http://pmse.scu.edu.cn

多腔微管气体辅助挤出成型的影响机制

邓小珍[1]，陈天荣[1]，刘 彪[1]，肖 兵[1]，江诗雨[1]，任 重[2]
（1. 南昌工程学院 精密驱动与装备江西省重点实验室 机械工程学院，江西 南昌 330099；
2. 江西科技师范大学 先进电子材料与器件江西省重点实验室，江西 南昌 330038）

摘要：以五腔微管为例，建立了多腔微管三维挤出流动模型，采用有限元方法进行了数值求解。通过分析口模内外熔体流场及应力分布，研究了传统和气辅2种不同条件下多腔微管挤出成型的影响机制。结果表明，传统挤出过程中，五腔微管挤出胀大比、主型腔和次型腔椭圆度均随着熔体入口流率和松驰时间的增大而增大，但微管外轮廓椭圆度随着入口流率和松驰时间的增大而减小；气辅挤出过程中，由于口模内外熔体径向速度、剪切速率和第一法向应力差等分布均匀且趋于零值，有效消除了微管截面与口模截面不一致的胀大变形现象，保证了微管外形轮廓、主型腔和次型腔的圆度，且不受熔体流率和松驰时间的影响，能有效提高多腔微管成型质量，实现多腔微管的精密成型。

关键词：多腔微管；气辅挤出；挤出胀大；椭圆度
中图分类号：TQ320.66+3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）11-0079-08

随着聚合物精密成型技术的不断发展，聚合物微管的应用越来越广泛，如医学诊断、介入治疗、通讯及汽车等领域，而这些高附加值的微管，特别是多腔医用微管主要依赖进口，因此，对多腔微管挤出成型工艺的研究具有重要意义。现有公开报道文献有关多腔微管的挤出成型研究，主要集中于其离模膨胀机理，如李福成等[1]研究了微管挤出过程中熔体的黏弹性流动，得到了入口流率和松弛时间对微管挤出胀大的影响规律。Tian等[2]对微管成型进行了模拟和实验研究，发现挤压体截面上不同位置的膨胀比有显著差异。Jin等[3]研究了挤出工艺参数对五腔微管挤出变形和胀大变化的影响。Liang等[4]研究了聚丙烯复合熔体的挤出胀大行为，发现挤出物胀大率与剪切速率呈非线性正相关。任重[5]、刘同科等[6]的研究发现气体辅助挤出成型技术（简称气辅挤出）可有效解决微管挤出过程中的胀大、截面变形、“鲨鱼皮”和熔体破裂等问题[7~10]。气辅挤出技术自21世纪初由Liang等[11]提出后，由于其在挤出口模壁面和熔体表面间产生的稳定气垫膜层的作用，聚合物熔体以完全滑移非黏着的方式挤出口模，能有效提高成型制品的质量，诸多学者对气体辅助挤出成型技术进行了大量研究。Ren等[12]研究了气辅挤出技术对微管成型的影响，结果进一步表明，气辅挤出可以很好地消除传统挤出过程产生的胀大、“鲨鱼皮”、熔体破裂等缺陷。然而已有的关于气体辅助技术应用于微管成型的研究主要集中于单腔和双腔微管，且现有公开发表文献中，鲜见涉及气辅技术对微管型腔椭圆度影响机制的研究。由于多腔微管具有壁厚不均、尺寸较小、结构复杂等特点，挤出后常常会出现型腔严重变形的情况，因此对于多腔微管除了要考虑挤出胀大问题还应考虑其圆度问题。

本文以五腔微管为研究对象，将气辅技术应用

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0208
收稿日期：2023-11-10
基金项目：江西省2023年度研究生创新计划项目（YC2023-S999）；江西省重点研发计划项目（20243BBI91011）；江西省自然科学基金重点项目（20224ACB202004）；国家自然科学基金资助项目（62165006）；江西省光电子与通信重点实验室开放基金项目（20202OEC001）
通讯联系人：邓小珍，主要从事聚合物加工成型技术研究，E-mail: Pearl617@163.com

