

http://pmse.scu.edu.cn

收缩微流道中高分子溶液流动行为的数值模拟与实验

王林林, 王伟

(青岛科技大学 橡塑材料与工程教育部重点实验室/山东省橡塑材料与工程重点实验室, 山东 青岛 266042)

摘要: 利用实验与数值模拟相结合的方法,研究了质量分数为0.3%的聚氧化乙烯(PEO)水溶液在4:1收缩微流道中的流动行为。进行数值模拟时,借助有限元分析软件Polyflow,采用指数型Phan-Thien-Tanner(PTT)本构模型,分别对PEO水溶液在Weissenberg数分别为5.9, 7.2, 8.1和9.8时和在4:1直角收缩微流道、4:1圆弧过渡收缩微流道中的流变行为进行了模拟分析。结果显示,实验结果与数值模拟结果的吻合较好,表明PTT本构模型能够很好地预测PEO水溶液在4:1收缩微流道中的流变行为。此外,还讨论了Weissenberg数和流道的几何形状对微流动行为的影响,随着Weissenberg数的增大,PEO水溶液的流速、压力和应力也随之增大,而圆弧过渡收缩口可以有效地避免涡流流动,提高挤出流场的稳定性。

关键词: 聚氧化乙烯水溶液; 收缩微流道; 微流控实验; 本构模型; 数值模拟

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2022)12-000

在科学研究的不懈努力和工程应用的推动下,宏观尺度流体流动行为的研究已经取得了巨大的成功,国内外研究者的热点逐渐转向微尺度的流动行为^[1]。

在特征尺度为毫米量级的宏观仪器中,很难使低黏度的黏弹性流体在保持较小雷诺数(Re)的情况下实现高魏森伯格数(Wi)和大变形率。随着科技水平的不断提高,微流控仪器很好地解决了这一问题,在微米级的流道中,低黏度的聚合物水溶液也会产生强烈的黏弹性效应^[2]。其中,微流控技术的发展极其迅速,该技术具有操作方便、分析效率高、样品消耗量少、污染低等优点^[3],被广泛应用于喷墨打印^[4]、细胞分离^[5]、药物筛选^[6]、微注塑成型^[7]、医疗诊断^[8]等方面。特别是在新冠疫情爆发之后,国内外研究者基于微流控技术开发出了多种新冠病毒检测方法和疫苗开发技术,在抗击疫情中发挥了关键作用。

谢海波等^[9]利用流场仿真与试验测试相结合的方法对微流控器件中常见的4种典型微流道进行理论与试验的相互检验,证明了微粒子图像测速

(Micro-PIV)技术具有较高的整体精度,是目前微流场检测的有效手段,验证了Navier-Stokes方程组在微量级流场的数值计算中依然有效。Li等^[10]使用Micro-PIV技术对半稀释的聚氧化乙烯(PEO)溶液在收缩-膨胀流道中的流动行为进行了研究,发现流道收缩比对流体的漩涡成长机制存在一定的影响。Rezaee等^[11]利用有限体积法对线型PTT流体在常规平面收缩流道中的流动行为进行了数值模拟,探讨了拉伸参数、延迟参数等材料参数对流体流速、压力降及应力等的影响。Omowunmi等^[12]采用多模PTT模型,对PEO溶液在收缩微通道中的流动行为进行了三维模拟,系统研究了流道长径比对流场的影响。乌岳等^[13]借助Polyflow软件,采用PTT本构模型对固体推进剂药浆在收缩流道中的流动行为进行预测,讨论了松弛时间对流体流动速度、应力等特性的影响。Oliveira等^[14]对PEO水溶液在双曲线型微加工收缩流道中的流动行为进行了实验研究,同时利用有限体积法进行相应的数值模拟,证明了有限体积法可以很好地预测PEO溶液的流变行为。Zografos等^[15]利用有限体积法分别对牛

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0273

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MEM022); 国家自然科学基金资助项目(21274072)

通讯联系人: 王伟, 主要从事计算流变学研究, E-mail: ww@qust.edu.cn

顿流体和黏弹性流体在双曲线型收缩膨胀微流道中的流动行为进行了三维数值模拟,深入了解了这种几何结构中的流变力学。李文文等^[16]利用离散的弹性-黏性应力分裂/迎风流线(Discrete elastic viscous stress split/streamline upwind, DEVSS/SU)方法研究了聚乙烯熔体在收缩膨胀流道中的黏弹性流变行为,验证了该方法在模拟高分子熔体的流动过程时具有较好的稳定性和收敛性。

