DOI: 10.3901/JME.2021.21.119

利用中低频振动改善熔丝制造产品表面 加工质量研究*

姜世杰¹ 胡科¹ 董天阔¹ 战明² 戴卫兵¹

(1. 东北大学机械与自动化学院 沈阳 110819;

2. 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110819)

摘要: 熔丝制造技术(Fused filament fabrication, FFF)因其操作简单、适用性强和成本低廉等特点,已经成为当今使用最为广泛的增材制造技术之一。然而,由于逐层累加的工艺特点,与传统加工方式相比 FFF 产品的表面质量存在着明显的缺陷。利用中低频振动在改善 FFF 产品表面质量方面有着很大的潜力,为此,将压电陶瓷与增材制造设备相结合,首先将普通 FFF 设备改装成振动式 FFF 设备;然后通过控制输入信号和电压,以控制压电陶瓷的输出振动参数,从而利用施加振动前和不同形式振动后的试验样件,并完成表面粗糙度测试;通过对比分析不同样件的试验结果,阐明利用振动对 FFF 产品表面质量的影响规律。结果表明,利用中低频振动能够有效改善 FFF 产品的表面质量,且随着振动频率或幅值的增大,表面质量将进一步提高。

关键词: 熔丝制造; 利用振动; 压电陶瓷; 试验样件; 表面质量

中图分类号: TG156

Investigation on Improving the Surface Quality of Fused Filament Fabrication Products by Low and Medium Frequency Vibration

JIANG Shijie¹ HU Ke¹ DONG Tiankuo¹ ZHAN Ming² DAI Weibing¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;

2. College of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819)

Abstract: Fused filament fabrication (FFF) has become one of the most widely used additive manufacturing technologies due to its simple operation, strong applicability, low manufacturing costs, etc. However, due to the layer-by-layer manufacturing characteristics, FFF products have obvious defects in surface quality compared with those fabricated by traditional methods. Since using vibration of low and medium frequency has great potential in improving the surface quality of FFF products, the piezoelectric ceramics are combined with the additive manufacturing equipment. An ordinary FFF equipment is firstly converted into a vibrating one; The output vibration of the piezoelectric ceramic can be controlled by controlling the input signal and voltage. Relevant testing samples are then prepared without and with different types of vibration utilized, and the corresponding surface roughness measurements are carried out; Through the comparison between different samples' testing results, the influencing rule of the utilized vibration is clarified. The results show that introducing vibration of low and medium frequency into FFF process can significantly improve the surface quality of FFF products, and it will be further improved with the increase of frequency or amplitude of the utilized vibration.

Key words: fused filament fabrication; using vibration; piezoelectric ceramics; testing sample; surface quality

0 前言

近几年,增材制造技术引起公众的广泛关注^[1],与传统加工工艺相比,其采用材料逐层累加、堆积

的方式制造出实体零件,是一种“自下而上”的成型方法^[2]。熔丝制造(Fused filament fabrication, FFF)因成本低廉、原材料范围广、环境污染小等优点,成为使用最为广泛的增材制造技术之一。其工作原理是材料丝通过热熔喷头加热至熔融状态,然后从沿模型设计轨迹运动的喷嘴挤出,迅速冷却并与周围材料粘结,逐层累加最终堆积成三维实体或模型^[3]。然而,由于逐层制造而产生的气孔、夹杂、

* 国家自然科学基金(51705068)和中央高校基本科研业务费专项资金(N180703009, N170302001)资助项目。20201030 收到初稿,20210401 收到修改稿

层间分离等缺陷,严重影响了 FFF 产品的表面质量,进而限制了该技术的应用和发展。因此,研究如何改善 FFF 产品的表面质量,将对 FFF 技术的发展起到至关重要的作用^[4]。

