

基于光频域反射技术的增材制造聚乳酸酯 温度分布特征研究

黄金生^{1,2,3}, 洪成雨^{1,2,3,4*}, 杨强^{1,3}, 孙晓辉^{1,2,3,4}

¹深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060;

²深圳市地铁地下车站绿色高效智能建造重点实验室, 广东 深圳 518060;

³深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060;

⁴滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 增材制造(AM)技术依据数字化模型,将材料以逐层铺叠的方式制成产品。在逐层铺叠过程中,模型内部不同位置的温度变化较为复杂,为了监测增材制造过程中层叠结构打印模型内部不同位置的温度变化,本研究利用光频域反射技术(OFDR),将分布式光纤嵌入聚乳酸酯(PLA)材料模型内部,实现了对打印过程中任一时刻材料模型内部不同位置的温度变化的监测,同时考虑填充密度对模型温度变化的影响,设置填充密度分别为 20%、40%、60%、80%、100%。结果表明,在打印过程中,模型在同一密度下不同位置点的内部温度变化量趋于一致,温度变化量范围为 20~40 °C;根据不同填充密度下模型的温度变化量曲线,将打印过程划分为 5 个典型阶段,包括光纤嵌入阶段、温度检测孔洞封装阶段、模型填充封装阶段、模型封顶阶段、模型温度回归阶段。分析模型填充封装阶段最高峰值点和模型封顶阶段完成点的温度变化量,发现 100%填充密度下 AM 过程中模型核心最大温度较 20%填充密度下高 15 °C,而且随着模型填充密度的增大,打印材料对温度消散的阻碍作用增强。

关键词 光纤光学; 光频域反射技术; 增材制造; 温度监测; 聚乳酸酯

中图分类号 TP212; TH74 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1606001

Temperature Distribution Characteristics of Polylactic Acid in Additive Manufacturing Based on Optical Frequency Domain Reflectometry

Huang Jinsheng^{1,2,3}, Hong Chengyu^{1,2,3,4*}, Yang Qiang^{1,3}, Sun Xiaohui^{1,2,3,4}

¹College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Shenzhen Key Laboratory of Green, Efficient and Intelligent Construction of Metro Underground Metro Station, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³Underground Polis Academy, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

⁴Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities (Shenzhen University), Ministry of Education, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Additive manufacturing (AM) is a technology that makes materials into products through layer-by-layer stacking according to a digital model. Nevertheless, during the layer-by-layer stacking, the temperature change at different positions inside the model is complicated. To measure the temperature change at different positions inside the stacked structure printing model during the AM process, in this study, we embed the distributed fiber into the polylactic acid (PLA) material model by optical frequency domain reflectometry (OFDR). The temperature change

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-02-24; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078303)、国家自然科学基金高铁联合基金项目(U2034204)

通信作者: *cyhong@szu.edu.cn

at different positions inside the material model can be measured at any time during the printing process. Considering the effect of filling density on the temperature change in the model, the filling density is set as 20%, 40%, 60%, 80%, and 100%, respectively. The results show that the internal temperature variation in the model with the same density at different locations tends to be consistent during the printing process, and the temperature change range is 20–40 °C. According to the temperature variation curves in the model at different filling densities, the printing process is divided into five typical stages, including fiber embedding, thermometer hole encapsulation, model filling encapsulation, model capping, and model temperature regression. After analyzing the temperature changes at the peak point of model filling encapsulation and at the completion point of model capping, we find that the maximum temperature at the AM core with a 100% filling density is 15 °C higher than that with a 20% filling density, and with the increase in the filling density of the model, the printing material further hinders temperature dissipation.

Key words fiber optics; optical frequency domain reflectometry; additive manufacturing; temperature monitoring; polylactic acid

OCIS codes 060.2300; 160.5740; 040.1880

1 引言

增材制造(AM)技术俗称 3D 打印,是一种使用可黏合材料,以数字模型文件为基础构造物体的逐层打印技术。当前,3D 打印在航空航天、汽车、医疗健康等领域的市场应用已经取得积极的进展。与传统制造业相比,增材制造技术利用计算机对物件的高精度分解实现对结构及其复杂构件的制造;其次,采用增材制造技术制造构件时无需传统器具及人工,即可将三维模型转化为实物,减少了制作过程中产生的误差^[1-5]。

