http://pmse.scu.edu.cn

3层共挤模具交汇夹角对单层厚度及离模胀大的调控机制

刘 磊[1]，王鑫杨[2]，李经纬[2]，刘 奎[3]，杨天洋[2]，靳国宝[4]，赵丹阳[1]

（1. 西北工业大学 第三六五研究所，陕西 西安 710065；2. 大连理工大学 机械工程学院，辽宁 大连 116024；3. 中国航空制造技术研究院，北京 100024；4. 巢湖学院 机械工程学院，安徽 合肥 238024）

摘要：聚合物共挤模具结构对制品成型质量有着重要影响，尤其是模具交汇夹角对熔体厚度及离模胀大有着明显的影响。文中采用Carreau黏度模型和Picard迭代计算方法，深入研究了外层为聚十二内酰胺(PA12)、中层为乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)和内层为聚丙烯(PP)的3层微管共挤过程的数值模拟。结果表明，外层熔体交汇夹角增大时，PA12厚度增加，EVA和PP厚度减小，内外径均减小，胀大率增大；中层熔体交汇夹角增大时，EVA厚度增大，PA12和PP厚度减小，内外径均减小，胀大率减小；两处熔体交汇夹角同时增大时，PA12和EVA厚度增大，PP厚度减小，内外径均减小，胀大率增大。3层共挤实验证明了模拟结果的正确性与有效性。该研究结果能够为聚合物多层共挤模具的流道结构设计提供了有价值的参考。

关键词：聚合物共挤；交汇夹角；熔体厚度；离模胀大；模具设计

中图分类号：TQ320.66 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2023）12-0071-09

近年来，多层导管因具备更加全面的性能在介入医疗中广泛使用。共挤制备多层导管是一种具备经济性与高效率的方法，该方法可同时保证微管尺寸精度及生产效率[1,2]。共挤过程中，熔体厚度和微管内外径及离模胀大现象严重影响挤出物的形状、尺寸与表面质量。由于内外层的材料及工艺参数不同，因此，共挤过程中的熔体厚度及离模胀大现象的变化也更加难以预测[3]。

不同的模具结构、材料及工艺参数都会影响共挤熔体厚度及胀大[4]。不同模具流道结构对共挤半径及胀大的影响不同[5,6]。例如吕静等[7]通过数值模拟研究发现，实心聚合物共挤流道壁面的粗糙度越大，离模胀大越大。Luo等[8]设计了一种气辅挤出模具可有效减小离模胀大。Liu等[9]对两侧为气体、中间为液体的微管挤出模型进行了数值模拟与实验研究，探究了快速形成微管内外双层稳定气垫膜的方法，成功实现了塑料微管尺寸的精准控制。内外层材料性质也会影响共挤界面及胀大的情况。潘建武等[10]通过数值模拟研究得出了黏度与熔体松弛时间对共挤的离模胀大有影响的结论。在工艺参数方面，Jin等[11]通过实验探究了注气量等工艺参数对2种常见的3层微管尺寸及形状的影响。以上研究多为材料及挤出工艺对聚合物薄膜及棒材的共挤界面半径及胀大的研究，然而对于面向3层微管的3层共挤模具中熔体交汇夹角对界面半径及离模胀大影响的研究尚少。

因此，本文研究了外层为聚十二内酰胺(PA12)、中层为乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、内层为聚丙烯(PP)的3层微管共挤过程，分析了熔体交汇夹角对3层共挤熔体厚度及离模胀大的影响，为聚合物多层共挤模具的流道结构设计提供了重要参考。

1 3层共挤过程数值计算模型

1.1 3层共挤熔体速度分布特征

本文所讨论的3层共挤问题可视作圆环形空间中3种熔体的共轴流动。为简化熔体流动分析，现

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0224
收稿日期：2022-12-28
通讯联系人：赵丹阳，主要从事聚合物微成型理论与模具技术、仿生功能表面制造技术、生物3D打印技术研究，E-mail：zhaody@dlut.edu.cn

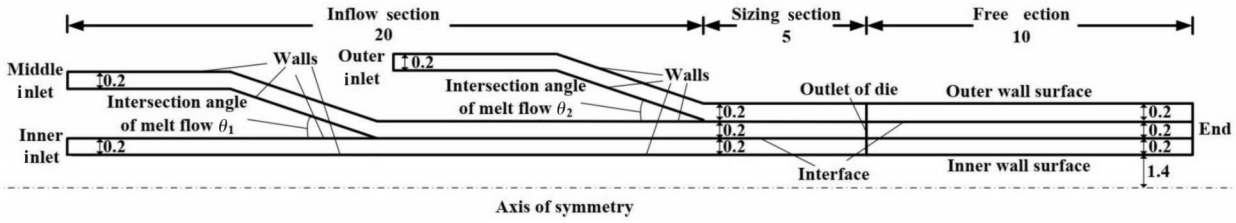


Fig. 1 Geometric model and boundary conditions (unit: mm)

作如下假设：(1)熔体流动为稳态流动；(2)熔体流动为层流，且为等温流动过程；(3)重力和惯性对熔体的作用忽略不计；(4)熔体与口模内壁面无壁面滑移；(5)熔体为幂律流体。

