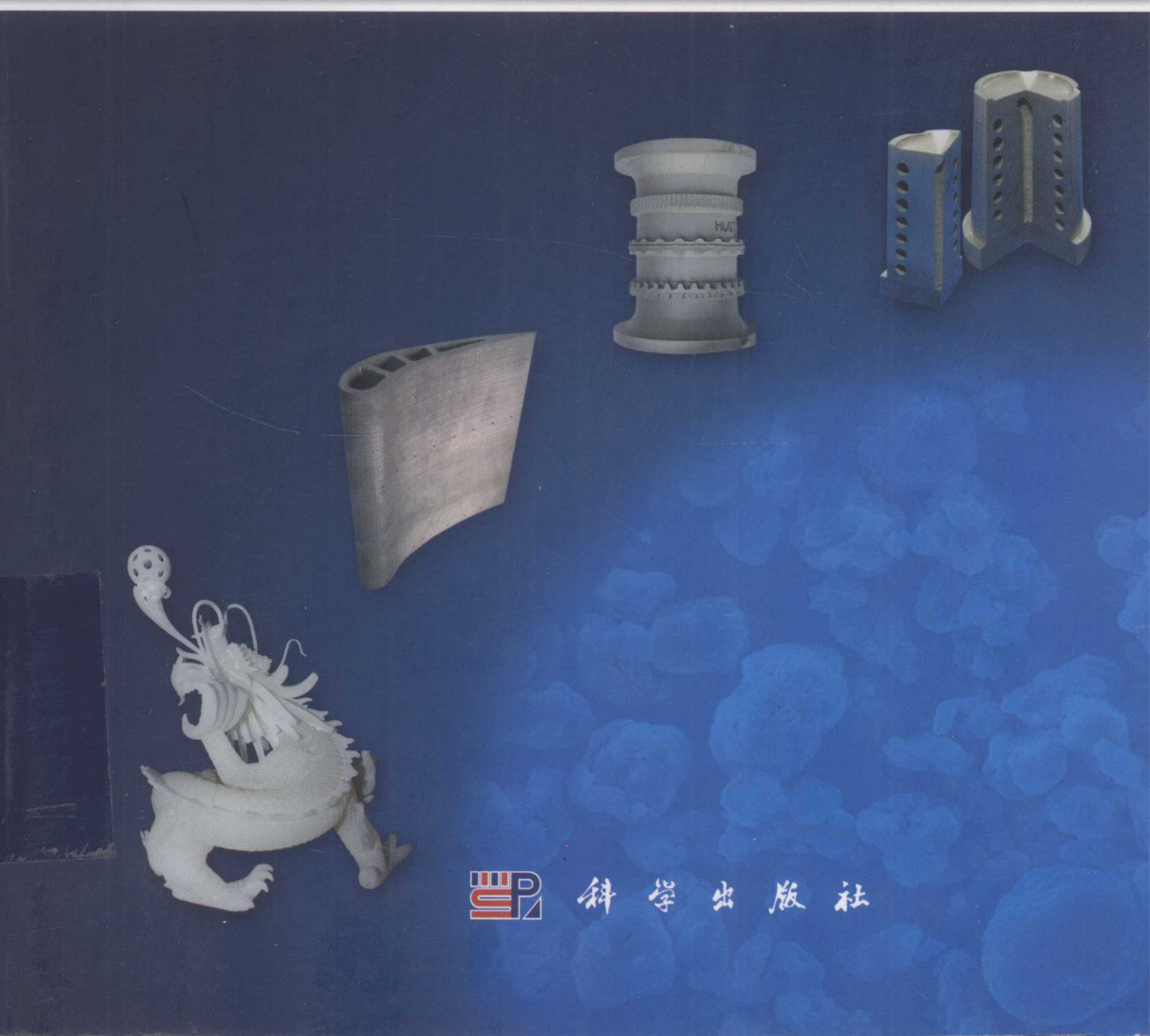


粉末材料 选择性激光快速成形 技术及应用

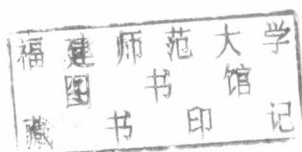
史玉升 刘锦辉 闫春泽 李瑞迪 杨劲松 著



科学出版社

粉末材料选择性激光快速成形 技术及应用

史玉升 刘锦辉 闫春泽 李瑞迪 杨劲松 著



1041189



T1041189

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了高分子、陶瓷、覆膜砂、金属及其复合粉末材料的选择性激光成形方法、机理与工艺。主要内容包括:选择性激光快速成形技术概述、高分子材料选择性激光烧结快速成形技术、陶瓷材料选择性激光烧结快速成形技术、覆膜砂材料选择性激光烧结快速成形技术、选择性激光烧结间接快速成形金属零部件技术、选择性激光烧结与等静压复合快速成形技术、选择性激光熔化快速成形金属零部件技术、选择性激光熔化与热等静压复合快速成形技术。

本书图文并茂,理论和实践相结合,既可供从事材料成形相关工作的工程技术人员阅读,也可作为材料科学与工程专业的在校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

粉末材料选择性激光快速成形技术及应用/史玉升等著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035313-9

I. ①粉… II. ①史… III. ①粉末-激光技术-快速成形技术-研究
IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 189996 号

责任编辑:陈 婕 张海丽 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

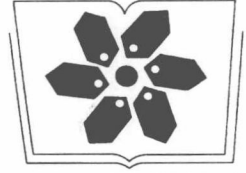
2012 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 12 月第一次印刷 印张:29 3/4

字数:590 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

前 言

