术训练的系列教材之一,主要突出了实用性、可训练性和可操作性的特点,可作为工生的工程训练教材,也可以作为从事新产品设计、模具制造的工程技术人员及相关人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

快速原型制造技术/卢清萍主编:卢秉恒,张连洪编
—北京:高等教育出版社,2001.7
等学校现代工程技术训练系列教材
BN 7-04-009408-8

.快… II.①卢…②卢…③张… III.高能成型—高
校—教材 IV.TG39

国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 029178 号

编辑	刘兴祥	封面设计	刘晓翔	责任绘图	陈钧元
设计	马静如	责任校对	刘莉	责任印制	张小强

原型制造技术

卢清萍 主编

发行 高等教育出版社

地址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电话 010-6401388

传真 010-64014048

地址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

经销 新华书店北京发行所

印刷 煤炭工业出版社印刷

本 787×1092 1/16

版 次 2001 年 6 月第 1 版

张 7.5

印 次 2001 年 6 月第 1 次印刷

数 170 000

定 价 7.10 元

如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

·所有 侵权必究

前言

本书是现代工程技术训练系列教材之一,全套系列教材共6册,分别为:《特种加工技术》、《数控加工技术》、《快速原型制造技术》、《先进制造系统和管理系统》、《质量检测与控制》、《材料的先进成形技术》。全套系列教材由高等教育出版社与清华大学傅水根教授共同策划,傅水根教授对每本书的编写思路和内容均进行了仔细审阅,从整体上控制全套书的风格。

制造业是一个国家的重要基础产业,它为国民经济的各个部门提供先进的手段和装备。在新的世纪,随着信息、计算机、材料等技术的发展,制造业的发展将越来越依赖于先进制造技术的发展。先进制造技术的发展需要大批创新性的人才,这对工科大学生的培养提出了新的要求。作为工程实践这一环节,必须符合总体的培养目标。基于此,我们推出了现代制造工程技术训练的系列教材,《快速原型制造技术》作为其中之一。

快速原型制造(Rapid Prototyping Manufacturing——RPM)技术又简称快速成形(Rapid Prototyping—RP)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20年来制造领域的一次重大创新,是先进制造技术的前沿。RP技术涉及机械、材料、计算机、自动化、信息与光学等学科,综合性强。

将快速原型技术的概念、相应的设备操作、原型制作及后处理等内容引入大学工科本科的实验教学,作为对大学生进行现代制造工程技术训练的重要内容,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。

学生通过对本课程的学习不仅了解先进制造技术的前沿,同时通过对快速成形设备的实际操作,从CAD造型、工艺参数选择、工艺规划、数据处理及控制软件的应用、原型制作、精度分析及原型后处理等一系列的实践活动,培养了动手能力及解决问题的能力,这对提高学生的全面素质将起积极的促进作用。

本书共5章,由清华大学卢清萍副教授(第1~3章、第4章4.2、4.3、4.5.2、4.5.3、第5章5.1、5.2.1、5.2.2、5.3),西安交通大学卢秉恒教授、赵万华副教授(第4章4.1、4.5.1、第5章5.2.4、5.2.5),天津大学张连洪教授(第4章4.4、4.5.4、第5章5.2.3)编写。全书由清华大学卢清萍主编,西安交通大学唐一平副主编,清华大学颜永年教授主审。

在本书的编著过程中得到清华大学激光快速成形中心、西安交通大学先进制造技术研究所和天津大学机械工程学院有关教师、博士生的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