采用实验与数值模拟相结合的方法,利用笔者课题组自行搭建的微流控实验平台对PEO水溶液的流动规律进行了实验观察,同时借助有限元分析软件Polyflow,使用指数型PTT本构模型预测了PEO水溶液在4:1收缩微流道中的流动行为,并进一步讨论了Weissenberg数和微流道形状对流体流动行为的影响。

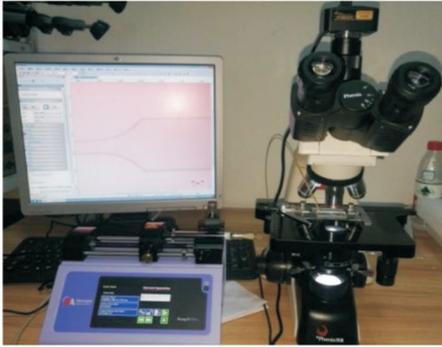


Fig.1 Microfluidic experiment device

1 PEO水溶液的实验研究

1.1 实验样品与仪器

实验样品包括相对分子质量为 2×10^6 的PEO粉末(纯度98%,上海麦克林生化科技有限公司)、去离子水和直径 $5 \mu\text{m}$ 的示踪粒子(主要成分: $\text{SiO}_2 > 65\%$),确保示踪粒子在溶液中实现均匀分布。

实验仪器为课题组搭建的微流控实验台。整

个实验装置包括流动控制系统、可视化系统及图像后处理系统三部分,分别由微流控芯片、微处理器驱动型注射泵、注射器、转接头、聚四氟乙烯(PTFE)软管、显微镜、CCD高速相机及计算机等部件组成,如图1所示。

实验所使用的微流控芯片包含1个4:1直角收缩微流道和1个4:1圆弧过渡收缩微流道,设计的上游流道宽 $600 \mu\text{m}$ 、下游收缩流道宽 $150 \mu\text{m}$,见Fig.2。

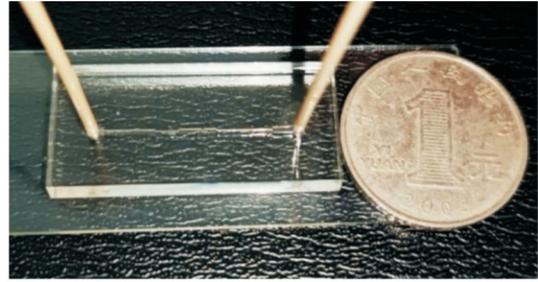


Fig.2 Photograph of microfluidic chip

在显微测量装置下,微流道的实际测量尺寸如图3所示。从测量结果可以看出,测量尺寸与设计尺寸基本一致,仅仅存在非常微小的偏差,偏差的原因主要有两方面:在芯片生产加工过程中可能会产生一定的误差;在进行测量时,由于测量仪器精密度的限制,会导致测量误差。总体来说,以上误差对最终结果的影响很小,可忽略不计。

1.2 实验过程

PEO的相对分子质量较高,是一种柔性聚合物,即使较低的浓度也能保持较高的弹性效应,而且水溶性较好,在常温可以与水以任意比例混合。通过查阅文献^[17],配制了不同浓度的PEO水溶液,本实验发现,当质量分数为0.3%时,流体的弹性较大,而且可以保证微流控实验的顺利进行,达到最佳的实验效果。因此,最终选择质量分数为0.3%的PEO水溶液为实验流体,并将一定量的示踪粒子添加到溶液中,使示踪粒子在溶液中均匀分散,静置

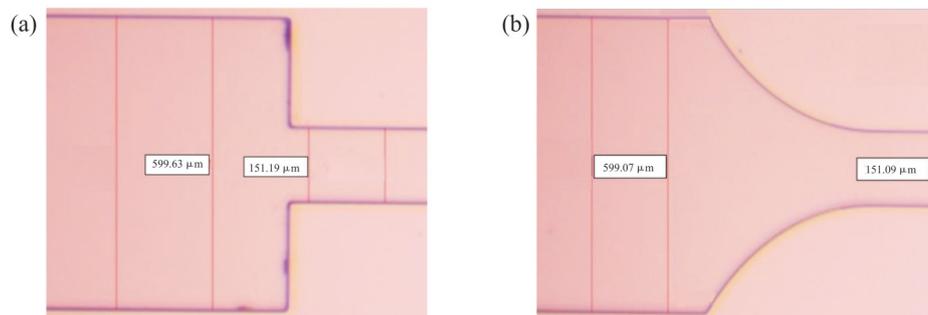


Fig.3 Dimensional measurement results of (a) right-angle contraction microchannel and (b) arc transition contraction microchannel

