

利用振动改善 FFF 薄板抗拉性能的实验研究*

姜世杰, 董天阔, 陈丕峰, 孙明宇, 戴卫兵

(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳, 110004)

摘要 熔丝制造成型 (fused filament fabrication, 简称 FFF) 技术因其操作简单、成本低廉且环境友好等特点, 成为普及范围最广的一种快速成型技术, 但由于逐层沉积的制造工艺, 其产品质量很难与传统加工方式得到的零件相媲美。笔者将压电陶瓷片与 FFF 快速成型设备相结合, 利用振动改善打印产品的机械性能。首先, 利用压电陶瓷将普通 FFF 快速成型设备改装成振动式 FFF 设备; 其次, 制备施加振动前和不同形式振动后的拉伸样件, 并完成拉伸实验; 最后, 通过对比不同样件的应力应变关系, 分析了振动对 FFF 制品抗拉性能的影响规律。研究结果表明, 利用振动能够显著提高 FFF 制品的抗拉强度和弹塑性能, 并有效降低其各向异性特点。

关键词 熔丝制造成型; 压电陶瓷; 利用振动; 抗拉强度; 弹塑性能

中图分类号 TH113.1

引言

随着社会的快速发展及科技水平的提高, 人们已经不再满足于传统的加工手段, 开始探索更为高效、便捷的加工方式。快速成型技术为制造业提供了一种新型的制造手段^[1]。FFF 技术因操作简单、设备成本低廉、原材料范围广和绿色安全等特点, 成为使用范围最广的快速成型技术之一。FFF 技术的工作原理是将丝状的原材料通过送料管送入热熔喷头中, 使其融化, 然后喷头通过设计好的三维打印路径和轨迹进行运动, 同时将熔融状态的材料挤出到所指定的位置并凝固成型, 逐层打印层层累加, 最终堆积成实体, 完成工件的制造^[2-4]。

目前, FFF 工件的机械性能无法与传统加工方式制造的工件相媲美, 成为阻碍 FFF 技术进一步发展的重要因素之一。因此, 如何提高 FFF 快速成型产品的机械性能, 对 FFF 快速成型技术的发展起到至关重要的作用。很多学者对此进行了大量研究。文献[5]通过在聚乳酸 (polylactic acid, 简称 PLA) 中加入铁或者铜等材料, 发现金属的加入可以改进打印样件的刚度和柔韧性。Goh 等^[6]研究了碳纤维和玻璃纤维对快速成型热塑性塑料力学性能和断裂模式的影响。由于不同的材料具有不同的热性能和冷却速度, 需要限制混合材料的比例, 因此限制了产品

强度的提高。Lederle 等^[7]观察到在氮气环境下, PLA 材料在打印过程中的氧化分解被抑制, 从而改善了快速成型 PLA 样品的力学性能。Jin 等^[8]采用二氯甲烷蒸汽溶解 PLA 样品表面的阶梯, 研究了化学工艺对快速成型样品拉伸力学性能的影响。以上方法成本较高且不易实现, 还会使零件表面粗糙度增加, 不利于大范围推广应用。文献[9]研究了不同光栅角度、间隙尺寸、打印层厚度、路径宽度和加热温度等参数对快速成型试样拉伸和弯曲力学性能的影响, 但其原理较复杂, 且不易调控。Wu 等^[10]对加工好的样件进行超声振动后处理, 分析超声振动对 FFF 快速成型丙烯腈·丁二烯·苯乙烯 (acrylonitrile butadiene styrene, 简称 ABS) 样品弯曲和动态力学性能的影响。研究发现, 超声波强化处理使 ABS 样品的抗弯强度提高了 10.8%, 弯曲模量提高了 12.5%, 提高了动态力学性能, 但其并不是在打印样件过程中施加振动, 且超声振动设备较大, 与 FFF 快速成型设备结合较为困难。在快速成型领域, 文献[11]利用高功率激光系统、五轴数控加工中心、材料粉末输送系统和电磁激振器等设备组建了振动式的激光粉末沉积 (laser powder deposition, 简称 LPD) 快速成型设备。其中, 激振器与工作平台相连接来控制其振动的幅度、频率及方向。研究发现, 利用振动可以有效减少 LPD 快速成型零件内部

* 国家自然科学基金资助项目 (51705068); 中央高校基本科研业务费资助项目 (N180703009, N170302001)

