http://pmse.scu.edu.cn

注射打印工艺的喷嘴设计与流量控制

朱家威[1]，潘 威[1]，黄士争[1]，Sain Mohini[2]，杨卫民[3]，曾宪奎[1]，鉴冉冉[1,2]
（1. 青岛科技大学 机电工程学院，山东 青岛 266061；2. 多伦多大学 机械与工业工程系 生物复合材料及生物质材料加工中心，安大略省 多伦多 M5S 3B3，加拿大；3. 北京化工大学 机电工程学院，北京 100029）

摘要：提出以挤出打印零件外壳为自身模具进行内部注射填充的注射打印增材制造策略，为实现高效高强熔融沉积成型提供了一种解决方案。分析得到了不同打印精度下所允许的注射流量范围及对应的喷嘴口径，探明了不同工序单元的喷嘴结构适配性及其对成型工艺的影响，以兼顾打印和注射工序的工艺需求。结果表明，在打印工序，打印流量与螺杆转速表现出良好的线性正相关关系。小口径喷嘴会引起较大流动阻力，使螺杆末端流体所受压力显著增高，过高的压力和流动阻力会降低挤出打印效率。在注射工序，注射流量与注射速度呈正相关，且熔体注射温升受注射速度和喷嘴口径的显著影响。注射速度过大会导致熔体因温升过高而降解，因此，存在极限注射流量，且其随喷嘴口径的增加而增加。此外，喷嘴口径不能过大，否则会影响打印工序的精度。因此，设计注射打印喷嘴要兼顾打印精度、注射温升和流量需求，以确保成型质量和稳定性。

关键词：注射打印；仿真分析；喷嘴口径；流量控制；熔融沉积成型
中图分类号：TQ320.5+2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2025）05-0149-10

熔融沉积成型(FDM)是一种流行的原型制作和数字化制造技术，在按需制造、个性定制、异形构件等领域具有明显优势，然而由点成线、由线成面、由面成体的逐层逐步堆积制造模式导致零件强度差、生产效率低，限制了其向工业功能组件先进制造领域发展，成为困扰其工程应用的两大挑战[1]。针对这些问题，国内外诸多学者从打印路径规划[2~4]、打印工艺[5,6]和算法优化[7,8]、打印设备改进[9~11]和打印材料设计[12~14]等方面进行了研究，以期加强打印件的强度和成型效率，然而受限于这种逐层堆积固有模式的缺陷，同时兼顾两者仍存在巨大挑战。

近年来，国内外学者在FDM增材制造技术基础上引入了注射工艺以改善打印制品强度，同时保持较高的生产效率，取得了较好的效果。Belter等[15]在FDM打印零件中设计合理的空隙通道，然后手动注射液体树脂填充空隙通道后固化得到最终制品，将零件强度和刚度分别提高了45%和25%。Duty等[16]描述了一种“Z-销”FDM打印方法，先在堆积方向(*Z*向)形成销孔，后将熔丝挤出注入预先确定的销孔中以缝合多层，起到层间销钉锚固的作用，使得堆积方向层间强度提高3.5倍以上。然而该方法为实现销钉构建采用了较大口径喷嘴，导致打印层内线距较大、空间填充率较低，降低了各个方向的极限拉伸强度。Kazmer等[17]在打印零件中设置敞口内腔，通过FDM设备连续交替的进行壳体挤出打印与内腔挤出充填以实现热塑性树脂零件的整体构造，使打印速度提高3.2倍。但由于零件内腔为敞口型腔，内部材料冷却时存在严重的体积收缩，易导致壳-芯分离。与Belter方法类似，Son等[18]改敞口型腔为闭口型腔，先使用FDM设备打印热塑性零件薄壳，再在

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0084
收稿日期：2024-05-07
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52206095)；山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE232)；山东省高等学校青创科技支持计划(2023KJ102)
通讯联系人：鉴冉冉，主要从事高分子材料加工成型与智能制造技术研究，E-mail: jianrr@qust.edu.cn