通过将熔体流动沿挤出方向的动量方程的分量与幂律流体流变方程联立，可推导出聚合物熔体在不同层的流动速度，如下：

PA12层的熔体流速分布式

$$v_1(r) = \left[\frac{1}{2K_1}\left(\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}y}\right)\right]^{\frac{1}{n_1}} \int_r^{R_1} \left(\frac{r_0^2 - r^2}{r}\right) \mathrm{d}r \tag{1}$$

EVA层的熔体流速分布式

$$v_2(r) = \left[\frac{1}{2K_2}\left(\frac{\mathrm{d}p_2}{\mathrm{d}y}\right)\right]^{\frac{1}{n_2}} \int_r^{R_2} \left(\frac{r^2 - {r_0}^2}{r}\right) \mathrm{d}r \tag{2}$$

PP层的熔体流速分布式

$$v_3(r) = \left[\frac{1}{2K_3}\left(\frac{\mathrm{d}p_3}{\mathrm{d}y}\right)\right]^{\frac{1}{n_3}} \int_{R_0}^{r} \left(\frac{r^2 - {r_0}^2}{r}\right) \mathrm{d}r \tag{3}$$

式(1~3)中：r——流道某处的半径；K——熔体的稠度；n——熔体的非牛指数；p——压力；y——沿挤出方向的距离；R_0——流道内壁面的半径；R_1——流道外壁面的半径；R_2——PA12与EVA的交界面的半径；R_3——EVA与PP的交界面的半径。

令r=R_2，可得到外层PA12熔体与中层EVA熔体的界面流速分布式

$$v(R_2) = \left[\frac{1}{2K_1}\left(\frac{\mathrm{d}p_1}{\mathrm{d}y}\right)\right]^{\frac{1}{n_1}} \int_{R_2}^{R_1} \left(\frac{r_0^2 - r^2}{r}\right) \mathrm{d}r \tag{4}$$

令r=R_3，可得到外层PA12熔体与中层EVA熔体的界面流速分布式

$$v(R_3) = \left[\frac{1}{2K_3}\left(\frac{\mathrm{d}p_3}{\mathrm{d}y}\right)\right]^{\frac{1}{n_3}} \int_{R_0}^{R_3} \left(\frac{r_0^2 - r^2}{r}\right) \mathrm{d}r \tag{5}$$

由式(1~3)可得，各层熔体挤出速度与熔体挤出方向的压力梯度、界面位置以及熔体的流变特性有关。在实际挤出过程中，熔体挤出速度由挤出机的螺杆转速决定。若增大某层熔体挤出机的螺杆转速，则会使该熔体层在挤出方向的压力梯度增大，并同时增加单位时间进入模具的熔体体积，导致共挤界面发生变化。又由于聚合物熔体挤出过程中存在剪切变稀现象，所以会导致K与n产生变化，也会对熔体层厚产生影响。因此，为了分析共挤过程中复杂的层厚变化及离模胀大，本文选择对外层为PA12、中层为EVA、内层为PP的3层共挤模型进行数值模拟计算，以分析熔体交汇夹角对共挤熔体层厚及离模胀大的影响。

1.2 流域几何模型建立、边界条件设置及网格划分

本文模拟计算的几何模型在共挤模具的基础上进行简化，Fig.1为3层共挤模具流道的简化二维模型。为了简化计算，取实际流道截面的1/2进行有限元计算。模型内层为直线流道，中层熔体交汇夹角为θ_1，外层熔体交汇夹角为θ_2，各层入口处厚度为0.2 mm，模具出口处的内径为2.8 mm，外径为4 mm，外层与中层熔体界面半径为1.8 mm，中层与内层熔体界面半径为1.6 mm。在模具出口沿挤出方向延长10 mm作为挤出物的自由段，以分析共挤胀大。

边界条件设置如下：

(1)熔体层界面Interface：设定内外层熔体交界面为运动界面并忽略界面表面张力和流体滑移的影响，该界面在运动学上满足：f_{n1}=f_{n2}，f_{s1}=f_{s2}，v_{s1}=v_{s2}，v_n=0。(式中f_{nk}，f_{sk}，v_{sk}，v_n分别为2层熔体在界面处所受的法向应力、切向应力，以及该位置处的切向速度及法向速度)

(2)熔体内、中及外层入口Outer/Middle/Inner inlet：熔体内外层入口流速为1 mm/s

(3)流道壁面Walls：设定熔体壁面滑移行为为0，即壁面处熔体流速为0

(4)自由段外壁面Outer wall surface：f_n=0，f_s=0，v_n=0

(5)自由段内壁面Inner wall surface：f_n=0，f_s=0，

v_n=0

（6）自由段末端 End：v_s=0, v_n=0

采用 Quadrilateral Dominant 的平面网格划分方法进行网格划分，单元尺寸为 0.02 mm，网格划分结果见 Fig.2。

1.3　聚合物材料及熔体黏度模型

聚合物材料的微挤出分析过程中，需要采用连续性方程、动量方程及本构方程作为有限元分析的基本方程。本文所研究的 3 层共挤外层材料为 PA12、中层材料为 EVA、内层材料为 PP。基于微挤出的低挤出流速及流体流动压力大等熔体流动特点[12]，本文分析过程采用三参量的 Carreau 黏度模型[13]。已修改该本构方程描述剪切黏度(η)和剪切速率($\dot{\gamma}$)的关系为

