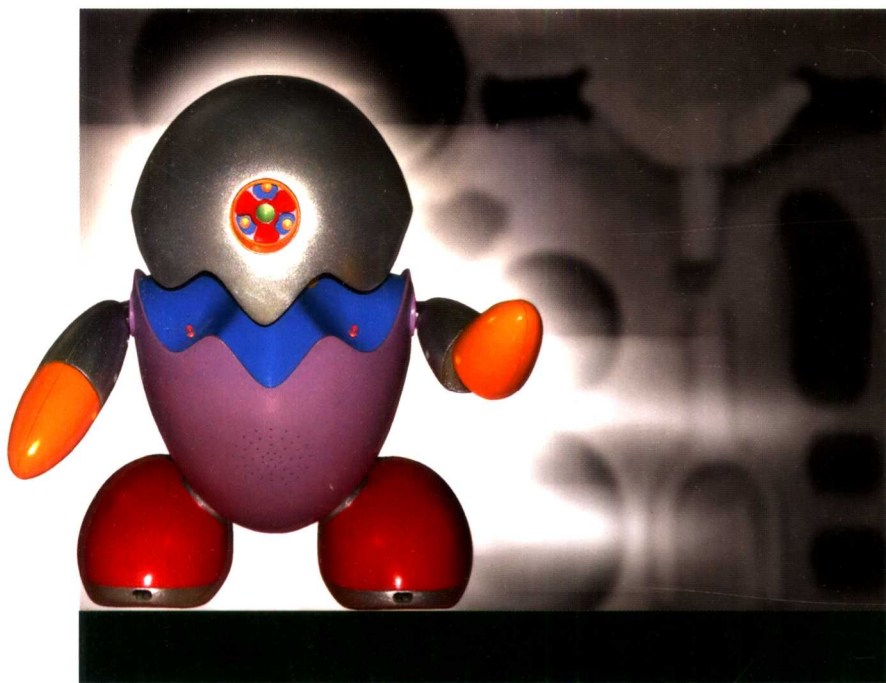


现代加工技术丛书

快速成形技术

郭 戈 颜旭涛 唐果林 主编



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

现代加工技术丛书

快速成形技术

郭 戈 颜旭涛 唐果林 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

快速成形技术/郭戈, 颜旭涛, 唐果林主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 10

(现代加工技术丛书)

ISBN 7-5025-6157-9

I. 快… II. ①郭… ②颜… ③唐… III. 金属压力加工-塑性变形-计算机辅助设计 IV. TG302-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 099998 号

现代加工技术丛书

快速成形技术

郭 戈 颜旭涛 唐果林 主编

责任编辑: 李玉晖

责任校对: 李 军

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

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

*

新华书店北京发行所经销

北京兴顺印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 7 $\frac{3}{4}$ 插页 1 字数 173 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6157-9/TH·241

定 价: 18.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

制造业是一个国家的重要基础产业，为人类社会创造了大量的物质财富。21 世纪是以知识经济和信息社会为特征的时代，瞬息万变的市场和对小批量多品种产品的要求使制造业面临严峻挑战。在制造业日趋国际化的状况下，缩短产品开发周期和减少开发新产品投资风险，成为企业赖以生存的关键。

从当前的制造业的发展趋势来看，现代加工技术将具有巨大的发展潜力和应用空间。在这样一个形势下，化学工业出版社组织出版了《现代加工技术丛书》。丛书共 7 种，包括《超声加工技术》、《激光加工技术》、《电火花加工技术》、《电化学加工技术》、《快速成形技术》、《微细加工技术》、《复合加工技术》。本书为《快速成形技术》。

快速成形（Rapid Prototyping，简称 RP）技术，又称快速原型技术，是 20 世纪 80 年代后期首先在美国产生并商品化，90 年代在全球迅速发展起来的一种全新概念的制造技术。它是继 60 年代 NC 技术之后制造领域的又一重大突破，是先进制造技术的重要组成部分。快速成形技术直接从计算机三维模型制造实体原型，是在现代设计和现代制造技术迅速发展的条件下应运而生的，它涉及机械工程、自动控制、激光、计算机、材料等多个学科，综合性很强。

随着相关技术的发展，快速成形的精度、速度和材料性能不断提高，得到了越来越多的应用。美国、日本及欧洲发达国家已将快速成形技术应用于航空、宇航、汽车、通信、医疗、电子、家电、玩具、军事装备、工业造型、建筑模型、机械行业等领域。国内也逐渐由技术推广阶段进入广泛应用阶段，越来越多的企业和科研院校开始引进并应用快速成形技术。

本书介绍了快速原形的原理、工艺、软件和快速模具技术，以及快速成形技术在不同领域的应用实例。希望能够通过这样的方式，使读者对快速原形技术的原理、优势、缺点、应用等有更加深刻的理解，在实践中更好地加以应用。

由于快速成形技术刚刚出现十余年，近些年的发展非常迅速，在编写过程中，我们不但参考了期刊、论文，还从快速成形网站上收集了最新的资料和图片，北京殷华激光快速成形技术有限公司为本书提供了许多实例，本书的成稿还得到清华大学激光快速成形中心颜永年教授的鼓励和支持，在此一并表示感谢。本书共 5 章，其中第 1~4 章由郭戈、于雷编写，第 5 章由颜旭涛、唐果林编写。