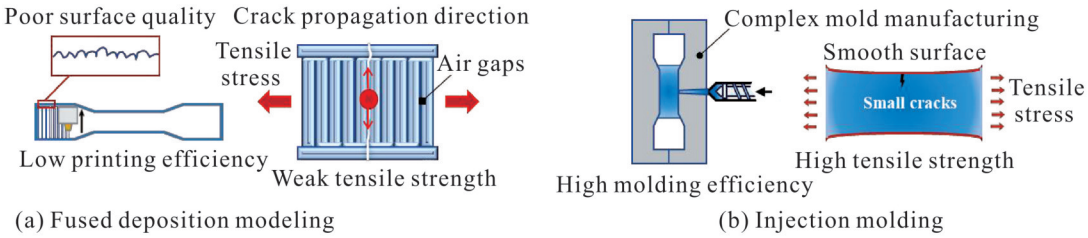


Fig. 1 Comparison between FDM technology and injection molding

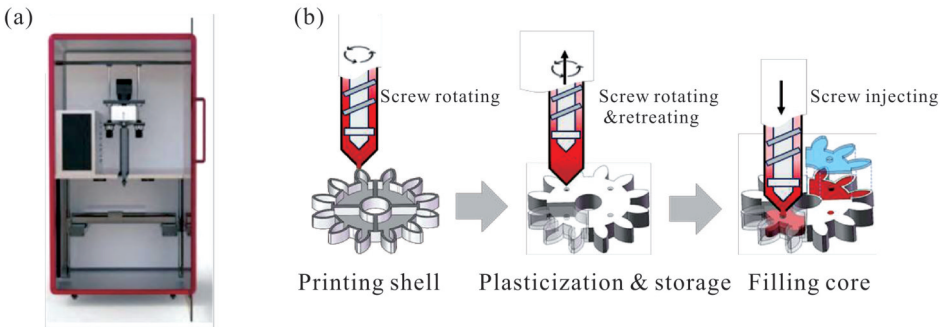


Fig. 2 (a) Injection printing prototype and (b) its process principle

壳内手动注射和固化液态热固性树脂，使打印件成型速度提升1倍，各向同性值达到注塑件水平。此外，为改善壳-芯分离问题，在注射液态树脂前需要对外壳内表面进行化学处理以增加壳-芯结合强度，工艺较为复杂。上述方法均基于常规FDM熔丝挤出设备进行零件构造，由于缺乏有效的注射塑化装置，大多采用可流动的液态树脂进行后续注射，使得壳-芯材料异质且难以实现连续化生产。传统FDM打印设备的小喷嘴口径导致的低流量输出也很难满足大空腔的填充需求。

为此，笔者所在团队提出了“预打印壳体，后注射壳芯”的注射打印一体化策略，并开发了专门的注射打印设备(Fig.2(a))[19~21]，实现了热塑性塑料多维度的高效高强增材制造。为解决打印与注射流量差异化难题、小喷嘴口径与大注射容积矛盾等问题，本文采用计算流体力学软件Polyflow进行三维非等温模拟，分别建立了不同喷嘴口径的挤出和注射流域模型，研究了打印工序下喷嘴口径对螺杆挤出流域的影响以及注射工序下喷嘴注射时的熔体质量，并结合两阶段模拟结果，分析了打印/注射两阶段共同适用的喷嘴口径范围及流量控制策略，从而为该工艺提供理论支撑和实际指导。

1 注射打印工艺

在聚合物加工领域，FDM增材制造和注射成型是两大核心技术。FDM技术以其逐层堆积的方式展现出无限的设计可能性，但其制品往往不能满足必需的强度和功能，制约了其在工业领域的应用(Fig.1(a))。相比之下，注射成型广泛应用于大规模高质量制品的生产，但其模具制作过程耗时长、成本高，不利于个性化制造(Fig.1(b))。为了打破这些局限，笔者提出了以挤出打印零件外壳为自身模具进行内部注射填充的注射打印增材制造策略，为实现高效高强熔融沉积成型、快速按需个性化制造高质量高分子制品提供了新途径。

注射打印工艺通过注射螺杆实现挤出打印零件外壳为自身模具，后进行内部注射填充成型制品，其基本原理如Fig.2(b)所示。首先螺杆旋转挤出熔体进行沉积打印，配合三维移动平台以构建具有零件外形及内部空腔的外壳；打印完成后螺杆旋转后退进行塑化储料，在达到预定行程后停止旋转；然后螺杆向前推动，以零件外壳为自身模具，通过内部空腔浇口将大量熔体注入零件内部，使零件达到注塑件的质量标准。这样既可以满足打印时的低流量输出，又能在注射阶段实现大流量注入，充分发挥注射

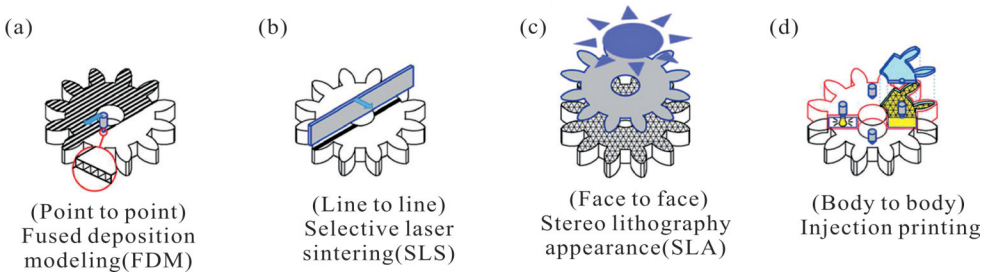


Fig. 3 Comparison between injection printing and common printing methods

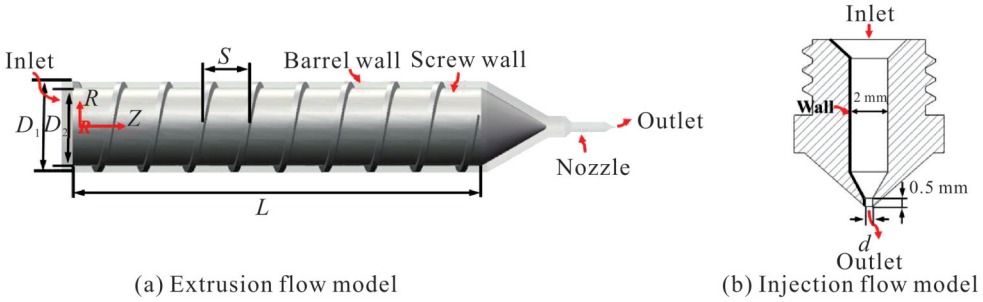


Fig. 4 Flow model

成型与FDM打印各自的优势,实现工业制品的大规模高性能定制。

注射打印与常见打印工艺的对比如Fig.3所示。正常来讲,运动维度越小,打印效率越高。FDM工艺(Fig.3(a))需要3个维度运动,选择性激光烧结(Fig.3(b))需要2个维度运动,立体光固化成型(Fig.3(c))需要1个维度运动,而本文提出的注射打印技术(Fig.3(d)),打破逐层逐步堆积的固有模式,以打印为衣、模塑为核,可近似为1个维度。因此,传统的3D打印工艺(如Fig.3(a),Fig.3(b)和Fig.3(c))仅限于以逐层堆积方式构建材料,这更适合被认为是“2.5D成型”,而以“体到体”的模塑成型方式(Fig.3(d))构建材料可以实现真正的“3D快速成型”,有望突破高分子材料挤出增材制造技术有限打印强度和打印效率的困境。