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{1-n}{2}}} \tag{6}$$

式中：η_0——零剪切黏度；λ——材料的松弛时间；$\dot{\gamma}$——剪切速率；n——非牛顿指数。

Tab. 1　Parameters of material

Material	η_0/(Pa·s)	λ/s	n
PA12	1656	0.0079	0.3646
EVA	4378	0.7953	0.4839
PP	614.6	0.0102	0.2607

经聚合物毛细管流变实验得到 PA12，EVA 与

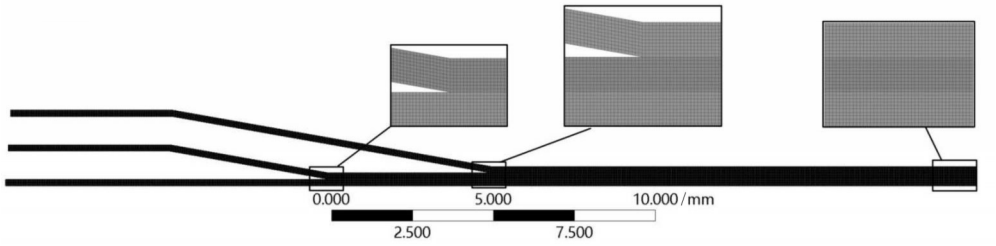


Fig. 2　Grid division results

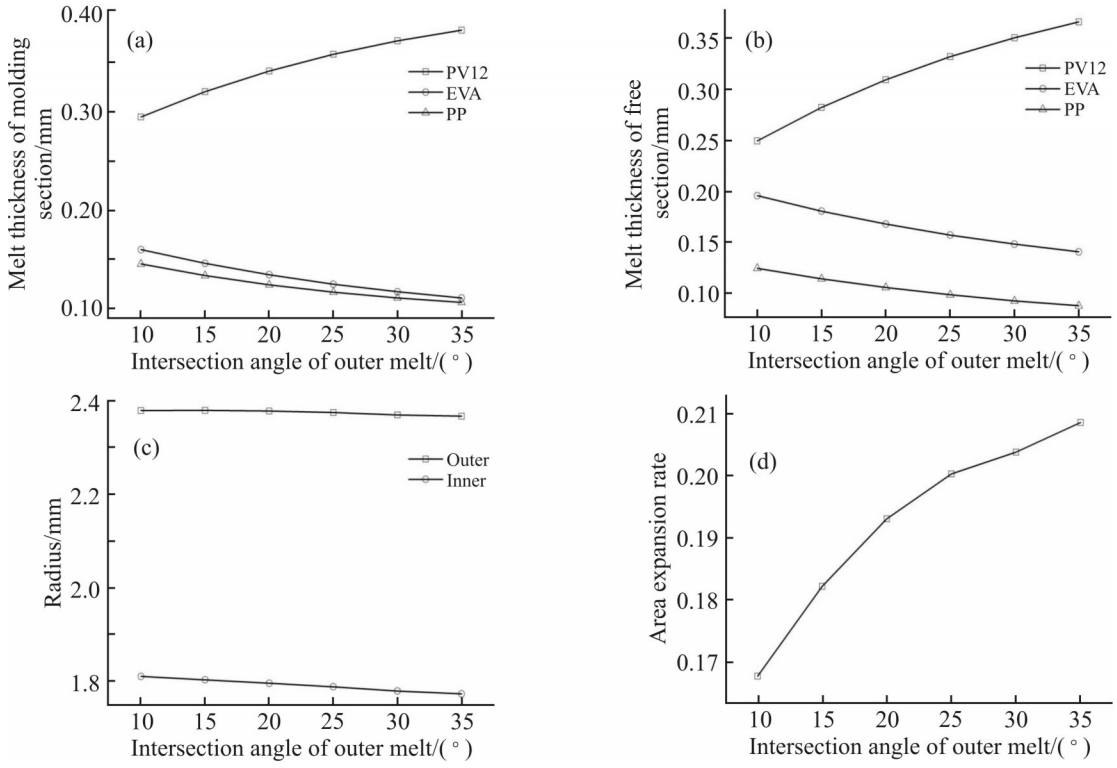


Fig. 3　Influence of the intersection angle of outer melt on the size and swelling of the co-extruded melt

(a): thickness of melt layer at the end of setting section; (b): thickness of melt layer at the end of free section; (c): inner and outer diameter of the melt at the end of the free section; (d): melt expansion rate at the end of the free section

PP的剪切速率与剪切应力的关系，使用Matlab软件数据拟合后，得到PA12，EVA和PP的Carreau黏度模型参数，如Tab.1所示。

1.4 数值模拟设置

为探究不同流道结构及工艺参数对层厚及胀大的影响，本文使用Polyflow软件，并假定熔体流动为广义牛顿等温流动。在数值计算过程中，设定求解问题为渐进问题，定义模型为二维平面轴对称模型。鉴于本文所使用的PA12，EVA与PP材料的非牛指数较小，为增强求解的稳定性，本文采用线性插值和Picard迭代计算熔体压力及黏度，同时开启迎风项。对于网格进行网格重置，以便分析追踪界面的变形情况，本文以界面半径及熔体层厚的变化来体现界面的变形情况。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 外层熔体交汇夹角对层厚及胀大的影响

