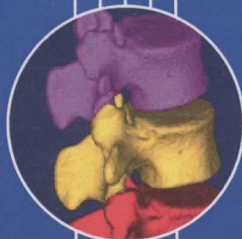


KUAI SU CHENG XING JI SHU YU  
SHENG WU YI XUE DA O L U N

# 快速成型技术与 生物医学导论

陈中中 蒋志强 著



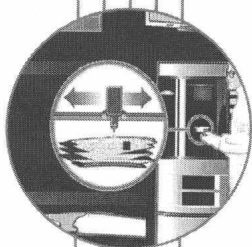
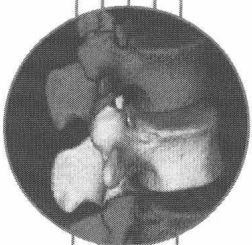
知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

KUAI SU CHENG XING JI SHU YU  
SHENG WU YI XUE DA O L U N

# 快速成型技术与 生物医学导论

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

当今医学技术正处于日新月异的飞速发展时代。与此同时,各种新理论、新技术和新方法不断涌现出来,并向医学的各个领域渗透。快速成型(Rapid Prototyping, RP)技术作为制造技术发展一个新的思维模式,在诸多领域都得到了广泛的应用,尤其是随着近年来研究人员不断地探索,已开发出各种新的RP制造方法,使得这项技术不断地融入了新的生命力。同样,RP技术在医学领域的应用方兴未艾,并为医学事业的发展创造了一个新的机遇。

作者参考了大量国内外文献,介绍了骨组织工程支架设计和制备技术,典型的快速成型的技术原理,着重阐述了RP技术在外科手术规划、口腔颌面、人工膝关节、人工假体置换手术、人工骨制备等方面的临床应用案例,同时对RP技术的医学应用前景做出了展望。

本书内容丰富、翔实,具有较强的先进性和实用性。作者希望通过此书,能将现代临床医学与工程制造两门学科相融合的最新理论、知识和信息传递给广大读者,使读者能够全面透彻地理解RP技术与生物医学之间的关系。本书适合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

快速成型技术与生物医学导论/陈中中,蒋志强著. —北京:知识产权出版社,2013.6

ISBN 978-7-5130-2055-8

I. ①快… II. ①陈… ②蒋… III. ①生物材料—应用—人工骨—研究 IV. ①R318.17

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第101426号

## 快速成型技术与生物医学导论

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

责任编辑: 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: 208千字

邮 编: 100088

邮 箱: [bjb@cnipr.com](mailto:bjb@cnipr.com)

传 真: 010-82000860 转 8240

责编邮箱: [hnsongyun@163.com](mailto:hnsongyun@163.com)

经 销: 新华书店及相关销售网点

印 张: 14

印 次: 2013年10月第1次印刷

定 价: 48.00元

ISBN 978-7-5130-2055-8

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

## 前 言

生命科学是当今世界科技发展的重点领域，也是全球范围内最受关注的基础自然科学。近年来，随着工程技术向生命科学的渗透，已形成工程学与生命科学互相交叉的学科新分支——医学工程化制造领域（简称生物制造，biomanufacturing）。其中，快速成型（RP）技术作为先进制造技术的一个重要组成部分，以其独特的技术优势在该领域中发挥着重要作用，特别是在骨科、口腔科、整形外科等领域，相关的研究报道不断增多，深度、广度不断扩展，已成为一个新的研究热点。为给从事医学和工程学研究的科研人员进一步深入了解快速成型技术在生物医学工程中的应用与发展状况，特编写此书。

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应用等案例。本书所反映的科研成果和学科前沿，可供从事相关研究的临床医学、理工科学者及研究生等人员阅读，也希望能对读者拓宽知识面、开阔视野有所裨益。

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！因著者水平有限，难免存在不足之处，敬请广大读者不吝赐教。