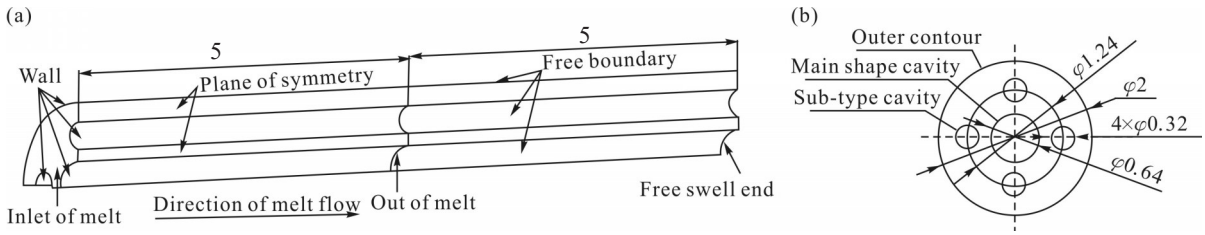


Fig. 1 Catheter geometry model and cross section: (a) geometric model of the five-lumen catheter; (b) cross section of the five-lumen catheter

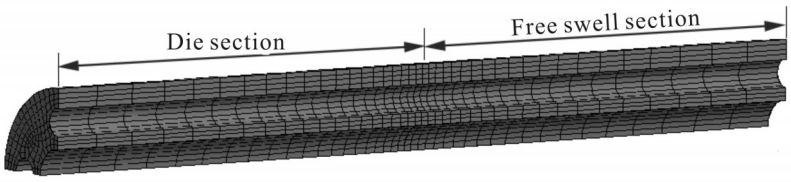


Fig. 2 Finite element meshing of five-cavity catheter

于多腔微管挤出成型，采用有限元方法分析气辅挤出和传统挤出时，工艺参数及材料特性对多腔微管挤出胀大及型腔椭圆度的影响，以此探究气辅技术在多腔微管挤出成型中的适用性及影响机制。

1 数值模型

1.1 几何模型及网格划分

五腔微管几何模型如Fig.1(a)所示，其中，外轮廓直径为2 mm，主型腔直径为0.62 mm，4个次型腔直径均为0.32 mm，如Fig.1(b)所示。模型沿熔体流动方向（Z轴正方向）分为口模内流动段和自由胀大段，2段区域长度均为5 mm，有限元网格模型如Fig.2所示。考虑该五腔微管截面的对称性，为了减少网格数量，提升计算速度，只取模型的1/4进行求解，同时因熔体在口模出口附近存在较大流场波动，为了提高模拟数据的准确性，在网格划分时对口模出口处进行适当网格加密处理。

1.2 控制方程与本构方程

1.2.1 *控制方程*：根据聚合物熔体在口模内的流动特点，假设熔体为等温不可压缩非牛顿黏弹性流体，且在口模内为充分发展流，不考虑熔体重力、惯性力和表面力对微管挤出过程的影响。根据上述假设可简化控制方程为式(1)和式(2)，

连续方程：

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

式中：∇——哈密尔算子；$\boldsymbol{v}$——速度矢量。

动量方程：

$$-\nabla p + \nabla \cdot \tau = 0 \tag{2}$$

式中：∇——哈密尔算子；p——熔体静压力；$\boldsymbol{\tau}$——偏应力张量。

1.2.2 *本构方程*：本构方程选用Phan-Thien-Tanner（PTT）黏弹本构方程[13]，不仅能同时表征熔体材料的黏性和弹性，且可以反映出在较大剪切速率下的第一法向应力差，其表达式如式(3)所示。

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{(1-\eta_r)\eta_0}\,\mathrm{tr}(\tau_1)\right]\tau_1 + \lambda\left[\left(1-\frac{\zeta}{2}\right)\overset{\nabla}{\tau_1} + \frac{\zeta}{2}\overset{\Delta}{\tau_1}\right] = 2(1-\eta_r)\eta_0 D \tag{3}$$