本节主要讨论外层熔体交汇夹角对层厚及胀大的影响，通过自由段末端熔体的尺寸体现离模胀大的大小。设定中层熔体交汇夹角为10°，3层入口熔体流速都为1 mm/s，牵引速度与内壁压力为0，且壁面无滑移。

由Fig.3(a)可知，当外层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，定型段末端外层PA12的厚度由0.295 mm增大至0.383 mm，中间层EVA的厚度由0.160 mm减小至0.111 mm，内层PP的厚度由0.145 mm减小至0.107 mm。由Fig.4速度云图可知，3层共挤过程中流速的峰值出现在外层熔体即将进入定型段处，且随着熔体交汇夹角的增大，流速的峰值也逐渐增大，同时流速在径向方向的分量也增大，使得在相同时间内，外层熔体进入定型段的体积增加，增大了对中层与内层熔体的挤压，使得中层与内层熔体的厚度减小，界面半径减小。

由Fig.3(b)可知，当外层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，自由段末端外层PA12的厚度由0.250 mm增大至0.367 mm，中间层EVA的厚度由0.196 mm减小至0.140 mm，内层PP的厚度由0.124 mm减小至0.087 mm。由Fig.3(c)可知，熔体外径由2.379 mm减小至2.367 mm，内径由1.810 mm减小至1.773mm，内外径同时减小，但内径减小的程度比外径大。通过Fig.3(d)可知，胀大率由16.90%增大至20.59%。由Fig.4可知，随着外层熔体交汇夹角的增加，外层熔体以更快的流速进入定型段，因此，外层熔体垂直于挤出方向的流速分量增大，使得外层熔体对中层及内层熔体的挤压增大，从而增加了内层熔体与定型段内壁面的摩擦力。同时，由于外层熔体交汇夹角增大，聚合物熔体在径向的挤出速度梯度增大，流道壁面对熔体的剪切速率增大，使得离模胀大增大[14]。随着外层熔体交汇夹角的增大，外层熔体层厚增大，因此PA12熔体与EVA熔体的界面半径减小，EVA层平均半径减小。由于EVA熔体的黏度大于PA12和PP熔体的黏度，因此由于熔体的“粘性包围”现象，即PA12和PP熔体向EVA偏转，导致微管内外径同时减小。此外，内层所受内壁面的摩擦力增加，因此内径减小的趋势要大于外径，从而导致微管的胀大率增加。

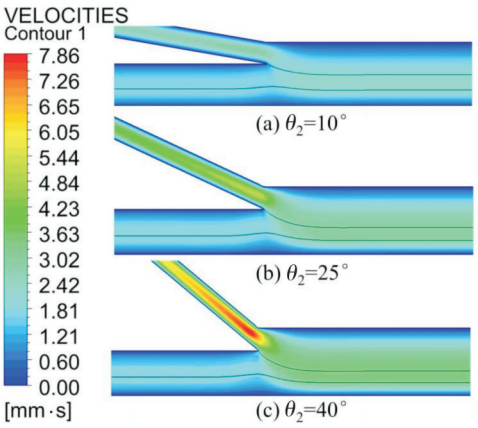


Fig. 4 Velocity nephogram

2.2 中层熔体交汇夹角对层厚及胀大的影响

本节主要讨论中层熔体交汇夹角对层厚及胀大的影响，通过自由段末端熔体的尺寸体现离模胀大的大小。设定外层熔体交汇夹角为35°，内、中和外层入口流速都为1 mm/s，牵引速度与内壁压力为0，且壁面无滑移。

由Fig.5(a)可知，当中层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，定型段末端外层PA12的厚度由0.383 mm减小至0.339 mm，中间层EVA的厚度由0.111 mm增大至0.167 mm，内层PP的厚度由0.107 mm减小至0.094 mm。随着中层熔体交汇夹角的增大，中层熔体与内层熔体交汇处的流速峰值也逐渐增大，同时流速在径向的分量也增大，使得在相同时间内，与PP交汇的EVA的体积增加，增大了对PP的挤压，进而导致PP层的厚度减小，EVA与PP的界面半径减小。与外层熔体夹角增大的情况相同，随着中层熔体交汇夹角的增大，中层熔体的流速增大，使得EVA与PP的共挤熔体的流速也增大，而PA12的流速不变，所以在相同时间内进入定型段的EVA与

