DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.03.021

振动辅助空间熔融沉积 3D 打印抗拉强度研究*

吴奕宏, 徐志成, 丁庆军, 杨 淋

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京,210016)

摘要 通过对熔融沉积(fused deposition modeling,简称FDM)3D打印过程中熔丝填充方式的重新规划,使打印件 仅依靠熔丝间的黏合力在拉伸方向完成成型与受力,避免了重力对该方向成型与力学性能的影响,以此模拟空间在 轨3D打印样品在竖直方向的抗拉性能。同时,基于3D打印机热床本身的动力学特性,以振动辅助打印,研究其对 打印件抗拉强度的影响。试验结果表明:在振动辅助下,不同打印参数的打印件力学性能提升效果存在差异;提升 效果最佳的是打印速度组,抗拉强度最低提高了4.96%,最高提高了7.97%;提升效果最差的是打印温度组,抗拉强 度最低提高了3.34%,最高提高了4.99%,这说明振动能够提高空间环境下FDM 3D打印的抗拉强度。

关键词 等效试验;模态分析;振动利用;3D打印;抗拉强度 中图分类号 V414.3⁺3;TQ323.8;TH13

1 问题的引出

空间 3D 打印在航天器维护及空间武器的在轨 制造方面展现出了广阔的应用前景^[1]。FDM3D 被 认为是目前空间 3D 打印中最理想的方法。在微重 力环境下,打印件在成型过程中没有重力的参与,使 得熔丝间孔隙增大,进而降低打印件的力学性能。 目前,我国实施空间站建设、载人航天计划和月球探 测计划。如果实现功能结构件的空间制造、空间废 弃零部件的回收再制造、月球资源的利用与原位制 造等^[2],将对我国空间探索产生巨大的推动作用。

国外于20世纪开始了微重力条件下3D打印的 相关研究工作。1999年,在约翰逊航天中心和密尔 沃基工程学院的合作下,完成了熔丝制造系统长达 10~12h的抛物线飞行试验^[3]。2014年9月,美国航 空航天局向国际空间站运送了世界上首台FDM3D 打印机,并在太空成功制备了一些塑料材质的工 具^[4]。2015年,意大利Altran公司成功研制出一款 空间FDM3D打印机,并由欧洲航天局送入国际空 间站开展试验^[5]。2016年,俄罗斯西伯利亚的托木 斯克理工大学高科技物理研究所等4家单位联合研 制了该国首台太空3D打印机样机,并在2018年送 入国际空间站进行相关测试^[6]。我国的空间3D打 印技术起步较晚。2016年,Tian等^[7]验证了连续纤 维增强热塑性复合材料空间3D打印机理的可行性。 中国科学院空间应用中心与中科院重庆智能研究院 共同研制成功了国内首台空间FDM3D打印机,并 在法国波尔多完成了抛物线失重飞行试验^[8]。2020 年,我国自主研制的"复合材料空间增材制造系统" 随新一代载人飞船试验船,搭乘长征五号B运载火 箭发射入轨,开展了连续碳纤维增强复合材料的太 空3D打印空间科学试验,成功完成了样品的打印。

振动技术用于 3D 打印的研究主要是前期打印 材料的制备和对成形后零件的后处理工艺。夏正 付^[9]在 3D 打印熔丝制备阶段加入了振动技术,使样 品的抗拉强度提高了 34%。陈学永等^[10]在使用激 光烧结 3D 打印的过程中,在基板上加入了振动辅 助,试验结果显示,打印成品内部晶粒得到了细化, 硬度也得到了提高。Gunduz等^[11]在 3D 打印喷头上 添加一个超声换能器,产生高达 20 µm 的振幅,制备 出黏度高达 14 000 Pa•s 的商业聚合物黏土。Tofangchi等^[12]在 FDM3D 打印机上增加了一套变幅杆 设备,使成品黏合强度提高了 10%。

笔者依托等效试验的思想,重新规划了FDM 3D打印的填充路径,并为热床添加压电振动,利用 热床在振动下表面质点得到的*x*向振幅,减小熔丝 之间的间隙,促进相邻熔丝间融合,从而提高打印件 的抗拉强度。图1为振动辅助3D打印原理图。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52375058) 收稿日期:2023-06-13;修回日期:2023-07-06