式中：ε——与熔体拉伸特性有关的材料参数，无量纲；λ——松弛时间，s；η_0——熔体的总黏度，Pa·s；η_r——黏度比，$\eta_r = \eta_1/\eta_0$，其中η_1为η_0的黏性分量，Pa·s；τ_1——偏应力张量；ζ——与熔体剪切黏度有关的材料参数，无量纲；$\overset{\nabla}{\tau_1}$，$\overset{\Delta}{\tau_1}$——τ_1的上、下随体导数；D——熔体形变速率张量。

1.3 材料参数及工艺条件

本文研究用材料物性参数如Tab.1所示[14],熔体入口流率分别设置为0.125 mm³/s,0.25 mm³/s,0.375 mm³/s,0.5 mm³/s和0.625 mm³/s。

Tab. 1 Melt material parameters and PTT model parameters

η_0/ (Pa·s)	λ/s	ε	ζ	η_r
10000	0.1	0.1	0.05	0.03

1.4 边界条件

(1)熔体入口:假设熔体在入口处的流动为充分发展流,即满足v_x=0,v_y=0,Z方向为熔体流动方向,即Z方向的流率为熔体入口流率,且入口处于恒温状态。

(2)壁面:作气辅挤出时为滑移边界条件,采用简化的Navier滑移条件,表达式$f_s=F_{slip}(v_{wall}-v_s)\,|\,v_s-v_{wall}\,|^{e_{slip}^{-1}}$,式中:$F_{slip}$为滑移系数;$v_{wall}$为壁面切向速度,mm/s,$e_{slip}$为材料参数,无量纲。由于气辅挤出满足完全滑移边界条件,因此,F_{slip}= 0,v_{wall}= 0,e_{slip}=0。作传统挤出时,壁面条件满足v_s=0,v_n=0,式中:v_s和v_n分别表示边界上的切向速度和法向速度。

(3)自由边界:满足f_n=0,f_s=0,v_n=0,式中:f_n和f_s分别表示边界上的法向力和切向力。

(4)对称面:满足条件f_s=0,v_n=0。

(5)自由胀大末端:微管不施加任何牵引力,满足f_n=0,f_s=0。

2 结果与讨论

2.1 气辅挤出对多腔微管挤出成型的影响

2.1.1 对挤出胀大的影响:Fig.3为五腔微管分别在传统挤出和气辅挤出中熔体入口流率(Q)与挤出胀大比(B)的关系。采用微管末端截面积(S_D)与口模出口截面积(S_A)之比,即挤出胀大比来描述微管的挤出胀大行为,如式(4)所示,

$$B=\frac{S_D}{S_A} \tag{4}$$

由Fig.3可知,传统挤出时,挤出胀大比随着入口流率的增大呈近线性增大,当入口流率从0.125 mm³/s增至0.625 mm³/s时,挤出胀大比从1.29增至1.45,这是由于随着熔体入口流率增大,口模压降增大,导致口模内外压差增大,使得熔体离开口模后胀大程度增强,另一方面,松弛时间一定时,熔体流率增大,口模内熔体流动时间缩短,口模外未松弛熔体增多,使得微管胀大程度增加;气辅挤出时,口模压降接近零值,口模内外几乎不存在压差,熔体也不受口模壁面黏附作用的影响,且微管挤出不受熔体入口流率的影响,挤出胀大比始终保持为1,即不存在挤出胀大现象,克服了传统挤出中存在的挤出胀大问题。

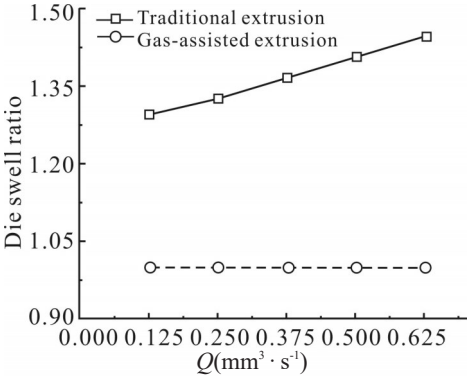


Fig. 3 Relationship between die swell ratio and inlet flow rate

Fig.4是在入口流率设定为0.375 mm³/s时,熔体松弛时间(λ)对微管挤出胀大的影响。熔体松弛时间是反应材料流变性能的主要参数,五腔微管在传统挤出中,挤出胀大比与松弛时间呈近似线性正相关关系,在松弛时间0.06 s延长至0.14 s时,挤出胀大比增长近10%,其根本原因在于,松弛时间越长,熔体分子链解缠结消耗时间越久,导致熔体在口模内来不及完全松弛的熔体越多,熔体越容易产生胀大;气辅挤出时,微管不随松弛时间的变化而变化,挤出胀大比始终接近1,这是因为气体辅助层的润滑作用,使熔体在口模内没有储存弹性能,以松弛状态挤出口模。