近年来针对 3D 打印的各种研究越来越多,Zhang 等^[6]成功结合 3D 打印技术与 FBG(Fiber Bragg Grating)传感器制作出液压传感器,并且通过在现场测试中对比传统传感器,成功验证了液压传感器的可靠性。Hong 等^[7-9]结合 3D 打印技术与 FBG 传感器,成功研发了各种新颖的岩土传感器;鲍成志等^[10]通过将光纤布拉格光栅植入碳纤维耗材中,制备了具有不同灵敏度的土压力传感器;Yao 等^[11]研究了在熔融沉积过程中聚乳酸酯(PLA)材料的拉伸破坏强度和分离角,发现打印材料在拉伸载荷作用下失效时,存在两种不同的失效模式和一个特殊的分离角。然而,目前的研究大多集中于增材制造的应用、不同打印材料运用等,对于整个增材制造过程中材料特征分析等基础研究十分缺乏。在每一层打印耗材的沉积过程中,热塑性耗材要经历一个熔化和快速冷却的过程并随之发生从熔融态到固态的相变。此过程会在打印模型内产生残余应变和残余温度,这些缺陷会显著影响打印模型尺寸精度,引起翘曲、层间分层等。Kousiatza 等^[12]通过将光纤布拉格光栅植入打印模型核心位置,进行了应变和温度测量,揭示了 3D 打印过程中模型核心位

置点的应变变化特征,然而点传感器在应用上是存在局限性的;Saenz 等^[13]总结了不同 3D 打印设置对 ABS 聚合物模型各力学性能的影响;Wang 等^[14]利用光学背散射反射仪(OBR)的分布式光纤揭示了 3D 打印构件内部残余应变的分布特征。现有的研究中鲜有对 3D 打印过程中模型内部的不同位置温度变化的监测,3D 打印过程中,耗材出丝较细,且堆叠过程形状各不相同,模型内部的温度变化十分复杂,因此利用光频域反射技术(OFDR)对增材制造过程中模型内部的温度特征进行研究,对于打印耗材的选择,打印工艺的调整、改进,以及打印模型主体结构的设计、力学特征分析等起着至关重要的作用。

目前应用较多的光纤传感技术主要包括以下两种:

1) 基于光纤布拉格光栅(FBG)的光纤传感技术。FBG 是通过紫外光曝光技术,使具有光敏性的光纤纤芯产生周期性的折射率分布,它对波长具有选择性,能够使特定波长的光反射,而使其他光透过^[15]。当 FBG 所处外界环境的温度或应力发生变化,FBG 的栅区长度或有效折射率发生改变,进而引起 FBG 特定中心波长的移动。FBG 传感技术是准分布式测量,受限于光源带宽,目前 FBG 传感点数量有限,空间分辨率有限。

2) 基于布里渊散射原理的光纤传感技术。布里渊光时域分析计(BOTDA)利用光纤中的布里渊散射光频率变化量与光纤轴向变形进行实时传感,利用一个感测回路来进行感测,在一端输入脉冲光,另一端输入探测光。布里渊光时域反射计(BOTDR)是利用激光在传输过程中的后向自发布里渊光感测各位点的应变与温度的变化^[16]。BOTDA 和 BOTDR 都可实现长距离测量,测量距离达到几十千米量级,但空间分辨率较低,约为 0.5 m,且系统复杂,测试

时间较长。而 OFDR 可以实现分布式测量,还具有高空间分辨率(50 m 传感范围内可达到 1 mm 空间分辨率)的优点。OFDR 的空间分辨率与探测器带宽无关,与频谱分析精度有关,可以获得远高于传统光时域反射/分析类分布式感测技术的空间分辨率与精度^[17-18]。

本研究结合增材制造,利用 OFDR 的分布式光纤的分布式、高精度传感性质,独特地设计了一种孔结构,将 OFDR 分布式光纤嵌入该孔结构中,以保证光纤在模型的打印制作过程中不受到任何外力的影响。在不同的打印填充密度下,研究了不同打印参数对模型制作过程中任一时刻不同位置处的温度变化特征。

2 OFDR 感测技术原理

OFDR 是基于光纤背向瑞利散射的技术,采用相干探测手段进行信号处理^[19],其工作原理如图 1 所示。光源发出的光经耦合器后分为两路,一路进入待测光纤中,在光纤各位置上不断地产生瑞利散射信号,信号光是背向反射的,与另一路参考光发生干涉,两者干涉产生的拍频信号被光电探测器检测到,拍频与待测光纤位置成正比。当待测光纤某一位置受温度、压力或应变的影响,此处光纤会产生瑞利散射频移。通过测量瑞利散射频移量,可以实现对某一位置应变和温度的测量以及整根光纤的分布式测量^[20-22]。

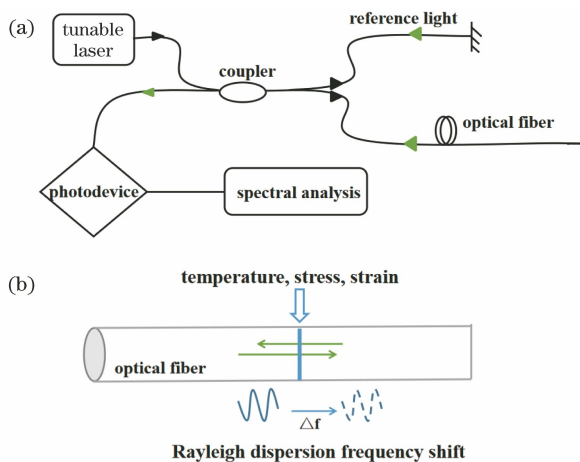


图 1 OFDR 工作原理。(a) OFDR 基本原理;
(b) OFDR 传感原理

Fig. 1 OFDR working principles. (a) OFDR fundamental principle; (b) OFDR sensing principle