快速成形,也称增量(材)制造、快速制造、3D 打印等,是近 30 年来全球先进制造领域兴起的一项集机械、计算机、数控和材料于一体的全新数字化成形制造技术。它将传统的面向制造工艺的零部件设计变为面向性能的全新设计,被称为当今制造业的一场革命。

华中科技大学从 1991 年开始研究快速成形技术的理论与应用,是中国开展此项技术研究最早的单位之一。截至目前,已研发成功四种快速成形装备及其成形材料、一种快速制模装备及其材料,并实现产业化,得到广泛应用。研究成果获国家科技进步二等奖和国家科技发明二等奖各一项,省部级一等奖两项,省部级自然、发明、进步二等奖各一项,发明专利二十多项,全国优秀博士论文提名奖一篇,湖北优秀博士论文四篇,湖北优秀硕士论文三篇,相关研究成果被评为 2011 年中国十大科技进展新闻之一。

快速成形的方法多种多样。粉末材料选择性激光快速成形技术具有成形材料多样化、用途广泛、成形过程简单、材料利用率高等优点,特别是不受零部件形状复杂程度的限制,可以在没有工装夹具或模具的条件下,迅速成形出结构复杂又具有一定功能的零部件,是最具发展前途的快速成形技术之一。为此,华中科技大学在此领域进行了长期的基础和应用研究,取得了一系列科研成果。这些成果在国内外得到了广泛应用,为关键行业核心产品的快速自主开发和小批量制造提供了有利手段,大大缩短了企业新产品的研制周期,取得了显著的社会经济效益。为了培养这方面的科技人才,更深入地研究、推广粉末材料选择性激光快速成形技术,在中国科学院科学出版基金的资助下,作者撰写了本书,总结了华中科技大学快速制造团队在这方面的研究成果。

本书对高分子、陶瓷、覆膜砂、金属及其复合粉末材料的选择性激光成形方法、机理与工艺进行了全面系统的论述。全书共 8 章。第 1 章概述了选择性激光快速成形技术,分为选择性激光烧结快速成形技术和选择性激光熔化快速成形技术。第 2 章论述了高分子粉末材料选择性激光烧结快速成形技术,主要包括高分子粉末材料的选择性激光烧结快速成形机理、高分子粉末材料特性对选择性激光烧结快速成形过程的影响、高分子粉末材料选择性激光烧结快速成形制件的精度、非结晶性高分子粉末材料选择性激光烧结快速成形及后处理工艺、结晶性高分子粉末材料的选择性激光烧结快速成形工艺。第 3 章论述了陶瓷粉末材料选择性激光烧结快速成形技术,主要包括氧化铝陶瓷粉末材料的选择性激光烧结快速成形工艺、