现如今,许多学者为解决此问题进行了大量的研究与探索。LI 等^[5]提出了增材制造产品表面粗糙度预测的新方法,即利用传感器以数据驱动的表面粗糙度预测模型。模型应用了机器学习算法,可较为准确的预测表面粗糙度,该模型可用于优化过程参数,从而达到降低表面粗糙度的目的。KIM 等^[6]利用试验研究了过程参数对挤出材料丝宽度的影响,在试验结果的基础上,给出了过程参数的经验公式。结果表明,当加工距离与挤出材料丝宽度相同时,加工出的样件表面质量较好。YANG 等^[7]对 FFF 过程中的参数进行了优化,从而达到降低表面粗糙度的作用。研究发现,FFF 产品的表面粗糙度随着喷嘴直径的减小而降低。CHEN 等^[8]发现,对 FFF 产品进行激光抛光处理可以提高产品的表面质量。但目前激光抛光作为一种新技术还处于发展阶段,存在着成本高、加工过程中的检测技术和精度控制技术要求较高等缺点。JAYANTH 等^[9]利用化学后处理的方法达到降低表面粗糙度的目的。试验结果表明,随着 FFF 产品在化学溶剂中浸泡的时间越长表明粗糙度值越小。BENIAK 等^[10]研究了丙酮蒸汽处理时间对 FFF 产品表面粗糙度的影响。分析显示,表面粗糙度值随着蒸汽处理时间的变长而降低。上述化学后处理的方法会降低产品的拉伸强度,同时化学物质对人体有一定的危害,不利于大范围的推广使用。SUNPREET 等^[11]采用阳极热处理的方法(使用空气对流电烤箱)对 FFF 产品进行加热以期改善产品的整体性能。试验结果表明,热处理后的产品表面轮廓明显变得平滑。LI 等^[12]研究了超声后处理对产品表面粗糙度的影响。结果表明,随着超声强化时间的变长和强化压力的增大 FFF 产品的表面质量有明显的改善。

为了便捷、高效地改善 FFF 产品的表面质量,一种全新的方法被提出,即利用振动进行 FFF 加工。首先,利用压电陶瓷将振动引入到 FFF 过程,完成振动式 FFF 设备的改装;然后对振动试样的表面粗糙度进行测试;对比分析试验结果,阐明不同形式振动对 FFF 产品表面质量的影响规律。

1 振动式 FFF 设备

试验所使用的 FFF 快速成型设备型号为

D-FORCE V2。为将中低频振动引入 FFF 过程,将压电陶瓷固定于熔融喷头处,利用压电陶瓷(P-5 I 型号,尺寸为 40 mm×10 mm×0.3 mm)的逆压电效应,通过放大器(型号: HPV-3C0150A0300D)将信号发生器(型号: VC2015H)产生的正弦波形电信号放大 15 倍,以为压电陶瓷提供高稳定性、高分辨率的电压,使熔融喷头处于纵向振动场中,再通过加速度传感器(B&K4517)、数据采集卡(NI USB 4431)等设备确定熔融喷头的实际振动状态。振动式 FFF 快速成型设备如图 1 所示。其中,信号发生器具有调节振动频率以及输入电压的功能,以此可以单独控制振动的频率或幅值。

(a) 振动式 FFF 设备

(b) 振动式 FFF 设备原理图

图 1 振动式 FFF 快速成型设备

2 试验研究

2.1 样件准备

为揭示不同形式中低频振动对 FFF 产品表面质量的影响规律,利用振动式 FFF 设备制备了如图 2

所示形状尺寸的试验样件，其长度和宽度均为 20 mm，厚度为 2.4 mm。样件材料为聚乳酸(Poly lactic acid, PLA)，一种可再生生物降解材料，具有热稳定性好、易于加工等优点^[13]。

图2 样件示意图

总计制备了 48 个样件，每种类型样件各 3 个，具体包括：3 个普通样件 R_0^0 ；45 个利用振动加工的样件，其中样件 $R_{100}^{0.1}$ 、 $R_{200}^{0.1}$ 、 $R_{300}^{0.1}$ 、 $R_{400}^{0.1}$ 、 $R_{500}^{0.1}$ 以及 $R_{600}^{0.1}$ (0.1 g 幅值、100~600 Hz 频率振动场下加工的样件)18 个；样件 $R_{700}^{0.1}$ 、 $R_{700}^{0.2}$ 以及 $R_{700}^{0.3}$ (700 Hz 频率、0.1~0.3 g 幅值振动场下加工的样件)9 个；样件 $R_{800}^{0.1}$ 、 $R_{800}^{0.2}$ 以及 $R_{800}^{0.3}$ (800 Hz 频率、0.1~0.3 g 幅值振动场下加工的样件)9 个；样件 $R_{900}^{0.1}$ 、 $R_{900}^{0.2}$ 以及 $R_{900}^{0.3}$ (900 Hz 频率、0.1~0.3 g 幅值振动场下加工的样件)9 个，具体如表 1 所示。此外，除了利用加不同形式的中低频振动与否之外，所有 FFF 过程参数均相同，如打印方向(Z 方向)、打印层厚度(0.15 mm)、挤出宽度(0.4 mm)、挤出温度(200 °C)、平台温度(55 °C)、打印速度(60 mm/s)等。