3 增材制造 PLA 内部典型的温度特征

结合增材制造制作本文模型并进行温度特性研

究,如图 2(a)所示,本次打印采用的设备包括 OFDR(型号:OSI-S)设备、分布式光纤、3D 打印机(型号:finder,无热床版)、PLA 打印耗材等。OFDR 的采集频率为 10 Hz,空间分辨率为 3.62 mm,传感精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;3D 打印机的喷嘴直径为 0.4 mm,喷头温度设置为 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。打印机对打印方式、模型的填充速度、模型的填充密度、模型的支撑方式等都具有灵活的调节方式。如图 2(b)所示,本研究的模型打印方式为线型打印,即喷嘴的出丝运动堆叠轨迹为线型,内部呈现网状填充,并与边界呈现 45° 夹角,且所有模型均采用 60 mm/s 的填充速度。本研究采用 20%、40%、60%、80%、100% 5 种不同密度的试样,进行打印材料不同位置的温度变化研究,这里的密度指 3D 打印下模型内部的填充密度。本研究的打印耗材采用 PLA,模型为直径为 30 mm、厚度为 10 mm 的圆柱体,因此无需设置模型支撑。

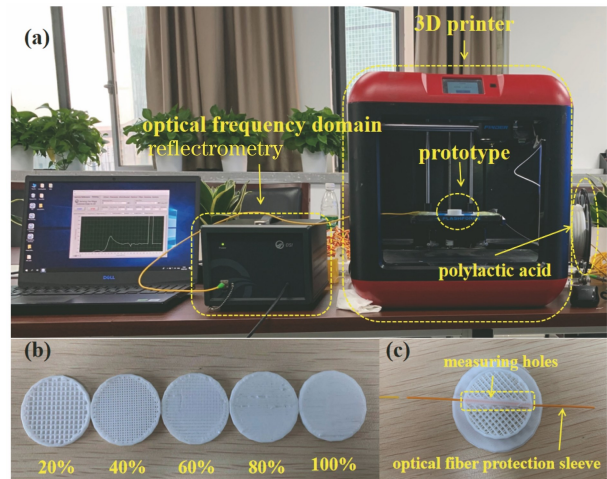


图 2 3D 打印制作模型。(a) 3D 打印全过程;(b) 不同填充密度的实物图;(c) 打印模型内部结构示意图

Fig. 2 3D printing model. (a) 3D printing process;
(b) physical maps for different filling densities;
(c) internal structure of printed model

将 OFDR 分布式光纤在增材制造过程中嵌入到打印的模型中,从而实现在打印过程中对模型内部不同位置的温度监测,并得到特征曲线,其嵌入方式如图 2(c)所示。完成 5 只试样的试验后,发现所有不同位置的温度曲线都具有相似的变化趋势,即所有的曲线都可以划分为 5 个典型阶段。因此建立的特征曲线模型如图 3 所示,并进一步地进行增材制造过程特征分析。

第 I 阶段为光纤嵌入阶段。在本阶段,当模型打印到 50% 时,温度检测孔洞也打印到 50%,此时暂停打印,并将 OFDR 分布式光纤嵌入温度检测孔

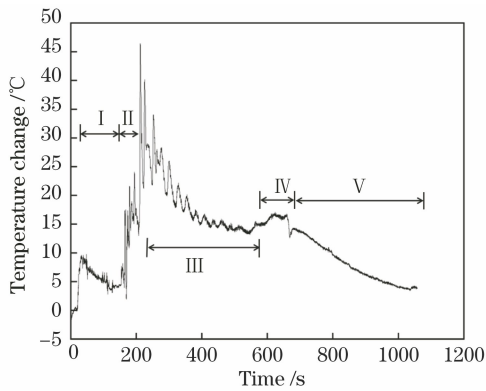


图 3 增材制造过程特征曲线

Fig. 3 Characteristic curve of manufacturing process

洞中,从而达到检测模型内部温度的目的。由于打印刚暂停,孔洞内仍有残余温度,因此将监测光纤从室内转移到带有残余温度的监测孔洞中,会引起温度变化量的骤升。打印机由暂停到启动并进入工作状态有 2~5 min 的等待时间,由于模型内部温度与环境温度存在温度差,模型内部的温度随着时间的推移会缓慢下降,因此 OFDR 分布式光纤监测到的第 I 阶段的温度变化量呈缓慢下降趋势。

