

RENGONG SHENGWU HUOXINGGU DE
RP ZHIBEI FANGFA JI XINGNENG YANJIU

人工生物活性骨的 RP制备方法及其性能研究

陈中中 蒋志强 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

RENGONG SHENGWU HUOXINGGU DE
RP ZHIBEI FANGFA JI XINGNENG YANJIU

人工生物活性骨的 RP制备方法及其性能研究

陈中中 蒋志强 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

内容提要

骨骼是人体唯一的支撑结构,其病变和损伤严重影响患者的健康和生活质量,许多骨创伤需要进行骨移植手术才能有效修复。近年来,随着材料科学的发展,已形成了生命科学与材料科学相互交叉的学科新分支——生物医学材料学。其中,人工生物活性骨作为一种新型硬组织修复与重建的医学材料,具有较好的综合性能和应用空间,而对其的研究工作也已成为生物医疗工程的一个新的学术研究热点。

本书向读者介绍了快速成型在制造人工骨方面的技术优势及基于该技术制备生物活性骨的工艺流程,尤其针对其内部微孔结构的可控制备过程这一重点环节作了详细的阐述。这种新型的人工骨支架结构设计和制作方法,能有效解决传统工艺中无法实现空间复杂孔道制作的技术难点。此外,本书对于所制备的人工骨的各项性能作了深入讨论和分析,如通过动物实验、降解实验、材料性能实验等手段,让读者了解植入骨的综合性能,同时让读者领略到采用现代制造技术和生命科学手段来进行骨骼外形及内部微孔结构一体化制造的技术风采。

本书可供从事先进制造技术领域、医学工程领域研究的科研与工程技术人员参阅。

责任编辑:宋云 责任出版:刘译文

图书在版编目(CIP)数据

人工生物活性骨的RP制备方法及其性能研究/陈中中,
蒋志强著. —北京:知识产权出版社,2013.6

ISBN 978-7-5130-2074-9

I. ①人… II. ①陈… ②蒋… III. ①生物材料—生
物活性—人工骨—快速成型技术—研究 IV. ①R318.17

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第107882号

人工生物活性骨的RP制备方法及其性能研究

陈中中 蒋志强 著

出版发行:知识产权出版社

社址:北京市海淀区马甸南村1号

网址: <http://www.ipph.cn>

发行电话:010-82000893 82000860 转 8101

责编电话:010-82000860-8388

印刷:知识产权出版社电子制印中心

开本:787mm×1092mm 1/16

版次:2013年10月第1版

字数:250千字

邮 编:100088

邮 箱:bjb@cnipr.com

传 真:010-82000860 转 8240

责编邮箱:hnsongyun@163.com

经 销:新华书店及相关销售网点

印 张:15.75

印 次:2013年10月第1次印刷

定 价:49.00元

ISBN 978-7-5130-2074-9

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

前 言

科学研究永无止境。近年来，学科交叉融合加快，新兴学科不断涌现。科学和技术的融合成为当今科技发展的重要特征，学科间的边界变得更加模糊，许多重大创新更多地出现在学科交叉领域。其中，先进制造工程技术正向生命科学渗透，已交叉融合出一个新的发展方向——医学工程化制造领域。同时，这两个学科之间、科学与技术之间相互融合、相互转化、相互渗透的速度不断加快，并正在形成一个统一的协同发展的科学技术体系。

快速成型技术是 20 世纪 80 年代发展起来的一项全新的制造技术，它可以与生物材料、生物工程相结合，通过各种先进的加工工艺来制备组织生物支架，同时借助组织工程的细胞培养技术，能够组装并完成多种人体器官、组织的仿生产品，能够为人体器官的修复和康复医学提供很好的技术手段。快速成型独特的技术优势在生命科学领域中能够发挥重要作用，特别是在骨科、口腔科、整形外科等医用领域，相关研究及报道不断增多，并已成为了一个研究热点。为给从事医学和工程学研究的科研技术人员能更多了解快速成型在生物医学工程中的应用与发展状况，特编写此书，以期扩大读者视野，有利于进一步开展研究工作。

