

文章编号:1006-9941(2024)04-0377-10

喷头流道结构参数对高黏度含能材料直写成型 3D 打印挤出过程稳定性影响

丁治豪^{1,2}, 杨伟涛², 高宇晨², 杨建兴², 孔新¹, 杨斌¹

(1. 西北大学化工学院, 陕西 西安 710069; 2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究直写成型技术(DIW)中挤出系统的喷头流道结构参数(锥角角度、出口直径、成型段长度)对含能材料挤出过程的流体流动影响,研究建立了基于 Polyflow Extrusion 模块的高黏度含能材料挤出模型,并采用直写成型 3D 打印工况的挤出实验对其进行了验证。研究通过所建立的模型分析了锥角角度范围 90°~130°,出口直径 0.75~2 mm 以及成型段长度 5~20 mm 对高黏度含能材料挤出过程的影响。结果表明:采用 Polyflow Extrusion 模块可以较准确地模拟复合含能材料的流动行为,同时发现锥角为 100°、喷头出口直径为 1.5~1.75 mm 时挤出成型过程相对稳定、挤出膨胀较小,且成型段的生长会在增大所需入口压强的同时减小出口膨胀效应。

关键词: 直写成型(DIW);黏弹性浆料;挤出装置;流道结构;挤出膨胀

中图分类号: TJ55;O373

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023110

0 引言

直写成型(direct ink writing, DIW)技术是增材制造(additive manufacture, AM)技术中的一种材料挤出工艺,该技术借助计算机辅助预先设计结构图案,通过控制打印物料的流变性能将浆料由喷嘴输出,由计算机控制 3D 打印装置进行三维模型分层加工与叠加成型^[1-2]。相对于传统制造工艺,DIW 具有无模具、设计自由度高的优点,适用物料范围广,可用于制造特殊复杂的产品,在含能材料装药领域具有广泛的应用前景。

DIW 所使用的含能材料打印浆料配方通常由辅助定型配剂(光固化树脂)与固体可燃颗粒组成,所得打印件的燃烧性能随着固体可燃颗粒含量的增高而增强,但较高的固体含量也会增大浆料的黏度,在过渡段至成型段中间位置的较窄处易堆积,发生流动堵塞。因此,DIW

在含能材料装药领域的研究重点是改善高固含量、高黏度配方的流变性能,或是通过辅助加工的方式优化 DIW 打印,包括通过新型振动辅助 3D 打印(VAP)^[3]和声场辅助增材制造(A-FAAM)技术^[4]优化 DIW 打印。此外,还包括改进挤出装置本身的流道结构。

在流道结构的设计方面,黄玲等^[5]提出了影响熔融 3D 打印挤出过程稳定性的一系列流道结构参数,如出入口收缩比、喷头成型段形状等,通过仿真得到了相关参量对挤出过程的影响趋势。陈富华等^[6]采用单因素法使用 Workbench 软件的流固耦合模块分析了收缩角、成型段长度对特定多孔发射药模具的挤出成型压力和模具针架系统变形的影响,证明了不同的流道结构会使挤出流速、挤压过程压强分布以及材料在喷嘴挤出后的流胀曲线发生变化。周梦蕾等^[7]以挤出沉积技术为核心,针对发射药黏度高、不能高温加热的性质,设计了发射药挤出沉积快速成型系统,同时使用以硝化棉为主的某 ZY 发射药为原料进行 3D 打印挤出实验,拟合发现喷头内径与物料浓度之间存在多项式函数关系。相关研究证明了流道结构优化对含能材料 3D 打印的正面作用,但现有研究考虑的参数影响量不足,亦或是只针对特殊形状的挤出模具进行参数研究,对 DIW 技术中使用的喷头流道结构对高黏度含

收稿日期:2023-05-19;修回日期:2023-07-18

网络出版日期:2023-12-05

基金项目:陕西省自然科学基金青年项目(2020JQ-596);陕西省教育厅青年项目(19JK0843)

作者简介:丁治豪(1999-),男,硕士研究生,主要从事工程流体力学研究。e-mail:dingzhihao165@163.com

通信联系人:杨伟涛(1987-),男,研究员,主要从事发射药及装药技术研究。e-mail:njyangweitao@163.com

引用本文:丁治豪,杨伟涛,高宇晨,等. 喷头流道结构参数对高黏度含能材料直写成型 3D 打印挤出过程稳定性影响[J]. 含能材料, 2024, 32(4):377-386.

DING Zhi-hao, YANG Wei-tao, GAO Yu-chen, et al. Influence of Nozzle Structure Parameters on the Stability of DIW 3D Printing Extrusion Process[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(4):377-386.

能材料挤出的影响研究较少,有待进一步探究。

为此,研究基于DIW挤出装置结构参数,采用Polyflow Extrusion模块建立了DIW高黏度含能材料挤出模型,通过直写成型3D打印工况条件下的挤出实验验证了模型的有效性,再通过所建立的模型对喷头流道结构参数(锥角角度范围 $90^{\circ}\sim 130^{\circ}$,出口直径 $0.75\sim 2\text{ mm}$ 以及成型段长度 $5\sim 20\text{ mm}$)在高黏度含能材料挤出过程中的作用进行模拟仿真,对高固含量复合浆料的喷头流道设计提出了建议。

1 仿真模型

1.1 模型构建与基本假设

研究采用Polyflow Extrusion模块^[8],建立DIW装置喷头的高黏度含能材料挤出模型。Polyflow是采用有限元法的计算流体动力学(CFD)软件,专用于黏弹性材料的流动模拟,黏弹性材料本构方程库丰富,其Extrusion模块可以较准确地模拟出塑料、树脂等高分子材料的挤出成型过程。

因DIW喷头为轴对称结构,为优化计算取四分之一进行建模并划分网格,网格划分以六面体网格为主导,成型段以及自由段位置采用扫掠方式进行划分,并进行加密处理。模型仿真边界如图1所示,含能材料以速度入口条件进入喷头内,因含能材料挤出过程中黏度呈非牛顿流体特性,黏度会随着挤出过程而发生变化,故含能材料本构方程选择为Bird carreau模型,采用渐进算法进行计算迭代,同时因为喷头出口处会发生膨胀现象,出口自由段采用网格重铸法以进行膨胀流线提取。仿真模型结构与网格如图2所示,重点研究锥角角度 angle 、成型段长度 L 以及出口直径 d 对高黏度含能材料的挤出作用影响。

