

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.10.013

熔融沉积成型打印 ABS 挤出胀大现象

王宗兴,张鹏飞,李俊儒,何田,程联军

(青岛大学,山东青岛 266071)

摘要:利用有限元分析和实验结合的方法研究喷嘴温度和填充速度对熔融沉积成型打印丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 挤出长丝挤出胀大现象的影响。实验选取不同喷嘴温度和填充速度挤出 ABS 长丝,采用光学显微镜精确测量挤出长丝直径,根据实验数据建立线性回归模型,以研究胀大现象与相关参数之间的关系。采用幂律模型建立熔融态 ABS 的材料模型,进行了挤出过程的有限元模拟,将得到的结果与实验结果进行对比。结果表明,喷嘴温度和填充速度都是影响胀大现象的显著因素,随着喷嘴温度的升高及填充速度的降低,ABS 长丝的挤出胀大比降低,具体参数的选择和胀大比有着很强的线性关系,与填充速度相比,喷嘴温度对于胀大现象的影响更为显著。

关键词: 熔融沉积成型;挤出胀大;丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料;有限元分析;3D 打印

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)10-0071-04

Die Swell of ABS by Fused Deposition Modeling

Wang Zongxing, Zhang Pengfei, Li Junru, He Tian, Cheng Lianjun

(Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract : The effects of nozzle temperature and filling speed on die swell of ABS filament by fused deposition modeling were studied by finite element analysis and experiment. In the experiment, different nozzle temperatures and filling speeds were selected to extrude ABS filaments, and the diameter of the extruded filaments was accurately measured by an optical microscope. A linear regression model was established based on the experimental data to study the relationship between the swelling phenomenon and related parameters. The material model of melt ABS was established by power law model, and the extrusion process was simulated by finite element method. The experimental results and simulation results were verified. The results show that nozzle temperature and filling speed are the significant factors affecting the swell phenomenon. With the increase of nozzle temperature and the decrease of filling speed, the die swell ratio of ABS filament decreases. There is a strong linear relationship between the selection of specific parameters and the swell ratio. Compared with the filling speed, the influence of nozzle temperature on the swell phenomenon is more significant.

Keywords : fused deposition modeling ; die swell ; ABS ; finite element analysis ; 3D printing

熔融沉积成型 (FDM) 技术是美国学者 Scott Crump 于 1988 年提出的^[1],因其价格低廉、原理简单,是当今应用率最高的 3D 打印技术,现已用于医学、航空航天、教学等众多领域^[2-3]。FDM 制件的尺寸公差和表面质量主要与打印时的工艺参数有关,影响较大的参数有打印温度、层厚、填充速度、填充率和填充方向等^[4-6]。其中,影响打印零件的表面质量和尺寸精度的主要参数是打印温度、填充速度

和喷头的内部形状,这些参数不仅会改变材料特性,例如剪切黏度^[7],而且还会改变 FDM 制件上的残余应力和收缩率^[8]。M. K. Agarwala 等^[9]研究发现打印过程中 FDM 喷嘴头的加速/减速运动对细丝宽度的形状和尺寸有很大影响,通过有效地控制进料速度,这些影响可以最小化。M. S. Saad 等^[10]以层高、印刷速度、印刷温度和外壳打印速度为输入参数,以表面粗糙度为输出响应,采用响应面法,利

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (019GGX104072),山东省自然科学基金项目 (ZR2019QEM010),山东省高等学校青创科技支持计划

通信作者: 程联军,博士,副教授 E-mail : chenglianjunwp@163.com

收稿日期: 2020-07-12

引用格式: 王宗兴,张鹏飞,李俊儒,等. 熔融沉积成型打印 ABS 挤出胀大现象 [J]. 工程塑料应用,2020,48(10) : 71-74,85.

Wang Zongxing, Zhang Pengfei, Li Junru, et al. Die swell of ABS by fused deposition modeling[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10) : 71-74,85.