2 h 后使用。

在进行微流控实验时,首先将微流控芯片固定于载物台上,将装有 PEO 水溶液的注射器固定于微处理器驱动型注射泵上,一根 PTFE 软管连接注射器的出口和微流道的入口,另一根 PTFE 软管连接微流道出口,集中收集流出的溶液。然后,分别设置不同的注射速度,依次进行实验测量,在每次改变注射速度后,需要等待流体的流动稳定后方可进行记录。

2 PEO 水溶液收缩流动的数值模拟

2.1 几何模型

在微流控实验中,由于流道尺寸微小,因此流道深度对黏弹性流体的复杂流动行为具有很大的影响。本文所使用的收缩微流道的深度为 $200\ \mu\text{m}$,大于下游收缩流道的宽度,消除了厚度对流动的影响。因此,在数值模拟时,可将几何模型简化为平面收缩流。

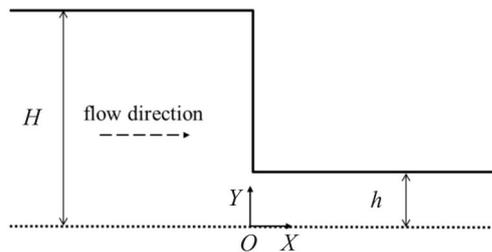


Fig.4 Schematic diagram of geometric model

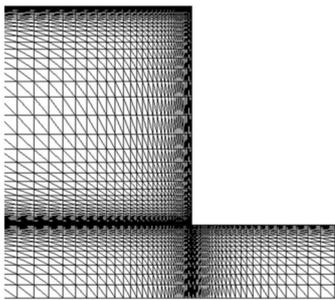


Fig.5 Computational mesh near contraction port

由于流道的几何结构和边界条件具有对称性,为了减少计算量,只取 1/2 流道进行建模。Fig.4 为平面收缩微流道的示意图,上游流道高度 $H=300\ \mu\text{m}$,下游流道高度 $h=75\ \mu\text{m}$,流道总长度为 $6000\ \mu\text{m}$,以保证流体在流动过程中的充分发展性,流道收缩口位于 $X=0\ \mu\text{m}$ 处,流道入口位于 $X=-3000\ \mu\text{m}$ 处,流道出口位于 $X=3000\ \mu\text{m}$ 处。

在进行网格划分时,为了保证计算过程收敛,对流道壁面及收缩口附近进行了网格加密,如 Fig.5 所示。

2.2 数学模型

在微尺度流动中,连续介质模型依然适用。PEO 水溶液在微流道中的流动为不可压缩的等温流动,因此需要遵守质量守恒和动量守恒定律,如式(1)和式(2)所示。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + [\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}] + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: \mathbf{u} ——速度矢量; $\boldsymbol{\sigma}$ ——偏应力张量; p ——压力; \mathbf{g} ——重力加速度; ∇p ——压力梯度。

2.3 本构方程

Phan-Thien^[18]和 Tanner^[19]基于 Lodge 的类橡胶弹性网络理论提出了 PTT 本构模型,其中,指数型 PTT 本构模型如式(3)所示。

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}} + \xi (\mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{D}) + \lambda^{-1} \exp\left[\frac{\lambda \varepsilon}{\eta_0} \text{tr}(\boldsymbol{\tau})\right] \boldsymbol{\tau} = 2G\mathbf{D} \quad (3)$$

式中: ξ ——滑移系数; \mathbf{D} ——变形率张量; $\boldsymbol{\tau}$ ——黏弹性部分的偏应力张量; $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}$ ——黏弹性偏应力张量的上随体导数; λ ——松弛时间; G ——剪切模量; ε ——特征拉伸参数; $\text{tr}(\boldsymbol{\tau})$ ——黏弹性偏应力张量的迹。

2.4 材料参数

由于实验条件有限,PEO 水溶液的材料参数来自于 Rodd 等^[20]的研究工作,模拟所用指数型 PTT 模型的本构参数见 Tab.1。

Tab.1 Constitutive parameters of PTT model(T=200 °C)