碳化硅陶瓷粉末材料的选择性激光烧结快速成形工艺。第4章论述了覆膜砂材料选择性激光烧结快速成形技术,主要包括覆膜砂的选择性激光烧结成形机理、覆膜砂的选择性激光烧结成形工艺与性能。第5章论述了选择性激光烧结间接快速成形金属零部件技术,主要包括金属粉末材料的激光烧结成形机理、金属粉末材料的选择性激光烧结快速成形工艺、选择性激光烧结快速成形制件的熔渗(浸渍)机理与工艺、随形冷却流道注塑模具的选择性激光烧结快速成形工艺。第6章论述了选择性激光烧结与等静压复合快速成形技术,主要包括选择性激光烧结与等静压复合快速成形技术的原理与工艺、选择性激光烧结快速成形制件的高温烧结与热等静压致密化机理与工艺、复合成形零部件性能的演变规律。第7章论述了选择性激光熔化快速成形技术,主要包括选择性激光熔化快速成形机理与工艺、选择性激光熔化快速成形制件的性能演变规律、选择性激光熔化快速成形过程中的温度场和应力应变场。第8章论述了选择性激光熔化与热等静压复合快速成形技术,主要包括选择性激光熔化与热等静压复合成形技术的原理与工艺、复合成形技术的工艺规划、热等静压包套的选择性激光熔化成形工艺、热等静压致密化机理及其工艺、复合技术成形零部件的性能。

本书以作者及所在团队几十年来从事激光快速成形技术的科研成果为基础,兼顾不同知识背景读者的要求,既保证了内容新颖,反映最新研究成果,又有理论知识探讨和实际应用实例。

本书集中反映了华中科技大学快速制造团队的有关成果,这些成果是由上百人的研究团队经过几十年的长期坚持研究而取得的,本书的作者仅是该研究团队的部分人员。在此,衷心地感谢华中科技大学快速制造团队的创始人黄树槐教授的指导以及为后来者建立的良好研究平台!衷心地感谢华中科技大学快速制造团队的各位教师、工程技术人员和历届研究生长期不懈的辛勤工作!衷心地感谢科技部、教育部、湖北省、武汉市等项目的资助以及中国科学院科学出版基金的资助!本书的撰写参考了相关文献,尤其是曾在本团队攻读学位的李湘生、林柳兰、汪艳、孙海霄、黎志冲、鲁中良、章文献、王成、陈继兵、姚化山、徐文武、程迪、张晶、付立定、姜炜、徐林等博硕士的研究论文和成果,这里特别向他们表示感谢!

本书以粉末材料的激光及其复合快速成形技术作为一条主线进行撰写,内容涉及广泛,有些内容是作者的最新研究成果,而有些内容涉及还在继续的研究工作,且作者对该技术的认识仍在不断深化,对一些问题的理解还不够深入,加之学术水平和知识面有限,故书中难免存在不妥之处,殷切地期望同行专家和读者能给予批评指正。

史玉升

2012年8月于武汉

目 录

前言

第 1 章 选择性激光快速成形技术概述	1
1.1 选择性激光烧结技术	1
1.2 选择性激光熔化技术	2
参考文献	4
第 2 章 高分子粉末材料的选择性激光烧结快速成形技术	5
2.1 高分子粉末材料的选择性激光烧结成形机理	5
2.1.1 激光的能量输入特性	6
2.1.2 高分子粉末材料的激光烧结成形机理	12
2.2 高分子粉末材料特性对选择性激光烧结成形过程的影响	16
2.2.1 表面张力对 SLS 成形过程的影响	16
2.2.2 粒径对 SLS 成形过程的影响	17
2.2.3 粒径分布对 SLS 成形过程的影响	18
2.2.4 粉末颗粒形状对 SLS 成形过程的影响	19
2.2.5 黏度对 SLS 成形过程的影响	20
2.2.6 高分子材料本体的力学性能对 SLS 成形件性能的影响	24
2.2.7 聚集态结构对 SLS 成形过程的影响	25
2.3 选择性激光烧结高分子粉末材料的制备及组成	29
2.3.1 高分子粉末材料的制备	29
2.3.2 SLS 高分子材料的组成	31
2.3.3 SLS 高分子材料制备工艺	35
2.4 非晶态高分子粉末材料的选择性激光烧结成形与后处理工艺	35
2.4.1 PS 粉末材料的 SLS 成形与后处理工艺	36
2.4.2 PC 粉末材料的 SLS 成形与浸渗树脂后处理工艺	54
2.5 晶态高分子粉末材料的选择性激光烧结成形工艺	61
2.5.1 尼龙 12 粉末材料的制备	61
2.5.2 尼龙 12 粉末材料的 SLS 成形工艺	74
2.5.3 尼龙 12 粉末材料 SLS 成形件的性能	78
2.6 机械混合尼龙 12/无机填料复合粉末材料的选择性激光烧结成形工艺	81