用回归模型建立了输入参数与表面粗糙度的关系,并使用粒子群算法和共生生物搜索算法进行了参数优化,使表面粗糙度达到最小,并最后进行了实验验证。H. S. Ramanath 等^[11]采用有限元法和解析模拟法对聚己内酯(PCL)在FDM中的挤出过程进行了模拟,研究了熔体流动行为和喷嘴几何结构变化对挤出过程的影响,得出喷嘴直径和角度的变化直接影响沿熔体流动通道的压降。

为了进一步探究打印参数与打印件精度的关系,近年来许多学者使用数值模拟工具研究聚合物在打印过程中的行为变化。Liu Jun 等^[12]开发了一个黏弹性多相凝固和动态网格求解器,并进行了简单的数值验证。该求解器可以直接模拟零件级FDM打印过程,通过单层和多层模拟,探讨了工艺条件对印刷件表面质量的影响。B. P. Heller 等^[13]用有限元法研究了挤出胀大和喷嘴形状对碳纤维增强聚合物复合材料FDM挤出过程的影响,结果表明,挤出胀大现象对纤维取向和力学性能有较大影响。R. Comminal 等^[14]模拟了材料在移动平台上的沉积形状,并使用等温模型研究了工艺参数对制件尺寸和形状的影响。N. Shadvar 等^[15]通过实验探究了熔融聚合物在FDM挤出过程中的行为以及挤出聚合物的挤出胀大现象,并利用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)的流变特性进行了有限元模拟,结果表明,较高的熔体温度和较低的材料流量可以降低喷嘴内的压力降,减小挤出长丝的膨胀。

可以看出,挤出胀大现象是影响FDM打印件尺寸精度的主要因素之一,寻找最佳的工艺参数对提高打印件的尺寸精度、降低挤出胀大现象有着重要的影响。在之前实验中,人们对于胀大数值的测量一直没有一个统一的标准,测量结果主要是在打印平台上打印完成后再进行测量,但对于FDM打印机而言,喷头的横向运动会使横截面为圆形的细丝变为矩形^[16],这降低了尺寸测量的准确性。针对这种现象,笔者提出了一种新的实验方法,可以高效准确地测量挤出细丝的直径,更好地反映挤出胀大现象和工艺参数之间的联系。基于实验数据,建立了线性回归模型以了解细丝直径与工艺参数之间的相关性。实验完成后,采用有限元法模拟了挤出胀大现象,通过与实验结果比较,验证了分析的正确性。

1 实验与仿真

1.1 3D打印实验

实验材料选用广东深圳 Sundcreate 公司的

ABS长丝,直径为1.75 mm,打印机是北京汇天威科技有限公司的弘瑞 Z400 型 FDM 打印机。在打印切片软件中,对于ABS材料的建议温度和速度分别为230℃和40 mm/s,基于此,在本次实验中选取喷嘴温度分别为220,240,260℃,填充速度为20,30,40,50,60 mm/s。

打印时,为了精确测得喷嘴挤出后的细丝直径的数值,将FDM打印机的底板拆下,打印喷嘴每次吐出一定量的细丝,用剪子将其从喷嘴处剪下。打印完成后,每一组温度和填充速度的组合各选取30根细丝,利用普瑞赛司仪器有限公司的 AxioCam 2018 color 型光学显微镜测量细丝直径,每根细丝选取三个位置测量直径,数据处理时选取平均值作为细丝的直径。

1.2 有限元分析

有限元模型如图1所示,该模型是打印机喷嘴结构的一种替代模型,将三维模型简化成了二维轴对称模型,以减少仿真时间。从 N. Shadvar 等^[15]的研究中可以看出,熔融态ABS在喷嘴内部流动时,其速度、压力和温度在内部尺寸突变前已经趋于一个稳定值,因此在进行仿真时,为了便于计算,舍去了材料在喷嘴内部的加热部分,只保留其挤出部分,将其看为一个等温流动。熔融态材料最初处于静止状态,然后在1 s内将入口速度提升至目标速度。为防止内部熔融态材料与空气直接接触,在流体边界上设置一固体区域,材料设置为黄铜,计算时不计算这一块区域。

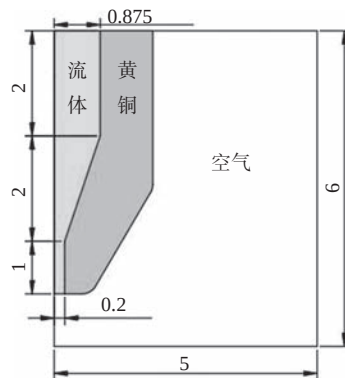


图1 仿真模型

ABS材料在熔融状态下被分类为非牛顿流体,采用幂律模型来表示其黏度的变化:

$$\mu = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1)$$

式(1)中, μ 为剪切黏度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, m 为稠度系数, n 为幂律指数,ABS材料在不同温度下其 m 值与 n 值不同,具体参数数值见表1^[15]。