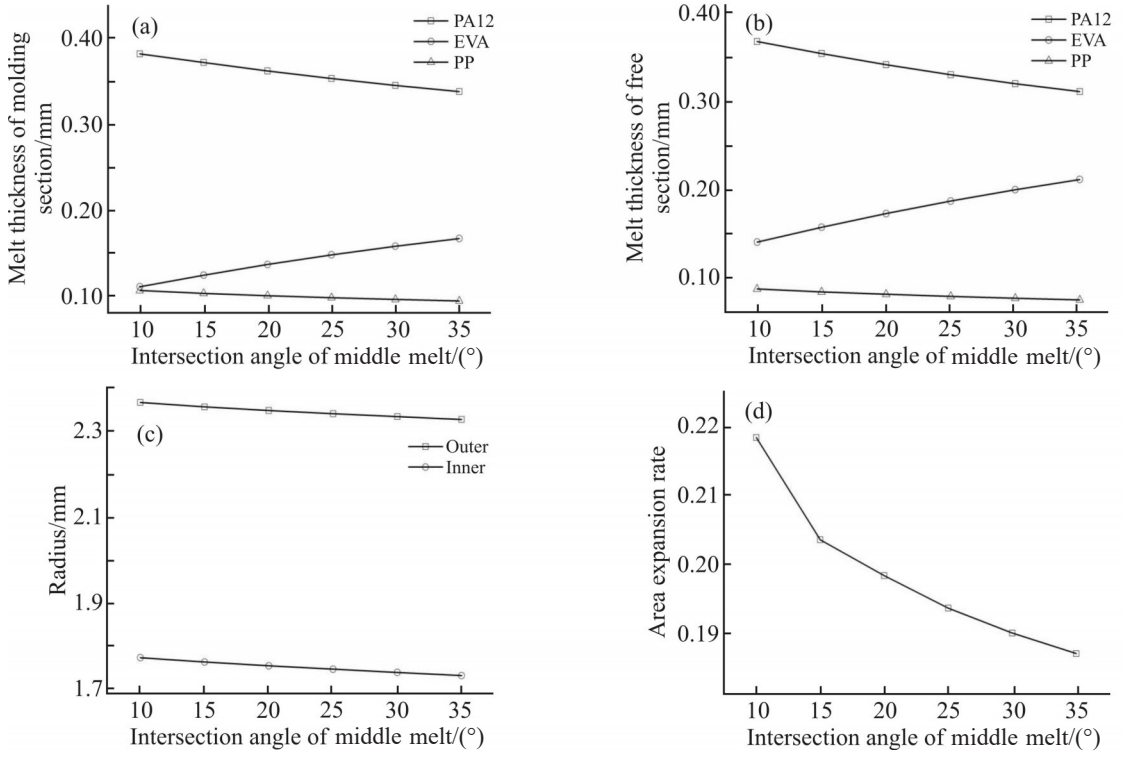


Fig. 5 Influence of the intersection angle of middle melt on the size and swelling of co-extruded melt

(a): thickness of melt layer at the end of setting section; (b): thickness of melt layer at the end of free section; (c): inner and outer diameter of the melt at the end of the free section; (d): melt expansion rate at the end of the free section

PP的共挤熔体的体积增加，使得PA12层的厚度减小，PA12与EVA的界面半径增大。

由Fig.5(b)可知，当中层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，自由段末端外层PA12的厚度由0.367 mm减小至0.310 mm，中间层EVA的厚度由0.140 mm增加到0.211 mm，内层PP的厚度由0.087 mm减小至0.075 mm。由Fig.5(c)可知，熔体外径由2.367 mm减小至2.327 mm，内径由1.773 mm减小至1.731 mm，内外径同时减小。通过Fig.5(d)可知，胀大率由20.59%减小至18.57%。由于外层夹角为35°，外层PA12的熔体流速大于中层与内层的熔体流速。当中层熔体交汇夹角增大时，在与内层PP熔体交汇处的中层EVA熔体的流速也会增大，也使得在第1段定型段定型后，中层EVA熔体与内层PP熔体共挤熔体的流速增加。因此，在外层PA12熔体与EVA熔体及PA12熔体在熔体交汇处的流速差减小，使得PA12与EVA二者界面的摩擦力与剪切速率减小，从而导致离模胀大减小[15]。除此之外，EVA熔体的黏度大于PA12与PP的黏度，因为聚合物熔体的“粘性包围”现象[10]，外层PA12与内层PP向中层EVA一侧偏转，进而导致外径与内径同时减小，共挤胀大减小。

2.3　2段熔体交汇夹角同时变化对层厚及胀大的影响

本节探究外层与中层熔体交汇夹角保持相等条件下，交汇夹角对层厚及胀大的影响，通过自由段末端熔体的尺寸体现离模胀大的大小。设定内、中和外层入口流速都为1 mm/s，牵引速度与内壁压力为0，且壁面无滑移。

由Fig.6(a)可知，当熔体交汇夹角由10°增大至35°时，定型段末端外层PA12的厚度由0.295 mm增大至0.339 mm，中间层EVA的厚度由0.160 mm增大至0.167 mm，内层PP的厚度由0.145 mm减小至0.094 mm。经上述2节所述，熔体交汇夹角的增加导致该层熔体的厚度增加，其他层的厚度减小。因此当两处交汇夹角同时增大时，EVA与PA12层的厚度同时增大，但由于共挤模具结构的设计，中层的EVA与内层的PP先交汇，经定型段后熔体达到稳定再与外层的PA12交汇，所以EVA层厚度的增大程度小于PA12层，PP由于受2次熔体的挤压，所以厚