2　模型建立

2.1　物理模型

注射打印工艺的制品成型分为螺杆旋转挤出打印外壳壳层和螺杆推进注射填充内部芯层2个阶段,为探明不同喷嘴口径对两阶段各物理场的影响,分别建立了挤出流域模型和注射流域模型。

2.1.1　挤出流域模型:根据机筒静止、螺杆旋转的特点,建立了注射螺杆流道内聚合物熔体的三维模型。螺杆计量段与流体组合模型如Fig.4(a)所示,其中螺杆计量段大径(D_1)为16 mm,小径(D_2)为13.76 mm,螺距(S)为8 mm,长度(L)为72 mm。为简化模型,省略了注射螺杆头部的止逆装置,但并不影响对挤出流域流场的分析。

2.1.2　注射流域模型:为方便观察注射时的流体变化并减少计算量,对模型进行适当简化。单对喷嘴流域进行注射仿真。喷嘴结构如Fig.4(b)所示,根据喷嘴口径共设置了7种模型(d=0.2 mm,0.4 mm,0.6 mm,0.8 mm,1.0 mm,1.5 mm和2.0 mm)。

2.2　控制模型及边界条件

本文采用聚丙烯(PP)为工作流体,以研究聚合物在挤出与注射阶段的物理规律,针对PP塑化系统中熔体流动的基本特点,做出以下假设:熔体是不可压缩的非牛顿流体;熔体流动是三维瞬态非等温流动;不存在滑移面;流道完全充满;由于PP的高黏性,惯性力和质量力相对于黏性力可以忽略不计。在以上假设的情况下,建立流域的控制方程,公式如下

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t}+\frac{\partial P}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}(\eta)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{2}$$

能量守恒方程：

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u_i\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)=k\frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}+\varphi \tag{3}$$

式中：i，j——x，y，z三个维度。

采用Bird- carreau 模型和近似Arrhenius模型来描述PP物料的表观黏度随剪切速率和温度的变化规律，如式(4)所示[22]

$$\eta=\eta_0(1+\lambda^2\dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}}\exp[-\alpha(T-T_\alpha)] \tag{4}$$

式中：η——表观黏度，Pa·s；η_0——零剪切黏度，Pa·s；λ——自然时间，s；α——温度敏感系数，K^{-1}；T_α——基准温度，K；n——非牛顿指数；$\dot{\gamma}$——剪切速率，s^{-1}。

计算中用到的PP物性参数如Tab.1所示。在挤出仿真时运用Polyflow软件的网格重叠技术进行挤出流域与螺杆网格的叠加运算，以反映流域内表面的实时变化。为研究注射工序下不同注射速度的注射流域物理场变化，根据不同注射速度求得对应的理论注射流量，如式(5)所示，并以此设置为入口边界条件[23]。Tab.2给出了挤出流域模型和注射流域模型的流动和热边界条件。

$$Q=\frac{\pi}{4}D_1^2V \tag{5}$$

式中：Q——理论注射流量，mm^3/s；D_1——螺杆大径，mm；V——注射速度，mm/s。

利用ANSYS Mesh网格划分软件对流域进行四面体网格划分，为提升模拟的准确性和效率，采用“捕获曲率”（Curvature）选项，确保模型中存在大曲率变化的区域的网格能够自动细化。针对喷嘴等关键区域进行了网格的精细化和加密处理，并在外壁面施加了边界层，以更好地描述这些区域的流动特性。Fig.5给出了0.4 mm喷嘴下挤出流域出口平均速度和注射流域出口平均温度随设置的最大单元网格尺寸的变化情况。挤出流域结果表明，最大单元

Tab. 1 Material properties of the PP fluid

Parameters	Unit	Numerical value
Density (ρ)	$kg\cdot m^{-3}$	735
Specific heat capacity (C_p)	$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	2100
Thermal conductivity (k)	$W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	0.15
Zero shear viscosity (η_0)	Pa·s	26470
Natural time (λ)	s	2.15
Non-Newtonian index (n)	n	0.38
Coefficient of temperature sensibility (α)	K^{-1}	0.02
Reference temperature (T_α)	K	483.15

Tab. 2 Flow and thermal boundary conditions

Boundary	Extrusion flow model		Injection flow model	
	Flow conditions	Thermal conditions	Flow conditions	Thermal conditions
Inlet	Normal force is zero, tangential force is zero	483.15 K(210 ℃)	Volume flow	483.15 K(210 ℃)
Outlet	Normal force is zero, tangential force is zero	Heat outlet	Outflow	Heat outlet
Barrel wall /wall	Stationary, no-slip wall	483.15 K(210 ℃)	Stationary, no-slip wall	483.15 K(210 ℃)
Screw wall	Screw speeds 1 $r\cdot min^{-1}$, 5 $r\cdot min^{-1}$, 10 $r\cdot min^{-1}$, 15, $r\cdot min^{-1}$ 20 $r\cdot min^{-1}$	Thermal insulation		