限于我们的水平，书中难免有错误、缺点，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 快速成型技术概述	1
1.1 快速成型技术简介	1
1.2 快速成型工艺介绍	3
1.2.1 快速成型的技术背景	3
1.2.2 工艺简介	3
1.2.3 快速成型工艺中应用的使能技术	6
1.3 快速成型技术的应用	6
1.3.1 新产品的开发	7
1.3.2 快速模具制造	7
1.3.3 生物医学应用	9
1.3.4 快速成型应用情况统计	10
1.3.5 快速成型技术发展趋势	10
第 2 章 典型快速成型工艺和设备	14
2.1 光固化 (SL) 工艺	14
2.2 熔融堆积成形 (FDM) 工艺	16
2.3 选择性激光烧结 (SLS) 工艺	18
2.4 三维印刷 (3DP) 工艺	21
2.5 分层实体制造 (LOM) 工艺	23
2.6 无模铸型制造 (PCM) 工艺	25
2.7 世界主要快速成型设备制造商	27
第 3 章 快速成形的软件系统	29
3.1 快速成型中的软件系统	29
3.2 三维 CAD 系统	29
3.3 STL 数据模型	31
3.4 反求工程	32
3.5 快速成型数据处理软件	35
第 4 章 快速工模具制造技术	42
4.1 硅胶模	42
4.2 石膏型快速精密铸造	45
4.3 陶瓷型精密铸造	47
4.4 电弧喷涂型快速模具制造	49

4.5 基于 SLS 工艺的快速工模具制造	50
4.5.1 裹覆砂 SLS 铸型制造	50
4.5.2 直接 SLS 壳型烧结	51
4.5.3 SLS 蜡型熔模铸型	53
4.6 基于 SL 工艺的直接铸型制造	53
4.7 冰型铸型制造	55
4.8 直接铸型制造	57
4.8.1 PCM 工艺	58
4.8.2 DSPC 工艺	58
4.8.3 GS 工艺	59
第 5 章 快速成形案例	61
5.1 快速成形在航空航天领域的应用	61
5.1.1 叶轮	61
5.1.2 增压涡轮	61
5.1.3 引信叶轮	62
5.1.4 壳体精铸	64
5.1.5 新型陆军航空兵头盔	65
5.1.6 泵叶片	65
5.1.7 航天飞机模型	66
5.1.8 飞机发动机铸件标准靠模	67
5.1.9 水泵泵盖	68
5.1.10 水泵叶轮	69
5.1.11 轴承座	70
5.2 快速成形在汽车制造中的应用	71
5.2.1 减速机箱体	71
5.2.2 发动机	72
5.2.3 保险杠	72
5.2.4 发动机排气管	73
5.2.5 汽车刹车钳体	73
5.2.6 高等级子午线轮胎活络模	74
5.2.7 轮胎模具	74
5.2.8 铝合金轮胎样件模具	75
5.2.9 汽车上模梁	76
5.2.10 汽车顶棚模型	78
5.2.11 换热片	79
5.2.12 手轮模型	80
5.2.13 四缸发动机	82
5.2.14 摩托车汽缸头	82
5.2.15 燃气发动机	83

5.2.16	汽车车灯	83
5.2.17	摩托车车灯	84
5.2.18	汽车轮毂	84
5.2.19	车载电话部件	85
5.2.20	汽车内饰件	85
5.2.21	车用空调出风口	85
5.2.22	车门把手	86
5.2.23	涡轮壳体	87
5.3	快速成形技术在家电制造中的应用	87
5.3.1	电风扇外壳	88
5.3.2	空调外壳	88
5.3.3	电子元器件的插接口	88
5.3.4	淋浴喷头	89
5.3.5	电吹风	90
5.3.6	读卡器	90
5.3.7	叶轮	90
5.3.8	吸尘器	91
5.3.9	CD 播放器外壳	92
5.3.10	电动五金机械	92
5.3.11	电源插板	93
5.3.12	检测仪外壳和支架	93
5.3.13	电子仪器外壳	93
5.3.14	计算机音箱	94
5.3.15	流量调节阀	95
5.3.16	手机面板	96
5.3.17	散热器外壳	96
5.3.18	电动工具	96
5.3.19	可移动机器人	96
5.4	生物医学与快速成形技术	98
5.4.1	快速成形在牙矫形方面的应用	98
5.4.2	快速成形在骨损伤手术中的应用	99
5.4.3	快速成形在小耳畸形治疗方面的应用	103
5.5	快速成形在艺术品业的应用	104
5.6	快速成形在首饰业的应用	110
5.7	快速成形在教学科研中的应用	111
参考文献		113

第 1 章 快速成形技术概述

1.1 快速成形技术简介

快速成形技术 (Rapid Prototyping, RP) 是由 CAD 模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维物理实体的技术总称, 其基本过程为 (图 1.1): 首先设计出所需零件的计算机三维模型 (数字模型、CAD 模型), 然后根据工艺要求, 按照一定的规律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), 把原来的三维 CAD 模型变成一系列的层片; 再根据每个层片的轮廓信息, 输入加工参数, 自动生成数控代码; 最后由成形机成形一系列层片并自动将它们连接起来, 得到一个三维物理实体。这样就将一个复杂的三维加工转变成一系列二维层片的加工, 因此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形状和结构的复杂程度无关, 这也是所谓的降维制造。