研究使用环氧丙烯酸光敏树脂作为含能材料打印浆料的固化塑型剂,浆料具有高分子材料所特有的流变性。高分子材料的基本控制方程是基于质量守恒、动量守恒和能量守恒三大定律的连续性方程、运动方程和能量方程。由于高分子材料的非牛顿特性,对上述方程组在实际应用中的数学模型修正存在着困难,为此适当进行了工程简化,综合考虑挤出工艺条件以及材料特性^[9-11],研究对挤出模拟仿真作如下假设:

(1)实验用代料为不可压缩的高黏性非牛顿流体;

(2)挤压装置中物料各处温度相同,流场分布与温度和时间无关,物料为等温流动的幂率非牛顿流体;

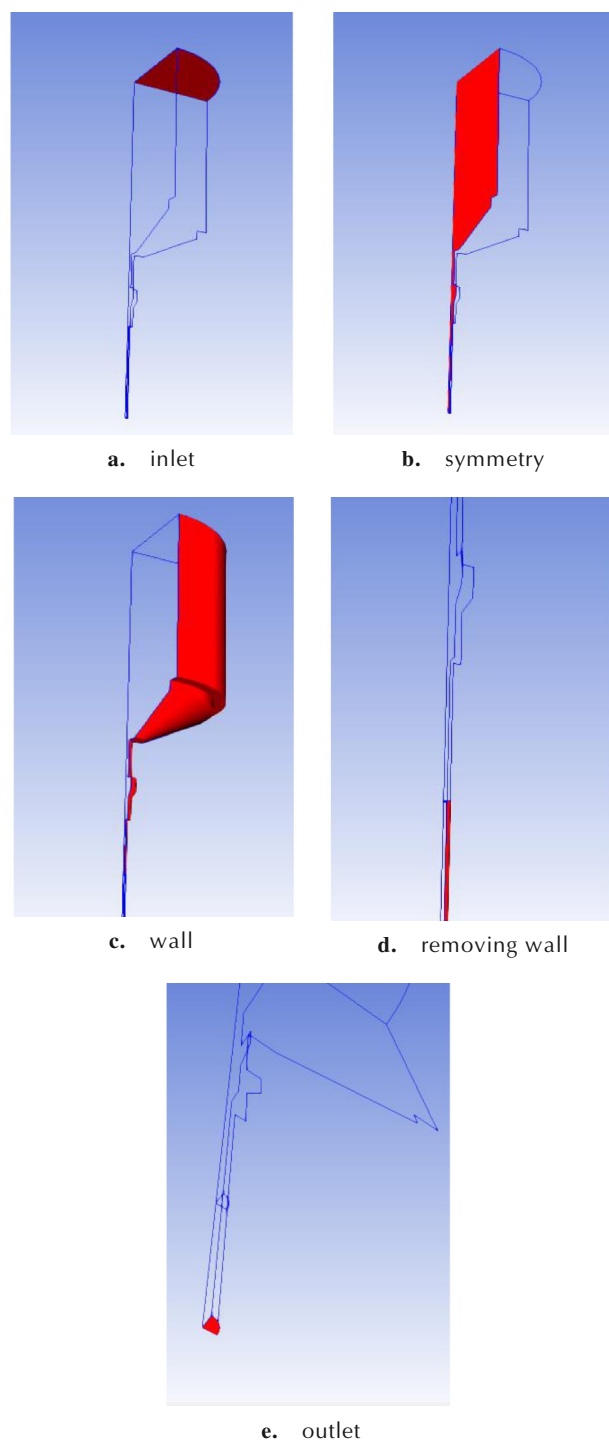


图1 仿真模型边界命名

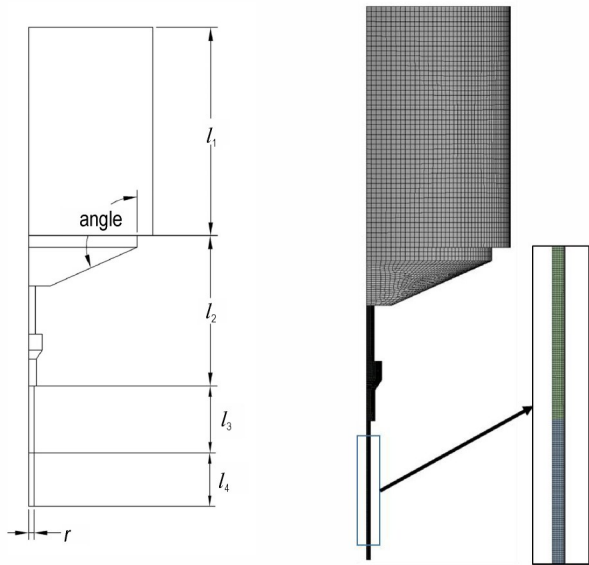
Fig.1 Diagram of simulation model boundary

(3)流动过程雷诺数较小,物料在挤出过程中为层流流动且充满整个流道;

(4)物料在流道壁面无滑移,在壁面处各向速度分量为0;

(5)物料在流道内为完全发展流动;

(6)忽略物料的重力影响。



l_1 —feeding section, l_2 —transition section,
 l_3 —forming section, l_4 —free section
angle—cone angle, r —nozzle outlet diameter

图2 料桶流道仿真模型结构与网格示意图

Fig.2 Structure and grid diagram of the simulation model for bucket flow channel

1.2 模型验证

1.2.1 实验原料与仪器

为验证模型的有效性,研究采用伺服拉力试验机对直写成型 3D 打印实际工况条件下的挤出行为进行了实验研究。

环氧丙烯酸光敏树脂为液相成分,以 K_2SO_4 为固相成分。固液两相通过搅料机旋转搅动约 20 min 使物料均匀混合。配制完成的用料需避光保存以防止树脂光敏性所致的流变性变化。采用 70% K_2SO_4 质量分数配比以保证浆料具有较高固体含量,而更高的质量分数配比会导致挤出试验无法顺利进行。浆料经搅料机真空混匀,所得流体黏弹性符合 Bird carreau 模型^[12],如公式(1)所示。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

