http://pmse.scu.edu.cn

工艺参数对聚乳酸线材熔融沉积尺寸的影响

王紫阳，陈毅非，李海梅
（郑州大学 材料科学与工程学院，河南 郑州 450001）

摘要：熔融沉积（FDM）成型中线材直径的变化对打印精度有重要影响。文中利用实验和数值模拟方法研究了单根聚乳酸线材FDM过程中从喷嘴挤出到沉积固化各阶段的直径变化。根据FDM工艺特点及材料性能，量化分析了工艺参数（喷嘴温度、挤出速度、打印速度、层高）对线材喷嘴附近、挤出胀大阶段、拉伸阶段、沉积阶段直径的影响，并推导了打印过程中线材沉积固化时直径的估算公式。研究表明，提高喷嘴温度、增大挤出速度、减少层高可有效改善打印过程中线材的尺寸稳定性，提高打印件的精度。最后，利用沉积固化时的直径公式，完成了线材直径补偿“精度实验”，补偿后打印制品尺寸精度提高了74.1%。

关键词：线材直径；数值模拟；打印精度；工艺参数；熔融沉积成型
中图分类号：TP391.73 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）04-0104-07

3D打印（Three-dimensional printing，3DP）或增材制造（Additive manufacturing，AM）是一种快速将设计模型转化为实体制品的成型技术[1]。高分子材料的3DP主要有熔融沉积成型（FDM）、选区激光烧结成型（SLS）和光固化成型（SLA）等技术，其中FDM技术因低价、安全、便捷、原料种类多而成为研究及市场的热点[2]。FDM是一种复杂的成型过程，成型过程中涉及众多工艺参数，直接影响制品的性能、尺寸和表面质量[3]。就打印工艺参数而言，Yang和Wu[4]发现可以通过减小层高、提高喷嘴或工作台板温度来改善打印精度；Abas等[5]的研究表明填充率是影响打印件长、宽尺寸偏差的主要因素，而层高是打印件高度、角度偏差主要因素。Mishra等[6]的研究表明减小沉积宽度（沉积阶段线材直径）和打印速度可提高尺寸精度，且喷嘴温度对打印件X、Y方向的尺寸影响明显。现有的研究成果主要考虑了喷嘴温度[4, 6,7]、挤出速度[7]、打印速度[4,6,8]、层高[4,6,9,10]、填充率[5]、角度[5,10]和图案[11]等因素对打印件外观质量、尺寸精度和力学性能的影响，而对于FDM整个成型过程中线材直径的变化、线材沉积微观形貌与性能关系的研究有限。

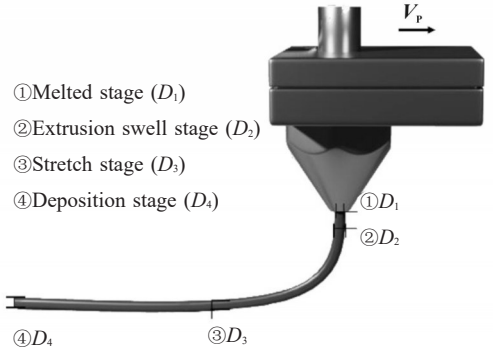


Fig. 1 Diagram of the filament diameter at different stages of FDM

本文以FDM聚乳酸线材为研究对象，结合实验和数值方法研究了FDM工艺中线材从喷嘴挤出到沉积固化4个阶段线材直径的变化（Fig.1），包括喷嘴附近D_1、挤出胀大阶段D_2、拉伸阶段D_3和沉积阶段D_4；探究了工艺参数(喷嘴温度(T_N)、挤出速度(V_E)、打印速度(V_P)和层高(H_L))对线材各阶段直径的影响；最后通过3D打印件实例，验证了线材直径修正对打印精度的积极意义。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0061
收稿日期：2023-06-30
通讯联系人：李海梅，主要从事聚合物成型新工艺、模具设计、制品设计及其数值模拟技术研究，E-mail：haimeili@zzu.edu.cn