在快速成形技术的发展过程中, 人们对该项技术的认识逐步深入, 它的内涵也在逐步扩大。快速成形技术主要是采用了分层制造的思想, 实际上这一思想是自古即有的, 如房屋、大坝等各种建筑都是分层制造的, 但它成为一项成形技术、一个自动化的过程来制造零件则是计算机技术、数控技术、激光技术、材料和机械科学等发展和集成的结果, 带有鲜明的时代特征。在成形概念上它以离散/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。

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 (Free Form Fabrication, FFF), 实体自由成形制造 (Solid Free-form Fabrication, SFF), 分层制造 (Layered Manufacturing, LM), 添加制造 (Additive Manufacturing, AM) 或材料添加制造 (Material Increase Manufacturing, MIM), 直接 CAD 制造 (Direct CAD Manufacturing, DCM), 即时制造 (Instant Manufacturing, IM) 等。快速成形技术的不同称谓即反映了其不同方面的重要特征。

快速成形技术与传统材料加工技术有本质的区别, 具有鲜明的特点。

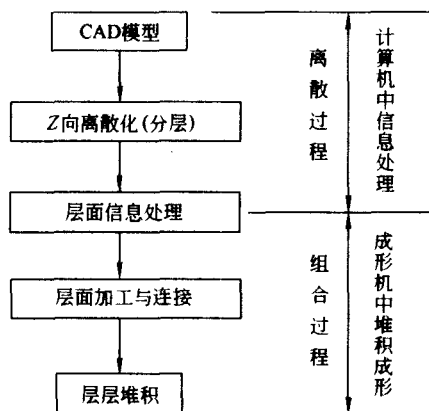
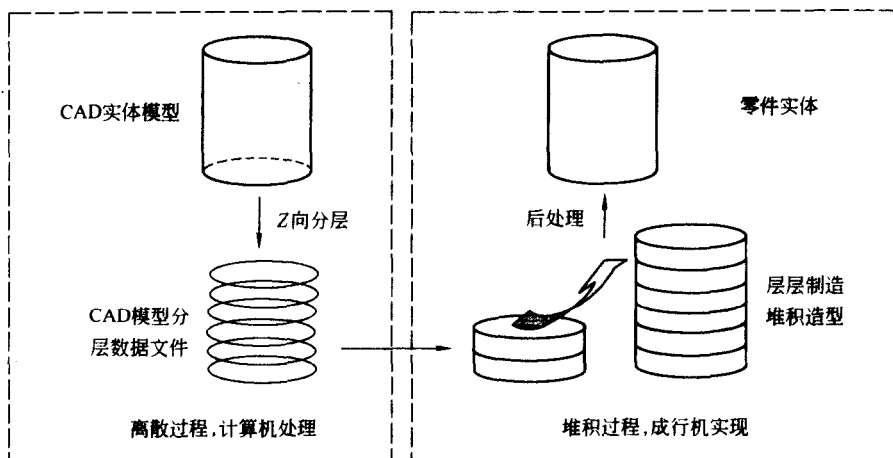


图 1.1 快速成形的原理

(1) 数字制造 区别于传统的模拟制造方式。它采用数字化（离散）的材料来构造最终形体；而传统制造形式中，最终成形零件的材料都是模拟（连续）的。

(2) 高度柔性和适应性 快速成形技术由于采用分层制造工艺，将复杂的三维实体离散成一系列二维层片进行加工，从而大大简化了加工过程。它不存在三维加工中刀具干涉的问题，因此理论上可以制造具有任意复杂形状的零件。

(3) 直接 CAD 模型驱动 设计出 CAD 模型后，后续工作全部由计算机自动处理，无需或只需较少的人工干预就可以制造出需要的原型，如同使用打印机或绘图仪一样方便快捷。

(4) 快速性 “即时制造”和“快速成形”反映了该技术的快速性。快速成形技术是建立在高度技术集成的基础之上，从 CAD 设计到原型（或零件）加工完毕，只需几小时至几十小时。虽然复杂、较大的零部件也可能达到上百小时，但从总体上看，速度要比传统成形方法快得多。快速性的最突出体现是无需工模具设计/制造/调整，从全过程来看，能够快速完成设计/制造一体化。这使得快速成形技术尤其适合于新产品的开发与管理。

(5) 材料丰富 RP 所用的材料类型丰富多样，包括树脂、纸、工程蜡、工程塑料（ABS 等）、陶瓷粉、金属粉、砂等，可以在航空、机械、家电、建筑、医疗等各个领域

应用。此外，快速成形技术是边堆积边成形的，因此它有可能在成形的过程中改变成形材料的组分，从而制造出具有材料梯度的零件，这是其他传统工艺难以做到的，也是快速成形技术与传统工艺相比很大的优势。

