

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.02.005

3D 打印柔性材料特性及有限元分析方法研究*

张媛媛,李 军*,石 凯

(哈尔滨工业大学 气动技术中心,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:针对 3D 打印柔性材料特性及有限元分析问题,对 3D 打印柔性试件的力学特性和有限元仿真方法进行了研究。通过对不同打印条件的柔性试件进行了单轴拉伸实验,测量了试件的力学特性,得到了打印条件对试件弹性模量和泊松比的影响;利用单轴拉伸实验得到的应力应变数据和不同的 Abaqus 有限元仿真方法对试件进行了分析,得到了 3D 打印柔性材料的最佳仿真方法,并利用复杂结构零件的仿真结果对仿真方法进行了验证。研究表明,层高和打印方向会影响 3D 打印柔性试件的弹性模量和泊松比;不同打印条件的试件可等效为不同材料的试件进行仿真,将 3D 打印柔性材料设置为超弹性体时仿真效果最好。

关键词:3D 打印;柔性材料;力学特性;有限元仿真

中图分类号:TH165;TH145.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)02-0138-05

Property and finite element analysis of 3D printing flexible material

ZHANG Yuan-yuan, LI Jun, SHI Kai

(Pneumatic technology center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problems of property and finite element analysis of 3D printing flexible material, the mechanical properties and the simulation method with finite element of 3D printing flexible specimens were studied. Experimental study on the mechanical properties with flexible specimens under different printing conditions were carried out, the effect of printing conditions on the elastic modulus and Poisson's ratio of the specimens was gotten. The specimen was simulated with stress and strain data from uniaxial tensile test and different finite element analysis method of Abaqus, the best method for simulating 3D printing flexible material was obtained, and the method was verified with the simulations of complex structural components. The results indicate that the height and printing direction could affect the elastic modulus and Poisson's ratio of the 3D printing flexible specimens. Specimens with different printing conditions could be equivalent to specimens of different materials, and the simulation result is the best when the 3D printing flexible material, which is set as hyper-elastic material.

Key words: 3D printing; flexible material; mechanical property; finite element analysis

0 引 言

3D 打印工艺主要有光固化成型(SLA)、选择性激光烧结(SLS)以及熔融沉积成型(FDM)打印等^[1-4]。常用的打印材料主要有工程塑料、橡胶、光敏树脂以及金属等^[5]。

对于借助 3D 打印设备制造的产品,国内外主要针对 3D 打印模具制造的橡胶及 3D 打印的硬质材料进行了分析。如 TSAI M 等人^[6]应用 3D 打印技术制造磁性齿轮,并借助有限元分析扭矩特性;MOON S K 等人^[7]3D 打印光敏树脂材料,并对结构进行压缩性试验;南京理工大学的陈飞蛟等人^[8]利用 3D 打印的模

收稿日期:2017-05-02

基金项目:国防科技创新特区资助项目(17-163-11-ZT-003-024-01)

作者简介:张媛媛(1992-),女,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事气动软体机器人方面的研究。E-mail: zhangyuan_yuan_hit@163.com.cn

通信联系人:李 军,男,副教授,硕士生导师。E-mail: lijun@hit.edu.cn

具制造硅橡胶驱动器,并测量其变形特性。国内外对3D打印的柔性材料分析相对较少,而3D打印的柔性材料也有较广的应用。MICHAEL W 及其团队^[9]借助3D打印技术利用硅橡胶材料打造了全软体机器人;FESTO公司生产的“BHA”气动机械臂以及手爪同样利用了SLS技术^[10-11]。3D打印柔性零部件的应用非常灵活,如3D打印的柔性产品可作为软体机器人的柔性机械臂、机械手等,取代传统刚性机器人应用于自动化设备,发展前景广阔。