式中, η_{∞} 为无穷剪切黏度,Pa·s; η_0 为零剪切黏度,Pa·s; λ 为特征时间; n 为幂律指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} 。

使用旋转流变仪(Haak Mars III, Thermo Fisher Scientific 公司,德国)对物料黏度随剪切速率的变化关系进行测量^[13]。测量得到 η_0 为 1206 Pa·s, η_{∞} 为 0, λ 为 266.1, n 为 0.4314。

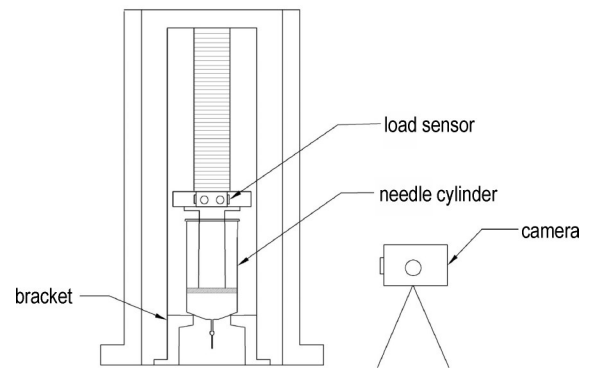
研究使用伺服拉力试验机(WBE-9010B,东莞市威邦仪器设备有限公司,中国)进行挤出实验。实验用相机型号为 sonyRX100M6,帧率为 25 fps,固定焦距为 40 mm,

最大光圈为 F2.8,拍摄范围为 1280 pixel×1024 pixel。

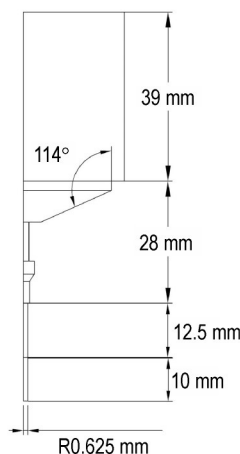
1.2.2 直写成型 3D 打印工况挤出实验

为获得不同入口进料速度下的实际出口流速情况以及挤出膨胀直径,验证仿真可靠性,研究搭建如图 3 所示的挤出与摄像实验装置。针筒固定在伺服拉力试验机的支架上,顶部活塞推杆与试验机压杆相接触,针筒参数不变,改变拉力机压杆下移速率进行实验,下移速率分别为 0.3, 0.5 $mm \cdot min^{-1}$ 和 0.7 $mm \cdot min^{-1}$ 。选择 114° 锥角, 1.25 mm 出口直径和 12.5 mm 成型段长度的实验用料筒。

对于拉力试验机的压杆推动活塞下移到稳定供料的整个过程,研究通过相机拍摄,并测量其各时间段内的短时平均出料速率,观察喷头出口处挤出膨胀现象及流线。采用 Matlab 处理摄像实验的图像^[14],以喷头作为参考物,以喷头出口直径、喷头长度等参数提取获得膨胀直径 d 及流线等参量。流线提取过程如图 4 所示。当入口进料下移 30 mm 左



a. schematic diagram of experimental device



b. structural parameters of experimental material cylinder

图3 挤出与摄像实验装置以及实验用料筒结构参数

Fig.3 Extrusion and camera experimental device and structural parameters of experimental material cylinder

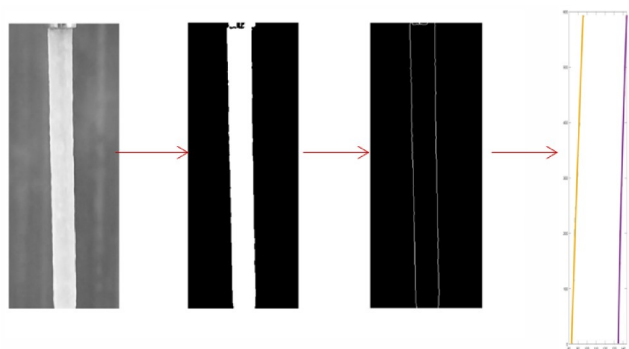


图4 MATLAB 流线提取分析

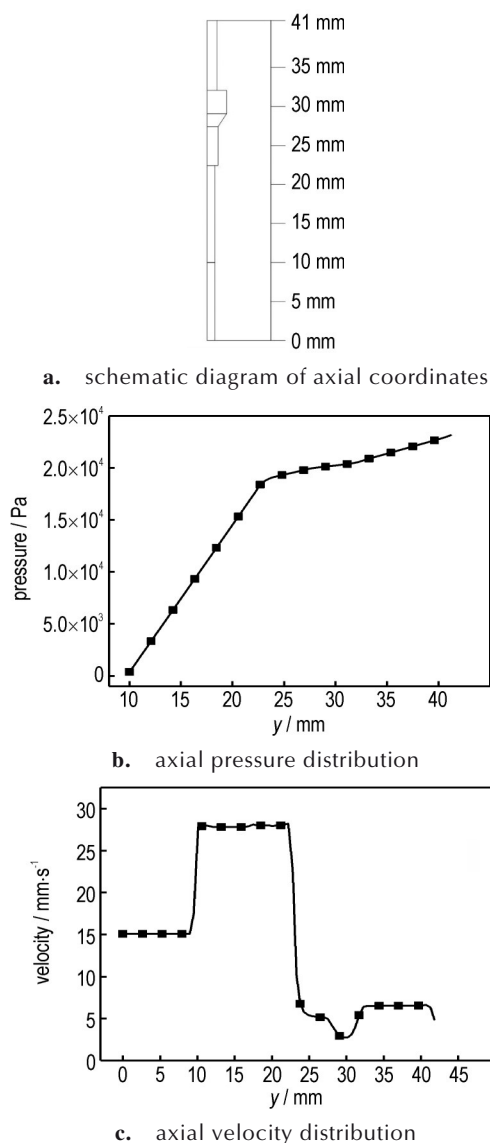
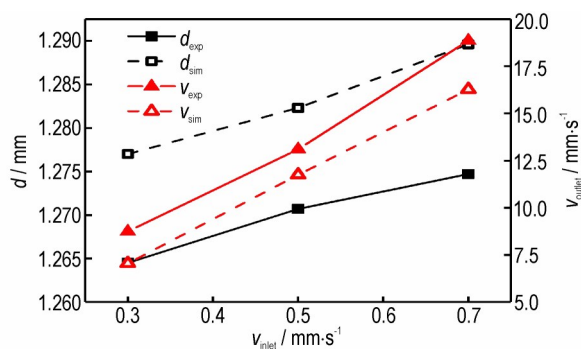
Fig.4 MATLAB streamline extraction analysis