1.2 快速成形工艺介绍

1.2.1 快速成形的技术背景

新技术的产生是以相关技术的成熟为基础的。多种技术的融合、集成，以产生新的综合技术是当今科技发展的一个重要特征。特别是以电子计算机、通信为标志的信息技术与其他技术的结合，产生出许多崭新的技术，这种结合已成为时代的标志。

快速成形技术是一个包含多种快速成形工艺的技术总称，不同工艺所用的技术不同。RP技术的特点是设备和工艺密切联系，每一种工艺，都由特定的设备实现，这些工艺技术都包括以下几个部分。

(1) 设备 构成成形设备的基础技术。包括运动控制（数控技术）、环境工程技术、工业设计等。

(2) 使能技术 实现工艺过程的关键技术。包括激光技术、喷射技术、挤出技术、定向使能技术等。

(3) 材料 特定的工艺对象和物性技术。包括金属粉末技术、高分子技术、陶瓷技术、复合材料技术等。

(4) 工艺 完成堆积成形的特殊工艺技术。包括粘接技术、粉末烧结技术、光固化技术等。

(5) 软件 CAD几何数据操作、工艺过程预测和控制技术。包括CAD/CAM、图形学、有限元、模拟仿真、数控等技术。

1.2.2 工艺简介

RP技术的产生和发展结合了众多当代高新技术：计算机辅助设计、数控技术、激光技术、材料技术，并将随着技术的更新而不断发展。自1986年出现至今，短短十几年，世界上已有大约二十多种不同的成形方法和工艺，而且新方法和新工艺不断出现。

目前已出现的RP技术的主要工艺如下。

(1) SL (Stereolithography) 工艺 称为光固化或立体光刻，是最早出现的一种RP工艺，它采用激光一点点照射光固化液态树脂使之固化的方法成形，是当前应用最广泛的一种高精度成形工艺。图1.2所示为SL工艺制造的叶轮原型。

(2) LOM (Laminated Object Manufacturing) 工艺 称为分层实体制造，它采用激光切割箔材，箔材之间靠热熔胶在热压辊的压力和传热作用下熔化并实现粘接，一层层叠加制造原型。

(3) SLS (Selective Laser Sintering) 工艺 称为选择性激光烧结，它采用激光逐点烧结粉末材料，使包覆于粉末材料外的固体黏结剂或粉末材料本身熔融实现材料的粘接。

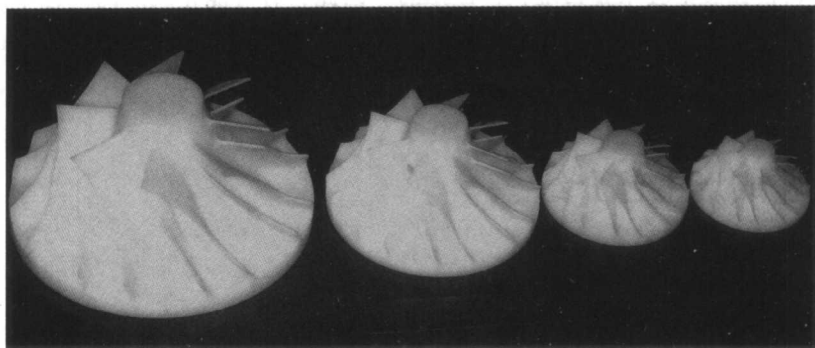


图 1.2 SL 工艺制造的叶轮原型

(4) FDM (Fused Deposition Modeling) 工艺 称为熔融堆积成形或熔融沉积成形，它采用丝状热塑性成形材料，连续地送入喷头后在其中加热熔融并挤出喷嘴，逐步堆积成形。图 1.3 所示为 FDM 工艺制造的工程车原型。

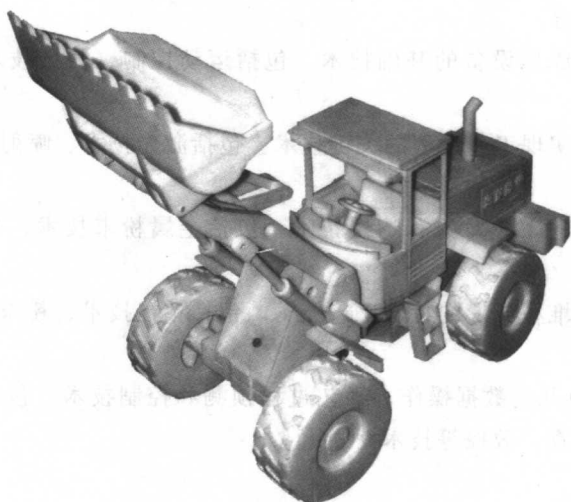


图 1.3 FDM 工艺制造的工程车原型 (32 个零部件)

(5) 3DP (Three Dimensional Printing) 工艺 称为三维印刷，它采用逐点喷射黏结剂来粘接粉末材料的方法制造原型，该工艺可以制造彩色模型，在概念型应用方面很有竞争力。

(6) PCM (Patternless Casting Manufacturing) 工艺 称为无模铸造型制造，它采用逐点喷射黏结剂和催化剂即两次同路径扫描的方法来实现铸造用树脂砂粒间的粘接。

