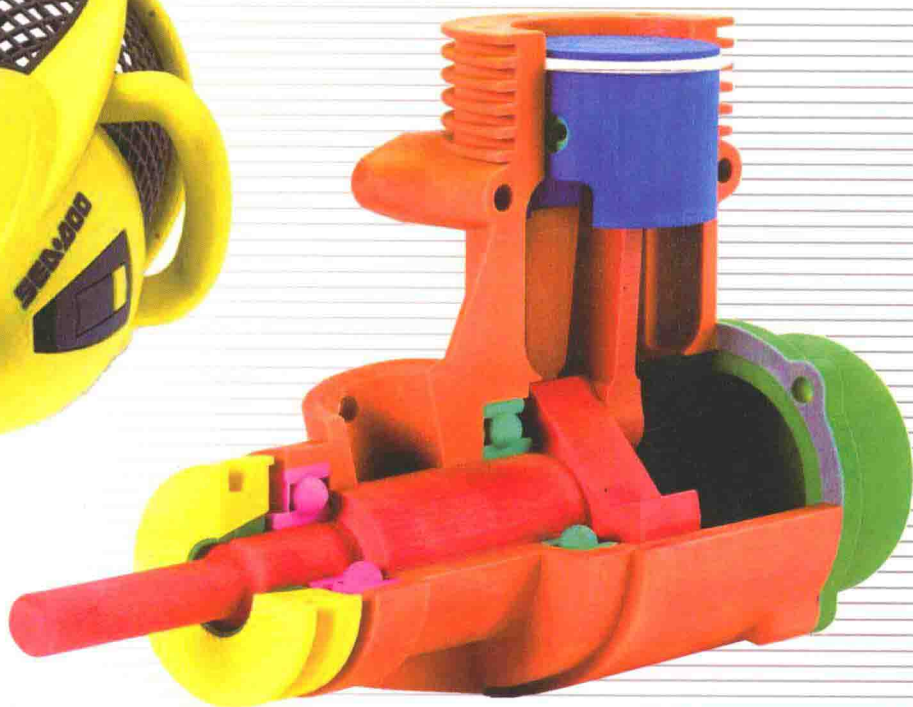


机械工程系列规划教材

3D打印技术

主 编 杜志忠 陆军华

副主编 陈财幸 陈延明 杨 娟



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

3D 打印技术

主 编 杜志忠 陆军华

副主编 陈财幸 陈延明 杨 娟



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

3D 打印技术 / 杜志忠, 陆军华主编. —杭州:
浙江大学出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-308-15063-7

I. ①3… II. ①杜… ②陆… III. ①快速成型技术—
中等专业学校—教材 IV. ①TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 202651 号

内容提要

本书是 3D 打印技术的入门教程。全书共分为 6 章, 主要介绍 3D 打印技术的基本知识、基本原理和国内外研究现状; 选择性激光烧结成型工艺及案例、光固化快速成型工艺及案例、叠层实体快速成型工艺及案例、熔融沉积快速成型工艺及案例、三维打印快速成型工艺及案例。

本书可以作为中职院校、技校等 3D 打印、快速成型技术及应用等相关课程的教材, 也可作为 3D 打印技术的培训教材, 以及广大工程技术人员的参考资料。

3D 打印技术

主 编 杜志忠 陆军华
副主编 陈财幸 陈延明 杨 娟

责任编辑 杜希武
责任校对 余梦洁
封面设计 刘依群
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州好友排版工作室
印 刷 浙江良渚印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 9.25
字 数 230 千
版 次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-15063-7
定 价 29.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

《机械工程系列规划教材》

编审委员会

(以姓氏笔划为序)

丁友生	王卫兵	王志明	王敬艳
王翠芳	古立福	刘绪民	杜志忠
李绍鹏	杨大成	吴立军	吴治明
邱国旺	陆军华	林华钊	罗晓晔
周文学	单 岩	赵学跃	贾 方
徐勤雁	谢力志	鲍华斌	蔡玉俊

