

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.016

3D 打印样品原位压缩下的结构观测

许伟^{1,2}, 聂恒勇², 刘禹¹

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 韦仕敦大学表面研究中心, 加拿大伦敦 N6G 0J3)

摘要:为观测同轴直书写 3D 打印样品在应力下的结构变化, 课题组提出并使用可原位压缩的 Micro-CT 设备对打印样品内部结构进行了三维成像表征和分析。基于直书写 3D 打印的基本概念, 匹配合适的工艺参数, 成功制备了具有空心结构且有复杂三维结构的同轴硅橡胶管道, 并用 Micro-CT 成功观测到同轴硅橡胶样品内部结构在不同应力下的变形情况。结果表明该表征方法在弹性压缩的条件下, 可准确地对同轴打印样品内部结构及其变化进行成像分析。该分析方法有助于改善打印工艺参数, 以获得具有更加优异性能的 3D 打印样品。

关键词:增材制造; 无损检测; 3D 直书写同轴打印; 聚二甲基硅氧烷; 显微断层扫描; 流变特性
中图分类号: TB4; TH89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2020)05-0089-05

Structural Observation of 3D Printed Samples in Situ Compression

XU Wei^{1,2}, NIE Hengyong², LIU Yu¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Surface Science Western, Western University, 999 Collip Circle, London, Ontario N6G 0J3, Canada)

Abstract: In order to observe the structural changes of the coaxial direct writing 3D printed samples under stresses, a micro-CT capable of in-situ compressive testing was proposed to characterize and analyze the internal structure of the printed samples by 3D imaging. Based on the basic concept of direct writing 3D printing and appropriate process parameters, a coaxial silicone rubber tube with hollow structure and complex three-dimensional structure was successfully prepared, and the deformation of the internal structure of the coaxial silicone rubber sample under different stresses was observed through micro-CT. The results show that under the condition of elastic compression, the internal structural changes in the coaxial printed samples can be accurately analyzed by this method. The analysis method is helpful to improve the printing process parameters for obtaining 3D printed samples with better performance.

Keywords: additive manufacturing; nondestructive testing; coaxial 3D direct-writing printing; PDMS (polydimethylsiloxane); Micro-CT; rheological characteristics

3D 直书写技术(three-dimensional direct-writing), 属于当代增材制造技术的一种类型^[1]。区别于熔融沉积成型(FDM)、选择激光固化成型(SLA)和数字光处理成型(DLP)等 3D 打印技术, 直书写 3D 打印技术一般将可打印材料存储在一个料筒中, 并将其固定在打印机 Z 轴上, 由压力控制供料, 由特定的打印喷头挤出材料并沉积在打印基底上, 最后选择合适的固化工艺, 对已沉积的打印样品进行固化成型操作^[2]。

目前已有学者成功将直书写 3D 打印技术应用在了硅橡胶打印中^[3-4], 并研究了不同结构下的硅橡胶泡沫力学性能变化^[5]。也有学者在直书写 3D 打印的基础上提出了同轴直书写 3D 打印技术来制备柔性可拉伸材料^[6-7], 其利用硅橡胶的优良保形性作为外壳材料, 再将无法成型的液态金属或水作为内芯材料, 使用同轴喷头挤出, 可以获得具有更加优异性能的同轴硅橡胶管道。但是, 对于同轴直书写 3D 打印, 受限于检

收稿日期: 2020-01-31; 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875253); 高等学校学科创新引智计划资助(B18027)。

第一作者简介: 许伟(1995), 男, 江苏镇江人, 硕士, 主要研究方向为增材制造与检测表征。E-mail: xwind0214@163.com

测仪器,人们较难直接地观测到打印结构内部的变化,因此课题组将利用 Micro-CT 设备对同轴打印的硅橡胶管道进行表征。

为保证相关结论的准确,实验中:①选取了道康宁公司的 SE1700 硅橡胶 (polydimethylsiloxane, PDMS) 作为同轴挤出的外壳材料,纯水为内芯材料;②外壳材料的打印采用点胶机气压挤出方式,内芯材料的打印采用注射泵推压的挤出方式。通过合适的打印参数成功制备了硅橡胶空心管,并将 Micro-CT 设备应用到空心硅橡胶管的内部结构观测中,研究了不同压力作用下,空心硅橡胶管的结构变化和力学性能变化。