本研究将针对3D打印的柔性材料进行实验测量以及有限元仿真方法的研究,以用于3D打印柔性执行器的仿真分析及设计。

1 实验测量力学特性

对3D打印柔性材料的模型进行有限元分析,首先要确定3D打印柔性材料的材料属性,本研究通过单轴拉伸实验来确定。

1.1 实验设备及打印材料

拉伸设备采用电子万能材料试验机 AG-X,最大拉力为20 kN,引伸计测定应变。实验所用试件通过3D打印制成,本文采用FDM型3D打印机,可打印聚合物材料,本研究中采用柔性PLA材料^[12]。

1.2 试件的制备

实验试件的制备首先利用Pro/E软件建立三维模型,试件的尺寸按照GB/T 1040.2-2006确定,模型保存为.stl格式,在3D打印软件中设置打印条件。打印温度、打印方向、层高以及填充密度等3D打印机的打印条件会对试件的力学性能产生影响。基于本文实验设备及材料的选择,将打印头温度设置为230℃,工作台温度设置为60℃。填充密度越大,试件的抗拉强度越大,在实验中将填充密度均设为100%。笔者主要研究打印方向和层高的影响。3D打印机完全遵循软件中的三维模型结构进行打印,因此改变软件中模型的放置方向即可改变打印方向,实验中共分两种打印方向:沿试件轴向与垂直轴向方向打印、与试件轴向呈45°角方向打印。

试件的尺寸及打印方向如图1所示。

图1中标注试件的主要尺寸,图1中箭头方向为试件的打印方向。

3D打印机的打印层高设为0.1 mm~0.2 mm,实验中高层分别设定为0.1 mm和0.2 mm。实验中共分4种打印试件,其打印条件设置如表1所示。

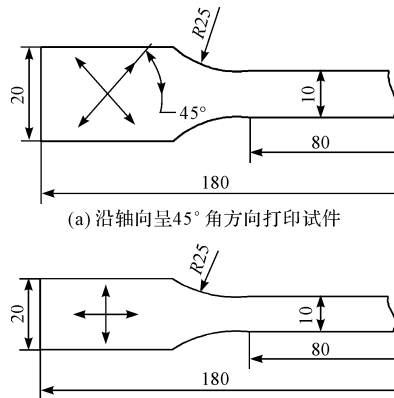


图1 试件尺寸和打印方向示意图

表1 4种打印试件的打印条件设置

试件	层高/mm	打印方向
1#	0.2	沿试件轴向呈45°角方向打印
2#	0.2	沿试件轴向与垂直轴向方向打印
3#	0.1	沿试件轴向呈45°角方向打印
4#	0.1	沿试件轴向与垂直轴向方向打印

1.3 实验结果及分析

在相同条件下,笔者分析不同打印层高试件的材料特性,得到各试件的应力 σ 应变 ϵ 数据,并分析弹性模量和泊松比。

不同层高打印试件 ϵ - σ 曲线对比图如图2所示。

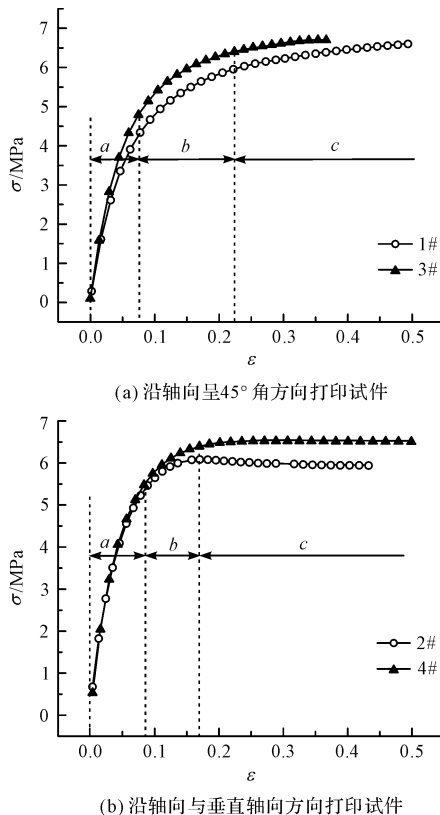


图2 不同层高打印试件的应力应变对比图

图 2 中 4 种试件的曲线均表现出非线性, 曲线的变化趋势比较一致, 大致可将 4 条曲线分成 3 个阶段: 弹性阶段、强化阶段、局部变形阶段, 分别将各阶段标为 a、b、c。