前 言

作为一种以 3D 数字模型为原型,通过材料层层叠加来制造三维物体的快速成型技术,3D(Three Dimensions)打印技术近年来的飞速发展已经让人们越来越多地在设计和工业制造等领域感受到它的神奇。在工业制造方面,3D 打印的小型无人飞机、小型汽车甚至家用器具等概念产品曾无数次地出现在 3D System 等公司的企业宣传和营销活动中。在文化创意和数码娱乐方面,科幻类电影《阿凡达》中也使用 3D 打印塑造了部分角色和道具,3D 打印出来的小提琴甚至已接近手工艺的水平。3D 打印技术在航空航天、国防军工、生物医药、教育、建筑、文物保护等领域做出的贡献无一不在潜移默化地改变着我们的生活。为了帮助入门者更快地了解 3D 打印技术,让已经接触过这项技术的人可以对每一种快速成型技术进行深究,我们编写了此书。

本书共分为 6 章,第 1 章为什么是 3D 打印,主要介绍了 3D 打印技术的基本知识、基本原理和国内外研究现状;第 2 章为选择性激光烧结成型工艺及案例,主要介绍了选择性激光烧结成型工艺的基本原理、材料及设备和工艺;第 3 章为光固化快速成型工艺及案例,主要介绍了光固化快速成型工艺的基本原理、材料及设备和工艺;第 4 章为叠层实体快速成型工艺及案例,主要介绍了叠层实体快速成型工艺的基本原理、材料及设备和工艺;第 5 章为熔融沉积快速成型工艺及案例,主要介绍了熔融沉积快速成型工艺的基本原理、材料及设备和工艺;第 6 章为三维打印快速成型工艺及案例,主要介绍了三维打印快速成型工艺的基本原理、材料及设备和工艺。

本书由杜志忠(厦门市集美职业技术学校)和陆军华(杭州博洋科技有限公司)担任主编,由厦门市集美职业技术学校陈财幸、陈延明、杨娟担任副主编。限于作者的知识水平和经验,并且由于 3D 打印技术发展很快,本书涉及的新内容较多,因此书中难免有错误或不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 5 月 1 日

目 录

第 1 章 什么是 3D 打印	1
1.1 3D 打印技术概述	1
1.2 3D 打印技术原理	2
1.3 3D 打印技术分类	2
1.4 3D 打印技术现状	3
1.4.1 国外现状	3
1.4.2 国内现状	4
1.4.3 局限性	5
第 2 章 选择性激光烧结成型工艺及案例	6
2.1 技术概述	6
2.2 选择性激光烧结工艺的基本原理	6
2.3 选择性激光烧结快速成型材料及设备	7
2.3.1 选择性激光烧结快速成型材料	7
2.3.2 选择性激光烧结快速成型设备	9
2.4 选择性激光烧结的工艺过程	13
2.4.1 高分子粉末材料烧结工艺	13
2.4.2 金属零件间接烧结工艺	14
2.4.3 金属零件直接烧结工艺	14
2.5 选择性激光烧结工艺参数	16
2.5.1 激光功率	16
2.5.2 激光烧结间距和光斑直径的确定	16
2.5.3 扫描速度	16
2.5.4 单层厚度	16
2.6 选择性激光烧结的特点及应用	17
2.6.1 SLS 技术的特点	17
2.6.2 SLS 技术的应用	17
2.7 案例:球的制作	19