著 者

# 目 录

<b>第一章 快速成型 (RP) 技术</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 快速成型 (RP) 技术原理 .....	2
1.3 快速成型 (RP) 技术分类 .....	3
1.4 快速成型 (RP) 技术的特点 .....	42
1.5 RP 技术与相关学科的技术发展 .....	45
1.6 快速成型 (RP) 技术的工业应用 .....	48
1.7 快速成型 (RP) 技术的医学应用 .....	55
参考文献 .....	66
<b>第二章 生物医用复合人工骨修复材料</b> .....	69
2.1 人工骨替代物简介 .....	69
2.2 金属多孔质人工骨 .....	70
2.3 生物陶瓷材料 .....	72
2.4 生物活性玻璃 .....	75
2.5 有机高分子材料 .....	75
2.6 硬组织工程材料的制造工艺 .....	86
2.7 人工骨修复骨缺损的实验与临床应用研究 .....	89
2.8 硬组织工程材料展望 .....	94
参考文献 .....	96
<b>第三章 基于 RP 的义齿快速制造方法</b> .....	101
3.1 概述 .....	101

3.2 数字化义齿制造过程 .....	101
3.3 数字化义齿修复治疗方法 .....	103
3.4 数字化义齿设计与加工系统 .....	104
参考文献 .....	109
<b>第四章 基于 RP 的口腔颌面外科人工骨快速制造方法 .....</b>	<b>111</b>
4.1 口腔颌骨修复材料 .....	113
4.2 在钛体上种植（安装）义齿方案 .....	115
4.3 面向 CT 图像的骨替代物外形匹配化设计 .....	118
4.4 下颌骨修复体外形设计 .....	127
4.5 骨替代物的空间定位设计 .....	135
4.6 定制化钛体的快速制造工艺 .....	139
4.7 定制化下颌骨钛植人体临床应用案例 .....	147
参考文献 .....	149
<b>第五章 基于 RP 的定制化人工膝关节快速制造方法 .....</b>	<b>153</b>
5.1 定制化半膝关节假体的设计要求和原则 .....	154
5.2 定制化半膝关节假体的医学要求 .....	156
5.3 定制化半膝关节假体系统的 CAD 设计 .....	161
5.4 定制化半膝关节假体系统的快速制造 .....	172
5.5 定制化人工膝关节的临床应用案例 .....	177
参考文献 .....	178
<b>第六章 基于 RP 的大段骨修复技术 .....</b>	<b>180</b>
6.1 大段骨定制化制作案例 .....	180
6.2 分析讨论 .....	185
6.3 大段个性化人工骨研究展望 .....	188
参考文献 .....	189

<b>第七章 基于 RP 的人工骨组织工程支架成型工艺</b> .....	191
7.1 人工骨支架的 RP 直接制造法 .....	191
7.2 人工骨支架的 RP 间接制造法 .....	200
7.3 人工骨支架的固态自由成型制造法 .....	202
7.4 复合细胞或生长因子的人工骨支架成型工艺 .....	204
7.5 本章小结 .....	206
参考文献 .....	207
<b>第八章 结论与展望</b> .....	211
参考文献 .....	211



# 第一章 快速成型（RP）技术

## 1.1 概述

快速成型（Rapid Prototyping）技术是国外 20 世纪 80 年代后期发展起来的一种新型制造技术，是直接根据 CAD 模型快速生产样件或零件的成组技术总称，它与虚拟制造技术一起，被称为未来制造业的两大支柱技术，其对制造业的影响力与数控技术刚出现时对制造业的影响程度相似，有人称快速成型制造技术是继 NC 技术后制造业的又一次革命。RP 技术集成了机械工程、CAD、数控技术、激光技术及材料科学技术，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。与传统机械加工过程中的材料逐渐去除有所不同，RP 法采用的是材料累加方法。其基本原理是先对三维 CAD 模型进行分层得到二维截面数据，然后根据每一层的截面数据，以特定的工艺方法生成与该层形状一致的薄片，这一过程反复进行、逐层累加，直至“生长”出实体模型来，故 RP 方法也称为增材制造（Material Increase Manufacturing），根据其逐层制造的特点，亦称作分层制造技术（Layered Manufacturing Technology）。而以 RP 系统为基础发展起来并已成型的快速模具工装制造（Quick Tooling）技术，快速精铸技术（Quick Casting），快速金属粉末烧结技术（Quick Powder Sintering），则可实现零件的快速成型。