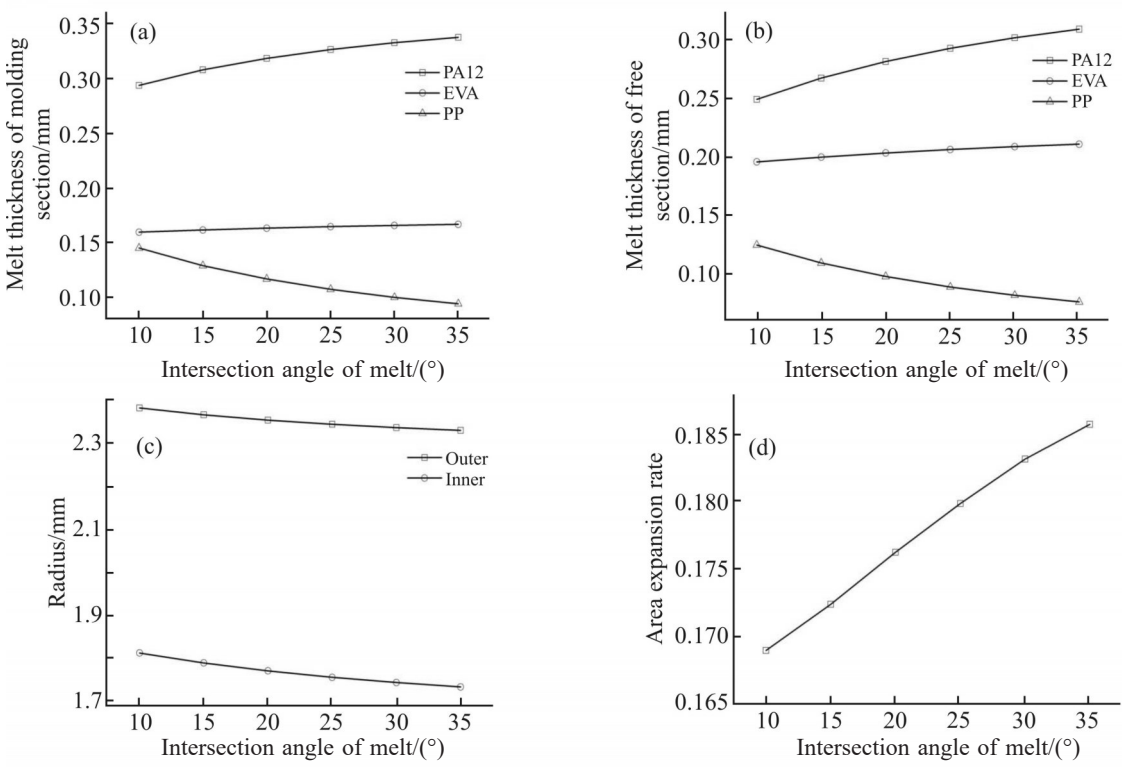


Fig. 6 Influence of the intersection angle on the size and swelling of co-extruded melt

(a): thickness of melt layer at the end of setting section; (b): thickness of melt layer at the end of free section; (c): inner and outer diameter of the melt at the end of the free section; (d): melt expansion rate at the end of the free section

度减小程度较仅有1段交汇夹角变化时的程度更为显著。

由Fig.6(b)可知，当熔体交汇夹角由10°增大至35°时，自由段末端外层PA12的厚度由0.250 mm增加到0.310 mm，中间层EVA的厚度由0.196 mm增加到0.211 mm，内层PP的厚度由0.124 mm减小至0.075 mm。由Fig.6(c)可知，熔体外径由2.379 mm减小至2.327 mm，内径由1.810 mm减小至1.731 mm，内外径同时减小。通过Fig.6(d)可知，面积胀大率由16.90%增大至18.57%。由于两处熔体交汇夹角同时增加，前文所述现象同时出现。因为定型段处的PA12层厚度增加的程度大于EVA层的厚度，所以，PA12层厚度增加所引起的胀大增大程度大于EVA层厚度增加所引起的胀大减小的程度，因此熔体离模胀大整体增大，且胀大率小于只改变1段熔体交汇夹角时的胀大率。

3 聚合物3层共挤过程的实验验证

3.1 3层共挤模具

本文通过数值模拟方法对3层微管熔体在挤出过程中的层厚及胀大的变化规律进行了分析。通过模拟结果可知，在两处熔体交汇夹角相等的情况下，熔体层厚度接近设计值，且胀大率较小。在实际的3层挤出模具设计时，除要考虑胀大和层厚的情况，还需要考虑模具制造和3台挤出机位置干涉等问题，因此挤出模具的熔体交汇夹角不适宜过小。综上所述，本文设计并制造出2段熔体交汇夹角均为17°的3层共挤模具，用于3层共挤出成型实验，验证是否可以获得理想的3层微管。

3.2 实验材料及设备

实验材料为PA12(L25, EMS Grilamid, Switzerland), EVA(QW2023, Sumitomo Chemical Co., Ltd, Japan)和PP(MR- 12- 01- 25, Hyosung Group, Korea)，聚合物黏度参数如Tab.2所示。

本实验采用的设备为3台单螺杆挤出机(HRJSJ-Φ25，直径25 mm，长径比为28:1，编号分别为#1，#2和#3)、3层共挤模具、气体流量控制装置、真空冷却水箱及牵引机。