第3章 光固化快速成型工艺及案例	24
3.1 技术概述	24
3.2 光固化快速成型工艺的基本原理	24
3.3 光固化快速成型材料及设备	26
3.3.1 光固化快速成型材料	26
3.3.2 光固化快速成型设备	31
3.4 光固化快速成型的工艺过程	38
3.4.1 前处理	38
3.4.2 原型制作	41
3.4.3 后处理	41
3.5 光固化快速成型的精度及效率	44
3.5.1 光固化快速成型中树脂的收缩变形	44
3.5.2 光固化快速成型的精度	44
3.5.3 光固化快速成型的制作效率	51
3.6 微光固化快速成型制造技术	53
3.7 案例:小塔的制作	60
第4章 叠层实体快速成型工艺及案例	66
4.1 技术概述	66
4.2 叠层实体制造工艺的基本原理和特点	66
4.2.1 叠层实体快速成型工艺的基本原理	66
4.2.2 叠层实体快速成型技术的特点	67
4.3 叠层实体快速成型的材料与设备	68
4.3.1 叠层实体快速成型材料	68
4.3.2 叠层实体快速成型设备	70
4.4 叠层实体快速成型的工艺过程	73
4.5 提高叠层实体快速成型制作质量的措施	73
4.5.1 叠层实体原型制作误差分析	73
4.5.2 提高叠层实体原型制作精度的措施	74
4.5.3 原型的吸湿性及涂漆防湿效果试验	74
4.6 叠层实体制造工艺后置处理中的表面涂覆	75
4.6.1 表面涂覆的必要性	75
4.6.2 表面涂覆的工艺过程	75
4.7 新型叠层实体快速成型工艺方法	77



4.7.1	Offset Fabrication 叠层实体快速成型工艺方法	78
4.7.2	Inhaeng Cho 新型叠层实体快速成型法	79
4.8	案例:蒸蛋机制作	79
4.8.1	前处理	79
4.8.2	分叠层加过程	102
第5章	熔融沉积快速成型工艺及案例	106
5.1	技术概述	106
5.2	熔融沉积快速成型工艺的基本原理和特点	106
5.2.1	熔融沉积快速成型工艺的基本原理	106
5.2.2	熔融沉积快速成型的特点	108
5.2.3	FDM 工艺与其他快速成型工艺方法的比较	108
5.3	熔融沉积快速成型材料及设备	109
5.3.1	熔融沉积快速成型材料	109
5.3.2	熔融沉积快速成型制造设备	111
5.4	熔融沉积快速成型工艺过程	114
5.5	熔融沉积快速成型工艺因素分析	115
5.5.1	材料性能的影响	115
5.5.2	喷头温度和成型室温度的影响	115
5.5.3	填充速度与挤出速度的交互影响	116
5.5.4	分层厚度的影响	116
5.5.5	成型时间的影响	116
5.5.6	扫描方式的影响	116
5.6	气压式熔融沉积快速成型系统	116
5.6.1	工作原理	116
5.6.2	特点	117
5.6.3	与传统 FDM 的区别	117
5.7	熔融沉积快速原型实例	118
5.8	案例:板手制作	119
第6章	三维打印快速成型工艺及案例	123
6.1	技术概述	123
6.2	三维喷涂黏结快速成型工艺	123
6.2.1	三维喷涂黏结快速成型工艺的基本原理	123
6.2.2	三维喷涂黏结快速成型工艺的特点	124

6.2.3 三维喷涂黏结快速成型工艺过程	124
6.2.4 3dp 制品	125
6.2.5 三维喷涂黏结快速成型技术	126
6.3 喷墨式三维打印快速成型工艺	127
6.4 三维打印快速成型设备及材料	128
6.4.1 Z Corp 公司开发的设备及材料	128
6.4.2 Object 公司开发的设备及材料	130
6.4.3 3D Systems 公司开发的设备及材料	133
6.5 案例:花瓶的制作	136

第 1 章 什么是 3D 打印

1.1 3D 打印技术概述

3D 打印,是该项技术近年来针对民用市场的一种通俗称谓,实质上是一种快速成型技术。快速成型技术也称快速原型制造(Rapid Prototyping Manufacturing,RPM)技术、增量制造技术或者增材制造技术。快速成型技术诞生于 20 世纪 80 年代后期,是一种基于材料堆积法的高新制造技术,它不再需要传统的刀具、夹具和机床等就可以打造出任意形状的产品。这种根据零件或物体的三维模型数据,通过成型设备以材料累加的方式制成实物模型的技术,被认为是近 20 年来制造领域的一个重大成果。快速成型技术集多种技术于一身(如图 1-1 所示)。