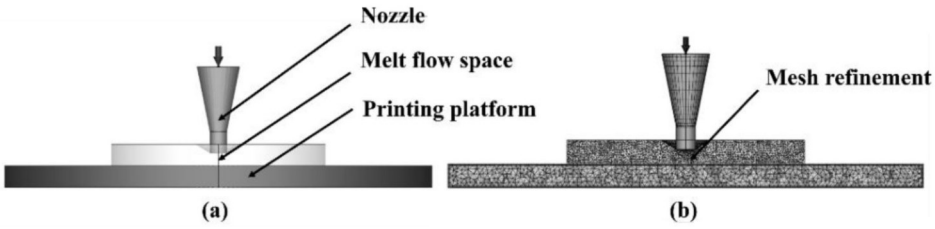


Fig. 2 Schematic of the simulation model for D_2
(a): equivalent model; (b): mesh

Tab. 1 Properties of PLA filament

Parameter	Density/(kg·m^{-3})	Tensile strength/MPa	Bending strength /MPa	Notched impact strength /(J·m^{-1})	Percentage of breaking elongation/%	Heat deformation temperature/℃
Value	1.24×10^3	60	60	16	3	55

1　实验部分

1.1　原料与设备

聚乳酸线材：购置于浙江金华市闪铸三维科技有限公司，直径为1.75 mm，基本性能如Tab.1所示。

3D打印系统ColiDo：珠海天威飞马打印耗材有限公司；电热鼓风干燥箱XB101-4：上海树立仪器仪表有限公司产品。

1.2　实验方案

为便于研究线材直径变化的影响因素，建立“线材-形貌-性能”关系，喷嘴附近处线材的直径为D_1，数值与喷嘴直径相同，打印过程仅对D_2，D_3和D_4有影响。在已有研究成果的基础上，设计Tab.2的实验方案，基准的工艺参数为加粗斜体，即T_N =200 ℃、V_E= 30 mm/s、V_P= 30 mm/s，H_L=0.2 mm。

Tab. 2 Factors and ranges affecting filament diameter

Filament diameter	Printing parameters
D_1	Constant(mm): 0.4(= nozzle size)
D_2	T_N/℃ **200**/210/220, V_E/(mm·s^{-1}) **30**/60/90
D_3	V_P /(mm·s^{-1})：10/20/**30**/40/50
D_4	H_L/mm：0.1/0.15/**0.2**/0.25/0.3

为研究挤出胀大阶段D_2与T_N、V_E的关系，设计垂直悬空打印实验（即喷嘴移动速度V_P=0），类比挤出成型工艺进行计算[12]，分析T_N、V_E对线材直径D_2的影响。每组工艺参数下都至少打印10段30 mm长的线材进行测量与统计。

挤出胀大阶段线材直径D_2用数值方法量化，并考虑FDM打印过程中线材的黏弹性。由于FDM过程的模拟软件较少，结合FDM成型特点，用Moldex3D 2022软件进行挤出胀大过程的等效模拟。模拟时3D打印喷嘴等效为热流道浇口、打印平台用“嵌件”属性比拟、垂直悬空打印空间为材料成型区域。模拟用三维模型及网格划分情况如Fig.2所示；本构关系是修正的White-Metzner模型[13]。在模拟中注射速度参考FDM的V_E，流率通过V_p换算，以保证模拟中喷头的挤出速度与3D打印实际的速度一致。当打印速度为30 mm/s，60 mm/s和90 mm/s时，对应的喷嘴流率分别为3.24 mm^3/s，6.48 mm^3/s和9.72 mm^3/s，运算时对熔体施加与线材挤出方向相同的重力加速度，求解器选择黏弹性模块。

拉伸阶段D_3用V_P来表示拉伸作用。线材尺寸与V_P的关系实验中，V_E与V_P一致。喷嘴在水平面以V_P匀速直线运动，并与喷嘴静止的V_P=0 mm/s对比。相同挤出速度下，通过对比D_2和D_3，可获得打印过程中式(1)所示的线材径向收缩率(s)，其值可通过测量或者通过压力、体积、温度关系（PVT关系）估算[14]，进而用径向收缩率量化拉伸作用（V_P）对线材尺寸的影响，

$$D_3 = (1-s)\cdot D_2 \quad (1)$$

式中：D_3——拉伸阶段线材直径，mm；s——线材径向收缩率，无量纲参数；D_2——挤出胀大阶段线材直

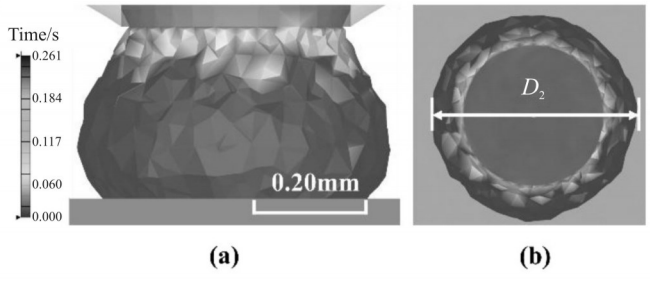


Fig. 3 Numerical simulation results of 3D printing extrusion
(a): cross-section shape; (b): extrusion diameter

