http://pmse.scu.edu.cn

基于模流平衡的U型材挤出口模结构优化

黄雪梅[1]，柳和生[1,2]，黄兴元[1]
（1.南昌大学 先进制造学院，江西 南昌 330031；2.华东交通大学 机电与车辆工程学院，江西 南昌 330013）

摘要：应用Polyflow软件分别建立了U型件模型、带内外气体辅助层厚度不同的U型件模型和U型件开口有倾角的模型。针对传统挤出、不同内外层辅助气体厚度、不同开口倾角下3种情况进行了数值模拟计算，并用Origin软件对部分结果进行了分析。研究发现，使用气体辅助技术比型腔结构优化更有利于模流平衡；当内外气体辅助层厚度不同时，内层气体层厚度偏大、外层气体层偏薄时，更有利于抑制U型件开口收缩的变形；而对口模开口臂倾斜角度的修正更有利于减小或调整U型件开口收缩的变形。

关键词：模流平衡；挤出成型；U型件；优化设计；数值模拟
中图分类号：TQ320.5+2 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）01-0074-08

社会市场对异型材的需求越来越多，但是由于异型材的不规则不对称，其在流道中的流动速度极难保持平衡。很多专家学者对此展开了研究，敖万路等通过风道对出料不均的部位进行温度调控来寻求解决PVC型材挤出口模出料不均的问题[1]；Dai等根据模具平衡要求，利用计算机辅助工程(CAE)技术对某型汽车橡胶密封件的挤出过程进行了研究[2]；Pauli等基于均匀胀形对异型材挤压模具形状进行了优化[3]；Zolfaghari等研究了流变效应对木粉和HDPE复合挤出模具中的流动平衡的影响[4]。陆跃等根据UPVC再生料与普通UPVC原料在模头流道中的流动性差异，同时结合生产实践，提出了新型的UPVC再生料共挤模头设计理念及设计方法[5]。Sharma等根据口模形状、材料流变性等，应用模拟软件设置热边界条件和流动边界条件，运用直接模拟和反向模拟2种方法来评估离模膨胀行为[6]。Liang等首次将气辅挤出成型技术引入挤出成型，其可以很好地消除离模膨胀[7]。随后，越来越多的专家学者将该技术应用于各类挤出成型中[8~10]，用于对L形异型材气辅共挤数值模拟与实验研究[11]，以及对方形挤出[12]等，研究发现使用气辅挤出成型可以使熔体挤出胀大、熔体破裂和变形都有极大的改善。柳和生等采用Polyflow逆向口型设计模拟的方法计算出T形异型材所需的口模口型形状，提出流道结构相对直线形T形口模和局部加宽的T形口模更为合理[13]。黄雪梅等对U型件挤出时拐角处的局部成型进行了研究，发现侧臂长度与入口流率均对流动速率和流动平衡有一定的影响[14]。蒋标等提出了塑料异型材三面压花挤出模具设计方案，其思路增加挤出型材的多样性、增强了型材的立体效果[15]。Shahbaz等基于Beziers公式的流线型方法设计模具，研究了加工样品的微观结构和力学特性[16]。

基于目前的研究成果，本文提出了基于模流平衡的U型材挤出口模结构优化设计的探讨。

1 理论模型

1.1 几何模型和有限元模型

本文以一个U形截面型材为研究对象，取其一

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0005
收稿日期：2023-03-15
基金项目：国家自然科学基金资助项目（21664002，51863014）；江西省重点研发项目（20203BBE53065）
通讯联系人：柳和生，主要从事材料成型加工和机电一体化方面的研究，E-mail: hsliu@vip.163.com