1 Micro-computed tomography (Micro-CT)

X 射线断层扫描 (Micro-CT) 也被称为显微断层扫描或微型计算机断层扫描,是一种 3D 成像技术。该技术利用 X 射线逐层扫描被测样品内部^[8],类似于医院的 CT 或“CAT”扫描成像,但其可扫描样品的尺寸更小且分辨率更高,样品可以以 100 nm 的像素大小成像,且扫描物体直径可达 200 mm。Micro-CT 扫描仪首先捕获一系列 2D 平面的 X 射线图像,并将数据重建为 2D 横截面切片,这些切片可以进一步处理并生成 3D 模型。与 2D X 射线成像技术的每个样品仅能获取一个角度的一张图像相比, Micro-CT 利用来自不同角度的 2D 投影图像中的信息来重建横向 2D 图像(切片)并最终生成 3D 模型观测,所以 X 射线 Micro-CT 图像能够证明某些特征(例如孔或腔)的大小和几何形状的变化。与现代显微镜扫描技术如扫描电子显微镜相比,同一样品的一系列 CT 切片可以提供更多信息。借助 Micro-CT 中的 3D 分析,可以选择从任何角度观察样品,并且可以对其进行切割以查看任何方向上的 2D 截面。

如图 1 所示^[9], X 射线 Micro-CT 的工作原理是利用 X 射线束照射样品,测量出样品的 X 射线吸收图像,并在样品旋转时反复获取 X 射线图像,这些图像可以从不同的角度反应样品的形貌,并且由于 X 射线的穿透性从而提供了样品的内部细节;然后,所获得的图像在软件的数学建模中生成相关的三维数据集(即三维图形)。三维图形中每个部分的亮度与其材料的 X 射线密度有关(X 射线密度取决于该扫描部分的物理密度和原子量)。图 1 所示为典型的 Micro-CT 仪器组成,包括了 X 射线源、旋转样品台、平面检测器和相关集成软件。该仪器可以通过采集图像并重建三维数据,在专用软件中进行数据可视化的分析。

实验中需要观测已打印成型的硅橡胶线条内部结

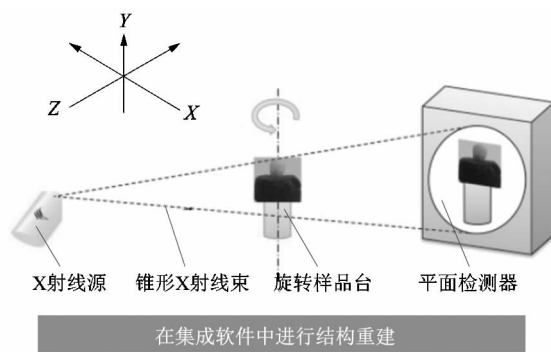


图 1 Micro-CT 测量原理示意

Figure 1 Micro-CT measurement principle diagram

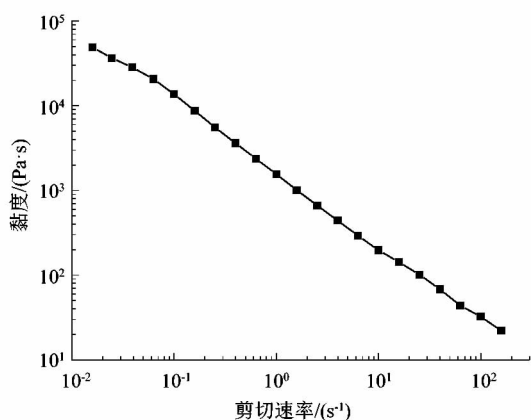
构,或在压力作用下硅橡胶泡沫结构的内部变形,因线条宽度在百微米级别,压力作用范围在 50 N 以内,因此选用的 X 射线 Micro-CT 为蔡司 Xradia 410 Verse,同时配备了压力位移平台 (Deben microtest)。Xradia 410 Verse 空间分辨率 $< 0.9 \mu\text{m}$, 压力位移平台最大压力可达 500 N,满足本实验的观测需求。