径，mm。

沉积阶段D_4的变化与单根线材的黏附及重力相关。用层高来代替黏附及重力作用，研究D_4与H_L的关系。当线材完全接触平台后由于温度仍在PLA热变形温度（50 ℃）之上，因此线材会在重力的作用下变形（由D_3变为D_4），线材最终的截面形状简化为椭圆形（长轴等效为D_4，短轴为H_L），根据质量守恒得到D_3和D_4的关系式(2)

$$D_4=\frac{D_3^2\cdot V_E}{H_L\cdot V_P} \tag{2}$$

式中：D_4——沉积阶段线材直径，mm；V_E——挤出速度，mm/s；H_L——层高，mm；V_P——打印速度，mm/s。

1.3 测试与表征

1.3.1 线材表面温度测定：用于测量线材表面温度的红外热成像仪HM-TPH11-3AXF（杭州微影软件有限公司），与测量对象距离为150 mm，发射率0.8、湿度50%、环境温度25 ℃。

1.3.2 线材直径及打印件尺寸测定：采用标准螺旋测微仪（东莞市三量精密量仪有限公司）、体视偏光显微镜（POM）SMZ-T4（重庆奥特光学仪器有限公司）测量PLA线材直径及打印件尺寸。其中长度方向间隔5 mm测试线材直径，每个位置至少测量5次，然后取平均值，至少5个试样；体式显微镜测量线材长度间隔为0.3 mm，每个位置至少测量5次，然后取平均值，至少5个试样。

1.3.3 热性能分析：将差示扫描量热仪DSC-Q250（美国TA公司）用于对比PLA线材打印前后热性能变化。DSC样品5~10 mg，以10 ℃/min速率从40 ℃升温到220 ℃，保持3 min消除热历史，然后以5 ℃/min降温到40 ℃；接着以10 ℃/min速度从40 ℃二次升温220 ℃；保护气体为氮气，流速为50 mL/min。

1.3.4 形貌表征：采用台式扫描电镜（SEM）EM-30 PLUS（韩国COXEM公司）表征线材沉积后直径的变化。使用打印完成的标准拉伸试样，液氮脆断、用导电胶将断裂处横截面样品固定、压缩空气吹扫清洁、喷金后，用于SEM观察。先用光学模式观察垂直于打印方向的截面，找到一处靠近边缘且能观察多列完整线材形貌的位置，切换至电镜模式，选择合适的放大倍数（200×）选区拍照，加速电压为10 kV。

1.3.5 数字建模及模拟：Solidworks2017用于数字建模，Moldex3D 2022（科盛科技股份有限公司）用于模拟挤出胀大阶段的线材直径。

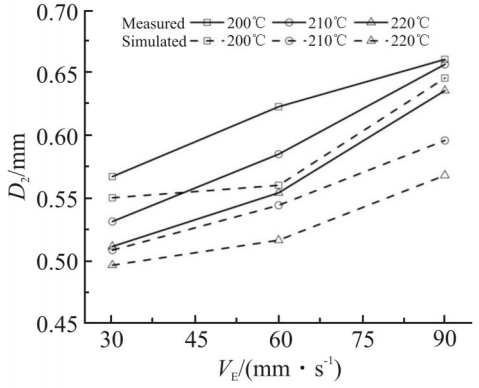


Fig. 4 Variation of D_2 with extrusion velocity V_E at different nozzle temperatures

2 结果与讨论

2.1 打印过程中线材的尺寸变化

3D打印过程中，悬空实验线材直径D_2的变化如Fig.3和Fig.4所示。线材通过喷嘴熔融挤出后胀大，数值模拟的挤出胀大过程如Fig.3所示。从Fig.3(a)可知，黏弹态的PLA因为弹性作用，D_2变大。离开喷嘴0.218 s后，直径从0.4 mm变为0.5 mm。不同挤出速度下的悬空打印实验的D_2变化如Fig.4所示。从

