

# 基于激光快速成形技术的微型血泵模型机研制

陈 新<sup>1,2</sup>, 朱小东<sup>2</sup>, 徐 宏<sup>2</sup>, 谭建平<sup>1</sup>

(1.中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2.湖南工业大学 快速成形研究所, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 介绍了激光快速成形技术的基本原理和方法, 通过血泵模型机的设计和制备, 研究了利用该项技术制造复杂的螺旋叶片零件的基本方法和技术, 并对加工零件产生的误差进行了分析, 认为激光快速成形中的分层技术和树脂材料会引起尺寸精度误差, 同时, 分层技术还会引起螺旋叶片表面的形貌误差。

**关键词:** 血泵模型; 激光快速成形; 螺旋叶片加工

中图分类号: R318.08

文献标识码: A

文章编号: 1008-2611(2007)01-0067-04

## Research on Micro-axial Blood Pump Model Based on the Technology of Laser Rapid Prototyping

Chen Xin<sup>1, 2</sup>, Zhu Xiaodong<sup>2</sup>, Xu Hong<sup>2</sup>, Tan Jianping<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanical & Electronical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Rapid Prototyping research institute, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** Laser Rapid Prototyping which is used in tooling the complex parts of blood pump is a good way in designing and developing the micro-axial blood pump model. We present the fundamental and methods of rapid prototyping and study in molding the complex screw blade by designing and manufacturing the blood pump model. By analysis of parts errors caused by tooling, the errors of the dimension precision is caused by the technique of layering and the material of resin of rapid prototyping and the technique of layering causes the appearance errors of screw blades.

**Key words:** blood pump model; laser rapid prototyping; tooling of screw blade

快速成形技术, 也称快速原型制造技术 (Rapid Prototyping), 是国际上 80 年代末出现的一种先进的产品研制和开发技术。它集计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助制造 (CAM)、计算机数字控制 (CNC) 以及精密伺服驱动和新材料等先进技术于一体。根据计算机上构建的产品三维设计模型, 通过对其分层切片, 获得该产品各层截面的轮廓数据; 计算机根据上述轮廓数据控制激光束或其它工具, 对所用材料进行选择加工, 逐层加工并逐层叠加, 最终得到所设计的三维产品模型。与传统的加工方法不同, 快速成形技术将复杂的三维加工分解为相对简单的二维加工, 不需要采用传统的加工设备和加工工具, 极大地节约了加工时间和成本。

近 10 年来, 快速成形技术已从最初单一工艺发展为多种工艺, 工艺过程和加工材料, 均有所发展, 使快速成形技术更加丰富、可选择材料更多、适应性更强<sup>[1,2]</sup>。目前, 国际上广泛流行的快速成形技术主要有如下几种工艺: 立体平版印刷法 (Stereo Lithography Apparatus, 简称 SLA, 也称“液态光敏树脂固化成形法”); 粉末材料选择性烧结法 (Selected Laser Sintering, 简称 SLS); 薄片材料成形法 (Laminated Object Manufacturing, 简称 LOM, 也称叠纸成形法); 熔融堆积成形法 (Fused Deposit Modeling, 简称 FDM); 其它成形方法 (如光掩膜法, 简称 SGO, 也称为激光照射制版法; 粉末材料选择性粘结法, 简称 TDP)。

微型轴流血泵是一种心内植入式血泵, 血泵由支

收稿日期: 2006-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50275151)

作者简介: 陈 新 (1965-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学教授, 博士生, 主要从事机械制造 CAD/CAM 方面的研究。

架、叶轮、导叶轮等部分组成,如图1所示。

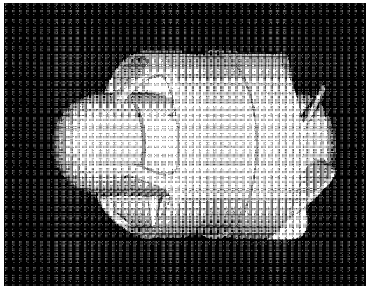


图1 微型血泵机示意图

Fig. 1 The assembled model of blood pump

采用传统加工工艺很难直接对这些零件进行加工处理;采用数控加工技术虽然能够快速准确地加工出这些零件,但加工成本太高,不适合血泵的前期研制。为此,选择激光快速成形工艺,采用较低的成本,制造出血泵模型机。通过对模型机的动力学性能和流场进行实验研究,优化血泵叶轮结构,改进血泵系统性能,对于降低研制成本、快速研制出总体性能好的血泵具有积极的意义。