网格尺寸为0.4~0.3 mm之间的出口平均速度计算相差小于1.29%,同时考虑平衡计算效率和精度,在后续挤出流域数值模拟中,将最大单元网格尺寸设置为0.35 mm,流体网格数量约为126万。注射流域结果表明,最大单元网格尺寸为0.2~0.1 mm,网格之间的出口平均温度计算相差小于0.96%,因此在后续注射流域数值模拟中,将最大单元网格尺寸设置为0.15 mm,流体网格数量约为10万。

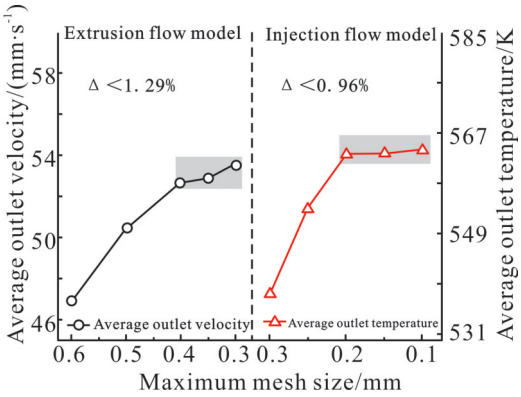


Fig. 5 Mesh independence validation of flow model

3 结果与讨论

注射打印分为壳层打印和芯层注射2个工艺阶段,喷嘴口径和注射速度对成型制品性能具有重要影响。在打印阶段,喷嘴口径会影响壳层打印的精度,一般来说喷嘴口径越小,打印时堆积的线条越细,成型的精度也越高;另一方面,小口径喷嘴会增加熔体流出的阻力,影响挤出打印效率。在注射阶段,喷嘴口径和注射速度则会影响芯层熔体的温度。喷嘴口径越小、注射速度越大,熔体经喷嘴流出后,由剪切作用引起的熔体注射温升就越大。熔体温度过高易造成壳层软化坍塌,甚至引起材料分解,影响注射质量和制品性能。Fig.6清晰展示了喷嘴口径和注射速度对注射打印成型的影响,这些因素的协同作用和合理选择对确保注射打印制品质量和稳定性至关重要。

3.1 挤出阶段流量与阻力分析

在挤出打印阶段,注射螺杆仅发生旋转动作,聚合物在螺杆旋转及机筒加热的双重作用下塑化熔融成可流动的熔体,然后经喷嘴挤出。螺杆转速和喷嘴口径是影响打印效率和打印精度的关键因素。流域挤出流量和压力分布均受到螺杆转速和喷嘴口径的影响。为此,分别计算了不同螺杆转速、喷嘴口径下的流域物理场变化。

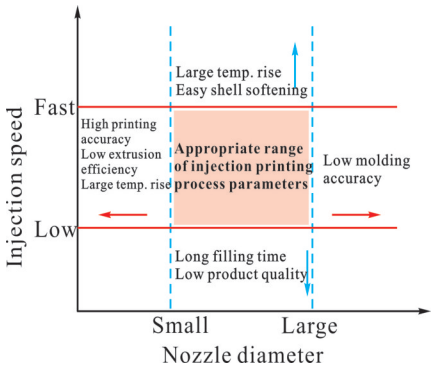


Fig. 6 Influence of nozzle diameter and injection speed on injection printing molding

Fig.7(a)为0.4 mm喷嘴出口速度分布及各喷嘴流域挤出流量随螺杆转速的变化。结果表明,出口速度大小由壁面向中心逐渐增大,且随着螺杆转速的增加而增加。计算得到的挤出流量与螺杆转速表现出良好的线性正相关关系。因此,通过调节螺杆转速可以控制挤出流量,从而满足不同打印速度的要求[24]。此外,在相同螺杆转速下,不同喷嘴口径流域的挤出流量存在差异,即挤出流量随着喷嘴口径的减小而减少,说明小口径喷嘴在熔体流出时会引起较大的流动阻力,进而影响挤出打印效率。

Fig.7(b)为螺杆转速为5 r/min时喷嘴口径对流域压力分布的影响。从0.4 mm喷嘴挤出流域的压力云图可以看出,在螺杆螺棱的正位移输送作用下,熔体沿程压力逐渐增加,并在螺杆末端达到最大值,而后在喷嘴流道内迅速降低。这种螺杆旋转增压的方式确保了熔体在挤出过程中保持稳定的压力和流动状态,近出口处一定的压力有助于熔体密实,提高挤出熔体质量。而对于不同喷嘴口径的流域,喷嘴口径越小,熔体流出的流动阻力越大,导致螺杆末端流体所受的压力越高。过大的压力会造成流体在螺棱处的逆流现象加剧,从而影响熔体的挤出稳定性并降低较小喷嘴流域的挤出效率。因此,除了考虑螺杆转速对挤出流量的影响之外,还需要考虑喷嘴口径对压力分布和流动阻力的影响,以实现更优的挤出效率和熔体质量。

