

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.005

光固化3D打印关键技术研究*

邵中魁¹, 姜耀林^{2*}

(1. 浙江省机电产品质量检测所, 浙江 杭州 311305;

2. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311305)

摘要: 针对单件批量复杂形状产品的快速制造问题,以具有典型复杂形状的离心泵叶轮为研究对象,开展了基于光固化快速成型技术的3D打印关键技术研究,研究内容主要包括:模型CAD优化设计技术、前处理技术、成形工艺参数设计、光固化原型后处理技术。该研究结果可为后续开展3D打印应用技术研究提供坚实的理论基础。

关键词: 3D打印; 光固化; 优化设计; 后处理; 叶轮

中图分类号: TH311; TP23 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-180-05

Key technologies of SLA 3D printing

SHAO Zhong-kui¹, JIANG Yao-lin²

(1. Zhejiang Testing & Inspection Institute for Mechanical and Electrical Products Quality, Hangzhou 311305, China; 2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311305, China)

Abstract: Aiming at rapid manufacturing of complex shape of the product for single and small batch, the key technologies of 3D printing based on stereo lithography appearance (SLA) were studied, with the centrifugal pump impeller which has typical complex shapes as a research object. The main research contents of this include the CAD optimization design, the pre-processing technology, the processing parameters design and the post-processing technology. The results have laid a solid theoretical foundation for further application technology research of 3D printing.

Key words: 3D printing; stereo lithography appearance (SLA); optimization design; post-processing; impeller

0 引言

3D打印技术是制造业领域正在迅速发展的一项新技术,被称为“具有工业革命意义的制造技术”^[1]。3D打印与传统的通过铸造、锻压、切削、打磨等工艺实现产品成型的过程具有本质区别,仅利用三维设计数据在一台设备上即可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,且无需模具,产生极少的废料,有效缩短加工周期,易于实现单件小批量复杂形状产品的快速制造,在非批量化生产中具有明显的成本和效率优势^[2]。

依据打印方式与打印材料的不同,3D打印技术可分为不同的种类。目前较主流的3D打印技术有熔融

沉积快速成型(fused depositim modeling, FDM)、光固化快速成型(stereo lithography appearance, SLA)、选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)、切纸叠层(laminated object manufacturing, LOM)等等^[3]。

目前,3D打印技术已在许多领域得到广泛应用,从产品设计到模具设计与制造,材料工程、医学研究、文化艺术、建筑工程等等都逐渐地使用3D打印技术,使得3D打印技术有着广阔的发展前景^[4]。

本研究以离心泵叶轮的3D打印成形过程为主线,并对光固化3D打印成形过程中所涉及的关键技术依次展开深入研究,为今后开展以3D打印为基础的应用技术研究工作奠定基础。

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 国家重大科技专项重大工业资助项目(2013C01127-5)

作者简介: 邵中魁(1988-),男,浙江浦江人,主要从事光固化3D打印应用技术方面的研究。E-mail: zkshao1988@163.com

通信联系人: 姜耀林,男,高级工程师。E-mail: jy15133@163.com

1 光固化快速成型原理

光固化快速成型技术是目前加工精度最高的一种3D打印技术,它的成型原理为:以液态光敏树脂为加工材料,计算机控制紫外激光束按加工零件的分层截面信息逐层对光敏树脂进行扫描,使其产生光聚合反应,每次固化形成零件的一个薄层截面;每一层固化完毕之后,工作平台移动一个层厚的高度,然后在原先固化好的树脂表面再涂敷一层新的液态树脂,以便进行下一层扫描固化;新固化的一层牢固的粘合在前一层上,如此重复直至零件原型制造完毕^[5]。

具体的光固化3D打印成形过程如图1所示。

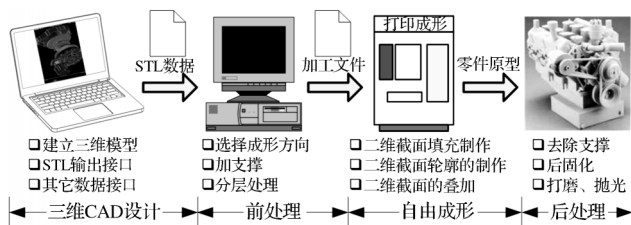


图1 光固化3D打印成形过程

2 模型CAD优化设计技术

模型CAD优化设计技术主要包括模型缩放以及抽壳设计。模型缩放主要是指在快速铸造等应用场合时,因为金属铸造零件不可避免地存在收缩现象,需对零件模型进行预缩放处理。其中,缩放比率与材料种类及具体的铸造工艺有关,需要通过实验获得铸件的综合收缩率,据此确定零件模型的缩放量,本研究对此不具体展开叙述。