表 1 样件类型

样件($i=1\sim3$)	是否利用振动	振动频率/Hz	振动幅值/g
R_0^0	否	0	0
$R_{100}^{0.1}$	是	100	0.1
$R_{200}^{0.1}$		200	
$R_{300}^{0.1}$		300	
$R_{400}^{0.1}$		400	
$R_{500}^{0.1}$		500	
$R_{600}^{0.1}$		600	
$R_{700}^{0.1}$		700	0.1
$R_{700}^{0.2}$			0.2
$R_{700}^{0.3}$			0.3
$R_{800}^{0.1}$		800	0.1
$R_{800}^{0.2}$			0.2
$R_{800}^{0.3}$			0.3
$R_{900}^{0.1}$		900	0.1
$R_{900}^{0.2}$			0.2
$R_{900}^{0.3}$			0.3

2.2 粗糙度试验

利用 3D 测量激光显微镜(型号：LEXT OLS4100)进行了样件表面粗糙度的试验研究。针对每个样件完成了 10 组数据的测量，共计获得 480 组表面粗糙度数据。该设备采用 405 nm 半导体激光光源的专用光学系统和独有的双共焦光学系统，可删除未聚焦区域的信号，只将聚焦范围内的反射光检测为同一高度，平面最高分辨率可达 0.12 μm 测量；同时结合高精度的光栅读取能力，可以生成高画质的影像，实现精确的三维测量。测试过程如图 3 所示。

图3 粗糙度试验设备和样件

3 试验结果

3.1 Z 方向测试

3.1.1 幅值相同、频率不同的振动的影响

图 4 为样件 R_0^0 、 $R_{100}^{0.1}$ 、 $R_{200}^{0.1}$ 、 $R_{300}^{0.1}$ 、 $R_{400}^{0.1}$ 、 $R_{500}^{0.1}$ 、 $R_{600}^{0.1}$ 、 $R_{700}^{0.1}$ 、 $R_{800}^{0.1}$ 以及 $R_{900}^{0.1}$ 的 Z 方向表面粗糙度平均值和偏差，通过对比可以发现，利用振动进行加工的样件比普通样件(未利用振动)表面粗糙度和偏差范围更小(即表面加工质量更好、更稳定)，且当幅值一定时(0.1 g)，表面粗糙度和偏差范围随着振动频率的增大而进一步减小，详见表 2 所示。

图4 幅值相同、频率不同振动场下样件 Z 方向表面粗糙度

由表 2 可知，普通样件 R_0^0 的 Z 方向表面粗

糙度平均值为 $39.02\ \mu\text{m}$, 偏差范围为 $7.96\ \mu\text{m}$, 而利用振动进行加工的样件($R_{100}^{0.1}_i$ 、 $R_{200}^{0.1}_i$ 、 $R_{300}^{0.1}_i$ 、 $R_{400}^{0.1}_i$ 、 $R_{500}^{0.1}_i$ 、 $R_{600}^{0.1}_i$ 、 $R_{700}^{0.1}_i$ 、 $R_{800}^{0.1}_i$ 和 $R_{900}^{0.1}_i$)相应的 Z 方向表面粗糙度平均值分别为 38.94 、 36.10 、 36.34 、 36.03 、 34.75 、 33.92 、 33.45 、 32.98 以及 $32.55\ \mu\text{m}$, 偏差范围则为 7.41 、 5.80 、 5.50 、 4.89 、 4.71 、 4.31 、 3.20 、 3.01 以及 $2.85\ \mu\text{m}$ 。其中, 粗糙度降低幅度最高达到 19.9% , 而偏差范围降低幅度最高更是达到 64.2% 。可见, 利用振动后 FFF 样件的表面质量明显提升, 且随着振动频率的增大而进一步提高。