2.6.1 尼龙 12/微米级填料复合粉末材料	81
2.6.2 尼龙/累托石复合粉末材料	93
2.7 溶剂沉淀尼龙 12/无机填料复合粉末材料的选择性激光烧结成形工艺	104
2.7.1 尼龙 12/钛酸钾晶须复合粉末材料	104
2.7.2 尼龙 12/铝复合粉末材料	112
2.7.3 尼龙 12/纳米二氧化硅复合粉末材料	124
2.8 尼龙/聚苯乙烯合金粉末材料的制备及选择性激光烧结成形工艺	135
2.8.1 物理混合 PS 和 PA 粉末材料的 SLS 成形试验	135
2.8.2 PS/PA 高分子合金增容剂的制备	136
2.8.3 PS/PA 高分子合金的制备及其配方试验研究	138
2.9 高性能高分子/金属复合零部件的选择性激光烧结间接成形	142
2.9.1 尼龙 12 覆膜金属粉末的制备与表征	143
2.9.2 聚合物/金属复合粉末的激光烧结过程分析	145
2.9.3 选择性激光烧结成形	148
2.9.4 初始形坯的后处理	153
参考文献	165
第 3 章 陶瓷粉末材料的选择性激光烧结快速成形技术	169
3.1 选择性激光成形陶瓷零部件的意义	169
3.2 选择性激光烧结成形陶瓷零部件的研究现状	169
3.2.1 陶瓷粉末所用的黏结剂	170
3.2.2 陶瓷粉末的 SLS 成形与后处理工艺	171
3.3 Al_2O_3 陶瓷制件的选择性激光烧结间接成形工艺	172
3.3.1 Al_2O_3 粉末的确定	172
3.3.2 Al_2O_3 粉末所用黏结剂种类的确定	173
3.3.3 环氧树脂的特性分析	173
3.3.4 Al_2O_3 粉末中环氧树脂含量的确定	175
3.3.5 间接 SLS 成形用 Al_2O_3 粉末的制备	176
3.3.6 Al_2O_3 粉末的 SLS 成形工艺	176
3.3.7 Al_2O_3 陶瓷 SLS 制件的后处理	179
3.3.8 Al_2O_3 陶瓷制件的性能	191
3.4 SiC 陶瓷零部件的选择性激光烧结间接成形工艺	195
3.4.1 成形材料	195
3.4.2 成形工艺	197

3.4.3 后处理	200
参考文献	212
第4章 覆膜砂选择性激光烧结快速成形技术及应用	215
4.1 覆膜砂的选择性激光烧结成形机理与特征研究	216
4.1.1 覆膜砂的选择性激光烧结成形概述	216
4.1.2 实验	216
4.1.3 覆膜砂的固化机理	216
4.1.4 覆膜砂的固化动力学	218
4.1.5 覆膜砂的激光烧结固化特性分析	220
4.1.6 覆膜砂的激光烧结特征	223
4.2 覆膜砂的选择性激光烧结快速成形工艺与性能研究	226
4.2.1 覆膜砂 SLS 成形失败的原因分析	226
4.2.2 覆膜砂性能对 SLS 成形过程的影响	226
4.2.3 覆膜砂的 SLS 成形工艺	229
4.2.4 SLS 覆膜砂型(芯)的后固化	237
4.2.5 发气量与透气率	237
4.2.6 SLS 覆膜砂型(芯)的尺寸精度	238
4.3 应用实例	239
4.3.1 复杂液压阀体的制造	239
4.3.2 气缸盖的制造	244
4.3.3 其他砂型(芯)的 SLS 成形	246
参考文献	247
第5章 选择性激光烧结间接快速成形金属零部件及应用	248
5.1 金属粉末激光烧结成形原理	248
5.1.1 粉末黏结成形的热力学原理	248
5.1.2 激光种类与成形机理	250
5.2 选择性激光烧结用金属粉末	254
5.2.1 高分子黏结剂系统	254
5.2.2 黏结剂添加方式与黏结原理	256
5.2.3 典型黏结剂分析	260
5.2.4 金属粉末材料	261
5.2.5 SLS 间接成形金属粉末的制备方法	264
5.3 选择性激光烧结成形工艺	265
5.3.1 SLS 成形工艺参数及粉末性能对其制件质量的影响	265