抽壳设计是指为了节约3D打印材料、提高零件制作速度,对零件三维模型进行轻量化优化设计,形成一定壁厚的中空结构,且在保证强度的条件下应尽可能减小壁厚。特别是在快速精密铸造应用场合,树脂原型作为熔模在沾浆、撒砂制壳后需要通过焙烧来气化烧蚀掉树脂原型,此时树脂原型受热膨胀有可能胀裂型壳。因此,在保证基本强度的条件下,模型抽壳壁厚应尽可能小,以尽量减少树脂原型受热膨胀对型壳造成的张力和冲击力。

本研究的离心泵叶轮模型如图(2~3)所示。该离心泵叶轮主要由叶片、后盖板、浇冒口等3部分结构组成,且其最大外形尺寸为 $\Phi 146.26\text{ mm} \times 40.28\text{ mm}$ 。该离心泵叶轮结构形状复杂,尤其是离心泵叶片在径向与轴向双重扭曲,采用传统方法制造叶轮模型将会存在很大的困难,模具结构复杂,难以脱模,且难以保证

制造精度。

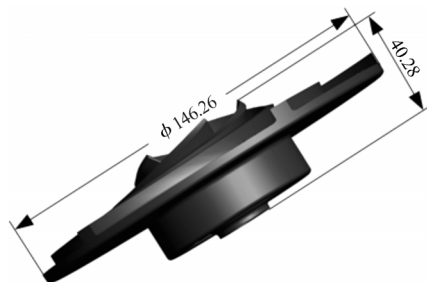


图2 离心泵叶轮三维模型

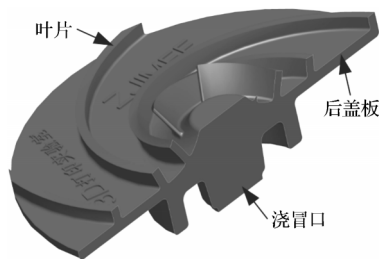


图3 叶轮模型剖视图

本研究通过控制变量法研究不同抽壳壁厚对叶轮成形性能的影响。在叶轮模型相同的条件下,分别按照如表1所示的8组不同抽壳壁厚设定值依次对叶轮模型进行优化设计,然后在相同的工艺参数条件下依次打印成形,最终获得8个壁厚由大到小排列的叶轮树脂模型。

表1 抽壳壁厚设定值

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
壁厚/mm	2.0	1.5	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6

根据打印结果,第1~6个叶轮模型满足基本强度要求,且尺寸稳定性好;第7、第8个叶轮树脂模型则出现不同程度的局部破裂、翘曲变形等现象。由该实验结果可得,壁厚大于等于0.8 mm的叶轮树脂模型强度足够,且尺寸稳定性好,无翘曲变形现象发生。

为了在满足模型基本强度要求的条件下尽可能节约树脂材料,笔者最终确定叶轮模型最佳抽壳壁厚为0.8 mm。本研究基于ProE软件对该叶轮模型进行抽壳优化设计,抽壳后的叶轮模型如图4所示。经测量知,抽壳优化设计后叶轮模型质量减少了67.7%。

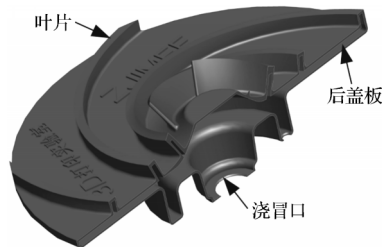


图4 抽壳后叶轮模型剖视图

3 数据模型前处理技术

数据模型前处理技术主要包括选择成形方向以及支撑设计。选择成形方向是指将模型合理地布置在3D打印机工作平台上,即模型造型方向定位。由于3D打印分层制造的特性,其表面的层叠现象引起的台阶效应如图5所示^[6-7]。

