

# 光固化快速成型技术的应用及其进展\*

## Application and Progress of SLA Rapid Prototyping Technology

山东大学 王广春 袁圆 刘东旭



王广春

山东大学教授,博导,研究方向:快速成型与快速模具制造技术、金属塑性成形数值模拟与优化技术等。

光固化成型技术特别适合于新产品的开发、不规则或复杂形状零件制造(如具有复杂形面的飞行器模型和风洞模型)、大型零件的制造、模具设计与制造、产品的外观评估和装配检验、快速反求与复制,也适用于难加工材料的制造(如利用SLA技术制备碳化硅复合材料构件等)。这项技术不仅在制造业具有广泛的应用,而且在材料科学与工程、医学、文化艺术等领域也有广阔的应用前景。

的方法,而是用材料一层一层积累的方式构造零件模型。由于该项技术不像传统的零件制造方法需要制作木模、塑料模和陶瓷模等,可以把零件原型的制造时间减少为几天、几小时,大大缩短了产品开发周期,降低了开发成本。计算机技术的快速发展和三维CAD软件应用的不断推广,使得光固化成型技术的广泛应用成为可能。光固化成型技术特别适合于新产品的开发、不规则或复杂形状零件制造(如具有复杂形面的飞行器模型和风洞模型)、大型零件的制造、模具设计与制造、产品的外观

评估和装配检验、快速反求与复制,也适用于难加工材料的制造(如利用SLA技术制备碳化硅复合材料构件等)。这项技术不仅在制造业具有广泛的应用,而且在材料科学与工程、医学、文化艺术等领域也有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

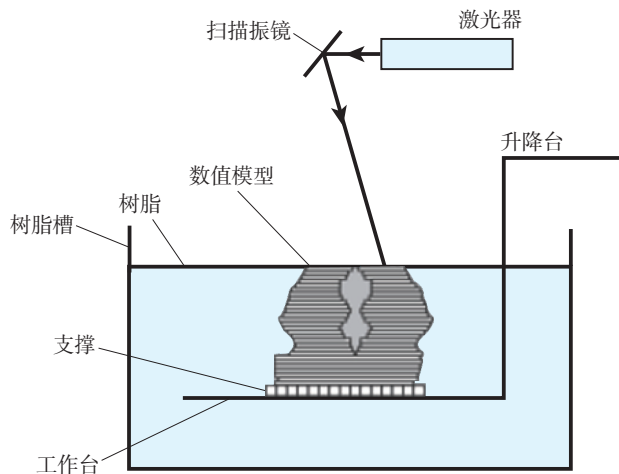


图1 光固化快速成型工艺原理

光固化成型工艺(Stereolithography,SL),常被称为立体光刻成型,有时被称为SLA(Stereolithography Apparatus)。光固化快速成型工艺是最早发展起来的快速成型技术。它是机械工程、计算机辅助设计及制造技术(CAD/CAM)、计算机数字控制(CNC)、精密伺服驱动、检测技术、激光技术及新型材料科学技术的集成。它不同于传统的用材料去除方式制造零件

\* 山东省科技发展计划项目资助(2008GG30002019,2008GG30001001)。

## 光固化成型技术的基本原理

光固化成型工艺的成型过程如图 1 所示<sup>[4]</sup>。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,刮板将粘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粘结在前一层上,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。

因为树脂材料的高粘性,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;并且可以解决残留体积的问题。

## 光固化成型技术的应用

在当前应用较多的几种快速成型工艺方法中,光固化成型由于具有成型过程自动化程度高、制作原型表面质量好、尺寸精度高以及能够实现比较精细的尺寸成型等特点,使之得到最为广泛的应用。在概念设计的交流、单件小批量精密铸造、产品模型、快速工模具及直接面向产品的模具等诸多方面广泛应用于航空、汽车、电器、消费品以及医疗等行业。