第 II 阶段为温度检测孔洞封装阶段。在本阶段,打印机重新启动并进入工作状态,此时将温度检测孔洞进行密封,温度变化量出现骤升现象,随着温度检测孔洞的剩余 50% 密封完成,模型内部的温度变化量呈缓慢上升趋势。

第 III 阶段为模型填充封装阶段。在本阶段,随着打印模型的逐层封装,内部 OFDR 分布式光纤的监测点处出现温度的上升与下降,形成了本阶段的温度变化量反复循环的变化趋势。其每一个循环代表一层耗材的堆叠。而且随着每一层耗材的堆叠,每层的温度变化量的峰值呈下降趋势,因为随着每一层耗材的堆叠,刚打印出来的耗材的高温传递到位于模型中间的监测光纤处时,由于传递过程中温度的散失,光纤监测到的温度变化量的峰值降低。本模型下,此阶段持续时间随着填充密度的不同会在 6~10 min 之间变化。

第 IV 阶段为模型封顶阶段。本阶段所有模型都由线性网格打印转为 100% 密实打印,从而达到表面密实封装的效果,因此本阶段会在第三阶段各循环峰值总体下降的趋势下,在不同打印密度下出现不同程度的峰值回升现象。因为本试验的模型切片设计中,封顶层数设置为 3 层,所以该阶段出现 3 段循环。

第 V 阶段为模型温度回归阶段。本阶段的开始

就是模型封顶阶段的结束。封顶结束即模型打印结束后,打印机停止运行,由于打印耗材仍带有一定的打印残留温度,所以此阶段的特点是模型的温度会迅速下降至环境温度,因此模型温度变化量以二次曲线趋势迅速下降,最终温度下降至环境温度,温度变化量逐渐趋向于 0。

4 打印参数对温度分布的影响规律

4.1 打印全过程的温度变化规律

本试验全程在恒温的实验室内进行。如图 2(c) 所示,本试验设计了一种直径为 1 mm 的孔结构,并且利用了套有光纤保护套管的 OFDR 分布式光纤 (1 mm),在模型的打印过程中,将光纤嵌入该孔结构中,光纤保护套管可保证光纤在整个模型打印制作过程中不受到任何打印外力的干扰,消除了打印过程中应变的影响,因此该嵌入的分布式光纤可以单独监测 PLA 模型在制作过程中任一时刻不同位置的温度变化特征。

本试验完成了 5 组 PLA 不同打印填充密度的模型。图 4 为分别在 20%、40%、60%、80%、100% 打印填充密度下的增材制造过程中任一时刻不同位置的温度变化量曲线。从图中可以看出,在增材制造的过程中,PLA 材料各个位置的温度变化量趋势是一致的,都会出现 5 个典型阶段。由温度检测孔洞封装阶段(第 II 阶段)进入模型填充封装阶段(第 III 阶段),耗材开始堆叠在温度检测孔洞上方,因此出现了温度变化量骤升现象,此阶段不同位置的温度变化量曲线都出现了循环现象,这是由模型填充封装阶段 PLA 耗材逐层循环堆叠引起的,其循环特征都是温度变化量先上升后下降,然后循环往复。通过分析填充阶段的打印路径,发现此现象是由 3D 打印机的高温喷嘴的运动模式所致。当打印机喷嘴运动到 OFDR 分布式光纤正上方时,此处是光纤接收热量最大的位置,因此温度变化量会出现峰值,当打印机喷嘴慢慢由光纤正上方向模型边缘运动时,随着距离的增大,光纤接收的热量也随之减少,温度变化量因此减小,对应地,一个温度循环就是喷嘴运动的一个循环,因此各个位置都监测到相同的温度变化量循环现象。由图 4 所示,在模型填充封装阶段(第 III 阶段),对于任何一种密度对应的不同位置的曲线,其每个循环的温度变化量峰值点呈下降趋势,这是由于随着打印耗材的逐层叠加,刚打印出来的高温耗材与 OFDR 分布式光纤之间的间隔耗材也随之增加,因此耗材对热量传递的阻碍作用增强,

