

基于 ABS 熔融堆积成型中孔轴类零件收缩及变形实验研究^{*}

许耀东^{*,1,2} 郑卫^{1,2}

(1. 上海工程技术大学, 上海 200437; 2. 上海市高级技工学校, 上海 200437)

摘要:快速成型能将 CAD 模型转化为实物模型,但材料的收缩变形可能导致成型件尺寸出现较大的偏差。为保证快速原型件能合理装配,以孔轴类零件配合为研究对象,利用熔融堆积成型原理对 ABS 材料进行成型实验,运用回归分析法研究发现,孔轴原型件收缩与尺寸存在着线性关系。对原型件变形机理进行实验分析可知,当材料填充率在 10%~40% 之间时,轴的圆度误差较小。利用这些成型规律及特性对模型进行处理,可保证装配的合理性和打印零件的质量。

关键词:熔融堆积成型;ABS;收缩;圆度误差;材料填充率

中图分类号:TB476 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2015.05.002

Experimental Study of Hole and Axis Shrinkage and Deformation on ABS Fused Deposition Modeling^{*}

XU Yaodong^{*,1,2} ZHENG Wei^{1,2}

(1. Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200437;
2. Shanghai Industrial Masters College, Shanghai 200437)

Abstract: Rapid prototyping can cause large deviation of the molding size in CAD model transformation for physical model. In order to ensure the reasonable assembly of the rapid prototyping part, the forming experiment of ABS material was carried out by the principle of FDM on the object of hole and axis. Through regression analysis, a linear relationship with the molding shrinkage and model size of hole and axis was found. Meanwhile, deforming mechanism was analyzed with the prototyping parts, also the experiment of axis roundness error was done to verify its small value within 10% and 40% of material filling rate. By these law and characters the model can be pre-processed to ensure the rationality of assembly and quality of print parts.

Key words: FDM; ABS; shrinkage; roundness error; material filling rate

1 引言

快速成型技术使概念设计转化为实物模型成为现实,用快速成型技术打印模型代替实际加工的零件进行装配、结构工艺分析、功能测试、运动仿真可以提高设计的可靠性和质量,缩短设计开发周期,使产品能更快地投入市场^[1]。

目前国内外快速成型技术研究主要针对成型质量、成型新材料、成型工艺等进行。为获得理想的成型质量,需通过模拟仿真和实验验证获得比较成熟稳定的成型工艺;而新材料研制侧重于低收缩率、兼具一定的强度韧性、低成本的材料的研究;在成型工

艺参数优化方面,成型温度、分层厚度、打印速度等因素对原型件尺寸误差、形状误差的影响可通过大量实验进行定性描述^[2]。然而上述研究往往是对单个原型件的成型质量研究,若要成型后进行装配,不仅要考虑成型件质量,还要掌握成型件在收缩的情况下的尺寸变化规律,以确保其尺寸能满足装配要求。由于快速成型是基于 CAD 模型进行制作的,而 CAD 模型的尺寸和公差皆是按机械设计的尺寸和公差而定,若直接按原始 CAD 模型打印成型,由于成型材料的收缩性,快速成型后原型件的尺寸和公差必然与原始 CAD 零件不一致,导致所打印的零件不能装配,或装配后不能拆卸。因此,必须对原始零件尺寸进行合理更改,或对原始零件尺寸进行适当缩放。

本文以熔融堆积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)为例,选择常见的孔轴类零件配合为研究

2015-06-25 收稿,2015-08-04 接受

^{*} 上海市教委重点项目(BJYXX13YYYJ00),上海高校实验技术队伍建设计划(A1-5300-14-020309)资助

^{**} 通讯作者,E-mail:sodarbisuit@163.com;Tel:13817843736

对象,通过成型收缩及变形实验,结合回归分析法及数据分析,研究 3D 打印原型件孔轴的收缩变形与模型尺寸、材料填充率等参数之间的规律和经验算法,以便为成型件的装配提供理论依据和参考,保证快速成型件能够合理装配,并为装配后整体样机的工艺分析和性能测试打下基础。

2 成型收缩实验

实验选用 ABS B601 材料作为成型丝材进行熔融堆积打印,3D 打印机型号为 GIA,打印机处理软件为 Aurora。打印采用的工艺参数为双喷头打印,打印温度 230℃,分层厚度 0.2 mm,打印外壳层数 3 层,轮廓线宽 0.5 mm,填充线宽 0.5 mm,填充间隔为 2.5 mm。