2 热床振动设计

2.1 3D 打印设备介绍

如图 2 所示,本试验采用广东珠海贝尔科技公司的 IedaFormer Pro型 FDM 3D 打印机作为打印设备。该设备拥有一块尺寸为 300 mm×300 mm×3 mm的铝合金制热床,通过热床4个角的螺栓与打印机的传动机构连接,从而进行水平方向移动。



2.2 热床模态分析

采用软件 Ansys Workbench 18.0 中的模态分析 模块对热床进行建模计算。为了反映实际螺栓连接 情况,对热床4个角上的通孔添加固定约束。有限 元计算材料属性如表1所示。

热床前4阶模态如图3所示。经计算可知,该热床的模态振型以纵振、弯振为主,若只激发单一模态,表面质点难以得到*x*向的较大振幅。

表 1 有限元计算材料属性 Tab.1 Material properties for finite element calculation

材料	$ ho/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
铝合金	2 780	71	0.33
压电陶瓷	7 750		—
A3钢	7 850	210	0.30



2.3 热床的模态合成与激励方法

通过合成热床相邻两阶正交模态的方法,可提 高热床表面质点*x*向的振幅。为了提高工作效果, 需要减小相邻两阶模态的频率差^[13]。由于热床含有 加热模块与传感器等设备的相关线路,无法通过改 变热床的几何属性达到此目的,因此在该设备上采 用添加配重的方法来减少相邻模态的频率差。

经有限元计算,采用一块几何参数为170 mm× 40 mm×5 mm的A₃钢制配重,并安装在热床背面的 中心位置。配重安装前后热床模态频率如表2所示。

表2 配重安装前后热床模态频率

Tab.2Modal frequency of heating bed before and
after counterweight installation

模态	<i>f</i> /Hz		频率差/Hz	
阶数	安装前	安装后	安装前	安装后
2阶	168.84	166.01	15.60	2.03
3阶	184.44	168.04	15.60	2.03

为了激励出对应的模态,根据模态分析结果在热 床背面最大变形处使用环氧树脂胶粘贴压电陶瓷。 压电陶瓷极化方向与激励方式如图4所示。



Fig.4 Polarization direction of piezoelectric ceramics and excitation methods

2.4 热床的谐响应计算

为了得到此激励方法的振型,通过软件Ansys Workbench 18.0 加载 Piezo and MEMS 插件在谐响 应分析模块中对热床在压电激励下的振型进行计 算。谐响应计算所需的刚度矩阵、压电应力常数矩 阵与相对介电常数矩阵分别为

$$C^{E} = \begin{bmatrix} 12.03 & 7.52 & 7.51 & 0 & 0 & 0 \\ 7.52 & 12.03 & 7.51 & 0 & 0 & 0 \\ 7.51 & 7.51 & 11.09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.26 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.11 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.11 \end{bmatrix} \times 10^{10}$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.35 \\ 0 & 0 & -5.35 \\ 0 & 0 & 15.78 \\ 0 & 0 & 0 \\ 12.29 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$k^{s} = \begin{bmatrix} 919 & 0 & 0 \\ 0 & 919 & 0 \\ 0 & 0 & 827 \end{bmatrix}$$

经计算,热床在167 Hz、相位差为90°的2路激励信号下,单位周期内的热床单位周期振型如图5 所示。



Fig.5 Mode shape of the heating bed per a cycle in simulation

3 试 验

3.1 试验准备

3.1.1 试验设备

本试验所需设备为 Polytec PSV500型三维扫 描式激光测振仪与 HAS4052型功率放大器。 Polytec PSV500型三维扫描式激光测振仪采用高精 度激光干涉仪,计算机控制激光在扫描过程中始终 照射在目标,扫描完毕后,由软件自动完成多区域扫 描三维数据的拼接,输出三维振型。HAS4052型功 率放大器的作用是接受三维测振仪的输出信号,通 过该设备接入负载,使压电陶瓷正常工作。 3.1.2 打印材料

FDM工艺成型材料多种多样,本次试验采用的 打印材料为聚乳酸(polylactic acid,简称 PLA)。本 次试验采用慈溪市兰博打印耗材有限公司生产的直 径为 1.75 mm 的 PLA 丝材。