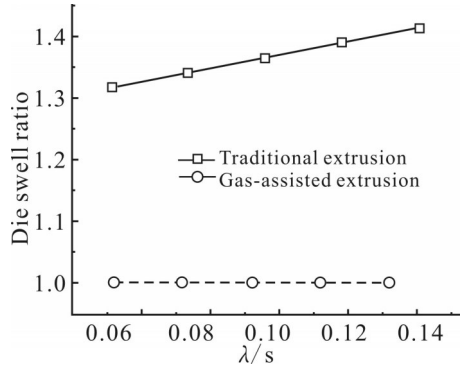


Fig. 4 Relationship between die swelling ratio and relaxation time

Fig.5为相同入口流率和材料物性参数条件下,

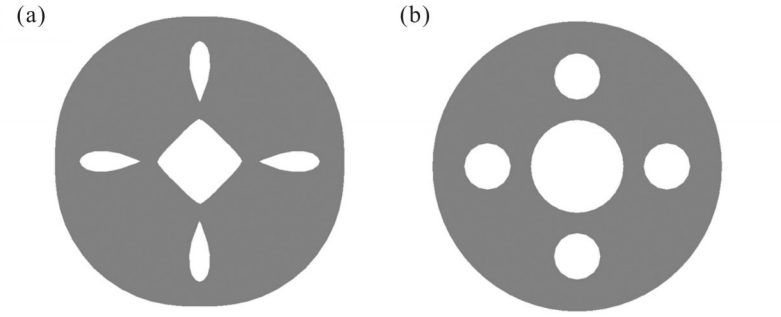


Fig. 5 Cross-sectional deformation of the catheter end: (a) traditional extrusion; (b) gas-assisted extrusion

传统挤出与气辅挤出时微管末端横截面变形图。由图可知，在传统挤出过程中，微管挤出变形现象较为明显，各腔室形状变形严重，而气辅挤出过程中，微管没有明显的挤出变形现象，各腔室形状亦无明显变化，表明气辅技术可以较好地消除微管的胀大问题，并能有效控制微管各腔室尺寸精度。