本书共分八章，涉及快速成型（RP）技术原理、RP 技术在口腔颌面外科、人工膝关节体和仿生结构人工骨中的临床案例等。本书所反映的科研成果和学科前沿，可供工程、先进制造技术、临床医学等研究领域的工程技术人员阅读。同时也希望为从事相关研究的医学、理工科学者及研究生的知识面拓宽和思路的开阔有所裨益。

本书得到国家自然科学基金（51105344、51275485），河南省创新型科技团队、河南省科技创新杰出人才计划（134200510024），河南省高校科技创新团队支持计划（2012IRTSTHN014），郑州市创新型科技人才队伍建设工程资助计划（112PCXTD350），郑州航院科研创新团队（2011TD05），航空科学基金（2012ZD55009），河南省基础与前沿技术

研究计划 (092300410162, 102300410131), 河南省重点科技攻关计划 (102102110130, 112102210491, 122102210423, 132102210323), 河南省教育厅自然科学基金基础研究计划 (2011A460013, 12A460011), 郑州市科技攻关计划 (112PPGY248-2) 等资助。同时还要感谢知识产权出版社给予的大力支持!

在本书的撰写过程中, 借鉴或引用了一些前人的研究成果和经验, 在此对原作者表示由衷的敬意和感谢! 因著者水平的局限, 难免存在缺点和不足之处, 敬请广大读者不吝赐教。

著 者

目 录

第一章 绪论	1
1.1 快速成型 (RP) 技术概述	1
1.2 快速成型 (RP) 技术的医疗应用	44
1.3 人工生物活性骨中 RP 技术应用现状	52
第二章 人工骨支架成型材料的研究	65
2.1 人工骨支架成型材料性能要求	65
2.2 成型材料的选择	66
2.3 成型材料的制备及其各项性能	69
2.4 成型材料的生物学性能分析	75
2.5 本章小结	77
第三章 基于 RP 的生物活性骨支架仿生 CAD 建模	78
3.1 基于 RP 的人工骨外形 CAD 建模	79
3.2 基于解剖学分析的人工骨内部结构建模	87
3.3 生物活性骨支架内外结构一体化建模	110
第四章 人工骨成型设备及成型工艺研究	115
4.1 人工骨专用成型设备——AJS 系统	115
4.2 AJS 系统成型工艺中的各项工艺参数	122
4.3 几种典型的工艺现象及其改善方法	135
4.4 成型精度测试	140
4.5 系统硬件	144
4.6 一体化制作及“定层构造法”技术方案	152
4.7 本章小结	154

第五章 复合工艺及固化机理研究	156
5.1 复合工艺方案	156
5.2 复合工艺中丝材直径的变化	160
5.3 人工骨的性能研究	163
5.4 本章小结	168
第六章 生物活性人工骨植入实验及相关降解机理研究	170
6.1 动物实验手术与检测指标	170
6.2 首期动物实验中人工骨的设计和制备	172
6.3 第二期动物实验	175
6.4 动物实验结果及相关分析	185
第七章 基于仿生 CAD 建模和熔铸负型法的人工骨	
支架 RP 制备工艺	201
7.1 生物活性骨支架制备工艺指标	201
7.2 支架结构设计及其负型 SL 制造	203
7.3 支架负型 SL 制造	209
7.4 支架负型树脂原型显微镜观察	210
7.5 生物材料填充烧结工艺	214
7.6 支架微结构观测及抗压力学试验	225
7.7 人工骨抗压力学性能试验	230
7.8 细胞毒性及增殖功能试验	231
第八章 总结与展望	238
参考文献	241

第一章 绪 论

1.1 快速成型（RP）技术概述

20 世纪 80 年代后期发展起来的快速成型（Rapid Prototyping, RP）技术，被认为是近 20 年来制造领域的一次重大突破，其对制造行业的影响可与 20 世纪 50 ~ 60 年代的数控技术相比。RP 技术集成了 CAD、数控、激光和材料技术等现代科技成果，是先进制造技术的重要组成部分。RP 系统综合了机械工程、CAD、数控、激光及材料科学技术，可以自动、直接、快速、精确地将设计思想物化为具有一定功能的原型或直接制造零件，从而可以对产品设计进行快速评价、修改及功能试验，有效地缩短了产品的研发周期。以 RP 系统为基础发展起来并已成熟的快速模具工装制造（Quick Tooling, QT）技术、快速精铸（Quick Casting, QC）技术、快速金属粉末烧结（Quick Powder Sintering, QPS）技术，则可实现零件的快速成型。