## 1 激光快速成形系统的基本原理

激光快速成形技术,首先利用CAD造型软件对产品的三维实体模型进行设计,并利用专门的软件对所设计的三维实体模型进行表面三角化处理,生成实体的STL模型,然后对所设计的STL模型进行分层处理,获得在垂直方向不同高度截面上的几何平面图形,最后在快速成型机上控制激光点,按照各层平面图形对工作平台上的材料切割或者加工,最终层层叠加形成一个三维实体。

本项目采用的是华中科技大学研制的HRP-III薄片材料法快速成形系统,所用材料以纸张为主。LOM法按工艺分为:数据准备、快速成形、零件剥离和后加工处理几个流程。

LOM法的工艺过程是:在工作台上平铺一层纸,计算机依据模型的截面轮廓数据,控制CO<sub>2</sub>激光束对材料进行边线切割;一层切割完毕后,工作台下落一层纸的高度,再铺上另一层纸;纸张背面涂覆有一薄层热熔胶,经热压辊滚压,将纸张相互粘结在一起,纸张逐层加工,逐层粘贴,最终得到所设计的模型。

LOM法与SLA法或SLS法有所不同。SLA或SLS法扫描的是截面轮廓内的面积,而LOM法加工的是截面轮廓的边线;SLA或SLS法是对材料进行扫描使其固化、相互粘结,而LOM法是对材料进行切割、使之分离;LOM法所用材料为纸张,该工艺成形时间短,翘曲变形小,激光器使用寿命长,成本相对较低。但是成形样件必须经过后续处理,样件本身不能有复杂的内腔。

## 2 微型血泵模型机的激光快速成形

血泵模型机的研制采用HRP-III型激光快速成形设备,该设备基于叠层实体制造技术(LOM),所生成的原型精度可达 $\pm 0.1$  mm且不收缩,叠层厚度可减小为0.05~0.5 mm。由于无固化过程,因此成型速度快,生成的原型最大尺寸可达到500 mm × 400 mm × 600 mm。

本项目零件采用Pro-E2001软件建模,将血泵零件的三维CAD模型(如图2)转化生成STL数据格式提供给HRP-III激光快速成形系统,根据模型的最大截面尺寸选取相应规格的纸材。

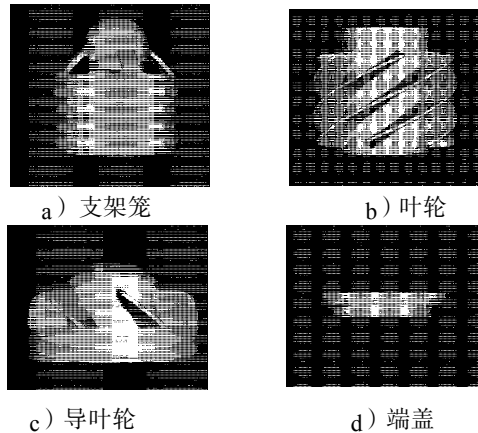


图2 Pro-E2001软件设计的微型血泵零件

Fig. 2 The parts of the blood pump designed

设备主要参数设置如下:激光切割速度:500 mm/s;热压辊送进速度:100 mm/s;切碎网格尺寸:20 mm;叠层热压温度:240 °C;STL文件精度:0.1 mm;工作台升降速度:180 mm/s。