2.1.2 对椭圆度的影响：为了表征五腔微管截面形状的变化，引入椭圆度参数T，该值越小，表示微管型腔形变越小，其表达式如式(5)所示，

$$T=\frac{2(D_{max}-D_{min})}{D_{max}+D_{min}} \tag{5}$$

式中：D_{max}——型腔最大直径；D_{min}——型腔最小直径。

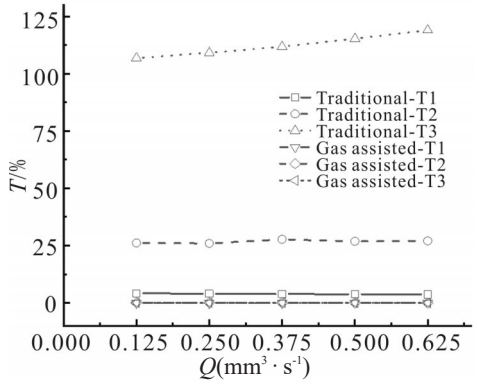


Fig. 6 Relationship between catheter ellipticity and inlet flow rate

Fig.6为微管椭圆度与入口流率的关系，图中T_1，T_2和T_3分别表示微管外轮廓椭圆度，主型腔椭圆度，次型腔椭圆度。由Fig.6可知，传统挤出时，微管的次型腔椭圆度T_3最大，说明微管次型腔变形最为显著，其椭圆度高达100%以上，且随入口流率的增加仍然在不断增大；微管主型腔椭圆度T_2高于25%，但受入口流率的影响较小；微管外轮廓变形较小，其椭圆度随入口流率的增加略有减小。分析原因，一是微管挤出型腔与外界大气压存在较大压差；二是熔体因壁面黏附作用产生的弹性能释放，熔体入口流率越大，其压差越大，且熔体在口模内弹性回复时间越短，微管产生形变越显著。微管次型腔呈水滴状的原因在于受到大气压和熔体松弛所引起作用力的双重影响，微管壁厚较厚处其熔体松弛引起的作用力占主导地位，向四周膨胀；而次型腔与主型腔之间壁厚较薄处的熔体较少，且2个型腔之间的压差较小。主型腔呈方形的主要原因在于壁厚较厚处熔体松弛引起的作用力向主型腔挤压，而主型腔内压力较小，导致形变的产生；微管外轮廓圆度差的原因在于，壁厚较薄处大气压力略小于熔体松弛引起的作用力，故整体向外胀大，又呈现微微内凹陷的现象，壁厚较厚处熔体较多，储存的弹性能也更大，所以表现出向外胀大。气辅挤出时，五腔微管的各腔室及外轮廓的椭圆度不受熔体入口流率的影响，始终为零值，形状保持良好，这是因为气垫层的润滑减小了熔体与壁面间的黏附作用及型腔与外界大气压之间的压差。结合Fig.5中气辅挤出截面示意图来看，气辅技术解决了五腔微管的挤出胀大和形变问题，可有效提高多腔微管的成型质量。

Fig.7为微管椭圆度与松弛时间的关系图。由图可知，传统挤出时，次型腔形变受松弛时间影响较大，其椭圆度T_3随松弛时间增加而增大，主型腔椭圆度T_2受松弛时间影响较小，而外轮廓椭圆度T_1当松弛时间增加时具有缓慢减小的趋势，原因是松弛时间延长，熔体弹性回复的越慢，这使得熔体离开口模后不完全松弛的熔体越多，而壁厚较厚处相较于较薄处不完全松弛的熔体更多，导致不完全松弛熔体

较多的区域沿主型腔和次型腔方向膨胀,挤压型腔产生形变。气辅挤出时,微管各腔室及外轮廓的椭圆度接近零值,这是由于口模内各处熔体基本处于松弛状态,即壁厚较厚和较薄区域熔体都没有未完全松弛的熔体存在,故气辅挤出时,微管椭圆度几乎不受松弛时间影响。

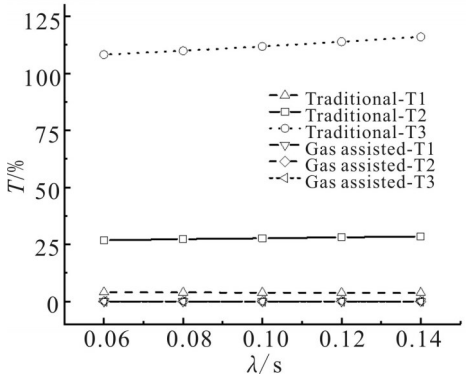


Fig. 7 Relationship between catheter ellipticity and relaxation time

2.2 流场分析

为探究多腔微管气体辅助挤出成型影响机理,本文对口模内外熔体速度、压力、剪切速率及第一法向应力差进行了分析。

2.2.1 速度场分析:Fig.8为五腔微管传统挤出和气辅挤出成型时熔体*Y*向速度分布云图,由于微管结构的对称性,*X*向速度云图与*Y*向速度云图一致。由图可知,传统挤出时,口模出口端面上熔体径向速度分布不均匀,微管外轮廓与次型腔附近存在较大的正向速度,即Fig.8(a)中的上半部分深色区域,该区域熔体径向速度导致外轮廓总体向外膨胀,次型腔向外轮廓方向拉伸变形,而主型腔和次型腔附近产生了较大的负方向速度,即Fig.8(a)中下半部分深色区域,该速度导致主型腔和次型腔产生收缩变形,结合Fig.5(a)微管末端截面图可知,微管末端的胀大变形及各型腔椭圆度均由出口端面熔体径向速度不均匀引起,出现这一现象的原因是口模内的熔体在微管壁面较厚的区域流速较大,在较薄处流速较小,离开口模后,熔体呈自由流动的状态,导致熔体从流速较大的区域流向流速较小的区域[15];气辅挤出时,熔体在口模出口端面的径向速度分布均匀且接近零值,表明气辅挤出可有效消除因径向流速不一致引起的胀长变形现象和各型腔椭圆度问题,如Fig.5(b)所示。