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-11-25

孔洞缺陷的数量和尺寸(最高可达 80%),进而有效提高零件的机械强度和弹塑性(延展性)。用此方法获得的零件内部组织更加细致,结构硬度分布也更加均匀。基于相似的概念,在 FFF 快速成型设备热熔喷头处施加振动激励在改进成品的机械性能方面有很大的潜力。

笔者将压电陶瓷与 FFF 快速成型设备相结合,将振动引入到 FFF 成型过程中,通过控制、调节引入振动的幅值和频率,获取施加振动前以及不同形式振动作用后的 FFF 样件。通过对比实验结果,分析了振动对 FFF 薄板抗拉强度和弹塑性的影响规律。

1 FFF 快速成型设备改装

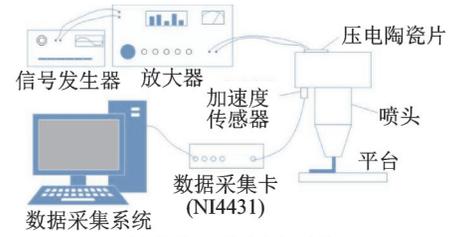
本研究使用的 FFF 快速成型设备型号为 D-FORCE V2,机身尺寸为 400 mm×470 mm×860 mm,喷嘴直径为 0.4 mm,工作底盘直径为 260 mm, z 方向可到达的最高点为 300 mm,其 3 个并联臂可以到达指定的任意位置,并能进行长时间的打印工作。

为了将振动引入 FFF 加工过程,将压电陶瓷固定在 FFF 熔融喷头处,利用压电陶瓷(型号为 P-5 I,尺寸为 40 mm×10 mm×0.3 mm)的逆压电效应,通过放大器(型号为 HPV-3C0150A0300D)将信号发生器(型号为 VC2015H)产生的正弦波形电信号放大 15 倍,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)等拾振设备确定熔融喷头的实际振动状态。振动式 FFF 快速成型设备示意图如图 1 所示。其中,信号发生器具有调节振动频率和输入电压的功能,可以单独控制用来改变振动的频率和幅值。

2 拉伸实验研究

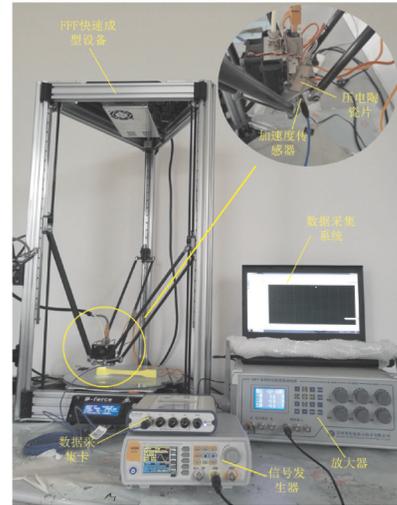
2.1 试件准备

根据 ISO 527-2-2012 标准,利用 FFF 快速成型设备制备了外形尺寸如图 2 所示的拉伸实验试件,其长度为 158 mm,测试宽度为 10 mm,厚度为 2.4 mm。试件材料为聚乳酸,一种生物基可再生生物降解材料,具有热稳定性好、易加工和生物相容性强等优点,因此得到了广泛应用。



(a) 振动式 FFF 设备原理图

(a) The schematic diagram of the vibrating FFF equipment



(b) 振动式 FFF 设备

(b) The vibrating FFF equipment

图 1 振动式 FFF 快速成型设备

Fig.1 The vibrating FFF rapid prototyping equipment

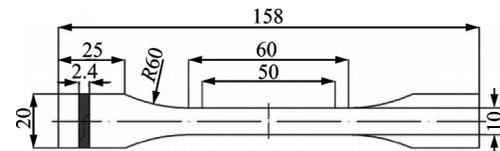


图 2 拉伸实验试件(单位:mm)

Fig.2 Tensile test specimen(unit:mm)

