http://pmse.scu.edu.cn

无定型段包覆挤出成型的非等温数值模拟

何 优，刘焕牢，王宇林，胡伟康
(广东海洋大学 机械工程学院 广东省小家电创新设计及制造工程技术研究中心，广东 湛江 524088)

摘要：实际生产中对医用薄壁管材进行包覆时，包覆层壁薄要求使得芯棒和口模形成的平直段流道的截面间隙面积小，导致材料熔体在定型段处压力过大、模具压力高、材料熔体反流，直接影响到包覆层的成型质量。针对上述问题，文中运用Polyflow分别对设置与不设置定型段的包覆模型进行非等温数值模拟。首先对2种模型的速度场和压力场进行分析，探究了不设置定型段对挤出胀大的影响，然后分析了不设置定型段的包覆模型在不同牵引速度、入口流率和口模温度对包覆层尺寸及包覆流场稳定性的影响，并与设置定型段流道的包覆挤出过程进行对比。结果表明，随着工艺参数变化，2种模型的包覆层尺寸和包覆挤出流场均匀性的相关变化规律基本一致；定型段的设置不能消除包覆挤出中的挤出胀大；相对于有定型段的包覆挤出，无定型段包覆挤出能降低口模压降、减少能量消耗、提高包覆质量。

关键词：包覆挤出；非等温；无定型段；管材拖动速度；入口流率；口模温度
中图分类号：TQ320.66+3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555(2025)08-0084-12

随着世界老龄化趋势的不断加深和日益严重的环境问题，内窥镜的需求量不断增加。内窥镜技术凭借其在诊断和治疗方面的卓越性能，以微创特性、较低感染风险及术后快速恢复的显著优势受到临床医生和患者的广泛认可，内窥镜产品迅速成为医疗器械行业中增长最快的创新产品之一，并逐步改变着现代医学诊疗方式[1]。随着介入治疗领域对内窥镜插入管需求的日益增长，通过包覆工艺成型的包覆层在医用内窥镜插入管中的应用日益广泛，包覆层的质量作为决定其医用性能的关键影响因素之一，愈发受到重视。当前，国产医用内窥镜插入管在包覆层质量方面普遍存在外观平整度不足、表面质感粗糙及包覆厚度分布不均等显著缺陷。这些缺陷在临床应用中可能带来包覆层磨损或破损的风险，进而影响内窥镜插入管的整体使用效能与安全性。因此，在医用内窥镜插入管的生产中提高包覆层的质量成为当前包覆挤出的技术挑战与研究方向[2,3]。

国内外学者对片材、管材、异型材及微管的包覆挤出进行了大量研究。Gouran[4]采用最小二乘法求解非线性微分方程预测了非牛顿流体在压力型模具中的速度和温度。Poungthong等[5]遵循Jones (1964)的方法得到了包覆层的速度和厚度分布，并对该分布进行积分得到流速，从而得到平均厚度。张广冬等[6]运用数值模拟方法，揭示了流动平衡系数与流变参数和薄壁类异型材挤出制品出口截面几何的内在联系。Javed等[7]使用Carreau-Yasuda流体模型对金属丝涂层过程进行了非等温研究，探究了模型参数与金属丝半径、体积流率和拉动金属丝所需牵引力的联系。陈鹏元[8]通过对异型材进行结构分析，提出了4种流道优化设计方式，并对包覆模具进行了合理的优化设计。尹洪娜等[9]运用Polyflow分析了传统包覆挤出和气辅包覆挤出工艺参数对压力场、速度场及剪切应力场的影响。Cho等[10]研究了螺杆转速(入口流率)、牵引速度、注气压力等挤出工艺

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0132
收稿日期：2024-07-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52175458)；广东省普通高校重点领域专项(2022ZDZX3006)；广东省科技厅高新技术专题(2021A05186)
通讯联系人：刘焕牢，主要从事数控装备技术、智能制造等方面的研究，E-mail：hl66@163.com

参数对薄壁管椭圆度和内外径尺寸的影响。

以上分析使用的包覆模型都设有定型段流道，而在实际生产中对医用薄壁编织管材进行包覆时，包覆层壁薄要求使得芯模和口模形成的平直段流道的截面间隙面积小，导致材料熔体在定型段处模具压力过大，材料熔体反流，造成包覆层尺寸波动、包覆生产过程不稳定及包覆层外观差等问题[11~14]。对于假塑性流体，温度会影响熔体的黏度，从而改变其流动速度分布和压力分布，进而影响包覆层的质量，所以包覆挤出过程中口模温度的影响不可忽略[15,16]。

本文针对内径5.4 mm，外径6.2 mm的包覆层模型，运用Polyflow有限元分析技术，在非等温场的条件下，对包覆层进行有限元仿真，对比分析了包覆模具不设置定型段流道与设置定型段流道时，各工艺参数对包覆层尺寸及包覆流场稳定性的影响。

1　有限元模型的建立

1.1　几何模型及网格划分

包覆层的有限元模型包括压缩段、定型段和熔体自由挤出段，Fig.1(a)是未设置定型段的包覆模具模型，Fig.1(b)是设置定型段的包覆模型。由于2种模型都关于包覆模具中心轴对称，为节约计算资源并避免计算困难，取上述模型的1/2用于有限元模拟，如Fig.1所示。模型尺寸如Tab.1所示。为了使计算结果准确，对影响熔体流动的重要影响区域进行适当网格加密，有限元网格划分如Fig.2所示。

Tab. 1　Model size of the coating extrusion

Unit	L1	L2	L3
Length/mm	50	10	45

1.2　有限元模型

1.2.1　工程化假设:(1)熔体流动是充分发展的稳态层流，方程中不含时间自变量;(2)熔体的热传递与热扩散保持恒定，比热容和传热系数不变;(3)熔体为不可压缩的非牛顿稳态层流;(4)TPU熔体具有高黏性，惯性力和重力的影响可忽略不计;(5)流道壁面无滑移。