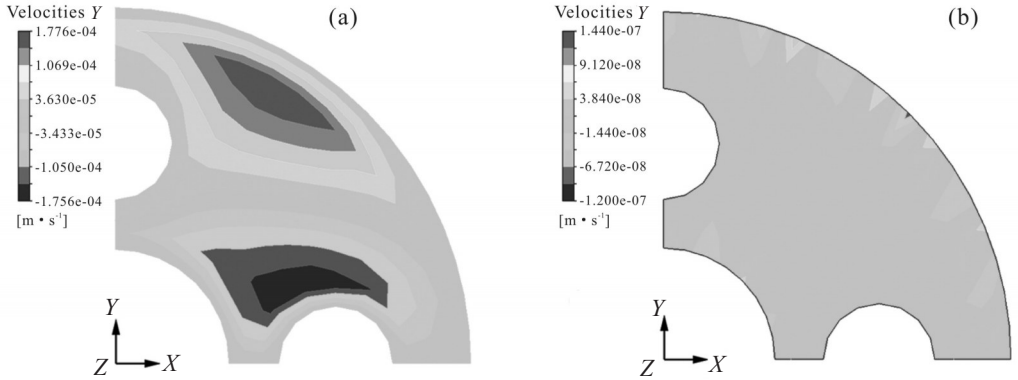


Fig. 8 Distribution of melt *Y*-direction velocities at the die outlet end: (a) traditional extrusion; (b) gas-assisted extrusion

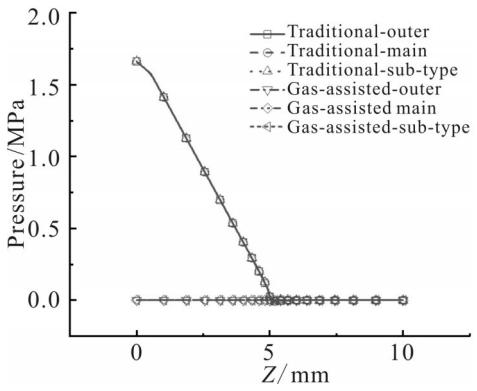


Fig. 9 Pressure distribution on the catheter cavity surface along extrusion direction

2.2.2 压力场分析:Fig.9为口模内外微管外轮廓、主型腔、次型腔表面沿*Z*轴方向(熔体挤出方向)的压力分布图。由图可知,在传统挤出过程中,熔体各表面的压力分布相似,即在口模入口处压力最大,沿挤出方向压力逐渐减小,至口模出口(*Z*=5 mm)处减至

零值(此处压力取值为相对压力,即大气压强为零),这是由于熔体在整个口模内壁所受到的摩擦阻力相同,故熔体在口模内的压力呈线性减小;气辅挤出过程中,口模内外熔体各表面压力始终接近零值,因为熔体与气体垫层间的摩擦阻力可以忽略不计,熔体呈完全滑移方式挤出口模,不需要较大压力推动熔体挤出口模,故气辅挤出能减小五腔微管挤出成型的口模压降,降低能量损失。

2.2.3 *剪切速率场分析*:Fig.10为沿挤出方向微管外轮廓、主型腔、次型腔表面的剪切速率分布图。传统挤出成型中,熔体进入口模后,熔体各表面都出现了不同程度的剪切速率差,且在熔体出口处剪切速率发生突变,其中,主型腔表面剪切速率最大,次型腔表面剪切速率次之,外轮廓表面剪切速率最小,导致多腔微管离开口模后,主型腔变形最为明显,次型腔变形程度次之,外轮廓变形相对较小,这是由于口模出口处,主型腔和次型腔附近的熔体出现了较大的压缩或拉伸流动;气辅挤出成型中,口模内外微管外轮廓、主型腔和次型腔表面剪切速率均为零值,因为气体垫层的润滑作用,熔体呈柱塞状挤出口模,避免了熔体出现压缩或拉伸流动,说明气体辅助技术可有效控制五腔微管因熔体剪切速率引起的各种形变,从而改善制品形状和表面质量。