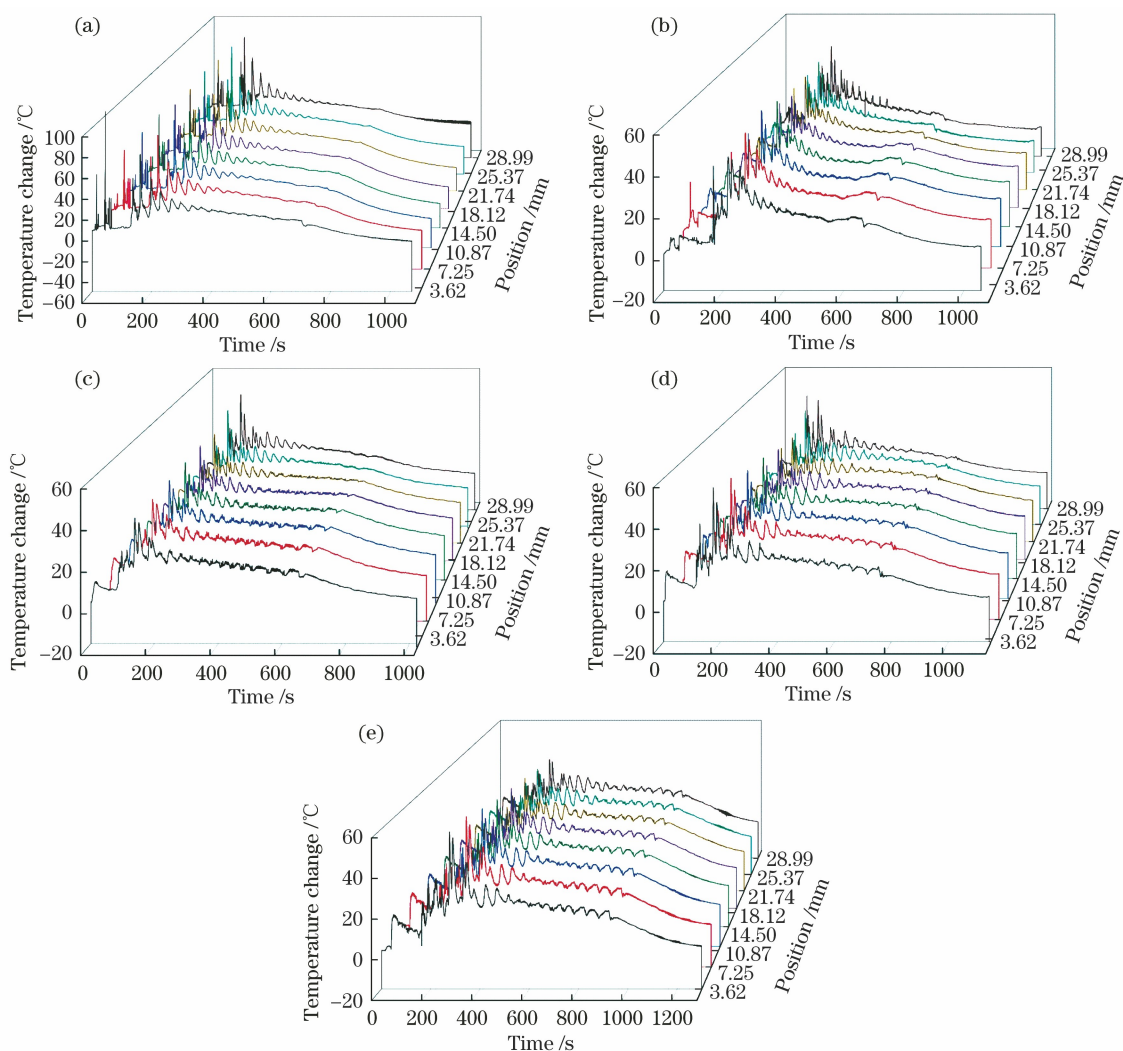


图 4 PLA 在增材制造过程中不同密度的温度变化量曲线。(a) 20%；(b) 40%；(c) 60%；(d) 80%；(e) 100%

Fig. 4 Curves of temperature change of PLA at different density during AM process.

(a) 20%；(b) 40%；(c) 60%；(d) 80%；(e) 100%

热量的消散增多,使位于模型中间的分布式光纤接收到的热量减少。

由图 4 可知,由模型填充封装阶段(第Ⅲ阶段)过渡到模型封顶阶段(第Ⅳ阶段)时,温度变化量在密度为 20%和 40%时分别都由下降趋势转为上升趋势,当密度为 60%、80%和 100%时,模型封顶阶段(第Ⅳ阶段)的温度变化量的上升趋势就会消失,并且开始转为下降趋势,这是由于:随着填充密度的增大,耗材对热量传递的阻碍作用也增大,模型封顶阶段的耗材热量越来越难传递到位于模型中间的 OFDR 分布式光纤处,这说明 40%密度是该模型内部的温度传递临界点,当填充密度超过 40%后,耗材热量在模型中的传递量开始小于耗材热量在模型中的消散量。

4.2 不同打印参数对温度分布特征的影响

在光纤嵌入阶段(第Ⅰ阶段),由于分布式光纤由环境温度迅速骤升到模型内部温度,对应地,图 4 中不同密度对应曲线的不同位置均出现了温度变化量骤升现象,而且骤升量随着打印密度的不同在 3~20 °C 之间变化。如图 5 所示,打印机暂停打印时,随着密度的增加,耗材堆积量增多,PLA 模型中的残余温度升高,所以温度骤升量随密度变化呈现正相关变化趋势,拟合优度为 0.98。