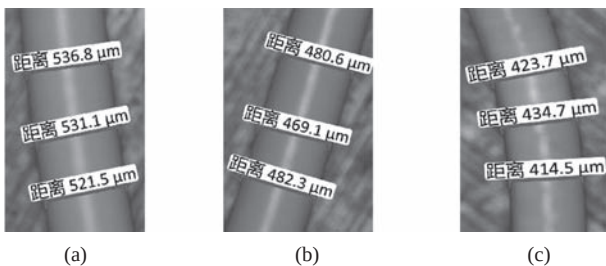
表 1 不同温度下 ABS 材料的幂律模型参数

温度 / °C	n	$m / (\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$
220	0.46	10 779.53
240	0.57	3 760.97
260	0.60	2 434.44

2 结果与讨论

2.1 细丝直径的测量

图 2 给出了在 40 mm/s 的填充速度下,不同喷嘴温度下的 ABS 样品示例及测量结果,将所有数据处理后汇总到表 2。从表 2 可以看出,尽管喷嘴的直径为 0.4 mm,其打印出来的细丝直径均偏大,甚至能达到 0.5362 mm,胀大现象比较明显。在实际应用中,常用挤出胀大比^[17](细丝直径与喷嘴直径的比值)表示胀大效应,将测得的直径与喷嘴直径进行比较后绘制成图 3。从图 3 可以看出,喷嘴温度和填充速度对胀大比有着较大的影响,胀大比随着喷嘴温度的升高而降低,随着填充速度的升高而升高。喷嘴温度为 220 °C 时的尺寸数据与 240 °C 和 260 °C 时有明显的差距,这可能与材料的内部参数有关,购买的 ABS 丝料厂商的建议加热温度为 230~270 °C,而 220 °C 不在建议范围内。将测量得到的数据与 N. Shadvar 等^[15]的数据进行比较,尽管填充速度的表示方式不同,填充速度和喷嘴温度对胀大比的影响有着相同的趋势。但具体数值的对比上,文献[15]中胀大比在不同温度和填充速度情况下,其值为 1.4~1.8,明显大于笔者的实验数值。造成这种差异的原因可能与实验方法有关,之前的测量普遍是将打印丝打印到打印平台上后再进行测量,打印头的横向运动会使打印丝的截面发生变化,这使得测量结果普遍偏大,而笔者的实验中,未使打印丝沉积在平台上,从而直接测量胀大值,与之前文献中的数据相比,更为精确。



喷嘴温度: a—220 °C; b—240 °C; c—260 °C

图 2 填充速度下不同喷嘴温度的测量值

为了进一步了解挤出胀大比与喷头温度和填充速度的关系,采用线性回归模型建立挤出胀大比与喷头温度和填充速度的关系,如式(2)所示。

$$\text{挤出胀大值} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 V \quad (2)$$

表 2 在不同实验情况下测得的细丝平均直径 mm

填充速度 / (mm · s ⁻¹)	喷嘴温度 / °C		
	220	240	260
20	0.522 3	0.448 5	0.422 2
30	0.530 4	0.465 1	0.424 3
40	0.533 2	0.468 7	0.430 3
50	0.535 5	0.469 0	0.433 8
60	0.536 2	0.477 6	0.443 4

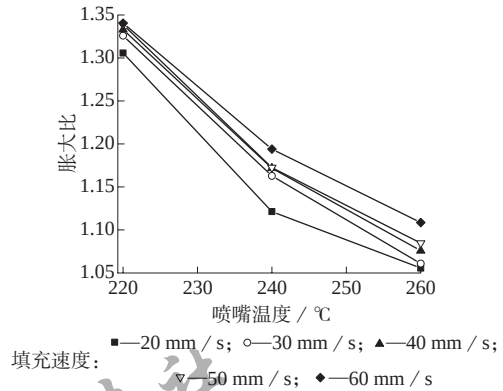


图 3 不同实验情况下测得的胀大比

式(2)中, T 代表喷嘴温度, V 表示填充速度。将表 2 中数值代入式(2)计算得到 $\beta_0 = 1.060\ 766\ 7$, $\beta_1 = -0.002\ 518$, $\beta_2 = 0.000\ 489\ 7$, 生成的方差分析结果见表 3, 该表是基于平方和、自由度、均方差、 F 值和 P 值生成的。从表 3 可以明显看出, 喷嘴温度 P 值明显的小于填充速度的 P 值, 这表明对于 ABS 材料而言, 温度的影响相比于速度更为显著, 此外, 通过计算得到 R^2 值等于 0.965 3, 其值趋向于 1, 表明填充速度和喷嘴温度对胀大现象有着很强的线性关系, 拟合的公式能很大程度上解释胀大比的变化。对于 ABS 材料而言, 胀大比主要与打印参数有关, 因此, 合理的选择工艺参数, 是降低挤出胀大比、提高打印件精度的关键。