1.2.2　材料本构方程:经过多次拟合尝试，本文选用非等温广义牛顿流体数学模型为Brid-Carreau-Arrhenius，其黏度($\eta(T)$)表达式为

$$\eta_a=\eta_\infty+(\eta_0-\eta_\infty)[1+(\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \tag{1}$$

$$H(T)=\exp[\alpha(\frac{1}{T-T_0}-\frac{1}{T_a-T_0})] \tag{2}$$

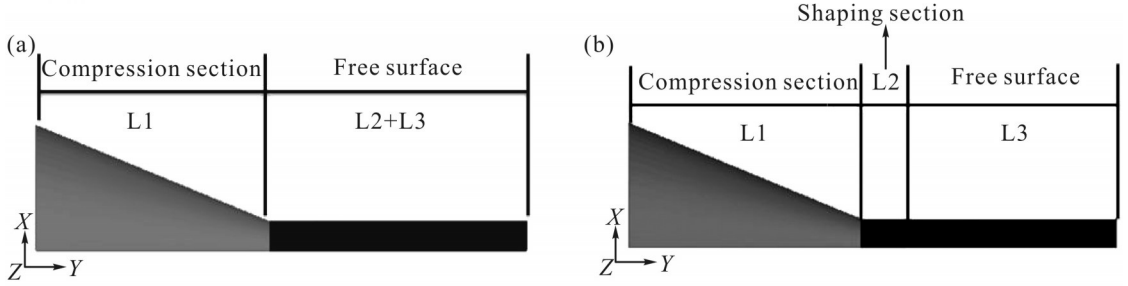


Fig. 1　Physical model of the coating extrusion: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

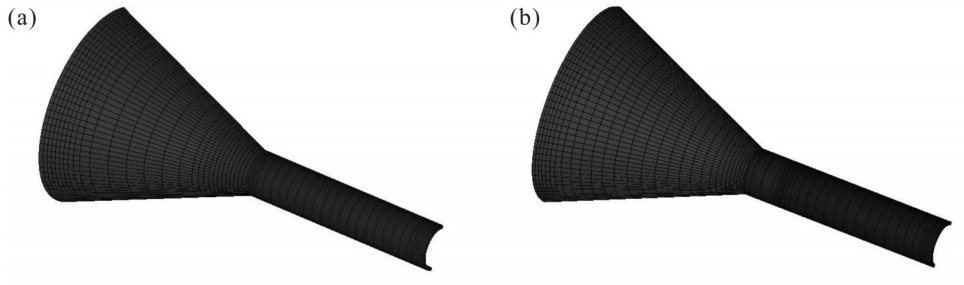


Fig. 2　Meshing of the melt of the numerical analysis: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

$$\eta(T) = \eta_a \cdot H(T) \quad (3)$$

式中：η_a——聚合物熔体表观黏度，Pa·s；$H(T)$——温度函数；η_0——零剪切黏度，Pa·s；η_∞——无穷剪切黏度，Pa·s；λ——熔体松弛时间，s；$\dot{\gamma}$——剪切速率，s^{-1}；n——熔体的非牛顿指数，无量纲；α——温度系数，$℃^{-1}$；T——未知热力学温度，℃；T_0——参考温度，℃；T_a——$H(T)$=1时的参考温度，K。

模拟时采用的数学模型各个参数如Tab.2所示。

Tab. 2 Properties of TPU ESTANE- 58271 for numerical analysis

Parameters	Value
η_0/(Pa·s)	6295
λ/s	0.094
n	0.389
η_∞/(Pa·s)	6.3×10^{-4}
α/$℃^{-1}$	7176
T_a/K	180
T_0/℃	−273.15

1.3 物性参数

本文使用的包覆层材料为热塑性聚氨酯(TPU)，材料部分物性参数如Tab.3所示。

1.4 边界条件

（1）Inflow入口边界，动力学边界条件：假设入口熔体为完全发展流，满足条件$\partial v_y/\partial z = 0$，$v_x = v_z = 0$，其中$v_y$为熔体沿挤出方向的流速，熔体入口流率设置为$Q$=400 mm^3/s，温度边界条件：包覆口模入口温度设置为固定温度T = 453.15 K；（2）Wall1壁面边界，动力学边界：熔体壁面满足$V_n = V_s = 0$，温度边界：包覆口模壁面温度设置为固定温度T = 443.15 K；（3）Free surface自由表面边界，动力学边界：熔体自由表面满足如下动力学条件$f_n = 0$，$f_s = 0$和$v_n = 0$，温度边界：由于自由边界与外界接触而产生热对流交换，故温度边界设置为热流密度（Flux density imposed）条件，只考虑对流换热，忽略热辐射的影响，所使用的数学表达式为$q = -k\nabla T = h(T - T_{air})$，式中：$k$为导热系数，取值为10 $W/(m^2\cdot K)$；h为空气自然对流系数；T为熔体温度；T_{air}为外界空气温度，取值为300.15 K；（4）Wall2熔体与编织管复合界面，动力学边界：编织管牵引速度v_c = 20 mm/s，且仅沿挤出方向牵引，故在此处施加笛卡尔坐标系速度对y轴方向（沿熔体挤出方向）施加牵引速度（Cartesian velocities imposed（$v_x = 0$, $v_y = v_c$, $v_z = 0$））；温度边界：温度设置为固定温度T = 453.15 K；（5）Outflow出口边界，动力学边界：对于聚合物微管挤出通常需要施加一定的牵引力，但在包覆挤出模拟中，熔体受到编织管的牵引，因此设置为$f_n = 0$, $v_n = 0$, $v_s = 0$，温度边界：由于流出口模时的温度未知，故设置为温度出口（Outflow）条件；（6）Axisymmetric boundary对称面边界，动力学边界：对称面满足的动力学条件为$f_s = v_n = 0$，温度边界：因为交界面处的温度是连续的，故满足对称温度条件。

边界设定如Fig.3所示。

Tab. 3 Mechanical Properties of TPU ESTANE-58271

Material	Manufacturer	Hardness/A	Specific gravity/ ($g\cdot cm^{-3}$)	Tensile strength/MPa	Melting point/℃
TPU	Lubrizol	85	1.21	51.7	120

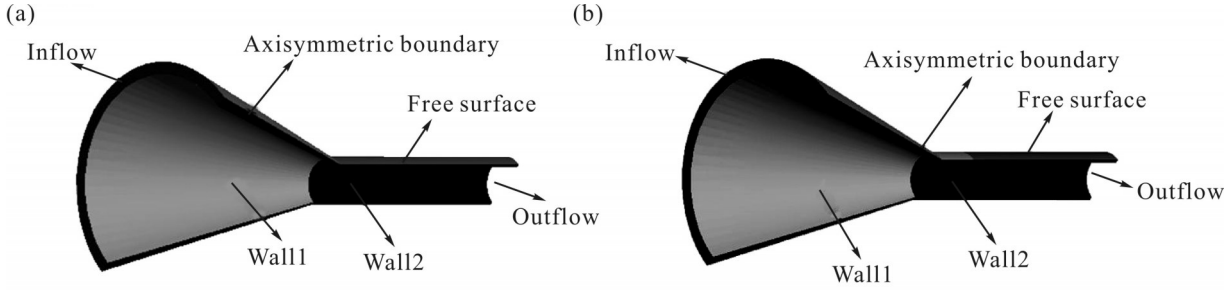


Fig. 3 Boundary conditions of the numerical analysis: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