3.2 注射阶段流量与温度分析

在注射充填阶段,螺杆轴向向前运动,将螺杆头部空腔储存的物料通过喷嘴注射充填到内部芯层中

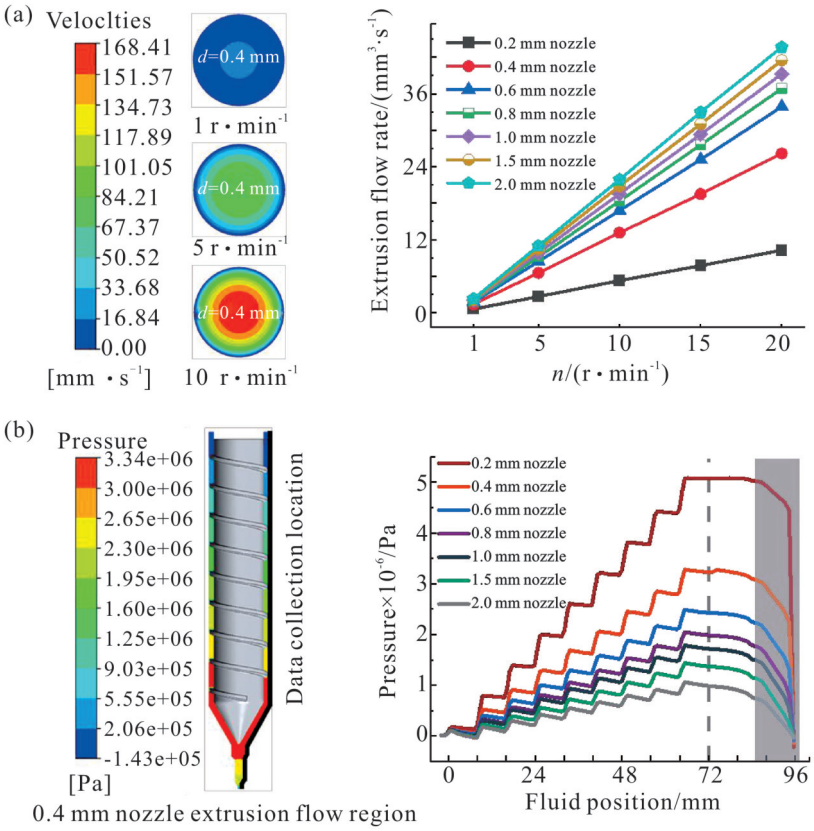


Fig. 7 (a) Variation of nozzle outlet velocity distribution and extrusion flow rate in each nozzle flow region with screw speed; (b) influence of nozzle diameter on the pressure distribution in the flow region

成型制品。经计算得到的理论注射流量随注射速度的变化如Fig.8(a)所示。Fig.8(b)为喷嘴口径为0.4 mm时注射速度对喷嘴出口速度分布的影响。从图中可以发现，出口速度大小由壁面向中心迅速增大，且随着注射速度的增加而增加。对比Fig.8(b)和Fig.7(a)可以看出，注射阶段的出口速度是挤出阶段的50倍以上，引起流量呈数量级的较大差异。在挤出打印阶段，熔体出口速度较慢，受到的剪切作用较小，因此熔体温度能够保持在物料加工允许范围内。然而，在注射填充阶段，随着出口速度的显著加快，剪切作用引起的温度变化极易导致熔体过热。Fig.8(c)为喷嘴口径为0.4 mm时出口温度分布，可以看出熔体在近壁面处温度骤升。因此，需要重视并优化注射阶段的熔体温度控制和出口热分布情况，以确保最佳的成型品质[25]。

Fig.8(d)所示为喷嘴口径为0.4 mm时出口速度及温度径向分布随注射速度的变化。从图中可以看出，不同注射速度下喷嘴出口中心径向0～0.15 mm范围内，物料速度基本保持稳定且一致；但在0.15～0.2 mm的边界区域内，物料流速迅速上升后骤降。这导致靠近壁面处熔体速度梯度增高，熔体内部剪切生热增强，造成靠近壁面处的熔体温度骤增，且注射速度越快，径向速度梯度越大，熔体温度变化越剧烈。

为探明喷嘴口径对剪切生热与熔体注射温升的影响，进一步分析了注射速度为4 mm/s时不同喷嘴口径下的出口径向温度分布，如Fig.8(e)所示。从图中可以看出，不同喷嘴口径下的径向温度分布趋势基本一致，即在靠近壁面时骤增，且最大熔体温度随着喷嘴口径的减小而增大[26]。这是因为在相同的注射速度下，熔体流动空间随喷嘴口径的减小而缩减，熔体出口速度及速度梯度均增大，流体分子链之间的剪切摩擦作用增强，使得剪切作用产生的热量增多，熔体温度的增幅也就更大。虽然剪切作用主要

