

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.017

挤出模具尺寸微调对微导管制品稳定性的影响

孙通通^{1,2}, 崔景强^{1,2}, 程玲玲^{1,2}, 侯景杰^{1,2}, 冯仲达^{1,2}

(1. 河南驼人医疗器械集团有限公司, 河南新乡 453400; 2. 河南省医用高分子材料技术与应用重点实验室, 河南新乡 453400)

摘要: 随着挤出成型技术在医疗器械领域的广泛应用, 导管类产品的小型化、精密化生产对模具尺寸精度提出了极高要求。针对挤出过程中持续输出制品尺寸不稳定的问题, 本研究采用数值模拟方法, 探究挤出模具尺寸微调对制品稳定性的影响。以热塑性聚氨酯(TPU)为研究对象, 通过毛细管流变仪测定其流变特性, 并基于Bird-Carreau模型建立黏弹性本构方程。利用Ansys Polyflow软件对模具关键参数(压缩角、成型段长度)进行多组数值模拟, 分析其对流体域压力分布、速度分布的影响以及最佳参数的挤出胀大效应。结果表明, 芯棒压缩角为42°、口模压缩角为50°、芯棒与口模成型段长度分别为10 mm和9 mm时, 出口截面不同位置流体速度波动显著降低, 方差最小, 稳定性最佳; 挤出胀大效应与流体体积流量呈正相关。本研究通过数值模拟替代传统试错法, 为医疗微导管的高精度挤出成型提供了参数优化依据, 显著提升了生产效率和制品合格率。

关键词: 挤出模具; 微导管; 稳定性; Polyflow; 数值模拟; 挤出胀大

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0138-12

Influence of minor adjustments to size of extrusion mold on stability of micro-catheter products

SUN Tongtong^{1,2}, CUI Jingqiang^{1,2}, CHENG Lingling^{1,2}, HOU Jingjie^{1,2}, FENG Zhongda^{1,2}

(1. Henan Tuoren Medical Equipment Group Co., Ltd., Xinxiang 453400, China;

2. Henan Key Laboratory of Medical Polymer Materials Technology and Application, Xinxiang 453400, China)

Abstract: With the widespread application of extrusion molding technology in the field of medical devices, the miniaturization and precision production of catheter products have put forward extremely high requirements for mold size accuracy. In response to the problem of unstable product size output during the extrusion process, this study employed numerical simulation methods to explore the effect of micro adjustment of extrusion mold size on product stability. The rheological properties of thermoplastic polyurethane (TPU) were measured using a capillary rheometer, and a viscoelastic constitutive equation was established based on the Bird-Carreau model. Using Ansys Polyflow software, multiple sets of numerical simulations were conducted on key parameters of the mold (compression angle, forming section length) to analyze their effects on the pressure distribution and velocity distribution in the fluid domain, as well as the extrusion swelling effect of the optimal parameters. Results show that when the mandrel compression angle is 42°, the die compression angle is 50°, and the forming section lengths of the mandrel and die are 10 mm and 9 mm respectively, fluctuations in fluid velocity at different positions in the outlet cross-section are significantly reduced, with the smallest variance and the best stability; The extrusion swelling effect is positively correlated with the volume flow rate of the fluid. This study replaces traditional trial and error methods with numerical simulations, providing parameter optimization basis for high-precision extrusion molding of medical microcatheters, significantly improving production efficiency and product qualification rate.

Keywords: extrusion mold; micro-catheter; stability; Polyflow; numerical simulation; extrusion swelling

随着聚合物挤出成型技术在医疗器械领域的应用逐渐深化, 挤出制品的小型化、微型化、轻量化、集成与高精度需求对模具尺寸控制提出了更加

严峻的挑战^[1]。挤出过程中持续输出制品尺寸不稳定的问题, 严重影响了产品合格率与项目进度。由于医疗器械对尺寸和外观的严格要求, 对现有模具

通信作者: 程玲玲, 硕士, 高级工程师, 主要从事医用高分子材料精密成型加工、结构与功能/性能调控等方面的研究

收稿日期: 2025-12-08

引用格式: 孙通通, 崔景强, 程玲玲, 等. 挤出模具尺寸微调对微导管制品稳定性的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 138-149.

SUN Tongtong, CUI Jingqiang, CHENG Lingling, et al. Influence of minor adjustments to size of extrusion mold on stability of micro-catheter products[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 138-149.

进行微调已经成为必须进行的一个重要环节。传统试错法^[2]依赖反复修模试模,成本高、效率低。然而,数值模拟技术^[3]作为优化模具参数的有效工具,早已广泛应用于挤出成型分析过程之中;Mu等^[4]分析了模具参数对速度分布均匀性的影响,最终提出了能达到产品挤出过程中流动平衡的设计方案。丁海等^[5]采用正交试验法利用Polyflow数值模拟分析了不同的压缩角、口模成型段长度、间隙角度等参数,最终得到最佳挤出模具流道结构参数。由此可见,现有研究多聚焦于参数的大范围变化,针对微调影响的探索仍较缺乏。为节约时间和费用成本以及解决挤出物不稳定输出的现象,本研究以热塑性聚氨酯弹性体(TPU)为材料,利用Ansys Polyflow软件进行仿真分析,系统探究模具关键参数(如压缩角、成型段长度)的微变化对制品稳定性的影响,并通过挤出胀大效应验证优化参数的可行性,以数值模拟替代经验调整,提升微导管生产的精度与效率。

1 数值模拟

1.1 流变实验

实验材料:TPU, 64D, 巴斯夫(中国)有限公司。

实验设备:毛细管流变仪, RG50, 仪尊科技有限公司, 实验设备实物如图1a所示。

根据TPU材料挤出生长的经验, 温度一般选择220~240℃, 因此选择该温度区间进行流变实验。口模规格为5 mm×0.3 mm; 剪切速率为100、300、500、1 000、3 000、5 000 s⁻¹; 测试温度为220、230、240℃。图1b为测定的TPU材料的表观黏度与剪切速率关系曲线图。

由图1b可知, 剪切速率大于100 s⁻¹时, TPU材料在熔融态下呈现剪切变稀行为, 剪切速率继续增大, 高分子链段的运动加剧, 大分子链之间产生解缠、滑移和取向的行为, 使缠结点以及流层之间传递能量减小, 以至于缠结现象减弱, 分子链整体的取向趋势更加明显。因此随着剪切速率的增大, 表观黏度呈下降趋势, 后期该趋势变小。此现象表明TPU熔体属于假塑性流体^[6]。对比不同温度下熔体的表观黏度变化可发现, 该材料表观黏度随温度的提高而降低。