RP 技术有别于传统的去除成型（如车、削、刨、磨）、拼合成型（如焊接）或受迫成型（如铸、锻，粉末冶金）等加工方法，而是采用材料累加法制造零件原型，直接将 CAD 数据在计算机控制下，快速制造出三维实体模型，而无须传统的刀具和夹具。其基本过程是首先对零件的 CAD 数据进行分层处理，得到零件的二维截面数据，然后根据每一层的截面数据，以特定的成型工艺（挤压成型材料、固化光敏树脂或烧结粉末等）制作出与该层截面形状一致的一层薄片，这样不断重复操作，逐层累加，直至“生长”出整个零件的实体模型。

1.1.1 快速成型（RP）技术的原理

RP 技术采用离散/堆积的概念制造零件，通过离散获得堆积的路径、限制和方式，通过堆积将材料叠加起来形成三维实体。离散/堆积成形着眼于从制造的全过程消除专用工具以提高柔性。从 CAD 模型中

获得零件的点、面信息（离散），再把它与成型工艺参数信息相结合，转换成控制成型机工作的数字控制代码，控制材料有规律、精确地叠加起来形成零件。离散/堆积通过离散把三维问题转化为一系列二维平面的数控加工，是一个分解—组合过程。快速成型技术工艺过程示意图如图 1-1 所示。

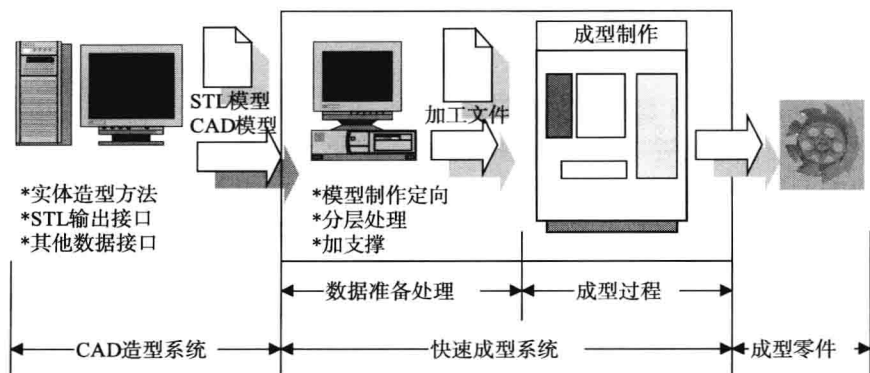


图 1-1 快速成型技术工艺过程示意图

由图 1-1 可以看出，由 CAD 造型系统输出的 STL 模型或 CAD 模型，经快速成型系统的数据准备处理，生成用于成型制造的加工文件，由成型过程将 CAD 模型转化为物理实体模型。在数据准备处理过程中，完成对 CAD 模型的制作定向、分层处理、加支撑和输出加工文件等功能。

1.1.2 快速成型（RP）技术的分类

快速成型工艺目前商业化的主要方法有立体光固化成型法（Stereolithography, SL）、叠层制造法（Laminated Object Manufacturing, LOM）、激光选区烧结法（Selected Laser Sintering, SLS）、熔化沉积制造法（Fused Deposition Modeling, FDM）、掩模固化法（Solid Ground Curing, SGC）、三维印刷法（Three Dimensional Printing, 3DP）、喷粒法（Ballistic Particle Manufacturing, BPM）等。其中，SL 具有误差小、光洁度高的优势，成为市场占有率最高的 RP 技术。

1.1.2.1 立体光固化成型 (Stereo-Lithography, SL)

立体光固化成型法亦称为液态制程或立体光刻成型 (Stereo-Lithography, SL), 是以紫外线光束照射光固化树脂, 使被照射树脂固化逐层堆栈, 从而制造出产品原型。其基本原理如图 1-2 所示。