半来进行建模和模拟,截面图如Fig.1,尺寸单位均为mm。

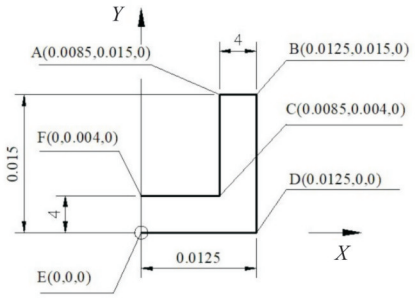


Fig. 1 U-shaped part and the coordinates

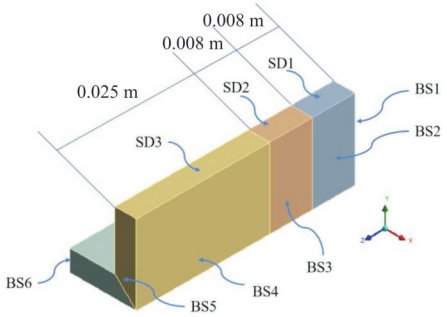


Fig. 2 Domain, boundary and coordinate system

本文以Fig.1的截面构建U型件模型,如Fig.2,并将其划分为3个域(SD1,SD2和SD3)。其中,SD1为自适应域,SD2为平行域和SD3为自由端域。SD1和SD2在Z向上长度为8 mm,SD3在Z向上长度为25 mm。BS1为熔体入口,BS2为熔体与口模壁接触的可优化面,BS3为熔体与口模壁平行的距离可调节面,BS4为熔体挤出口后的自由理想表面,BS5为熔体挤出口后的出口端,BS6为对称轴面。

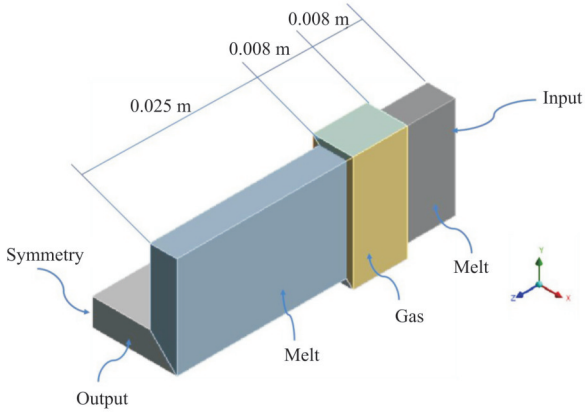


Fig. 3 Gas-assisted of U-model

为了研究可优化面(BS2)和可调节面(BS3)的壁面可优化情况,本文选择了界面上的5个端点,端点坐标为A(0.0085,0.015,0), B(0.0125,0.015,0), C(0.0085,0.004,0), D(0.0125,0,0), E(0,0,0)和F(0,0.004,0),共6个节点,基于流动平衡对该U型挤出口模进行优化设计。

随后为了研究气体辅助对模流平衡的影响,在U型件入口处0.008~0.016 m的一段距离上增加了气体辅助,气体层厚度为1 mm。并且取不同的气体层内外壁厚分别进行模拟仿真。内层气体层厚度取1 mm时,外侧气体层厚度分别取0.4 mm,0.6 mm,0.8 mm和1 mm;外层气体层厚度取1 mm时,内侧气体层厚度分别取0.4 mm,0.6 mm,0.8 mm和1 mm。

最后,取U型件侧壁与底面不垂直,分别设置为一定的夹角,θ取95°,93.5°,91.5°与垂直情况(90°时)进行分析比对。

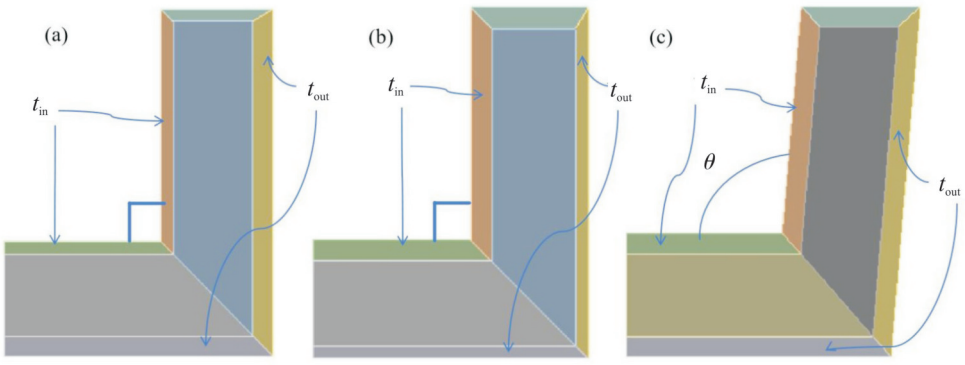


Fig. 4 (a) t_{in}<t_{out}, (b)t_{in}>t_{out} and (c)side wall tilt angle θ of different gas thicknesses or U-shaped parts