微导管挤出成型的过程中, 聚合物熔体的流动具有连续性, 因此熔体流动满足聚合物流变行为的

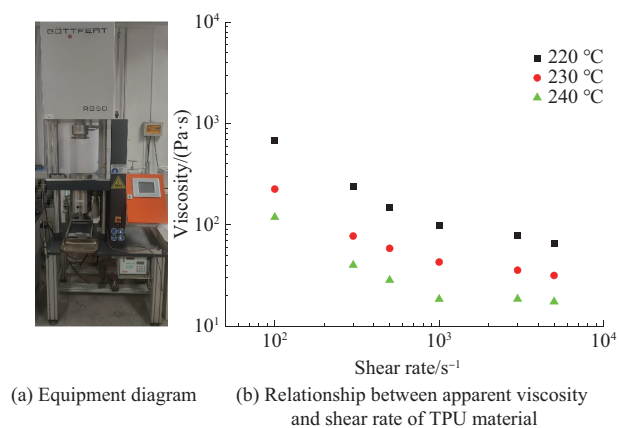


图1 流变实验

Fig. 1 Rheological experiment

流变状态方程(本构方程——描述高分子聚合物黏弹性响应规律的方程)。现阶段采用较多的非牛顿黏度模型主要有:Power模型、Carreau模型以及PTT模型^[7]。其中Carreau模型^[1,6]不仅能反映低剪切速率下聚合物熔体的牛顿行为以及高剪切速率下塑料的流道特性, 而且还可以反映中间区域的非牛顿流体的流动特性。本文采用Carreau模型中的四参数Bird-Carreau模型建立TPU微导管的挤出黏性模型。由于TPU材料实际常用温度多为220℃, 因此仅拟合220℃温度下的材料表观黏度与剪切速率关系曲线参数, 结果见表1, R^2 达到0.92, 拟合效果较好。

表1 TPU材料220℃下的Bird-Carreau模型拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of Bird-Carreau model for TPU material at 220℃

$\eta_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	λ/s	n	$\eta_\infty/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	R^2
1 799.83	0.03	0.20	29.13	0.92

Notes: η_0 is zero shear viscosity; λ is relaxation time; n is non-Newtonian index; η_∞ is infinite shear viscosity; R^2 is statistical measures of goodness of fit.

1.2 参数选择与网格划分

由于微导管挤出过程中的稳定性极差, 导致无法持续生产出合格产品, 根据相关建模软件UG进行布尔运算, 发现零部件分流梭结构制造不严谨, 图2为分流梭与产品缺陷的分析图。分流梭结构缺陷如图2a所示。

现存的问题为持续挤出的微导管尺寸不稳定, 而口模内径与芯棒外径均符合标准要求, 因此仅对口模内径和芯棒外径的其余参数进行调整。根据挤出模具制造经验以及模具设计参考书^[8-10]的

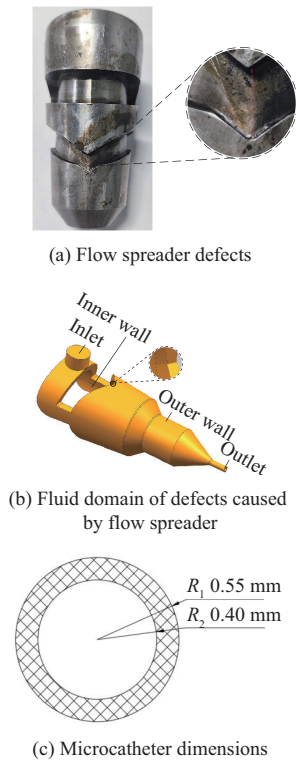


图2 缺陷分析图

Fig. 2 Defect analysis diagram

推荐,选取模具微结构的参数范围。

TPU 材料的压缩角^[11]为 30°~50°,而实际挤出工作中该因素旧参数(50°)偏大,因此芯棒压缩角(A)参数范围选取于旧参数附近,分别为 40°、42°、44°、46°、48°。

间隙角范围为 2°~7°^[12],在芯棒压缩角参数的基础上调整口模压缩角。口模压缩角(B)分别选取 44°、46°、48°、50°、52°。

实际操作中,芯棒成型段稍长于口模成型段。该参数的取值由经验公式(1)^[13]计算出具体数据范围,根据经验选取位于推荐范围且在原数据附近的参数,芯棒成型段长度(C)分别选取 10、12、14、16、18 mm。

$$L = (5 - 12)d \quad (1)$$

式中: L 为芯棒成型段长度; d 为芯棒成型段外径。

口模成型段长度(D)微小于芯棒成型段,分别选取 5、6、7、8、9 mm。

各结构参数的实际值和实验值见表 2。

表 2 结构参数的实际值和实验值

Tab. 2 Actual and experimental values of structural parameters

Items		Factors			
		$A/^{\circ}$	$B/^{\circ}$	C/mm	D/mm
Actual size		50	52	10	8
Leves	1	40	44	10	5
	2	42	46	12	6
	3	44	48	14	7
	4	46	50	16	8
	5	48	52	18	9

Notes: A is mandrel compression angle; B is die compression angle; C is mandrel forming section length; D is die forming section length.

由于分流梭缺陷的存在,导致流体域结构不完全对称,因此只能就整个流体域进行网格划分,不能对此简化操作。图 3 为网格划分后的流体域,如图所示,采用效果较佳的四面体方法划分网格,针对压缩段和成型段流体单独加密网格划分,具体模型网格数量见表 3。针对所有模型的网格划分总数量,均处于同一个数量级,后期因网格数量变化而造成的影响较小。此外,针对同一个结构尺寸的变化,造成的零部件结构变化较复杂,最终导致网格数量不同幅度的增减。如 B 因素口模压缩角的增大,导致倾斜度区域细化网格划分,最终导致网格数量增加; C 因素芯棒成型段长度增加导致网格划分区域大幅度增加; A 因素芯棒压缩角增加而口模固定导致流体域减小,致使网格数量减小; D 因素口

模成型段增加而芯棒固定导致流体域减小,致使模型网格数量呈现逐渐减小趋势。

一般情况下,网格划分得越密化,最后计算结果的精度越高,但网格总数量的增加会导致计算设备负荷严重及计算的时间成本大幅增加,另外,当网格达到一定范围的数量后,计算结果精度的变化并不



图3 流体域网格划分

Fig. 3 Mesh generation of fluid domain

表3 与模型对应的网格划分总数量

Tab. 3 Total number of grid elements corresponding to different models

Leves	Factors			
	A	B	C	D
1	4 378 080	4 215 329	4 330 030	4 467 151
2	4 357 471	4 264 229	4 466 981	4 431 955
3	4 349 369	4 310 164	4 550 541	4 384 301
4	4 332 555	4 336 149	4 644 713	4 330 427
5	4 335 026	4 360 980	4 764 243	4 262 074

显著。因此,在工程应用中,应平衡计算精度和计算时间,用较低的成本获得尽可能理想的结果。

而上述网格数量是否影响模拟结果,还需进一步进行网格无关性验证。网格无关性验证的求解

表4 流体域网格无关性验证

Tab. 4 Grid independence verification for fluid domain

Models	Total number of grid cells	Average outlet pressure/Pa	Average export velocity/(m·s ⁻¹)
1 [#] (thinning)	2 176 602	140 982	0.221 469
2 [#] (D1)	4 467 151	144 881	0.221 490
3 [#] (encrypted)	9 272 297	142 872	0.221 529

根据表4中的数据计算得出1[#]模型与2[#]模型的出口平均压力偏差为2.691%、出口平均速度偏差0.009%;2[#]模型与3[#]模型出口平均压力偏差为1.387%、出口平均速度偏差0.018%均小于5%,各组合出口参数偏差均小于5%,故上述网格划分满足对模拟结果的有效计算。