RP 技术，迥异于传统的去除成型（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，而是以逐层成型的薄层累积成所设计的实体原型，RP 技术较之传统的诸多加工方法展示了以下的优越性：

(1) 高度柔性。不借助任何专用工具，即可快速成型出具有一定精度与强度、满足一定性能的原型或零件，要改变零件，只需修改 CAD 模型，特别适宜于单件小批生产。

(2) 高度集成化。CAD 数据转换成 STL 数据后，即可开始 RP 制造过程。CAD 到 STL 文件的转换是自动完成的，大多数 CAD 软件均有此接口。而传统的数控加工方法，CAD/CAM 集成时存在 CAPP 这个技术瓶颈，这是由于切削过程中，机床、刀具、工夹具、零件定位及夹紧诸多因素使工艺过程的制定复杂化。而 RP 过程是二维操作，可以高度自动化和程序化，即用简单重复的动作成型复杂的三维零件，无须特殊模具、工具或人工干预，从设计到成型结束只有信息流，更便于信息传送，易于融合集成化和网络化制造等先进制造概念和技术，适合异地服务。

(3) 适宜成型复杂零件。不论多复杂的三维实体零件，在 RP 中，都分解成二维数据统一处理，因此该方法特别适宜成型型腔、复杂型面等传统方法难以制造甚至无法制造的零件。

(4) 快速性。RP 属于分层制造，制造具有复杂曲面的模型时，比起传统工艺的效率要高得多。此外，围绕 RP 技术发展起来并已成熟的快速工装模具制造技术，使得 RP 技术在快速制造中显示出更大的优势。从 CAD 设计到原型的加工完成往往只需几十个小时，尤其是对复杂零件，比传统加工方法要快得多。

## 1.2 快速成型 (RP) 技术原理

快速成型制造技术是综合利用 CAD 技术、数控技术、激光加工技术和材料技术实现从零件设计到三维实体原型制造一体化的系统技术。它采用软件离散—材料堆积的原理实现零件的成型，如图 1-1 所示。

具体过程如下：首先利用高性能的 CAD 软件设计出零件的三维曲面或实体模型，再根据工艺要求，按照一定的厚度在 Z 向（或其他方向）对生成的 CAD 模型进行分层切片，生成各个截面的二维平面信息；然后对层面信息进行工艺处理，选择加工参数，系统自动生成刀具移动

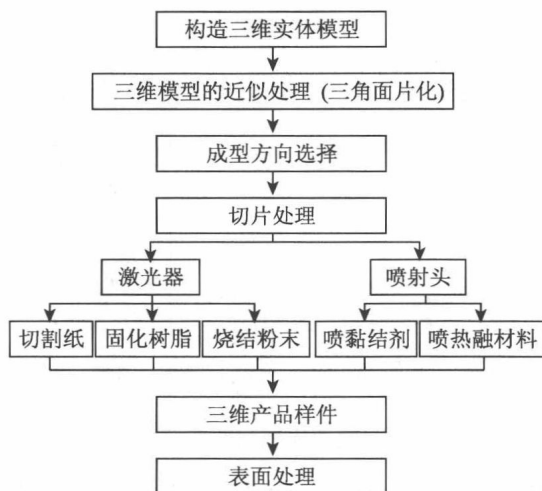


图 1-1 快速成型制造流程示意图

轨迹和数控加工代码，再对加工过程进行仿真，确认数控代码的正确性；最后利用数控装置精确控制激光束选择性地切割一层一层的纸、固化一层层光敏树脂、烧结一层层的粉末材料，或者用喷射头选择性地喷射一层层热融材料或黏结剂，形成各截面轮廓并依次一层层地叠加成三维产品形状，直至整个零件加工完毕。可以看出，快速成型制造技术是一个由三维转换成二维（软件离散化），再由二维到三维（材料堆积）的工作过程。