Tab. 3 Measurement results of microtube size

	Maximum value /mm	Minimum value /mm	Average value /mm	Simulation results /mm	Error/%
Outer radius	2.594	2.4	2.506	2.357	6.23
PA12 layer thickness	0.284	0.255	0.272	0.274	0.73
EVA layer thickness	0.176	0.148	0.166	0.201	17.41
PP layer thickness	0.134	0.113	0.118	0.101	16.83
Innerradius	1.532	1.348	1.425	1.77	19.49

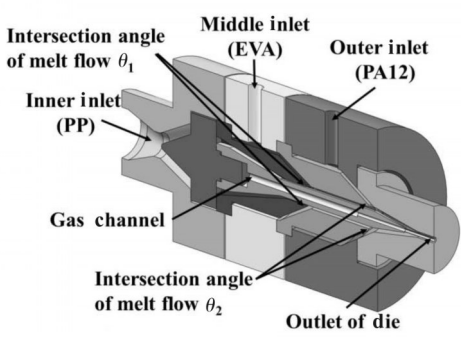


Fig. 7 Diagram of three-layer co-extrusion die

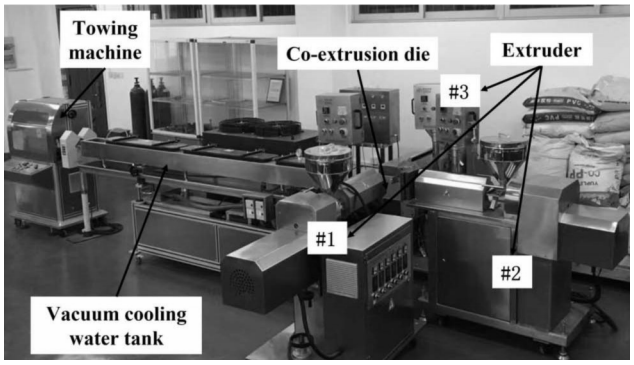


Fig. 8 Three-layer coextrusion experimental equipment

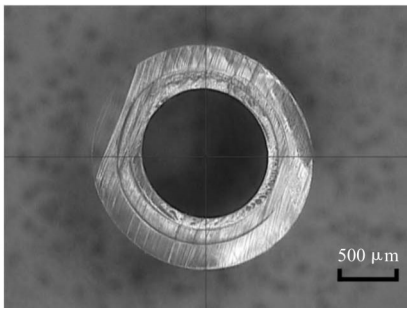


Fig. 9 Cross section of three-layer micropipe

根据聚合物熔体挤出特性及挤出机的塑化性能，从加料区到挤出机出料口设置3个加热区（I，II和III区）。除此之外，在模具与挤出机的连接法兰处设置1个加热区（IV区），并在模具口模处设置加热区（V区），各加热区挤出温度如Tab.2所示。

Tab. 2 Extrusion temperature (unit: ℃)

Temperature	I	II	III	IV	V
PA12	220	235	235	230	225
EVA	195	215	220	220	210
PP	190	210	225	220	220

3.3 实验结果与分析

3层共挤出实验过程中，外层熔体挤出螺杆转速为30 r/min、中层与内层熔体挤出螺杆转速为10 r/min，牵引速度为5 mm/s，注气量为15 mL/min。对获得的实验样品进行切割，并采用万能工具显微镜拍照获得3层微管界面照片，如Fig.9所示。

按顺时针方向，每60°测量各层层厚及微管内外径，并计算偏差。由Tab.3数据可得，微管均匀性较好，满足实际使用需求。此实验结果证明该模具可成功制备3层微管。与相同条件的模拟结果进行对比，二者尺寸基本保持一致，说明成型实验结果与模拟结果具有比较好的一致性，二者之间存在的差异是由模型的简化、工艺参数、壁面滑移及重力环境情况等因素造成的。

4 结论

在聚合物流变学的基础上，本文构建了外层为PA12、中层为EVA、内层为PP的3层医疗微管共挤二维有限元简化模型。在此基础上，研究了熔体交汇夹角对3层共挤微管各层熔体层厚及离模胀大的影响，并通过共挤实验对模拟结果进行了验证，主要结论如下。

（1）外层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，外层熔体层厚增加，中层与内层层厚减小，微管内外径减小，胀大率由16.90%增大至20.59%。中层熔体交汇夹角由10°增大至35°时，中层熔体层厚增加，外层与内层层厚减小，微管内外径减小，胀大率由

20.59%减小至18.57%。

（2）两处熔体交汇夹角同时由10°增大至35°时，外中层层厚增加，且外层层厚变化比中层熔体更明显，微管内外径减小，胀大率由16.90%增大至18.57%。

（3）共挤实验成功制备出了3层微管，实验结果与模拟结果具有比较好的一致性。

（4）在共挤模具设计时，在保证各层厚度在设计范围及挤出压力在理论范围内的前提下，合理选择熔体交汇夹角，可减小离模胀大。

本文为3层共挤模具中熔体交汇夹角的设计起到了理论指导作用，对提高聚合物共挤模具设计水平具有重要意义。

参考文献：

[1] Liu H S, Deng X Z, Huang Y B, *et al*. Three- dimensional viscoelastic simulation of the effect of wall slip on encapsulation in the coextrusion process[J]. Journal of Polymer Engineering, 2013, 33: 625-632.

