

立体光固化成型机理与精度分析

北京工业大学激光工程研究院

黄朝阳

摘要：增材制造，又称为 3D 打印，是加工零件、生产产品的新型工艺。本文以立体光固化（SLA）为例介绍了 3D 打印的基本原理和成型过程和影响成型精度的因素。对光敏树脂特性的参数作了研究。对立体光固化在医学领域的应用作了介绍。

一、增材制造简介

在增材制造技术诞生之前，机械加工、铸模是零件加工、产品生产的主要方式。对于利用机械加工来生产零件，材料的利用率是个无法忽视的问题。据统计，在我国机械加工行业，钢材的利用率仅为 60%左右；据调查的部分企业数据显示，铸铁件废品率为 12%-14%，铸钢件废品率为 10%-11%，有些企业甚至达到 20%^[1]。机械加工过程中产生的粉尘污染严重影响人体健康以及生命安全^[2]。

增材制造，又称为 3D 打印，是加工生产零件和产品的新型工艺，被誉为第三次工业革命，已经成为一些发达国家重点发展的领域，目前也是我国《中国制造 2025》的重点发展领域。在航空航天、汽车、船舶、医疗和文创等领域都得到越来越多的应用，产业规模快速增长^[3]。

增材制造技术按照成型原理和使用材料的不同分为熔融沉积制造（FDM）、选择性激光烧结（SLS）、选择性激光熔化（SLM）、立体光固化（SLA）、数字光处理（DLP）、喷射式 3D 打印^[4]等几种方式。使用的材料涵盖范围广，按照化学成分来归类有高分子材料、金属材料和陶瓷材料^[5]，材料形态有粉末、液态光敏树脂、丝状材料。使用增材制造技术来制造零件、生产产品，材料的利用率高，如果不添加支撑的情况下可以达到 100%，这一点对于选择性激光烧结更为明显；整个制造过程不会产生任何污染；大大缩短制造周期。

二、立体光固化原理

以实验室现有的立体光固化（SLA）打印机为例介绍 3D 打印的原理。光源为 355nm 紫外激光器，激光功率 245mw，打印速度 6m/s，层厚 0.1mm，材料为液态光敏树脂。

2.1 光敏树脂组成

光敏树脂由基体树脂低聚物、光引发剂、活性稀释剂以及其他成分如染料组成。低聚物是光敏树脂的主要成分，能够调节粘度、减小收缩、加快固化；活性稀释剂能够稀释低聚物和光引发剂，避免树脂过于粘稠使得树脂的流动性不好；光引发剂在一定波长激光的照射下引发体系发生聚合^[6]。

2.1 液态光敏树脂固化机理^[7]

光引发剂吸收一定强度的紫外光能量后分子跃迁至激发态，与预聚物和单体中的不饱和键发生聚合反应，生成初级自由基。在链引发阶段，生成的初级自由基继续与其他不饱和键继续发生聚合反应。当链增长到一定程度后，树脂固化体系达到很高的交联密度，使得自由基的活性降低，并且自由基的扩散也受到限制，

因此自由基与不饱和键的聚合反应降低。当树脂体系形成体型网络结构后，体系中存在复合笼效应，使得分子链段上的自由基的活性更低，自由基不再扩散而猝灭，使链增长终止。最终固化完成。

2.2 立体光固化过程

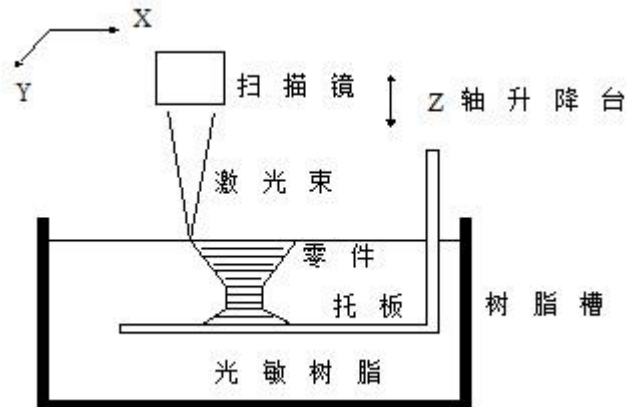


图 1 成型原理图

(1) 将使用三维建模软件或者三维扫描好的模型转换成 STL 格式导入到切片软件（我们使用的是 magics）中，首先对模型添加支撑，然后再进行分层，层厚 0.1mm。这样整个模型可以看成是由层厚为 0.1mm 的切片叠加而成。