右时,物料挤出情况趋于稳定,对这时的流线轮廓进行提取,并取挤出出口下方 1.5 mm 处截面进行膨胀分析,对两端数据点坐标比对可得到膨胀直径 d 。同时对 30 s 内的挤出物质量进行称量,已知其密度为 $1.7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,即可得到单位时间内的体积流量 Q ,出口截面积已知,计算即可得单位时间内的平均流速 v 。

1.2.3 仿真与实验对比验证

研究在入口进料速率为 $0.3, 0.5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下对直写成型 3D 打印高黏度含能材料工况进行仿真模拟,由 Polyfow Extrusion 模块仿真得到入口进料速率下喷头流道竖直轴向参数分布结果,如图 5 所示。由图 5 可知,从过渡段顶部入口开始,为克服黏性摩擦阻力,压强逐步下降,在进入流道截面变窄的成型段后,压强衰减的幅度变大(图 5b)。速度变化与流道截面变化相关,在窄截面处,流线收敛流速增快,最终到达自由段后失去壁面约束,流体挤出膨胀,流通截面变大导致流速减小(图 5c)。

实验与仿真结果对比如图 6 所示,实验与仿真的整体出口状况随入口流速变化所导致的改变程度存在一定误差,但变化趋势基本一致。分析认为产生膨胀方面误差的原因可能是因为没有考虑挤出后的环境温度、压力变化;而产生流速方面误差的原因可能是因为料筒内物料下移 30 mm 挤压后,物料经过压缩密实作用,最终挤出时的密度会较初始密度变大,因此通过初始密度计算得出的平均流速会偏大。除去系统误差,研究认为仿真所反映的线性趋势与实际实验一致,可以较为可靠地预测在不同工况下的流场变化趋势情况,认为所得模型有效。

图5 仿真所得 $0.7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 入口进料速率下喷头流道竖直轴向参数分布Fig.5 Vertical axial parameter distribution of nozzle flow path at $0.7 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ inlet feed rate from simulation图6 所得出口膨胀直径 d 与出口流速 v_{outlet} 的实验值与仿真值对比Fig.6 Comparison of outlet expansion diameter d and outlet flow velocity v_{outlet} obtained from experiment and simulation

2 高黏度含能材料挤出仿真研究

2.1 仿真参数

由于相同参数情况下出口流速越大,挤出膨胀现象越为明显^[15-16]。为此,研究采用实验组最大入口速度 $0.7 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,模拟研究不同主锥角角度、喷头出口直径和成型段长度对速度场、压力场以及膨胀系数的作用,以分析各喷头结构参数对挤出膨胀系数的影响。其中,模型锥角、喷头出口直径和成型段长度为单一变化,模型锥角分别设为 $90^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 114^\circ, 120^\circ$ 和 130° ;喷头出口直径分别设为 $0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75 \text{ mm}$ 和 2 mm ;成型段长度则分别为 $5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 \text{ mm}$ 和 20 mm 。

为保证变量仿真结果的准确性,仿真模型在已有的验证模型基础上进行修改,对所需研究的结构参数在其它模块维持不变的前提下进行单模块化重铸。喷头数值仿真基本参数见表 1。

表 1 数值仿真基本参数

Table 1 Basic parameters of numerical simulation

boundary name	boundary conditions	value / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
inlet	Inflow (velocity inlet)	1.167×10^{-5}
outlet	$f_n=0, f_s=0$	
wall	zero wall velocity ($v_n=v_s=0$)	
removing wall	free surface	
symmetry	plane of symmetry	

2.2 仿真结果与讨论

2.2.1 锥角流道影响

考虑到在相同的入口速度下,进料段料筒的锥角角度不同会影响出口的膨胀情况^[15]。为分析锥角流道如何影响高黏度含能材料挤出过程的流场和挤出口的膨胀,研究通过仿真模拟了锥角范围为 $90^\circ \sim 130^\circ$,喷头出口直径为 1.25 mm 及成型段长度为 12.5 mm 的喷头挤出工况,得到锥角流道对高黏度含能材料挤出的影响结果。图 7 展示了不同锥角料筒段的流线图。由图 7 可知,流线在料筒段内首先收敛,随后进入