Fig.4可知,同一挤出速度下,D_2随着T_N的升高而减小,这是由于温度升高时PLA熔体黏度变小(Fig.4),流动性能提升,熔体在出喷嘴前松弛地较为充分,挤出胀大效应减弱。相同的喷嘴温度,不同V_E下,D_2随着挤出速度的增大而增大,这是由于挤出速度增大后,喷嘴入口处的流线收敛导致速度梯度增大,PLA料的弹性作用明显,且熔体在喷嘴内狭窄区域的松弛时间变短,使得挤出胀大效应增强。比较D_2的结果,发现Fig.4数值模拟结果与实验结果的变化趋势一致,并且与V_E=60 mm/s和V_E=90 mm/s相比,V_E=30 mm/s(挤出速度较低时)的模拟与实验误差较小。线材原料经打印机喷嘴熔融挤出,喷嘴附近材料是黏弹态。由于黏弹性关系模型复杂,且相关材料参数(如松弛时间等)较难获得,多用线性黏弹假设,因此本构关系的误差带来了模拟尺寸的误差;加上弹性可恢复的材料性能数据不准确,导致线材直径的实验值大于模拟值。

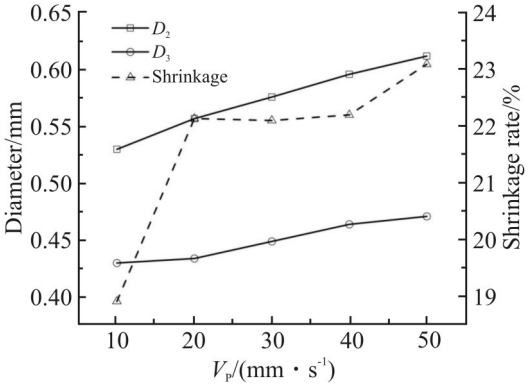


Fig. 5 Variation of D_2, D_3 and shrinkage s with printing speeds V_P

线材在拉伸阶段的直径D_3随V_P的变化结果如Fig.5所示。由于拉伸阶段线材仍然是悬空的(无接触的自由表面),所以挤出胀大效应在这一阶段仍有影响,且线材的体积/质量一定,V_P增大时,V_E同步增大(质量守恒)。由Fig.4可知,D_2随着V_E的增加而增大,因此Fig.5中,D_2随着V_P的增加而增加。线材径向收缩率的变化与材料相态转变有关(PVT关系是温度、体积、压力的函数)。当V_P≥20 mm/s时,线材的温度较高,材料以黏性为主且黏度趋于稳定,即一定范围内对V_P的变化不敏感,线材径向收缩率变化不大,平均值约s=21.7%。当V_P=10 mm/s时,PLA呈现黏弹态,由于弹性作用,PLA受到一定范围内的外力后产生可恢复的变形,因此线材径向收缩率较低。线材的径向收缩率随打印速度的增加而增大。

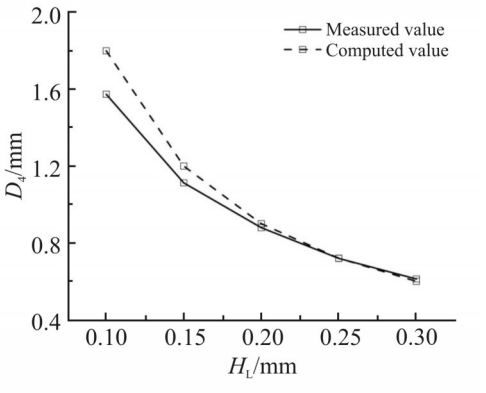


Fig. 6 Variation of D_4 with layer thickness H_L

线材沉积尺寸D_4与H_L的关系如Fig.6所示。从中可知,随着H_L增加,D_4快速减小,实验结果与式(2)的计算结果吻合。当层高大于0.20 mm时,实验与计算的误差很小,精度较高。这是由于层高越小,沉积黏附影响越大,椭圆形假设误差较大;而层高增加线材界面更接近于椭圆形,与后面的POM和SEM实验结果相符。