快速成型制造不仅可用于原始设计中快速生成零件的实物，也可用来快速复制实物（包括放大、缩小、修改和复制）。其工作原理是用三维数字化仪采集三维实物信息，在计算机中还原生成实物的三维模型，必要时用三维 CAD 软件进行修改和缩放，然后进行三维离散化并送到成型机生成实物，整个过程如图 1-2 所示。

### 1.3 快速成型 (RP) 技术分类

目前，RP 技术按具体工艺来分有十几种，典型的有：立体光固化成型法 (Stereo Lithography Appearance, SLA)、叠层制造法 (Laminated Object Manufacturing, LOM)、选择性激光烧结法 (Selective Laser Sintering,

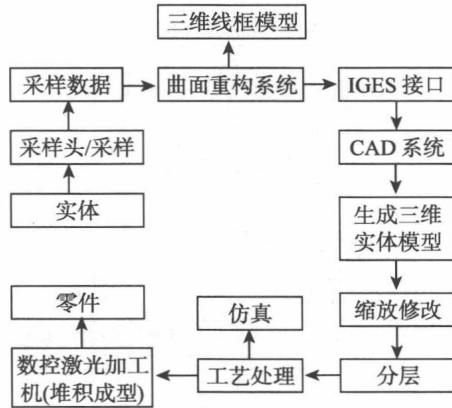


图 1-2 快速成型制造与反求工程

SLS)、熔融沉积成型法 (Fused Deposition Modeling, FDM)、三维印刷法 (Three Dimensional Printing, 3DP)、形状沉积法 (Shape Deposition Manufacturing, SDM)、掩膜固化法 (Solid Ground Curing, SGC)、光束干涉固化 (Beam Interference Solidification, BIS)、树脂热固化成型 (Laser Thermosetting Prototyping, LTP)、全息干涉固化 (Holographic Interference Solidification, HIS)、弹射颗粒成型 (Ballistic Particle Manufacturing, BPM)、三维焊接 (Three Dimensional Welding, 3DW)、形状层积技术 (Shape Deposition Modeling, SDM)、液相烧结 (Liquid Phase Sintering, LPS)、图形光刻沉积成型 (Graphic Photoetching Deposition, GPD)、空间成型 (Space Forming, SF)、模具固化成型 (Tooling Solidification Fabrication, TSF)、实体薄片成型 (Solid Flake Production, SFP) 等。

按照成型材料来区分, RP 工艺的分类形式如图 1-3 所示。

### 1.3.1 立体光固化成型法 (SLA)

#### 1.3.1.1 立体光固化成型法基本原理

立体光固化成型法亦称为液态制程或立体光刻成型 (StereoLithography, SL), 是以紫外线光束照射光固化树脂, 使被照射的树脂固化逐层堆积, 从而制造出产品原型。其基本原理如图 1-4 所示。