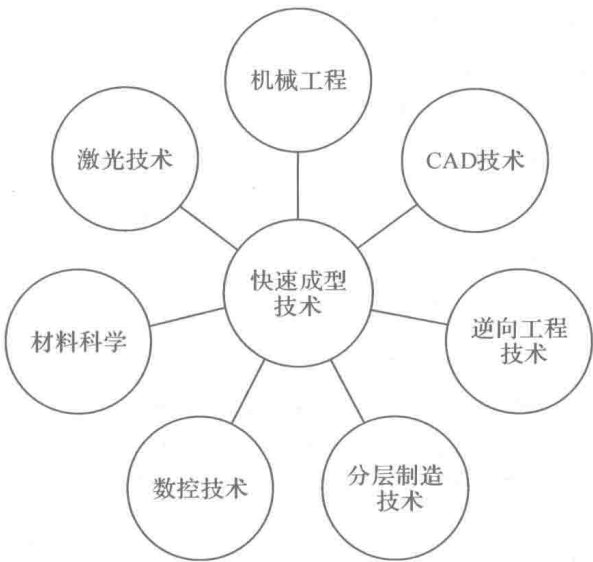


图 1-1 快速成型技术集成

快速成型技术可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件,从而为零件原型制作、新设计思想的校验等方面提供了一种高效、低成本的实现手段。

因所使用的成型材料、成型原理和系统特点不同,构成了不同种类的快速成型系统。但这些快速成型系统的基本原理都是:分层制造,逐层叠加。快速成型系统就像一台“立体打印机”,因此得名“3D 打印机”。

1.2 3D 打印技术原理

3D 打印机根据零件的形状,每次制作一个具有一定微小厚度和特定形状的截面,然后再把它们逐层黏结起来,最终得到所需的零件。整个制造过程可以比喻为一个“叠加”的过程。当然,这个过程是在电脑的控制下,由 3D 打印机系统自动完成的。不同的 3D 打印机厂商,其 3D 打印机系统有所不同。

1.3 3D 打印技术分类

根据不同的成型原理,3D 打印技术可以分为很多种类,如表 1-1 所示。

表 1-1 3D 打印技术分类

成型原理	技术名称
高分子聚合反应	激光立体印刷术(Stereolithography, SLA)
	高分子打印技术(Polymer Printing)
	高分子喷射技术(Polymer Jetting)
	数字化光照加工技术(Digital Lighting Processing, DLP)
烧结和熔化	选择性激光烧结技术(Selective Laser Sintering, SLS)
	选择性激光熔化技术(Selective Laser Melting, SLM)
	电子束熔化技术(Electron Beam Melting, EBM)
熔融沉积	熔融沉积造型技术(Fused Deposition Modeling, FDM)
层压制造	层压制造技术(Layer Laminate Manufacturing, LLM)
叠层实体制造	叠层实体制造技术(Laminated Object Manufacturing, LOM)

每种制造技术的具体原理都不一样,但主要都是想办法根据电脑数据制造出一层物体,然后逐层叠加,直至制造出整个立体的物品。

常见的几种快速成型技术在零件精度、表面质量和生存率等方面存在一些差异(如表 1-2 所示)。

表 1-2 常见快速成型技术的比较

工 艺	SLA	LOM	SLS	FDM
零件精度	较高	中等	中等	较低
表面质量	优良	较差	中等	较差
复杂程度	复杂	简单	复杂	中等
零件大小	中小	中大	中小	中小
材料价格	较贵	较便宜	中等	较贵
材料种类	光敏树脂	纸、塑料、金属 薄膜	石蜡、塑料、金属、 陶瓷粉末	石蜡、塑料丝
材料利用率	~100%	较差	~100%	~100%
生存率	高	高	中等	较低