本研究共加工了 30 个试件,纤维方向是纵向的试件有 15 个(与拉伸方向平行,为 x 方向打印),其中:3 个为施加振动前的试件(表示为 $X_0^0_i, i=1\sim 3$);6 个为 900 Hz 振动场下试件(振动幅值为 0.18 g 和 0.24 g 的试件各 3 个,分别表示为 $X_{900}^{0.18g}_i$ 和 $X_{900}^{0.24g}_i, i=1\sim 3$);另有 6 个是振动幅值为 0.2 g 振动场下试件(振动频率分别为 150 Hz 和 200 Hz 的试件各 3 个,分别表示为 $X_{150}^{0.2g}_i$ 和 $X_{200}^{0.2g}_i, i=1\sim 3$)。纤维方向是横向的试件有 15 个(与拉伸方向垂直,为 z 方向打印),其中:3 个为施加振动前的试件(表示为 $Z_0^0_i, i=1\sim 3$);6 个为 900 Hz 振动场下试件(振动幅值为 0.18 g 和 0.24 g 的试件各 3 个,分别表示为 $Z_{900}^{0.18g}_i$ 和 $Z_{900}^{0.24g}_i, i=1\sim 3$);另有 6 个是振动幅值为 0.2 g 振动场下试件(振动频率分别为 150 Hz 和

200 Hz 的试件各 3 个,分别表示为 $Z_{150}^{0.2g}_i$ 和 $Z_{200}^{0.2g}_i$, $i=1\sim 3$)。除了施加振动的频率或者幅值不同之

外,打印机的其他所有设置均是相同的。试件的具体参数设置如表 1 所示。

表 1 试件的具体参数 ($i=1\sim 3$)
Tab.1 Specific parameters of specimens ($i=1\sim 3$)

试件 ($i=1\sim 3$)	$X_{0_i}^0$	$X_{900}^{0.18g}$	$X_{900}^{0.24g}$	$X_{150}^{0.2g}$	$X_{200}^{0.2g}$	$Z_{0_i}^0$	$Z_{900}^{0.18g}$	$Z_{900}^{0.24g}$	$Z_{150}^{0.2g}$	$Z_{200}^{0.2g}$
打印方向	x 方向		z 方向							
打印层高度/mm	0.15									
挤出宽度/mm	0.4									
打印速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	60									
挤出温度/ $^{\circ}\text{C}$	200									
平台温度/ $^{\circ}\text{C}$	55									

2.2 实验方法

根据 ISO 527-2-2012 标准,利用拉伸实验机(型号为 SHIMADZU EHF-EV200K2-040)对全部 30 个试件进行拉伸实验。该设备的测量精度为 $\pm 0.5\%$,负载力范围为 $0\sim 200\text{ kN}$,加载速率设置为 5 mm/min ,拉伸实验设备和试件如图 3 所示。