2　结果与讨论

2.1　速度场和压力场分析

在当前边界条件设定下,2种包覆机头模型沿挤出方向的速度分布云图如Fig.4所示,其中Fig.4(a)为未设置定型段的包覆挤出,Fig.4(b)为设置定型段的包覆挤出。从图中可以看出,熔体的流动速度随着压缩段流道横截面的减小而逐渐增大,且最大流速出现在包覆口模出口处附近。在包覆口模的末端,熔体的流动速率先经历显著突变,当熔体经过口模并流出一段距离后,其流动速度逐渐趋于稳定,最终达到并维持与编织管牵引速度相匹配的恒定流速,沿挤出方向平稳流动。在相同工艺参数条件下,对比分析表明,是否设置定型段,包覆挤出的挤出胀大效应从外形上看近乎一致。这与传统挤出的研究结果不同,定型段的存在可以显著减小或消除挤出胀大现象。传统挤出发生挤出胀大现象一方面是因为高分子离模后分子链取向伸展弹性能释放,回归平衡态;另一方面是因为离模后的流速重新分布(由梯度层流快速转变为阻塞流动)。对于包覆挤出而言,无论是否设置定型段,熔体在离开口模后会受到内部管材的持续牵引作用。这种牵引作用会破坏离模后分子链的取向伸展,并使离模后的熔体由梯度层流快速转变为拖曳流,而不是阻塞流。如Fig.4(a)和Fig.4(b)所示,在口模外部,熔体的速度完全受到管材拖动速度的控制,逐渐达到稳定状态。因此,在压缩段出口处,设置定型段与未设置定型段的包覆挤出所得到的包覆层外径无明显差异。

Fig.5为模拟所得的压力分布图,从图中可以看出,由于TPU熔体黏度较大,导致熔体入口处产生了较大的入口压力,在进入口模压缩段到压缩段出口处,流道横截面积逐渐减小,沿挤出方向的熔体所受压力呈现递减的趋势。对于未设置定型段的包覆挤出,熔体流出包覆口模后压力趋于稳定,对于设置定型段的包覆挤出,熔体流出包覆口模后进入定型段,压力呈现出逐渐递减的趋势,一旦熔体完全流出定型段,其压力水平逐渐趋于稳定。

2.2　包覆层外径变化分析

医用薄壁编织管包覆挤出过程涉及的主要工艺参数有编织管牵引速度、熔体入口流率和口模温度。为系统分析这些工艺参数对有定型段包覆挤出

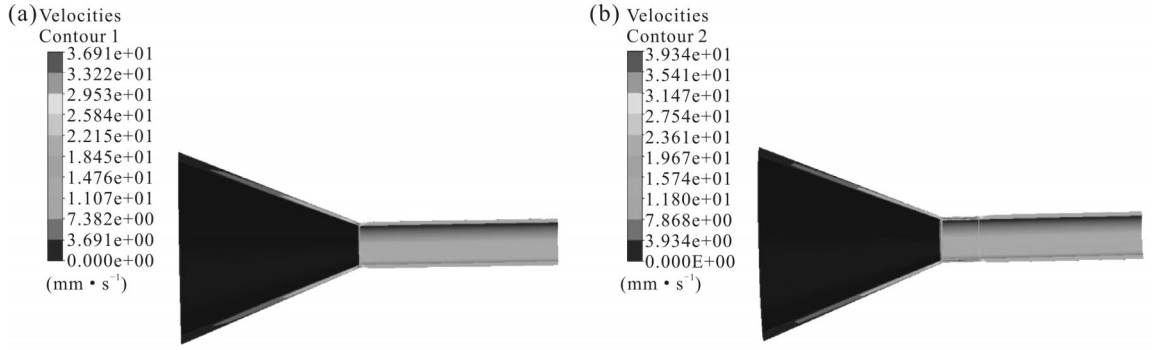


Fig. 4　Distribution of the cloud charts of velocity: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping coating extrusion

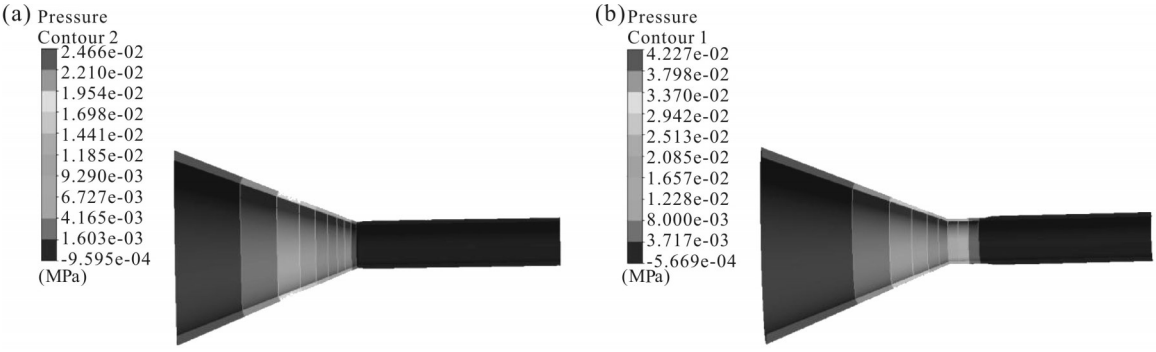


Fig. 5　Distribution of the cloud charts of pressure: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping coating extrusion

和无定型段包覆挤出的影响，在保持其它边界条件不变的情况下，分别研究了熔体入口流率和口模温度一定时，编织管牵引速度对包覆层尺寸及包覆流场稳定性的影响；编织管牵引速度和口模温度一定时，熔体入口流率对包覆层尺寸及包覆流场稳定性的影响；以及编织管牵引速度和熔体入口流率一定时，口模温度对包覆层尺寸及包覆流场稳定性的影响（见Tab.4）。在分析编织管牵引速度对包覆挤出成型过程的影响时，设置牵引速度分别为 v_c = 15 mm/s，v_c = 20 mm/s，v_c = 25 mm/s，v_c = 30 mm/s，v_c = 35 mm/s，v_c = 40 mm/s；分析熔体入口流率对包覆挤出成型过程的影响时，设置熔体入口流率分别为 Q=250 mm^3/s，Q=300 mm^3/s，Q=350 mm^3/s，Q=400 mm^3/s，Q=450 mm^3/s，Q=500 mm^3/s；分析口模温度对包覆挤出成型过程的影响时，设置口模温度分别为 T=443.15 K，T = 453.15 K，T = 463.15 K，T = 473.15 K，分别对无定型段和有定型段2种模型进行有限元分析。