### 1 SLA 在航空航天领域的应用

在航空航天领域,SLA 模型可直接用于风洞试验,进行可制造性、可装配性检验。航空航天零件往往

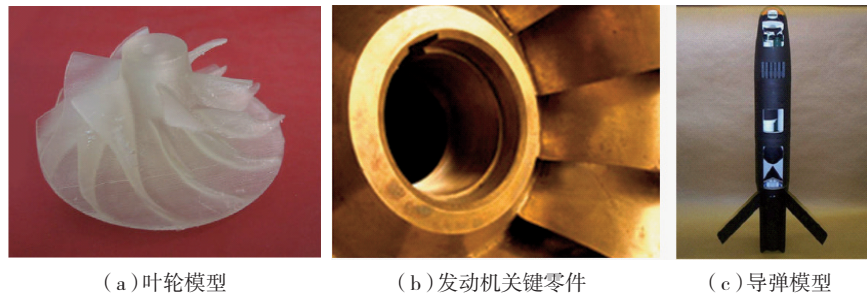


图2 光固化快速原型应用

是在有限空间内运行的复杂系统,在采用光固化成型技术以后,不但可以基于 SLA 原型进行装配干涉检查,还可以进行可制造性讨论评估,确定最佳的合理制造工艺。通过快速熔模铸造、快速翻砂铸造等辅助技术进行特殊复杂零件(如涡轮、叶片、叶轮等)的单件、小批量生产,并进行发动机等部件的试制和试验<sup>[5]</sup>,如图 2(a)所示为 SLA 技术制作的叶轮模型。

航空领域中发动机上许多零件都是经过精密铸造来制造的,对于高精度的木模制作,传统工艺成本极高且制作时间也很长。采用 SLA 工艺,可以直接由 CAD 数字模型制作熔模铸造的母模,时间和成本可以得到显著的降低。数小时之内,就可以由 CAD 数字模型得到成本较低、结构又十分复杂的用于熔模铸造的 SLA 快速原型母模。图 2(b)给出了基于 SLA 技术采用精密熔模铸造方法制造的某发动机的关键零件<sup>[4]</sup>。

利用光固化成型技术可以制作出多种弹体外壳,装上传感器后便可直接进行风洞试验。通过这样的方法避免了制作复杂曲面模的成本和时间,从而可以更快地从多种设计方案中筛选出最优的整流方案,在整个开发过程中大大缩短了验证周期和开发成本。此外,利用光固化成型技术制作的导弹全尺寸模型,在模型表面表进行相应喷涂后,清晰展示了导弹外观、结构和战斗原理,其展示和讲解效果远远超出了单纯的电脑图纸模拟方式,可在未正式量产之前对

其可制造性和可装配性进行检验<sup>[5]</sup>,如图 2(c)为 SLA 制作的导弹模型。

### 2 SLA 在其他制造领域的应用

光固化快速成型技术除了在航空航天领域有较为重要的应用之外,在其他制造领域的应用也非常重要且广泛,如在汽车领域、模具制造、电器和铸造领域等。下面就光固化快速成型技术在汽车领域和铸造领域的应用作简要的介绍<sup>[4,6]</sup>。

现代汽车生产的特点就是产品的多型号、短周期。为了满足不同的生产需求,就需要不断地改型。虽然现代计算机模拟技术不断完善,可以完成各种动力、强度、刚度分析,但研究开发中仍需要做成实物以验证其外观形象、工装可安装性和可拆卸性。对于形状、结构十分复杂的零件,可以用光固化成型技术制作零件原型,以验证设计人员的设计思想,并利用零件原型做功能性和装配性检验,图 3(a)为汽车水箱面罩原型。

光固化快速成型技术还可在发动机的试验研究中用于流动分析。流动分析技术是用来在复杂零件内确定液体或气体的流动模式。将透明的模型安装在一简单的试验台上,中间循环某种液体,在液体内加一些细小粒子或细气泡,以显示液体在流道内的流动情况。该技术已成功地用于发动机冷却系统(气缸盖、机体水箱)、进排气管等的研究。问题的关键是透明模型的制造,用传统方法时间长、花费大且不精确,而用 SLA 技术结合 CAD 造型仅仅需要 4~5 周