Fluid property	0.30%PEO
Density/(kg · m ⁻³)	989
Relaxation time/s	4.4 × 10 ⁻³
Zero-shear viscosity/(Pa · s)	8.3 × 10 ⁻³
Power law exponent	0.88
ε	0.02
ξ	0

2.5 计算方法

借助 Polyflow 软件对 PEO 水溶液在 4:1 收缩微流道中的流动行为进行数值模拟时,计算采用速度二次插值、压力和应力线性插值的单元。同时,为了保证计算的稳定性,所用的数值算法为基于 Crank-Nicolson 隐式差分的时域离散方法和离散的弹性-黏性应力分裂/迎风流线 (Discrete elastic viscous stress split/streamline upwind, DEVSS/SU) 算法。

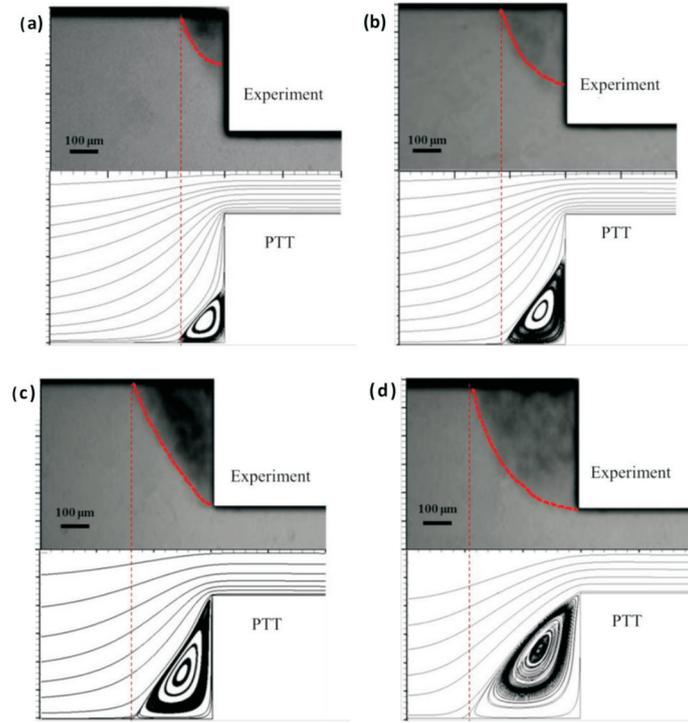


Fig.6 Streamline comparison of experimental and simulated when (a) $Wi=5.9$, (b) $Wi=7.2$, (c) $Wi=8.1$ and (d) $Wi=9.8$

3 结果与讨论

3.1 模拟结果与实验结果比较

为了验证指数型 PTT 本构模型对 PEO 水溶液流变行为的预测能力和数值方法的稳定性,将模拟结果与实验结果进行了比较。Fig.6 为 Weissenberg 数分别为 5.9, 7.2, 8.1 和 9.8 时,实验和模拟所得到的 PEO 水溶液在 4:1 收缩微流道中的流线比较情况。从 Fig.6 可以看出,在这 4 种流动条件下,实验和模拟所得到的流体的流场分布基本一致,流动过程中所产生的角漩涡的水平长度和垂直长度均接近相等,只存在非常微小的差别。

分析可能造成误差的原因有以下 3 个:一是微流控实验装置的精度不够,CCD 相机所捕获的图像分辨率较低,计算机处理得到的流场分布图存在误差;二是为了更好地观察流体的流动轨迹,在流体中添加了微量的示踪粒子,虽然其直径非常小,但可能会对流体的流动行为产生影响;三是在进行数值模拟时,计算所用的材料参数和本构模型与流体的真实情况可能存在一定差异。

整体来看,数值模拟结果与实验结果吻合较好,证明利用指数型 PTT 本构模型对 PEO 水溶液的流变行为进行预测的方法是可靠的,计算结果是具有参考价值的,同时也证明所用的数值方法

是稳定的。

3.2 Weissenberg 数对 PEO 水溶液流变行为的影响

在研究高分子流体的黏弹性流动问题时,通常用 Weissenberg 数来描述流体弹性的强弱程度,在平面收缩流道中,可以用式(4)表示

$$Wi = \lambda_{ob} \frac{Q}{h^2} \quad (4)$$

式中: λ_{ob} ——为高分子流体的取向松弛时间; Q ——流体的入口流量; h ——流道下游收缩部分的半高。

从式(4)可以看出,在微流道几何结构不变的条件下, Wi 数的大小由入口流量和流体的取向松弛时间决定。本文通过改变流体的入口流量来得到不同的 Wi 数,用以研究 PEO 水溶液在不同 Wi 数时的流动行为。