叠层结束后,进行余料去除,以及防水、防潮、加固和使其表面光滑等后置处理,以满足快速原型表面质量、尺寸稳定性、精度和强度等方面的要求。

纸质原型加工好后,在真空铸型机中用硅橡胶翻制凹模,然后经硅胶模翻制出树脂零件,见图3。

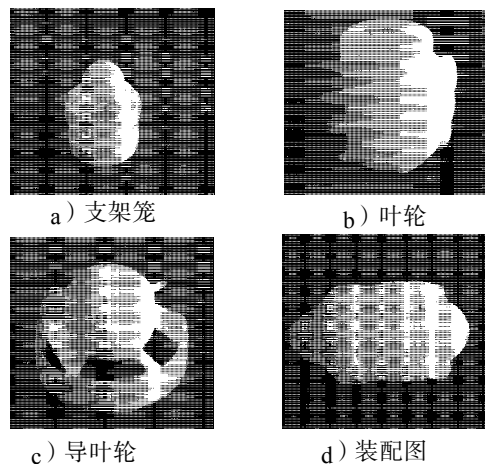


图3 利用硅胶模加工的树脂材料零件

Fig. 3 The resin parts of the blood pump molded by Rapid Prototyping

### 3 微型血泵模型机的成形质量分析

血泵模型机在利用快速成形法制造时产生的质量问题主要有分型产生的误差和树脂材料冷却收缩时的误差, 其中, 分型产生的误差又包括精度误差和表面形貌误差。血泵零件之间需要装配和相对运动, 因此, 模型机的制造精度直接影响制造的质量。

#### 3.1 微型血泵零件分层方向对精度的影响

##### 3.1.1 分层制造的原理误差

由于激光成形是用积分累加的原理生成的, 其在加工过程中必然会产生所谓的“阶梯效应”现象(如图4所示), 但这个“阶梯效应”是由快速成形制造的原理所决定的, 因而所产生的误差称为“原理误差”, 该误差的存在使得零件的精度, 尤其是垂直于叠层方向的曲面精度明显的降低。使用LOM法时, 该精度决定于纸的厚度, SL加工中 $z$ 向的进给一般可以采用0.05~0.3 mm/次, 进给太大, 原理误差过大, 进给过小, 零件的生产效率又太低。因此, 分层制件的精度和效率是影响激光快速成形大面积推广应用的主要原因<sup>[3]</sup>。

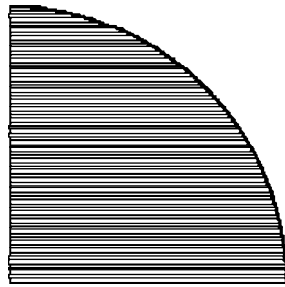


图4 分层误差示意图  
Fig. 4 Layering sketch map

为分析第一分层板的原理误差, 将其中一层分层板取出放大, 如图5所示。该曲面的造型过程是从下往上进行, 所分析的分层板在高度上位于 $z$ 位置处, 分层厚度为 $d$ , 沿 $z$ 位置处的水平面与造型曲面的交线将此分层板切割出来, 即得图示情况。从图可知, 曲边三角形 $ABD$ 的面积 $S_1$ 为残留光整加工面积, 绕 $z$ 轴转一圈为残留光整加工量 $V_1$ , 而曲边三角形在半径方向的高 $AC$ 为原理加工误差 $\Delta_1$ , 其计算式分别见式(1)、(2)、(3)。

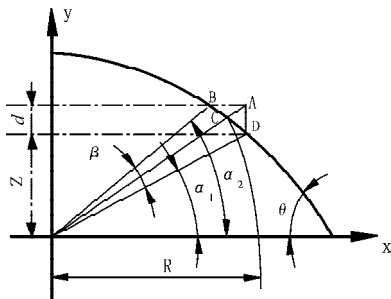


图5 原理误差分析  
Fig. 5 The analysis of the fundamental errors

图4为半圆球曲面基于SL方法的分层重叠堆积成形原理图。从此图可知, 每一层分层板与造型曲面之

间存在一个台阶, 要获得正确的曲面形状, 必须通过后处理将此台阶去除, 将其称为残留光整加工量。第一层分层板的台阶与造型曲面的最大距离即为此层分层板的原理加工误差。图6为优选分层方向处理法, 对于具有螺旋叶面的血泵叶轮来说, 这些方法不能从原理误差产生的本质上采取补救。