Tab. 4 Coating extrusion processing and process variables

Research objective	Invariant variable	Variables
Drag velocity	Q = 400 mm$^3\cdot$s^{-1}, T= 453.15 K	v_c
Inlet flow rate	v_c = 20 mm$\cdot$s^{-1}, T= 453.15 K	Q
Die temperature	v_c = 20 mm/s, Q = 400 mm$^3\cdot$s^{-1}	T

Fig.6是不同编织管牵引速度下，包覆层外径半径从口模出口处沿挤出方向的变化情况，其中Fig.6(a)和Fig.6(b)分别为有定型段包覆挤出与无定型段包覆挤出。从图中可以发现，随着编织管牵引速度的增加，包覆层的外径单调的减小，编织管外径的缩减速率与牵引速度之间的关系并非呈现简单的线性特征。这源于包覆层熔体直接覆盖在编织管表面，当编织管的牵引速度超过熔体自身的挤出速度时，会产生显著的拖曳效应。这种拖曳力会加速熔体的流动，从而改变熔体在此方向的流动状态，这种变化进一步导致包覆层外径的缩减。反之，编织管牵引

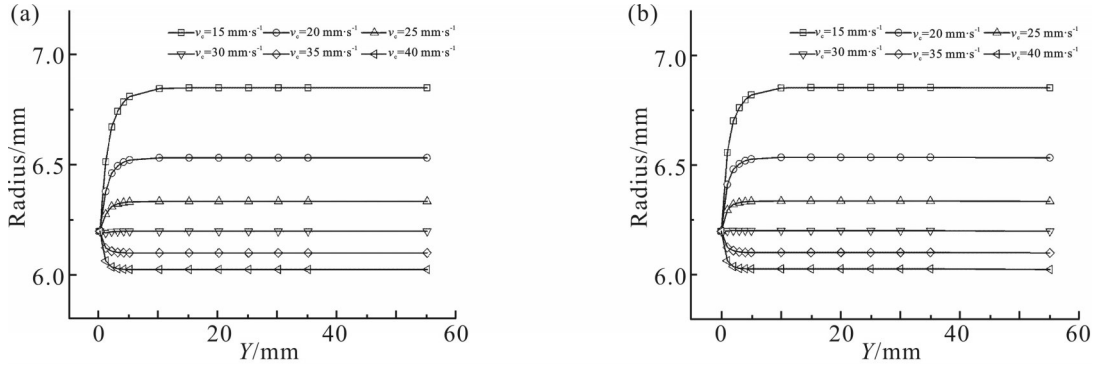


Fig.6 Effects of drag velocity on the coating radius: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping wire coating extrusion

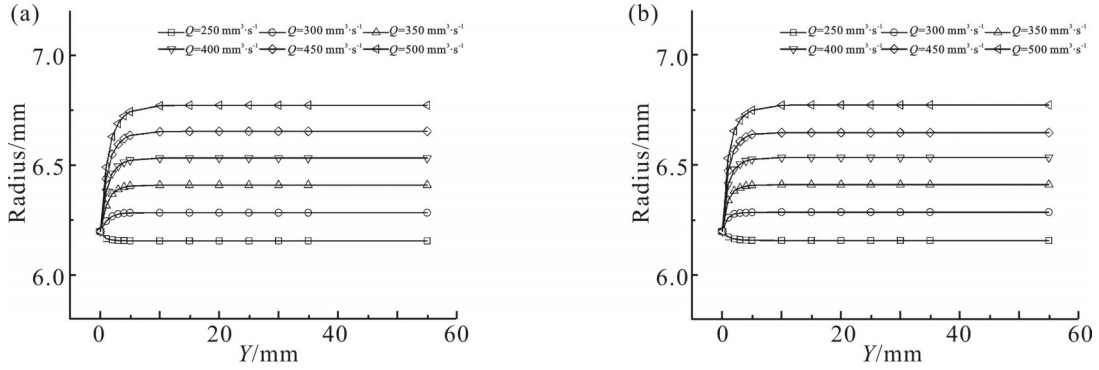


Fig. 7 Effects of inlet flow rate on the coating radius: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

速度小于包覆层熔体流动速度,熔体受到编织管的摩擦阻碍,导致包覆层外径增大。随着熔体沿挤出方向离开口模,包覆层外径的变化速率沿挤出方向至口模出口距离的增大而减小,经历短暂突变后尺寸逐渐保持稳定。如Fig.6(a, b)所示,有定型段包覆挤出模拟和无定形段包覆挤出模拟从口模出口沿挤出方向,包覆层尺寸变化相差不超过1%,基本不变。

Fig.7是不同入口流率下,包覆层外径半径从口模出口处沿挤出方向的尺寸变化;Fig.8是熔体入口流率与挤出胀大率的关系。挤出胀大率(X)表达式为

$$X=\frac{R-R_0}{R_0} \tag{4}$$

式中:R和R_0——分别为包覆层熔体末端半径和口模出口半径。从Fig.7中可以发现,包覆层外径半径在熔体流出口模出口一段距离后基本保持不变,包覆层外径随着熔体入口流率的增加单调递增。这是由于随着熔体入口流率增大,口模压降增大,使得熔体离开口模后胀大程度增强。从Fig.8中可以看出,不管是否设置定型段,随着入口流率的增加,包覆层挤出胀大率逐渐变大,且变大的趋势和数值基本一致。因此,对于包覆挤出而言,设置定型段并不能减弱挤出胀大现象。