书中的错误、缺点,敬请读者批评、指正。

编 者

2001.3.15

第1章 绪论	(1)	结构	(19)
1.1 概述	(1)	3.2.2 数据处理流程	(20)
1.2 快速成形技术	(1)	3.2.3 主要模块的功能	(21)
1.2.1 定义	(1)	第4章 快速原型设备	(22)
1.2.2 特征	(2)	4.1 CPS 快速成型机	(22)
1.2.3 快速成形称谓简介	(3)	4.1.1 设备结构简介	(22)
第2章 几种典型的快速成形工艺	(5)	4.1.2 工艺过程及操作步骤	(25)
2.1 立体光刻(SL, Stereolithography)		4.1.3 CPS250 成型机常见故障及排除	
工艺	(5)	方法	(33)
2.1.1 原理	(5)	4.2 SSM-800 快速成型制造系统	(34)
2.1.2 工艺过程和特点	(5)	4.2.1 设备结构简介	(34)
2.1.3 成型材料	(5)	4.2.2 控制软件操作界面	(36)
2.2 分层实体制造(LOM, Laminated		4.2.3 SSM-800 制造系统的工艺过程	
Object Manufacturing)工艺	(7)		(43)
2.2.1 原理	(7)	4.2.4 操作注意事项及故障分析	(44)
2.2.2 工艺过程与特点	(7)	4.3 MEM-250-II 熔融挤压成型	
2.2.3 成型材料	(8)	机	(46)
2.3 熔融沉积制造(FDM, Fused		4.3.1 设备结构简介	(46)
Deposition Modeling)工艺	(9)	4.3.2 控制软件	(48)
2.3.1 原理	(9)	4.3.3 MEM-250-II 的操作说明	(55)
2.3.2 工艺过程与特点	(9)	4.3.4 安全维护	(58)
2.3.3 成型材料	(9)	4.4 AFS-300 激光快速成型机	(59)
2.4 选择性激光烧结(SLS, Selective		4.4.1 设备结构简介	(59)
Laser Sintering)工艺	(10)	4.4.2 控制软件操作界面	(62)
2.4.1 原理	(10)	4.4.3 工艺过程及操作步骤	(67)
2.4.2 工艺过程与特点	(11)	4.4.4 注意事项及故障分析	(71)
2.4.3 成型材料	(11)	4.5 原型制作实例	(73)
第3章 快速成形的软件系统	(12)	4.5.1 SL 工艺原型制作实例	(73)
3.1 数据格式	(12)	4.5.2 LOM 工艺原型制作实例	(76)
3.1.1 常用的数据格式	(12)	4.5.3 FDM 工艺原型制作实例	(79)
3.1.2 RP 成形系统常用的三种数据		4.5.4 SLS 工艺原型制作实例	(82)
格式的比较	(17)	第5章 快速成形技术的工程应用	(86)
3.2 数据检验与处理软件	(19)	5.1 新产品开发	(86)
3.2.1 数据检验与处理软件的模块		5.2 快速工模具制造技术	(87)

5.2.1 陶瓷型快速金属模具	(88)	5.3.2 试验分析模型	(109)
5.2.2 石膏型快速金属模具	(93)	5.3.3 建筑行业	(109)
5.2.3 硅胶复模技术	(97)	附表一 国内生产厂家及设备一览表	
5.2.4 金属喷涂快速模具	(101)		(110)
5.2.5 电铸快速制模	(104)	附表二 国外生产厂家及设备一览表	
5.3 其他领域的应用	(108)		(111)
5.3.1 生物医学及组织工程领域	(108)	参考文献	(113)

第1章 绪 论

1.1 概 述

制造业为人类创造着辉煌的物质文明。据统计,1990年20个工业化国家的制造业所创造的财富占国民生产总值(GDP)的比例平均为22.15%。因此,制造业是一个国家的立国之本。

20世纪下半叶以来,随着科学技术的迅速发展,制造业正在经历一场深刻的变革。随着现代物质文明的高度发展,人们生活水平的提高,人们的消费也日趋个性化。市场需求已由卖方市场转化为买方市场并日趋全球化。空前激烈的市场竞争迫使制造企业必须以更快的速度设计、制造出性能价格比高并满足人们需求的产品。因此,产品快速开发的技术和手段成了企业的核心竞争力。在这样的形势下,传统的大批量、刚性的生产方式及其制造技术已不能适应要求,于是先进制造技术就成为世界范围内的研究热点,涌现了计算机集成制造、敏捷制造、并行工程、智能制造等先进的生产管理模式和净成形、激光加工、快速成形等先进的成形概念和技术。

产生于20世纪80年代的快速成形技术是先进制造技术的重要组成部分。该技术是基于离散/堆积成形原理,集成了计算机、数控、激光、新材料等技术发展起来的,与60年代的数控技术一样对制造业产生了巨大的影响。

快速成形技术经过十多年的发展,目前已有几十种工艺及相应的商品化设备。在这一领域,美国一直处于领先地位,各种新工艺大都在美国最先出现,研究、开发的工艺种类也最多。其次在欧洲、日本发展也很快。国内在该领域的研究起步较晚,20世纪90年代初开始涉足,经过几年的努力,在快速成形工艺研究、成形设备开发、数据处理及控制软件、新材料的研发等方面都做了大量卓有成效的工作,赶上了世界发展的步伐,并有新的创新。

1.2 快速成形技术

1.2.1 定义

快速成形技术是由CAD模型直接驱动,快速制造任意复杂形状的三维物理实体的技术。其核心是由CAD模型直接驱动,其基本过程如图1.1所示:首先由CAD软件设计出所需零件的计算机三维曲面或实体模型,即数字模型或称电子模型;然后根据工艺要求,按照一定的规则将该模型离散为一系列有序的单元,通常在Z向将其按一定厚度进行离散(习惯称为分层或切片),把三维电子模型变成一系列的二维层片;再根据每个层片的轮廓信息,进行工艺规划,选择合适的

加工参数,自动生成数控代码;最后由成形机接受控制指令制造一系列层片并自动将它们联接起来,得到一个三维物理实体。这种将一个物理实体复杂的三维加工离散成一系列二维层片的加工,是一种降维制造的思想,大大降低了加工难度,并且成形过程的难度与待成形的物理实体的形状和结构的复杂程度无关。