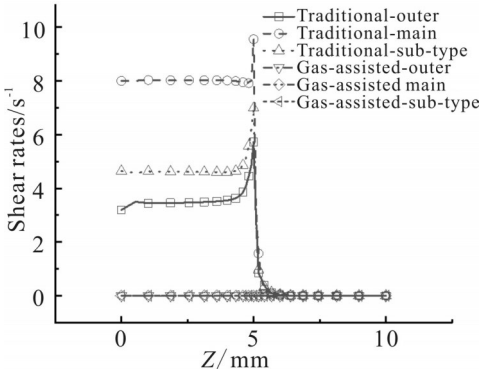


Fig. 10 Shear rate distribution on the catheter cavity surface along extrusion direction

2.2.4 *第一法向应力差分析*:Fig.11为五腔微管在传统挤出和气辅挤出方式下,熔体各表面的第一法向应力差N_1沿挤出方向的分布。第一法向应力差在挤出成型中通常用来表征熔体储存弹性能的大小,由图可知,传统挤出过程中,微管的主型腔和次型腔及外轮廓表面都产生了较大的第一法向应力差,且在口模出口处存在突变,N_1较大的主型腔和次型腔形变更为严重,这是因为熔体在离开口模之前吸收了较多的弹性势能,离开口模后,弹性势能瞬间释放,以致微管产生胀大;气辅挤出过程中,由于熔体与口模壁面间气体层的作用,熔体在口模内几乎没有第一法向应力差产生,即口模内未储存弹性势能,表明气辅挤出可有效消除因熔体第一法向应力差引起的形变。

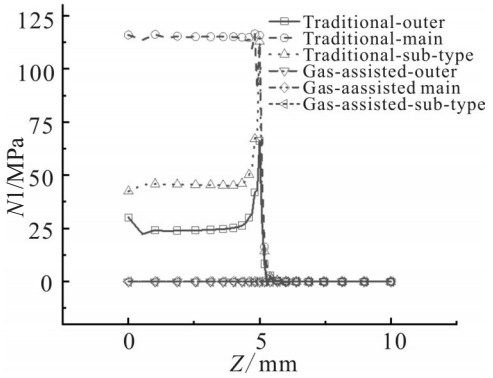


Fig. 11 First normal stress distribution on the catheter cavity surface along extrusion direction

3 结论

(1)五腔微管传统挤出时,口模出口端面主型腔和次型腔附近熔体径向速度分布存在较大差异,其表面剪切速率和第一法向应力差也较大,使得微管各型腔椭圆度较差,且随着熔体入口流率和松弛时间的变化而变化。

(2)气辅技术消除了因熔体径向速度分布不均、剪切速率及第一法向应力差等引起的形变和胀大现象,各型腔椭圆度为零值,说明微管形变问题与熔体的径向速度分布、剪切速率和第一法向应力差均有关联。

(3)气辅挤出时,口模内外熔体各处剪切速率均接近零值,且熔体在口模内吸收的弹性势能不大,熔体出口端面第一法向应力差波动较小。因此,为了准确反映材料性质对微管成型的影响,需考虑材料的弹性给成型带来的影响,采用黏弹性本构方程是必要的。

参考文献:

[1] 李福成, 周国发. 异形医用双腔导管挤出离模膨胀变形机理与调控[J]. 中国塑料, 2020, 34(6): 52-59.

Li F C, Zhou G F. Extrusion die swell deformation mechanism and control of medical heteromorphosis double-cavitiy catheter [J]. China Plastics, 2020, 34(6): 52-59.

[2] Tian H, Zhao D, Wang M, *et al*. Study on extrudate swell of polypropylene in double- lumen micro profile extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 357-368.

[3] Jin G B, Wang M J, Zhao D Y, *et al*. Design and experiments of extrusion die for polypropylene five-lumen micro tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214: 50-59.