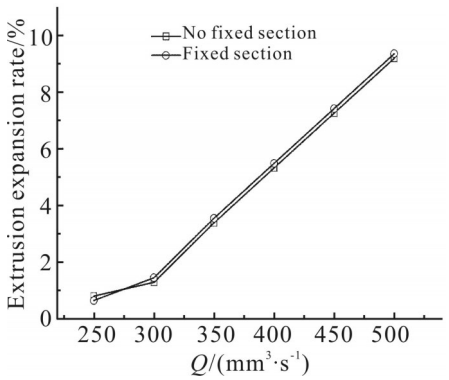


Fig. 8 Effects of inlet flow rate on the extrusion expansion rate

Fig.9是不同口模壁面温度下,包覆层外径半径

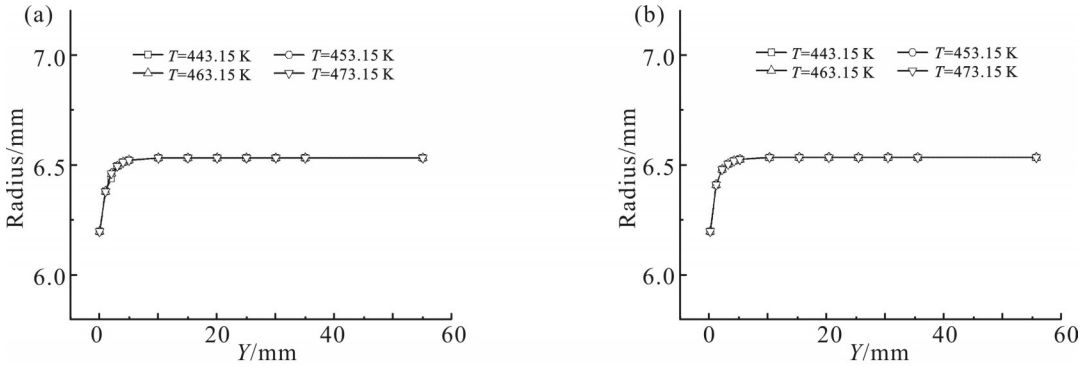


Fig. 9 Effects of die temperature on the coating radius: (a) without shaping section coating extrusion;(b) with shaping section coating extrusion

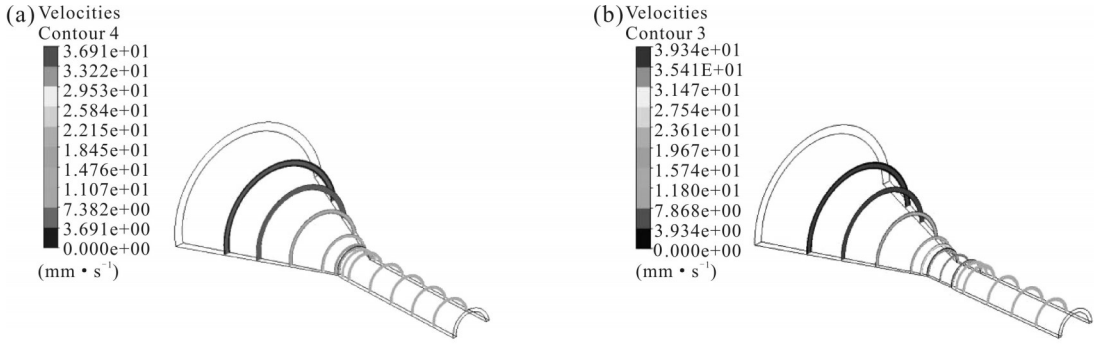


Fig. 10 Distribution of the cloud charts of velocity in different cross-section: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

从口模出口处沿挤出方向的尺寸变化。从图中可以发现，随着温度升高，包覆层外径尺寸几乎保持不变，不同于传统挤出，随着温度的升高，熔体黏度降低，聚合物熔体的流动性增加，使包覆层外径尺寸减小，这是由于包覆挤出时，在口模出口熔体受到管材的拖曳作用。

2.3 包覆流场稳定性分析

为了更加清楚地分析口模出口流场的稳定性以及直观地分析包覆过程中截面各处的速度变化情况，沿熔体挤出方向y方向选取了多个截面的速度分布图进行对比，如Fig.10所示。

从图中不同的截面速度分布可以看出，速度的变化经历了2个过程，口模内（压缩段和定型段）和口模外（自由段）。熔体在包覆口模内的速度并不是充分发展的，靠近口模内壁面和芯棒外壁面处的流速相对较低，而在压缩段环形流道的中央区域，熔体的流速则显著增大，且最大流速出现在包覆口模出口处附近。在口模出口附近的速度分布变化尤为明显，它揭示了熔体离开口模后，其流动速度经历了重新分布和调整的过程。而在挤出口模后的速度云图颜色保持一致，说明熔体离开口模出口后经过短暂的速度突变后保持稳定，截面尺寸也逐渐保持稳定。

为对后续自由段流场进行稳定性分析，本文定义了熔体自由段横截面上速度分布均值和自由段各截面平均速度标准差。

截面速度均值($\overline{V}$)

$$\overline{V}=\frac{\sum_{i=1}^{s}V_i}{s} \tag{5}$$

截面平均速度标准差(σ)：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\overline{V}_i-\overline{\overline{V}})^2}{n}} \tag{6}$$

式中：s——截面速度统计点个数，位置如Fig.11所示；V_i——各统计点的速度；n——截面个数；$\overline{\overline{V}}$——各个截面平均速度的均值。

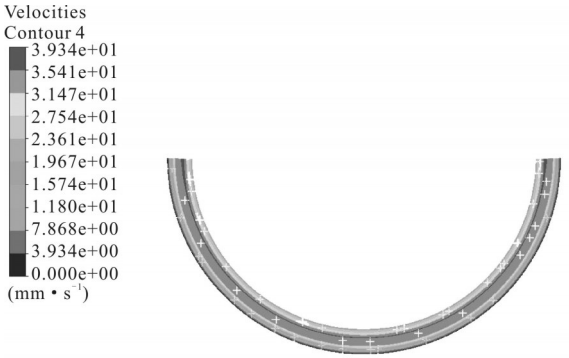


Fig. 11 Position of statistical point of die cross-section

Fig.12是不同牵引速度下截面平均速度从口模出口处沿挤出方向的变化曲线。从图中可以看出，截面平均速度的波动区间与包覆层外径半径波动区间一致，从出口处截面处的平均速度可以看出，改变编织管牵引速度对熔体口模出口的挤出速度提升并不明显。Fig.13是不同牵引速度时截面平均速度标准差，从图中可以看出，有定型段和无定型段截面平

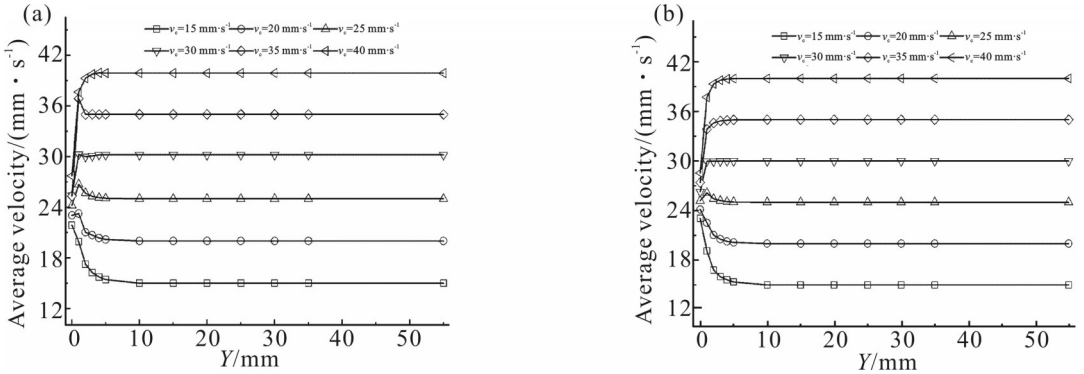


Fig. 12 Variation in average velocity of the polymer melt along the flow direction: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