选取外径为 Φ12 mm 的轴和孔为 Φ12 mm 的手柄配合,Φ12 mm 的轴按照 0.736 比例缩放。为保证手柄与轴能够相配合,对 Φ12 mm 的手柄按照不同的比例缩放进行实验,实验数据如表 1 所示。

表 2 相关性计算数据

测量号 i	缩放比例 x_i	收缩比例 $y_i/\%$	x_i^2	$x_i \cdot y_i$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$
1	0.69	1.4	0.4761	0.966	-0.0433	-0.2333	0.0101
2	0.73	1.6	0.5329	1.168	-0.0033	-0.0333	0.0001
3	0.78	1.9	0.6084	1.482	0.0467	0.2667	0.0124
平均值	$\bar{x}=0.7333$	$\bar{y}=1.6333$					
求和 Σ			1.6174	3.616			0.0226

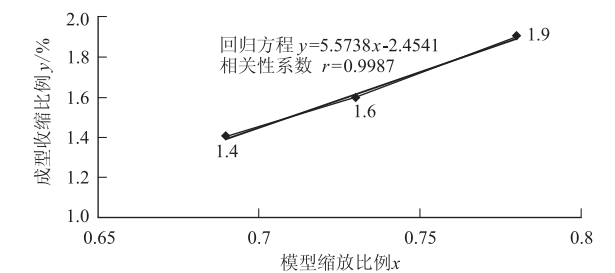


图 1 成型收缩和模型缩放的拟合曲线图

根据线性回归方程 $y = 5.5738x - 2.4541$,推算模型缩放比例 $x = 0.742$ 时,成型收缩的比例 $y \approx 1.7\%$ 。而实际按 0.742 比例缩放的模型进行打印成型后的实际收缩率也为 1.7%,见表 1 所示,验证了成型收缩比例和模型缩放比例之间线性关系的正确性。

2.2 经验公式

经过分析,材料收缩除了与 ABS 本身的收缩率有关外,还与模型材料的填充率有关^[4]。打印时按打印层厚、外壳层数和网格的间隙来确定材料填充率,但当打印层厚、外壳层数和网格的间隙不变时,

表 1 成型收缩实验数据

	轴		孔		
缩放比例	0.736	0.78	0.742	0.73	0.69
理论尺寸/mm	8.832	9.36	8.904	8.76	8.28
实际尺寸/mm	8.76	9.18	8.75	8.62	8.16
收缩比例/%	0.8	1.9	1.7	1.6	1.4

2.1 回归分析

由表 1 数据可知,随着孔缩放比例的变化,成型收缩的比例也存在变化,并且存在正相关的关系。通过线性回归分析和相关性计算^[3],得到打印模型缩放的比例 x_i 与打印成型后模型收缩的比例 y_i 存在线性相关的关系,相关系数 $r_{xy} = 0.9987$ 。 $r_{xy} =$

$$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

。相关性计算数据如表 2 所示。成型收缩的比例(%)与模型缩放的比例拟合关系曲线如图 1 所示。

实际当打印模型越小时会越趋向于实心,材料的实际有效填充率相应就越大。而当打印模型越大时,空心的区域就越大,材料的实际有效填充率就越小。通过实验验证分析,设成型收缩比例为 a ,材料收缩率为 b ,材料填充率为 c ,则有经验公式 $a = b/c$ 。

可以通过打印耗用的 ABS 材料所占的体积与理论模型的体积之比来计算模型实际材料的填充率。已知打印手柄所用 ABS 材料质量 $m = 2.2g$,通过 PROE 软件的模型质量分析,得到手柄模型的理论体积 $V_0 = 2158.6 \text{ mm}^3$ 。

根据 ABS 材料的密度 $\rho = 1.05g/cm^3$,可计算得到实际手柄的材料所占体积 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{2.2 \times 10^3}{1.05} = 2095.2 \text{ mm}^3$ 。

根据经验公式 $a = \frac{b}{c}$,得到手柄成型收缩比例 $a = \frac{b}{c} = \frac{b}{V/V_0} = 0.866\%$,其中 ABS 的收缩率为 0.8% (ABS 成型收缩率在 0.3% ~ 0.8% 之间,本文