表 3 方差分析表

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
T	0.025 361 3	1	0.253 613	324.493 1	4.713×10^{-10}
V	0.000 719 3	1	0.000 719 3	9.203 6	0.010 39
残差	0.000 973 9	12			

2.2 有限元仿真结果分析

图 4 显示了在喷嘴温度 220 °C, 填充速度 20 mm/s 条件下熔融 ABS 材料的黏度图。由图 4 可以观察到黏度在喷头尺寸变化时会有较大的变化, 这是因为喷头尺寸发生变化时, 填充速度是恒定的, 从而使剪切速率发生变化, 故黏度会发生一个较大的变化。图 5 显示了在三种填充速度下基于喷嘴温度的挤出胀大实验结果和模拟结果。由图 5 可以看到, 实验和模拟有着相同的趋势, ABS 的挤出胀大现象随温度的升高几乎呈线性下降, 随填充速

度的增大而增大。挤出胀大现象是由于在挤出过程中,非牛顿半熔融聚合物在喷头中流动,沿模壁形成剪切应力,聚合物链与流动方向对齐,当到达喷嘴出口处时,这些链趋向于恢复其原始和不对齐状态,从而导致直径增大。随着温度的升高,聚合物链的布朗运动增强,其周围的自由体积增大,使流动更容易,黏度降低,分子之间更容易滑动,使得直径增大幅度变小。当温度恒定时,填充速度增加,则单位时间内喷头内部的熔融态材料的体积流量增大,使得剪切应力增加,ABS材料中保存的弹性能同步增大,因此,当聚合物从模具中挤出时,随着分子链的弹性恢复,模具胀大现象同步增加。

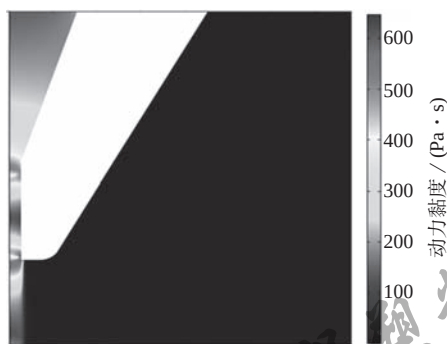


图4 喷嘴温度 220℃、填充速度 20 mm/s 下的仿真结果

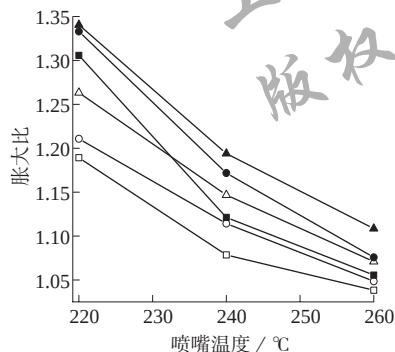


图5 实验和仿真得到的不同填充速度下挤出胀大比与喷嘴温度的关系曲线

从图5可以看出,在实验和模拟结果之间观察到有大约10%的差异。这种差异是由于温度波动、测量误差或有限元模拟中的简化和假设造成的。从实验结果来看,有限元模拟是合理的,实验结果验证了模拟结果的正确性。