(1) 弹性阶段。相同打印方向试件的应力应变曲线弹性阶段范围大致相同, 且弹性阶段曲线基本重合, 即应力在弹性阶段内, 改变层高对试件的力学性能几乎无影响;

(2) 强化阶段。应力应变曲线呈非线性, 相同打印方向条件下, 0.1 mm 试件较质密, 变形时所需的应力更大;

(3) 局部变形阶段。当拉应力增加到 6 MPa 左右时, 试件局部变细, 试件所能承受的应力变小, 应变急剧增大, 0.1 mm 的试件抗拉强度更大。

在相同条件下, 分析不同打印方向的试件的材料特性。

不同打印方向试件 ε - σ 曲线对比图如图 3 所示。

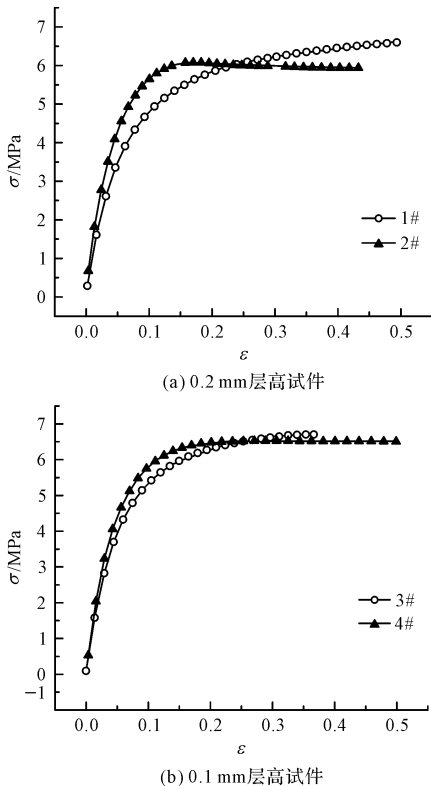


图 3 不同打印方向的试件应力应变曲线对比图

(1) 弹性阶段。沿轴向呈 45° 角方向打印试件的应力应变曲线弹性阶段范围相对较窄, 沿轴向与垂直轴向方向打印的试件弹性模量较大;

(2) 强化阶段。应力应变曲线呈非线性, 相同层高条件下, 沿轴向与垂直轴向方向打印的试件变形时所需的应力更大, 沿轴向呈 45° 角方向打印试件的强化阶段区间范围较大;

(3) 局部变形阶段。当拉应力增加到 6 MPa 左右时产生局部变形, 试件所能承受的应力变小, 应变急剧增大, 沿轴向呈 45° 角方向打印试件的局部变形阶段不明显, 沿轴向与垂直轴向方向打印的试件所能承受的应力明显减小, 两曲线出现交叉点, 此时应变约为 0.25, 沿轴向呈 45° 角方向打印试件的抗拉强度较大。

综合 4 种打印方式的对比曲线, 层高 0.1 mm、沿轴向与垂直轴向方向打印的试件弹性模量较大, 不易被拉伸。

综合 4 种曲线, 相同打印方向试件的 3 个阶段应变范围大致相同, 借助引伸计的测量数据, 还可得到试件的泊松比。

4 种打印试件的泊松比如表 2 所示。

表 2 不同打印方式试件的泊松比

试件	1#	2#	3#	4#
泊松比	0.310 4	0.250 8	0.346 7	0.265 6

根据表 2 的数据可以看出, 打印方向相同时, 0.1 mm 层高打印的试件泊松比相对 0.2 mm 层高打印的试件泊松比稍大, 因此不同于轴向的变形情况, 0.1 mm 层高试件在垂直轴线方向更易变形; 当打印层高相同时, 打印方向对泊松比的影响要相对明显, 且沿试件轴向的 45° 方向打印时其泊松比较大, 其垂直轴线方向更易变形。