1.3 条件设置

假设流体为不可压缩流体,流动属于等温稳态层流;由于流体的黏性力远大于惯性力和重力,可忽略惯性力与重力^[15]。模型只有一个计算域,计算时进行以下设置。

(1)流体入口:体积流量(Q)为常量, $Q=1\ 000\ \text{mm}^3/\text{s}$ 。

(2)流体壁面:壁面无滑移,切向速度与法向速度均为零。

(3)流体出口:切向力与法向力均为零。

材料设置参照表1的流变数据拟合结果。由于 $n<0.75$,为了仿真软件计算流体域收敛,采用线性插值和Picard迭代算法计算流体压力及流速分布。

2 仿真结果分析

2.1 压缩角(芯棒)对挤出制品的影响

以芯棒压缩角为变量,口模压缩角(52°),口模与芯棒成型段长度(8 mm、10 mm)均保持不变进行分析。图4为芯棒压缩角不同时,流体域压力分布的变化。由于流体域压力云图变化较小,以A1为代

过程中,通常保持约束和载荷不变,对成比例增加和减少网格数量的模型进行计算,比较不同数量网格条件下的计算结果,观察数值解的变化趋势,一般认为如果相邻两次的解的偏差在5%~10%^[14],则网格对结果的影响在可接受的范围内,可认为获得了网格无关解。

随机选取D1为代表模型,对其进行上下调整网格总数量,验证计算结果是否与网格无关。网格总数量4 467 151,对其进行密化和疏化操作。利用Polyflow计算出口平均压力、出口平均速度作为考核网格无关性的指标,不同网格总数量下的计算结果见表4。

表分析压力云图。图4a为参数A1对应的模型流体域压力云图,芯棒压缩角不同时,压力降的大致趋势相似,入口压力均是最大的,压力沿流体流动方向逐渐减小。图4b为流体域压力具体数据变化,分析可知,入口压力最大,出口压力最小,而出口压力相对入口压力来说极小,因此压力降的变化主要是

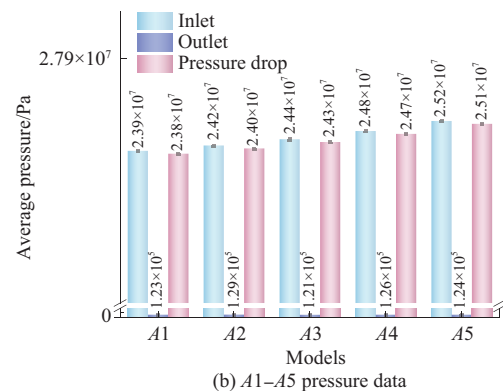
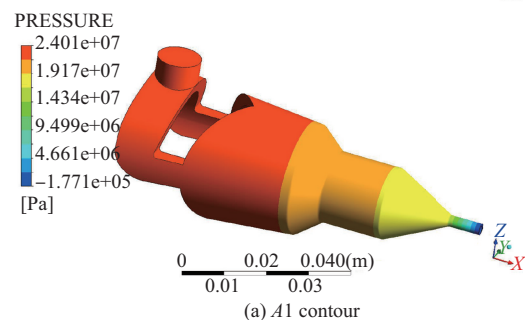


图4 A系列流体域压力变化

Fig. 4 Pressure variation in fluid domain of series A

由入口处压力决定的;随着芯棒压缩角的增加,整体压力降呈现逐渐增大趋势,这种增长的趋势较不明显。其中,模型A5的压力降最大,而总体而言,五种模型的压力降差距不大,表明芯棒压缩角参数对模具内的压力降影响较小。

图5为芯棒压缩角不同时,流体速度分布的变化。根据流体域的挤出走向建立多个面结构分析流体域流体流动速度,图5a为模型A1对应的流速云图,其中不同颜色代表着不同流体流动速度,红色代表速度最大、深蓝色代表速度最低,而图5b为各参数对应的口模芯棒出口处流体的平均流速。由图5a可知,流体沿着Z轴负方向流动速度较快,再沿着挤出方向流体的速度较低,原因是模具内部空间变大,压力减小,导致沿挤出方向速度较小,但增加了多方向的流体流动,以便充分填充整个模具空白空间;流体从挤出机流入模具内,速度较快,而流体域中心层流体速度较两侧流体速度快;流体到达扩展段,向多个方向流动,因此挤出方向流体速度降低,随着模具填充体积的减小,压强增大,导致流体速度增大,此现象在压缩段末段较显著;流体在压缩段后期开始加速,出口处的挤出速度达到最大。图5b可知,芯棒压缩角不同时,出口处流体流动的平均速度基本相同,表明芯棒压缩角对出口位

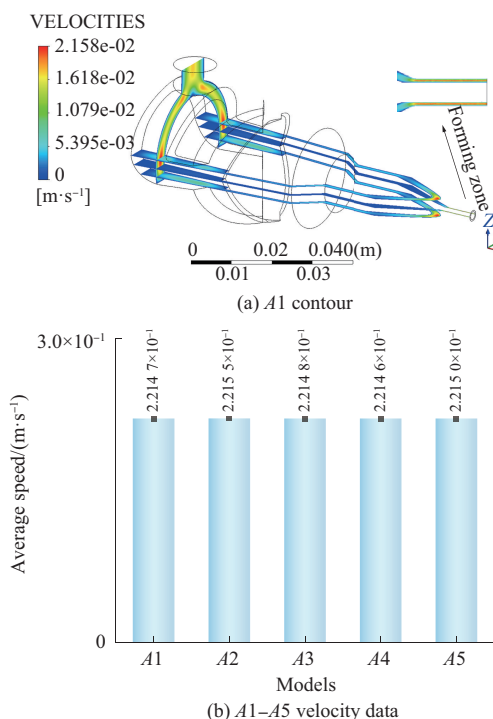


图5 A系列流体域流动平均速度变化

Fig. 5 Variation of average flow velocity in fluid domain of series A

置平均挤出速度的影响较小,挤出的平均速度为0.214 8 m/s左右;随着芯棒压缩角的增大,出口处挤出速度先增后减,最后再增,而当芯棒压缩角为42°(模型A2)时,出口处流体流动的平均速度达到最大,为0.221 5 m/s。

由于上述判断不能得到出口截面处流体流动是否稳定,因此为了进一步判断稳定性,在口模内径和芯棒外径之间的中心层选取有限节点进行分析,由上述内容得知流体域为不完全对称结构,因此只能就整个截面进行选取节点。所选取的12个节点在中心层上均匀分布,按照顺时针方向依次编号为1#~12#,连接形状圆中心与就近原则节点构成30°的角度,具体如图6所示。

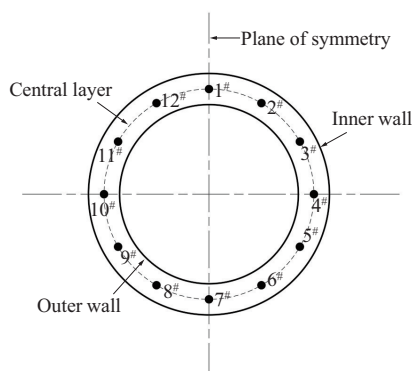


图6 中心层节点分布

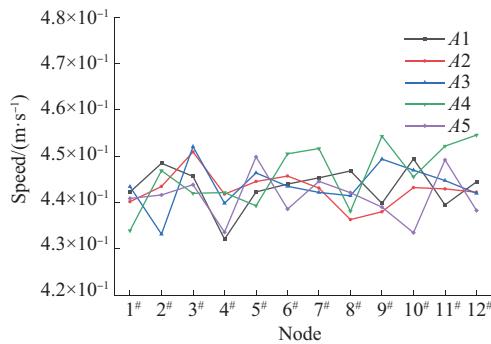
Fig. 6 Node distribution in core layer

选取节点的速度折线图如图7所示,而各节点速度的波动程度可通过方差的大小判断,方差越小,表明数据波动越小,挤出制品越稳定。分析可知,节点的速度大致均保持在0.44 m/s左右;在挤出速度稳定性方面,A2速度的方差最小,A4速度方差最大,其余三个模型的方差近似,波动居中。由此可知,A2出口截面挤出速度稳定性最好,而A4出口截面挤出速度稳定性最差,其余模型居中,同时表明芯棒压缩角对出口截面每个方位流体速度的影响较大。