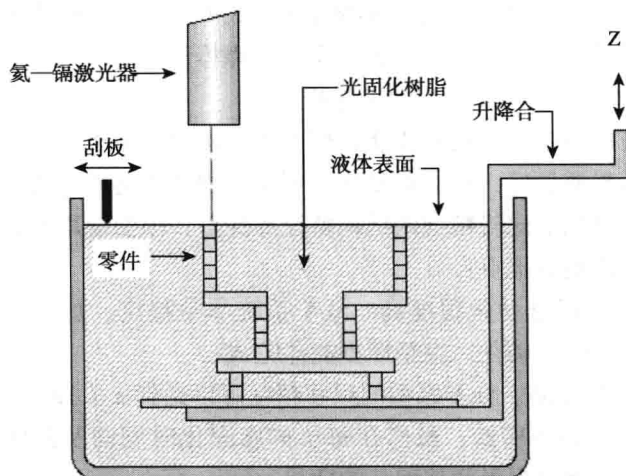


图 1-2 SL 原理图

具体过程如下：加工从最底部开始，用紫外激光在光敏树脂表面扫描，每次产生零件的一层。在扫描的过程中只有激光的曝光量超过树脂固化所需的阈值能量的地方液态树脂才会发生聚合反应形成固态，因此在扫描过程中，对于不同量的固化深度，要自动调整扫描速度，以使产生的曝光量和固化某一深度所需的曝光量相适应。扫描固化成的第一层黏附在一个平台上，此时平台的位置比树脂表面稍微低一点，每一层固化完毕之后，平台向下移动一个新的高度，然后将树脂涂在前一层上，如此反复，每形成新的一层均黏附到前一层上，直到制作完零件的最上一层（零件的最顶层）。这样零件就制作完毕，升起平台后对零件进行一些后续处理，整个制作过程就完成了。当实体原型完成后，首先将实体取出，并将多余的树脂排净；之后去掉支撑，进行清洗；然后再将实体原型放在紫外激光下整体固化。

因为树脂材料的高黏性，在每层固化之后，液面很难在短时间内迅速流平，这将会影响实体的精度。采用刮板刮切后，所需数量的树脂便

会被均匀地涂敷在上一叠层上,这样经过激光固化后可以得到较好的精度,使产品表面更加光滑和平整。采用刮板结构进行辅助涂层的另一个重要优点是可以解决残留体积的问题。最新推出的光固化快速成型系统多采用吸附式涂层结构,吸附式涂层结构在刮板静止时,液态树脂在表面张力作用下,吸附槽中充满树脂。当刮板进行涂刮运动时,吸附槽中的树脂会均匀涂敷到已固化的树脂表面。此外,涂敷结构中的前刃和后刃可以很好地消除树脂表面因为工作台升降等产生的气泡。

(1) 立体光固化成型法的工艺特点

在当前应用较多的几种快速成型工艺方法中,由于光固化成型具有制作原型表面质量好,尺寸精度高,原型实物制作迅速,成型材料收缩量小以及能够制造比较精细的结构特征等优点,因而应用最为广泛。

光固化成型的优点:

- a. 成型过程自动化程度高。SLA 系统非常稳定,加工开始后,成型过程可以完全自动化,直至原型制作完成。
- b. 尺寸精度高。SLA 原型的尺寸精度可以达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。
- c. 优良的表面质量。虽然在每层树脂固化时侧面及曲面可能出现台阶,但上表面仍可得到玻璃状的效果。
- d. 可以制作结构十分复杂、尺寸比较精细的模型。尤其是对于内部结构十分复杂、一般切削刀具难以进入的模型,能轻松地一次成型。
- e. 可以直接制作面向熔模精密铸造的具有中空结构的消失模。
- f. 制作的原型可以在一定程度上替代塑料件。

光固化成型的缺点:

- a. 成型过程中伴随着物理和化学变化,制件较易弯曲,需要支撑,否则会引起制件变形。
- b. 液态树脂固化后的性能尚不如常用的工业塑料,一般较脆,易断裂。
- c. 设备运转及维护费用较高。由于液态树脂材料和激光器的价格较高,并且为了使光学元件处于理想的工作状态,需要进行定期的调整,对空间环境要求严格,其费用也比较高。
- d. 使用的材料种类较少。目前可用的材料主要为感光性的液态树脂材料,并且在大多数情况下,不能进行抗力和热量的测试。
- e. 液态树脂有一定的气味和毒性,并且需要避光保存,以防止提