均速度标准差变化趋势一致,随着编织管牵引速度的增加,截面速度标准差呈现出先减小后增大的趋势,在牵引速度15～20 mm/s和35～40 mm/s的区间内,截面平均速度标准差较大,这是由于编织管牵引速度太小或太大时,熔体受到编织管的拖曳或阻碍作用,导致速度波动较大。在20～30 mm/s的区间内,熔体流速与编织管牵引速度匹配,截面平均速度标准差较小。由此可知,编织管牵引速度太小或太大都会增加熔体流速的波动,从而导致尺寸的波动,造成产品粗细不均,表面质量差,不能满足产品质量要求。

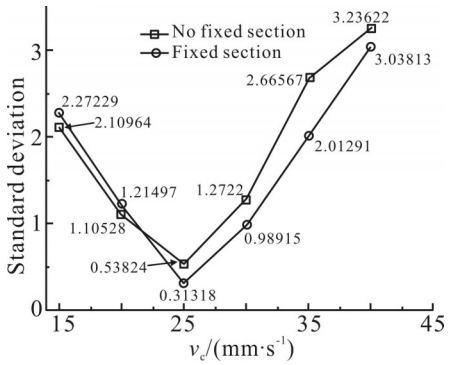


Fig. 13 Standard deviation of different velocity

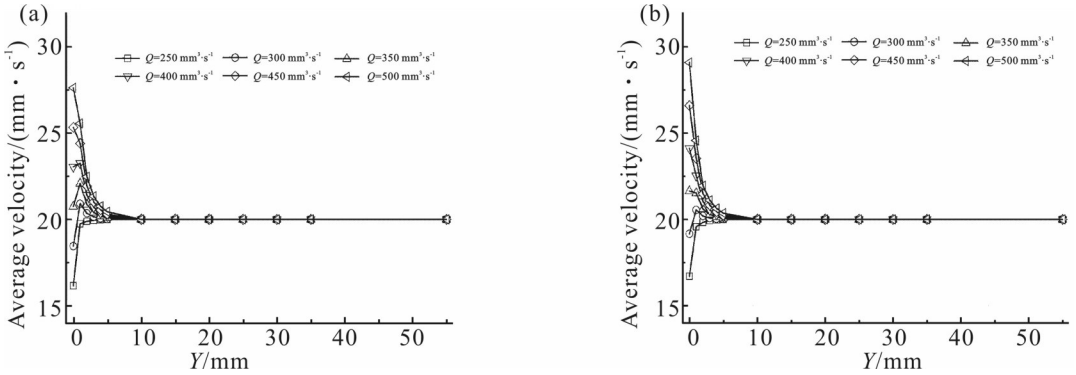


Fig. 14 Variation in average velocity of the polymer melt along the flow direction: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

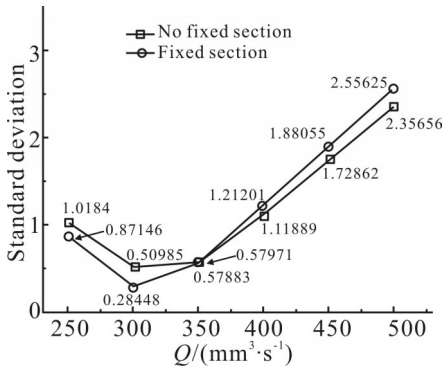


Fig.15 Standard deviation of different inlet flow rate

Fig.14是熔体入口流率对口模出口截面流场稳定性的影响。通过对Fig.14的分析,可以观察到,随着熔体入口流率的提升,口模出口截面的平均流速呈现显著增长。然而,这种增长并非与熔体入口流率的增加呈线性比例关系。这种非线性变化归因于熔体本身流变性质的复杂性,在包覆层的尺寸上表现为外径尺寸的增加,使得包覆层尺寸的变化同熔体入口流率之间的变化并不完全同步。由于编织管的牵引速度不变,截面速度在口模出口后经历短暂的变化后逐渐趋于同一速度值。Fig.15为不同入口流率时截面平均速度标准差,从图中可以看出,随着入口流率的逐渐增加,截面平均速度的标准差展现出一种先下降后上升的趋势。在入口流率为250~300 mm/s和350~500 mm/s的区间内,截面平均速度标准差较大。这是由于包覆层熔体流速与编织管牵引速度不匹配。在入口流率为300~350 mm/s时,截面平均速度标准差最小,表明此时熔体流速与编织管牵引速度匹配,流速波动最小,流场稳定性最好。

Fig.16是不同口模壁面温度下截面平均速度从口模出口处沿挤出方向的变化曲线,从图中可以看出,口模壁面温度的变化并不影响截面平均速度。对比Fig.15(a, b)可以发现,在当前工艺参数设置条件下,无定型段的包覆挤出熔体在口模出口处的平均速度波动比有定型段的包覆挤出波动小,流场稳定性更好。

2.4 压力降分析

Fig.17为不同牵引速度下口模入口压力的变化，从图中可以看出，随着编织管牵引速度的增加，包覆口模入口压力逐渐减小，但减小量有限。因此，想要减小压缩段入口压力，还需要从熔体入口流率和温度方面着手。对比Fig.17(a)和Fig.17(b)可以发现，随着牵引速度的增加，有定型段的口模入口压力下降速率大于无定型段口模入口压力下降速率，无定型段包覆挤出口模压降约小于有定型段包覆挤出的40%，所以无定型段包覆挤出可降低口模压降。

Fig.18为入口流率变化对口模入口压力的影响，从图中可以看出，随着熔体入口流率增大，螺杆的转速相应增加，这导致熔体在加工过程中受到的剪切作用显著增强。这种增强的剪切作用进一步弱化了