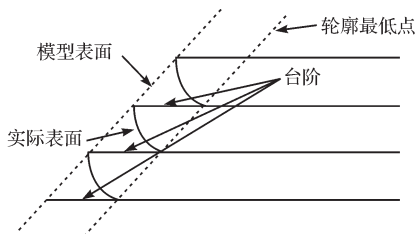


图5 模型表面台阶效应

为研究成形方向对台阶效应的影响,本研究分别将相同的叶轮模型选择多个不同的造型方向并进行打印成形,然后通过测量表面粗糙度的方法比较各个模型表面台阶效应,表面粗糙度值越大,则台阶效应越严重。最终比较结果显示:对于同一个模型表面,粗糙度值会随着零件制作角度的不同而不同,水平布置时模型表面粗糙度值最小,与水平方向夹角越大则模型表面粗糙度越大。由该实验结果可知,在选择零件成形方向时,应尽可能多地把重要的模型表面布置在水平方向,以有效降低台阶效应对零件模型表面质量的影响。

光固化模型制作时需要在工作平台与模型表面之间或者模型不同表面之间制作辅助支撑。合理的支撑设计对模型的成形质量至关重要。支撑设计主要包括选择支撑区域、选择支撑类型以及支撑形状结构设计等等。支撑太少或者支撑间距太大容易导致模型制作缺陷,支撑过多又容易造成材料浪费。对于抽壳后的中空模型,合理的支撑结构可以极大地提高模型的强度。

本研究通过实验研究证明,通过设计合理的内部支撑结构可以将零件的壁厚减小到0.8 mm以内,这样可以在保证强度的条件下尽可能节约材料,且在铸造应用场合还能最大限度地减少胀壳。另外,生成支撑的模型表面去除支撑后的表面粗糙度较大,需要通过适当的打磨后处理来提高表面质量,在设计支撑时研究者应尽可能把支撑区域选择在对表面粗糙度要求不高的表面或者易于打磨处理的表面。

本研究将前述设计好的叶轮模型导入RPData软件进行前处理,确定好造型方向及方位布置,叶轮造型方向定位如图6所示。后盖板底面平行于打印机工作平台。

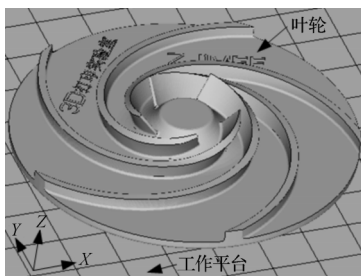


图6 叶轮造型方向定位

本研究为叶轮模型设计辅助支撑,支撑设计完成后的数据模型如图7所示。它主要包括底部支撑和内部支撑。其中,内部支撑具有加强模型的作用,不需要去除,底部支撑因裸露在模型下部,易于去除并打磨处理。

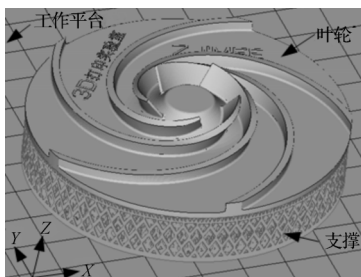


图7 带支撑叶轮模型

4 成形工艺参数设计

成形工艺参数设计主要包括激光束填充扫描速度设定以及光斑补偿直径设定。其中,激光束填充扫描速度越小,则成形截面上每一点处激光照射时间越长,固化效果越好,零件固化硬度越高,但零件成形效率降低。具体的激光束填充扫描速度需根据零件制作效果并兼顾零件制作时间设定,如果已制作的零件较软,则需要适当降低扫描速度以提高零件固化硬度。

在光固化成型中,圆形光斑具有一定直径,固化的线宽大小等于在该扫描速度下实际光斑直径大小。如果不采用补偿,所制作的零件实体部分实际上每侧大了一个光斑半径,零件的长度尺寸大了一个光斑直径,使零件出现正偏差,补偿前的扫描路径如图8所示。

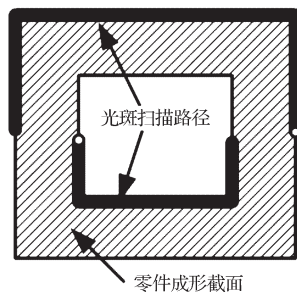


图8 补偿前的扫描路径

设定光斑补偿直径就是为了减小或消除这个正

偏差,使光斑扫描路径向实体内部缩进一个光斑半径,补偿后的扫描路径如图9所示。具体的光斑补偿直径需要根据零件制作误差大小情况来设定。

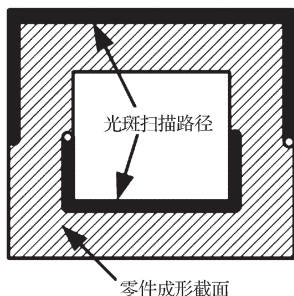


图9 补偿后的扫描路径

本研究通过多次反复实验研究发现,填充扫描速度选择在4 000 mm/s~6 000 mm/s范围内时可以较好地兼顾固化效果及制作速度;光斑补偿直径设置为0.14 mm时零件制作精度可以高达0.08 mm。需要说明的是,上述数据是针对现有的3D打印机得出的,而每台同类型设备的激光功率或者光斑直径都会略有差异,因此具体工艺参数需要针对每台设备进行反复实验校正。