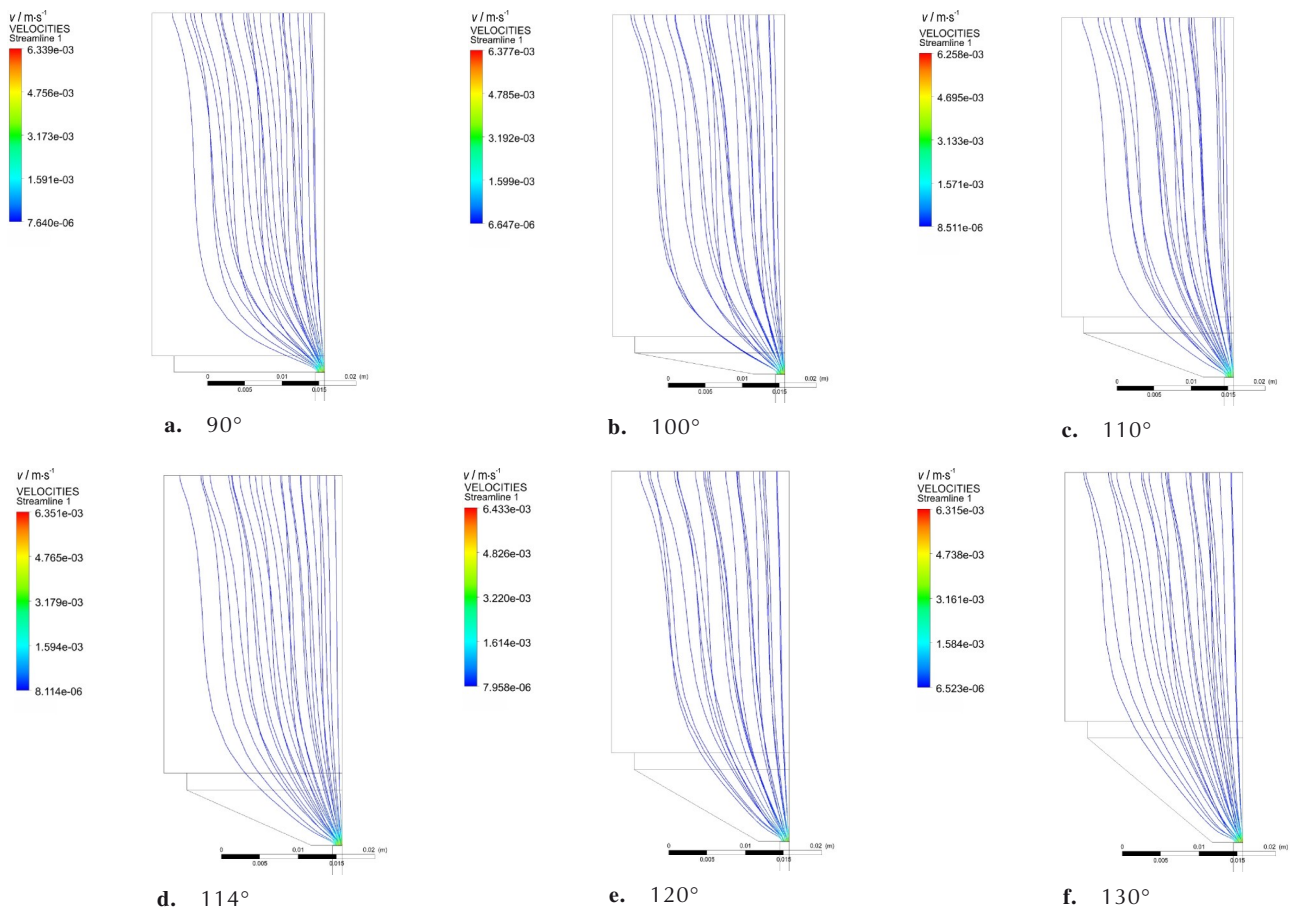


图 7 不同锥角料筒段流线图

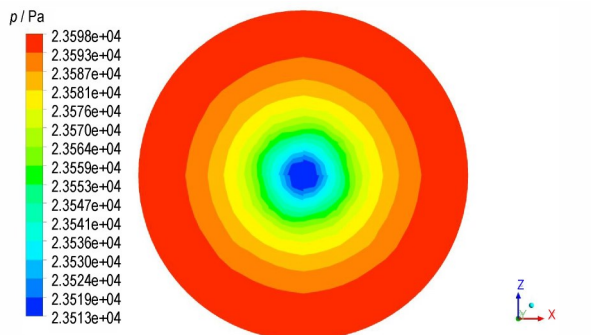
Fig.7 Flowline diagram of different cone angle material cylinder sections

渐变段。随着材料从较大直径的料筒迁移到较窄的渐变段入口, 流速急剧上升, 数值增加数个数量级 (图 7a)。进一步观察表明, 随着锥角的增加, 流线的收敛性增强, 并与壁面轮廓更为贴近 (图 7f)。这暗示了更大的顶部压强在推动材料流动时作用, 而不是无效地冲击壁面, 因此, 增大锥角有助于材料的顺畅挤出。

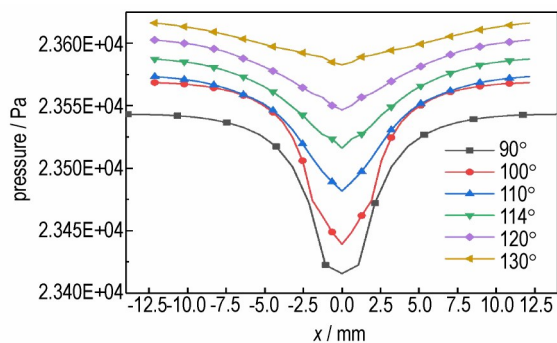
为进一步分析锥角段的作用, 研究对锥角段的中间截面处进行压强衍变研究, 得到了不同锥角段下压强转化为弹性势能的趋势情况, 因各锥角中间截面压力云图轮廓带分布接近, 故选取仿真实验锥角组的中间锥角值 110° 进行压力云图变化趋势展示。图 8 展示了 110° 锥角段中间截面的压力分布图 (图 8a) 以及不同锥角段中间截面的水平轴向压力分布 (图 8b)。图 8a 揭示了压强从外到内逐渐减小的现象, 分析认为这是由于浆料在向中心流动时, 部分顶部压强被转化为弹性势能并储存。此外, 从图 8b 可以看出, 小锥角的料筒在同一位置的压强衰

减更为显著。这是由于较大的锥角在纵向上拥有更长的距离, 从而提供了更多的空间以转化压强为弹性势能。

图 9 为不同锥角竖直轴向速度与压力分布。表 2 为不同锥角组膨胀参数。由图 9a 可以看出, 不同的锥角在渐变段的速度趋势是一致的, 但在成型段出口, 100° 锥角显示出最高流速。当浆料流入自由段后, 因为壁面的约束消失, 流速显著下降。图 9b 显示, 锥角



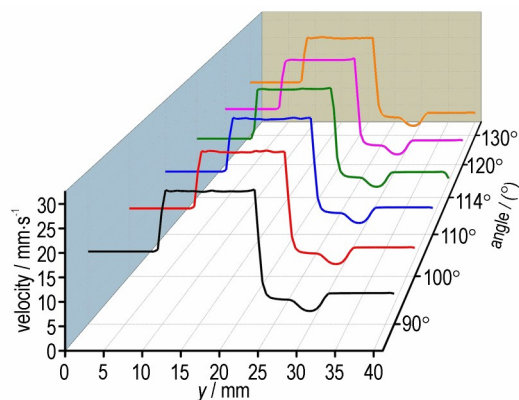
a. pressure cloud map distribution at cone angle of 110°