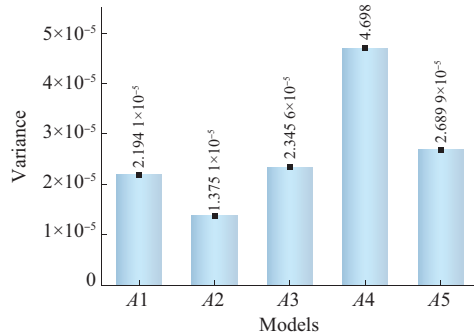
综上所述,芯棒压缩角对模具内的压力降和出口流体平均流速的影响较小,对出口截面的各节点流体速度影响较大,而模型A2各节点流体流速稳定性最好。综合考虑,芯棒压缩角为42°为最佳参数。

2.2 压缩角(口模)对挤出制品的影响

以口模压缩角为变量,芯棒压缩角(42°)、口模与芯棒成型段长度(8 mm、10 mm)均保持不变进行分析。图8为口模压缩角不同时,压力分布的变化,图8a为参数B1对应的模型压力云图。以模型B1为



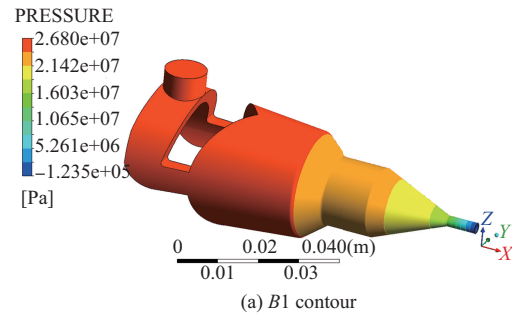
(a) Line chart



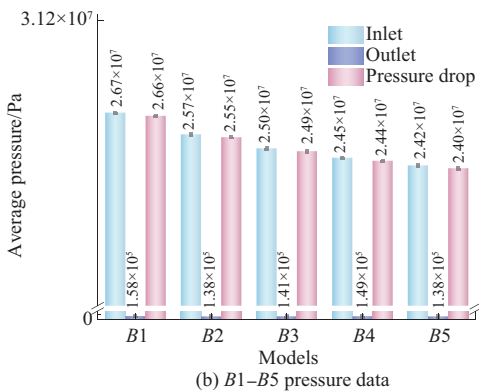
(b) Variance

图7 A系列出口中心层节点速度

Fig. 7 Nodal velocities in central layer at outlet of series A



(a) B1 contour



(b) B1-B5 pressure data

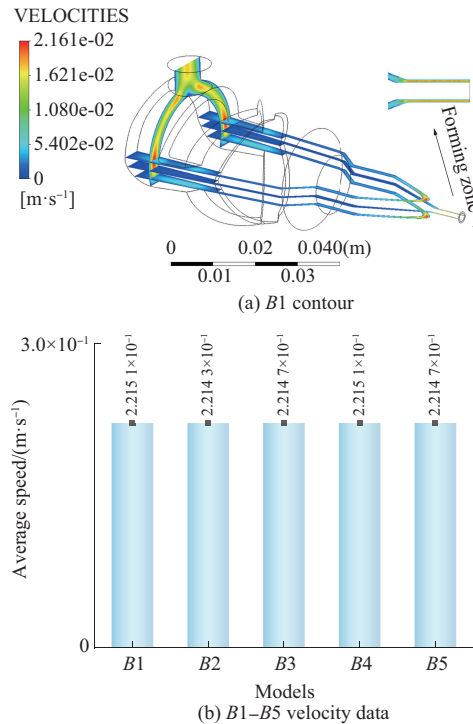
图8 B系列流体域压力变化

Fig. 8 Pressure variation in fluid domain of series B

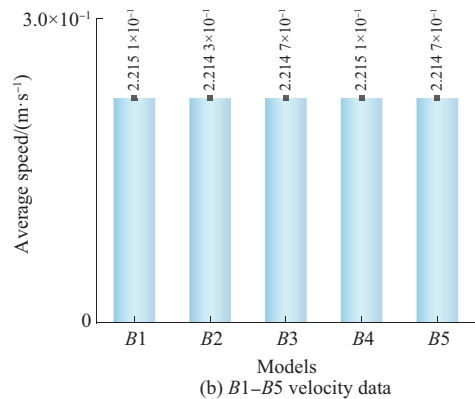
例进行分析,入口压力最大,压力沿流体流动方向逐渐减小。图8b为具体数据变化,如图所示,随着口模压缩角的增加,整体压力降呈现逐渐减小趋

势,这种趋势在B1-B3范围内较明显,模型B1的压力降最大,而总体而言,该参数引起压力降的变化较芯棒压缩角引起压力降的变化大。

图9为口模压缩角不同时,速度分布的变化。参数B1对应的模型流体流速云图,如图9a所示,沿着Z轴负方向的流体流速较大,待转向X方向时,流体流速降低,接近压缩段尾端时流速反向升高,流体流动速度在出口位置获得较大的速度。流速产生变化的原因是流体域体积的变化所致。图9b为口模芯棒出口处流体的平均速度,如图所示,口模压缩角不同时,出口处流体流动的平均速度基本相同;口模压缩角发生变化时,对出口截面的挤出速度影响极小,挤出流体的平均速度在0.221 5 m/s左右;在微观上,随着口模压缩角的增大,出口处挤出速度先减后增,最后再减,而当口模压缩角为44°(模型B1)时,出口处流体流动速度达到最大,具体数值为0.221 51 m/s。宏观上,口模压缩角对制品的挤出工作影响极小。



(a) B1 contour

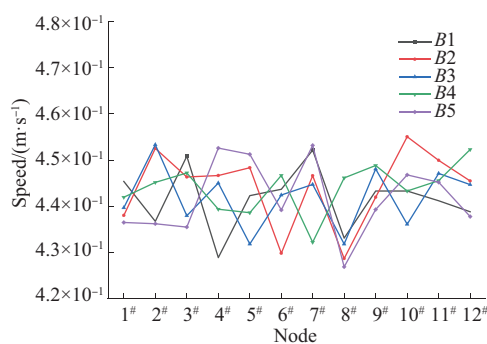


(b) B1-B5 velocity data

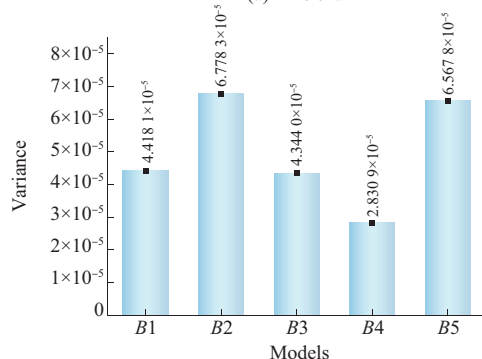
图9 B系列流体域流动平均速度变化

Fig. 9 Variation of average flow velocity in fluid domain of series B

图10为口模压缩角不同时出口处流体流动速度的稳定性分析,所选取节点的速度折线图如图10a所示,各节点速度的稳定性可通过图10b判断。分析可知,节点的速度均保持在0.44 m/s左右;在挤出速度稳定性方面,B4速度的波动最小,B2速度波