图 3 拉伸实验设备和试件

Fig.3 Tensile test equipment and specimen

由于 PLA 材料的机械性能远小于钢铁等金属材料,因此拉伸实验机对试件两端的夹紧力仅设置为 5 MPa ,以防止试件损坏而影响实验结果。测得应力 σ 的公式为

$$\sigma = F/S \tag{1}$$

其中: F 为施加在试件上的力; S 为试件的横截面积。

应变 ϵ 的公式为

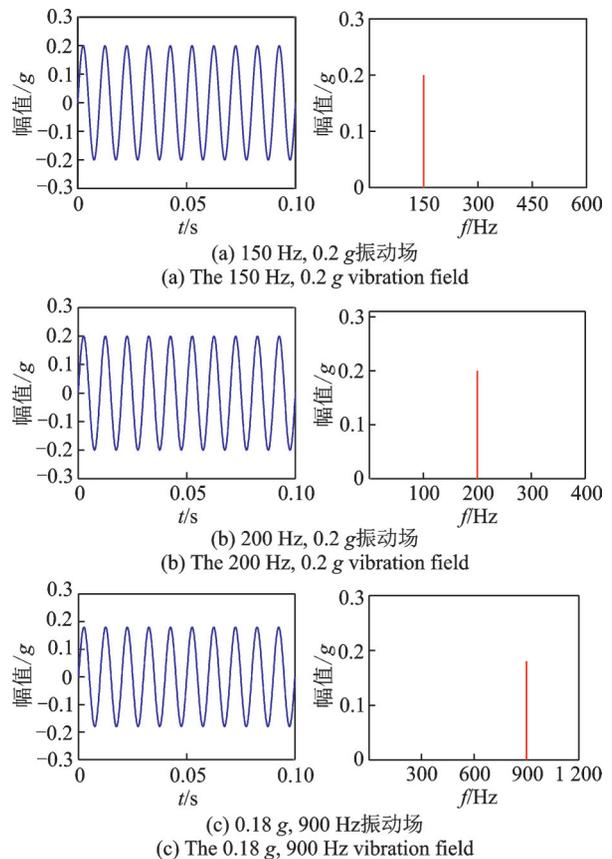
$$\epsilon = \delta/L \tag{2}$$

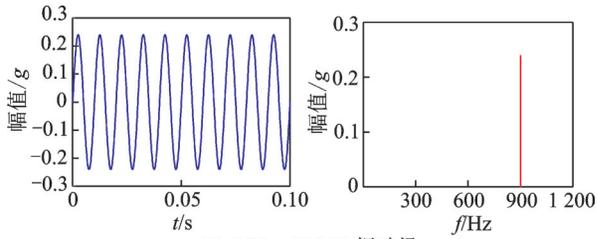
其中: δ 为沿着拉伸方向的伸长量; L 为试件的原始长度。

3 实验结果

3.1 熔融喷头振动分析

利用压电陶瓷将振动场施加于熔融喷头,通过拾振设备确定喷头的实际振动状态,由此控制熔融喷头产生不同形式的振动状态(竖直方向)如图 4 所示。





(d) 0.24 g, 900 Hz 振动场
(d) The 0.24 g, 900 Hz vibration field

图 4 熔融喷头的振动状态

Fig.4 The vibration state of the extrusion liquefier

竖直方向的简谐振动表达式为

$$x = A \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

其中: x 为加速度; A 为振幅; ω 为圆频率; t 为时间; α 为初相, $\alpha = 0$ 。

3.2 x 方向试件

3.2.1 幅值相同、频率不同振动场的影响

对比分析 x 方向打印的试件 X_0^0 、 $X_{150}^{0.2g}$ 以及 $X_{200}^{0.2g}$ ($i=1\sim 3$) 的应力-应变关系,可以确定振动幅值相同、频率不同的振动场对试件抗拉性能的影响规律。图 5 为幅值相同、频率不同的振动对 x 方向试件抗拉性能的影响曲线。可以看出,施加振动后的试件比施加振动前的试件抗拉强度更好,且应变数值更大,弹塑性更好。

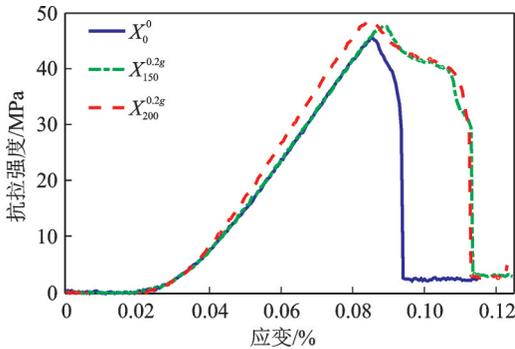


图 5 幅值相同、频率不同的振动对 x 方向试件抗拉性能的影响

Fig.5 The effect of the vibration with the same amplitude but different frequencies on the tensile property of x -direction specimens

幅值相同、频率不同的振动场下, x 方向试件测试结果如表 2 所示。由表 2 可知:施加振动前的试件 X_0^0 的平均抗拉强度为 45.46 MPa,施加振动进行加工的试件 $X_{150}^{0.2g}$ 和 $X_{200}^{0.2g}$ 的平均抗拉强度分别为 47.69 MPa 和 48.51 MPa,抗拉强度提高幅度为

4.9 % 和 6.7 %;在极限应变方面,施加振动前的试件 X_0^0 的平均应变为 0.095 %,而试件 $X_{150}^{0.2g}$ 和 $X_{200}^{0.2g}$ 的平均应变值分别为 0.115 % 和 0.116 %,提升幅度达 21 % 和 22 %。可见,施加振动后,FFF 试件的抗拉性能(抗拉强度和弹塑性)得到了明显提升,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 x 方向试件测试结果

Tab.2 Test results of x -direction specimens fabricated under the vibration with the same amplitude but different frequencies

试件($i=1\sim 3$)	X_0^0	$X_{150}^{0.2g}$	$X_{200}^{0.2g}$
抗拉强度/MPa	45.46	47.69	48.51
增幅/%	—	4.9	6.7
极限应变/%	0.095	0.115	0.116
增幅/%	—	21	22