[4] Liang J Z, Chen C Y, Zhou T Y, *et al*. Melt extrudate swell behavior of multi-walled carbon nanotubes filled-polypropylene composites[J]. Polymer Composites, 2017, 38: 2433-2439.

[5] 任重,黄兴元,柳和生.塑料微管气辅挤出成型实验与机理分析[J].材料导报, 2020, 34(20): 20193-20198.

Ren Z, Huang X Y, Liu H S. Experiment and mechanism analysis of gas- assisted extrusion forming for plastic micro- tube[J]. Materials Reports, 2020, 34(20): 20193-20198.

[6] 刘同科, 黄兴元, 柳和生, 等. 塑料微管气辅挤出中内气垫层气体的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(4): 75-86.

Liu T K, Huang X Y, Liu H S, *et al*. Influence of gas in the inner gas layer on gas- assisted extrusion of plastic micro- tube[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(4): 75-86.

[7] Mitsoulis E, Georgiou G C, Kountouriotis Z. A study of various factors affecting Newtonian extrudateswell[J]. Computers & Fluids, 2012, 57: 195-207.

[8] 邓小珍,肖兵,任重.聚合物气体辅助挤出成型研究进展[J].高分子材料科学与工程, 2022, 38(3): 151-158.

DengX Z, Xiao B, Ren Z. Progress on polymer gas- assisted extrusion molding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(3): 151-158.

[9] Arda D R, Mackley M R. Sharkskin instabilities and the effect of slip from gas- assisted extrusion[J]. Rheologica Acta, 2005, 44: 352-359.

[10] Ketata M, Ayadi A, Elkissi N, *et al*. Effect of rheological and physical properties on mitigation of melt fracture instability during extrusion of polymer melts through a radial flow die[J]. Rheologica Acta, 2017, 56: 341-350.

[11] Liang R F, Mackley M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene[J]. Journal of Rheology, 2001, 45: 211-226.

[12] Ren Z, Huang X Y, Xiong Z H. Experimental and numerical studies for the gas-assisted extrusion forming of polypropylene micro-tube[J]. International Journal of Material Forming, 2020, 13(3): 235-256.

[13] 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.

[14] 李福成.异型医用多腔导管挤出离模膨胀变形机理与调控[D].南昌: 南昌大学, 2020.

Li F C. Mechanism and control on extrusion die swell deformation of profile medical multi-lumen cavity catheter[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[15] 战春鸣.聚合物五腔微管挤出胀大与冷却定型研究[D].大连:大连理工大学,2015.

Zhan C M. Study on extrusion swelling and cooling of polymer five- lumen micro tube[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

Influence Mechanism of Gas-Assisted Extrusion Molding for Multi-Lumen Microtube

Xiaozhen Deng[1], Tianrong Chen[1], Biao Liu[1], Bing Xiao[1], Shiyu Jiang[1], Zhong Ren[2]

(*1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Precision Drive and Equipment, School of Mechanical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Advanced Electronic Materials and Devices, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China*)

ABSTRACT: Taking a five-cavity microtube as example, a 3D extrusion flow model of multilumen catheter was established and numerically solved based on finite element method. By analyzing the melt flow field and stress distribution inside and outside the die, the influence mechanism of multi-lumen microtube extrusion molding was studied under traditional and gas-assisted wall slip conditions. The research results indicate that, in the traditional extrusion process, the die swell ratio of the five-cavity microtubule and the ellipticity of the main and secondary cavities all increase with the increase of melt inlet flow rate and relaxation time, but the ellipticity of the outer contour decreases with the increase of inlet flow rate and relaxation time. In the gas-assisted extrusion process, due to the uniform distribution of radial velocity, shear rate and first normal stress difference of melt inside and outside the die, which tends to zero, the swelling deformation of the inconsistency between the catheter and die cross-section is effectively eliminated. It ensures the roundness of the catheter contour, main and secondary cavities, and it is independent of melt flow rate and relaxation time. It can effectively improve the quality of multilumen microtube extrusion forming and achieve precision molding of multi-lumen microtube.

Keywords: multi-lumen microtube; gas-assisted extrusion; die swell; ellipticity