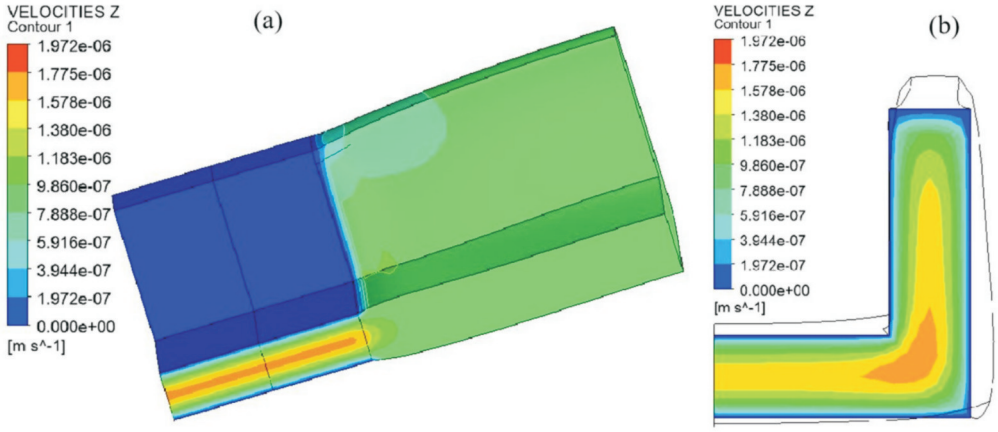


Fig. 5 (a)Overall speed and (b)exit speed of *Z*-velocity of traditional extrusion molding

1.2 基本假设和基本方程

为了优化模具结构，本文采用了模流平衡系数[17]，它是一个基于法向速度相对于模具出口平均速度的偏差数，公式如式(1)

$$K_m = \left(V_n - \frac{Q}{S}\right)^2 \tag{1}$$

式中：V_n——熔体法线方向的流动速度；Q——口模出口的体积流率；S——口模出口的面积。

理想的模流平衡是希望在出口处所获得的熔体流动速度是均匀的，偏差为0，故理想的模流平衡系数为0，目标函数为

$$f = \int (V_n - \frac{Q}{S})^2 ds \tag{2}$$

优化的目标是求目标函数的极小值。

根据熔体流变学理论，在计算中还运用了流变学中的连续性方程、动量方程、能量方程和应用比较广泛的微分黏弹本构模型Phan-Thien-Tanner(PTT)本构模型[18]。

1.3 材料物性参数

在数值模拟中，采用的聚合物材料是聚丙烯（PP），其熔体密度为973 kg/m^3，松弛时间为0.1 s，零剪切黏度为1500 Pa·s，与熔体拉伸特性有关的材料参数ε=0.16，与熔体剪切黏度有关的材料参数ξ=0.25，黏度比为0.1111。

1.4 边界条件设置

熔体各部分边界设置如Fig.2。

BS1：熔体入口，其流率为1.0×10^{-7} m^3/s；BS2：熔体与口模壁的接触面，也是可优化面，它可以根据流动平衡的需要在X向和Y向移动一定的距离，移动的距离由计算结果而定，该面采用无滑移（No-slip）边界条件，即V_n=V_s=0；BS3：熔体与口模壁接触的面，也是在Z向可调节的面，它可以根据流动平衡的需要在Z向有一定的移动距离，移动的距离由计算结果而定，该面也采用无滑移（No-slip）边界条件，即V_n=V_s=0；BS4：熔体挤出口后的自由理想表面，理想表面没有任何变形，其流动速度取决于挤出成形过程采用的工艺参数；BS5：熔体挤出口后的出口端，设置f_n=f_s=0 N；BS6：为对称面。