2.2　线材的热分析和形貌

PLA线材3D打印前、后一次熔融过程和二次熔融过程的DSC曲线如Fig.7所示。“一次熔融过程”是对线材原料(即直接购买的线材)进行DSC分析以便帮助设置打印温度等参数;“二次熔融”是从FDM打印完成的试样中取样进行DSC分析,以便对照线材原料进行比较。因此“二次熔融过程”相较于“一次熔融过程”多了一次热力历程,即FDM打印过程。对比Fig.7(a)和Fig.7(b)可知不同的热历史,PLA打印前后的熔点并无明显变化,这是由于材料本身的相对分子质量、形态等无较大变化。在打印过程中,线材经喷嘴熔融挤出后在短时间内冷却,冷却速率高(远大于20 ℃/min),结晶度降低,可能会导致熔融温度略有下降。

线材沉积尺寸D_4的POM和SEM结果如Fig.8所示。从中可知,线材沉积截面为椭圆形,且沉积尺寸对打印件微观形貌、层间结合有重要影响(Fig.8(b))。

不同挤出速度下3D打印过程的温度结果如Fig.9所示。从Fig.9(b)可知,挤出速度越大,喷嘴附近PLA的温度越低,这是由于喷嘴尺寸和热量固定,

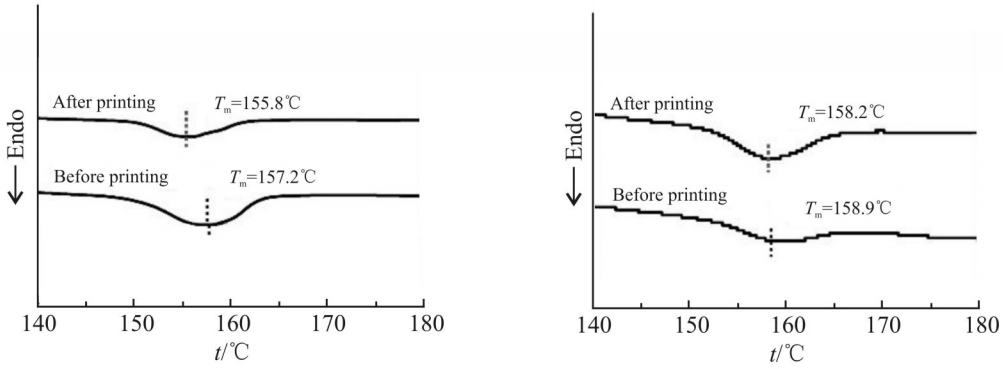


Fig. 7 DSC results of PLA filament before and after 3D printing
(a): primary melt process; (b): secondary melt process

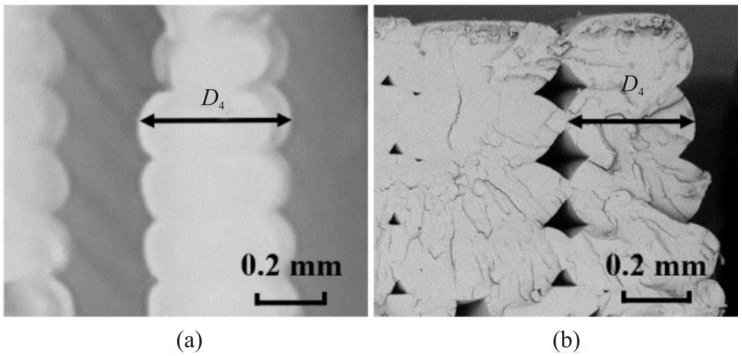


Fig. 8 D_4 results of (a) POM and (b) SEM

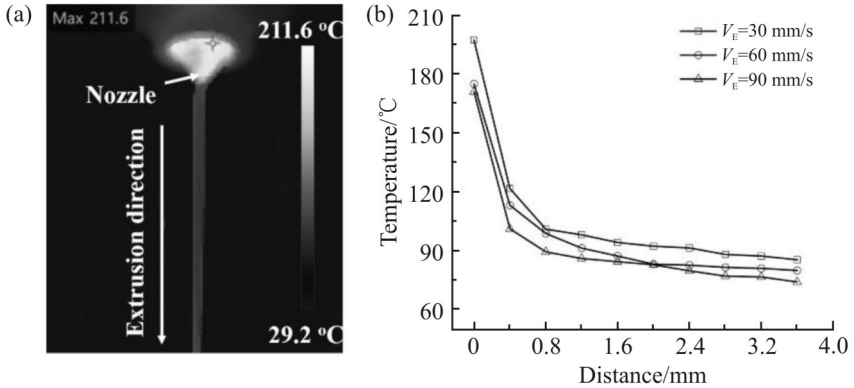


Fig. 9 Temperature results of the filament near nozzle
(a): thermal image; (b): estimated the temperature