2 直书写同轴 3D 打印方法研究

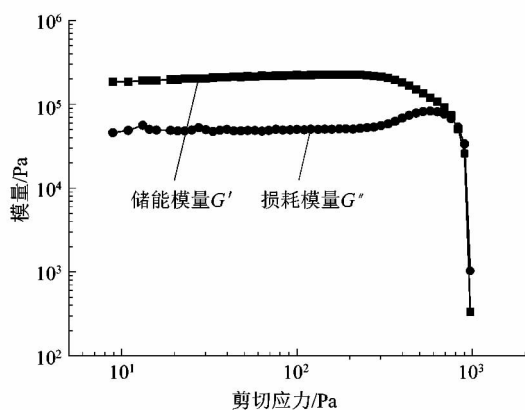
为直书写 3D 打印技术开发的打印墨水需要具有剪切变稀的特性^[10],这是为了确保打印墨水在通过打印喷头的时候,受剪切力作用而模量降低,使其具有流动的特性(液体行为)。同时也要保证当打印墨水沉积到基底的时候,不受剪切力作用的墨水可以迅速恢复其模量至初始状态,保持其自身形态(固体行为)。这种流变性能要求打印墨水的储能模量 (G') 大于其损耗模量 (G'')^[11]。

如图 2 所示,利用流变仪对 PDMS 硅橡胶进行流变测试,可以得到黏度随剪切速率变化的曲线,以及模量随剪切应力变化的曲线。由图 2(a)可知,随着剪切速率的增加,PDMS 墨水的黏度降低,表明 PDMS 油墨具有剪切变稀的行为。这种行为意味着 PDMS 墨水的流动性随剪切速率的增加而增加,因此适合直书写打印。图 2(b)展示了为评估 PDMS 墨水的粘弹性而进行的振荡测试的结果,证实了 PDMS 墨水在较低的剪切应力下主要是弹性表现(即固体行为)。

用气压挤出打印浆料的方法对浆料的流量控制要求不高,且性价比较高,应用范围广,所以本次的同轴挤出实验选择气压挤出方式进行外壳材料(硅橡胶)的打印。又因为纯水的黏度非常低,当使用它做内芯材料时,如继续使用气压挤出,则难以控制流量,容易导致打印失败,所以选择注射泵推压来精准控制内芯材料(纯水)的流量。



(a) 硅橡胶黏度随剪切速率的变化



(b) 2种模量随剪切应力的变化

图2 PDMS流变测试图

Figure 2 Rheological properties of silicone gel PDMS

如图3所示为同轴3D打印的原理示意图。硅橡胶和纯水分别有2个输入通道进入同轴喷头,通道内部互不相通,两通道的出口处为同心圆结构,故挤出的线条形成核-壳结构,内部是纯水,外部是硅橡胶。本实验选用的同轴喷头的尺寸:①内芯喷头内径为0.25 mm,外径为0.70 mm;②外芯喷头的内径为1.30 mm,外径为1.55 mm。当使用5 mm/s的打印速度、420 kPa的挤出气压和3 μL/s的注射泵速度时,可以得到如图4所示的单根同轴硅橡胶管。因为水分在固化过程中(固化温度为80 °C,固化时间为2 h)会蒸发,所以最终可以得到空心硅橡胶管。

在得到单根线条的打印工艺后,可以据此进行三维结构制造。打印路径如图5(a)至图5(d)所示,并设置打印线距为2 mm,最终得到如图5(e)中的样品,线宽约为1.5 mm,层高三.6 mm。