3.2.2 频率相同、幅值不同振动场的影响

根据相同的实验过程,对比分析 x 方向打印的试件 X_0^0 、 $X_{900}^{0.18g}$ 以及 $X_{900}^{0.24g}$ 的应力-应变关系,可以确定频率相同、幅值不同的振动场对试件抗拉性能的影响规律。图 6 为频率相同、幅值不同的振动对 x 方向试件抗拉性能的影响。可以看出,施加振动进行加工的试件的抗拉强度和弹塑性明显优于施加振动前的试件。

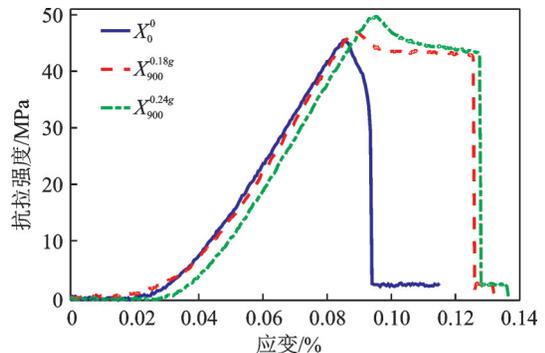


图 6 频率相同、幅值不同的振动对 x 方向试件抗拉性能的影响

Fig.6 The effect of the vibration with the same frequency but different amplitudes on the tensile property of x -direction specimens

频率相同、幅值不同的振动场下 x 方向试件测试结果如表 3 所示。由表 3 可知:施加振动前的试件 X_0^0 的平均抗拉强度为 45.46 MPa,施加振动进行加工的试件 $X_{900}^{0.18g}$ 和 $X_{900}^{0.24g}$ 的平均抗拉强度分别为 46.99 MPa 和 49.71 MPa,抗拉强度提高幅度为

3.4 %和9.3 %;在极限应变方面,施加振动前的试件 $X_0^0_i$ 的平均应变为0.095 %,而试件 $X_{900}^{0.18g}_i$ 和 $X_{900}^{0.24g}_i$ 的平均应变分别为0.126 %和0.128 %,提升幅度达33 %和35 %。可见,施加振动后,FFF试件的抗拉性能(抗拉强度和弹塑性)得到了明显提升,并且随着振动幅度的增大而进一步增大。

表3 频率相同、幅值不同的振动场下x方向试件测试结果

Tab.3 Test results of x-direction specimens fabricated under the vibration with the same frequency but different amplitudes

试件($i=1\sim3$)	$X_0^0_i$	$X_{900}^{0.18g}_i$	$X_{900}^{0.24g}_i$
抗拉强度/MPa	45.46	46.99	49.71
增幅/%	—	3.4	9.3
极限应变/%	0.095	0.126	0.128
增幅/%	—	33	35

3.3 z方向试件

3.3.1 幅值相同、频率不同振动场的影响

对比分析z方向打印的试件 $Z_0^0_i$, $Z_{150}^{0.2g}_i$ 以及 $Z_{200}^{0.2g}_i$ 的应力-应变关系,可以确定加速度幅值相同、频率不同的振动场对试件抗拉性能的影响规律。图7为幅值相同、频率不同的振动对z方向试件抗拉性能的影响曲线。可以看出,施加振动后的试件比施加振动前的试件的抗拉强度更好,且应变数值更大,弹塑性更好。

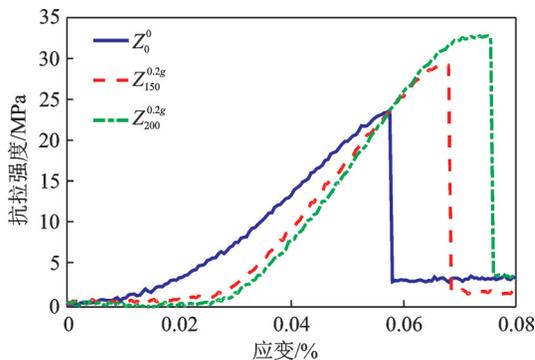


图7 幅值相同、频率不同的振动对z方向试件抗拉性能的影响

Fig.7 The effect of the vibration with the same amplitude but different frequencies on the tensile property of z-direction specimens