模型填充封装阶段(第Ⅲ阶段),随着温度检测孔洞填充结束,第一层耗材叠加在温度检测孔洞上方,温度变化量出现第一个峰值点,图 6 为不同填充密度下第Ⅲ阶段最高峰值点的位置、温度变化量、密度的关系曲线,由图可知,填充密度为 20%和 40%

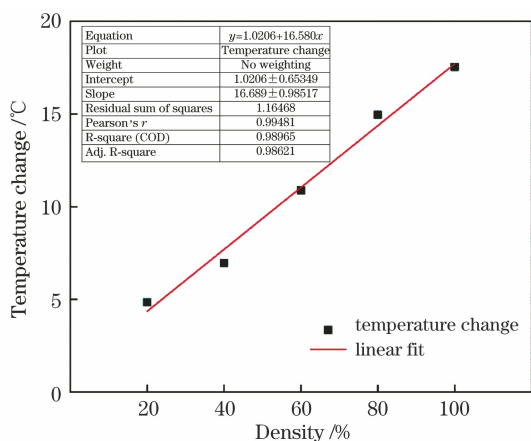


图 5 不同密度下第 I 阶段温度骤升量

Fig. 5 Sudden increase in temperature at stage I at different densities

的温度变化量随位置的变化整体呈向下凹的抛物线形状,而填充密度为 60%、80%、100% 的温度变化量随位置的变化整体呈向上凸的抛物线形状,温度变化量在 20~40 °C 之间。这是由于,当 PLA 模型的填充密度为 20% 时,同一层打印耗材填充较疏,打印耗材的温度降低较快,拐点出现在 14.5 mm,即模型核心位置。靠近模型边缘,由于模型每层外壳是以 100% 密度填充两圈,耗材堆叠多,所以靠近边缘位置温度比模型内部温度高;当模型的填充密度为 40% 时,由于填充密度的增大,打印耗材堆叠量增多,耗材的温度散失速度减缓,因此,相比于填充密度为 20% 的曲线,填充密度为 40% 的曲线斜率减小;填充密度为 60%、80%、100% 的曲线变为向上凸的抛物线形状,这是由于:随着填充密度的增大,同一层打印耗材越来越密,有更多的打印耗材温度传递到分布式光纤处,而且模型内部的温度积聚在模型内不宜消散,从而致使靠近模型核心位置点的温度变化量相较于模型边缘的温度变化量大,而且随着填充密度的增大,抛物线的斜率也呈增大的趋势,且其拐点温度变化量分别为 34.45 °C、35.13 °C、37.61 °C,随着填充密度的增大呈上升趋势。

图 7 为第 IV 阶段完成点的位置、温度变化量、密度的关系曲线,由图可知,填充密度为 20%、40%、60%、80%、100% 时,温度变化量随位置的变化整体呈向上凸的抛物线形状。其原因是:当模型打印结束时,随着打印耗材的堆积,耗材对温度散失的阻碍作用越来越大,从而导致耗材的温度积聚在模型核心位置不易消散,而靠近边缘的位置点,由于与外界环境距离较近,温度散失速度快,因此打印完成点处各密度下都出现了靠近模型核心位置点温度变化量

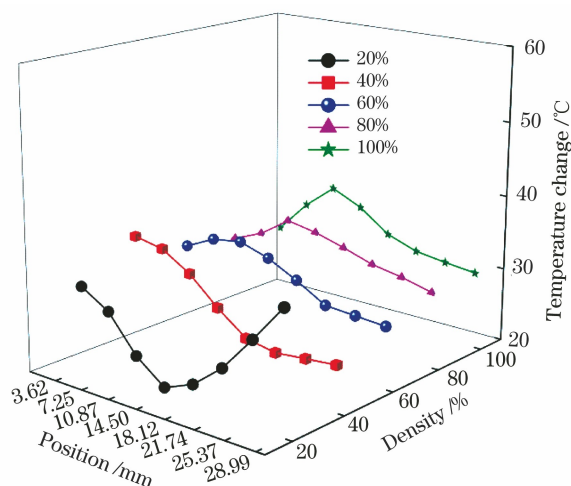


图 6 不同密度下第 III 阶段最高峰值点的位置、温度变化量、密度的关系曲线

Fig. 6 Curves of relationship among position, temperature change, and density of peak point at stage III for different densities