当气体辅助挤出时，气体黏度为2.6×10^{-5} Pa·s，BS3外增加一层气体层，气体层与熔体层交接面，设置为Interface；而气体和口模壁接触面设置为无滑移（No-slip）边界条件，即V_n=V_s=0；此时BS3不再设置Z向移动优化；其他设置和传统挤出时一致。

2 模拟结果及讨论

2.1 优化型腔

Fig.5为传统挤出时的速度图，挤出出口处界面的Z向速度变化较大，挤出自由表面有自由胀大和侧壁内倾的变形。为了能改善这一现象，首先基于流体平衡的理论，在假定自由端没有变形的情况下对熔体入口端各个点的坐标进行优化，为了计算方便，仅选择了E点、D点的变化来进行计算，数值计算结果如Fig.6。

从图来看，入口端熔体有一定的斜度进入口模，有助于熔体的流动，流动速度有了很大的提高，但是

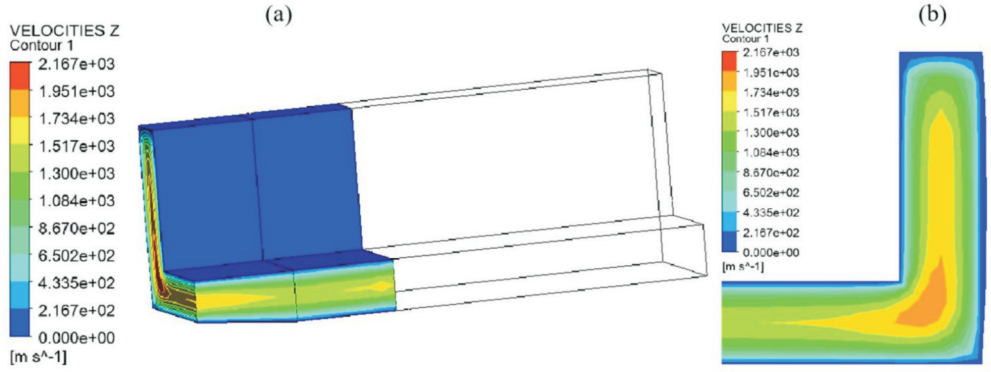


Fig. 6 (a)Overall speed and (b)exit speed of *Z*-velocity after cavity optimization

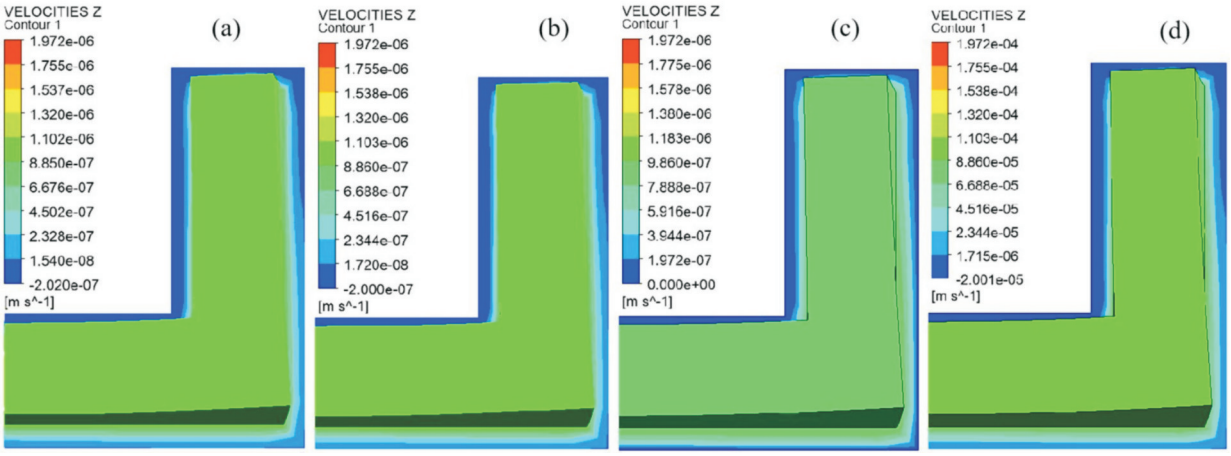


Fig. 7 (a) Gas/1e^{-12}(melt 1e^{-7}), (b) Gas/1e^{-10}(melt 1e^{-7}), (c) Gas/1e^{-8}(melt 1e^{-7}) and (d) Gas/1e^{-8}(melt 1e^{-5}) of *Z*-velocity