Fig.7 为在不同 Wi 数时流体漩涡尺寸的比较情况。从图中可以看出,随着 Wi 数的增大,漩涡的尺寸也随之增大,当 Wi 数由 5.9 增大至 9.8 时,角漩涡的水平长度由 $80 \mu\text{m}$ 增加到 $200 \mu\text{m}$,垂直长度由 $90 \mu\text{m}$ 增加到 $225 \mu\text{m}$,其中, $Wi=8.1$ 时,角漩涡的垂直长度就已经达到最大值。

流体的流场分布受到 Wi 数影响的主要原因是:当流体流经收缩口附近时,由于流道突然变窄,为了满足质量守恒定律,流体的流速会迅速增大,产

生明显的速度过冲现象,部分流体堆积在收缩角处,堆积流体的流动速度极低,远小于中心线处流体的速度,于是在收缩角处发生涡流流动,形成漩涡。 Wi 数越大,流体的流动速度就越快,流体的堆积现象就越严重,因此漩涡的尺寸就越大。

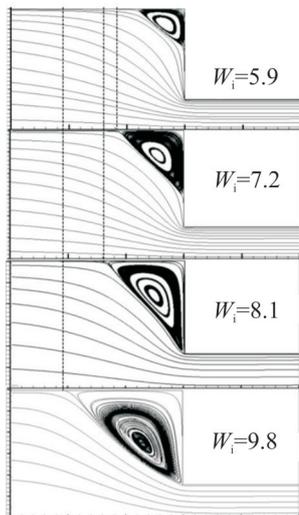


Fig.7 Comparison of vortex size under different Wi

Fig.8 为在 4 个不同 Wi 数下, PEO 水溶液沿中心线的速度、压力、各应力分量及主应力差的分布情况。从 Fig.8(a) 可以看出, 流体的流速随着 Wi 数的增加而增加, 尤其在收缩口附近位置, 流体的流速

会急剧增长, 而在远离收缩口的流道上、下游区域, 流体的流速趋于稳定。从 Fig.8(b) 可以看出, Wi 数越大, 流体在流动过程中受到的阻力就越大, 压力降也随之变大。从 Fig.8(c~f) 可以看出, 在远离收缩口的流道上、下游, 流体的各应力分量和主应力差的值均为 0, 不受 Wi 数的影响; 在收缩口附近, 各应力分量和主应力差出现明显的波动, 数值迅速增大, 在 $X=0 \mu\text{m}$ 的位置, 应力达到最大值, 并且其最大值随着 Wi 的增大而增大。这是由于流体在流经收缩口时, 流速增大, 流体所受到的剪切变大, 高分子链的取向拉伸程度变大, Wi 数越大, 流体受到的剪切和拉伸就越强烈; 当流体远离收缩区域时, 分子链发生松弛, 恢复到原来的无规卷曲状态, 应力也随之减小。

3.3 微流道形状对 PEO 水溶液流变行为的影响

在直角收缩微流道中, 漩涡的存在不利于实验的进行与实际生产加工。在进行微流控实验时, 漩涡的存在会使示踪粒子聚集于此, 时间过长时, 示踪粒子会发生团聚现象, 吸附在流道壁面处, 很难被冲出, 造成流道的堵塞, 增加实验难度; 在聚合物的微挤出、微注塑等工艺中, 漩涡的存在会使停留在流道中的原料发生分解, 材料性能降低, 而且容易产生气泡, 影响制品的生产质量。为了避免上