(a) Line chart



(b) Variance

图10 B系列出口中心层节点速度

Fig. 10 Nodal velocities in central layer at outlet of series B

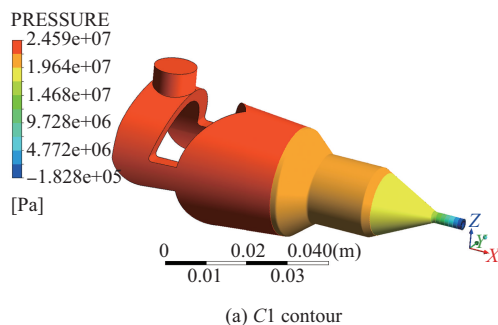
动最大, B1和B3波动性相近, 处于居中位置, B5的波动性较大。由此可知, B4出口截面挤出速度稳定性最好, 而B2出口截面挤出速度稳定性最差。

综上所述, 口模压缩角对出口流体平均速度的影响极小, 而对模具内的压力降和出口截面不同位置的流体速度影响较大; 在口模压缩角逐渐增加时, 流体域压力降呈下降趋势; 针对outflow面各节点的流体流动速度稳定性, 波动性最小的参数是B4。综合考虑, 口模压缩角为50°为最佳参数。

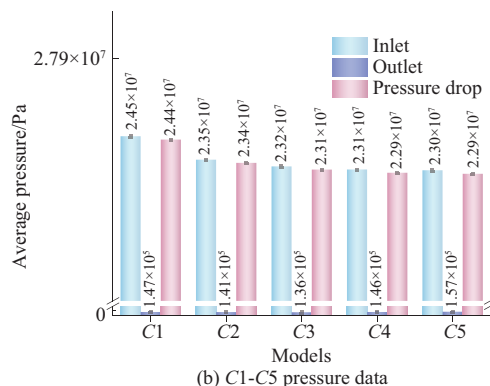
2.3 成型段(芯棒)对挤出制品的影响

以芯棒成型段长度为变量, 口模与芯棒压缩角(50°、42°)及口模成型段长度(8 mm)均保持不变进行分析。图11为芯棒成型段长度不同时, 对压力分布的影响。C1参数对应的模型压力云图, 如图11a所示。流体域入口压力为最大, 压力沿流体流动方向逐渐减小。具体分析, 如图11c所示, 芯棒成型段长度不同时压力变化幅度较小, 随着芯棒成型段长度的增加, 整体压力降呈现逐渐减小趋势, 这种趋势在C1至C2范围内较明显, 模型C1的压力降最大。

图12为不同芯棒成型段长度对速度分布的影响。参数C1对应的模型流体流速云图, 如图12a所示, 流体流动的速度在Z或X方向上变化不大, 仅在



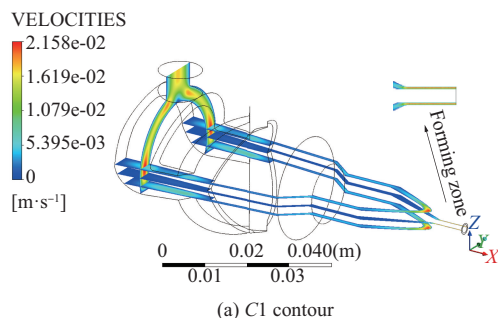
(a) C1 contour



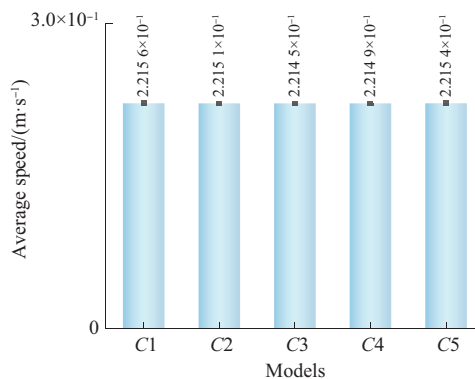
(b) C1-C5 pressure data

图11 C系列流体域压力变化

Fig. 11 Pressure variation in fluid domain of series C



(a) C1 contour



(b) C1-C5 velocity data

图12 C系列流体域流动平均速度变化

Fig. 12 Variation of average flow velocity in fluid domain of series C

Z方向转向X方向的流体流速有较大的变化, 这个数据的变化表明直角式挤出模具的缺陷。出口处流体平均速度具体数据如图12b所示。芯棒成型段长度不同时, 出口处流体流动的平均速度基本相

同,表明该参数发生变化时,对出口处流体平均速度的影响极小,挤出的平均速度在0.221 5 m/s左右;在微观上,随着芯棒成型段长度的增大,出口处挤出速度先减后增,而当芯棒成型段长度为10 mm(模型C1)时,出口处流体流动速度达到最大,具体数值为0.221 56 m/s。

进一步分析出口处流体流动速度稳定性,所选取节点的速度折线图如图13a所示,方差如图13b所示。分析可知,节点的速度均保持在0.44 m/s左右;在挤出速度稳定性方面,C3模型出口截面流体速度的方差最大,C1模型的速度方差最小,其余模型的速度方差相对近似,表明芯棒成型段对出口处流体速度的影响较大;由此可知,C1出口截面挤出速度稳定性最好,而C3出口截面挤出速度稳定性最差。

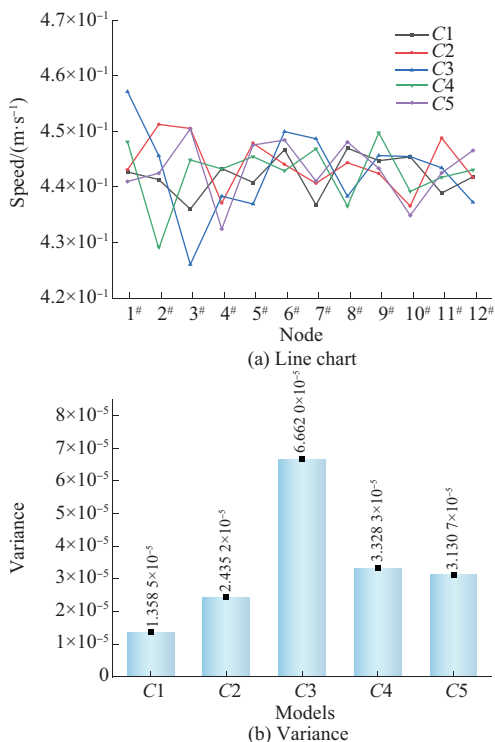


图13 C系列出口中心层节点速度

Fig. 13 Nodal velocities in central layer at outlet of series C

综上所述,口模成型段长度的变化对压力变化的影响较小,对出口流体平均流速的影响极小;在口模成型段逐渐增加时,流体域压力降呈下降趋势,但变化幅度先大后小;出口截面的流体流动的平均速度均保持在0.44 m/s左右;针对outflow面12个节点的流体流动速度,波动性最小的模型也是C1,表明该模型稳定性最佳。综合考虑,口模成型段长度为10 mm时,该参数为最佳参数。