前发生聚合反应,选择时有局限性。

f. 在很多情况下,经快速成型系统光固化后的原型树脂并未完全被激光固化,为提高模型的使用性能和尺寸稳定性,通常需要二次固化。

(2) 立体光固化成型法成型材料

快速成型材料及设备一直是快速成型技术与开发的核心,也是快速成型技术的重要组成部分。快速成型材料直接决定着快速成型技术制作的模型的性能及适用性,而快速成型制造设备可以说是相应的快速成型技术方法以及相关材料等研究成果的集中体现,快速成型设备系统的先进程度标志着快速成型技术发展的水平。

用于光固化快速成型的材料为液态光固化树脂,或称液态光敏树脂。随着光固化成型技术的不断发展,具有独特性能的光固化树脂(如收缩率小甚至无收缩,变形小,不用二次固化,强度高等)也不断地被开发出来。

光固化快速成型材料与一般固化材料比较,具有下列优点:

- a. 固化快。可在几秒钟内固化,可应用于要求立刻固化的场合。
- b. 不需要加热。这一点对于某些不能耐热的塑料、光学、电子零件来说十分有用。
- c. 可配成无溶剂产品。使用溶剂会涉及许多环境问题和审批手续问题,因此每个工业部门都力图减少使用溶剂。
- d. 节省能量。各种光源的效率都高于烘箱。
- e. 可使用单组分,无配置问题,使用周期长。
- f. 可以实现自动化操作及固化,提高生产的自动化程度,从而提高生产效率和经济效益。

用于光固化快速成型的材料为液态光固化树脂,或称液态光敏树脂。光固化树脂材料中主要包括低聚物、反应性稀释剂及光引发剂。根据光引发剂的引发机理,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。

自由基光固化树脂主要有三类:第一类为环氧树脂丙烯酸酯,该类材料聚合快,原型强度高,但脆性大且易泛黄;第二类为聚酯丙烯酸酯,该类材料流平性和固化性好,性能可调节;第三类材料为聚氨酯丙烯酸酯,该类材料生成的原型柔顺性和耐磨性好,但聚合速度慢。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、天然色素等。其中阻聚剂特别重要，因为它可以保证液态树脂在容器中保持较长的存放时间。

阳离子光固化树脂的主要成分为环氧化合物。用于光固化工艺的阳离子型低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低聚物，其优点如下：

- a. 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%。
- b. 产品精度高。
- c. 阳离子聚合物是活性聚合，在光熄灭后可继续引发聚合。
- d. 氧气对自由基聚合有阻聚作用，而对阳离子树脂则无影响。
- e. 黏度低。
- f. 生坯件强度高。
- g. 产品可以直接用于注塑模具。

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

- a. 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。混杂型体系可以设计成无收缩的聚合物。
- b. 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，混杂型体系可以提供诱导期短而聚合速度稳定的聚合系统。
- c. 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。

根据工艺和原型使用要求，要求光固化成型材料具有黏度低、流平快、固化速度快、固化收缩小、溶胀小、毒性小等性能特点。

热固树脂生产企业美国 Vantico 公司针对 SLA 快速成型工艺提供了 SL 系列光固化树脂材料，其中 SL5195 环氧树脂具有较低的黏性，较好的强度、精度，并能得到光滑的表面效果，适合于可视化模型、装配检验模型、功能模型的制造、熔模铸造模型制造以及快速模具的母模制造等。SL5510 材料是一种多用途、精确、尺寸稳定、高产的材料，可以满足多种生产要求，并由 SL5510 制定了原型精度的工业标准，适于在较高湿度条件下应用，如复杂型腔实体的流体研究等。SL7510 制作的

原型具有较好的侧面质量,成型效率高,适于熔模铸造、硅橡胶模的母模以及功能模型等。SL7540 制作的原型的性能类似于聚丙烯,具有较高的耐久性,侧壁质量好,可以较好地制作精细结构,较适于功能模型的断裂试验等。SL7560 的性能类似于 ABS 材料。SL5530HT 是一种在高温条件下仍具有较好抗力的特殊材料,使用温度可以超过 200℃,适合于零件的检测、热流体流动可视化、照明器材检测、热熔工具以及飞行器高温成型等方面。SL Y - C9300 可以实现有选择性的区域着色,可生成无菌原型,适用于医学领域以及原型内部可视化的应用场合。