1.4 3D 打印技术现状

1.4.1 国外现状

从历史上看,早在 20 世纪初期就出现了“材料叠加”这一制造概念,国外很多研究学者也基于这一设想取得了一系列的研究成果,如表 1-3 所示。

表 1-3 国外学者研究成果

年 份	学 者	研 究 成 果
1902	Carlo Baese	提出用光敏聚合物来制造塑料件的方法,即“立体光固化造型”(SLA)的初步设想
1940	Perera	在一些硬纸板上切割地形图轮廓线,然后将对应的纸板黏结在一起来形成三维地形图
1976	Paul L Dimatteo	提出利用轮廓跟踪器,将三维物体转换成许多的二维轮廓薄片,然后利用激光切割这些薄片,再利用螺钉、销钉等将一系列的薄片连接成三维物体的方法,即“分层实体制造”(LOM)的初步设想
1982	J. E. Blanthier	将地形图的各轮廓线通过压印在蜡片上,然后按照轮廓线切割各蜡片,将切割后的各蜡片黏结,进而得到对应的三维地形图的方法,即分层制造

这些研究成果中虽然提出了类似于快速成型的各种基本原理,但一方面技术理论不成熟,另一方面没有各种商品级的快速成型机械设备,因此离实际生产还有一定的距离。自 20 世纪 80 年代以来,快速成型技术的商品化进程得到了质的飞跃,取得了很多成果(如表 1-4 所示)。

表 1-4 国外快速成型技术商品化成果

年 份	技 术 来 源	商品化实物
1988	Charles W Hull 激光束照射液态光敏树脂	3D System 公司: 第一台立体光固化造型快速成型机——SLA-250
1990	Michael Feygin 分层实体制造方法	Helisys 公司: 第一台商用 LOM 设备——LOM-10150
1992	C. Deckard 选择性激光烧结方法	DTM 公司: 第一台商用 SLS 设备——Sinterstation
1992	Scott Crump 熔融沉积制造方法	第一台商用 FDM 设备——3D-Modeler

80 年代中期到 90 年代后期,先后出现了十几种不同类型的快速成型技术,但 SLA、SLS、LOM 和 FDM 这四种技术仍然是快速成型技术的主流。此外,国外众多学者还在技术、材料以及理论层面对快速成型技术进行了研究,创立了专业刊物和学术会议,如每月新闻通讯 *Rapid Prototyping Reports*、快速成型季刊 *Rapid Prototyping*、快速成型期刊 *Rapid Prototyping Journal* 以及快速成型国际会议。这些学术期刊及国际学术会议涵盖了制造方法及工艺介绍、新材料的开发、设备精度的控制以及产业化应用等快速成型领域的各个方面。

1.4.2 国内现状

我国快速成型技术的研究始于 1991 年,研究工作主要在高校展开,在理论研究、实际应用及商品化等方面取得了一定进展(如表 1-5 所示)。这些成果包括快速成型理论研究、各种处理软件、不同工艺及型号的成型设备、新的控制技术、适应于不同工艺的成型材料以及成型精度控制等各个方面。

表 1-5 国内快速成型技术研究成果

机 构	研 究 成 果
清华大学	M-RPMS-II 系统 基于 FDM 工艺原理的快速成型系统 基于 LOM 工艺原理的快速成型系统
西安交通大学	基于立体印刷法的 LPS 系统和 CPS 系统
华中科技大学快速制造中心	薄材叠层快速成型系统样机——HRP-I

续表

机 构	研 究 成 果
武汉滨湖机电技术产业有限公司	激光快速成型系统——HRP-III HRP 系列快速成型系统 基于粉末烧结方法的 HRPS-I、HRPS-IIIA 型商品化快速成型机
南京航空航天大学和 北京隆源自动成型系统有限公司	基于选择性激光烧结方法的 RAP 系统和 AFS 系统

1.4.3 局限性

即使发展至今,3D 打印技术也还存在一定的局限性。

一、材料问题

目前已经研究出可以使用在 3D 打印机上的材料约有几十种,但仍存在以下问题:

- (1)材料成本高昂。从价格上看,便宜的几百元一公斤,最贵的则要数万元一公斤。
- (2)材料种类有限。3D 打印的耗材非常有限,现有的市场上的耗材多为石膏、无机粉料、光敏树脂、塑料等。

二、成型精度和质量问题

3D 打印工艺发展还不完善,特别是快速成型软件技术的研究还不成熟,目前快速成型零件的精度及表面质量大多不能满足工程直接使用的要求,不能作为功能性部件,只能作为原型使用。

三、打印速度

3D 打印技术虽始于“快速成型”,但制作一个制件仍需要数小时,难以大规模生产,仅能用于原型开发或单件制造。

四、产品的力学性能

3D 打印技术制造出的制件与铸件、锻件相比强度低、构件易疲劳、使用寿命短、断裂韧性差,在一定的外力条件下,很容易产生损坏。

第2章 选择性激光烧结成 型工艺及案例

2.1 技术概述

选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)是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。SLS 是有选择地将材料粉末在高强度的激光照射下烧结在一起,得到零件的截面,通过层层叠加的方法生成所需形状的零件。其整个工艺过程包括 CAD 模型建立、数据处理、铺粉、烧结以及后处理等。SLS 成型方法的选材范围广泛,尼龙、蜡、ABS、金属和陶瓷粉末等都可以作为原材料。SLS 不需支撑结构,因而在成型设备和系统软件中,也无需考虑支撑系统。总之,SLS 成型方法有着制造工艺简单、柔性度高、材料选择范围广、材料价格便宜、成本低、材料利用率高、成型速度快等特点,针对以上特点 SLS 法主要应用于铸造业,并且可以用来直接制作快速模具。国内也有多家单位开展了有关 SLS 的研究,但主要集中于高校和科研院所,如华中科技大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中北大学和北京隆源自动成型系统有限公司等,也取得了一定的研究成果。如南京航空航天大学研制的 RAP-I 型激光烧结快速成型系统和北京隆源自动成型有限公司开发的 AFS-300 激光快速成型的设备等。

2.2 选择性激光烧结工艺的基本原理

选择性激光烧结主要是将粉末材料(塑料粉等与黏结剂的混合粉)通过二氧化碳激光器进行选择性的烧结。在开始加工之前将充有氮气的工作室升温,将温度维持在粉末的熔点以下;成型阶段送料桶上升,铺粉小车移动,在工作平台上铺一层粉末材料,然后激光束在计算机的控制下按照界面轮廓对实心部分的粉末进行烧结,继而熔化粉末形成一层固体轮廓。每一层烧结完成之后,工作台下降一个截面层的高度,再次铺上粉末,进行下一层烧结,如此循环,直至完成整个实体构建。在实体构建完成并充分冷却后,需要将加工件取出置于后处理工作台上,去除残留的粉末。在成型过程中,未经烧结的粉末对模型的空腔和悬臂部分起