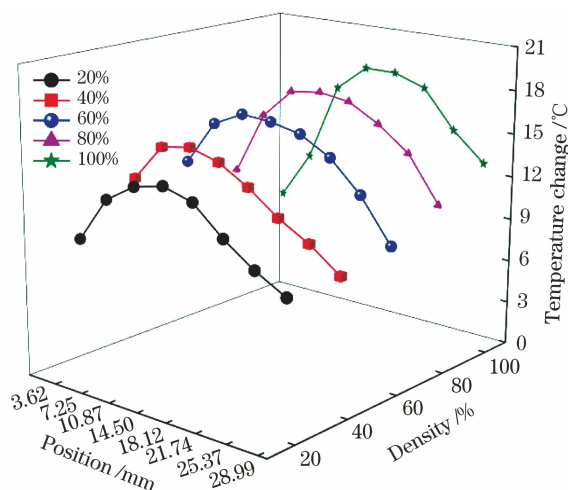


图 7 不同密度下第 IV 阶段完成点的位置、温度变化量、密度的关系曲线

Fig. 7 Curves of relationship among position, temperature change, and density of completion point at stage IV for different densities

大而靠近模型边缘的位置点温度变化量小的现象。随着填充密度的增大,拐点温度变化量分别为 14.24, 15.34, 16.64, 17.64, 18.53 °C, 如图 8 中三角形图标所示,温度变化量的最大值随着填充密度的增大逐渐增大,拟合优度为 0.95。由图 7 可知,温度变化量范围在 3~19 °C 之间,相较于第 III 阶段的最高峰值点,温度变化量降低了近 20 °C。

将模型内的不同位置点 3.62, 7.25, 10.87, 14.50, 18.12, 21.74, 25.37, 28.99 分别标记为 1~8 号点,则本试验中模型在不同填充密度下的平均温度散失

率的表达式为

$$V_1 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_{p,i} - \Delta T_{f,i}}{t}, \quad (1)$$

式中: V_1 为平均温度散失率; $\Delta T_{p,i}$ 为模型填充封装阶段(第 III 阶段)第一个峰值点的温度变化量; $\Delta T_{f,i}$ 为模型封顶阶段(第 IV 阶段)完成点的温度变化量; t 为从模型填充封装阶段出现第一个峰值点到模型封顶阶段完成点的时间; n 为位置点数量, $n=8$ 。不同打印填充密度下的平均温度散失率如图 8 中方形图标所示, 平均温度散失率随着填充密度的增大呈减小趋势, 这也揭示了随着填充密度的增大, 打印耗材堆积量越来越多, 其对温度消散的阻碍作用也增大, 这不利于模型内部的温度消散。

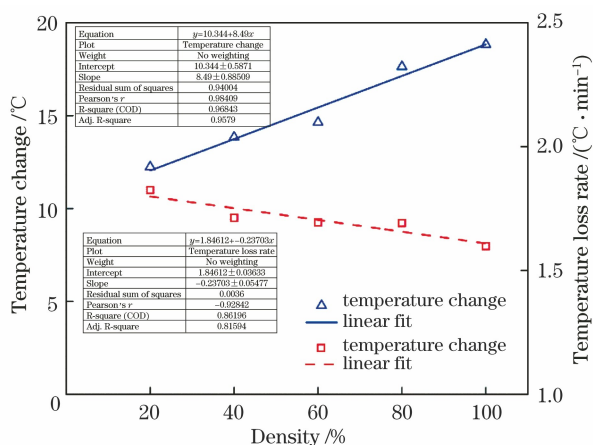


图 8 不同密度下第 IV 阶段完成点的温度变化量曲线拐点与不同密度下的平均温度散失率

Fig. 8 Inflection point of temperature change curve of completion point for stage IV at different densities and average temperature loss rate at different densities

5 结 论

本研究通过在增材制造过程中将 OFDR 分布式光纤嵌入 PLA 材料模型内部, 实现了覆盖增材制造模型内部不同位置点的温度特征研究, 得出以下结论:

1) 高空间分辨率的 OFDR 分布式光纤传感技术可以成功地监测增材制造过程中的 PLA 材料模型内部不同位置点的温度变化, 所得空间分辨率可以达到 3.62 mm。

2) 增材制造过程中 PLA 材料模型在不同密度下的内部温度变化曲线可以分为 5 个明显的特征阶段, 包括: 光纤嵌入阶段、温度检测孔洞封装阶段、模型填充封装阶段、模型封顶阶段、模型温度回归

阶段。

3) 在 PLA 材料的打印过程中, 其内部温度(低于 70 °C)散失较快, 远低于打印机喷头的温度(220 °C)。打印机喷头的运动轨迹导致温度分布呈现快速的波动特征, 且随着打印的进行, 温度波动逐渐减弱。

4) 打印密度对温度的分布影响较大, 打印完成点的最高温度的上升量与温度的消散速度均与打印密度呈线性关系, 不同打印密度条件下不同位置的温度变化特征一致, 但密度越高, 非线性趋势越明显。