图 1.1 快速成形过程示意图

快速成形由以下五个步骤组成(图 1.2):

(1) CAD 模型设计 主要是解决零件的几何造型,因此需有较强的实体造型或曲面造型功能,并与后续的软件具有良好的数据接口。目前,大多数 CAD 商业软件均配有 STL 数据转换接口,如 Pro/Engineer, UG, I - DEAS, CADKEY, CATIA, Strim100, SolidWorks, AutoCAD2000 等。

(2) Z 向离散化 这是一个分层过程,它将 CAD 模型在 Z 向上分成一系列具有一定厚度的薄层,厚度通常在 0.05 ~ 0.3 mm 之间。离散化破坏了零件在 Z 向的连续性,使之在 Z 向上产生了“台阶”。但从理论上讲,只要将分层厚度定得合理,就可以满足零件的加工精度要求。

(3) 层面信息处理 为控制成形机对层面的加工轨迹,必须把层面的几何形状信息转换成控制成形机运动的数控代码。

(4) 层面加工与粘接 成形机根据控制指令进行二维扫描。同时进行层与层的粘接。

(5) 层层堆积 当一层制造完毕后,成形机工作台面下降一个层厚的距离,再加工新的一层,如此反复进行直至整个原型加工完成。对完成的原型进行后处理,如深度固化、去除支撑、修磨、着色等,使之达到要求。

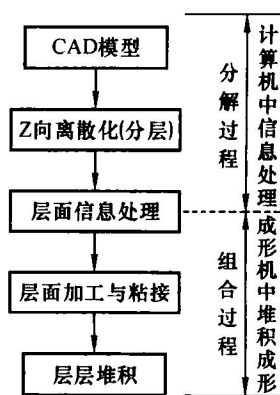


图 1.2 快速成形的五个步骤

1.2.2 特征

快速成形技术在成形概念上以离散/堆积成形为指导思想;在控制上以计算机和数控为基础,以最大柔性为目标。因此,只有在计算机技术和数控技术高度发展的今天,才有可能产生快速成形技术。CAD 技术实现了零件的曲面或实体造型,能够进行精确的离散运算和繁杂的数据转换。先进的数控技术为高速精确的二维扫描提供必要的基础,这是精确高效堆积材料的前提。而材料科学的发展则为快速成形技术奠定了坚实的基础,材料技术的每一项进步都将给快速成形技术带来新的发展机遇。目前快速成形技术中材料的转移形式可以是自由添加、去除、添加和

去除相结合等多种形式,构成三维物理实体的每一层片,一般为 2.5 维层片,即侧壁为直壁的层片,目前也出现了由 3 维层片构成实体的工艺。

快速成形技术的重要特征是:

- 1) 高度柔性,成形过程无需专用工具或夹具,可以制造任意复杂形状的三维实体;
- 2) CAD 模型直接驱动,CAD/CAM 一体化,无需人员干预或较少干预,是一种自动化的成形过程;
- 3) 成形过程中信息过程和材料过程的一体化,适合成形材料为非均质并具有功能梯度或有孔隙度要求的原型;
- 4) 成形的快速性,适合现代激烈竞争的产品市场;
- 5) 技术的高度集成性,快速成形是计算机、数控、激光、新材料等技术的高度集成。

1.2.3 快速成形称谓简介

在快速成形技术的发展过程中,各个研究机构和人员均按照自己的理解赋予其不同的称谓,如自由成形制造(FFF, Free Form Fabrication)、实体自由成形制造(SFF, Solid Freeform Fabrication)、分层制造(LM, Layered Manufacturing)、添加制造(AM, Additive Manufacturing)或材料添加制造(MIM, Material Increase Manufacturing)、直接 CAD 制造(DCM, Direct CAD Manufacturing)、即时制造(IM, Instant Manufacturing)等等。快速成形技术的不同称谓即反映了其不同方面的主要特征。下面将这些称谓及其所反映的快速成形技术的基本特征逐一简要分析。

1. 离散堆积制造(DAM, Discretization Accumulation Manufacturing)

离散堆积制造是现代成形学理论在对成形技术发展进行总结的基础上提出的,体现了快速成形技术的基本成形原理。它既表明了模型信息处理过程的离散性,也强调成形物理过程的材料堆积性。离散堆积制造的提法不局限于现有的成形工艺,没有对制造单元的性状做任何限制。制造单元可以是二维层片,也可以是更低维的线单元、点单元,或者是更高维的三维实体。它是从成形原理的角度做出的概括,具有较强的概括性和适应性。

2. 分层制造(LM, Layered Manufacturing)

分层制造体现了目前已有的快速成形工艺的基本成形过程特征,强调快速成形技术是采用将复杂的三维加工分解成一系列二维层片的加工。不同于锻压、铸造等传统成形工艺的一次成形性,着重强调“层”作为制造单元的特点,尽管每层还可采取更低维单元进行累加或高维单元进行加工得到。