表 2 幅值相同、频率不同的振动场下样件 Z 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
$R_0^0_i$	39.02	—	7.96	—
$R_{100}^{0.1}_i$	38.94	0.2	7.41	6.9
$R_{200}^{0.1}_i$	36.10	7.5	5.80	27
$R_{300}^{0.1}_i$	36.34	6.9	5.50	31
$R_{400}^{0.1}_i$	36.03	7.7	4.89	38
$R_{500}^{0.1}_i$	34.75	11	4.71	41
$R_{600}^{0.1}_i$	33.92	13	4.31	46
$R_{700}^{0.1}_i$	33.45	16.9	3.20	60
$R_{800}^{0.1}_i$	32.98	18.3	3.01	62.2
$R_{900}^{0.1}_i$	32.55	19.9	2.85	64.2

3.1.2 频率相同、幅值不同的振动的影响

图 5 对比分析了样件 $R_0^0_i$ 、 $R_{700}^{0.1}_i$ 、 $R_{700}^{0.2}_i$ 和 $R_{700}^{0.3}_i$ 的 Z 方向表面粗糙度平均值和偏差, 可以确定频率一定时($700\ \text{Hz}$), 利用不同幅值的振动场对样件表面质量的影响规律。

图 5 不同幅值的 $700\ \text{Hz}$ 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度

可以看出, $700\ \text{Hz}$ 振动场下加工的样件表面粗糙度和偏差范围明显更小, 且随着振动幅值的

增大两者进一步减小, 具体数值如表 3 所示。样件($R_{700}^{0.1}_i$ 、 $R_{700}^{0.2}_i$ 和 $R_{700}^{0.3}_i$) Z 方向表面粗糙度平均值分别为 33.45 、 32.69 以及 $31.98\ \mu\text{m}$, 偏差范围分别为 3.2 、 2.95 以及 $1.56\ \mu\text{m}$ 。相较于普通样件, 表面粗糙度的降幅分别为 16% 、 19% 以及 22% ; 偏差范围降低幅度分别达到 60% 、 63% 以及 68% 。可见, 利用振动后 FFF 样件的表面质量和稳定性得到了明显改善, 且随着振动幅值的增大两者进一步提升。

表 3 不同幅值的 $700\ \text{Hz}$ 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
$R_0^0_i$	39.02	—	7.96	—
$R_{700}^{0.1}_i$	33.45	16	3.20	60
$R_{700}^{0.2}_i$	32.69	19	2.95	63
$R_{700}^{0.3}_i$	31.98	22	2.56	68

类似的, 图 6、7 分别揭示了 800 、 $900\ \text{Hz}$ 振动场下不同振动幅值对样件 Z 方向表面粗糙度平均值和偏差范围的影响规律, 具体数值如表 4、5 所示。同样可见, 利用 800 、 $900\ \text{Hz}$ 振动后 FFF 样件的表面粗糙度和偏差范围明显降低, 且随着振动幅值的增大而进一步降低。

图 6 不同幅值的 $800\ \text{Hz}$ 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度

图 7 不同幅值的 $900\ \text{Hz}$ 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度

表 4 不同幅值的 800 Hz 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	39.02	—	7.96	—
$R_{800}^{0.1}-i$	32.98	18	3.01	62.2
$R_{800}^{0.2}-i$	32.13	21	3.66	54
$R_{800}^{0.3}-i$	31.55	23	3.79	52

表 5 不同幅值的 900 Hz 振动场下样件 Z 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	39.02	—	7.96	—
$R_{900}^{0.1}-i$	32.55	20	2.85	64
$R_{900}^{0.2}-i$	31.78	23	3.51	55
$R_{900}^{0.3}-i$	30.38	28	3.56	54