3.1.3 打印件的建模与切片

根据GB/T 1040—2006,在建模软件Catia中对 拉伸样件进行建模,并通过切片软件Cura对模型进行 处理。默认填充方式如图6所示,在切片软件默认的 相邻层间45°与135°填充方式下,打印件的抗拉强度除 了受到熔丝间黏合力的影响外,还受到熔丝本身抗拉 性能的影响。这与空间环境下样品在竖直方向仅依 靠熔丝间黏合力的情形不符。



图 7 为拉伸样件 3D 打印过程熔丝填充与成型 示意图。为了模拟空间 3D 打印件样品的成型与受 力情况,在打印过程中,各打印层均采用图 6 所示的 填充方式。该填充方式排除了重力的影响,使打印 样件在拉伸方向的成型与受力仅依靠熔丝间的黏合 力。同时,由于填充方式的转变,微重力环境下主要 影响的z向振幅也转化为x向振幅,以达到等效的振 动辅助效果。





3.2 热床模态试验

使用三维扫描式激光测振仪的扫频模式对热床 进行模态试验,图8为热床模态试验结果。可见,2 个工作模态分别为139 Hz和143.2 Hz。

用两相频率为139 Hz、同幅值、相位差为90°的 交流信号激励压电陶瓷,以激光测振仪的定频模式 对热床振型进行测定。热床单位周期振型如图9 所示。

设定峰峰值不同的激励电压,并测量热床表面 振幅,不同电压下的振幅如图10所示。热床表面质 点的运动轨迹为椭圆形。



Fig.8 Heating bed modal test results





3.3 不同工艺参数下的抗拉强度测试

3.3.1 填充密度

本试验在层高为0.2 mm、打印速度为40 mm/s、 打印温度为190℃,采用20%、40%、50%和60% 4种打印填充密度进行制样,并以频率为139 Hz、电 压峰峰值为0、200和400 V的压电陶瓷片辅助打



rig.10 Amplitude at unicient voltages

印。为了减小误差,每一组数据制样5个并取平均数。振动辅助下不同填充密度样件抗拉强度如表3 所示。振动辅助下样件抗拉强度随填充密度的变化 规律如图11所示。

表 3 振动辅助下不同填充密度时样件的抗拉强度 Tab.3 Tensile strength of samples with different filling densities with vibration assistance MPa

填充密度/	电压峰峰值/V		
%	0	200	400
20	35.69	36.58	37.46
40	37.49	38.53	40.02
50	39.07	40.47	41.18
60	32.97	33.99	35.43





Fig.11 Variation law of tensile strength of samples with filling density under vibration assistance

通过比较表3与图11可知,随着激励电压的增大,在FDM3D打印过程中加入振动辅助,打印样件的抗拉强度也随之逐渐增大。其中,抗拉强度提升最大的是在打印填充密度为60%、频率为139Hz、交变电压峰峰值为400V激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印样件,其抗拉强度提高了7.46%。抗拉强度提升

最小的是在打印填充密度为20%时、相同交变电压 的激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打 印参数下,没有振动辅助的打印样件抗拉强度提高 了4.96%。需要说明的是,本试验没有采用100% 填充率的完全填充方式,而是采用了非完全填充的 空心设计方式。该研究方式是为了探索不同打印参 数对振动辅助FDM3D打印件抗拉强度的影响,而 不是研究填充密度或空心设计的优化,故对最终结 论不会产生影响。

3.3.2 打印层高

本试验在 0.1、0.15、0.2 和 0.25 mm 4 种打印层 高、打印填充密度为 20%、打印速度为 40 mm/s、打 印温度为 190 ℃条件下进行制样,并以电压峰峰值 为 0、200 和 400 V、频率为 139 Hz 的交变电压激励 压电陶瓷片辅助打印。为了减小误差,每一组数据 制样 5个并取平均数。表 4 为振动辅助下不同打印 层高的样件抗拉强度。振动辅助下样件抗拉强度随 打印层高的变化规律如图 12 所示。

÷	表 4	振动辅助下不同打印层高的样件抗拉引	虽度
Tab.4	Te	nsile strength of samples with differen	t printing
	thi	ckness with vibration assistance	MPa