(7) BPM (Ballistic Particle Manufacturing) 工艺 称为弹道粒子制造。它用一个压电喷射 (头) 系统来沉积熔化了的热塑性塑料的微小颗粒。BPM 的喷头安装在一个 5 轴的运动机构上，对于零件中悬臂部分，可以不加支撑。而在制造过程中出现的“不连通”的部分还要加支撑。

(8) 3D Plotting (Three Dimensional Plotting) 称为三维绘图工艺，它采用类似喷墨打印的方法喷射熔融材料来堆积成形。

(9) MJS (Multiple Jet Solidification) 工艺 称为多相喷射固化, 该工艺采用活塞挤压熔融材料使其连续地挤出喷嘴的方法来堆积成形。

(10) SGC (Solid Ground Curing) 工艺 称为实体磨削固化, 它采用掩模版技术使一层光固化树脂整体一次成形, 不像 SL 设备那样, 每一层树脂是逐点照射固化成形的, 这样就提高了原型制造速度。

(11) CC (Contour Craft) 工艺 称为轮廓成形工艺, 它采用堆积轮廓和浇注熔融材料相结合的方法来成形, 在堆积轮廓时采用了简单的模具, 形成原型的层片为准三维。

(12) RIPF (Rapid Ice Prototype Forming) 工艺 称为低温冰型快速成形工艺, 该工艺采用脉宽调制喷头高频喷射离散水滴, 在低温下堆积冰原型。

(13) BEM (Bio-materials Extrusion Modeling) 工艺 称为生物材料挤出成形, 该工艺采用喷头挤压生物活性材料, 使其连续挤出喷嘴来制造细胞生长的支撑框架。

上述 RP 工艺可以有以下几种分类。

(1) 按所用材料形态分类 (如图 1.4)

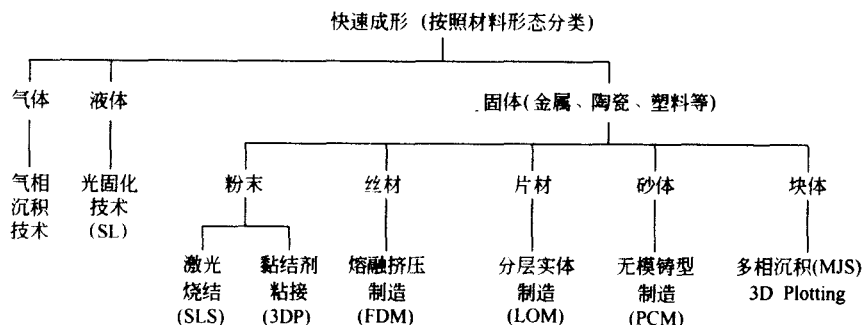


图 1.4 基于材料形态的 RP 工艺分类

(2) 按堆积单元的几何形态分类 从点到体的堆积成形, 如 BPM、SL、SLS; 从线到体的堆积成形, 如 FDM; 从面到体的堆积成形, 如 LOM、SGC。

(3) 按是否需另外设计支撑结构分类 无需单独设计支撑的成形方法, 如 SLS、LOM、SGC、3DP 等; 需另外设计支撑结构的成形方法, 如 FDM、SL 等。

(4) 按材料状态变化及其连接机理分类 基于化学变化的 RP 和基于物理作用的 RP (如图 1.5)。

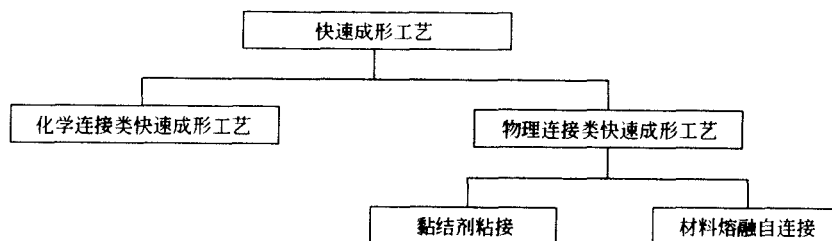


图 1.5 RP 工艺分类图

基于化学变化的 RP 是指依靠成形材料产生化学变化而实现材料间连接的一类 RP 工艺, 常见的有 SL、SGC 等。这类 RP 工艺都是采用光固化材料, 由激光诱导成形材料发

生化学变化。

基于物理作用的 RP 工艺是指依靠材料间的镶嵌、扩散、分子键合、吸附等物理作用实现材料间连接的一类 RP 工艺,在成形过程中材料性质不发生变化。它又可分为黏结剂粘接法和材料熔融连接法。黏结剂粘接法 RP 工艺是指成形过程中材料之间的连接靠黏结剂实现,这类工艺有 LOM、间接 SLS、3DP 等。而材料熔融连接法 RP 是指成形过程中材料之间的连接是靠材料本身熔融来实现的,这类工艺通常称为熔融堆积 RP 工艺,常见有 FDM、BPM、3D Plotting、MJS、CC、直接 SLS 等。