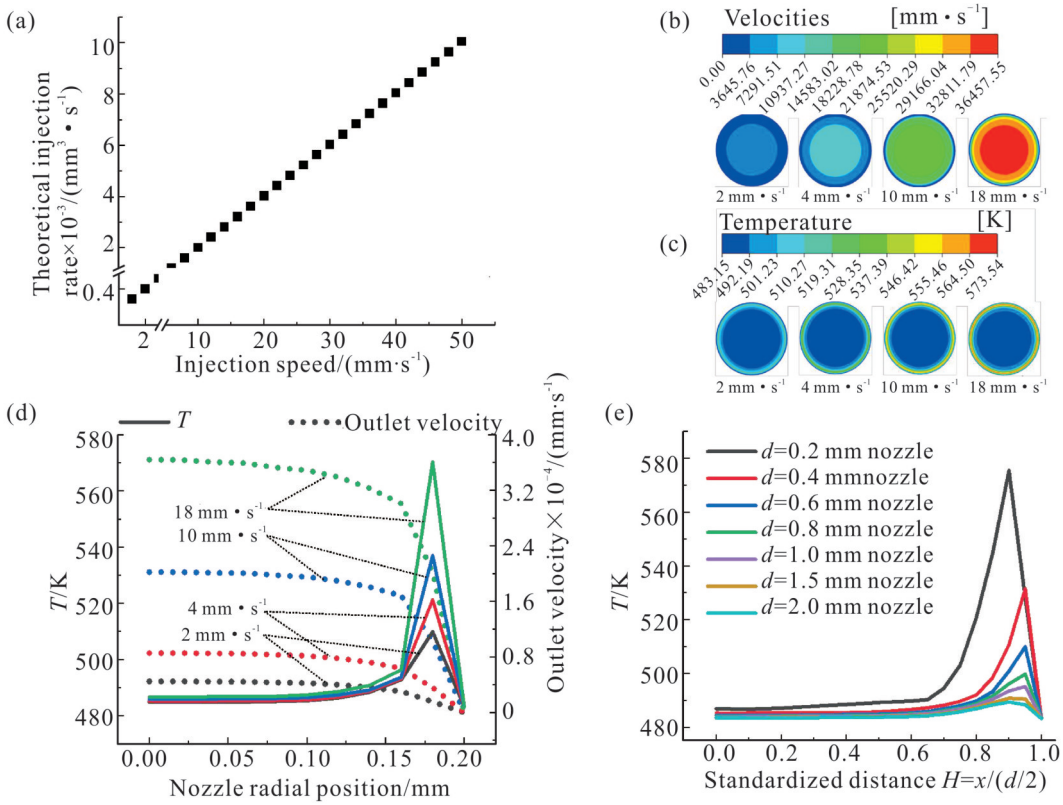


Fig. 8 (a) Variation of theoretical injection rate with injection speed; (b) impact of injection speed on outlet velocity distribution under a 0.4 mm nozzle; (c) impact of injection speed on outlet temperature distribution under a 0.4 mm nozzle; (d) variation of radial distribution of nozzle outlet velocity and temperature with injection speed; (e) variation of radial distribution of outlet temperature with nozzle diameter

发生在靠近壁面处,但其产生的热量会向喷嘴中心区域传导。喷嘴口径越小,剪切作用越大,中心区域的熔体温度变化越明显,所以曲线中最高温度随着喷嘴口径的减小而左移,即往中心区域偏移。

3.3　最大注射温升与极限注射流量分析

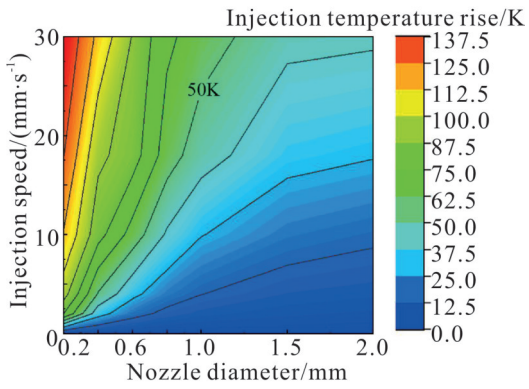


Fig. 9 Relationship between injection temperature rise and nozzle diameter and injection speed

综合分析喷嘴口径、注射速度及熔体温度的关系,有助于精确控制注射工序中的流量。Fig.9为注射温升与喷嘴口径和注射速度的关系。由图可知,注射温升随注射速度的增加及喷嘴口径的减小而迅速增高。然而过高的温度会使PP材料发生劣化(超过533.15 K时与氧气接触易黄化[27])。因此,设置熔体注射温升不得超过50 K。Fig.10为不同注射速度下各喷嘴注射温升的仿真数据与拟合函数。所得回归方程为注射工序的熔体温升及流量控制提供了参考,并确定了各喷嘴达到50 K注射温升时的最大注射速度。有助于在设计层面了解各喷嘴的注射性能,同时避免注射填充时出现熔体温升过高导致的材料劣化或壳层软化坍塌的现象,进而确保高效、高质量的成型过程。

采用上述得出的各喷嘴最大注射速度进行仿真计算,得到的熔体注射温升仿真结果如Tab.3所示。可以看出,仿真结果与拟合数据误差较小,证明了拟合函数的准确性。Fig.11为各喷嘴极限注射流量。

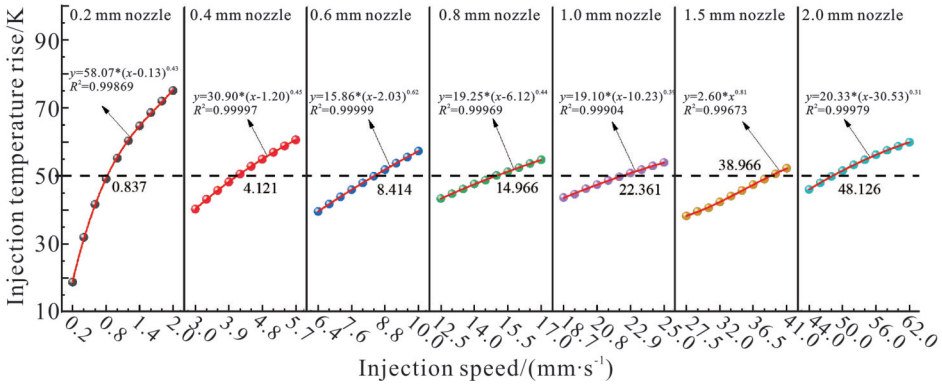


Fig. 10 Simulation data and fitted function of injection temperature rise of each nozzle with different injection speeds