3. 材料添加制造(MIM, Material Increase Manufacturing)

材料添加制造从材料在成形过程中的状态变化角度出发,强调快速成形技术是在 CAD 模型离散的基础上将材料单元采用一定方式堆积、叠加成形,而不同于车削加工等基于材料去除原理的传统加工工艺。

由于目前出现的快速成形工艺均采用一层层叠加制造的原理,是在 CAD 模型离散基础上的材料分层累加成形过程,所以上述三个概念没有显著意义上的不同。由于一般不存在无法加工或加工很困难的二维层片,添加制造时也不存在三维加工中重点考虑的刀具干涉的问题,快速成形技术使得加工过程大大简化。所以从理论上讲,任意复杂形状的零件,甚至组合零件或部件都可以成形。

4. 直接 CAD 制造(DCM, Direct CAD Manufacturing)

直接 CAD 制造反映了快速成形 CAD 模型直接驱动,实现了设计与制造一体化。计算机中的 CAD 模型通过接口软件直接驱动快速成形设备,接口软件完成 CAD 数据向设备数控指令的转化和成形过程的工艺规划,成形设备则像打印机一样“打印”零件,完成三维输出。这一点一直是人们追求的目标。在传统的 CAD、CAM 技术中,由于成形思想的局限性,致使设计制造一体化很难实现,复杂的 CAPP(计算机辅助工艺规划—Computer Aided Process Planning)一直是实现设计制造一体化较难克服的一个障碍。而对于快速成形来说,由于采用了离散/堆积的加工工艺,CAD 和 CAM 能够很顺利地结合在一起。快速成形的工艺规划与传统数控加工有很大不同,其主要作用是对成形过程进行优化以提高造型精度、速度和质量,所以快速成形可以容易地实现设计制造一体化。

5. 实体自由成形制造(SFF, Solid Freeform Fabrication)

实体自由成形制造表明快速成形技术无需专用的模腔或夹具,零件的形状和结构也相应不受任何约束。这和传统的模锻、铸造等在型腔约束下成形有很大不同,也不同于需要专用夹具的冷加工。由于无需专用的夹具或工具,成形过程具有极高的柔性,这是快速成形技术非常重要的一个特征。快速成形工艺是用逐层变化的截面来制造三维形体,在制造每一层片时都和前一层自动实现联接,第一层和成形平台连接,这样零件成形过程中不需要专用夹具或工具,使制造成本完全与批量无关。当零件的形状、要求和批量改变时,不需要进行重新设计、制造工装和专用工具,只需要改变它的 CAD 模型,调整和设置工艺参数,即可制造出新的零件。这样既增加了成形工艺的柔性,又节省了制造工装和专用工具的大量成本。

6. 即时制造(Instant Manufacturing)、快速成形(RP, Rapid Prototyping)

即时制造和快速成形都反映了该类技术的快速响应性。由于无需针对特定零件制定工艺操作规程,也无需准备专用夹具和工具,所以当零件三维 CAD 模型建立之后,可立即输入快速成形系统,由数据处理软件进行零件信息处理和工艺规划,然后自动生成数控代码控制成形机造型。快速成形工艺造型过程所需时间与零件形状和大小有关,也和工艺种类有关。由于比传统工艺节省了大量的工艺准备时间,快速成形工艺制造一个零件的全过程均远远短于传统工艺相应过程,使得快速成形技术尤其适合于新产品的开发,显示了其适应现代科技和社会发展的快速反应的特征。

第2章 几种典型的快速成形工艺

在众多的快速成形(以下简称 RP)工艺中,具有代表性的工艺是 SL、LOM、FDM、SLS 等。下面对这些典型工艺的原理、特点和成型材料分别进行简单介绍。

2.1 立体光刻(SL, Stereolithography)工艺

立体光刻(SL)工艺,由 Charles Hull 于 1984 年获美国专利。1988 年美国 3D Systems 公司推出商品化样机 SLA-1,这是世界上第一台快速原型成形机。SLA 系列成形机占据着 RP 设备市场较大的份额。

2.1.1 原理

SL 工艺是基于液态光敏树脂的光聚合原理工作的。这种液态材料在一定波长($\lambda = 325 \text{ nm}$)和功率($P = 30 \text{ mW}$)的紫外光的照射下能迅速发生光聚合反应,分子量急剧增大,材料也就从液态转变成固态。