表 1-1 给出了 Vantico 公司提供的光固化树脂在各种 3D Systems 公司光固化快速成型系统与原型不同的使用性能和要求情况下的光固化成型材料的选择方案。表 1-2 给出了 SLA5000 系统使用的几种树脂材料的性能指标。

表 1-1 3D Systems 公司光固化快速成型系统的光固化成型材料选择方案

指标 LA 系统	成型效率	成型精度	类聚丙烯	类 ABS	耐高温	颜色
SLA190 SLA250	SL5220	SL5170	SL5240	SL5260	SL5210	SL H - C9100
SLA500	SL7560	SL5410 SL5180	SL5440	SL7560	SL5430	—
Viper si2	SL5510	SL5510	SL7540 SL7545	SL7560 SL7565	SL5530	SL H - C9300
SLA350 SLA3500	SL5510 SL7510	SL5510 SL5190	SL7540 SL7545	SL7560 SL7565	SL5530	SL Y - C8300
SLA5000	SL5510 SL7510	SL5510 SL5195	SL7540 SL7545	SL7560 SL7565	SL5530	SL Y - C8300
SLA7000	SL7510 SL7520	SL7510 SL7520	SL7540 SL7545	SL7560 SL7565	SL5530	SL Y - C8300

注:材料 SL5170、SL5180、SL5190 和 SL5195 不适于高湿度的场合。

表 1-2 SLA5000 系统使用的几种树脂材料的性能指标

指标/型号	SL5195	SL5510	SL5530	SL7510	SL7540	SL7560	SLY - C9300
外特性	透明光亮	透明光亮	透明光亮	透明光亮	透明光亮	白色	透明
密度 (g/cm^3)	1.16	1.13	1.19	1.17	1.14	1.18	1.12
黏度 ($\text{cP}^{①}$) (30°C)	180	180	210	325	279	200	1090
固化深度 ($\text{mil}^{②}$)	5.2	4.1	5.4	5.5	6.0	5.2	9.4
临界照射强 (mJ/cm^2)	13.1	11.4	8.9	10.9	8.7	5.4	8.4
邵氏硬度	83	86	88	87	79	86	75
抗拉强度 (MPa)	46.5	77	56 ~ 61	44	38 ~ 39	42 ~ 46	45
拉伸弹性模量 (MPa)	2090	3296	2889 ~ 3144	2206	1538 ~ 1662	2400 ~ 2600	1315
抗弯强度	49.3	99	63 ~ 87	82	48 ~ 52	83 ~ 104	—
弯曲弹性模量	1628	3054	2620 ~ 3240	2455	1372 ~ 1441	2400 ~ 2600	—
延伸率 (%)	11	5.4	3.8 ~ 4.4	13.7	21.2 ~ 22.4	6 ~ 15	7
冲击韧度 (J/m^2)	54	27	21	32	38.4 ~ 45.9	28 ~ 44	—
玻璃化转变温度 ($^\circ\text{C}$)	67 ~ 82	68	79	63	57	60	52
热膨胀率 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	108 ($T < T_g$) 189 ($T > T_g$)	84 ($T < T_g$) 182 ($T > T_g$)	76 ($T < T_g$) 152 ($T > T_g$)	—	181 ($T < T_g$)	—	—
热导率/ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0.182	0.181	0.173	0.175	0.159	—	—
固化后密度 (g/cm^3)	1.18	1.23	1.25	—	1.18	1.22	1.18

①cP: 厘泊, $1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; ②mil: 密耳, $1 \text{ mil} = 2.54 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

1.1.2.2 激光选区烧结 (Selective Laser Sintering, SLS)