根据实验具体情况选取 0.8%)。由 $0.742 \times (1 - a) \approx 0.736$ 可知,按 0.742 的比例缩放打印的手柄,在收缩后,与按 0.736 的比例缩放打印的轴,在经验推算上恰好实现 H/h 公差配合。根据表 1 中数据,Φ12mm 的孔按 0.742 缩放,成型收缩后的实际尺寸为 8.75mm 与轴按 0.736 的比例缩放,成型收缩后的实际尺寸为 8.76 mm 基本相等,这与按经验公式进行的推算正好相符。值得注意的是,经验公式里的成型收缩比例 a ,不是最终的收缩比例,而是收缩到与轴同状态下尺寸的比例,即满足 H/h 公差配合。实际上,实验中的轴被默认为实心,即材料实际填充率默认为 100%,根据经验公式,由于 $b = 0.8\%$, $c = 1$,所以计算可得轴的成型收缩比例 a 为 0.8%,所以手柄孔收缩到与轴同状态下,还要继续收缩 0.8%,手柄孔最终成型收缩比例为 $1 - (1 - 0.866\%) \times (1 - 0.8\%) \approx 1.7\%$,这与表 1 的数据正好相符。在实际打印成型中,只要确定孔轴模型的合理缩放关系就可以确定相应的装配关系。经实验验证,在确定 H/h 公差配合的基础上,将孔轴模型缩放的比例加減 2%,就可得到间隙或过盈的配合。以 Φ10 mm 孔轴成型配合为例,间隙配合时要孔的直径尺寸在按 H/h 公差配合的基础尺寸上增加 0.2 mm 的余量,而过盈配合时要在 H/h 的基础尺寸上减小 0.2 mm 的余量,这方面与机械零件公差配合有所不同,因为成型件为塑料件,存在着缩放的问题,其公差要大于一般机械零件的公差。

3 变形机理分析

1) 开裂。影响开裂的因素主要有打印温度、打印速度、打印层数、冷却温度等。打印温度低,会使丝材粘结性不够,造成层间开裂。喷头的扫描速度(即空间移动速度)若比打印送丝的速度高,会造成丝材出丝时产生拉扯或断丝,而喷头移动速度过快,会造成机器振动,导致模型开裂^[5]。另外打印层数决定了分层间距,层数越少,间距越大,丝材层间的粘结性不好,可通过增大打印层数,提高丝间的粘结性。若冷却速度不均,会导致上层和下层收缩不一致而产生开裂,可通过设置恒温仓,或将模型进行抽壳处理改善散热面积,减少开裂发生^[6]。

2) 翘曲。翘曲主要与丝材与托盘的粘结性、打印开裂、材料填充率、打印模型的摆放位置有关。可通过减少喷头与托盘间隙,减少开裂,减小材料填充率或增大支撑,合理摆放使打印截面减小等措施,来

避免翘曲的发生^[4]。

3) 塌陷。影响塌陷的因素主要有打印温度、材料的填充率等。可通过适当降低打印温度,增大材料的填充率或增加支撑的方式来减少塌陷。

4) 圆度误差。影响圆度误差的因素主要有 STL 网格划分的原理性误差^[7]、打印层间的接合误差、材料的填充率等。STL 是按照三角形面片对模型进行网格划分,面片存在弦高,网格划分的疏密决定弦高的大小,可适当减少弦高来降低原理性误差。另外打印是按层打印,每层打印结束进入下一层时会出现丝材的接合,导致产生接缝,影响圆度误差。以上两种因素所产生的误差属于原理性误差,是无法消除的。实验证明,打印模型轴线垂直于打印层面时,圆度误差较小,主要是原理性误差造成的。当打印模型轴线与层面平行时,打印模型圆度主要与材料的填充率有关。

4 圆度误差实验

轴类模型在进行 3D 打印时,为保证打印模型的刚性,使过程平稳,往往需将轴平放于打印托盘上。而由于材料填充率的原因,打印的轴内部存在空心结构,导致丝材堆积时产生塌陷现象,最终使打印出的轴的横截面近似椭圆,会出现直径一边大和一边小的情况,即产生圆度误差。

实验选用 ABS 作为成型丝材进行熔融堆积打印,打印机型号为 3D PRO,打印机处理软件为 ReplicatorG 040,打印采用的工艺参数为单喷头打印,采用全支撑,打印温度为 230℃,分层厚度为 0.35 mm,外壳层数为 3 层,送丝速度为 60 mm/s,喷头移动速度为 45mm/s。