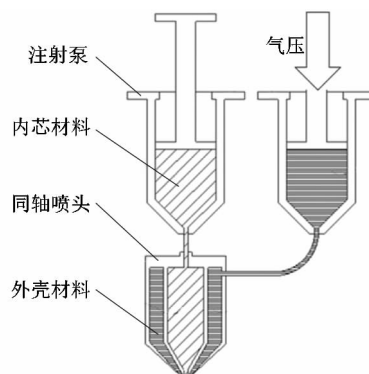
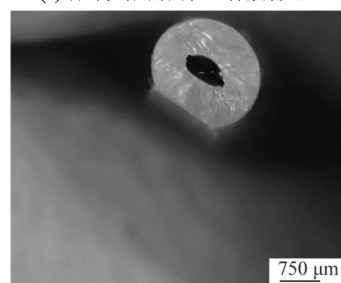


图3 直书写同轴打印的原理示意图

Figure 3 Schematics of coaxial direct-writing printing



(a) 打印完成的同轴硅橡胶管道



(b) 固化后的空心硅橡胶管道截面

图4 单根硅橡胶管道表征图

Figure 4 Characterization diagram of single silicone rubber tube

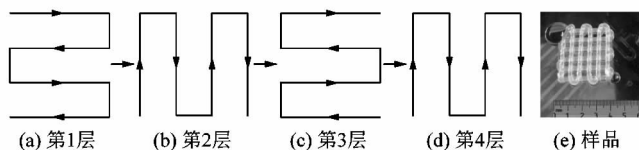


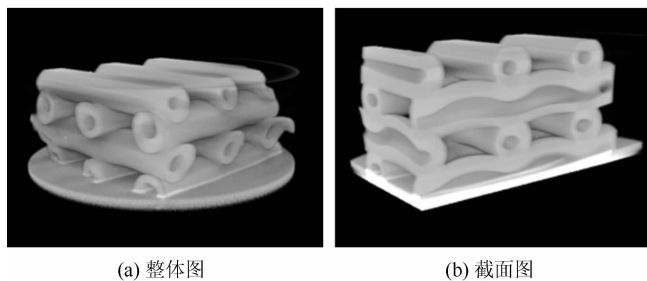
图5 同轴打印样品的路径规划及实物图

Figure 5 Path planning and physical map of coaxial printing samples

3 Micro-CT 表征

为了对 3D 打印的硅橡胶空心泡沫管进行成像, X 射线源在 60 kV 和 133 μ A (即 8 W) 的条件下运行, 并带有低能量滤波器 (LE5)。使用了 0.4 倍物镜, 源样品和检测器样品的距离各为 42 和 150 mm。像素组合为 4, 曝光时间为 1 s, 样品旋转 360°, 期间收集的 X 射线图为 1 601 张, 扫描时间约为 1 h。为了在压力下观察 3D 打印的空心泡沫管结构的变化, 使用 Deben microtest 原位测试模块 (CT500N, UK) 压缩样品。

如图 6 所示为无任何压力作用下的硅橡胶扫描图, 可以清楚地看到空心管道的内部结构, 由于受重力作用, 当单根空心管的上方有其他空心管存在时, 管道相交的节点处截面积明显小于其他地方。



(a) 整体图 (b) 截面图
图 6 无压力作用下的硅橡胶空心管
Micro-CT 扫描图

Figure 6 Micro-CT results of PDMS hollow tube under no pressure

如图 7 所示为不同压力下的硅橡胶 Micro-CT 表征图。从图中可以看到在受压缩作用时, 节点部分首先被压缩, 节点处的空心部分逐渐变直直至没有, 而非节点处的空心部分一直存在。根据设备导出的力-位移曲线, 可以得到如图 8 所示的应力-应变曲线和弹性模量-应变曲线 (接触面积约为 1 cm^2); 并通过计算得到作用力为 2, 5, 10 和 20 N 时对应的应变分别为 0.093, 0.191, 0.362 和 0.504。