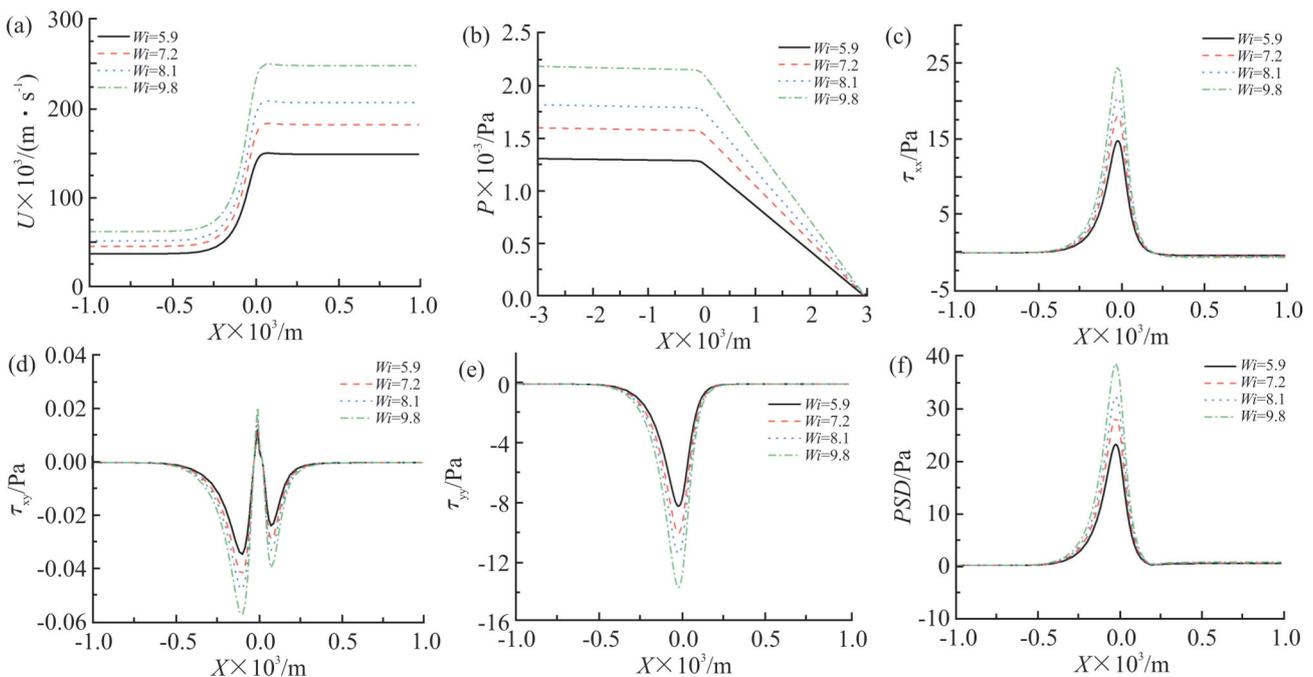


Fig.8 (a) Variation of velocity, (b) pressure, (c) tensile stress τ_{xx} , (d) shear stress τ_{xy} , (e) stress component τ_{yy} and (f) principal stress difference of fluid along the centerline under different Wi

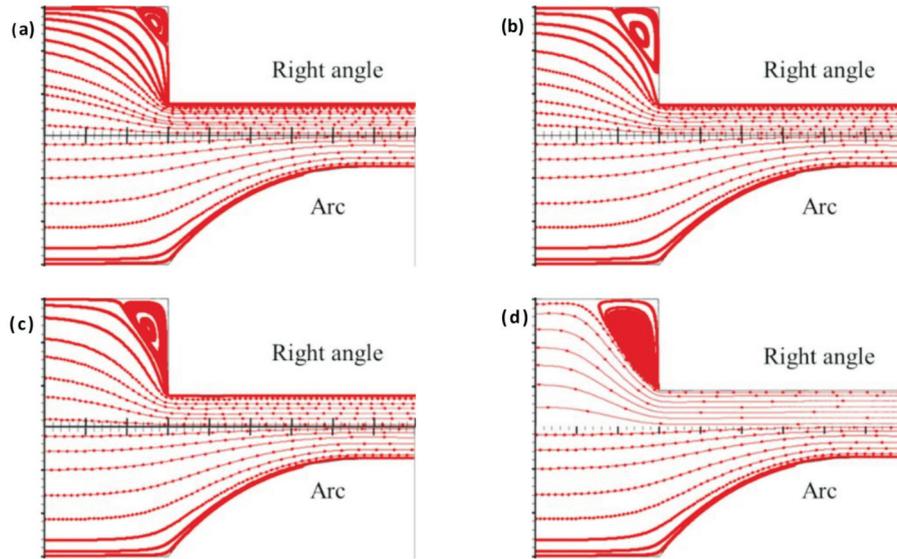


Fig.9 Comparison of streamlines between right-angle contraction flow and arc transition contraction flow when (a) $Wi=5.9$, (b) $Wi=7.2$, (c) $Wi=8.1$ and (d) $Wi=9.8$