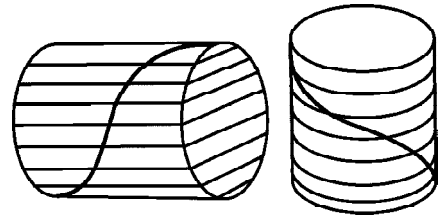


图6 分层方式造成的误差

Fig. 6 The errors caused by the way of layering sketch

##### 3.1.2 分层制造原理误差的计算

1) 形状误差的原理计算

$$\Delta_1 = \sqrt{d^2 + R^2 + 2zd} - R, \quad (1)$$

$$S_1 = \frac{1}{2} [R_1(\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) - R^2(\beta - \sin \beta)], \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{\pi}{6} d [3(R \cos \alpha_1)^2 - 3(R \cos \alpha_2)^2 - d^2], \quad (3)$$

式中:

$$\alpha_1 = \sin^{-1}(z/R); \quad \alpha_2 = \sin^{-1}[(z+d)/R]; \quad \beta = \alpha_2 - \alpha_1;$$

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$ 均为弧度。

分别取 $d = 0.05 \text{ mm}$ 、 $0.1 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm}$ , 计算其原理误差。根据计算结果可得图7所示的、采用不同 $z$ 向进给所得的原理误差对比曲线。由此可见, 采用减小分层厚度是减小原理误差的一个重要因素。

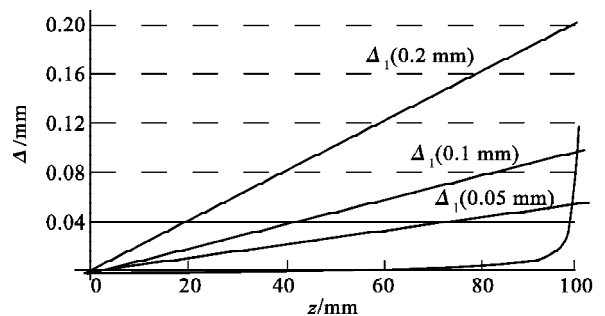


图7 Z向进给值产生的误差对比

Fig. 7 The errors caused by the thickness of the layer

2) 产生叶轮曲面粗糙度误差

薄层材料厚度一般为0.05 mm~0.3 mm, 这些薄层材料的叠加, 会产生阶梯现象。较小的厚度影响了制件生产效率, 但若为提高效率而加厚层片, 则又会加大阶梯效应, 还可能遗失两相邻切片层之间的小特征结构(如窄槽、小凸缘等), 从而造成误差<sup>[4]</sup>, 如图8、9所示。

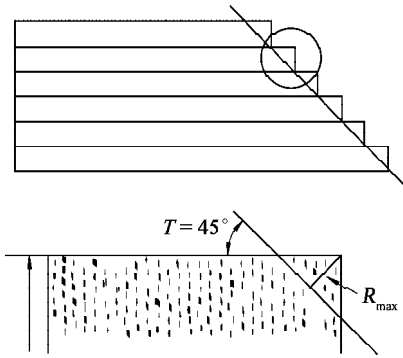


图8 分层产生的表面形貌误差示意图

Fig. 8 The appearance fundamental errors by layering

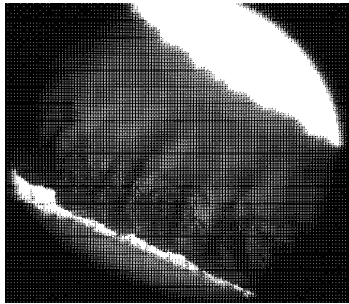


图9 分层产生的叶轮表面形貌误差

Fig. 9 The appearance errors of the impeller by layering

以斜度为  $45^\circ$  的表面为例, 当采用层厚为  $d$  的材料时, 其最大粗糙度为:  $R_{\max} = \frac{d}{2\sqrt{2}}$ ,