1.2.3 快速成形工艺中应用的使能技术

根据成形工艺所采用的使能技术可以将现有的快速成形技术分为两大类:基于激光技术的工艺和基于微滴、微流喷射技术的工艺。

其中基于激光技术的工艺包括立体光刻 (SL)、实体制造 (LOM)、选择性激光烧结 (SLS) 等。激光光束具有相同的频率、方向、偏振态和严格的相位关系,因而激光除了具有一般光的共性(如光的反射、折射等)外,还具有独特的优越性:如强度高、单色性好、相干性好和方向性好。因为这些优点,激光技术广泛应用在快速成形工艺中。

SL 技术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和强度的紫外光(如 $\lambda=325\text{nm}$) 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。LOM 技术利用波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的红外激光切割箔材如纸、塑料薄膜、陶瓷箔材实现快速成形制造。同样应用红外激光, SLS 技术不是对材料切割而是将粉末材料烧结成一个层面,层层叠加构造一个三维实体的 RP 工艺称为选择性激光烧结。直接将粉末材料熔化而烧结的工艺称为直接粉末烧结;如在粉末表层裹覆一层低熔点材料,激光通过熔化此层材料而将粉末粘在一起的工艺称为间接粉末激光烧结。

基于微滴、微流喷射技术的工艺包括:三维印刷 (3DP)、无模铸型制造 (PCM)、熔融堆积成形 (FDM)、弹道粒子制造 (BPM)、三维绘图工艺 (3D Plotting)、多相喷射固化 (MJS) 等。材料微滴喷射的方法很多,如驱动部件可以采用在脉冲信号驱动下能够发生体积微收缩的压电晶体、磁致伸缩、电致伸缩等器件,此类器件一般要采用微机械系统 (MEMS) 制造的工艺来制造。此外,精密高速电磁阀在脉冲信号的激励下产生快速通断,从而喷出材料微滴,也属此类方法。材料微流挤出的方法一般和高分子材料的挤出原理类似,只是结构更微细,精度更高而已。常用的有微螺杆挤出、活塞挤出和气压式挤出等。

在微机械制造、快速成形和材料科学等领域研究人员的共同努力下,微滴喷射技术在实用化和可靠性方面都达到了很高的水平。喷嘴直径可达 $\phi 0.01\text{mm}$,微滴直径(凝固后测试值)可达 $\phi 0.05\text{mm}$,喷射频率可达 1000Hz ,喷射系统分辨率可达 $1000\text{dpi}\times 1000\text{dpi}$,喷射流量可精确控制在 0.001mL/s 左右。喷射的实时启停响应性很好,可达到完全无流涎和无延迟的水平。高水平的微滴、微流技术保证了这些快速成形工艺的成形质量和成形速度。

1.3 快速成形技术的应用

由于快速成形技术能够缩短产品开发周期、提高生产效率、改善产品质量、优化产品

设计,因而从其诞生之日起,就受到了学术界和工业界的极大重视,并迅速在航空航天、汽车、机械、电子、电器、医学、玩具、建筑、艺术品等许多领域获得了广泛应用,取得了极大的成果。目前已广泛应用于航空航天、汽车、机械、电子、电器、医学、建筑、玩具、工艺品等许多领域。

1.3.1 新产品的开发

RP 技术最重要的应用就是开发新产品。在新产品开发过程中,原型的用途主要包括以下几方面。

外形设计:很多产品特别是家电、汽车等对外形的美观和新颖性要求极高。一般检验外形的方法是将产品图形显示于计算机终端,但经常发生“画出来好看而做出来不好看”的现象。采用 RP 技术可以很快做出原型,供设计人员和用户审查,使得外形设计及检验更直观有效快捷。

检查设计质量:以模具制造为例,传统的方法是根据几何造型在数控机床上开模,这对于一个价值数十万乃至数百万元的复杂模具来说风险太大,设计上任何不慎,反映到模具上就是不可挽回的损失。RP 方法可在开模前真实而准确地制造出零件原型,设计上的各种细微问题和错误就能在模型上一目了然地显示出来,这就大大减少了开模风险。

功能检测:设计者可以利用原型快速进行功能测试以判明是否最好的满足设计要求,从而优化产品设计。如风扇、风鼓等的设计,可获得最佳的扇叶曲面、最低噪声的结构等。

手感:通过原型,人们能触摸和感受实体,这对照相机、手握电动工具等的外形设计极为重要,在人机工程应用方面具有广泛的意义。

装配干涉检验:在有限空间内的复杂系统,对其进行装配干涉检验是极为重要的,如导弹、卫星系统。原型可以用来做装配模拟,观察工件之间如何配合、如何相互影响。如汽车发动机上的排气管,由于安装关系极其复杂,通过原型装配模拟可以一次成功地完成设计。

供货询价及用户评价等:由于能及时提供产品模型给用户评价,大大增加了产品的竞争力。

试验分析模型:RP 技术还可以应用在计算分析与试验模型上。例如,对有限元分析的结果可以做出实物模型,从而帮助了解分析对象的实际变形情况。插页图 1.6 所示为用于有限元分析的彩色 RP 模型。另外,凡是涉及到空气动力学或流体力学实验的各种流线型设计均需做风洞试验,如飞行器、船舶、高速车辆的设计等,采用 RP 原型可严格地按照原设计将模型迅速地制造出来进行测试。