挤出速度越高，需要的PLA料及其相变所需的热量越多，因此喷嘴处线材温度越低；打印过程中距离喷嘴约0.2 mm内的段线材处于熔融态，保持在90 ℃左右，处于PLA材料的热变形温度（50 ℃）以上。所以，打印过程线材经历的拉伸、相变沉积以及重力都会改变线材的截面尺寸和形状，单根线材的尺寸估算有助于理解FDM打印缺陷（空洞）形成和层间结合的机制。

2.3 打印精度测试

根据国标GB/T 39329-2020进行3D打印的精度测试。通过对FDM不同阶段线材直径影响因素的研究及量化，根据FDM工艺特点，进行了打印制品尺寸补偿试验，对比线材尺寸补偿前后制品打印制品直径Φ的变化。从设备角度考虑，D_1（0.4mm）是打印机喷嘴的直径，这里作为初值；结合本文前面的分析可知线材直径D_4，经历了喷嘴附近D_2、相转变

Tab. 3 Measurement diameter results of 3D printed standard samples before and after printing modified parameters

No.	Φ_b/mm	$(\Phi_b-\Phi_0)$/mm	SE/mm	Φ_a/mm	$(\Phi_a-\Phi_0)$/mm	SE/mm
1	12.729	0.229	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(\Phi_{bi}-\Phi_0)^2}{5}}$ = 0.201	12.516	0.016	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{5}(\Phi_{ai}-\Phi_0)^2}{5}}$ = 0.052
2	12.575	0.075		12.607	0.107	
3	12.707	0.207		12.504	0.004	
4	12.742	0.242		12.458	-0.042	
5	12.704	0.204		12.510	0.010	

D_3变化，尺寸稳定，因此用（D_1~D_4）作为总的补偿值；由于线材轴对称且设备要求输入的补偿值为线材半径的补偿值，因此FDM打印设备输入的外径补偿值为(D_1/2－D_4/2)。

试样打印完成后，利用螺旋测微仪测量试样外径，并依照国标GB/T 39329-2020计算试样直径的误差，参考直径φ_0为12.500 mm。打印试样的测试结果如Tab. 3所示。外径补偿前，试样直径φ_b及偏差($\varphi_b-\varphi_0$)最大为0.229 mm，最小为0.075 mm，标准误差（SE）为0.201 mm；外径补偿后，试样直径φ_a及偏差($\varphi_a-\varphi_0$)的偏差最大是0.107 mm，最小是0.004 mm，标准误差（SE）为0.052 mm。因此通过外径补偿，可大幅提高FDM的打印精度，标准误差改善了74.1%。

3　结论

本文研究了单根PLA线材FDM加工中的尺寸变化，探究了喷嘴温度、挤出速度、打印速度和层高对线材尺寸的影响，量化了FDM过程中部分工艺参数对线材尺寸的影响，进而研究了线材尺寸对FDM打印件精度的影响，建立PLA材料的“工艺-结构-性能”关系，最终依照工艺和性能的影响机制使用工艺参数中的外径补偿来提高打印精度。对于优化FDM工艺参数的研究和工艺参数对FDM打印件性能的研究具有参考价值。此外，对于单根线材尺寸的研究有助于理解FDM打印缺陷的形成和层间结合的机制。

主要结论如下：

（1）FDM成型并未改变PLA材料的微观结构，材料自身的性能得到保持。

（2）打印过程中，距喷嘴3.5 mm的悬空线材温度仍在热变形温度以上；线材的直径受到拉伸和重力作用而产生变化，D_1，D_2和D_3尺寸具有相关性，而D_4与D_3的平方成正比；D_4对3D打印过程的工艺参数设置和工艺参数优化具有参考价值。

参考文献：

[1] Tripathy C R, Sharma R K, Rattan V K. Effect of printing parameters on the mechanical behaviour of the thermoplastic polymer processed by FDM technique: a research review[J]. Advances in Production Engineering and Management, 2022, 17: 279-294.