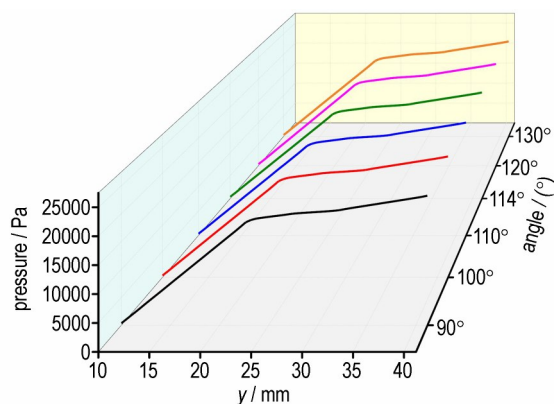
b. horizontal axial pressure distribution

图 8 110° 锥角段中间截面处压力云图分布与不同锥角段中间截面处水平轴向压强分布

Fig. 8 Pressure map distribution at the middle section of 110° cone angle section and horizontal axial pressure distribution at the middle section of different cone angle sections



a. axial velocity



b. axial pressure

图 9 不同锥角竖直轴向参数分布

Fig. 9 Vertical axial parameter distribution for different cone angles

表 2 不同锥角组膨胀参数

Table 2 Expansion parameters of different cone-angle groups

angle / (°)	r / mm	λ
90	0.6427	1.0283
100	0.6423	1.0277
110	0.6432	1.0291
114	0.6448	1.0317
120	0.6449	1.0318
130	0.6435	1.0296

Note: r is expanded radius; λ is coefficient of expansion.

的变化对压强的影响微乎其微。表 2 的膨胀系数变化进一步指出,尽管锥角大于 130°可能仍有减小膨胀半径的潜力,但过大的角度会导致装置的倾斜段过长,对喷头结构强度提出更高的要求。因此,仿真仅考虑 90°至 130°的范围,综合考虑,100°锥角展现出最佳的流出性和膨胀控制性能。

2.2.2 喷头出口直径影响

现有研究已证实,在聚合物材料挤出时,随着喷头出口直径的减小,其出口速度会相应增加^[16],这背后深层的规律还待深入探讨。为了深入了解喷头出口直径对挤出流动和出口膨胀的影响,研究进行了系列模拟,喷头出口直径从 0.75 mm 逐渐增加到 2 mm,间隔 0.25 mm,共计 6 组;锥角选取为 114°,成型段长度设定为 12.5 mm。

图 10 展示了中心轴各点的压强和速度变化。通过对不同出口直径的竖直压强分布(图 10a)分析。发现,当出口直径缩小且其他因素不变时,所需的挤出压强会增大。此外,由于浆料的非牛顿流体的特性,其压强与出口直径之间的关系并非简单的线性变化。如图 10b 所示,流体经过一段渐变后,在成

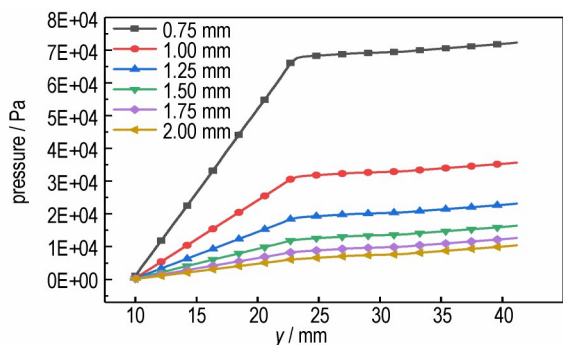
型段中逐渐汇聚,出口直径越小,流速越快,当出口直径为 0.75 mm 时,流速高,流动呈现出高分子熔体特有的不稳定性。与其他喷头出口直径对比发现,这可能会导致挤出物表面出现明显的不规则棱纹,影响其表面质量。因此,在选择打印喷头时既要关注挤出的稳定性,也要考虑其膨胀影响,特别是膨胀系数超过 3%(即膨胀参数 $\lambda > 1.03$)时,打印精度可能会受影响。

表 3 进一步显示,喷头出口直径越大,出口的膨胀效果越小。但对于超过 1.75 mm 的喷头出口直径,由于峰值压强过低,无法将筒内的浆料完全挤出,导致挤出物中存在有气泡空隙,进而影响部件质量。但另一方面,过高的压强也并不是一个理想的选择,因为最终的目标是确定适用于含能材料的最佳流道结构。鉴于这类材料固有的不稳定性,挤出过程中的过高压强可能带来安全隐患。综合上述分析,结合不同出口直径下的数据,认为最佳的喷头出口直径范围应为 1.5~1.75 mm。

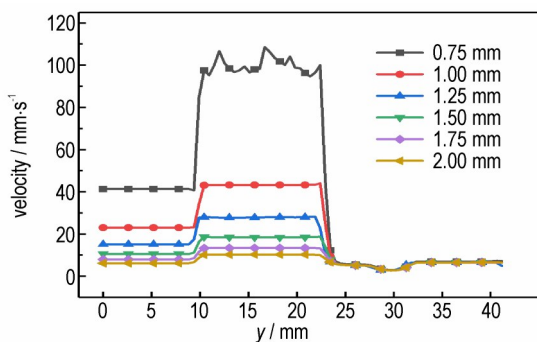
表 3 不同出口直径下膨胀参数

Table 3 Expansion parameters under different outlet diameters

diameter / mm	r / mm	λ
0.75	0.4068	1.0850
1	0.5164	1.0328
1.25	0.6448	1.0317
1.5	0.7655	1.0207
1.75	0.8854	1.0119
2	1.0060	1.0060



a. axial pressure



b. axial velocity

图 10 不同出口直径下竖直轴向参数分布

Fig.10 Vertical and axial parameter distribution under different outlet diameters

2.2.3 成型段长度影响

成型段在喷头流道中被视为高分子材料的稳定流动区,紧随过渡段后为浆料提供一个相对平稳的发展区域。该段的主要功能是进一步收敛速度矢量并确保浆料在此区域内充分密实,从而保证挤出物的稳定成型。然而,成型段的长度选择存在制约因素,特别是当处理高黏度材料时,材料与设备壁面的摩擦增加,所需压强也相应提高,导致设备超载甚至结构变形。为深入了解成型段长度对流场分布的影响,设定了一系列仿真实验,其中成型段长度范围从 5 mm 至 20 mm,每组增加 2.5 mm,总计 7 组;锥角设定为 114°,喷头出口直径选择 1.25 mm。