2.1.2 工艺过程和特点

图 2.1 为 SL 工艺原理图。液槽中盛满液态光敏树脂,激光束在偏转镜作用下,能在液体表面上扫描,扫描的轨迹及激光的有无均由计算机控制,光点扫描到的地方,液体就固化。成型开始时,工作平台在液面下一个确定的深度,液面始终处于激光的焦平面,聚焦后的光斑在液面上按计算机的指令逐点扫描即逐点固化。当一层扫描完成后,未被照射的地方仍是液态树脂。然后升降台带动平台下降一层高度,已成型的层面上又布满一层树脂,刮平器将粘度较大的树脂液面刮平,然后再进行下一层的扫描,新固化的一层牢固地粘在前一层上,如此重复直到整个零件制造完毕,得到一个三维实体原型。

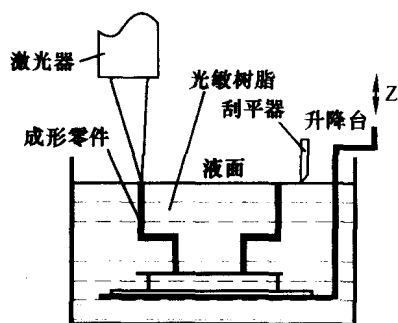


图 2.1 SL 工艺原理图

SL 方法是目前 RP 技术领域研究中研究得最多的方法,也是技术上最为成熟的方法。SL 工艺成形的零件精度较高。

多年的研究改进了截面扫描方式和树脂成形性能,使该工艺的精度能达到或小于 0.1 mm 。

2.1.3 成型材料

SL 工艺的成型材料称为光固化树脂(或称光敏树脂),光固化树脂材料中主要包括齐聚物、

反应性稀释剂及光引发剂。根据引发剂的引发机理,光固化树脂可以分为三类:自由基光固化树脂、阳离子光固化树脂和混杂型光固化树脂。

1. 自由基光固化树脂

自由基齐聚物主要有三类:环氧树脂丙烯酸酯(聚合快、终产品强度高但脆性较大、产品易泛黄)、聚酯丙烯酸酯(流平好、固化好、性能可调节)和聚氨酯丙烯酸酯(可赋予产品柔顺性与耐磨性,但聚合速度减慢)。稀释剂包括多官能度单体与单官能度单体两类。此外,常规的添加剂还有:阻聚剂、UV 稳定剂、消泡剂、流平剂、光敏剂、染料、天然色素、填充剂及惰性稀释剂等。其中的阻聚剂特别重要,因为它可以保证液态树脂在容器中具有较长的存放时间。

表 2.1 SL 光固化树脂的性能比较

树脂类型	丙烯酸类	氨基甲酸乙酯丙烯酸类	环氧类
树脂名称	XB5081-1	XB5149	XB5170
尺寸性能与精度			
试件精度 (均方根误差 mils ^①)	5.3	6.1	2.8
悬臂梁翘曲	10%	10%	1%
生坯件蠕变率 (mils/long _{10t})	3.7	11.5	0.5
线性收缩率	0.7%	0.6%	0.06%
平面变形/mils	71	70	20
物理性能			
粘度 @ 30℃/cps ^②	2,400	2,000	180
生坯件弯曲模量/MPa	620	310	1,700
固化后抗拉模量/MPa	3,000	1,150	2,700
断裂伸长率	2.5%	10%	9%
冲击强度/(kJ ^③ /m ²)	3	23	30
激光造型性能			
临界照射强度 mJ ^④ /cm ²	7	6	9
固化深度/mils	7	5.5	4.5
聚合机理	自由基聚合	自由基聚合	阳离子聚合

注:① Mils:毫英寸(1 mils = 10⁻³ inch);

② Cps:厘泊(@ 30℃表示在 30℃时的粘度);

③ kJ:千焦耳;

④ mJ:毫焦耳。

2. 阳离子光固化树脂

阳离子光固化树脂的主要成分为环氧化合物。用于 SL 工艺的阳离子型齐聚物和活性稀释剂,通常为环氧树脂和乙烯基醚。环氧树脂是最常用的阳离子型齐聚物,其优点如下:

(1) 固化收缩小,预聚物环氧树脂的固化收缩率为 2% ~ 3%,而自由基光固化树脂的预聚物丙烯酸酯的固化收缩率为 5% ~ 7%;

(2) 产品精度高;

(3) 阳离子聚合物是活性聚合,在光熄灭后可继续引发聚合;

(4) 氧气对自由基聚合有阻聚作用,而对阳离子树脂则无影响;

(5) 粘度低;

(6) 生坯件强度高;

(7) 产品可以直接用于注塑模具。

3. 混杂型光固化树脂

比起自由基光固化树脂和阳离子光固化树脂,混杂型光固化树脂有许多优点,目前的趋势是使用混杂型光固化树脂。其优点主要有:

(1) 环状聚合物进行阳离子开环聚合时,体积收缩很小甚至产生膨胀,而自由基体系总有明显的收缩,混杂体系可以设计成无收缩的聚合物。

(2) 当系统中有碱性杂质时,阳离子聚合的诱导期较长,而自由基聚合的诱导期较短,混杂体系可以提供诱导期短而聚合速度稳定的聚合系统。

(3) 在光照消失后阳离子仍可引发聚合,故混杂体系能克服光照消失后自由基迅速失活而使聚合终结的缺点。

4. 主要光固化树脂材料性能比较

目前,新开发出来许多具有独特性能的 SL 树脂,如收缩率小甚至无收缩,变形小,不用二次固化,强度高。

表 2.1 列出 Ciba 公司生产的三种主要的 SL 光固化树脂的性能比较。

2.2 分层实体制造(LOM, Laminated Object Manufacturing)工艺

分层实体制造(LOM)工艺又称叠层实体制造或分层实体制造,由美国 Helisys 公司的 Michael Feygin 于 1986 年研制成功,并推出商品化的机器。

2.2.1 原理

LOM 工艺采用薄片材料,如纸、塑料薄膜等。片材表面事先涂覆上一层热熔胶。加工时,用 CO₂ 激光器(或刀)在计算机控制下切割片材,然后通过热压辊热压,使当前层与下面已成形的工件粘接,从而堆积成型。

2.2.2 工艺过程与特点

图 2.2 是 LOM 工艺的原理图。用 CO₂ 激光器在刚粘接的新层上切割出零件截面轮廓和工件外框,并在截面轮廓与外框之间多余的区域内切割出上下对齐的网格;激光切割完成后,工作台带动已成形的工件下降,与带状片材(料带)分离;供料机构转动收料轴和供料轴,带动料带移

动,使新层移到加工区域;工作台上升到加工平面;热压辊热压,工件的层数增加一层,高度增加一个料厚;再在新层上切割截面轮廓。如此反复直至零件的所有截面切割、粘接完,得到三维的实体零件。

LOM 工艺只需在片材上切割出零件截面的轮廓,而不用扫描整个截面。因此易于制造大型、实体零件。零件的精度较高($< 0.15 \text{ mm}$)。工件外框与截面轮廓之间的多余材料在加工中起到了支撑作用,所以 LOM 工艺无需加支撑。

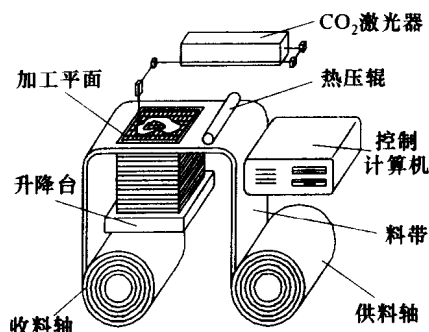


图 2.2 LOM 工艺原理图

2.2.3 成型材料

LOM 工艺中的成型材料涉及到三个方面的问题,即纸、热熔胶和涂布工艺。纸材料的选取、热熔胶的配置及涂布工艺的研究均要从保证最终成型零件的质量出发,同时要考虑成本。

1. 纸的性能

(1) 抗湿性 保证纸原料(卷轴纸)不会因时间长而吸水。纸的施胶度可用来表示纸张抗水能力的大小。

(2) 良好的浸润性 保证良好的涂胶性能。

(3) 抗拉强度 保证在加工过程中不被拉断。

(4) 收缩率小 保证热压过程中不会因部分水分损失而导致变形,可用纸的伸缩率参数计量。

(5) 剥离性能好 因剥离时,在纸张内部发生破坏,要求纸的垂直方向抗拉强度不是很大。

(6) 易打磨 表面光滑。

(7) 稳定性 成型零件可长时间保存。

2. 热熔胶和涂布工艺

分层实体制造中的成型材料为涂有热熔胶的薄层材料,层与层之间的粘结是靠热熔胶保证的。热熔胶的种类很多,其中以 EVA 型热熔胶的需求量为量大,占热熔胶消费总量的 80% 左右。分层实体制造中采用 EVA 型热熔胶。

EVA 型热熔胶由共聚物 EVA 树脂、增粘剂、蜡类和抗氧剂等组成。EVA 树脂中醋酸乙烯的含量(VA%含量)增加,树脂的韧性、耐冲击性、柔韧性、耐应力开裂性、粘性增加,胶接的剥离强度提高,橡胶弹性增大,但强度、硬度、熔融点和热变形温度也随之下降。可以根据热熔胶的性能要求选择适当的 VA 百分含量的 EVA 树脂做主体材料。熔体流动速率 MI 与分子结构和分子量有关,一般讲 MI 数值大,树脂熔融粘度低,配置的热熔胶粘度低,流动性好,有利于往被粘物表面扩散和渗透。

为了增加对被粘物体的表面粘附性、胶接强度,EVA 型热熔胶配方中需加增粘剂。随着增粘剂用量增加,流动性、扩散性变好,能提高胶接面的润湿性和初粘性。但增粘剂用量过多,胶层变脆,内聚强度下降。设计热熔胶配方时,选择增粘剂的软化点和 EVA 软化点最好同步,这样配置的热熔胶熔化范围窄,性能好。