弹性模量是指当有力施加于物体或物质时, 其弹性变形 (非永久变形) 趋势的数学描述。物体的弹性模量定义为弹性变形区的应力-应变曲线的斜率。从图 7 和图 8 可以看出, 在低压力时 (< 5 N), 硅胶部分和硅胶内部的空心部分一起被压缩, 物体整体的弹性模量逐渐增大; 而随着压力慢慢增大 (5 ~ 10 N), 硅胶一部分被压紧, 被压缩的主要部分变为内部空心部分, 所以维持物体弹性模量的不变; 当压力进一步增大 (10 ~ 20 N) 时, 节点处的空心部分已经被压缩完全, 压缩的主要部分重新变成硅胶和非节点部分的空气,

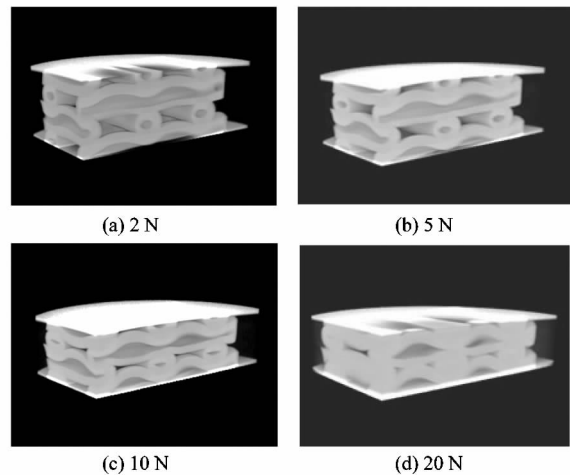


图 7 不同压力作用下的硅橡胶空心管
Micro-CT 扫描图

Figure 7 Micro-CT results of PDMS hollow tube under different pressure

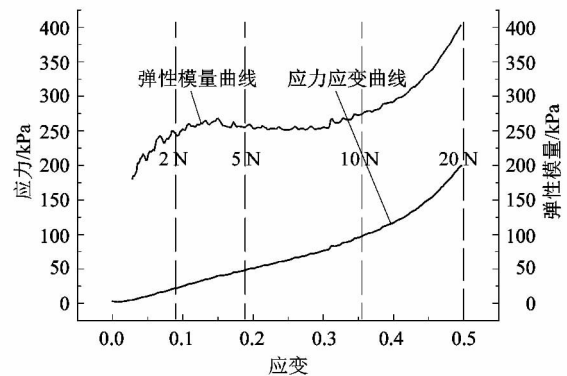


图 8 应力-应变曲线及弹性模量-应变曲线
Figure 8 Stress-strain curve and elastic modulus-strain curve

所以物体弹性模量继续升高。由此可见, 同轴打印的方法可以在结构上进一步的控制物体的弹性模量, Micro-CT 的表征可以直观地解释这一现象的出现。

4 结论

课题组对硅橡胶的流变性能进行了研究, 从原理上验证了其具有可打印性的功能, 并集成三维运动平台、点胶机及注射泵等设备, 探索相关工艺参数, 成功制备了具有空心结构的硅橡胶泡沫空心管。将 Micro-CT 设备应用在硅橡胶的压缩实验中, 成功表征了压缩过程中硅橡胶的内部结构的变化, 解释了其弹性模量变化规律。随着新型的功能性复合材料发展, 将会有越来越多的不同材料体系被应用到 3D 打印的这个广泛的行业中来, 而打印物体的内部结构和机械性能变

化也一直是学者们关注的焦点, Micro-CT 因为其高分辨率和无损检测等优点, 在 3D 打印的表征领域将会有更新更好的发展。

参考文献:

- [1] 罗斌, 陈花玲, 徐雪杰, 等. 电活性聚合物 PVC 凝胶材料的 3D 直写打印工艺[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 76 - 82.
- [2] LI Q, LEWIS J A. Nanoparticle inks for directed assembly of three - dimensional periodic structures [J]. *Advanced Materials*, 2003, 15 (19): 1640.
- [3] 朱晓敏. 有机硅材料基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 106 - 110.
- [4] HE Zhoukun, CHEN Yanqiu, YANG Jian, et al. Fabrication of polydimethylsiloxane films with special surface wettability by 3D printing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 129: 58 - 65.
- [5] ZHU Xiaowei, CHEN Yanqiu, LIU Yu, et al. Additive manufacturing of elastomeric foam with cell unit design for broadening compressive stress plateau[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(9): 1579 - 1585.
- [6] YAN Hailiang, CHEN Yanqiu, DENG Yongqiang, et al. Coaxial printing method for directly writing stretchable cable as strain sensor [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(8): 083502.
- [7] 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, 2018, 35(2): 138 - 142.
- [8] 罗品凤, 智伟, 张静微, 等. 基于 Micro-CT 不同多孔结构陶瓷支架的建模及其贯通性与液流分布分析[J]. 无机材料学报, 2015, 30(1): 72.
- [9] SCHOEMAN L, WILLIAMS P, DU PLESSIS A, et al. X-ray micro-computed tomography (μ CT) for non-destructive characterisation of food microstructure[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 47: 17.
- [10] LEWIS J A. Direct ink writing of 3D functional materials [J]. *Advanced Functional Materials*, 2006, 16(17): 2193 - 2204.
- [11] WANG Zhenyu, GAO Weilian, ZHANG Qiang, et al. 3D-printed graphene/polydimethylsiloxane composites for stretchable and strain-insensitive temperature sensors [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, 11(1): 1347.
- [12] 郭盛, 于智远, 曲海波. 轻型抓取机器人的优化设计与路径规划 [J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 101.
- [13] 姜杰凤, 毕运波. 高锁螺母自动化安装机器人末端执行器设计 [J]. 制造技术与机床, 2019(8): 73 - 76.
- [14] 夏海渤, 刘占磊, 李睿, 等. 机器人末端打磨执行器设计与开发 [J]. 机械设计与制造, 2020(1): 243 - 247.
- [15] 朱志伟, 李和平. 基于 MATLAB 的 KUKA 焊接机器人轨迹规划与运动学仿真[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 64 - 69.
- [16] 李克讷, 杨津, 刘昌东, 等. 食品配料机器人位置误差容错运动规划方法[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 232 - 235.
- [17] 张国龙, 张杰, 蒋亚南, 等. 机器人力控末端执行器综述[J]. 工程设计学报, 2018, 25(6): 617 - 629.
- [18] 沙智华, 刘禹峰, 吴颀, 等. 螺旋铣孔末端执行器设计及其运动仿真分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(13): 84 - 87.
- [19] 霍洪鹏, 解福祥, 姜军生, 等. QM-40SA 机床上料机器人结构仿真与试验[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(2): 76 - 80.
- [20] 陈建宇, 穆春阳, 马行, 等. 面向轴承车削加工的自动上下料系统设计及实现[J]. 现代制造工程, 2019(6): 113 - 119.
- [21] 冯慧娟, 苗青, 樊胜秋, 等. 工业机器人机械结构模块化参数化设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(21): 60 - 63.
- [22] BAC C W, HEMMING J, VAN TUIJL B A J, et al. Performance evaluation of a harvesting robot for sweet pepper[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(6): 1123 - 1139.
- [23] SILWAL A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester[J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(6): 1140 - 1159.
- [24] 陈晨, 李晶, 刘站, 等. 碳纤维叠层布缝纫机辅助机构设计[J]. 西安工程大学学报, 2019, 32(2): 186 - 191.
- [25] 叶敏, 邹湘军, 杨洲, 等. 荔枝采摘机器人拟人手受力分析与夹持试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 1 - 8.
- [26] 范娟, 张新建, 杨家军. 基于发动机缸体压铸工业机器人末端操作器的设计[J]. 机电工程, 2018, 35(3): 256 - 260.
- [27] 郑军, 马崇启, 吕汉明. 分布式筒子纱自动收集与输送系统开发 [J]. 棉纺织技术, 2015, 43(3): 10 - 14.
- [28] 牟新刚, 蔡逸超, 周晓. 基于机器视觉的筒子纱缺陷在线检测系统[J]. 纺织学报, 2018, 39(1): 140.
- [29] 戴宏民, 戴佩燕, 周均. 中国包装机械发展的成就及问题[J]. 包装学报, 2012, 4(1): 61.

(上接第 88 页)