图 11 为不同成型段长度竖直轴向压力与速度分布。根据图 11a,可以明确观察到成型段长度与压强

分布之间存在一定关系,成型段入口处的压强与成型段长度表现出强正相关性。这表明,更长的成型段可以为物料提供更充分的密实区域,从而提高密实度,但也同时对喷头结构装置的材料强度提出了更高的挑战。图 11b 揭示了在固定入口速度下,不同长度的成型段内的峰值流速在相同高度位置表现出相似性,这意味着成型段长度对总体挤出速度的影响较小。关于出口的膨胀效应,表 4 展示了不同成型段长度下膨胀参数。如表 4 所示,随着成型段长度的增加,膨胀

效应逐渐减少,从 5 mm 到 20 mm,挤出膨胀减少约 20%。因此,成型段长度的选择需要综合考虑流体力学、设备结构稳定性、挤出安全性以及材料的密实和精度要求。在面临较大的挤出压强和潜在的安全风险时,可选择较短的成型段;而在处理易发生挤出膨胀效应的材料时,可通过选择较长的成型段来降低膨胀效应。另外,当成型件出现塌陷时,较长的成型段能够提高压强并增加密实区域,有助于此问题的解决。

2.3 DIW 3D 打印预测及调节

综上,分析认为要通过 DIW 技术 3D 打印出精度良好,且无缺陷的含能材料成型件,应满足以下条件:(1)出口挤出流速与底部平台移动速度相匹配;(2)物料经过足够大的压力作用充分密实,所打印的成型件无坍塌现象;(3)填充率与出口变形相匹配,无两边间的非预期间隙或堆积叠边。

为了满足上述条件,实现 DIW 技术对含能材料成型件的成功打印,研究结合仿真所得各喷头结构参数对打印挤出过程的影响情况,对打印时可能出现的潜在问题提出优化方案:当出口挤出速率小于打印装置平台移动速度时,可更换出口直径更小的喷头从而增大出口挤出速率以适配平台较快的移动速度。当成型件出现坍塌时,更换较小的喷头出口直径或增加成型段长度来增大内部的密实压强,同时较长的成型段长度可以使含能材料浆料有充分的密实空间来压实固化。当出口膨胀较大、成型件因打印路径间隙与膨胀不匹配出现叠边时,采用更大出口直径的喷头或选择更长的成型段可以减小膨胀效应以避免成型件叠边。

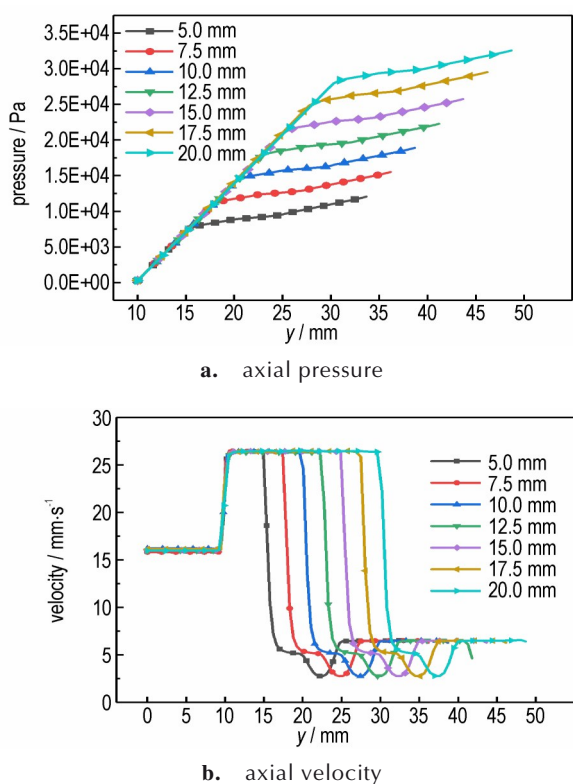


图 11 不同成型段长度垂直轴向参数分布

Fig. 11 Axial parameter distribution under different forming section lengths

表 4 不同成型段长度下膨胀参数

Table 4 Expansion parameters under different forming section lengths

length / mm	r / mm	λ
5	0.6469	1.0350
7.5	0.6464	1.0342
10	0.6457	1.0331
12.5	0.6448	1.0317
15	0.6436	1.0297
17.5	0.6429	1.0286
20	0.6424	1.0278

3 结论

(1) 实验证明采用 Polyflow Extrusion 模块,合理建模、网格划分可以较准确地模拟高黏度复合含能材料的流动行为,虽适当工程简化会使仿真结果与实际间不存在少量误差,但仿真所反映的变化趋势与实际实验一致,可以较为可靠地预测不同工况下的流场变化趋势。

(2) 锥角角度基本不会影响料筒顶部的载荷压强,但较大的锥角有助于内部流线的收敛,避免挤出过程中顶部载荷对壁面无效冲击的同时减少物料在料筒边缘的堆积。大于 100°的锥角会加剧出口的挤出膨胀,因此 100°锥角是理想仿真中最为合适的模型锥角

角度。

(3)相同入口进料速度下,较小的喷头出口直径会带来更大出口速度,同时也会显著增加入口载荷,对模型结构有着更高强度的要求,挤出过程的安全稳定性面临巨大冲击,影响 3D 打印件的质量。而较大出口直径会使顶部压强载荷过小,物料有可能充分压实挤出,致使成型件塌件。综上考虑在实验的仿真参数范围内,喷头出口直径选择 1.5~1.75 mm 更为合适。

(4)足够长的成型段可以使流体矢量充分收敛,物料充分压实,成型件更加稳固,但过长的窄出口直径成型段对模具材料强度有极高要求,因此需根据实际工况条件选取合适的成型段长度。

参考文献:

- [1] 姜一帆,赵风起,李辉,等.墨水直写增材制造技术及其在含能材料领域的研究进展[J]. 火炸药学报, 2022,45(1):1-19.
JIANG Yi-fan, ZHAO Feng-qi, LI Hui, et al. Direct ink writing technology for additive manufacturing and its research progress in energetic materials[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2022, 45(1):1-19.
- [2] 刘志伟,张海鹰.面向增材制造的快速建模若干关键技术的探讨[J].现代制造技术与装备,2015(2):20-21.
LIU Zhi-wei, ZHANG Hai-ying. Discussion of key technologies of rapid modeling of additive manufacturing[J]. *Modern manufacturing technology and equipment*, 2015(2):20-21.
- [3] AFRIAT A, BACH J S, GUNDUZ I, et al. Comparing the capabilities of vibration-assisted printing (VAP) and direct-write additive manufacturing techniques [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121(11-12): 8231-8241.
- [4] TAN C, LI R, SU J, et al. Review on field assisted metal additive manufacturing [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023: 104032.
- [5] 徐阳,黄玲.基于 CFD 的含能材料 3D 打印机喷嘴[J].兵工自动化,2019,38(6):57-61.
XU Yang, HUANG Ling. Nozzle structure in energetic material 3D printer based on CFD technology[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(6):57-61.
- [6] 陈富华,胡小秋,刘志涛.基于有限元分析 Workbench 软件的多孔发射药挤压过程仿真分析[J].兵工学报,2017,38(4):695-703.
CHEN Fu-hua, HU Xiao-qiu, LIU Zhi-tao. Workbench-based simulation analysis of multi-perforated gun propellant in extrusion process [J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2017, 38(4): 695-703.
- [7] 周梦蕾,南风强,何卫东,等.基于挤出沉积技术的发射药 3D 打印机设计及制备[J].含能材料,2021,29(6):530-534.
ZHOU Meng-lei, NAN Feng-qiang, HE Wei-dong, et al. Design and preparation of propellant 3D Printer based on extrusion deposition technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(6):530-534.
- [8] 陈晋南,胡冬冬,彭炯.Polyflow 软件包在聚合物挤出成型中的应用[J].世界科技研究与发展,2002(1):28-34.
CHEN Jin-nan, HU Dong-dong, PENG Jiong. Applications of polyflow in extrusion process[J]. *World Scientific and Technological Research and Development*, 2002(1):28-34.
- [9] 丁亚军,应三九.螺杆挤出过程中物料在线流变行为及其数值模拟[J].兵工学报,2015,36(8):1437-1442.
DING Ya-jun, YING San-jiu. In-line rheological behaviors and numerical simulation of material in extrusion processing [J]. *ACTA ARMAMENTARII*, 2015, 36(8):1437-1442.
- [10] 张丹丹,何卫东.硝基胍七孔发射药挤压成型过程的数值模拟[J].火炸药学报,2015,38(1):82-86.
ZHANG Dan-dan, HE Wei-dong. Numerical simulation of 7-hole nitroguanidine-based gun propellant in extrusion forming process [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(1):82-86.
- [11] 柴俊,马忠亮.七孔变燃速发射药挤出胀大的模拟[J].四川兵工学报,2015,36(4):124-126.
CHAI Jun, MA Zhong-liang. Extrusion swelling numerical simulation of co-extrusion process of variable-burning rate propellant [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(4): 124-126.
- [12] HUILGOL R R, Phan-Thien N. Fluid mechanics of viscoelasticity: general principles, constitutive modelling, analytical and numerical techniques (Volume 6) [M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1997: 324-328.
- [13] 邵鸿飞,刘元俊,任万杰,等.非牛顿流体粘度测试方法及标准物质研究进展[J].宇航计测技术,2019,39(S1):1-5.
SHAO Hong-fei, LIU Yuan-jun, REN Wan-jie, et al. Research progress of viscosity measurement methods and reference materials for non-newtonian fluids[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2019, 39(S1):1-5.
- [14] 杜云龙,徐冬冬,陶宏江.基于 MATLAB 的图像边缘检测算法的研究[J].自动化应用,2023,64(20):181-183.
DU Yun-long, XU Dong-dong, TAO Hong-jiang. Research on the edge detection algorithm based on MATLAB [J]. *Automation applications*, 2023, 64(20):181-183.
- [15] 徐阳.含能材料 3D 打印实验系统出料结构设计及成型精度分析[D].南京:南京理工大学,2019.
XU Yang. Design of discharge structure and analysis of forming accuracy for 3D printing experimental system of energetic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [16] 丁骁焱.含能材料 3D 打印实验系统喷头的设计和分析[D].南京:南京理工大学,2017.
DING Xiao-yao. Design and analysis of the nozzle for the 3D printing experimental system of energetic materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

Influence of Nozzle Structure Parameters on the Stability of DIW 3D Printing Extrusion Process

DING Zhi-hao^{1,2}, YANG Wei-tao², GAO Yu-chen², YANG Jian-xing², KONG Xin¹, YANG Bin¹

(1. Chemical Engineering Institute, Northwestern University, Xi'an 710069, China; 2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To study the effects of extrusion system nozzle runner structural parameters (cone angle, outlet diameter, and molding section length) on the fluid flow of energy-containing material extrusion process in the direct-in-writing-forming (DIW) technology, an extrusion model of high-viscosity energy-containing materials based on the Polyflow Extrusion module was established, and was verified by extrusion experiments under the working conditions of direct-write 3D printing. The study analyzed the effects of cone angle range (90° – 130°), outlet diameter (0.75–2 mm), and molding section length (5–20 mm) on the extrusion process of high-viscosity energy-containing materials through the established model. The results show that the Polyflow Extrusion module can accurately simulate the flow behavior of composite energy-containing materials. When the cone angle is 100° , and the nozzle outlet diameter is between 1.5 mm and 1.75 mm, the extrusion process is relatively stable with small extrusion expansion. Additionally, as the length of the molding section grows, the required inlet pressure increases while the outlet expansion effect decreases.

Key words: direct write forming (DIW); viscoelastic slurry; extrusion device; flow channel structure; extrusion expansion

CLC number: TJ55; O373

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2023110

Grant support: Shaanxi Provincial Natural Science Foundation Youth Program (No.2020JQ-596); Shaanxi Provincial Education Department Youth Program (No.19JK0843)

(责编: 姜梅)