本研究将前述设计好支撑的叶轮模型分层处理,分层厚度设置为0.1 mm,然后将该模型导入3D打印机,设置激光束扫描速度为5 500 mm/s,光斑补偿直径为0.14 mm,打印完成后即得到叶轮树脂模型。

叶轮模型打印成形过程如图10所示。



图10 打印成形过程

3D打印成形得到的带支撑的叶轮树脂模型如图11所示。

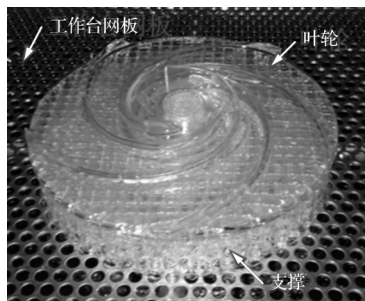


图11 带支撑的叶轮模型

5 光固化原型后处理技术

光固化原型后处理技术主要包括清洗、去除支撑、后固化以及表面打磨等等,通过合理的后处理工艺可以有效提高原型件的尺寸精度、强度、硬度、表面质量等性能。其中,清洗是指用酒精溶液清洗掉残留在树脂原型上的液态树脂;去除支撑是指去掉因加工工艺需要而生成的辅助支撑,内部支撑可以不去除;后固化是指将树脂原型放到后固化箱中进行紫外光照射,以便进一步提高原型强度;表面打磨是指用水砂纸打磨原型件表面以提高表面粗糙度和尺寸精度,特别是附着有支撑的部位以及台阶效应明显的部位。

本研究通过多次不同的后处理实验证明,各个后处理工艺的时间、顺序不同,最后的后处理效果也随之不同,同时根据实验结果,综合考虑模型强度、尺寸精度以及表面粗糙度,提出该离心泵叶轮的最佳后处理工序为:清洗→去除支撑→水砂纸打磨→后固化约15 min。笔者照该最佳后处理工序将前述制作好的叶轮模型进行后处理。后处理完成后的叶轮树脂模型如图12所示。



图12 经后处理的叶轮

本研究分别检验叶轮树脂模型在后处理前及后处理后的尺寸精度及表面粗糙度,选择叶轮树脂模型4个具有代表性且便于测量的尺寸进行测量,尺寸测量示意图如图13所示。

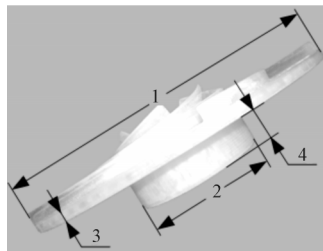


图13 尺寸测量示意图

打磨前叶轮树脂模型的尺寸测量结果如表2所示。

打磨后叶轮树脂模型的尺寸测量结果如表3所示。

由表2、表3可知,打磨前叶轮树脂模型的尺寸精度较低,尺寸绝对误差最大达0.20 mm,尺寸精度等级

表2 打磨前叶轮尺寸测量结果

序号	理论值/mm	实测值/mm	绝对误差/mm	尺寸精度等级
1	$\Phi 146.26$	$\Phi 146.23$	-0.03	IT7
2	$\Phi 62.32$	$\Phi 62.26$	-0.06	IT9
3	4.12	4.20	+0.08	IT12
4	16.48	16.68	+0.20	IT13

表3 打磨后叶轮尺寸测量结果

序号	理论值/mm	实测值/mm	绝对误差/mm	尺寸精度等级
1	$\Phi 146.26$	$\Phi 146.20$	-0.06	IT8
2	$\Phi 62.32$	$\Phi 62.24$	-0.08	IT10
3	4.12	4.15	+0.03	IT9
4	16.48	16.52	+0.04	IT9

表4 打磨前叶轮表面粗糙度测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
实测值/ μm	3.56	5.42	3.66	2.84	2.84	4.22	1.98	2.48	3.48	3.38	5.56	4.08	7.48	6.38	6.94	4.36	5.90	5.46	6.38	7.24