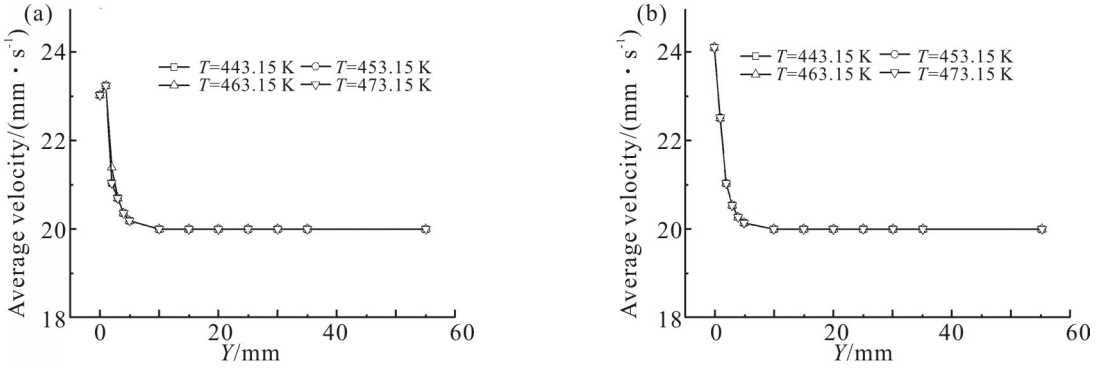


Fig. 16 Variation in average velocity of the polymer melt along the flow direction: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

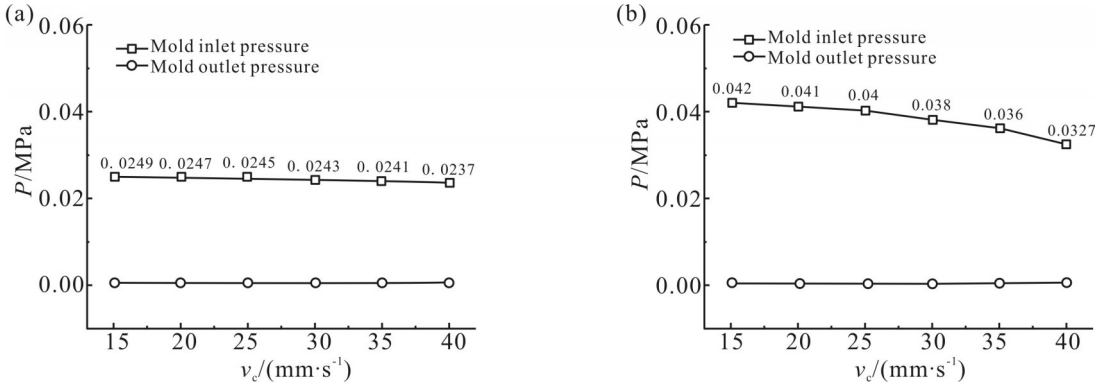


Fig. 17 Variation of the melt pressure with varying drag speeds: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

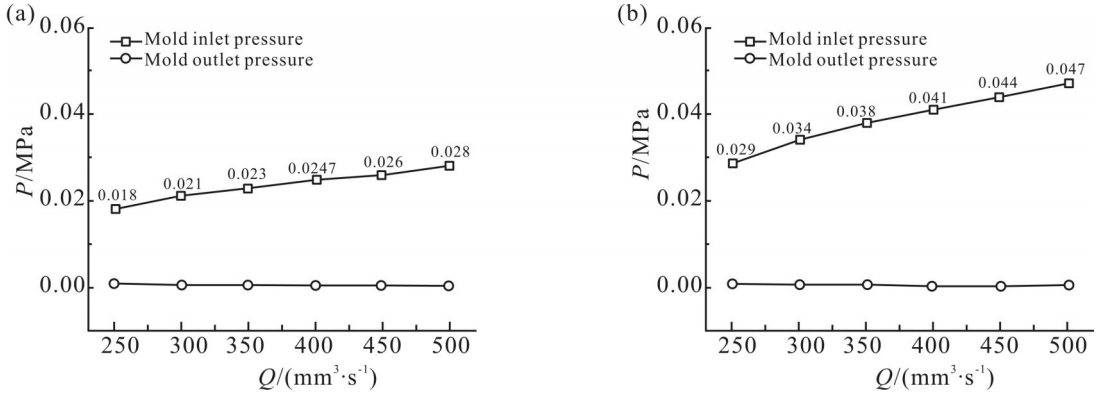


Fig. 18 Variation of the melt pressure with varying inlet flow rate: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

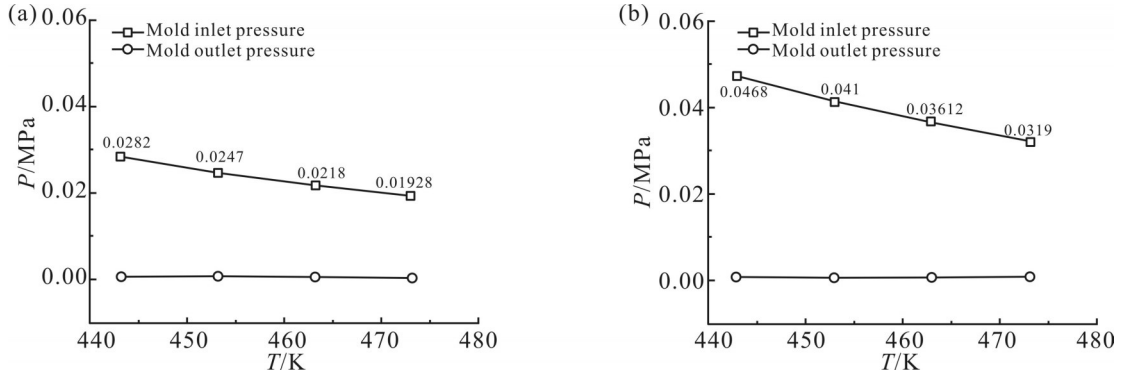


Fig. 19 Variation of the melt pressure with varying die temperature: (a) without shaping section coating extrusion; (b) with shaping section coating extrusion

熔体分子间的相互作用力，进而造成熔体黏度降低。因此，可以观察到压缩段入口压力的增大。在较大的入口压力作用下，熔体流过压缩段所储存的弹性能增加，到达口模出口后变形趋势增强，体现到宏观上为包覆层挤出胀大率的增加。对比Fig.18(a)和Fig.18(b)口模入口压力变化，无定型段包覆挤出口模压降约小于有定型段包覆挤出的35%～40%。

Fig.19为口模壁面温度变化对口模入口压力的影响，从图中可以看出，随着口模温度升高，取向分子链松弛较快，熔体粘度降低，熔体在口模入口压力逐渐降低。不同温度下熔体在口模入口处压力虽然不同，但在口模出口处压力几乎都降为0。对比Fig.19(a)和Fig.19(b)口模入口压力变化，无定型段包覆挤出口模压降约小于有定型段包覆挤出的39%。