蜡类也是 EVA 型热熔胶配方中常用的材料。在配方中加入蜡类,可以降低熔融粘度,缩短

固化时间,可进一步改善热熔胶的流动性和润湿性,可防止热熔胶存放结块及表面发粘,但用量过多,会使胶接强度下降。

为了防止热熔胶热分解、胶变质和胶接强度下降,延长胶的使用寿命,一般加入 0.5% ~ 2% 的抗氧化剂。为了降低成本,减少固化时的收缩率和过度渗透性,有时加入填料。

热熔胶涂布可分为均匀式涂布和非均匀涂布两种。均匀式涂布采用狭缝式刮板进行涂布,非均匀涂布有条纹式和颗粒式。一般来讲,非均匀涂布可以减小应力集中,但涂布设备比较贵。

2.3 熔融沉积制造(FDM, Fused Deposition Modeling)工艺

熔融沉积制造(FDM)工艺由美国学者 Dr.Scott Crump 于 1988 年研制成功。并由美国 Stratasys 公司推出商品化的机器。

2.3.1 原理

FDM 工艺是利用热塑性材料的热熔性、粘结性,在计算机控制下层层堆积成型。

2.3.2 工艺过程与特点

图 2.3 表示了 FDM 工艺原理,材料先抽成丝状,通过送丝机构送进喷头,在喷头内被加热熔化,喷头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动,同时将熔化的材料挤出,材料迅速固化,并与周围的材料粘结,层层堆积成型。该工艺不用激光,因此使用、维护简单,成本较低。用蜡成形的零件原型,可以直接用于失蜡铸造。用 ABS 工程塑料制造的原型因具有较高强度而在产品设计、测试与评估等方面得到广泛应用。由于以 FDM 工艺为代表的熔融材料堆积成形工艺具有一些显著优点,该工艺发展极为迅速。

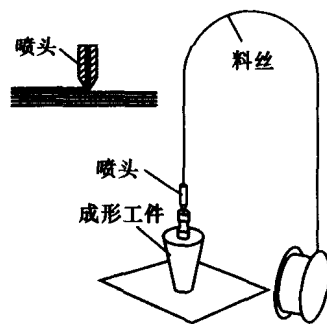


图 2.3 FDM 工艺原理图

2.3.3 成型材料

材料是 FDM 工艺的基础,FDM 工艺中使用的材料分为成型材料和支撑材料。

1. 成型材料

FDM 工艺对成型材料的要求是熔融温度低、粘度低、粘结性好、收缩率小。影响材料挤出的主要因素是粘度。材料的粘度低、流动性好,阻力就小,有助于材料顺利的挤出。材料的流动性差,需要很大的送丝压力才能挤出,会增加喷头的启停响应时间,从而影响成型精度。

熔融温度低对 FDM 工艺的好处是多方面的。熔融温度低可以使材料在较低的温度下挤出,有利于提高喷头和整个机械系统的寿命;可以减少材料在挤出前后的温差,减少热应力,从而提高原型的精度。

粘结性主要影响零件的强度。FDM 工艺是基于分层制造的一种工艺,层与层之间往往是零件强度最薄弱的地方,粘结性好坏决定了零件成型以后的强度。粘结性过低,有时在成型过程中

由于热应力就会造成层与层之间的开裂。零件的粘结从理论上主要有两种方式,液固粘结和液液粘结。液固粘结是指从喷头挤出的丝,浸润在上层已经固化的丝上,粘结在一起,这种方式的粘结对材料的粘结性要求比较高;液液粘结是指从喷头挤出的丝将上层的丝重新熔化,依靠同种材料本身的亲和性粘结在一起,这种方式粘结强度较高,但是会对造型精度造成不利的影响。

收缩率在很多方面影响零件的成型精度。由于在挤出时,喷头内部需要保持一定的压力才能将材料顺利的挤出,丝在挤出后一般会发生一定程度的膨胀。如果材料收缩率对压力比较敏感,会造成喷头挤出的丝直径与喷嘴的名义直径相差太大,影响材料的成型精度。FDM 成型材料的收缩率对温度不能太敏感。由于 FDM 工艺一般在 $80 \sim 120^{\circ}\text{C}$ 进行,材料的收缩率必然会引起尺寸误差,同时会产生热应力,严重时会使零件翘曲、开裂。

2. 支撑材料

FDM 工艺对支撑材料的要求是能够承受一定的高温、与成型材料不浸润、具有水溶性或者酸溶性、具有较低的熔融温度、流动性要特别好。具体来说:

(1) 能承受一定的高温。由于支撑材料要与成型材料在支撑面上接触,所以支撑材料必须能够承受成型材料的高温,在此温度下不产生分解、融化。由于 FDM 工艺挤出的丝比较细,在空气中能够比较快的冷却,所以支撑材料能承受 100°C 以下的温度即可。