3 结论

(1) 随着喷嘴温度的升高、填充速度的降低,ABS长丝的平均直径降低。喷嘴温度和填充速度都是影响挤出胀大现象的显著因素,和胀大现象有

着很强的线性关系,喷嘴温度对于胀大现象的影响更为显著。

(2) 建立了喷嘴出口聚合物膨胀的有限元模型,仿真结果与实验结果有着较好的一致性,能够表示聚合物在喷嘴内部的流动与胀大过程。

(3) 对于普通FDM打印机而言,选择较高的喷嘴温度、较小的打印速度能够提高打印件的尺寸精度,进而改善FDM打印件的品质和尺寸精度。

参考文献

- [1] 刘伟军. 快速成型技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Liu Weijun. Rapid prototyping technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [2] Ranjan N, Singh R, Ahuja I P S. Development of PLA-HAp-CS-based biocompatible functional prototype:A case study[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2018, 33(3):305-323.
- [3] Bulanda K, Oleksy M, Oliwa R, et al. Biodegradable polymer composites used in rapid prototyping technology by melt extrusion polymers (MEP)[J]. Polimery, 2020, 65(6):430-436.
- [4] Yang T C, Yeh C H. Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber / polylactic acid composite parts using fused deposition modeling (FDM):The effects of printing speed[J]. Polymers, 2020, 12(6).doi:10.3390/polym12061334.
- [5] Camposeco-Negrete C. Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(7-8):2 131-2 147.
- [6] Alafaghani A, Qattawi A. Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36:164-174.
- [7] Campbell I, Bourell D, Gibson I. Additive manufacturing:Rapid prototyping comes of age[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(4):255-258.
- [8] Nickel A H, Barnett D M, Prinz F B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing[J]. Materials Science and Engineering:A, 2001, 317(1-2):59-64.
- [9] Agarwala M K, Jamalabad V R, Langrana N A, et al. Structural quality of parts processed by fused deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 1996, 2(4):4-19.
- [10] Saad M S, Nor A M, Baharudin M E, et al. Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(12):5 121-5 137.

- 工程塑料应用,2016,44(6):76-79.
- Chen Jiping, Ding Zhiping, Chen Hongzhou. Injection mould design for core-pulling mechanism of a multiple combination[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(6):76-79.
- [10] 温煌英,赵利平,刘付国宇. 汽车前保险杠热流道精密注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2020,48(3):98-103.
- Wen Huangying, Zhao Liping, Liu Fuguoyu. Design of precision injection mold for hot runner of automobile front bumper[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):98-103.
- [11] 李桂金,匡唐清,金凯. 基于随形水路技术的带把双色水杯注塑模具设计[J]. 中国塑料,2018,32(1):131-136.
- Li Guijin, Kuang Tangqing, Jin Kai. Design of injection molds for a two-color cup with handles based on conformal cooling technology[J]. China Plastics, 2018, 32(1):131-136.
- [12] 张新聚,刘雷,赵文清,等. 注塑模具随形冷却的分析及优化[J]. 塑料,2018,47(2):126-130.
- Zhang Xinju, Liu Lei, Zhao Wenqing, et al. Analysis and optimization of conformal cooling system in injection mold[J]. Plastics, 2018, 47(2):126-130.
- [13] 韩伟,江丽珍,黄凌森. 汽车档位杆注塑模具冷却系统设计与优化[J]. 塑料,2020,49(2):128-131.
- Han Wei, Jiang Lizhen, Huang Lingsen. Design and optimization of cooling system for injection mould of automobile gear rod[J]. Plastics, 2020, 49(2):128-131.
- [14] 骆仕斌,李爱娜. 大型液晶电视外壳双层结构注塑模具设计[J]. 塑料,2018,47(4):94-98.
- Luo Shibin, Li Aina. Design of injection mold for double layer structure of large LCD TV shell[J]. Plastics, 2018, 47(4):94-98.
-
- (上接第 74 页)
- [11] Ramanath H S, Chua C K, Leong K F, et al. Melt flow behaviour of poly- ϵ -caprolactone in fused deposition modelling[J]. J Mater Sci Mater Med, 2008, 19(7):2 541-2 550.
- [12] Liu Jun, Anderson K L, Sridhar N. Direct simulation of polymer fused deposition modeling (FDM)——An implementation of the multi-phase viscoelastic solver in OpenFOAM[J]. International Journal of Computational Methods, 2020, 17(1):253-277.
- [13] Heller B P, Smith D E, Jack D A. Effects of extrudate swell and nozzle geometry on fiber orientation in fused filament fabrication nozzle flow[J]. Additive Manufacturing, 2016, 12:252-264.
- [14] Comminal R, Serdeczny M P, Pedersen D B, et al. Numerical modeling of the strand deposition flow in extrusion-based additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 20:68-76.
- [15] 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.doi:10.1007/s12289-019-01523-1.
- [16] Serdeczny M P, Comminal R, Pedersen D B, et al. Experimental validation of a numerical model for the strand shape in material extrusion additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24:145-153.
- [17] Mu Y, Hang L, Chen A, et al. Influence of die geometric structure on flow balance in complex hollow plastic profile extrusion[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1-4):1 275-1 287.