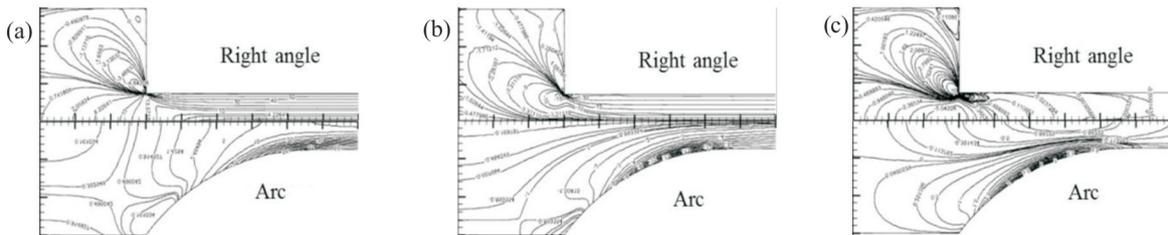


Fig.10 Comparison of contour lines of (a) tensile stress τ_{xx} , (b) shear stress τ_{xy} and (c) stress component τ_{yy} under two flow channels(unit: Pa)

述现象的发生, 研究者们引入了斜角、锥形、楔形等形状的道。

本文以尺寸相同的 4:1 直角收缩流道和 4:1 圆弧过渡收缩流道为研究对象, 分析了微流道收缩口的几何形状对 PEO 水溶液流变行为的影响。

Fig.9 为流体在 2 种微流道中的流线比较。从图中可以看出, 与直角收缩流道相比, 圆弧过渡收缩流道中流体的流线平稳顺滑, 不存在漩涡。这是由于圆弧过渡段的存在使流体在流经收缩口区域时, 存在一个缓冲阶段, 避免了速度过冲现象的发生, 流动状态比较稳定。

Fig.10 为流体在 2 种微流道中的应力分量等值线分布。从图中可以看出, 在直角收缩流道中, 收缩尖角位置应力集中现象显著, 存在着应力奇异点, 计算较为困难, 容易出现不收敛问题; 在圆弧过渡流道中, 流体流经收缩过渡段时, 靠近壁面的高分子链发生了拉伸和取向, 产生局部扰动, 导致应力发生变化, 因此, 该区域壁面附近的应力等值线

分布较为密集, 当流体远离收缩过渡区域时, 分子链发生松弛, 恢复到原来的卷曲状态, 应力减小。相比较而言, 圆弧过渡收缩流道不仅避免了涡流流动, 而且有利于挤出流场的稳定, 可提高挤出物的产量和质量。

4 结论

本文采用有限元软件 Polyflow 中的 PTT 本构模型预测了 0.3% PEO 水溶液在 4:1 收缩微流道中的流动行为, 并与微流控实验结果进行了比较, 得出以下结论:

(1) 实验结果与数值模拟结果吻合较好, 说明 DEVSS/SU 数值方法能够较好地计算微流道中流体的流动行为。

(2) 指数型 PTT 本构模型能够很好地预测 PEO 水溶液在收缩微流道中的流变行为。

(3) 微流道的形状对流体的流动行为有很大的影响, 将流道收缩口设计成圆弧过渡形状不仅避免

了涡流流动,而且有利于挤出流场的稳定,可提高挤出物的产量和质量。

参考文献:

- [1] 李小斌. 粘弹性流体微尺度流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Li X B. Study on the characteristics of microscale flow of viscoelastic fluids[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [2] Wu S, Raihan M K, Song L, *et al.* Polymer effects on viscoelastic fluid flows in a planar constriction microchannel[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2021, 290: 104508.
- [3] 丁家坚. 微流体系统的设计与数值模拟[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Ding J J. The design and numerical simulation of the microfluidic system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [4] 范昭璇. 喷墨打印技术与微流控技术的液滴生成及应用[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
Fan Z X. Inkjet printing and microfluidics based droplets generation and applications[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [5] 李慧来, 杨道, 吴晓松, 等. 多通道微流控芯片的设计、仿真及细胞迁移应用研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2022, 39(1): 128-138.
Li H L, Yang X, Wu X S, *et al.* Design, simulation and application of multichannel microfluidic chip for cell migration [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2022, 39(1): 128-138.
- [6] Zheng L, Wang B, Sun Y, *et al.* An oxygen-concentration-controllable multiorgan microfluidic platform for studying hypoxia-induced lung cancer-liver metastasis and screening drugs[J]. *ACS Sensors*, 2021, 6: 823-832.
- [7] 李湘林, 蒋炳炎, 朱来余, 等. 注射成型工艺对微流控芯片微通道尺寸均匀性的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(5): 86-91.
Li X L, Jiang B Y, Zhu L Y, *et al.* Influence of injection molding processing on the size uniformity of microchannels in microfluidic chips[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(5): 86-91.
- [8] 张道远, 林树靖, 王菲, 等. 用于高集成度数字PCR平台的微流控芯片[J]. *微纳电子技术*, 2022, 59(3): 242-249.
Zhang D Y, Lin S J, Wang F, *et al.* Microfluidic chip for a highly integrated digital PCR platform[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2022, 59(3): 242-249.
- [9] 谢海波, 傅新, 杨华勇, 等. 典型微管道流场数值模拟与 Micro-PIV 检测研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(5): 32-38.
Xie H B, Fu X, Yang H Y, *et al.* Simulation and Micro-PIV research on classical microchannel flow[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(5): 32-38.
- [10] Li Z, Yuan X F, Haward S J, *et al.* Non-linear dynamics of semi-dilute polydisperse polymer solutions in microfluidics: effects of flow geometry[J]. *Rheologica Acta*, 2011, 50: 277-290.
- [11] Rezaee T, Esmaili M, Bazargan S, *et al.* Predicting the excess pressure drop incurred by LPTT fluids in flow through a planar constricted channel[J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2019, 31: 149-166.
- [12] Omowunmi S C, Yuan X F. Modelling the three-dimensional flow of a semi-dilute polymer solution in microfluidics-on the effect of aspect ratio[J]. *Rheologica Acta*, 2010, 49: 585-595.
- [13] 乌岳, 李卓. 固体推进剂药浆收缩流动数值模拟与实验验证[J]. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(12): 99-105.
Wu Y, Li Z. Numerical simulation and experiment of solid propellant 4:1 contraction flow[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2019, 35(12): 99-105.
- [14] Oliveira M, Alves M A, Mckinley G H, *et al.* Extensional flow of water and a semi-dilute aqueous solution of polyethylene oxide through microfabricated hyperbolic contractions[C]. *Lisbon:13th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, 2006.
- [15] Zografos K, Hartt W, Hamersky M, *et al.* Viscoelastic fluid flow simulations in the e-VROC (TM) geometry[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2019, 278: 104222.
- [16] 李文文, 王伟. 支化高分子在收缩膨胀流道中的复杂流变行为[J]. *高分子材料科学与工程*, 2016, 32(9): 103-107.
Li W W, Wang W. Complex rheological behavior of branched polymer in contraction-expansion flow[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2016, 32(9): 103-107.
- [17] Li Z, Yuan X F, Haward S J, *et al.* Non-linear dynamics of semi-dilute polydisperse polymer solutions in microfluidics: a study of a benchmark flow problem[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166: 951-963.
- [18] Thien N P, Tanner R I. A new constitutive equation derived from network theory[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1977, 2: 353-365.
- [19] Tanner R I. *Engineering rheology*[M]. New York: Oxford University Press, 2000.
- [20] Rodd L E, Scott T P, Boger D V, *et al.* The inertio-elastic planar entry flow of low-viscosity elastic fluids in micro-fabricated geometries[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2005, 129: 1-22.

Numerical Simulation and Experiment on Flow Behavior of Polymer Solution in Contraction Microchannel

Linlin Wang, Wei Wang

(Key Laboratory of Rubber-Plastics, Ministry of Education//Shandong Provincial Key Laboratory of Rubber-Plastics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

ABSTRACT: The flow behavior of polyethylene oxide (PEO) aqueous solution with the mass fraction of 0.30% in a 4:1 contraction microchannel was studied by the experimental and numerical methods in this paper. With finite element analysis software Polyflow, the exponential Phan-Thien-Tanner (PTT) constitutive model was applied to simulate the flow behavior of the solution in 4:1 right angle contraction microchannel and 4:1 arc transition contraction microchannel at Weissenberg numbers of 5.9, 7.2, 8.1 and 9.8. The results show that the experimental results agree well with the numerical simulation results. It is proved that the PTT constitutive model can well predict the rheological behavior of PEO aqueous solution in 4:1 contraction microchannel. Furthermore, the influence of Weissenberg number and geometry of the channel on the microscale flow behavior were discussed. With the increase of Weissenberg number, the flow velocity, pressure and stress of PEO aqueous solution also increase, and the arc transition contraction port can effectively avoid vortex flow and improve the stability of extrusion flow field.

Keywords: polyethylene oxide aqueous solution; contraction microchannel; microfluidic experiment; constitutive model; numerical simulation