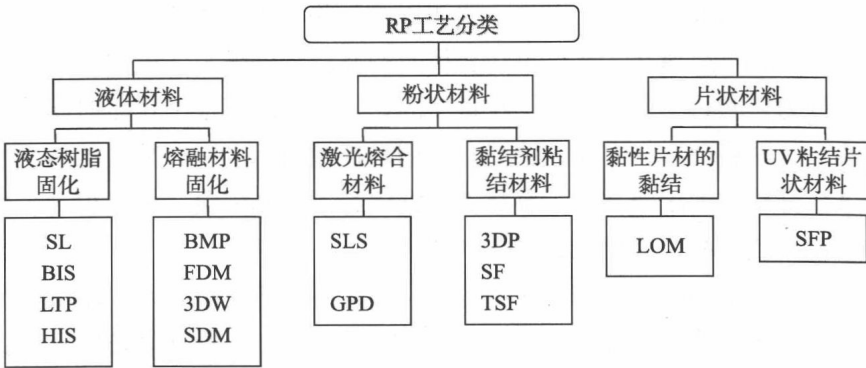


图 1-3 快速成型 (RP) 技术的工艺分类

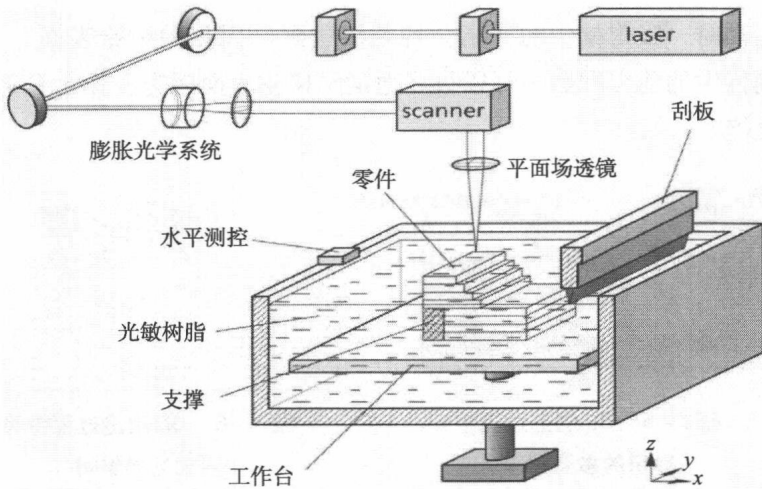


图 1-4 SLA 原理示意图

具体过程如下：液槽中盛满液态光敏树脂，氦-镉激光器或氩离子激光器发出的紫外激光束在控制系统的控制下按零件的各分层截面信息在光敏树脂表面进行逐点扫描，使被扫描区域的树脂薄层产生光聚合反应而固化，形成零件的一个薄层。一层固化完毕后，工作台下移一个层厚的距离，以使在原先固化好的树脂表面再敷上一层新的液态树脂，刮板将黏度较大的树脂液面刮平，然后进行下一层的扫描加工，新固化的一层牢固地黏结在前一层上，如此重复直至整个零件制造完毕，得到一个三维实体原型。

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后固化。

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十分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的优点就是可以解决残留体积的问题，残留的多余树脂如图 1-5 所示。最新推出的光固化快速成型系统多采用吸附式涂层结构（见图 1-6），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。

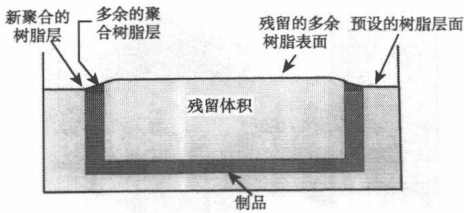


图 1-5 SL 制造过程中  
残留的多余树脂

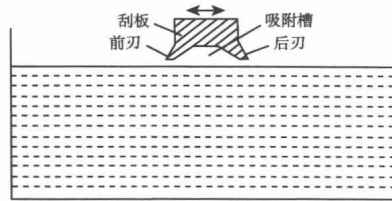


图 1-6 SL 制造过程中吸  
附式涂层结构

### 1.3.1.2 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，因而应用广泛。

#### (1) 光固化成型的优点

①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。

②尺寸精度高。SLA 原型的尺寸精度可以达到  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

③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。

④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。

⑤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。

⑥制作的原型可以在一定程度上替代塑料件。

#### (2) 光固化成型的缺点

①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。

②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。

③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。

④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。

⑤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。

⑥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。

#### 1.3.1.3 立体光固化成型法成型材料及设备

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。

##### (1) 光固化快速成型材料

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)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。

①固化快。可在几秒钟内固化，可应用于要求立刻固化的场合。

②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。

③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。

④节省能量。各种光源的效率都高于烘箱。

⑤可使用单组分，无配置问题，使用周期长。

⑥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。

光固化树脂材料主要包括齐聚物、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。其中的阻聚剂特别重要，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：

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黏度低。
- ⑥生坯件强度高。
- ⑦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:

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。混杂型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,混杂型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。

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 SL 5195 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、熔模铸造模型制造以及快速模具的母模制造等。SL 5510 材料是一种多用途、精确、尺寸稳定的材料,可以满足多种生产要求,并由 SL 5510 制定了原型精度的工业标准,适合于在较高湿度条件下应用,如复杂型腔实体的流体研究等。SL 7510 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。SL 7540 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。SL 7560 的性能类似于 ABS 材料。SL 5530HT 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。SLY - 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。