幅值相同、频率不同的振动场下z方向试件测试结果如表4所示。由表4可知,施加振动前的试件 $Z_0^0_i$ 的平均抗拉强度为23.68 MPa,平均极限应变

为0.057 %。利用振动进行加工的样件 $Z_{150}^{0.2g}_i$ 和 $Z_{200}^{0.2g}_i$ 的平均抗拉强度分别为29.36 MPa和32.79 MPa,平均极限应变分别为0.070 %和0.073 %。抗拉强度提高幅度为24 %和38 %,极限应变提升幅度为23 %和28 %。可见,施加振动后,FFF试件的抗拉性能(抗拉强度和弹塑性)得到了明显的提升,且随着振动频率的增大而逐渐增大。

表4 幅值相同、频率不同的振动场下z方向试件测试结果

Tab.4 Test results of z-direction specimens fabricated under the vibration with the same amplitude but different frequencies

试件($i=1\sim3$)	$Z_0^0_i$	$Z_{150}^{0.2g}_i$	$Z_{200}^{0.2g}_i$
抗拉强度/MPa	23.68	29.36	32.79
增幅/%	—	24	38
极限应变/%	0.057	0.070	0.073
增幅/%	—	23	28

3.3.2 频率相同、幅值不同振动场的影响

根据相同的实验过程,对比分析z方向打印的试件 $Z_0^0_i$, $Z_{900}^{0.18g}_i$ 以及 $Z_{900}^{0.24g}_i$ 的应力-应变关系,可以确定振动频率相同、幅值不同的振动场对试件抗拉性能的影响规律。图8为频率相同、幅值不同的振动对z方向试件抗拉性能的影响曲线。频率相同、幅值不同的振动场下z方向打印试件测试结果

如表5所示。可以看到,施加振动前的试件 $Z_0^0_i$ 的平均抗拉强度为23.68 MPa,平均极限应变为0.057 %;利用振动进行加工的样件 $Z_{900}^{0.18g}_i$ 和 $Z_{900}^{0.24g}_i$ 的平均抗拉强度分别为37.09 MPa和39.57 MPa,平均极限应变分别为0.076 %和0.079 %。抗拉强度提高幅度为57 %和67 %,极限

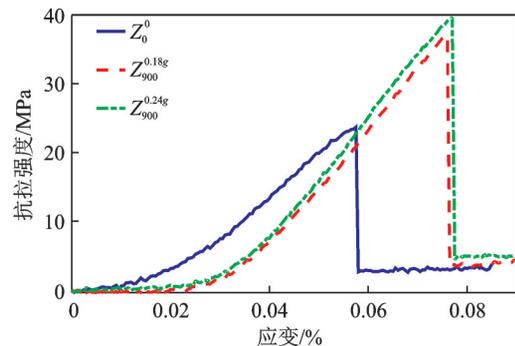


图8 频率相同、幅值不同的振动对z方向试件抗拉性能的影响

Fig.8 The effect of the vibration with the same frequency but different amplitudes on the tensile property of z-direction specimens

应变提升幅度为 33 %和 39 %。可见,施加振动后, FFF 试件的抗拉性能(抗拉强度和弹塑性)得到了明显的提升,并且振动幅值越大,试件的抗拉强度和弹塑性越好。

表 5 频率相同、幅值不同的振动场下 z 方向打印试件测试结果

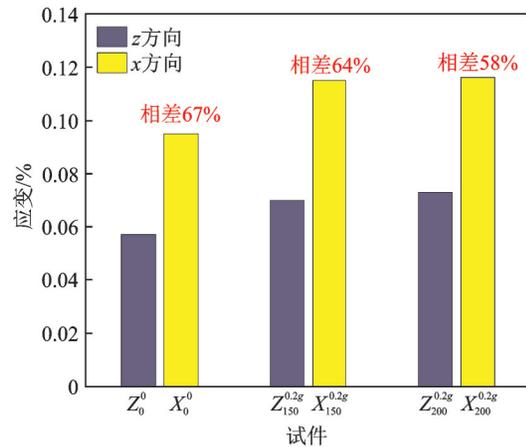
Tab.5 Test results of z-direction specimens fabricated under the vibration with the same amplitude but different frequencies