针对不同材料填充率进行打印模型实验(材料填充率按照 3D 打印机软件参数进行设置,精确到整数位),测量圆度误差,具体实验数据如表 3 所示。材料填充率和圆度误差关系曲线如图 2 所示。

表 3 圆度误差实验数据(单位:mm)

材料填充率/%	轴直径		直径极差	圆度误差
10	9.55	9.45	0.10	0.05
20	9.58	9.37	0.21	0.105
30	9.48	9.20	0.28	0.14
40	9.40	9.23	0.17	0.085
60	9.66	9.29	0.37	0.185

根据图 2 所示,轴的圆度误差随着材料填充率增加有递增趋势。圆度误差在材料填充率 10% ~

40% 范围内较小,其中 10% 和 40% 为最佳。实验观察得知圆度误差与原型件的翘曲变形相关,翘曲变形越大,圆度误差越大。而翘曲变形与材料填充率和喷头的挤压有很大的关系。填充率越大,翘曲变形越明显,但同时喷头的挤压也相应增大,反而对翘曲变形有一个抑制作用。当填充率太大时,材料的内部应力超出喷头的挤压作用,导致打印轴的两端出现明显翘曲变形,将严重影响圆度误差。填充率太小时,则材料的内部应力和翘曲变形都较小,但由于原型件内部空间间隔大且强度变小,喷头的挤压将会导致一定的圆度误差。综合内部应力和喷头挤压两方面的因素影响,材料填充率在 10% 时,虽然喷头挤压抑制变形的能力减弱,但由于原型件内部应力小,总体轴向翘曲变形很小,成型件与底盘粘结得比较牢靠;材料填充率在 40% 时,内部应力大一些,会使轴向翘曲变形有偏大的趋势,但由于填充材料增多,喷头挤压抑制变形的作用增强,使得成型件与底盘粘结得也比较牢靠,因而不会产生大的翘曲变形。综合考虑强度、变形及成本的因素,材料填充率宜选择 10% 或 40%,10% 时最节省成本,40% 时强度更高。

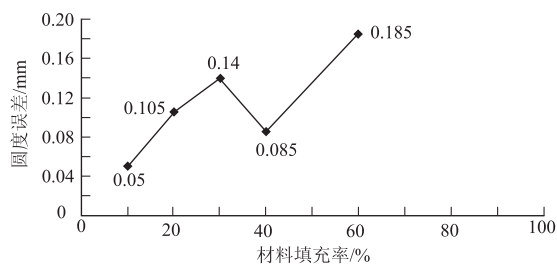


图 2 圆度误差和材料填充率曲线图

5 结论

采用快速成型技术将 CAD 模型打印成实物模型时,为实现打印后零件能够装配,以打印的孔轴类零件配合为研究对象,轴径尺寸不变,孔径按不同比例缩放进行成型实验。通过对实验数据进行回归拟合分析,发现模型缩放比例与成型收缩比例存在着线性关系;通过回归方程,可以预估孔轴零件合理的缩放比,以实现成型后孔轴零件满足装配要求;通过不同的材料填充率实验发现,轴的圆度误差随材料填充率的增大而出现趋势性增大,且材料填充率在 10% ~ 40% 时,圆度误差为较小,其中 10% 和 40% 为最佳;另通过实验分析,获得孔轴成型缩放的比例与材料收缩率、材料填充率相关的经验公式。据此可为 3D 打印装配件在成型前对孔轴的缩放提供必要的参考,保证成型后能够合理的装配。

参考文献

[1] 张楠,李飞. 3D 打印技术的发展与应用对未来产品设计的影响[J]. 机械设计,2013,30(7):97-99.

[2] 倪荣华. 熔融沉积快速成型精度研究及其成型过程数值模拟[D]. 山东:山东大学. 2013.

[3] 许耀东,郑卫. 硬度测量法测定退火碳钢含碳量的实验[J]. 实验室研究与探索,2012,31(1):50-52.

[4] 陈雪芳,张义平. 控制 FDM 成型制件误差的方法研究[J]. 现代制造工程,2011,(11):39-41.

[5] 彭安华,张剑峰,张江林. FDM 工艺参数对制件精度影响的实验研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2008,17(3):21-24.

[6] 谭剑锋,吴志超,全宗宇,等. FDM 快速成型技术在动漫模型制作中的应用[J]. 机械设计与制造,2014,(6):233-235.

[7] 许耀东. 基于破损零件逆向设计的快速成型及质量分析[J]. 世界科技研究与发展,2009,31(5):864-866.