参 考 文 献

- [1] Cai J J, Wei X H, Lin S, et al. Application and prospect of 3D printing technology in biomedical field[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2021, 42(1): 91-96.
蔡军杰, 魏晓慧, 林松, 等. 3D 打印技术在生物医学领域的应用及展望[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(1): 91-96.
- [2] Guo Z J, Zhong G C. Application of modern 3D printing technology in aviation titanium alloy parts[J]. World Nonferrous Metals, 2020(6): 37-38.
郭昭君, 钟功诚. 现代 3D 打印技术在航空钛合金部件中的应用[J]. 世界有色金属, 2020(6): 37-38.
- [3] Martin J H, Yahata B D, Hundley J M, et al. 3D printing of high-strength aluminium alloys[J]. Nature, 2017, 549(7672): 365-369.
- [4] Lin X C, Liu H G. Continuous liquid interface production 3D printing technology and its application in fabrication of architecture models[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0816002.
林宣成, 刘华刚. 连续液面成型 3D 打印技术及建筑模型制作[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0816002.
- [5] Zhang R H, Zhang J H, Zhu Y F, et al. Principles and experimental verification of valveless piezoelectric pump with taper pipe slopes element[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2): 378-382, 407-408.
张蕊华, 张建辉, 朱银法, 等. 3D 打印的锥管坡面腔底无阀压电泵[J]. 振动·测试与诊断, 2016, 36(2): 378-382, 407-408.
- [6] Zhang X J, Luo W Z, Zhang J, et al. Development of a FBG water content sensor adopting FDM method and its application in field drying-wetting monitoring test[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111494.
- [7] Hong C Y, Zhang Y F, Su D, et al. Development of a FBG based hoop-strain sensor using 3D printing

- method[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107154-107160.
- [8] Hong C Y, Yuan Y, Yang Y Y, et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 269-274.
- [9] Hong C Y, Zhang Y F, Abro Z A. A fiber Bragg grating-based inclinometer fabricated using 3-D printing method for slope monitoring[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, 43(1): 20170277.
- [10] Bao C Z, Hong C Y, Sun D A, et al. Development and verification of carbon fiber based FBG earth pressure sensors using additive manufacturing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2106002.
鲍成志, 洪成雨, 孙德安, 等. 增材制造碳纤维 FBG 土压力传感器的研发与验证[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2106002.
- [11] Yao T Y, Ye J, Deng Z C, et al. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 188: 107894.
- [12] Kousiatza C, Karalekas D. *In-situ* monitoring of strain and temperature distributions during fused deposition modeling process[J]. Materials & Design, 2016, 97: 400-406.
- [13] Saenz F, Otarola C, Valladares K, et al. Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K[J]. Additive Manufacturing, 2021, 39: 101841.
- [14] Wang S Q, Lasn K, Elverum C W, et al. Novel *in situ* residual strain measurements in additive manufacturing specimens by using the optical backscatter reflectometry [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101040.
- [15] Lin H T, Zhang L, Liu X, et al. Research on dynamic characteristics of temperature sensing based on loop ring-down cavity with FBG[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1006003.
林洪太, 张丽, 刘欣, 等. FBG 环形衰荡腔的温度传感动态特性研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1006003.
- [16] Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Comparative analysis of strain monitoring of the installed optical fiber composite overhead ground wire using BOTDA/R[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1506001.
夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于 BOTDA/R 的在运光纤复合架空地线光缆应变监测对比分析[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1506001.
- [17] Wu J H, Liu H, Yang P, et al. Identification and monitoring of concrete cracks based on optical frequency domain reflectometry technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 241201.
吴静红, 刘浩, 杨鹏, 等. 基于光频域反射计技术的混凝土裂缝识别与监测[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 241201.
- [18] Zhang Z L, Sun Y Y, Zhang Q H, et al. Applications of optical frequency-domain reflectometry technology in strain-deformed configuration conversion of structural surface deformed configuration measurement [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2019, 15(11): 15501477198.
- [19] Sun Y J, Zhang Q, Cheng G, et al. Optical frequency domain reflectometry technology based theoretical analysis and experiment on strain transferring of surface-attached optical fiber sensor [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 46-52.
孙义杰, 张强, 程刚, 等. 基于光频域反射技术的表面粘贴分布式光纤传感器应变传递特性分析与试验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 46-52.
- [20] Qiu T G, Sun Y Y, Lu T M, et al. Research on monitoring of horizontal displacement field of deep soil based on OFDR technology[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 108-112.
仇唐国, 孙阳阳, 卢天鸣, 等. 基于 OFDR 技术的深层土体水平位移场监测研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 108-112.
- [21] Suo L J, Lei Z K, Qu X X, et al. A large strain demodulation method based on dynamic reference Rayleigh backscattering spectrum in distributed optical fiber strain measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(5): 729-738.
锁刘佳, 雷振坤, 渠晓溪, 等. 一种基于动态参考瑞利散射谱的分布式光纤大应变解调方法[J]. 实验力学, 2019, 34(5): 729-738.
- [22] Song J, Li W H, Lu P, et al. Long-range high spatial resolution distributed temperature and strain sensing based on optical frequency-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1-8.