试件($i=1\sim 3$)	$Z_{0_i}^0$	$Z_{900}^{0.18g_i}$	$Z_{900}^{0.24g_i}$
抗拉强度/MPa	23.68	37.09	39.57
增幅/%	—	57	67
极限应变/%	0.057	0.076	0.079
增幅/%	—	33	39

3.4 正交各向异性分析

图 9,10 为 z 方向和 x 方向打印试件的平均抗拉强度和极限应变的柱状图。可见,施加振动前的 z 和 x 方向打印的试件 Z_0^0 和 X_0^0 平均抗拉强度分别为 23.68 MPa 和 45.46 MPa,两者相差 92 %;相应的平均极限应变分别为 0.057 %和 0.095 %,相差 67 %。因此,施加振动前的普通 FFF 薄板的正交各向异性特点明显。

当施加振动幅值相同(0.2 g)、频率分别为 150 和 200 Hz 的振动时,z 和 x 方向试件($Z_{150}^{0.2g}$ 、 $X_{150}^{0.2g}$ 以及 $Z_{200}^{0.2g}$ 和 $X_{200}^{0.2g}$)的平均抗拉强度分别相差 62 %和 48 %;相应的平均极限应变值分别相差 64 %和 58 %,如图 9 所示。可见,利用振动后,FFF



(b) 幅值相同、频率不同的振动对z和x方向试件正交各向异性应力特点的影响

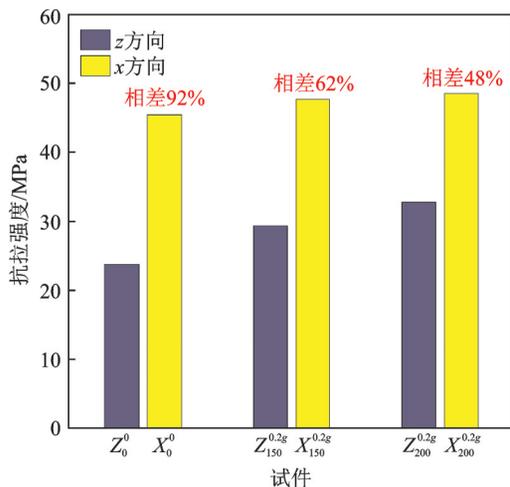
(b) The effect of the vibration with the same amplitude but different frequencies on the orthotropic stress of the specimens fabricated in z and x direction

图 9 幅值相同、频率不同的振动场下 z 和 x 方向试件的平均各向异性对比图

Fig.9 Comparison of the average anisotropy of the specimens fabricated in z and x direction under the vibration with the same amplitude but different frequencies

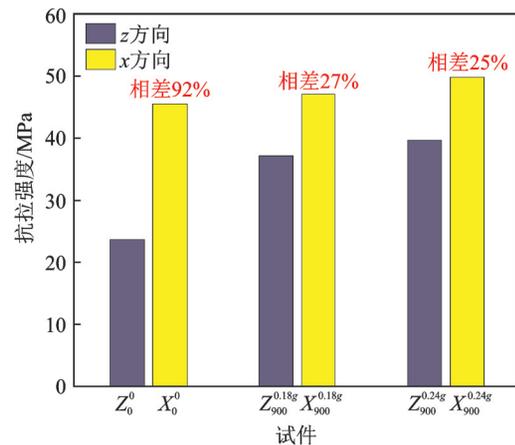
薄板的正交各向异性特点显著降低,且随着频率的增大而进一步降低。

当施加频率相同(900 Hz)、振动幅值分别为 0.18 g 和 0.24 g 的振动时,z 和 x 方向试件($Z_{900}^{0.18g}$ 、 $X_{900}^{0.18g}$ 以及 $Z_{900}^{0.24g}$ 和 $X_{900}^{0.24g}$)的平均抗拉强度分别相差 27 %和 25 %;相应的平均极限应变值分别相差 65 %和 62 %,如图 10 所示。可见,施加振动后,FFF 薄板的正交各向异性特点显著降低,且随着振动幅值的增大而进一步降低。