2.4 成型段(口模)对挤出制品的影响

以口模成型段长度为变量,口模与芯棒压缩角(50°、42°)及芯棒成型段长度(10 mm)均保持不变进行分析。图14为模拟结果。参数D1对应的模型压力云图,如图14a所示,无论是口模成型段长度为变量,还是芯棒成型段长度、口模与芯棒压缩角,流体域的压力变化大致相似,压力降的趋势大致相似,入口压力均为最大,压力沿流体流动方向逐渐减小。但是图14a压力变化幅度与图4a、图8a、图11a相差较大,表明口模成型段长度对流体域的压力降变化幅度有很大的影响。就具体数据分析,如图14b所示,随着口模成型段长度的增加,整体压力降呈现逐渐增大趋势,即流体阻力越来越大,此现象不利于微导管的成型,因此口模成型段长度不建议过大,但是压力降过小,会导致模具内的流体不能完全填充于整个型腔内,以至于不利于微导管的成型,因此压力降过大或过小均不利于产品的成型,该数据应适宜,而其中D5的压力降最大,而D1的压力降最小。从D5到D1,入口压力从约28.6 MPa降低至17.6 MPa,降幅38.5%。

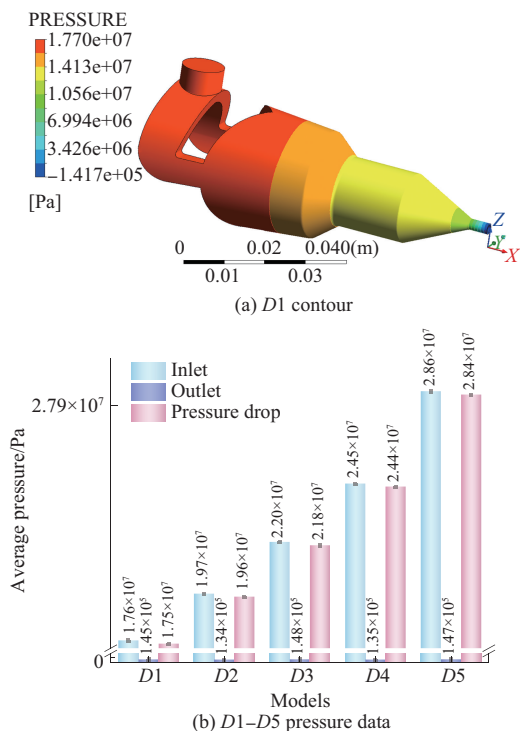


图14 D系列流体域压力变化

Fig. 14 Pressure variation in fluid domain of series D

图15a为参数D1对应的模型流体流速云图,如图所示,流体流动速度的分布趋势与上述变量产生的相关图大致相同;流体流动速度从压缩段后期开

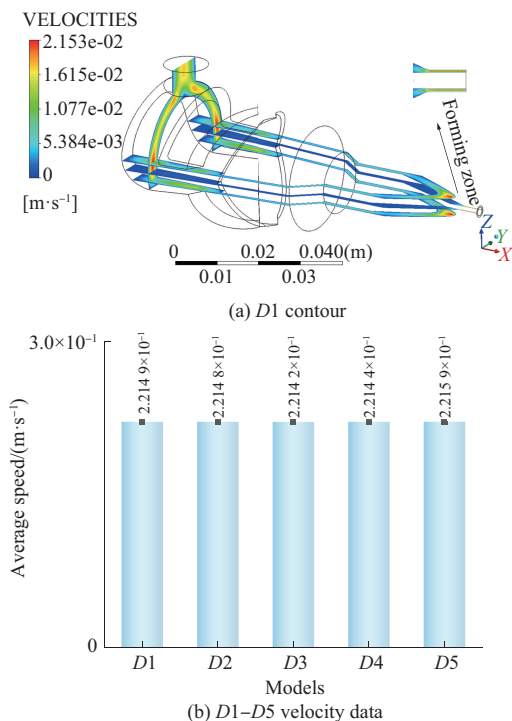


图15 D系列流体域流动平均速度变化

Fig. 15 Variation of average flow velocity in fluid domain of series D

始显著变化,挤出速度在出口获得最大的挤出速度;而速度变化较大的位置位于纵向截面和成型段截面。图15b为流体的平均速度分析,如图所示,口模成型段长度不同时,出口处流体的平均速度基本相同,表明该参数对出口处流体的平均速度影响小,平均速度均位于 0.2214 m/s 左右;在微观上,随着口模成型段长度的增大,出口处挤出速度先减后增,而当口模成型段长度为 5 mm (模型D5)时,出口处流体流动速度达到最大,为 0.22159 m/s 。

进一步分析出口处截面的流体流动速度稳定性,所选取节点的速度折线图和方差图如图16所示。节点的速度均保持在 0.44 m/s 左右;在挤出速度稳定方面,D2模型出口截面速度的波动最大,D1模型的速度波动最小;由此可知,D1出口截面挤出速度稳定性最好,而D2出口截面挤出速度稳定性最差。

综上所述,口模成型段长度对模具内的压力降和出口处不同方位的流体流动速度有很大的影响,对出口流体的平均速度影响较小。当口模成型段长度逐渐增加时,流体域压力降呈上升趋势,但变化幅度先小后大;出口截面流体流动的平均速度保持在 0.2214 m/s 左右,其中模型D5的流体平均速度最大,其余模型的流体平均速度与之相差甚小;针

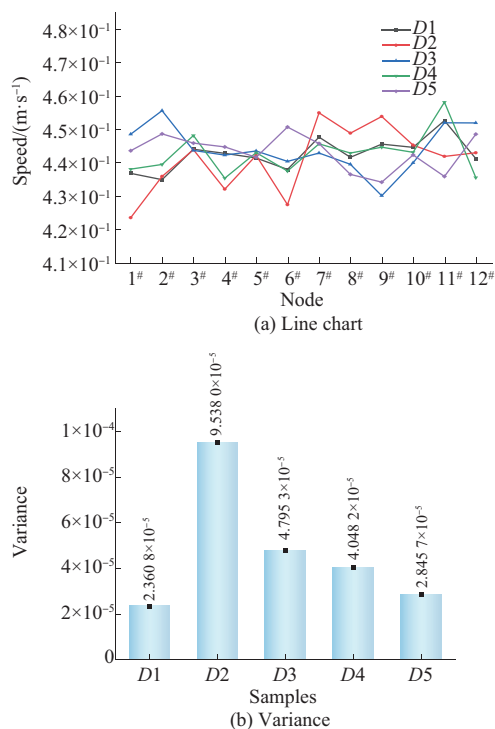


图16 D系列出口中心层节点速度

Fig. 16 Nodal velocities in central layer at outlet of series D

对outflow面12个节点的流体流动速度,稳定性最佳的模型是D1。综合考虑,口模成型段长度为 9 mm 时,该参数为最佳参数。

由于结构尺寸的微调整导致最终结果的变化幅度不同,造成的影响也未呈现出规律性,因此导致该现象的原因可能是流体域结构不对称、材料非线性黏弹性响应等多种因素共同作用的结果。其中最主要的因素有以下两点。

(1)由于分流梭存在的缺陷,导致整个流体域结构是不完全对称的(图2)。这种固有的不对称性使流体域本身不具备理想的对称条件。当变量变化时,流体的流动路径和受到的阻力会发生微妙的、非线性的变化。在某些情况下,这种变化可能恰好补偿了结构缺陷带来的不均匀性,从而使各节点速度分布更均匀(方差最小);而变量为另一个参数时,可能加剧了流动的不平衡,导致速度分布最不稳定(方差最大)。因此,结构缺陷可能是导致规律性不明显的根本原因之一。