2 柔性材料的有限元分析方法

本研究将上述 4 种不同打印条件的试件进行有限元仿真, 并与实验结果曲线对比。该柔性材料的试件在受力过程中会产生较大的变形并具有几何非线性。而在非线性领域, Abaqus 是较好的有限元分析软件, 可以解决复杂的工程力学以及大变形的问題, 因此, 本研究选择 Abaqus 软件进行有限元仿真。

本研究将试件模型导入 Abaqus 有限元分析软件, 设置其具有几何非线性。将试件一端夹持端固定, 另一端夹持端设置沿轴向的拉伸力。具有几何非线性的柔性材料选择计算较精确的二次六面体单元, 网格类型选择 C3D20。

除了上述主要设置步骤, 还需设置材料属性。相同材料、不同打印条件下得到的试件力学特性不同, 因此, 不同打印条件的试件在仿真过程中材料属性设置也不同, 即将不同打印条件的试件视为是不同材料的试件, 仿真时利用不同试件在各自拉伸实验中得到的应力应变数据设置其材料属性。该柔性材料试件经测量其应力应变曲线具有非线性, 以应力应变数据为基础, 对非线性的材料进行属性设置时, 可采用下面几种方式:

(1)弹性体。将材料的应力应变近似为线性变化,即将其近似设置为弹性体,取应力应变曲线的弹性阶段的杨氏模量及泊松比进行计算;

(2)超弹性体。超弹性体材料的应力应变曲线是非线性的,即直接输入试件实验得到的名义应力和名义应变,并需要设置超弹性体的本构模型,超弹性体的本构模型主要有多项式、Arruda-Boyce、Marlow、Mooney-Rivlin、Neo Hooke 等,根据应力应变实验数据利用软件中的评估功能进行材料模型的选择,评估结果显示可设置2阶多项式作为超弹性体仿真的本构模型;

(3)弹塑性体。将材料近似设置为小于某一应力值时为弹性体,超过该应力后材料出现塑性特征,材料的实际应变为弹性应变加上塑性应变,材料弹性的杨氏模量和泊松比取弹性阶段来近似计算,材料的塑性

设置需要输入材料的真实应力和塑性应变,经由单轴拉伸试验测出的为材料的名义应变和名义应力。

首先根据下式将试验数据中的名义应力 σ_{nom} 和名义应变 ϵ_{nom} 转换为材料的真实应力 σ_{true} 和真实应变 ϵ_{true} :

$$\begin{cases} \epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \\ \sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \end{cases} \quad (1)$$

真实应变 ϵ_{true} 由弹性应变 ϵ_{tan} 和塑性应变 ϵ_s 组成,由下式可以得到试件的塑性应变 ϵ_s :

$$\epsilon_s = \epsilon_{true} - \epsilon_{tan} \quad (2)$$

本研究利用上述3种方法对不同打印条件的试件进行沿轴向拉伸的仿真分析,将试件单轴拉伸的实验数据与不同仿真方法得到的仿真结果进行对比,4种打印条件下试件的实验结果与仿真结果的拉力 F - 伸长量 L 曲线对比图如图4所示。