的时间,且花费只为之前的 1/3,制作出的透明模型能完全符合机体水箱和气缸盖的 CAD 数据要求,模型的表面质量也能满足要求。如图 3(b)所示即为用于冷却系统流动分析的气缸盖模型。为了进行分析,该气缸盖模型装在了曲轴箱上,并配备了必要的辅助零件。图中的蓝色液体高亮显示了腔体的内部结构。当分析结果不合格时,可以将模型拆卸,对模型零件进行修改之后重装模型,进行另一轮的流动分析,直至各项指标均满足要求为止。

光固化成型技术在汽车行业除了上述用途外,还可以与逆向工程技术、快速模具制造技术相结合,用于汽车车身设计、前后保险杠总成试

工方法,有时还需要钳工进行修整,费时耗资,而且精度不高。特别是对于一些形状复杂的铸件(例如飞机发动机的叶片、船用螺旋桨、汽车、拖拉机的缸体、缸盖等),模具的制造更是一个巨大的难题。虽然一些大型企业的铸造厂也备有一些数控机床、仿型铣等高级设备,但除了设备价格昂贵外,模具加工的周期也很长,而且由于没有很好的软件系统支持,机床的编程也很困难。快速成型技术的出现,为铸造的铸模生产提供了速度更快、精度更高、结构更复杂的保障。图 4(a)为 SLA 技术制作的用来生产氧化铝基陶瓷芯的模具,该氧化铝陶瓷芯是在铸造生产燃气涡轮叶片时用作熔模的,其结构十分复杂,包

的用来生产消失模的模具嵌件,该消失模是用来生产标致汽车发动机变速箱拨叉的。

### 光固化成型技术的研究进展

光固化快速成型制造技术自问世以来在快速制造领域发挥了巨大作用,已成为工程界关注的焦点。光固化原型的制作精度和成型材料的性能成本,一直是该技术领域研究的热点。目前,很多研究者通过对成型参数、成型方式、材料固化等方面分析各种影响成型精度的因素,提出了很多提高光固化原型的制作精度的方法,如扫描线重叠区域固化工序、改进的二次曝光法、研究开发用 CAD 原始数据直接切片法、在制件加工之前对工艺参数进行优化等,这些工艺方法都可以减小零件的变形、降低残余应力,提高原型的制作精度。此外,SLA 所用的材料为液态光敏树脂,其性能的好坏直接影响到成型零件的强度、韧性等重要指标,进而影响到 SLA 技术的应用前景。所以近年来在提高成型材料的性能降低成本方面也做了很多的研究,提出了很多有效的工艺方法,如将改性后的纳米  $\text{SiO}_2$  分散到自由基-阳离子混杂型的光敏树脂中,可以使光敏树脂的临界曝光量增大而投射深度变小,其成型件的耐热性、硬度和弯曲强度有明显的提高;又如在树脂基中加入  $\text{SiC}$  晶须,可以提高其韧性和可靠性;开发新型的可见光固化树脂,这种新型树脂使用可见光便可固化且固化速度快,对人体危害小,提高生产效率的同时大幅度地降低了成本。