支撑作用,无需另行生成支撑工艺结构。选择性激光烧结工艺原理如图 2-1 所示。

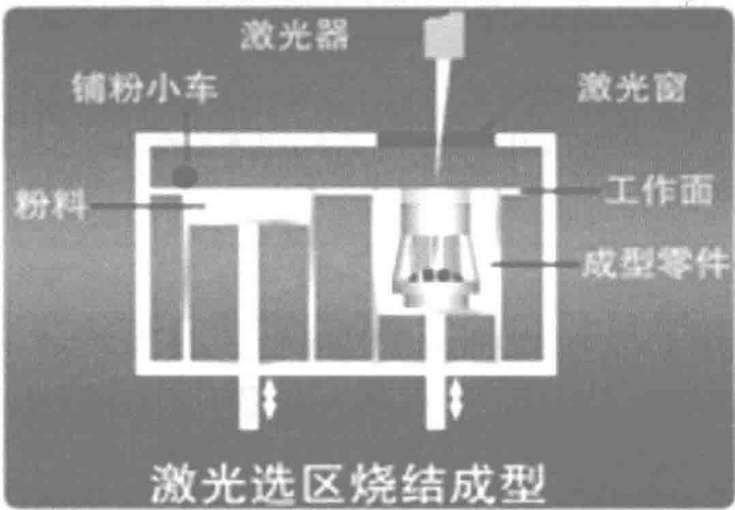


图 2-1 选择性激光烧结工艺原理

2.3 选择性激光烧结快速成型材料及设备

2.3.1 选择性激光烧结快速成型材料

选择性激光烧结所使用的材料主要分为以下几类:金属基合成材料、陶瓷基合成材料、铸造砂和高分子粉末等。

一、金属基合成材料

金属基合成材料的硬度高,有较高的工作温度,可用于复制高温模具。常用的金属基合成材料一般由金属粉和黏结剂组合而成,这两种材料也有很多种类,如表 2-1 所示。

表 2-1 金属粉和黏结剂分类

金 属 粉	黏 结 剂
不锈钢粉末、还原铁粉、铜粉、锌粉、铝粉	有机玻璃、聚甲基丙烯酸丁酯、环氧树脂、其他易于热降解的高分子共聚物

二、陶瓷基合成材料

陶瓷基合成材料比金属基合成材料硬度更高,工作温度也更高,也可用于复制高温模

具,它一般由陶瓷粉和黏结剂组合而成。在 SLS 的过程中,CO₂ 激光束产生热量熔化黏结剂,黏结陶瓷粉使制件成型,最终经过在加热炉中烧结获得陶瓷工件。

三、铸造砂

铸造砂主要用于低精度原型件的制作,主要成分为覆模砂,其表面的高分子黏结成分一般是低分子量酚醛树脂。

四、高分子粉末

高分子粉末材料主要包括尼龙(PA)粉、聚碳酸酯(PC)粉、聚苯乙烯(PS)粉、ABS 粉、铸造用蜡粉、环氧聚酯粉末、聚酯(PBT)粉末、聚氯乙烯(PVC)粉末、聚四氟乙烯(PTFE)以及共聚改性粉末材料等。从理论角度出发,所有的热塑性粉末都可通过 SLS 技术制作出各种形状的制件,国内外也有很多有关 SLS 材料应用的研究,如表 2-2 所示。

表 2-2 国内外 SLS 材料的应用状况

生 产 商	牌号及产品类型	用途及特点
EOS	PrimeCast 100 PS 粉末	适用于熔模铸造
	Quartz 4. 2/5. 7 酚醛树脂包裹铸造砂	适用于翻砂铸造
	Alumide A1(30%)+PA 复合粉末	适用于具有金属性质的坚硬耐用的零件
	DirectSteel 20 粒状良好的钢粉	适用于注塑模以及直接制造金属零件
	DirectSteelH20 粒状良好的铜粉	适用于具有与金属注塑模性能相当的注塑模
	DirectMetal 粒状良好的合金粉	适用于注塑模以及直接制造金属零件
	ABS	适用于功能件及测试件
	PA3200/2200	适用于功能件及原型件
	PC	适用于功能件及测试件
3D Systems	DuraForm PA PA 粉末	适用于功能件及测试件,热、化学稳定性优良
	DuraForm GF PA+玻璃微珠复合	适用于小特征功能及测试件,热化学性能优良,耐腐蚀
	DuraForm EX	适用于制作扣合型开关等功能件,耐弯折、冲击,力学性能优良
	DuraForm Flex	适用于制作类橡胶韧弹性体,可经受重复弯折,耐撕裂性好,可染色
	DTM PC PC 粉末	热稳定性良好,可用于精密铸造
	TrureForm Polymer PS 粉末	适用于制作消失模,尺寸稳定,表面光洁
	SandForm Si 覆膜硅砂	适用于砂型制作
	RapidSteel 1. 0/2. 0 覆膜钢粉	适用于功能零件或金属模具制作
	SandFormZrll 覆膜铅砂	适用于砂型制作