打印层高/		电压峰峰值/V	
mm	0	200	400
0.10	45.46	46.61	47.86
0.15	42.34	43.42	44.73
0.20	35.69	36.58	37.46
0.25	33.36	34.32	35.10





通过比较表4与图12可知,随着激励电压的增大,在FDM3D打印过程中加入振动辅助,打印样件的抗拉强度也随之逐渐增大。其中,抗拉强度提升最大的是在打印层厚为0.15 mm、频率为139 Hz、峰

峰值为400 V交变电压激励下,加入振动辅助的打 印样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印 样件,其抗拉强度提高了5.64%。抗拉强度提升最 小的是当打印层厚度为0.2 mm时,在相同交变电压 的激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打 印参数下没有振动辅助的打印样件,其抗拉强度提 高了4.96%。

3.3.3 打印温度

本试验采用190℃、200℃、205℃和210℃4个打 印温度,层高为0.2 mm、打印速度为40 mm/s填充 密度为40%的样件进行制样,并以峰峰值为0、200 和400 V的139 Hz交变电压激励压电陶瓷片辅助打 印。表5为振动辅助下不同打印温度的样件抗拉强 度。图13为振动辅助下样件抗拉强度随打印温度 的变化规律。

表 5 振动辅助下不同打印温度的样件抗拉强度 Tab.5 Tensile strength of samples with different printing temperature with vibration assistance MPa

打印温度/	电压峰峰值/V		
°C	0	200	400
190	35.69	36.58	37.46
200	37.22	38.16	39.08
205	42.66	43.52	44.26
210	43.05	43.89	44.50







比较表5与图13可知,在FDM 3D打印过程中 加入振动辅助,随着激励电压的增大,打印样件的抗 拉强度也随之逐渐增大。其中,抗拉强度提升最大 的是打印温度为200℃时,在频率为139 Hz,峰峰值 为400 V交变电压的激励下,加入振动辅助的打印 样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印样 件,其抗拉强度提高4.99%。抗拉强度提升最小的 是打印温度为210℃时,在相同交变电压的激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打印参数下没 有振动辅助的打印样件,其抗拉强度提高了3.34%。 3.3.4 打印速度

本试验采用 40、50、60 和 70 mm/s 4 种打印速度,在层高为 0.2 mm、填充密度为 20%、打印温度为 190℃环境下进行制样,并以峰峰值为 0、200 和 400 V 的 139 Hz 交变电压激励压电陶瓷片辅助打印。表 6 为振动辅助下不同打印速度的样件抗拉强度。振动辅助下样件抗拉强度随打印速度的变化规 律如图 14 所示。

表6 振动辅助下不同打印速度的样件抗拉强度

Tab.6Tensile strength of samples with different printing
speed with vibration assistanceMPa

*			
打印速度/	电压峰峰值/V		
$(mm \cdot s^{-1})$	0	200	400
40	35.69	36.58	37.46
50	36.78	38.495	39.71
60	43.21	45.02	46.56
70	37.06	38.53	39.16





Fig.14 Variation law of tensile strength of samples with printing speed under vibration assistance

比较表6与图14可知,在FDM 3D打印过程中加入振动辅助,随着激励电压的增大,打印样件的抗拉强度也随之逐渐增大。其中,抗拉强度提升最大的是打印速度为50 mm/s时,在频率为139 Hz,峰峰值为400 V交变电压的激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印样件,其抗拉强度提高了7.98%。抗拉强度提升最小的是打印速度为40 mm/s时,在相同交变电压的激励下,加入振动辅助的打印样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印样件相对于相同打印参数下没有振动辅助的打印样件,抗拉强度提高了4.96%。