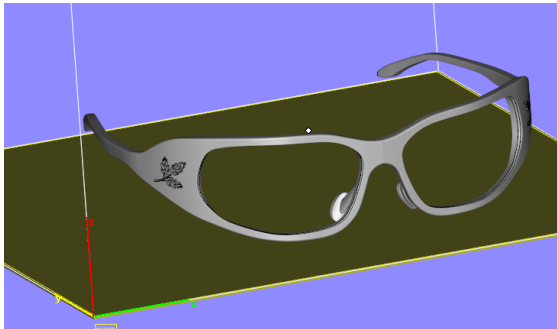


图 2 模型导入

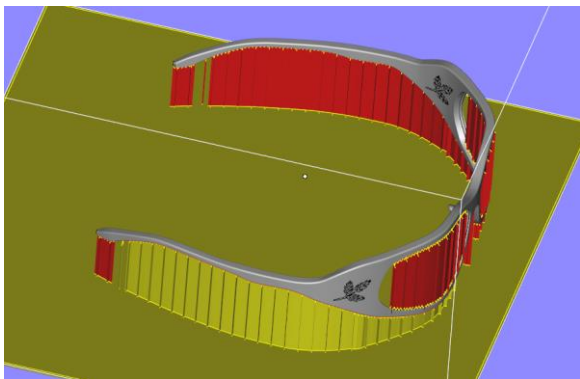


图 3 生成支撑

(2) 将分层后的模型连同支撑文件从 magics 中导出为 SLC 格式的文件。通过 USB 口再将其导入到打印机中。

(3) 每一层的薄片都有轮廓信息，这些轮廓信息反映的是模型的截面形状。

这些轮廓信息控制激光的运动。

(4) 打印开始时，树脂槽中的打印基板先下降一个层厚的距离，这时树脂的液面在基板之上 0.1mm，分层后的模型按照第一层切片的截面信息控制激光扫描出第一层的轮廓。

(5) 第一层切片扫描完毕之后，基板在下降一个层厚的距离，刮刀将树脂液面刮平，第二层的切片按照第二层的截面轮廓信息控制激光扫描出第二层的轮廓。如此往复，直到所有的切片全都扫描完毕，则打印完成。

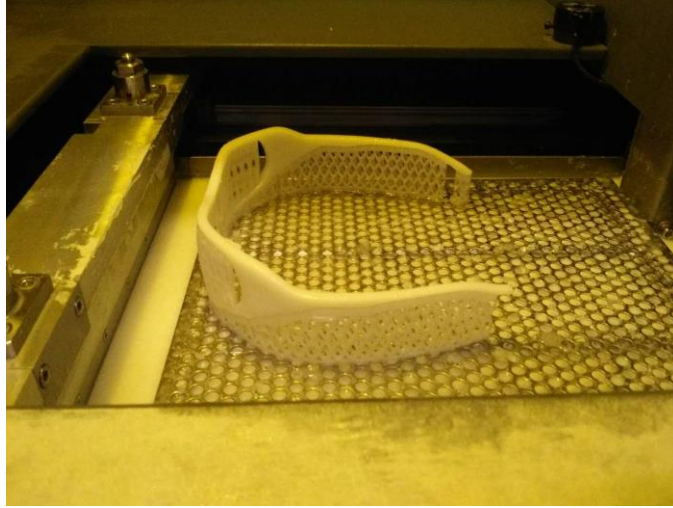


图 4 打印完成

需要注意的是，为了模型打印完成后能够非常方便的从树脂槽中去除模型，需要模型与打印基板保持一段距离，这段距离可以添加一部分支撑来填充。

三、透射深度和临界曝光量

临界曝光量 E_c ：光敏树脂由液态变为固态的临界值。

透射深度 D_p ：紫外光能量密度衰减到入射光能量密度 E 的 $1/e$ 时的深度，是光敏树脂的固有参数。

临界曝光量和透射深度是衡量光敏树脂特性的主要参数，也是确定立体光固化工艺参数激光能量和分层厚度的基础^[8]。

3.1 光敏树脂光固化方程^[9]

液态光敏树脂对紫外光的吸收符合 Beer-lambert 定律：随着深度的增加，紫外光的能量呈负指数衰减。

$$E(z) = E \exp(-kz) \quad \text{式 1}$$

E ：入射能量密度； $E(z)$ ：距液面距离为 z 时的能量密度； k ：吸收系数，与光引发剂的浓度有关，浓度越大， k 越大。

令：

$$D_p = 1/k \quad \text{式 2}$$

则：

$$E(z) = E \exp(-z/D_p) \quad \text{式 3}$$

当 $E(z) > E_c$ 时，树脂发生相变，从液态变为固态，将 E_c 代入式 3 可以求得固

化深度:

$$z = -D_p \ln(E(c)/E) \quad \text{式 4}$$

3.2 透射深度 D_p 和临界曝光量 E_c 确定[10]

对公式 4 变形, 得:

$$z = D_p [\ln E - \ln E(c)] \quad \text{式 5}$$

以 $\ln E$ 为横坐标、 z 为纵坐标, 可以构建以直线方程, 直线方程与横坐标的交点为 $(\ln E(c), 0)$, 纵坐标为 $(0, -D_p \ln E(c))$ 。只要测得一系列的 z 值和 $\ln E$ 值, 即可求得 D_p 和 E_c 。可以通过调整不同的激光功率和扫描速度打印一些薄壁件, 通过测试不同薄壁件的厚度, 即可得出透射深度 D_p 和临界曝光量 E_c 的值。采用平面扫描法来测试, 具体请参考文献[10]。