3.2 X 方向测试

3.2.1 幅值相同、频率不同的振动的的影响

图 8 绘制了样件 R_0^0-i 、 $R_{100}^{0.1}-i$ 、 $R_{200}^{0.1}-i$ 、 $R_{300}^{0.1}-i$ 、 $R_{400}^{0.1}-i$ 、 $R_{500}^{0.1}-i$ 、 $R_{600}^{0.1}-i$ 以及 $R_{700}^{0.1}-i$ 的 X 方向表面粗糙度平均值和偏差，对比发现，利用振动进行加工的样件与普通样件的表面粗糙度几乎相同，与其相对应的偏差也基本一致，具体数值如表 6 所示。可见，普通样件 R_0^0-i 的 X 方向表面粗糙度平均值为 10.18 μm ，偏差范围为 4.98 μm ，而样件 $R_{100}^{0.1}-i$ 、 $R_{200}^{0.1}-i$ 、 $R_{300}^{0.1}-i$ 、 $R_{400}^{0.1}-i$ 、 $R_{500}^{0.1}-i$ 、 $R_{600}^{0.1}-i$ 以及 $R_{700}^{0.1}-i$ 相应的 X 方向表面粗糙度平均值分别为 9.49 μm 、10.29 μm 、9.99 μm 、10.27 μm 、10.48 μm 、9.66 μm 以及 9.58 μm ，偏差范围则为 4.23 μm 、4.06 μm 、4.04 μm 、5.23 μm 、4.26 μm 、4.19 μm 以及 4.41 μm 。因此，利用振动对 FFF 样件 X 方向的表面粗糙度和偏差的影响有限，其效果可忽略不计。

图 8 幅值相同、频率不同振动场下样件 X 方向表面粗糙度

表 6 幅值相同、频率不同的振动场下 X 方向表面粗糙度测试结果

样件 ($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	10.18	—	4.98	—
$R_{100}^{0.1}-i$	9.49	6.8	4.23	15
$R_{200}^{0.1}-i$	10.29	-1.1	4.06	18
$R_{300}^{0.1}-i$	9.99	1.9	4.04	19
$R_{400}^{0.1}-i$	10.27	-0.8	5.23	-5
$R_{500}^{0.1}-i$	10.48	-2.9	4.26	14
$R_{600}^{0.1}-i$	9.66	5.1	4.19	16
$R_{700}^{0.1}-i$	9.58	5.9	4.41	11

3.2.2 频率相同、幅值不同的振动的的影响

图 9 对比分析了样件 R_0^0-i 、 $R_{700}^{0.1}-i$ 、 $R_{700}^{0.2}-i$ 和 $R_{700}^{0.3}-i$ 的 X 方向表面粗糙度平均值和偏差，可以确定频率一定时(700 Hz)，利用不同幅值的振动场对样件表面质量的影响规律。总体来说，700 Hz 振动场下加工的样件与普通样件的 X 方向表面粗糙度和偏差基本一致，具体数值详见表 7 所示。样件 $R_{700}^{0.1}-i$ 、 $R_{700}^{0.2}-i$ 和 $R_{700}^{0.3}-i$ 的 X 方向表面粗糙度分别为 9.58 μm 、8.89 μm 以及 8.93 μm ，偏差范围分别为 4.41 μm 、4.88 μm 以及 4.17 μm 。对比普通样件，表面粗糙度降低幅度分别达到 5.8%、12%和 12%，偏差范围降低幅度分别达到 11%、2%和 16%。可见，利用振动后 FFF 样件 X 方向的表面粗糙度和偏差范围都有所减小，但振动幅值的影响效果并不明显。

图 9 不同幅值的 700 Hz 振动场下样件 X 方向表面粗糙度

表 7 不同幅值的 700 Hz 的振动场下样件 X 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	10.18	—	4.98	—
$R_{700}^{0.1}-i$	9.58	5.8	4.41	11
$R_{700}^{0.2}-i$	8.89	12	4.88	2.0
$R_{700}^{0.3}-i$	8.93	12	4.17	16

类似的,图 10、11 分别展示了 800 Hz、900 Hz 振动场下不同振动幅值对样件 X 方向表面粗糙度和偏差范围的影响规律,具体数值如表 8、9 所示。同样可见,利用 800 Hz、900 Hz 不同幅值的振动后 FFF 样件 X 方向粗糙度值几乎相同,与其相对应的偏差范围也基本一致。因此,频率相同、幅值不同的振动场对 FFF 样件的 X 方向表面粗糙度和偏差影响有限,改善效果并不明显。

图 10 不同幅值的 800 Hz 振动场下样件 X 方向表面粗糙度

图 11 不同幅值的 900 Hz 振动场下样件 X 方向表面粗糙度

表 8 不同幅值的 800 Hz 振动场下样件 X 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	10.18	—	4.98	—
$R_{800}^{0.1}-i$	9.67	5	4.93	1
$R_{800}^{0.2}-i$	9.44	7.3	4.46	10
$R_{800}^{0.3}-i$	10.07	1.1	4.10	18