总体来说,通过快速制造出物理原型,可以尽早地对设计进行评估,缩短设计反馈的周期,方便而又快速地进行多次设计反复,提高了产品开发的成功率,降低开发成本,总体的开发时间也缩短。

1.3.2 快速模具制造

应用 RP 方法快速制作工具或模具的技术一般称为快速工/模具技术(Rapid Tooling, RT),目前它已成为 RP 技术的一个新的研究热点。由于传统模具制作过程复杂、

耗时长、费用高，往往成为设计和制造的瓶颈，因此应用 RP 技术制造快速经济模具成为该技术发展的主要推动力之一。直接用 RP 技术制造金属零件或模具更是 RP 领域研究人员的目标，目前也已取得一定的成果，但还未达到实用推广阶段，因此需要金属零件或要进行批量生产时，还需要利用 RP 技术与各种转换技术相结合，间接制造金属零件或模具。

RP 工艺制作的零件原型，可以与熔模铸造、陶瓷模法、喷涂法、研磨法、电铸法等转换技术相结合来制造金属模具或金属零件。有些工艺，如 PCM、SLS、3DP 等，可以直接制造铸型，浇注金属后就可以得到模具或零件。图 1.7 所示为 SLS 工艺铸造壳型及其铸件。

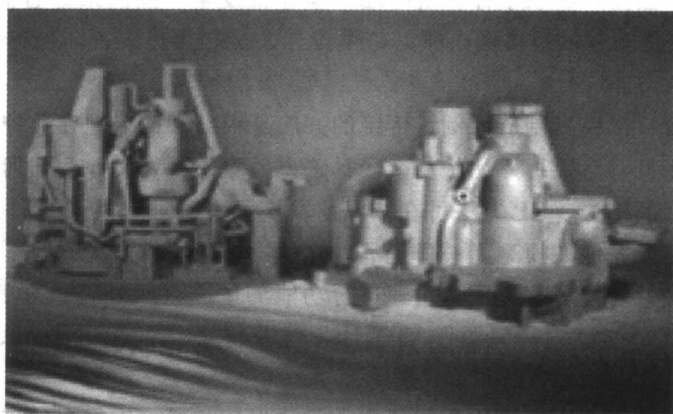


图 1.7 SLS 工艺铸造壳型及其铸件

常用的基于 RP 原型的快速模具制造技术有以下几种。

硅橡胶模：这是最常见的间接模具快速制造技术，一般采用室温固化硅橡胶作为模具材料，以 RP 原型为母模，浇注硅橡胶得到硅胶模。硅胶模具有很好的弹性、复印性和一定的强度，便于脱模，可用作试制及小批量生产用注塑模、精铸蜡模制作、其他间接模具快速制造技术的中间过渡模，用作注塑模时其寿命一般为 10~100 件。在航空航天、家用电器、体育用品、玩具和装饰品等很多领域中应用广泛。

铝基环氧树脂制模：这也是一种常见的间接模具快速制造技术，它采用环氧树脂作为模具主要材料，以 RP 原型为母模，在 RP 原型表面涂一层环氧树脂，再在后面填充混有铝粒的环氧树脂作为背衬，脱模得到铝基环氧树脂模。它主要用作注塑模，其寿命一般为 500~2000 件。

精密铸造模具：根据实物的 RP 原型（正型）可翻制成硅胶型腔（负型）再翻制成陶瓷型或石膏型（正型）；利用正型可精铸出一个金属（如锌铝合金、铍铜）型腔（负型）用以注塑成形。

熔模铸造：RP 技术的最大优势在于它能迅速制造出形状复杂的原型，而熔模铸造（失蜡铸造）的长处是有了原型可以制造复杂的零件，两者结合在一起，可快速制造出各种零件。这一方法已实用化，产生了巨大的经济效益。

喷涂法：采用喷枪将金属喷涂到 RP 原型上形成一个金属硬壳层，将其分离下来，用填充铝粉的环氧树脂或硅橡胶做背衬，即可制成注塑模具的型腔。这一方法省略了传统加

土工艺中的详细画图、数控加工和热处理三个耗时费钱的过程，因而成本只有传统方法的几分之一。生产周期也从 3~6 周减少到 1 周，模具寿命可达 10000 次。

Hausermann 研磨法：将环氧树脂碳化硅磨料的混合物浇附在 RP 原型上，产生一个工件的印模，此印模可作为压力振动法研磨工具，用以制造形状复杂的石墨电极（电火花加工用）。

电铸制模：以 RP 原型为母模，采用电铸工艺在 RP 原型表面电铸一层铜或镍，后面填充以 CEMCOM 公司开发的化学黏结陶瓷材料 CBC（Chemically Bonded Ceramics）为主的背衬材料，脱模得到注塑模具。

石墨电极制模：以 RP 原型为母模，浇注环氧树脂碳化硅磨料的混合物得到印模，此印模作为研磨工具，通过压力振动研磨法制造出形状复杂的电脉冲机床加工用石墨电极。

无焙烧陶瓷型制模：以 RP 原型为母模，将 RP 原型翻制为硅胶模，再由硅胶模翻制陶瓷型，通过陶瓷型精铸得到金属模具。

1.3.3 生物医学应用

医学应用是快速成形很重要的一个应用方向。除了应用于医疗器械的设计开发方面，快速成形已经运用于器官（如骨骼、心脏等）、种植体（如人工关节等）的原型制作。图 1.8 是用于颅外手术规划的头骨快速原型。