(2)本次仿真模拟采用的是Bird-Carreau模型,聚物流体的黏性行为是高度非线性的。变量(如芯棒压缩角等)的细微调整会改变流体在压缩段期间的剪切历史和形变速率,从而影响分子链的取向和解缠结状态。这种影响不是线性的,可能在 42°

时达到一个最佳的松弛与取向平衡状态,使得出口流动最稳定;而当角度继续增大至 46° 时,可能会引发不同的弹性效应,导致稳定性变差。因此,材料本身的复杂流变性质可能是导致方差变化不规律的另一个重要因素。

3 挤出胀大效应

聚合物熔体离开口模但未能完全冷却的制品会在多重因素的影响下出现挤出物横截面的面积比口模芯棒横截面大的现象,称为挤出胀大效应^[16]。而挤出胀大率表示挤出胀大程度^[17],通过聚合物熔体横截面面积的增值与口模横截面面积的比值表征。根据林顺平等^[18]、邓小珍等^[19]和朱常委等^[20]的挤出制品自由胀大段和成型段比值为2:1,结合上章节得出口模成型段最佳长度为9 mm,以及考虑到挤出制品尺寸要求,微导管挤出胀大部分设定20 mm,具体如图17所示。

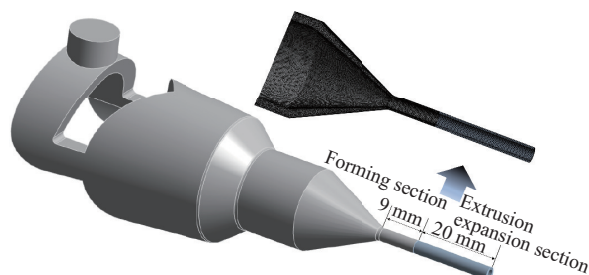


图17 挤出胀大结构及网格划分

Fig. 17 Structure and mesh of extrudate swell

网格划分方式选择自动,以至于流体域部分是按照最佳方式四面体划分网格,胀大部分是根据区域形状进行六面体划分网格,为了加密网格划分效果,更高效分析流体域,出口处截面进行面网格多梯度划分。最终网格总数量为4 411 699,正交质量0.775 25,倾斜度0.222 94,纵横比2.120 5。根据相关书籍网格质量评估标准^[21],由于倾斜度处于0~0.25,属于优秀质量,纵横比处于1与5之间,远远小于20,可判断该网格划分质量较好。

3.1 条件设置

基于1.3部分的设置,增加入口体积流量多梯度为1 000、5 000、10 000、20 000 mm^3/s ;采用线性动

态边界条件以及Optimesh-3D技术对模具外熔体进行自由面网格重置,进行正向挤出工作时仅对自由胀大段进行重置。

3.2 挤出胀大分析

经图18分析可知,蓝色区域为模具内的聚合物流体,黑线是挤出胀大段的熔体边界线。随着模具入口熔体的体积流量(Q)越大,产品的挤出胀大效果越明显。在 Q 为1 000 mm^3/s 时,产品的外径变小,内径变大,因此厚度逐渐缩小,这可能是由于在极低剪切速率下,流体的弹性形变不显著,挤出胀大效应较弱,导致制品在脱离模具后发生轻微收缩;而 Q 增大至5 000 mm^3/s 时,产品的外径有所变大,内径变小,因此厚度逐渐变大; Q 增大至10 000 mm^3/s 、20 000 mm^3/s 时,该截面对比效果更加明显,不同体积流量对应的挤出胀大率见表9,由表9可知,挤出胀大率随着流体体积流量增加而不断变大,表明产品厚度与熔体的体积流量成正比的关系。因此,在实际挤出作业中可根据实际情况进行调节挤出机的挤出速度。

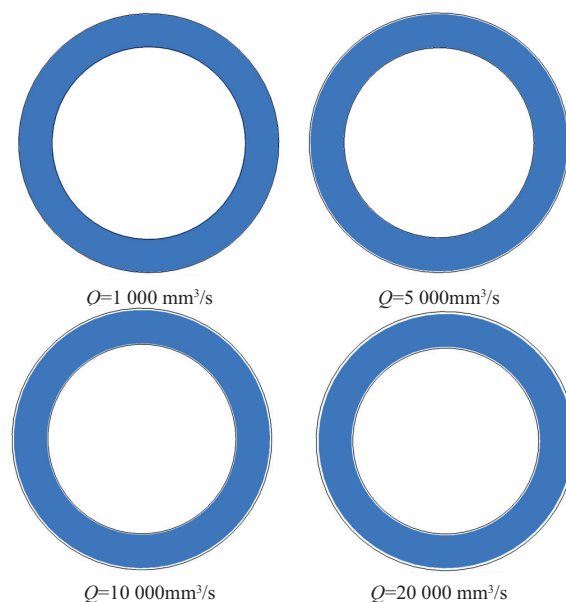


图18 微导管截面挤出胀大效果图

Fig. 18 Effect diagram of extrudate swell for microcatheter cross-section

表9 不同体积流量对应的挤出胀大率

Tab. 9 Die swell ratio corresponding to different volume flow rates

Volume flow/ $(\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	Mould cross-sectional area/ m^2	Free-end outlet cross-sectional area/ m^2	Extrusion expansion ratio (to two decimal places)/%
1 000	$3.385\ 81 \times 10^{-6}$	$3.392\ 68 \times 10^{-6}$	0.20
5 000	$3.385\ 81 \times 10^{-6}$	$3.572\ 27 \times 10^{-6}$	5.51
10 000	$3.385\ 81 \times 10^{-6}$	$3.686\ 62 \times 10^{-6}$	8.89
20 000	$3.385\ 81 \times 10^{-6}$	$3.800\ 50 \times 10^{-6}$	12.25

4 结论

(1)通过 Ansys Polyflow 数值模拟,系统分析了模具关键参数(压缩角、成型段长度)的微调整对 TPU 微导管挤出稳定性的影响。

(2)模具结构参数的协同优化可显著提升挤出制品尺寸的稳定性。当芯棒压缩角为 42° 、口模压缩角为 50° 、芯棒与口模成型段长度分别为 10 mm 和 9 mm 时,挤出过程最为稳定。

(3)口模成型段长度是调控模具内压力降的关键宏观因素,而压缩角与芯棒成型段长度则用于微观调节。仿真结果表明,口模成型段长度从 5 mm 增加至 9 mm 时,模具入口压力从约 28.6 MPa 显著降低至 17.6 MPa,提供了约 38.5% 的调节范围,从而可有效避免因压力过高或过低导致的充填不足或过度剪切。相比之下,调整压缩角与芯棒成型段长度对整体压力降的影响幅度较小,更适合进行精细的微观调节。

(4)在最佳模具参数下,挤出胀大效应与体积流量呈正相关。数值模拟表明,当体积流量从 $1\,000\text{ mm}^3/\text{s}$ 增大至 $20\,000\text{ mm}^3/\text{s}$ 时,挤出胀大率 B 从 0.2% 线性增加至 12.25%。在实际生产中,可通过精确控制挤出速度和牵引设备的速度进一步来控制产品最终尺寸。