[2] Ren Z, Huang X Y. 3D Numerical simulation of the hollow square-typed polymer based on gas- assisted extrusion method[J]. Materials Science Forum, 2016, 861: 189-194

[3] Harma S, Goswami M, Deb A, *et al*. Structural deformation/ instability of the co- extrudate rubber profiles due to die swell: experimental and CFD studies with 3D models [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 424:130504.

[4] 靳国宝,王敏杰,赵丹阳,等.聚合物双腔微管直角挤出模具非对称流动平衡设计方法[J].化工学报,2012,63(11):3478-3485.
Jin G B, Wang M J, Zhao D Y, *et al*. A design method of non-symmetry flowing balance for right angle extrusion die of polymeric double- lumen micro- tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering China,2012,63(11):3478-3485.

[5] Wang L, Chen H, Liu T, *et al*. Study on the composite spinning co-extrusion process of the tri- component [J]. Advanced Materials Research, 2013, 661: 81-86.

[6] Yang C, Li Z. An integrated numerical study of coextrusion flow inside and outside the die [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133:43522.

[7] 吕静,陈晋南,胡冬冬.壁面滑移对两种聚合物熔体共挤影响的数值研究[J].化工学报,2004,55(3):455-459.
Lü J, Chen J N, Hu D D. Numerical study of effects of wall slip on bi- component co- extrusion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering China,2004,55(3):455-459.

[8] Luo C, Huang X, Liu T, *et al*. Research on inner gas inflation improvements in double- layer gas- assisted extrusion of micro-tubes [J]. Polymers, 2020, 12:899.

[9] Liu T K, Huang X Y, Luo C, *et al*. The formation mechanism of the double gas layer in gas assisted extrusion and its influence on plastic micro-tube formation[J]. Polymers, 2020, 12: 355.

[10] 潘建武,罗璇,敬波,等.双层微管挤出胀大的数值分析[J].塑料工业,2021,49(5):65-68.
Pan J W, Luo X, Jing B, *et al*. Numerical analysis of extrusion swell of double-layer microtubule[J]. Plastic Industry,2021,49(5): 65-68.

[11] Jin G, Hua W, Wang K, *et al*. Theoretical and experimental study onthree - layered polymeric balloon catheter processing [J]. Polymer Engineering & Science, 2020, 60: 3244-3257.

[12] 靳国宝.面向介入医疗导管的聚合物微挤出模具设计制造技术与工艺研究[D].大连:大连理工大学,2013.
Jin G B. Research on design and manufacturing technology and extrusion process of polymer micro- extrusion dies for interventional medical catheters[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2013.

[13] 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.

[14] 宋卫生.熔体层厚对聚合物共挤胀大的影响[J].合成树脂及塑料,2016,33(2):78-82.
Song W S. Influence analysis of melt thickness on die swell in polymer co- extrusion molding[J]. Synthetic Resin and Plastics, 2016,33(2):78-82.

[15] 孔劲松,孙文彬,周婧,等.微流挤出成形工艺挤出胀大机理研究[J].机械设计与制造,2022,375(5):132-137.
Sun J S, Sun W B, Zhou J, *et al*. Study on extrusion swelling mechanism of micro- flow extrusion forming process[J]. Mechanical Design and Manufacturing,2022,375(5):132-137.

Regulation Mechanism of Intersection Angle of Three-Layer Co-Extrusion Die on Single Layer Thickness and Die Swell

Lei Liu[1], Xinyang Wang[2], Jingwei Li[2], Kui Liu[3], Tianyang Yang[2], Guobao Jin[4], Danyang Zhao[1]

(*1.365th Research Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China*;*2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*;*3. Avic Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China; 4. School of Mechanical Engineering, Chaohu College, Hefei 238024, China*)

ABSTRACT: The structure of polymer co-extrusion die has an important influence on the forming quality of products, especially the intersection angle of die has a significant influence on the melt thickness and die swell. In this paper, the Carreau viscosity model and Picard iterative calculation method were used to study the numerical simulation of the co-extrusion process of three-layer microtubes with the outer layer of polydodecylamide (PA12), middle layer of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) and inner layer of polypropylene (PP). The results show that when the intersection angle of the outer melt increases, the thickness of PA12 increases, the thickness of EVA and PP decreases, the inner and outer diameters decrease, and the swelling ratio increases. When the intersection angle of the middle melt increases, the thickness of EVA increases, the thickness of PA12 and PP decreases, the inner and outer diameters decrease, and the swelling rate decreases. When the intersection angle of the two melts increases at the same time, the thickness of PA12 and EVA increases, the thickness of PP decreases, the inner and outer diameters decrease, and the swelling rate increases. The three-layer co-extrusion experiment proves the correctness and effectiveness of the simulation results. The research results can provide important guidance value for the flow channel structure design of polymer multi-layer coextrusion die.

Keywords: polymer coextrusion; intersection angle; melt thickness; die expansion; mold design