(2) 与成型材料不浸润,便于后处理。支撑材料是加工中采取的辅助手段,在加工完毕后必须去除,所以支撑材料与成型材料的亲和性不能太好。

(3) 具有水溶性或者酸溶性。由于 FDM 工艺的一大优点是可以成型任意复杂程度的零件,经常用于成型具有很复杂的内腔、孔等零件,为了便于后处理,最好是支撑材料在某种液体里可以溶解。这种液体必须不能产生污染或有难闻的气味。由于现在使用的成型材料一般是 ABS 工程塑料,该材料一般可以溶解在有机溶剂中,所以不能使用有机溶剂。目前已开发出水溶性支撑材料。

(4) 具有较低的熔融温度。具有较低的熔融温度可以使材料在较低的温度挤出,提高喷头的使用寿命。

(5) 流动性要好。由于对支撑材料的成型精度要求不高,为了提高机器的扫描速度,要求支撑材料具有很好的流动性,相对而言,对于粘结性可以差一些。

2.4 选择性激光烧结(SLS, Selective Laser Sintering)工艺

选择性激光烧结(SLS)工艺又称为选区激光烧结,由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C.R. Dechard 于 1989 年研制成功。该方法已被美国 DTM 公司商品化。

2.4.1 原理

SLS 工艺是利用粉末材料(金属粉末或非金属粉末)在激光照射下烧结的原理,在计算机控制下层层堆积成形。

2.4.2 工艺过程与特点

图 2.4 是 SLS 工艺原理图。将材料粉末铺洒在已成形零件的上表面,并刮平;用高强度的 CO_2 激光器在刚铺的新层上扫描出零件截面;材料粉末在高强度的激光照射下被烧结在一起,得到零件的截面,并与下面已成形的部分粘接;当一层截面烧结完后,再铺上新的一层材料粉末,选择地烧结新一层截面。

SLS 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、石蜡等材料的零件。特别是可以直接制造金属零件,这使 SLS 工艺颇具吸引力。SLS 工艺无需加支撑,因为没有被烧结的粉末起到了支撑的作用。

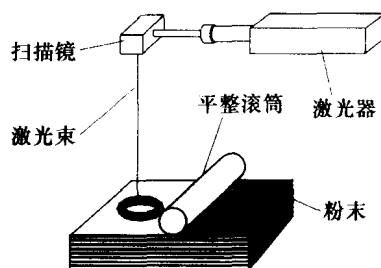


图 2.4 SLS 工艺原理图

2.4.3 成型材料

用于 SLS 工艺的材料是各类粉末,包括金属、陶瓷、石蜡以及聚合物的粉末,近年来更多地采用复合粉末。工程上一般如表 2.2 划分颗粒等级。

表 2.2 SLS 粉末材料颗粒等级划分

大于 10 mm	粒体	1 μm ~ 10 nm	细粉末或微粉末
10 mm ~ 100 μm	粉粒	小于 1 nm	超微粉末(纳米粉末)
100 μm ~ 1 μm	粉末		

间接 SLS 用的复合粉末通常有两种混合形式:一种是粘接剂粉末与金属或陶瓷粉末按一定比例机械混合;另一种则是把金属或陶瓷粉末放到粘接剂稀释液中,制取具有粘接剂包覆的金属或陶瓷粉末。实验表明,这种粘接剂包覆的粉末制备虽然复杂,但烧结效果较机械混合的粉末好。

近年来开发的较为成熟的用于 SLS 工艺的材料如表 2.3 所示。

为了提高原型的强度,用于 SLS 工艺材料的研究转向金属和陶瓷,这也正是 SLS 工艺优越于 SL、LOM 工艺之处。

表 2.3 用于 SLS 工艺的材料一览表

材 料	特 性
石蜡	主要用于失蜡铸造,制造金属型
聚碳酸酯	坚固耐热,可以制造微细轮廓及薄壳结构,也可以用于消失模铸造,正逐步取代石蜡
尼龙 纤维尼龙 合成尼龙 (尼龙纤维)	它们都能制造可测试功能零件,其中合成尼龙制件具有最佳的力学性能
钢铜合金	具有较高的强度,可作注塑模

美国 B.F. Goodrich 公司专门开发了用于 SLS 工艺的石蜡粉末。

近年来,金属粉末的制取越来越多地采用雾化法。主要有两种方式:离心雾化法和气体雾化法。它们的主要原理是使金属熔融,高速将金属液滴甩出并急冷,随后形成粉末颗粒。

SLS 工艺还可以采用其他粉末,比如聚碳酸酯粉末,当烧结环境温度控制在聚碳酸酯软化点附近时,其线胀系数较小,进行激光烧结后,被烧结的聚碳酸酯材料翘曲较小,具有很好的工艺性能。