(1) 激光选区烧结 (SLS) 的原理

激光选区烧结是利用红外激光光束所提供热量熔化热塑性材料以形成三维零件，通过一个辊子在制作区域铺上一薄层热塑性材料，然后用激光在粉末表面扫描零件的截面形状，对于非晶体物质，激光扫描到的地方将引起粉体软化，同时整体之间在相互接触点处黏结起来形成一个固体团，这个过程称为熔化或烧结，对于结晶体，激光的热量使得粉体熔化形成液态，通过冷却后便硬化为固体，形成的每一层保留在那一层的粉体中，在所有的层均形成以后整个零件就埋置在粉体中。加工开始时先将一层很薄（ $100 \sim 250 \mu\text{m}$ ）的热能粉末均匀地铺在工作平台上，辅助加热装置将其加热到熔点以下的温度，在这个均匀的粉末上面，计算机控制激光按照设计零件第一层的信息扫描，激光扫描到的地方粉末烧结形成固体，激光未扫描到的地方仍是粉末，可以作为下一层的支撑并能在成型完成后去掉，上一层制作完毕后成型活塞下降一个层厚，供粉活塞上升，用铺粉辊筒将粉末从供粉活塞移到成型活塞，将粉体铺平后即可扫描下一层，不断重复这个铺粉和选区烧结的过程直到最后一层，一个三维实体便制作完成了（见图1-3）。

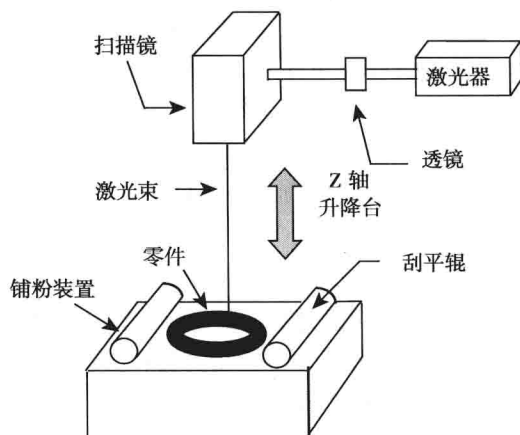


图 1-3 SLS 原理图

注：SLS使用的激光器是 CO_2 激光器，使用的原料有蜡、聚碳酸酯、尼龙、纤维尼龙、合成尼龙、金属以及其他一些粉状物料。

根据所使用的成型材料不同,激光选区烧结具体的烧结工艺也有所不同,可大致分为高分子、金属、陶瓷粉末三种烧结工艺。

①高分子粉末材料烧结工艺。

高分子粉末材料激光烧结快速原型制造工艺过程同样分为前处理、粉层烧结叠加以及后处理过程三个阶段。下面以某一铸件的 SLS 原型在 HRPS-IVB 设备上的制作为例,介绍具体的工艺过程。

a. 前处理。前处理阶段主要完成模型的三维 CAD 造型,并经 STL 数据转换后输入到粉末激光烧结快速原型系统中。

b. 粉层激光烧结叠加。首先对成型空间进行预热。对于 PS 高分子材料,一般需要预热到 100℃ 左右。在预热阶段,根据原型结构的特点进行制作方位的确定,当摆放方位确定后,将状态设置为加工状态。

然后设定建造工艺参数,如层厚、激光扫描速度和扫描方式、激光功率、烧结间距等。当成型区域的温度达到预定值时,便可以启动制作了。

在制作过程中,为确保制件烧结质量,减少翘曲变形,应根据截面变化相应地调整粉料预热的温度。所有叠层自动烧结叠加完毕后,需要将原型在成型缸中缓慢冷却至 40℃ 以下,取出原型并进行后处理。

c. 后处理。高分子粉末材料烧结件的后处理工艺主要有渗树脂和渗蜡两种。当原型件主要用于熔模铸造的消失模时,需要进行渗蜡处理。当原型件为了提高硬性指标时,需要进行渗树脂处理。以高分子粉末为基底的烧结件力学性能较差,作为原型件一般需对烧结件进行树脂增强。在树脂涂料中,环氧树脂的收缩率较小,可以较好地保持烧结原型件的尺寸精度,提高高分子粉末烧结件的适用范围。

②金属烧结工艺。

a. 金属零件间接烧结工艺。在广泛应用的几种快速原型技术方法中,只有 SLS 工艺可以直接或间接地烧结金属粉末来制作金属材质的原型或零件。金属零件间接烧结工艺使用的材料为混合有树脂材料的金属粉末材料,SLS 工艺主要实现包裹在金属粉粒表面树脂材料的黏接。整个工艺过程主要分三个阶段:一是 SLS 原型件(“绿件”)的制作;二是粉末烧结件(“褐件”)的制作;三是金属熔渗后处理。

b. 金属零件直接烧结工艺。金属零件直接烧结工艺采用的材料是纯粹的金属粉末,是采用 SLS 工艺中的激光能源对金属粉末直接烧结,