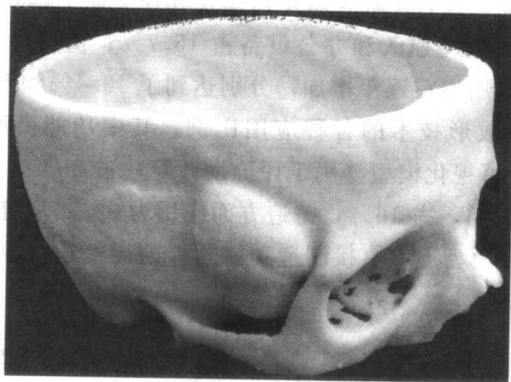


图 1.8 用于颅外手术规划的头骨快速原型

快速成形技术应用于医学、医疗领域使得医学水平和医疗手段不断提高，以数字影像技术为特征的临床诊断发展迅速，如计算机辅助断层成像（CT）、磁共振成像（MRI）、三维 B 超等技术，对人体局部扫描可获得截面图像，再对器官进行计算机三维建模。这些数据传到快速成形系统用以建造实体器官模型。这些模型为那些想不开刀就可观看病人骨结构的研究人员、种植体设计师和外科医生提供了帮助。很多专科如颅外科、骨外科、神经外科、口腔外科、整形外科和头颈外科等都开始应用快速成形技术，帮助外科医生进行教学、诊断、手术规划等工作。

RP 技术在生物医学中的应用主要包括以下三个方面：

- ① 解剖学体外模型制造（体外模型）
- ② 生物相容性假体制造（植入体）
- ③ 组织工程细胞载体支架结构的制造（人体器官）

1.3.4 快速成形应用情况统计

目前已应用快速成形技术的工业部门有很多，据“Rapid Prototyping & Tooling—State of the Industry (2003 Worldwide Progress Report)” (by Terry T. Wohlers) 中权威资料统计显示，RP 技术已广泛应用在消费产品、商业设备、航空航天和汽车等诸多行业，在各行业部门中应用所占比例如图 1.9 所示。

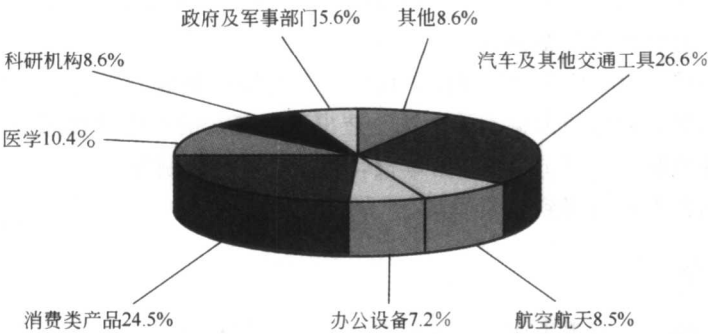


图 1.9 快速成形的应用部门

购买快速成形设备的主要行业包括汽车、家电、军事以及高校等的研究开发单位。从图中可以看到其分布情况。在各工业领域中汽车及其他交通工具和消费类产品为主要应用领域，占 51.1%；其次是航空航天和办公设备占 15.7%；值得注意的是，在医学领域和高等学校研究机构中的应用也在逐年增加，分别达到了 10.4% 和 8.6%。

图 1.10 所示为快速成形技术的各种应用比例，其中功能模型是主要应用领域，占 38%（包括装配模型）；可视化模型（用于评价设计等）占 20%，为第二大应用；与工具制造有关的应用为第三大类，占 16%；铸造方面应用为 9%。从统计数据上可以看到，目前 RP 技术还主要应用在模型上，直接制造功能零件的比例还很少。这和 RP 技术的特点及其局限性是紧密相关的。

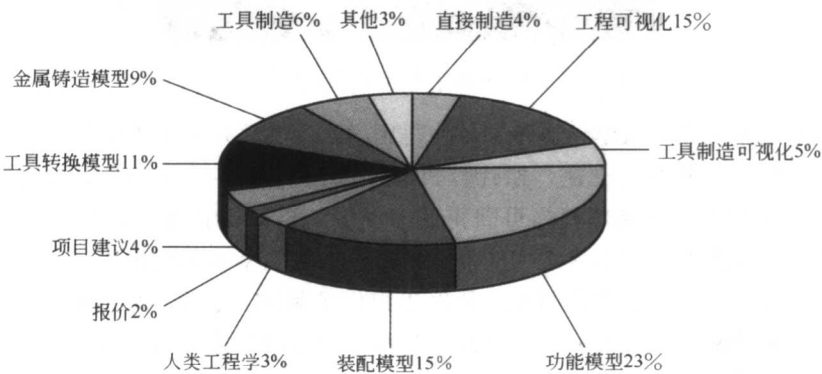


图 1.10 快速成形的各种应用比例

1.3.5 快速成形技术发展趋势

RP 从产生到现在，发展十分迅速。与过去相比，RP 在制造目标、制造能力等方面