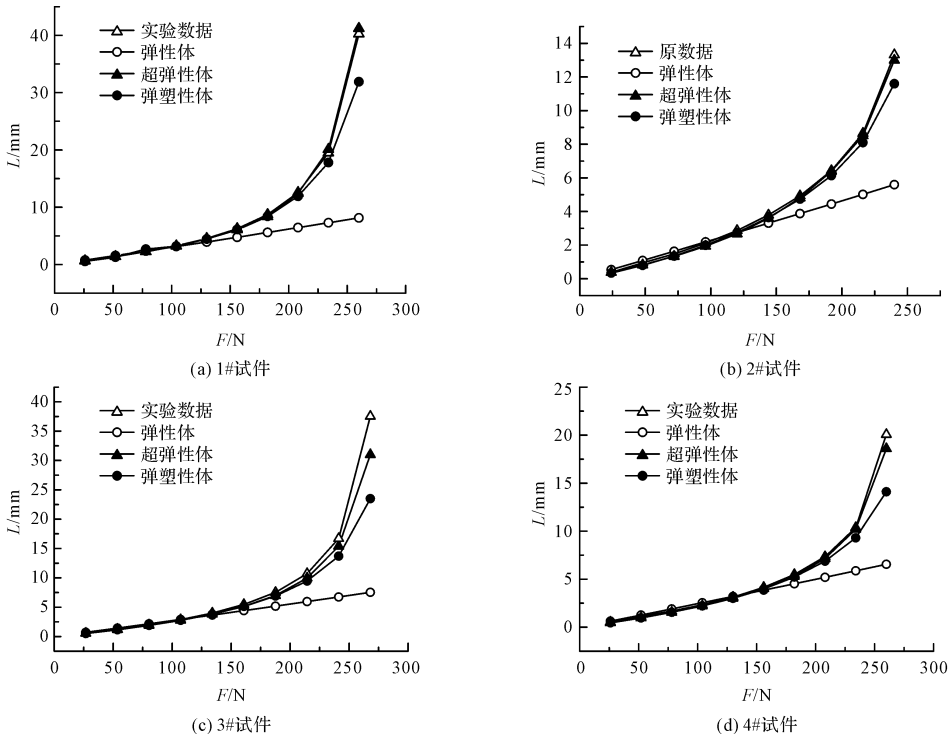


图4 不同打印方式的试件拉力-伸长量曲线对比图

如图4所示,当拉力小于150 N,伸长量随拉力近似呈线性变化,当拉力大于150 N,试件的 L 随 F 的增大呈非线性的变化趋势,且 L 的增长率逐渐增大。

将不同打印方式的试件近似成弹性体时,在实测的拉力-伸长量曲线的近似线性段内,弹性体材料属性试件的仿真结果与实际结果还比较一致,但在非线性段内两种结果的偏差很大。将试件属性设置为弹塑性体和超弹性体时,仿真结果曲线是非线性的,且仿真结果曲线与实际数据曲线重合度较高。其中,最接近实际结果的仿真曲线为超弹性体仿真结果曲线,最大偏差小于5%。

为了验证上述方法应用到复杂结构时的准确性,本

研究依据上述3D打印柔性材料的有限元分析方法,对3D打印柔性驱动器进行仿真,并对比仿真结果和实际实验的结果。3D打印柔性驱动器结构如图5所示。

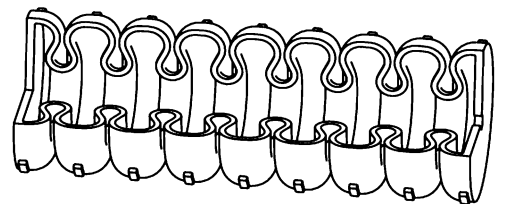


图5 3D打印柔性驱动器

该3D打印柔性驱动器材料柔软,结构易变形,可

用于组成柔性机械臂、机械手等结构。

本研究对 3D 打印柔性驱动器进行有限元仿真,借助上述 Abaqus 分析方法进行仿真设置,将驱动器一端固定,另一端分别施加沿轴向的 5 N ~ 65 N 的拉力 F 。得到各拉力下驱动器沿轴向的伸长量,当拉力为 65 N 时,驱动器的空间位移云图和应力云图如图 6 所示。