四、成型精度影响因素

1、将 CAD 模型转换为 STL 格式时, 实际上是用三角面片来近似逼近 CAD 模型的表面, 在转换过程中会产生误差。

2、由于树脂经过固化后由液态变为固态, 使得树脂分子之间的距离减小, 因此固化完成后的模型会有一些收缩。

3、由于模型被分层后导入到打印机中进行打印, 因此层与层之间的阶梯效应会影响打印精度。

4、在打印模型时某些悬空的部分会添加支撑, 给模型去除支撑时, 与支撑连接的地方可能会被剥落。

5、对模型进行后处理, 例如用酒精和毛刷清洗模型时, 毛刷模型的表面会有轻微的摩擦可能导致微量树脂脱落。

6、模型打印完成后, 模型内部可能会残留还没有固化完全的树脂, 因此需要进行二次固化, 所以二次固化也会导致模型收缩。

解决方案: 由于格式转换产生的误差不可避免; 对于收缩变形, 可以通过优化工艺参数或者改进树脂的配方使得收缩率减小; 对于阶梯效应, 可以通过选择合适的分层厚度和摆放位置来减小阶梯效应对精度的影响; 在添加支撑时, 密度不要过于严密, 可以有效减小支撑对精度的影响。

五、立体光固化在医学领域应用

立体光固化技术制作零件精度高、速度快, 可以制造具有任意复杂曲面形状模型。在医疗领域, 将 CT 扫描与立体光固化技术相结合, 针对特定患者可以制定特定的治疗方案, 提高治疗的成功率, 在科学研究上也能发挥巨大的作用。

运用 CT 扫描和立体光固化相结合制造肋骨实体^[11], 将打印好的实体与原型比对之后, 得出打印好的肋骨实体具有很高的精确度, 尽管不能直接作为人体植入体, 但是可以以此为母模制造金属人工肋骨。结合 CAD、逆向工程和立体光固化技术制作仿生结构生物人工骨支架模具, 在模具中填充磷酸钙骨水泥, 烧结后得到仿生结构生物活性人工骨支架, 试验表明支架无细胞毒性, 且黏附在支架上的细胞保持着良好的形态和功能发挥^[12]。利用立体光固化技术打印手术导板, 进行骨肿瘤切除重建手术的应用, 缩短了手术时间, 肿瘤也被完整切除, 经过后续随访发现骨重建稳定^[13]。利用 CT 扫描患者下肢, 并进行三维重建, 用立体光固化技术打印出下肢模型进行术前模拟, 明显缩短手术时间, 减少了麻醉时间和出血量, 患者术后短期随访效果良好^[14]。

六、展望

目前由于立体光固化设备和光敏树脂的价格比较昂贵,使用立体光固化技术来打印零件、生产产品的成本还是较高,目前还只能实现小批量制作。但是由于3D打印具有精度高、速度快、可以制造任意复杂结构的零件和产品等优势,所以如何降低3D打印的生产成本是亟待解决的问题。

现在stratasys已经生产出可以实现全彩打印的POLYJET打印机和光敏树脂,为3D打印的发展与应用增加了更多的可能。



图5 Stratasys 全彩 3D 打印

参考文献:

- [1]徐冬梅. 浅谈提高机械加工材料利用率的途径[J]. 中国机械, 2013(7):196.
- [2]张文艳. 机械加工中粉尘污染的研究进展及防治措施[J]. 南方农机, 2017.
- [3]李方正. 中国增材制造产业发展及应用情况综述[J]. 工业技术创新, 2017, 4(4).
- [4]陈继民, 张成宇, 曾勇, 徐仰立. 骨科数字化 3D 打印技术及应用 LS[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(01):011414.
- [5]邓丽荣, 王晓刚, 陆树河, 华小虎. 增材制造原材料发展现状. 科技资讯, 2016, (24): 47-50.
- [6]何岷洪, 宋坤, 莫宏斌等. 3D 打印光敏树脂研究的进展[J]. 功能高分子学报, 2015, 28(1):102-108.
- [7]杨媛丽, 王永祯, 王爱玲. 光固化快速成型中光敏树脂固化机理研究[J]. 材料开发与应用, 2006, 21(6):8-10.
- [8]黄笔武, 黄伯芬, 谌伟庆, 等. 光固化快速成形光敏树脂临界曝光量和透射深度的测试研究[J]. 信息记录材料, 2007, 8(1):59-62.
- [9-10]赵毅. 激光快速成型中光敏树脂特性的实验研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 20(1):184-186.
- [11]阮征, 王永武, 毛建强等. CT 扫描结合立体光固化技术制造犬肋骨实体的实验研究[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2012, 32(7):902-906.

- [12]李祥, 李涤尘, 张彦东, 卢秉恒. 骨组织微结构观察分析及仿生支架立体光固化间接制造[J]. 北京生物医学工程, 2006, 25(2):164-167.
- [13]付军. 多种 3-D 打印手术导板在骨肿瘤切除重建手术中的应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2014(3):304-308.
- [14]邹运, 韩青, 徐晓麟等. 3 D打印光固化树脂模型在精确评估膝关节损伤及其个体化治疗方案制定中的应用[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(1):141-146.