Tab. 3 Comparison between fitted data and simulated data

Nozzle diameter/mm	Max injection speed /(mm·s^{-1})	Fit data/K	Simulation data/K	Error/%
0.2	0.837	50.00	50.38	0.76
0.4	4.121	50.00	49.98	−0.04
0.6	8.414	50.00	50.00	0.00
0.8	14.966	50.00	49.97	−0.06
1.0	22.361	50.00	49.99	−0.02
1.5	38.966	50.00	50.11	0.22
2.0	48.126	50.00	49.94	−0.12

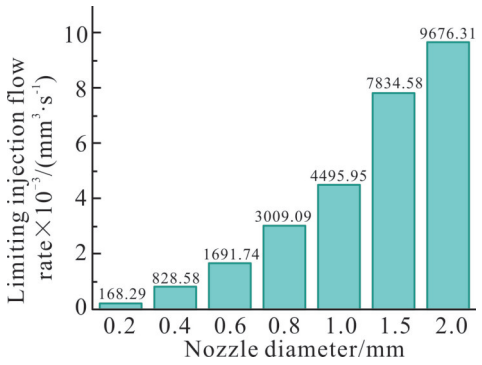


Fig. 11 Limiting injection flow rate of each nozzle

在注射温升限制下，允许的注射流量随着喷嘴口径的减小而急剧降低。当使用0.2 mm的喷嘴时，允许的极限注射流量仅为168.29 mm^3/s。过低的注射流量限制了成型制品的大小，并且延长了注射工序的时间，这会导致芯层熔体温度分布差异过大，从而影响成型质量。然而，如果喷嘴口径过大，则会影响打印工序的精度。因此，在选择喷嘴口径时，应综合考虑各个阶段各因素(如打印精度、注射温升、注射速度)之间的关系，根据实际需求合理选择喷嘴口径，以实现最佳的打印效果和成型质量。

4 结论

(1)在打印工序，分析了喷嘴口径及螺杆转速对挤出流域的影响，发现螺杆式挤出工艺在增材制造中具有灵活性，不受挤出流量限制，并可通过调节螺杆转速满足不同打印速度需求。螺杆转速与挤出流量呈线性正相关关系，螺杆末端一定的压力有助于提高挤出熔体的质量，但使用小喷嘴口径打印时，熔体流出所受阻力增高，螺杆末端压力显著增加，挤出效率下降。所以在打印工序应综合考虑打印精度和挤出效率之间的平衡，在保证打印质量的前提下选择合适的喷嘴口径。

(2)在注射工序，分析了喷嘴流域温度场与注射速度及喷嘴口径之间的关系。研究结果表明，在同一喷嘴口径下，随着注射速度的增加，注射温升变化更加显著，注射熔体的温度对成品质量的影响也相应增大。同时，喷嘴口径的减小会增强熔体在喷嘴内的剪切作用，导致相同注射速度下的注射温升增加更为剧烈。基于对喷嘴口径和注射速度对注射温升的影响分析，得出了注射流量与喷嘴口径之间的

限制关系,确定了注射工序时不同喷嘴口径的注射性能。

(3)分析了注射打印成型过程中各个工序的限制条件,验证了打印工序与注射工序的喷嘴结构适配性。喷嘴口径对打印工序精度(分辨率)和注射工序流量的影响呈相反关系,此消彼长。虽然牺牲一定的打印精度能够提高注射时的流量,加快整体构建速度,但必须综合考虑打印精度、注射温升和流量,并根据实际需求合理选择喷嘴口径,以确保成型质量和稳定性。

参考文献:

[1] 卢秉恒. 增材制造技术—现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
Lu B H. Additive manufacturing—current situation and future[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 19-23.

[2] Durgun I, Ertan R. Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20: 228-235.

[3] Urquizo E C, Barocio E, Ortigoza V T, *et al.* Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: a review on the experimental, computational and theoretical approaches[J]. Materials, 2019, 12: 895.

[4] Shang J, Tian X, Luo M, *et al*. Controllable inter-line bonding performance and fracture patterns of continuous fiber reinforced composites by sinusoidal-path 3D printing[J]. Composites Science and Technology, 2020, 192: 108096-108096.

[5] Lee J E, Park S J, Son Y, *et al.* Mechanical reinforcement of additive-manufactured constructs using in situ auxiliary heating process[J]. Additive Manufacturing, 2021, 43: 101995.

[6] Bengfort P, Stracke D, Künne B. Establishment of a rotary print head to effect residual stresses and interlayer bonding in an FLM-process[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5: 82.

[7] Giberti H, Sbaglia L, Urgo M. A path planning algorithm for industrial processes under velocity constraints with an application to additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43: 160-167.

[8] Adams J J, Duoss E B, Malkowski T F, *et al*. Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces[J]. Advanced materials, 2011, 23: 1335-1340.

[9] Han P, Tofangchi A, Deshpande A, *et al.* An approach to improve interface healing in FFF-3D printed Ultem 1010 using laser pre-deposition heating[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 34: 672-677.