参考文献

- [1] 张晋霞. 基于数值模拟的聚合物医用导管成型工艺参数研究[J]. 塑料工业, 2022(增刊1):66–69.
ZHANG Jinxia. Molding process parameters study of polymeric multi-lumen catheter based on numerical simulation[J]. China Plastics Industry, 2022(S1):66–69.
- [2] 莫远东, 洪新密. PVC 线槽挤出成型的 Polyflow 优化与模具设计[J]. 塑料科技, 2022, 50(11):109–114.
MO Yuandong, HONG Xinmi. Polyflow optimization and mould design of PVC trunking extrusion molding[J]. Plastics Science and Technology, 2022, 50(11):109–114.
- [3] 纪超, 王建康, 于强, 等. 基于 Polyflow 与 STAR-CCM+ 对 SX 静态混合器的数值模拟[J]. 塑料工业, 2023, 51(8):80–85.
JI Chao, WANG Jiankang, YU Qiang, et al. Numerical simulation of SX static mixer based on polyflow and STAR-CCM[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(8):80–85.
- [4] MU Y, HANG L Q, CHEN A B, et al. Influence of die geometric structure on flow balance in complex hollow plastic profile extrusion[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1):1 275–1 287.
- [5] 丁海, 马秉馨, 花少震, 等. 中心静脉导管挤出成型的 Polyflow 优化与模具设计[J]. 中国塑料, 2023, 37(8):113–117.
DING Hai, MA Bingxin, HUA Shaozhen, et al. Optimization and design of central venous catheter mold by Polyflow[J]. China Plastics, 2023, 37(8):113–117.
- [6] 潘建武. TPU 共挤微管的模具设计与成型工艺研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
PAN Jianwu. Mold design and molding process research of TPU co-extruded microtubes[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [7] 方坤. LDPE 双腔微管模具优化设计及实验验证[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
FANG Kun. Optimal design and experimental verification of LDPE double-lumen microtube die[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [8] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 174–197.
ZHU Fuhua. Extrusion theory and application[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001:174–197.
- [9] 李秦蕊. 塑料模具设计[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 1988:296–306.
LI Qinrui. Plastic mold design[M]. 2nd ed. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1988:296–306.
- [10] 朱光力, 周建安, 洪建明, 等. 塑料模具设计[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2017.
ZHU Guangli, ZHOU Jianan, HONG Jianming, et al. Plastic mold design[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [11] 李梦. 双腔微管挤出机头设计及气体辅助挤出成型工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
LI Meng. Design of double-cavity microtubule extruder head and study on gas-assisted extrusion molding process[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [12] 习家成. 基于流动平衡的双腔微管挤出模具设计与优化[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022.
XI Jiacheng. Design and optimization of double-lumen microtubules extrusion die based on flow balance[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2022.
- [13] 周友明. 医用导管的气辅微挤出成型工艺研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
ZHOU Youming. Research on gas-assisted micro extrusion molding technology of medical catheters[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2017.
- [14] 李嘉炜. 基于 Polyflow 的橡胶注射机塑化系统数值模拟及分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023.
LI Jiawei. Numerical simulation and analysis of plasticizing system of rubber injection machine based on polyflow[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2023.

- [15] 王浩南,张礼华,陈凯,等.基于ANSYS-Polyflow的可降解塑料板材挤出机头流道分析及设计优化[J].塑料科技,2023,51(9):103–107.
WANG Haonan, ZHANG Lihua, CHEN Kai, et al. ANSYS-polyflow based flow channel analysis and design optimization of degradable plastic sheet extruder head[J]. *Plastics Science and Technology*, 2023, 51(9):103–107.
- [16] 刘磊,李经纬,王鑫杨,等.聚合物三腔微管挤出口模结构对胀大变形的影响[J].高分子材料科学与工程,2024,40(1):82–91.
LIU Lei, LI Jingwei, WANG Xinyang, et al. Effect of polymer three-cavity micro-tube extrusion die structure on swell deformation[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2024, 40(1):82–91.
- [17] 张广冬.基于非均匀挤出胀大行为的聚合物挤出模具设计关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2022.
ZHANG Guangdong. Research on key technology of polymer extrusion die design based on non-uniform extrusion swelling behavior[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [18] 林顺平,纪海波,刘强,等.特征尺寸对塑料双腔导管气辅挤出成型的影响[J].工程塑料应用,2025,53(9):105–110.
LIN Shunping, JI Haibo, LIU Qiang, et al. Effect of feature size on gas-assisted extrusion process of plastics double-lumen catheter [J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(9):105–110.
- [19] 邓小珍,纪海波,陈天荣,等.型腔直径对双腔塑料导管挤出成型的影响[J].塑料工业,2025,53(3):85–91.
DENG Xiaozhen, JI Haibo, CHEN Tianrong, et al. Influence of cavity diameter on extrusion process for the double lumen plastic catheters[J]. *China Plastics Industry*, 2025, 53(3):85–91.
- [20] 朱常委,吴大鸣.挤出胀大逆向求解技术在多腔精密医用导管口模设计中的应用[J].塑料,2009,38(1):1–4, 28.
ZHU Changwei, WU Daming. Inverse extrudate swell for multi-lumen precise medical catheter[J]. *Plastics*, 2009, 38(1):1–4, 28.
- [21] 胡坤,邓荣,梁栋. ANSYS CFD 网格划分技术指南[M].北京:化学工业出版社,2019.
HU Kun, DENG Rong, LIANG Dong. Technical guide of ANSYS CFD mesh generation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

(上接第121页)

- [16] MPHAHLELE K, RAY S S, KOLESNIKOV A. Cure kinetics, morphology development, and rheology of a high-performance carbon-fiber-reinforced epoxy composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107300.
- [17] GARSCHKE C, PARLEVLIET P P, WEIMER C, et al. Cure kinetics and viscosity modelling of a high-performance epoxy resin film[J]. *Polymer Testing*, 2013, 32(1):150–157.
- [18] 高腾龙,余建虎,许英杰.碳纤维/环氧树脂预浸料固化动力学建模研究[J].机械科学与技术,2022,41(7):1 128–1 135.
GAO Tenglong, YU Jianhu, XU Yingjie. Dynamic modeling of curing process of carbon/epoxy prepreg[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2022, 41(7):1 128–1 135.
- [19] 李婷婷,李艳霞,陈超,等.603环氧树脂体系固化动力学模型的建立与验证[J].复合材料学报,2018,35(1):95–102.
LI Tingting, LI Yanxia, CHEN Chao, et al. Establishment and verification of curing kinetics model of 603 epoxy resin system[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(1):95–102.
- [20] ZHANG C L, GU G H, DONG S H, et al. Curing kinetics, mechanical properties and thermomechanical analysis of carbon fiber/epoxy resin laminates with different ply orientations[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2021, 30(12):1 297–1 308.
- [21] 刘春林,张兰芬,陶国良,等.不饱和聚酯树脂/复合引发体系固化反应动力学研究[J].中国塑料,2009,23(5):61–65.
LIU Chunlin, ZHANG Lanfen, TAO Guoliang, et al. Curing kinetics of unsaturated polyester resin and complex initiation system [J]. *China Plastics*, 2009, 23(5):61–65.
- [22] 李福来,杨增福,陈亚芹,等.快速拉挤用环氧树脂固化动力学及动态力学性能研究[J].中国塑料,2023,37(6):66–73.
LI Fulai, YANG Zengfu, CHEN Yaqin, et al. Study on curing kinetics and dynamic mechanical properties of epoxy resin for rapid pultrusion[J]. *China Plastics*, 2023, 37(6):66–73.