5.3.2	SLS 成形工艺优化	285
5.3.3	制件的脱脂机理与工艺	286
5.3.4	制件的二次烧结机理与工艺	296
5.3.5	制件的组织与性能	297
5.4	选择性激光烧结制件的熔(浸)渗机理与工艺	303
5.4.1	熔(浸)渗模型建立	303
5.4.2	熔渗金属制件及其组织性能	307
5.4.3	熔渗合金制件的热处理及其组织性能	310
5.4.4	制件的高分子浸渗剂及浸渗工艺	314
5.4.5	制件浸渗高分子后的组织性能	319
5.5	应用实例:随形冷却流道注塑模具的选择性激光烧结快速成形 制造	321
5.5.1	随形冷却技术的必要性	321
5.5.2	随形冷却流道的实现方法	323
5.5.3	随形冷却流道注塑模具镶块的 SLS 成形	324
5.5.4	随形冷却流道注塑模具镶块制件的后处理	326
5.5.5	随形冷却流道注塑模具镶块制件的注塑成形	332
	参考文献	334
第 6 章	选择性激光烧结与等静压复合快速成形技术	336
6.1	复合成形技术原理与研究现状	336
6.2	SLS/IP 复合技术	338
6.2.1	SLS/HIP 复合技术	338
6.2.2	SLS/CIP 复合技术	346
6.2.3	冷等静压致密化机理	346
6.2.4	冷等静压致密化工艺	348
6.3	高温烧结与热等静压致密化机理及工艺	350
6.3.1	高温烧结致密化机理与工艺	350
6.3.2	热等静压致密化机理与工艺	356
6.4	复合技术各阶段零件材料的性能	358
6.4.1	CIP 压强对 AISI304 SLS/CIP 试样致密度影响	358
6.4.2	CIP 压强对显微硬度影响	360
6.4.3	CIP 后续处理对显微形貌影响	362
6.4.4	SLS/CIP 后续处理材料致密度变化	363
6.4.5	SLS/IP 过程中 AISI304 试样性能的变化	364

参考文献	367
第7章 选择性激光熔化快速成形技术及应用	368
7.1 选择性激光熔化成形原理	368
7.1.1 激光与金属作用引起的物态变化	368
7.1.2 激光与金属作用的能量平衡	369
7.1.3 致密金属对激光的吸收	370
7.1.4 金属粉末对激光的吸收	373
7.2 选择性激光熔化成形机理及其工艺	376
7.2.1 成形机理	376
7.2.2 实验条件	377
7.2.3 成形工艺规划	377
7.2.4 单道扫描成形	378
7.2.5 单层扫描成形	383
7.2.6 块体成形	389
7.3 选择性激光熔化成形材料性能	393
7.3.1 金相显微分析	393
7.3.2 X射线衍射物相分析	396
7.3.3 扫描电子显微镜分析	397
7.3.4 显微硬度分析	400
7.3.5 尺寸精度分析	401
7.4 选择性激光熔化成形过程温度、应力及应变场	402
7.4.1 温度场	403
7.4.2 热应力和热应变场	409
7.5 选择性激光熔化成形孔隙形成规律	416
7.5.1 试验条件	416
7.5.2 孔隙影响因素	417
7.5.3 孔隙的分类及其形成机理	424
7.5.4 孔隙控制的应用	428
7.6 选择性激光熔化成形件质量的综合影响因素	434
7.6.1 综述	434
7.6.2 选择性激光熔化成形中的球化	435
7.6.3 成形表面与界面	441
7.6.4 成形件组织形成与特点	445
参考文献	449