3　结论

本文针对医用薄壁管材包覆挤出过程中，芯棒和口模形成的定型段截面间隙面积小导致的材料熔体在定型段压力大、模具压力高、材料熔体反流等问题，建立了一种无定型段包覆挤出模型。采用数值模拟分析了该模型与传统设置定型段的包覆挤出模型在包覆挤出过程中，工艺参数对包覆层外径、流场稳定性和口模压力降的影响，得出了以下结论。

（1）在不设置定型段和设置定型段包覆挤出的过程中，包覆层尺寸和包覆挤出流场均匀性随着工艺参数（编织管牵引速度、熔体入口流率、口模温度）变化的相关变化规律基本相同。不同于对传统包覆挤出的研究，设置有定型段的包覆挤出和未设置定型段的包覆挤出的挤出胀大从外形上几乎相同。对于包覆挤出，定型段的存在不能减小或消除挤出胀大现象。

（2）无定型段包覆挤出比有定型段包覆挤出更具优势。相对于有定型段包覆挤出，无定型段包覆挤出能降低口模压降，减少能量消耗，避免模具压力高、材料熔体反流等问题。

本文有助于提高在微创和介入治疗领域中广泛应用的管材包覆层质量，丰富薄壁类管材包覆挤出制备理论，对无定型段包覆挤出模具的设计具有重要意义。此外，该研究能够为医用薄壁类管材实际包覆生产过程中工艺参数的制定提供理论支持。

参考文献：

[1] 鲍玉冬, 齐东博, 魏雯, 等. 医用内窥镜装置的进展研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(5): 25-33.
Bao Y D, Qi D B, Wei W, *et al*. Research progress of medical endoscope device[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(5): 25-33.

[2] 陶景升. 线缆护层挤出方式及挤出模具的设计[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(4): 16-18.
Tao J S. Cable sheath extrusion methods and extrusion tools design [J]. Optical Fiber &, Electric Cable and Their Applications, 2008 (4): 16-18.

[3] 焦冬梅, 许晓培, 苑诗帅, 等. 非等温包覆机头胶料流场挤出均匀性的研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(4): 292-299.
Jiao D M, Xu X P, Yu S S, *et al*. Study on extrusion uniformity of compound flow field in nonisothermal cladding head[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 292-299.

[4] Gouran S. Numerical investigation on heat transfer characteristics of the viscoelastic fluid flow during wire coating process[J]. Results in Engineering, 2024, 21: 101783.

[5] Poungthong P, Saengow C, Kolitawong C, *et al*. Wire coating and melt elasticity[J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 057133.

[6] 张广冬, 黄翔. 聚合物挤出成型过程狭缝组合流道出口流动平衡系数解析解[J]. 机械工程学报, 2023, 59(11): 1-9.
Zhang G D, Huang X. Analytical solution of flow balance coefficient at the outlet of slit- combined channel in polymer extrusion process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (11): 1-9.

[7] Javed M A, Al K K, Ghaffari A, *et al*. Numerical and analytical study of heat transfer in the wire coating process using Carreau‐Yasuda fluid model[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2025, 86: 2468-2487.

[8] 陈鹏元. 全包覆共挤出成型塑料异型材门窗模具优化设计[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(7) : 94-97.
Chen P Y. Optimization design of totally coated co-extrusion mold for plastic profile door and window[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7): 94-97.

[9] 尹洪娜, 黄兴元, 柳和生, 等. 线缆包覆气辅挤出成型的黏弹性数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(3): 114-122.
Yin H N, Huang X Y, Liu H S, *et al*. Viscoelastic numerical simulation of gas-assisted extrusion process of cable cladding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(3): 114-122.

[10] Cho S, Lee E, Jo S, *et al*. Extrusion characteristics of thin walled tubes for catheters using thermoplastic elastomer[J]. Polymers, 2020, 12: 1628.

[11] 赵丹阳, 王敏杰, 李凯, 等. 聚合物微挤出成型过程流动的均匀性[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(7): 159-162.
Zhao D Y, Wang M J, Li K, *et al*. Flow uniformity of polymer micro extrusion processing[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(7): 159-162.

[12] 任重. 塑料微管气辅挤出成型理论及实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
Ren Z. Theoretical and experimental study on gas- assisted extrusionforming of plastic micro- tubes[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.

[13] Shah R A, Islam S, Siddiqui A M, *et al*. Heat transfer by laminar flow of an elastico- viscous fluid in posttreatment analysis of wire coating with linearly varying temperature along the coated wire[J]. Heat and Mass Transfer, 2012, 48: 903-914.

[14] Zeeshan, Mohamed A, Khan I, *et al*. Wire coating analysis using Phan‐Thien‐Tanner fluid subject to Lorentz force as a polymer coating material in a canonical covering die[J]. Science Progress, 2023, 106: 00368504231172617.

[15] Hao X, Zhang G, Deng T. Improved optimization of a coextrusion die with a complex geometry using the coupling inverse design method[J]. Polymers, 2023, 15, 3310.

[16] Hussain A, Ameer S, Javed F, *et al*. Rheological analysis on non-Newtonian wire coating[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41: 115.

Non-Isothermal Numerical Simulation of Amorphous Segment Coating Extrusion

You He, Huanlao Liu, Yulin Wang, Weikang Hu

(*School of Mechanical Engineering, Guangdong Engineering Technology Research Center of Small Household Appliances Innovation Design and Manufacturing, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*)

ABSRACT: When the medical thin-wall tube was coated in actual production, the coating layer was required to be thin-wall, which made the cross-section gap area of the straight section flow channel formed by the internal plug and the die small, resulting in excessive pressure of the polymer melt at the shaping section, high die pressure and material melt reflux, all of which directly affected the forming quality of the coating layer. To solve the above problems, the non-isothermal numerical simulation of the coating model with and without the shaping section was conducted by Polyflow. Firstly, the velocity field and pressure field of the two models were analyzed to explore the influence of the non-setting section on the die swell. Subsequently, the impact of the coating model without shaping section on the size of the coating layer and the stability of the coating flow field at varying drag speeds of the wire, inlet flow rates and die temperatures were analyzed, and the coating extrusion process was compared with that of the flow channel with the shaping section. The results indicate that, with the variation of process parameters, the correlated variation patterns of the coating layer dimensions and the uniformity of the coating extrusion flow field are fundamentally consistent between the two models. Die swell cannot be eliminated by setting of the shaping section. In comparison to the conventional coating extrusion, the die pressure drop and energy consumption can be decreased and the coating quality can be enhanced by the coating extrusion without shaping section.

Keywords: wire coating extrusion; non-isothermal; without shaping section; drag speed of wire; inlet flow rate; die temperature