平均粗糙度为:  $R_{\text{avg}} = \frac{d}{4\sqrt{2}}$ 。

当表面斜度为  $T$  时, 最大粗糙度为:  $R_{\max} = \frac{d}{2\cos T}$ ,

平均粗糙度为:  $R_{\text{avg}} = \frac{d}{4\cos T}$ 。

薄片材料成形法由于分层对不同斜度表面产生的粗糙度误差见表1。

表1 分层对不同斜度表面产生的最大粗糙度和平均粗糙度  
Table 1 The roughness of the difference pitch surface by layering

| 斜度 $/^\circ$ | 最大粗糙度 $R_{\max} / \text{mm}$ | 平均粗糙度 $R_{\text{avg}} / \text{mm}$ |
|--------------|------------------------------|------------------------------------|
| 0            | 0.052                        | 0.027                              |
| 20           | 0.051                        | 0.026                              |
| 40           | 0.041                        | 0.021                              |
| 60           | 0.028                        | 0.014                              |
| 80           | 0.010                        | 0.005                              |

### 3.2 微型血泵零件材料对精度的影响

血泵模型机制造材料为树脂, 树脂在固化过程中会发生收缩, 通常其体收缩率约为 10%, 线收缩率约为 3%, 因此, 固化过程中的收缩是必然的。常用树脂的热膨胀系数为  $10^{-4}$  左右, 同时, 温度升高的区域面积很小, 因此, 温度变化引起的收缩量极小, 可以忽略不

计<sup>[5]</sup>。而光固化树脂在光固化过程所产生的体积收缩对零件精度(包括形状精度和尺寸精度)的影响是不可忽视的。从高分子物理学方面来解释, 产生这种体积收缩的一个重要原因是处于液体状态的小分子之间为范德华作用力距离, 而固态的聚合物, 其结构单元之间处于共价键距离, 共价键距离远小于范德华力的距离, 所以液态预聚物固化变成固态聚合物时, 必然会导致零件的体积收缩<sup>[6]</sup>。由上所述, 无论从高分子物理角度还是从高分子化学角度分析, 树脂收缩都是由于聚合反应时分子结构的变化而引起, 是一个内部过程。

## 4 结论

从以上分析可以知道, 由于血泵零件采用快速成型法, 可以方便、快捷地得到复杂和难于加工的零件, 使设计周期大大缩短。但是, 由于快速成型工艺本身的缺陷, 使加工零件存在一定的加工误差, 需要在设计中弥补:

1) 快速成型加工方法是制造血泵模型复杂零件的较好方法, 能够方便加工出血泵叶片和导叶轮等复杂零件, 这些零件可用于血液流场的实验研究;

2) 快速成型加工中对零件的分层处理会产生零件的尺寸精度误差, 分层的方法不同, 产生的尺寸误差的方向也不同, 对于螺旋叶片来说, 平行与垂直于轴线的两种分层方法产生的误差对叶片来说一致;

3) 对零件的分层还会造成零件表面形貌误差, 这点对于螺旋叶片的表面来说, 非常明显;

4) 零件模型的树脂材料收缩也会造成零件的尺寸误差, 这主要是由于树脂在液态凝固成固体状态时引起的。在设计图形时, 应考虑这种尺寸变化, 予以预留缩水。

### 参考文献:

- [1] 陈 鸿, 程 军. 激光快速成型系统中自适应分层算法及实现[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 329-334.
- [2] 郭九生, 李彦生, 卢秉恒. 基于激光快速成型技术的快速模具 CAD[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(1): 158-159.
- [3] 李吉彪, 张亚梅, 赵敬云, 等. 减少激光快速成型原理误差的途径[J]. 河南职业技术师范学院学报, 2002, 30(4): 61-63.
- [4] 胡成武, 徐 弘, 朱小东. LOM型快速成形件精度的影响因素与改进措施[J]. 锻压装备与制造技术, 2003(6): 83-85.
- [5] 管延锦, 赵国群, 李辉平, 等. 基于反求工程和激光快速成型技术的新型车轮开发[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(4): 75-77.
- [6] 胡成武, 徐 弘, 朱小东. EVA 热熔胶厚度对 LOM 型快速成形件精度的影响和改进措施[J]. 制造业自动化, 2004, 26(9): 72-75.