第8章 选择性激光熔化与热等静压复合快速成形技术	451
8.1 复合成形技术原理与研究现状	451
8.2 热等静压致密化机理	451
8.3 选择性激光熔化制件的热等静压	452
8.4 选择性激光熔化包套热等静压	456
8.4.1 工艺规划	456
8.4.2 结果与讨论	459
参考文献	461

第 1 章 选择性激光快速成形技术概述

选择性激光快速成形技术是当今国际上较为重要的快速成形技术之一,它主要以激光为热源,以粉末为原料,间接或直接快速成形零部件原形直至最终零部件。目前,选择性激光快速成形技术主要分为选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)技术和选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)技术两种。

1.1 选择性激光烧结技术

SLS 技术属于快速原型与制造(rapid prototyping & manufacturing, RP&M)技术中的一种,是由美国得克萨斯大学的研究生 Decard 于 1986 年发明的。美国得克萨斯大学于 1988 年成功研制第一台 SLS 样机,并获得这一技术的发明专利,于 1992 年授权美国 DTM 公司(现已并入美国 3D System 公司)将 SLS 系统商业化^[1]。SLS 技术借助计算机辅助设计与制造,采用分层叠加制造原理,将粉末材料直接成形为三维实体零件,不受成形零件形状复杂程度的限制,不需任何工装模具^[2~7]。目前,德国 EOS 公司和美国 3D System 公司是世界上 SLS 系统及其成形材料的主要提供商。在国内,北京隆源自动成型系统有限公司从 1993 年开始研究 SLS 技术,并于 1994 年初成功研制国产化 AFS 系列激光快速成形机;1998 年年底华中科技大学的武汉滨湖产业有限公司也研制出 HRPS 系列 SLS 成形机,这两家单位的 SLS 成形设备及材料均已实现产业化。SLS 工艺过程如图 1.1 所示。

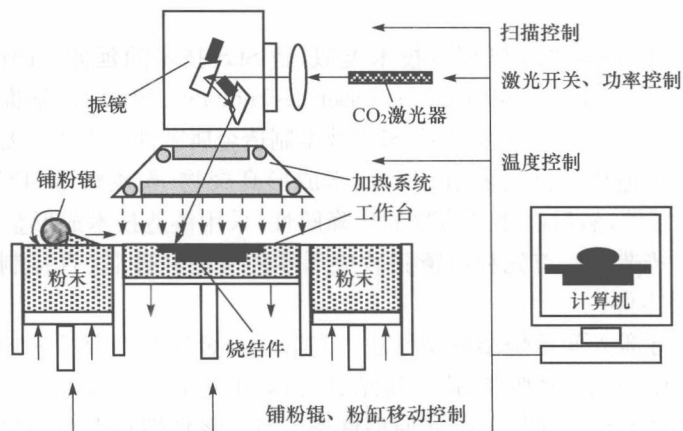


图 1.1 SLS 工艺过程示意图

首先将零件三维实体模型文件沿 Z 向分层切片,并将零件实体的截面信息储存于 STL 文件中;然后在工作台上用铺粉辊铺一层粉末材料,由 CO_2 激光器发出的激光束在计算机的控制下,根据各层截面的 CAD 数据,有选择地对粉末层进行扫描,在被激光扫描的区域,粉末材料被烧结在一起,未被激光照射的粉末仍呈松散状,作为成形件和下一粉末层的支撑;一层烧结完成后,工作台下降一个截面层(设定的切片厚度)的高度,再进行下一层铺粉、烧结,新的一层和前一层烧结在一起;这样,当全部截面烧结完成后除去未被烧结的多余粉末,便得到所设计的三维实体零件。由图 1.1 所示,激光扫描过程、激光开关与功率控制、预热温度以及铺粉辊、粉缸移动等都是在计算机系统的精确控制下完成的。

相对于其他快速成形技术,SLS 技术的特点如下:

(1) 成形材料非常广泛。理论上,任何能够吸收激光能量而黏度降低的粉末材料都可以用于 SLS,这些材料可以是聚合物、金属、陶瓷粉末材料。

(2) 应用范围广。由于成形材料的多样性,决定了 SLS 技术可以使用各种不同性质的粉末材料来成形满足不同用途的复杂零件。SLS 可以成形用于结构验证和功能测试的塑料原型件及功能件,可以通过间接法来成形金属或陶瓷功能零件。目前,SLS 成形件已被广泛用于汽车、航空航天、医学生物等领域。

(3) 材料利用率高。在 SLS 过程中,未被激光扫描到的粉末材料还处于松散状态,可以被重复使用。因而,SLS 技术具有较高的材料利用率。

(4) 无需支撑。未烧结的粉末可以对成形件的空腔和悬臂部分起支撑作用,不必像光固化成形和熔融沉积成形(fused deposition modeling, FDM)那样需要另外设计支撑结构。

1.2 选择性激光熔化技术

SLM 技术的基本原理与 SLS 技术类似,是 SLS 技术的延伸。德国 Fraunhofer 激光器研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT)最早提出采用 SLM 技术直接制造金属零件。目前,采用 SLS 技术制造金属零件的方法主要有:

(1) 熔模铸造法。首先采用 SLS 技术成形高聚物[聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)等]原型零件,然后利用高聚物的热降解性,采用铸造技术成形金属零件。

(2) 砂型铸造法。首先利用覆膜砂成形零件型腔和砂芯(直接制造砂型),然后浇铸出金属零件。

(3) 选择性激光间接烧结原型件法。高分子与金属的混合粉末或高分子包覆金属粉末经 SLS 成形,经脱脂、高温烧结、浸渍等工艺成形金属零件。

(4) 选择性激光直接烧结金属原型件法。首先将低熔点金属与高熔点金属粉末混合,其中低熔点金属粉末在成形过程中主要起黏结剂作用,然后利用 SLS 技

术成形金属零件,最后对零件后处理,包括浸渍低熔点金属、高温烧结、热等静压(hot isostatic pressing, HIP)。

SLM 技术能直接成形出接近全致密度的金属零件^[1],克服了 SLS 技术制造金属零件的复杂工艺过程,而且所制造的金属零件力学性能不再像 SLS 技术一样受低熔点金属的影响,零件精度也有所提高。

SLM 技术是利用金属粉末在激光束的热作用下完全熔化、经冷却凝固而成形的一种技术。为了完全熔化金属粉末,要求激光能量密度超过 10^6 W/cm^2 ^[1]。目前用于 SLM 技术的激光器主要有 Nd-YAG 激光器、CO₂ 激光器、光纤激光器。这些激光器产生的激光波长分别为 1064nm、10640nm、1090nm。金属粉末对 1064nm 等较短波长激光的吸收率比较高,而对 10640nm 等较长波长激光的吸收率较低。因此,在成形金属零件过程中具有较短波长激光器的能量利用率高,而采用较长波长的 CO₂ 激光器时激光能量利用率低。

在高激光能量密度作用下金属粉末完全熔化,经散热冷却实现与固体金属冶金焊合成形。SLM 技术正是通过对激光选区内的金属粉末完全熔化、经散热冷却固化、层层累积成形出三维实体的快速成形技术。SLM 金属粉末成形技术的原理如图 1.2 所示。

图 1.2 中,根据成形零件的三维 CAD 模型的分层切片信息,扫描系统(振镜)控制激光束作用于待成形区域内的粉末。一层扫描完毕后,活塞缸内的活塞下降一个层厚距离;接着送粉系统输送一定量的粉末,铺粉系统的辊子铺展一层厚的粉末沉积于已成形层之上。然后,重复上述两个成形过程,直至所有三维 CAD 模型的切片层全部扫描完毕。这样三维 CAD 模型经逐层累积方式直接成形金属零件。最后,活塞上推,可从成形装备中取出零件。至此,SLM 金属粉末直接成形金属零件的全部过程结束。