光固化快速成型技术发展到今天已经比较成熟,各种新的成型工艺不断涌现。下面从微光固化快速成型制造技术和生物医学两方面展望 SLA 技术。

#### 1 微光固化快速成型制造技术

目前,传统的 SLA 设备成型精

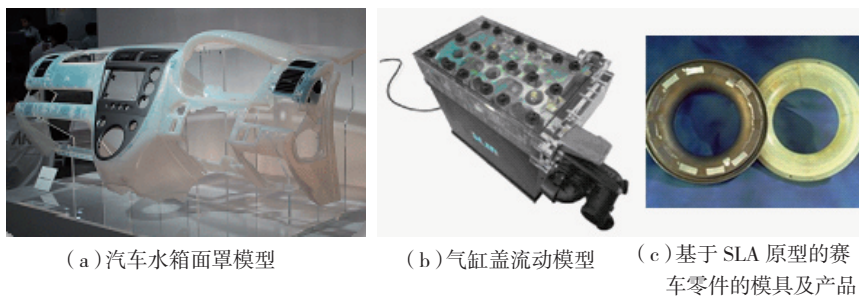


图3 光固化快速原型在汽车领域的应用实例

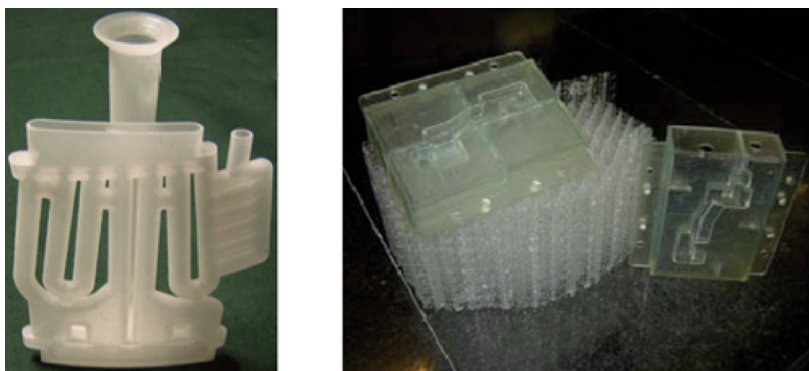


图4 SLA原型在铸造领域的应用实例

制、内饰门板等结构样件/功能样件试制、赛车零件制作等,图 3(c)是基于 SLA 原型,采用 Keltool 工艺快速制作的某赛车零件的模具及产品。

在铸造生产中,模板、芯盒、压蜡型、压铸模等的制造往往是采用机加

含制作涡轮叶片内部冷却通道的结构,且精度要求高,对表面质量的要求也非常高。制作时,当浇注到模具内的液体凝固后,经过加热分解便可去除 SLA 模具,得到氧化铝基陶瓷芯<sup>[7]</sup>。图 4(b)是用 SLA 技术制作