表5 打磨后叶轮表面粗糙度测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
实测值/ μm	1.22	1.46	2.46	2.48	3.22	1.60	1.42	1.98	1.06	1.38	1.56	1.58	5.10	1.40	3.46	2.60	1.74	4.40	4.58	2.56

由表4、表5可知,打磨前叶轮树脂模型无支撑表面的粗糙度范围为 $1.98\ \mu\text{m}\sim 5.4\ \mu\text{m}$,带支撑表面的粗糙度范围为 $4.08\ \mu\text{m}\sim 7.48\ \mu\text{m}$;打磨后叶轮树脂模型无支撑表面的粗糙度范围为 $1.06\ \mu\text{m}\sim 3.22\ \mu\text{m}$,带支撑表面的粗糙度范围为 $1.40\ \mu\text{m}\sim 5.10\ \mu\text{m}$ 。由此可得,打磨后模型表面粗糙度明显比打磨前小,且无支撑表面的粗糙度明显比带支撑表面的小。

6 结束语

(1) 模型优化设计中,缩放比率需要通过具体的实验确定,抽壳设计时应在保证基本强度的条件下尽量减小模型壁厚,以节约树脂材料,减少胀壳。本研究的离心泵叶轮的最佳抽壳壁厚为 $0.8\ \text{mm}$ 。

(2) 模型前处理中,研究者在选择成形方向时应尽可能多地把重要的模型表面布置在水平方向以避免台阶效应,设计支撑时应选择合理的支撑区域以尽量降低对模型表面粗糙度的影响,且合理的内部支撑结构可以极大地提高模型强度。

(3) 工艺参数设计中,激光束扫描速度需要根据零件固化效果并兼顾零件制作时间设定,光斑补偿直

范围为IT7~IT13,尺寸精度稳定性较差,主要原因是去除支撑后仍有少量支撑残留导致模型表面凹凸不平,降低了尺寸精度及尺寸稳定性;而打磨后叶轮树脂模型的尺寸精度明显提高,尺寸绝对误差在 $0.08\ \text{mm}$ 以内,尺寸精度等级范围为IT8~IT10,尺寸精度稳定性较好。

本研究在叶轮树脂模型表面分别随机选择均匀布置的20个点进行表面粗糙度测量。其中,序号1~10这10个点测量的是叶轮模型无支撑表面,序号11~20这10个点测量的是叶轮模型带支撑的表面。打磨前叶轮树脂模型的表面粗糙度测量结果如表4所示。打磨后叶轮树脂模型的表面粗糙度测量结果如表5所示。

径需要根据零件制作误差大小情况来设定。

(4) 本研究通过实验提出的离心泵叶轮的最佳后处理工序为:清洗→去除支撑→水砂纸打磨→后固化约 $15\ \text{min}$,且后处理后模型尺寸精度可达IT8~IT10,表面粗糙度可达 $1.06\ \mu\text{m}\sim 3.22\ \mu\text{m}$ (无支撑表面)或 $1.40\ \mu\text{m}\sim 5.10\ \mu\text{m}$ (带支撑表面)。

参考文献(References):

- [1] 祁 鸣,张天龙. 3D打印:社会化制造的新时代[J]. 中国科技成果,2013(11):10-12.
- [2] 王忠宏,李扬帆,张曼茵. 中国3D打印产业的现状及发展思路[J]. 经济纵横,2013(1):90-93.
- [3] 席 骏. 3D打印技术及产品简介[J]. 数码印刷,2014(2):27-29.
- [4] 孙晓林. 3D打印技术的应用[J]. 机电产品开发与创新,2013,26(4):107-109.
- [5] 张宇红,曾俊华,洪 军. 大型零件光固化快速成型工艺研究[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(3):553-557.
- [6] 洪 军,武殿梁,李涤尘,等. 光固化快速成型中零件制作方向的多目标优化问题研究[J]. 西安交通大学学报,2001,35(5):506-509.
- [7] 黄晔矿. 光固化快速成型叠层方向精度研究[D]. 西安:西安科技大学机械工程学院,2010.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

邵中魁,姜耀林. 光固化3D打印关键技术研究[J]. 机电工程,2015,32(2):180-184.

SHAO Zhong-kui, JIANG Yao-lin. Key technologies of SLA 3D printing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 180-184.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>