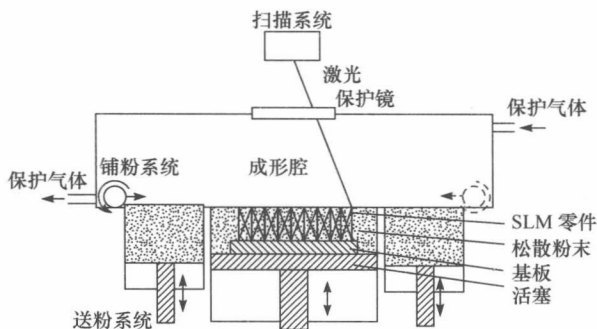


图 1.2 SLM 成形技术原理图

本书主要论述了采用 SLS 和 SLM 及其与等静压方法相复合的几类方法成形

各种零部件的技术与工艺,包括高分子零件原型、覆膜砂、陶瓷及金属零部件几类成形技术,希望读者能够充分认识上述技术,获得相关知识,并在此基础上深入研究开发更新的制造工艺,服务更广泛的领域。

参 考 文 献

- [1] Abe F, Osakada K, Shiomi M, et al. The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 111 (1-3): 210—213.
- [2] Karapatis N P, van Griethuysen J P S, Glardon R. Direct rapid tooling: A review of current research. *Rapid Prototyping Journal*, 1998, 4(2): 77—89.
- [3] Nelson J C. Selective Laser Sintering: A Definition of the Process and an Empirical Sintering Model [PhD Dissertation]. Austin: The University of Texas at Austin, 1993.
- [4] Upcraft S, Fletcher R. The rapid prototyping technologies. *Assembly Automation*, 2003, 23(4): 318—330.
- [5] Steven A. Rapid prototyping systems. *Mechanical Engineering*, 1991, 113(4): 34—43.
- [6] Kruth J K, Leu M C, Nakagawa T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Annals of the CIRP*, 1998, 47(2): 525—540.
- [7] 黄树槐, 张祥林, 马黎, 等. 快速原型制造技术的进展. *中国机械工程*, 1997, 5(8): 8—12.

第2章 高分子粉末材料的选择性 激光烧结快速成形技术

高分子材料与金属、陶瓷材料相比,具有激光烧结成形温度低、所需激光功率小、烧结件精度高等优点,成为应用最早,也是应用最多、最成功的 SLS 成形材料,在 SLS 成形材料中占有重要地位,其品种和性能的多样性以及各种改性技术也为它在 SLS 成形领域的应用提供了广阔的空间。SLS 技术一般要求高分子材料能被制成平均粒径在 $10\sim 100\mu\text{m}$ 的固体粉末材料,粉末颗粒在吸收激光能量后熔融(或软化、反应)而黏结,且不会发生剧烈降解。目前,用于 SLS 技术的高分子材料主要是热塑性高分子材料及其复合材料,热塑性高分子材料又可分为晶态和非晶态两种,由于晶态和非晶态高分子材料在热性能上的决然不同,造成它们在激光烧结成形参数设置及烧结件性能上存在巨大差异。本章首先详细讨论高分子材料 SLS 成形机理及其特性对 SLS 成形过程的影响,然后分别讨论非晶态、晶态高分子材料及其复合材料、合金的 SLS 成形工艺。

目前,高分子材料在 SLS 技术中主要应用于以下几个方面:

- (1) 快速制造原型件。主要用于新产品结构的验证,这也是 SLS 的最初应用领域。
- (2) 快速制造精密铸造用高分子材料熔模。与传统模具制造的蜡模相比,用 SLS 技术制造的熔模具有更高的复杂度、强度及较短的制造周期。
- (3) 直接或间接快速制造塑料功能零件。直接制造是指通过 SLS 成形的高分子零件具有较高的强度,可直接用作塑料功能件;间接制造是指通过 SLS 成形的高分子零件强度较低,通过适当的后处理工艺,力学性能得到提高后才可用作塑料功能件。
- (4) 生物制造。这是目前 SLS 领域的研究热点之一^[1]。

2.1 高分子粉末材料的选择性激光烧结成形机理

高分子粉末材料的激光烧结是将 CO_2 激光器输出的光束通过聚焦,在工作面上形成具有很高能量密度的光斑,此光斑对平铺在工作台上的粉末材料进行烧结。这一成形方法包含了激光对粉末材料的加热以及粉末材料的烧结两个基本过程。正确认识这两个基本过程是成功应用 SLS 技术的基础。本节从理论上对这两个基本过程进行分析探讨,以揭示与之有关的各种因素及其相互作用关系,为研制高