表 9 不同幅值的 900 Hz 振动场下样件 X 方向表面粗糙度测试结果

样件($i=1\sim3$)	表面粗糙度/ μm	降幅(%)	偏差范围/ μm	降幅(%)
R_0^0-i	10.18	—	4.98	—
$R_{900}^{0.1}-i$	9.28	8.8	4.70	5.6
$R_{900}^{0.2}-i$	9.21	9.5	4.77	2.1
$R_{900}^{0.3}-i$	9.60	5.7	4.45	11

4 结论

通过试验研究了利用不同形式的中低频振动对熔丝制造(FFF)产品表面质量的影响规律。具体结论如下所述。

(1) 在 FFF 成型过程中,利用中低频振动(900 Hz 以内)可以明显降低 FFF 产品 Z 方向的表面粗糙度和偏差范围,且随着振动频率或幅值的增加,两者将进一步降低。

(2) 利用振动对 FFF 产品的 X 方向的表面粗糙度平均值和偏差范围影响有限,其效果可忽略不计。

(3) 利用中低频振动可以总体改善 FFF 产品的表面质量,且随着振动频率或幅值的增大表面质量进一步提升。

(4) 提出利用压电陶瓷引入中低频振动以改善 FFF 产品表面质量的方法,研究内容为 FFF 技术的进一步发展做出了积极的贡献,同时也为后续的机理研究提供了研究的依据和基础。

参 考 文 献

- [1] SIMON F, MÉLANIE D. Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 1573-1587.
- [2] CHEN Lian, HE Yong, YANG Yingxin, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 89: 3651-3660.
- [3] OMAR A, SYED H, JAHAR L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects[J]. Advances in Manufacturing, 2015, 3: 42-53.
- [4] 何新英, 陶明元, 叶春生. FDM 工艺成形过程中影响成形精度的因素分析[J]. 机械电子, 2004(9): 77-78.
HE Xinying, TAO Mingyuan, YE Chunsheng, Analysis for factors that affect the precision of the shaped pieces on fused deposition modeling process[J]. Mechanics and Electronics, 2004(9): 77-78.
- [5] LI Zhixiong, ZHANG Ziyang, SHI Junchuan, et al. Prediction of surface roughness in extrusion-based additive manufacturing with machine learning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 57: 488-495.
- [6] KIM M K, LEE H I, KIM H C. Effect of fabrication parameters on surface roughness of FDM parts[J]. International Journal of Precision Engineering and

- Manufacturing, 2018, 1(19): 137-142.
- [7] YANG Leipeng, LI Shujun, LI Yan, et al. Experimental investigations for optimizing the extrusion parameters on FDM PLA printed parts[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 28(1): 169-182.
- [8] CHEN Lan, ZHANG Xinzhou. Modification the surface quality and mechanical properties by laser polishing of Al/PLA part manufactured by fused deposition modeling[J]. Applied Surface Science, 2019, 429: 765-775.
- [9] JAYANTH N, SENTHIL P, PRAKASH C, Effect of chemical treatment on tensile strength and surface roughness of 3D-printed ABS using the FDM process[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(3): 155-163.
- [10] BENIAK J, KRIŽAN P, ĽUBOMÍR Š, et al. Roughness and compressive strength of FDM 3D printed specimens affected by acetone vapour treatment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 297: 1-8.
- [11] SUNPREET S, MANJEET S, CHANDER P, et al. Optimization and reliability analysis to improve surface quality and mechanical characteristics of heat-treated fused filament fabricated parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102: 1521-1536.
- [12] LI Guiwei, ZHAO Ji, JIANG Jili, et al. Ultrasonic strengthening improves tensile mechanical performance of fused deposition modeling 3D printing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96: 2747-2755.
- [13] 盛敏刚, 严永新, 张金花, 等. 环境友好型生物降解材料聚乳酸的性能研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 499-503.
- SHENG Mingang, YAN Yongxin, ZHANG Jinhua, et al. Study on properties of environment-friendly biodegradable material polyactic acid[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(9): 499-503.
-
- 作者简介: 姜世杰(通信作者), 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为振动利用工程。
E-mail: jiangsj@me.neu.edu.cn