[10] Alberto A, Sanglae K, Jörg D, *et al.* Hybrid material extrusion 3D printing to strengthen interlayer adhesion through hot rolling[J]. Additive Manufacturing, 2022, 55: 102773.

[11] Ravoori D, Prajapati H, Talluru V, *et al*. Nozzle-integrated pre-deposition and post-deposition heating of previously deposited layers in polymer extrusion based additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 28: 719-726.

[12] Levenhagen N P, Dadmun M D. Interlayer diffusion of surface segregating additives to improve the isotropy of fused deposition modeling products[J]. Polymer, 2018, 152: 35-41.

[13] Yamamoto B E, Trimble A Z, Minei B, *et al*. Development of multifunctional nanocomposites with 3- D printing additive manufacturing and low graphene loading[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2019, 32: 383-408.

[14] Appuhamillage G A, Reagan J C, Khorsandi S, *et al*. 3D printed remendable polylactic acid blends with uniform mechanical strength enabled by a dynamic Diels–Alder reaction[J]. Polymer Chemistry, 2017, 8: 2087-2092.

[15] Belter J T, Dollar A M. Strengthening of 3D printed fused deposition manufactured parts using the fill compositing technique[J]. PloS one, 2015, 10(4): e0122915.

[16] Duty C, Failla J, Kim S, *et al*. Z-pinning approach for 3D printing mechanically isotropic materials[J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 175-184.

[17] Kazmer D O, Colon A R. Injection printing: additive molding via shell material extrusion and filling[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101469.

[18] Son J, Yun S, Park K, *et al*. Isotropic 3d printing using material extrusion of thin shell and post-casting of reinforcement core[J]. SSRN Electronic Journal, 2022, 58: 102974.

[19] 鉴冉冉, 贾维辉, 郭鹏, 等. 一种注射 3D 打印装置: 中国, 113211785A[P]. 2021-08-06.

[20] 鉴冉冉, 林广义, 史忠鹤, 等. 一种桌面级 3D 打印和复印装置及方法: 中国, 112571791A[P]. 2021-03-30.

[21] 鉴冉冉, 林广义, 史忠鹤, 等. 一种具有增强骨架的异步 3D 打印方法及装置: 中国, 111823581A[P]. 2020-10-27.

[22] Jian R ,Yang W, Cheng L , *et al*. Numerical analysis of enhanced heat transfer by incorporating torsion elements in the homogenizing section of polymer plasticization with the field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 946-953.

[23] Olmsted A B, Davis M. Practical injection molding[M]. Taylor and Francis, CRC Press,2014.

[24] 王天明, 习俊通, 金烨. 颗粒体进料微型螺旋挤压堆积喷头的设计[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 178-184.
Wang T M, Xi J T, Jin Y. Design of particle feed micro-screw extrusion deposition nozzle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 178-184.

[25] 姬宜朋, 张沛, 王丽. 注射过程喷嘴内物料温度和压力的模拟与分析[J]. 工程塑料应用, 2004, 32(9): 23-26.
Ji Y P, Zhang P, Wang L. Simulation and analysis of material temperature and pressure inside the injection nozzle during the injection process[J]. Engineering Plastics Application, 2004, 32 (9): 23-26.

[26] Go J, Schiffres S N, Stevens A G, *et al.* Rate limits of additive manufacturing by fused filament fabrication and guidelines for high- throughput system design[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16: 1-11.

[27] 张雅茹, 杨芝超, 谭忠, 等. 聚合温度对聚丙烯性能的影响[J]. 石油化工, 2018, 47(3): 248-252.
Zhang Y R, Yang Z C, Tan Z, *et al.* Effect of polymerization temperature on the properties of polypropylene[J]. Petrochemical Technology, 2018, 47(3): 248-252.

Nozzle Design and Flow Control in Injection Printing Process

Jiawei Zhu[1], Wei Pan[1], Shizheng Huang[1], Mohini Sain[2], Weimin Yang[3], Xiankui Zeng[1], Ranran Jian[1, 2]

(*1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Centre for Biocomposites and Biomaterial Processing, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto, ON M5S 3B3, Canada; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

ABSTRACT: An injection printing additive manufacturing strategy that uses the extruded printed part shell as its own mold for internal injection filling was proposed, providing a solution for achieving efficient and high-strength melt deposition molding. The allowable injection flow range and corresponding nozzle diameter under different printing accuracies was analyzed, the adaptability of nozzle structures for different process units and their impact on the molding process was explored, in order to meet the process requirements of printing and injection processes. The results show that there is a good linear positive correlation between the printing flow rate and screw speed in the printing process. Small diameter nozzles can cause significant flow resistance, resulting in a significant increase in the pressure on the fluid at the end of the screw. Excessive pressure and flow resistance can reduce the extrusion printing efficiency. In the injection process, the injection flow rate is positively correlated with the injection speed, and the temperature rise of melt injection is significantly affected by the injection speed and nozzle diameter. Excessive injection speed can lead to degradation of the melt due to excessive temperature rise, resulting in a limit injection flow rate that increases with the increase of nozzle diameter. In addition, the nozzle diameter should not be too large, otherwise it will affect the accuracy of the printing process. Therefore, when designing injection printing nozzles, it is necessary to consider printing accuracy, injection temperature rise, and flow requirements to ensure the molding quality and stability.

Keywords: injection printing; simulation analysis; nozzle diameter; flow control; fused deposition modeling