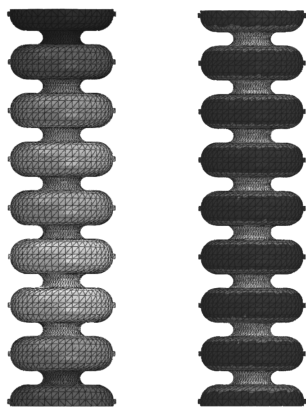


图 6 $F=65$ N 时的空间位移云图和应力云图

本研究借助 FMA 工艺制造柔性 PLA 材料的柔性驱动器,并对其进行拉伸实验。将实验结果和仿真结果进行对比,对比结果如图 7 所示。

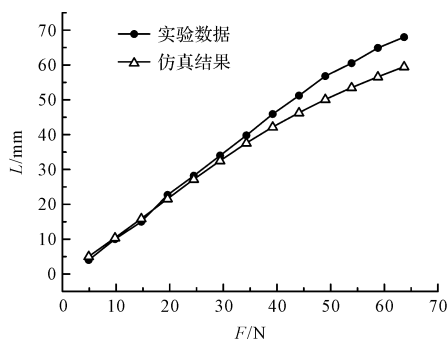


图 7 驱动器拉力-伸长量曲线对比图

当拉力 F 小于 40 N, 拉力 F -伸长量 L 曲线可以近似看作是线性的, 且仿真结果和实验数据吻合较好, 线性段内的最大误差小于 5%。当拉力 F 大于 40 N, 伸长量 L 随拉力 F 的增长非线性变化, 随着拉力 F 的增大, 伸长量 L 的变化率逐渐减小, 且在相同拉力 F 下, 实验时驱动器的伸长量 L 相对较大。

3 结束语

(1) 本研究以 FDM 工艺打印的柔性 PLA 材料为例, 进行单轴拉伸实验测试试件的力学特性, 不同条件

打印时, 层高 0.1 mm 沿轴向与垂直轴向方向打印的试件弹性模量较大, 试件在轴向不易变形, 层高 0.1 mm 沿轴向 45° 方向打印的试件泊松比较大, 试件在垂直轴线方向更易变形;

(2) 利用 Abaqus 进行不同 3D 打印条件的试件的有限元分析, 仿真方法的区别在于材料属性设置不同, 即将不同打印条件下的试件视作由不同材料制得, 3D 打印的柔性材料具有材料非线性, 将非线性材料的 3 种设置方法的仿真结果对比实验数据, 结果表明 3D 打印的柔性材料设置为超弹性体时仿真效果好, 结果最接近实际值;

(3) 应用上述方法对 3D 打印柔性驱动器进行分析, 得到的仿真结果与实验结果吻合较好, 其误差主要来源于打印缺陷。

参考文献 (References):

- [1] 李小丽, 马剑雄, 李 萍, 等. 3D 打印技术及应用趋势 [J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 1-5.
- [2] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [3] 邓钢锋. 工业级 3D 打印机调研 [J]. 机械工程师, 2014 (12): 134-136.
- [4] 杨德建, 刘仁洪. 大型复杂金属件 3D 打印技术及研究进展 [J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 8-12.
- [5] 杜宇雷, 孙菲菲, 原 光, 等. 3D 打印材料的发展现状 [J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2014, 29(1): 20-24.
- [6] TSAI M, KU L. 3D printing based design of axial flux magnetic gear for high torque density [J]. **Magnetics Conference**, 2015, 51(11): 1-4.
- [7] MOON S K, TAN Y E, HWANG J, et al. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures [J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, 2014, 1(3): 223-228.
- [8] 陈飞蛟, 李小宁, PETER X. 气驱动仿食道蠕动软驱动器的结构设计与实验研究 [J]. 液压与气动, 2015(7): 116-119.
- [9] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots [J]. **Nature**, 2016, 536(7617): 451.
- [10] FESTO. Bionic handling assistant [EB/OL]. https://www.festo.com.cn/net/SupportPortal/Files/42050/Brosch_FC_BHA_3_0_EN_lo.pdf
- [11] FESTO. Bionic tripod with finGripper [EB/OL]. https://www.festo.com.cn/net/SupportPortal/Files/42082/Tripod_en.pdf
- [12] 肖苏华, 巫小珍. 聚乳酸材料在桌面型 3D 打印中的应用研究 [J]. 机电工程, 2015, 32(10): 1344-1347.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

张媛媛, 李 军, 石 凯. 3D 打印柔性材料特性及有限元分析方法研究 [J]. 机电工程, 2017, 35(2): 138-142.

ZHANG Yuan-yuan, LI Jun, SHI Kai. Property and finite element analysis of 3D printing flexible material [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(2): 138-142.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>