4 结 论

1) 振动辅助可以提高空间环境下 3D 打印的抗 拉强度,在一定程度上弥补由于空间环境微重力条 件下造成的FDM 3D 打印件力学性能下降问题。

2)不同的打印参数下,振动辅助对打印件抗拉 强度的提升效果不相同。其中,提升效果最差的是 打印温度,抗拉强度最低提高了3.34%,最高提高了 4.99%。其原因在于直接提高打印温度会极大提高 熔丝的流动性,相邻间的熔丝已经充分融合,此时振 幅很难更进一步减少熔丝间隙,从而提升抗拉强 度。提升效果最佳的是打印速度,抗拉强度最低提 高了4.96%,最高提高了7.97%。其原因在于适当 提高打印速度,相邻熔丝接触面的温度小幅提高,流 动性提高程度远不如直接提高打印温度,这为振幅 促进相邻熔丝的结合留出了空间,导致振动辅助效 果进一步提高。

3)本试验采用的是压电陶瓷激励热床模态的 方法。试验结果表明,该方法提升样件的抗拉强度 还不够理想。原因在于使用的压电陶瓷厚度较小, 在试验中无法承受过高电压而导致功率低下,无法 为板表面带来较为理想的振幅。

参考文献

- [1] TAMINGER K M B, HAFLEY R A, DICUS D L. Solid freeform fabrication: an enabling technology for future space missions[C]//2002 International Conference on Metal Powder Deposition for Rapid Manufacturing. San Antonio, TX: NTRS, 2002: 20030013635.
- [2] 田小永,李涤尘,卢秉恒.空间3D打印技术现状与前景[J].载人航天,2016,22(4):471-476.
 TIAN Xiaoyong, LI Dichen, LU Bingheng. Status and prospect of 3D printing technology in space[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(4):471-476. (in Chinese)
- [3] DUNN J, WERKHEISER M J, SNYDER M P, et al.
 3D printing in zero-G ISS technology demonstration
 [C]//AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition.
 San Diego, CA: AIAA, 2014:1-5.
- [4] Anon. First zero-gravity 3D printer heads to international space station [EB/OL]. (2014-09-19) [2023-01-12].https://newatlas.com/made-in-space-zerog-3d-printer/33889/.
- [5] European Space Agency. Europe's 3D printer set for space station [R/OL]. (2014-11-13) [2023-01-12]. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_ Technology/Europe_s_3D_printer_set_for_Space_Station.
- [6] 栾海.俄罗斯制成该国首台太空 3D 打印样机[J].特种

铸造及有色合金, 2017(1):82.

LUAN Hai. Russia makes its first space 3D printer prototype[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017(1): 82. (in Chinese)

- [7] TIAN X Y, LIU T F, YANG C C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites [J]. Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 198-205.
- [8] 王功,刘亦飞,程天锦,等.空间增材制造技术的应用
 [J].空间科学学报,2016,36(4):571-576.
 WANG Gong, LIU Yifei, CHENG Tianjin, et al. Application of additive manufacturing technology for space
 [J]. Chinese Journal of Space Science, 2016, 36(4):571-576. (in Chinese)
- [9] 夏正付.纤维增强复合材料增材制造技术研究[D].哈 尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [10] 陈学永,史恩秀,斯帕克斯,等.基于超声振动的激光 金属堆积机理研究分析[J].中国机械工程,2015(2): 200-203.
 CHEN Xueyong, SHI Enxiu, SPARKS T, et al.

Study on mechanism of laser metal deposition based on ultrasonic vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2015(2): 200-203. (in Chinese)

- [11] GUNDUZ I E, MCCLAIN M S, CATTANI P, et al. 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 98-103.
- [12] TOFANGCHI A, HAN P, IZQUIERDO J, et al. Effect of ultrasonic vibration on interlayer adhesion in fused filament fabrication 3D printed ABS [J]. Polymers, 2019, 11(2): 315.
- [13] 陈乾伟,黄卫清.斜动子与塔形定子构成的单驱双动 超声电机[J].振动、测试与诊断,2012,32(1):28-33.
 CHEN Qianwei, HUANG Weiqing. A single-phasedrive bi-directional moving ultrasonic motor composed of an inclined slider and a tower-type stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 28-33. (in Chinese)



第一作者简介:吴奕宏,男,1998年12 月生,硕士生。主要研究方向为振动辅助3D打印。

E-mail:sz2101063@nuaa.edu.cn

通信作者简介:丁庆军,男,1975年10 月生,博士、副教授、硕士生导师。主要 研究方向为精密驱动与振动利用和材 料学。

E-mail:dingqingjun@nuaa.edu.cn