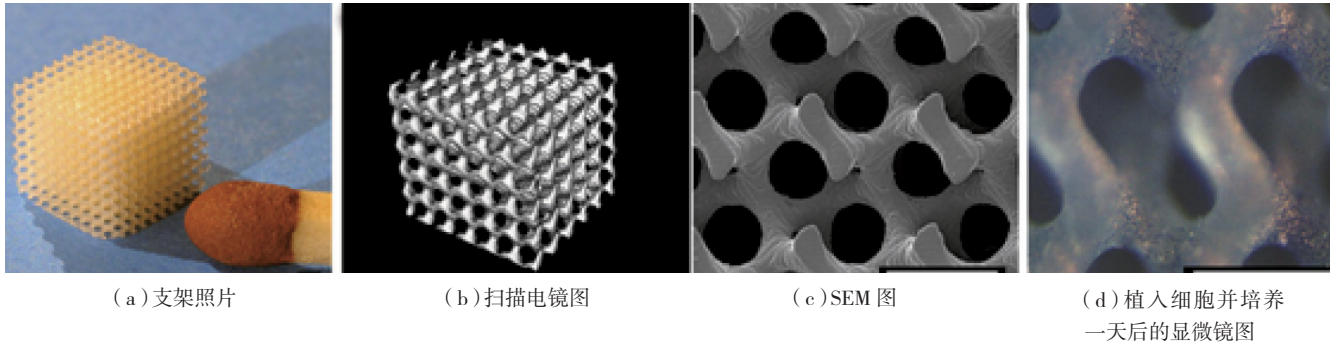


图5 SLA技术制作的聚乳酸支架

度为  $\pm 0.1\text{mm}$ , 能够较好地满足一般的工程需求。但是在微电子和生物工程等领域, 一般要求制件具有微米级或亚微米级的细微结构, 而传统的SLA工艺技术已无法满足这一领域的需求。尤其在近年来, MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 和微电子领域的快速发展, 使得微机械结构的制造成为具有极大研究价值和经济价值的热点。微光固化快速成型  $\mu\text{-SL}$  (Micro Stereolithography) 便是在传统的SLA技术方法基础上, 面向微机械结构制造需求而提出的一种新型的快速成型技术。该技术早在20世纪80年代就已经被提出, 经过将近20多年的努力研究, 已经得到了一定的应用。目前提出并实现的  $\mu\text{-SL}$  技术主要包括基于单光子吸收效应的  $\mu\text{-SL}$  技术和基于双光子吸收效应的  $\mu\text{-SL}$  技术, 可将传统的SLA技术成型精度提高到亚微米级, 开拓了快速成型技术在微机械制造方面的应用。但是, 绝大多数的  $\mu\text{-SL}$  制造技术成本相当高, 因此多数还处于试验室阶段, 离实现大规模工业化生产还有一定的距离。因而今后该领域的研究方向为: 开发低成本生产技术, 降低设备的成本; 开发新型的树脂材料; 进一步提高光成型技术的精度; 建立  $\mu\text{-SL}$  数学模型和物理模型, 为解决工程中的实际问题提供理论依据; 实现  $\mu\text{-SL}$  与其他领域的结合, 例如生物工程领域<sup>[8]</sup>等。

## 2 生物医学领域

光固化快速成型技术为不能制作或难以用传统方法制作的人体器官模型提供了一种新的方法, 基于CT图像的光固化成型技术是应用于假体制作、复杂外科手术的规划、口腔颌面修复的有效方法。目前在生命科学研究的前沿领域出现的一门新的交叉学科——组织工程是光固化成型技术非常有前景的一个应用领域。基于SLA技术可以制作具有生物活性的人工骨支架, 该支架具有很好的机械性能和与细胞的生物相容性, 且有利于成骨细胞的黏附和生长。如图5所示为用SLA技术制作的组织工程支架, 在该支架中植入老鼠的预成骨细胞, 细胞的植入和黏附效果都很好<sup>[9]</sup>。此外, 将光固化快速成型技术和冷冻干燥技术相结合, 能够制造出包含多种复杂微结构的肝组织工程支架, 该支架系统可保证多种肝脏细胞的有序分布, 可为组织工程肝脏支架材料微观结构的模拟提供参考。

## 结束语

光固化快速成型技术发展至今已有了长足的进步, 正继续向着工业化、产业化方向发展, 它与其他先进设计和制造技术的结合越来越来紧密。在光固化快速成型技术未来的发展中, 应对以下3个方面的发展趋势加以注意: 第一, 进一步研制经济的、高效的和精密的光固化成型工艺和设备, 努力提高成型精度和成型尺

寸的稳定性, 降低设备运行成本; 第二, 继续研究成型材料的机理和性能, 进一步开发高性能、低成本的光固化成型特种材料; 第三, 不断拓展新的应用领域。

## 参考文献

- [1] 杨党国, 张征宇, 周志华, 等. 光固化快速成型的轻质 AGARD-B 模型气动特性试验研究. 实验流体力学, 2009, 23(2): 73-77.
- [2] 张宇红, 曾俊华, 洪军. 大型零件光固化快速成型工艺研究. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3): 553-557.
- [3] 崔志忠, 李涤尘, 乔冠军. 基于光固化快速成型技术的碳化硅复合材料构件制备新工艺. 工程塑料应用, 2006(34): 52-57.
- [4] 王广春, 赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 马劲松. SLA技术在制造领域中的应用. 航空制造技术, 2008(7): 46-48.
- [6] 刘伟军. 快速成型技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] Wu Haihua, Li Dichen, Tang Yiping, et al. Rapid fabrication of alumina-based ceramic cores for gas turbine blades by stereolithography and gelcasting. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 5 886-5 891.
- [8] Jae-Won Choi, Ryan Wickera, Seok-Hee Leeb, et al. Fabrication of 3D incompatible/biodegradable micro-scaffolds using dynamic mask projection microstereolithography. Journal of Materials Processing Technology, 2009(209): 5 494-5 503.
- [9] Ferry P W Melchels, Jan Feijen, Dirk W G. A poly(D,L-lactide) resin for the preparation of tissue engineering scaffolds by stereolithography. Biomaterials, 2009(30): 3 801-3 809.

(责编 小颖)