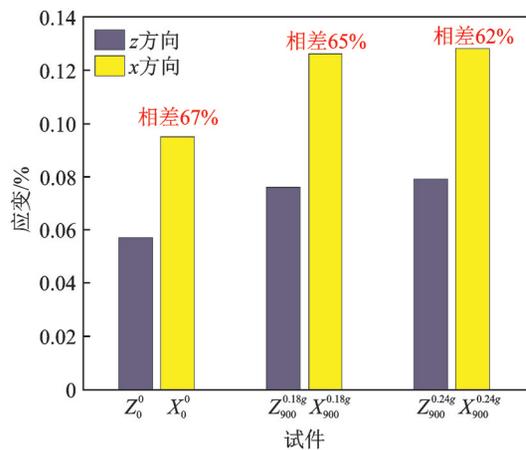
(a) 幅值相同、频率不同的振动对z和x方向试件正交各向异性应力特点的影响

(a) The effect of the vibration with the same amplitude but different frequencies on the orthotropic stress of the specimens fabricated in z and x direction



(a) 频率相同、幅值不同的振动对z和x方向试件正交各向异性应力特点的影响

(a) The effect of the vibration with the same frequency but different amplitudes on the orthotropic stress of the specimens fabricated in z and x direction



(b) 频率相同、幅值不同的振动对z和x方向试件正交各向异性应力特点的影响

(b) The effect of the vibration with the same frequency but different amplitudes on the orthotropic stress of the specimens fabricated in z and x direction

图10 频率相同、幅值不同的振动场下z和x方向试件的平均各向异性对比图

Fig.10 Comparison of the average anisotropy of the specimens fabricated in z and x direction under the vibration with the same frequency but different amplitudes

4 结论

1) 在FFF快速成型中,施加振动进行加工的试件抗拉性能(抗拉强度和弹塑性)明显优于施加振动前的试件,并且正交各向异性特点改善明显。

2) 对于施加振动后的试件,当施加振动的幅值相同、频率不同时,频率越大,试件的抗拉强度越大,弹塑性越好,正交各向异性改善越明显。

3) 对于施加振动后的试件,当施加振动的频率相同、幅值不同时,幅值越大试件的抗拉强度越大,弹塑性越好,正交各向异性改善也越明显。

4) 将压电陶瓷与FFF快速成型设备相结合,将振动引入到FFF成型过程中,以改善FFF产品的机械性能,为FFF技术的进一步发展做出了一定的贡献。

参 考 文 献

- [1] HU D P, WEN Z J, CHEN Y H, et al. Surface-molding accuracy of FDM thin plastic parts molded by 3D printing [J]. China Plastics, 2017, 31(2):82-87.
- [2] HESAMODIN J S H, MASOOD W Q. Dynamic response of FDM made ABS parts in different part orientations [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2493(1496): 291-294.

- [3] SHI Q J, XIAO J J, CHENG G Y, et al. Process optimization of mechanical properties for PLA material via 3D printing [J]. Green Packaging, 2018(8): 54-61.
- [4] ARIVAZHZGAN A, MASOODSH R. Dynamic mechanical properties of ABS material processed by fused deposition modelling [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2012, 2(3): 2013-2014.
- [5] KAMALJIT S B, RUPINDER S, HARWINDER S. Development of rapid tooling using fused deposition modeling: a review [J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(2): 281-299.
- [6] GOH V, DIKSHIT A P, NAGALINGAM G L, et al. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics [J]. Materials Design, 2018, 137: 79-89.
- [7] LEDERLE F, MEYER F, BRUNOTTE G P, et al. Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2016, 1: 3-7.
- [8] JIN Y F, WAN Y, ZHANG B, et al. Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties [J]. Journal of Materials Processing Tech, 2017, 240: 233-239.
- [9] MICHAEL D, IMAN T, SAMY J. Mechanical behaviour of ABS: an experimental study using FDM and injection moulding techniques [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 39-45.
- [10] WU W Z, JIANG J L, JIANG H, et al. Improving bending and dynamic mechanics performance of 3D printing through ultrasonic strengthening [J]. Materials Letters, 2018, 220: 317-320.
- [11] LAGE Y E, NEVES M M, MAIA N M, et al. Force transmissibility versus displacement transmissibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(22): 5708-5722.



第一作者简介:姜世杰,男,1985年1月生,博士、讲师。主要研究方向为熔丝加工成型增材制造技术、机械系统振动噪声的测试、分析与控制以及振动利用等。曾发表《FDM薄板振动特性的理论与实验研究》(《东北大学学报(自然科学版)》2019年第40卷第4期)等论文。

E-mail:jiangsj@me.neu.edu.cn