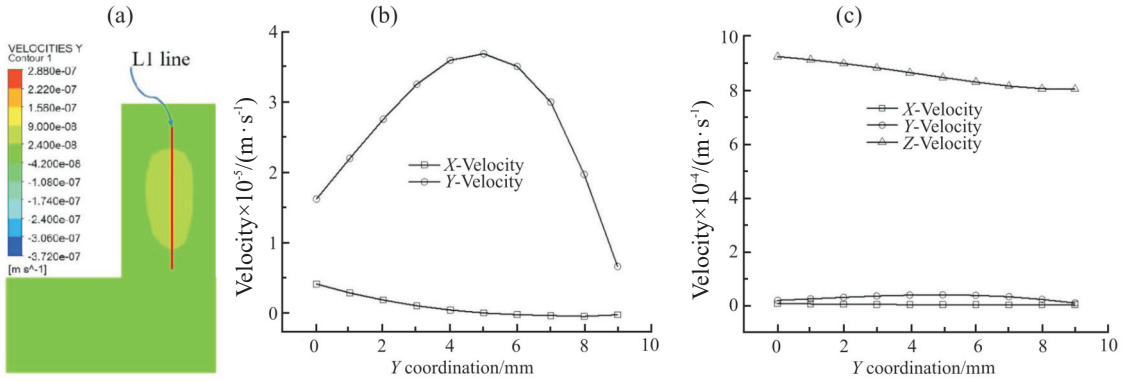


Fig. 8 (a)Location, (b)*X*-velocities and *Y*-velocities and (c)*X*-velocities, *Y*-velocities and *Z*-velocities of L1

在熔体出口界面处,速度差别也还是比较大,还是没有很好的模流平衡。

2.2　增加气体辅助

根据口模型腔优化后的结果,发现熔体流动极度的不平衡。在此基础上引入了气体辅助挤出技术,设置熔体入口流率分别为1×10^{-7} m^3/s和1×10^{-5} m^3/s,气体入口流率分别为1×10^{-12} m^3/s,1×10^{-10} m^3/s和1×10^{-8} m^3/s,进行了模拟计算,结果如Fig.7。由图发现,熔体在出口处的速度基本上是一致的,变化不是很大,但是样件自由端有向内倾斜的趋势,底端有向上偏移的倾向,熔体入口流率和气体入口流率对样件端面和自由端的*Z*向速度影响不大。

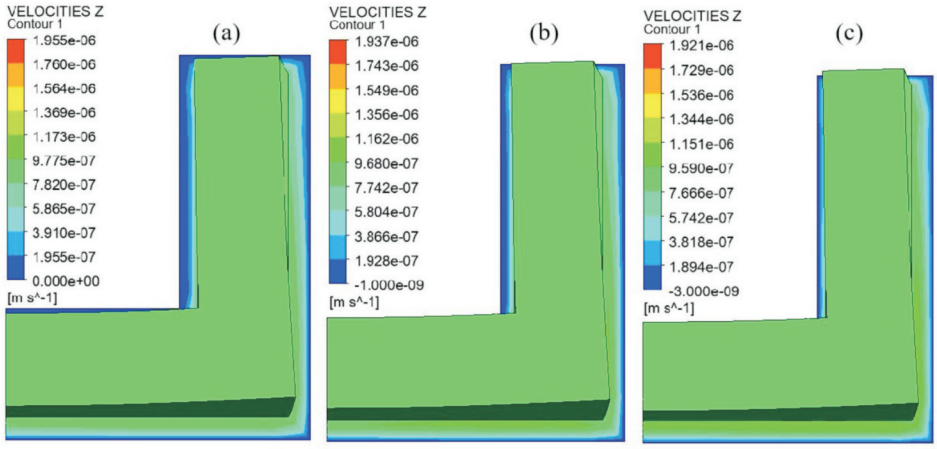


Fig. 9 (a)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(0.8~1.0)e^{-3}, (b)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(0.6~1.0)e^{-3}, and (c)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(0.4~1.0)e^{-3} of *Z*-velocity