[2] 邵君燕, 张慧颖, 柯福佑, 等. 高β相多壁碳纳米管/离子液体/聚偏氟乙烯介电材料制备及熔融沉积成型[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(9): 116-123.
Shao J Y, Zhang H Y, Ke F Y, *et al*. Preparation and fused deposition modeling of multiwalled carbon nanotubes/inoic liquid/poly (vinylidene fluoride) dielectric materials with high β phase [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(9): 116-123.

[3] 夏新曙, 林鸿裕, 杨松伟, 等. 熔融沉积成型参数对改性聚乳酸冲击性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(5): 88-93.
Xia X S, Lin H Y, Yang S W, *et al.* Influence of fused deposition modeling processing parameters on impact properties of modified poly (lactic acid) [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5): 88-93.

[4] Yang C J,Wu S S. Sustainable manufacturing decisions through

the optimization of printing parameters in 3D printing[J]. Applied Sciences, 2022, 12: 10060-10074.

[5] Abas M, Habib T, Noor S, *et al*. Parametric investigation and optimization to study the effect of process parameters on the dimensional deviation of fused deposition modeling of 3D printed parts[J]. Polymers, 2022, 14: 3667-3689.

[6] Mishra P, Sood S, Bharadwaj V, *et al*. Parametric modeling and optimization of dimensional error and surface roughness of fused deposition modeling printed polyethylene terephthalate glycol parts[J]. Polymers, 2023, 15: 546-572.

[7] Shadvar N, Foroozmehr E, Badrossamay M, *et al*. Computational analysis of the extrusion process of fused deposition modeling of acrylonitrile- butadiene- styrene[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 14: 121-131.

[8] 周梦蕾, 南风强, 何卫东, 等. 挤出沉积3D打印工艺参数对发射药尺寸及拉伸强度的影响[J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 661-666.
Zhou M L, Nan F Q, He W D, *et al*. Influence of extrusion deposition 3D printing process parameters on propellant size and tensile strength[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(3): 661-666.

[9] Ozen A, Ganzosch G, Vollmecke C, *et al*. Characterization and multiscale modeling of the mechanical properties for FDM-printed copper- reinforced PLA composites[J]. Polymers, 2022, 14: 3512-3544.

[10] Mishra S B, Malik R, Mahapatra S S. Effect of external perimeter on flexural strength of FDM build parts[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42: 4587-4595.

[11] Jiang J, Ma Y. Path planning strategies to optimize accuracy, quality, build time and material use in additive manufacturing: a review[J]. Micromachines, 2020, 11: 633-651.

[12] Oropallo W, Piegl L A. Ten challenges in 3D printing[J]. Engineering with Computers, 2015, 32: 135-148.

[13] Wang M L,Chang R Y, Hsu C H. Molding simulation: theory and practice[M]. [S.l.]: Hanser Publications, 2018: 23-24.

[14] Foster III G N, Waldman N, Griskey R G. Pressure- volume-temperature behavior of polypropylene[J]. Polymer Engineering and Science, 1966, 6: 131-134.

Effect of Process Parameters on the Deposition Size of Polylactic Acid Filament

Ziyang Wang, Yifei Chen, Haimei Li

(*College of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

ABSTRACT: The change of filament size in fused deposition modeling (FDM) has an important influence on the printing precision. In this paper, the diameter changes of PLA single filament during FDM process from nozzle extrusion to deposition solidification were studied by experimental and numerical simulation methods. According to the characteristics of FDM process, the effects of process parameters (nozzle temperature, extrusion speed, printing speed, layer height) on the diameter of filament near the nozzle, extrusion expansion stage, stretching stage and deposition stage were quantitatively analyzed. The results show that increasing the nozzle temperature, increasing the extrusion speed and reducing the layer height are very helpful to adjust the dimensional stability of filament during printing process and improve the precision of the printed parts. Finally, by using the diameter formula during deposition and solidification, the "precision experiment" of filament diameter compensation is done, and the dimensional accuracy of printed products is improved by 74.1 % after compensation.

Keywords: filament size; numerical simulation; printing precision; process parameters; fused deposition molding