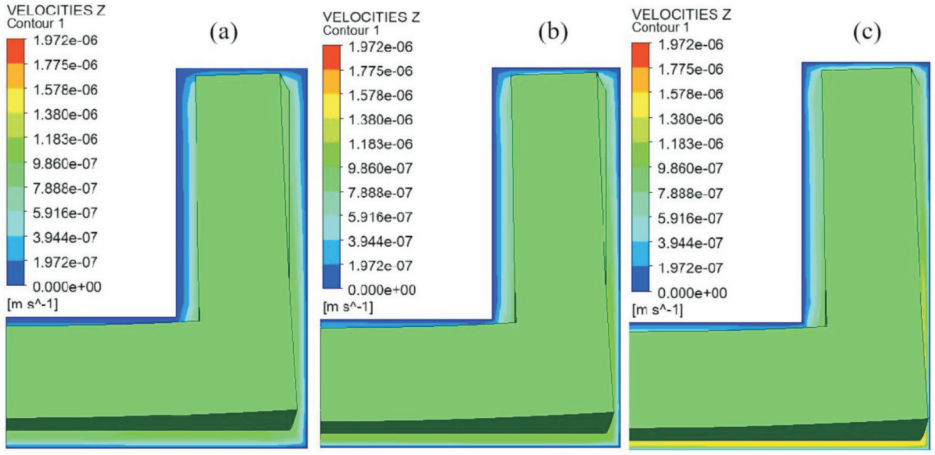


Fig. 10 (a)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(1.0~0.8)e^{-3}, (b)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(1.0~0.6)e^{-3}, and (c)G/1e^{-8}(m/1e^{-7})H(1.0~0.4)e^{-3} of *Z*-velocity

口模出口处，开口臂上有*Y*向速度突变区域，取直线L1(0.0108，0，0.016) (0.0108，0.009，0.016)，单位均为m，如Fig.8(a)。先对L1上的*X*向速度、*Y*向速度进行对比，在竖直高度5 mm左右*Y*先速度达到最大，*X*向速度变化比较缓慢。但*X*向速度、*Y*向速度与*Z*向速度比较时，*Z*向速度应然是主要运动，与前面传统挤出相比，*Z*向速度变化是比较平缓的，速度变化比较均衡。

2.3 改变气体层厚度

为了修正样件自由端的变形，本文通过改变内外层气体层厚度进行调整。

（1）取外层气体层厚度为1 mm时，内侧气体层厚度分别取0.4 mm，0.6 mm和0.8 mm，如Fig.9。由图可知，内层气体层厚度越薄，开口端越往内偏。

（2）取内层气体层厚度为1 mm时，外侧气体层厚度分别取0.4 mm，0.6 mm和0.8 mm，如Fig.10。由图可知，内层气体层厚度越薄，开口端逐渐外偏。但是外层气体层太薄时，气体速度和熔体速度偏差会较大。

另外对内外不同气体层厚度对L1线上的*X*向和*Y*向速度进行对比研究发现，内外气体层不同厚度对出口处*X*向速度基本没有影响；内层气体厚度（$t_{内}$）大于外层气体厚度（$t_{外}$）时，内外气体层不同厚度对出口处*X*向速度也基本上没有影响；外层气体厚度（$t_{内}$）大于内层气体厚度（$t_{外}$）时，内外气体层不同厚度对出口处*Y*向速度有一定的影响，如Fig.11。

由此可见，在气体层的制造或安装过程中，可以让外层间距$t_{外}$稍小一些，而内层间距$t_{内}$稍大一些，这将有利于抑制U型件自由端开口处向外倾的趋势。

2.4 改变U型件侧壁倾角

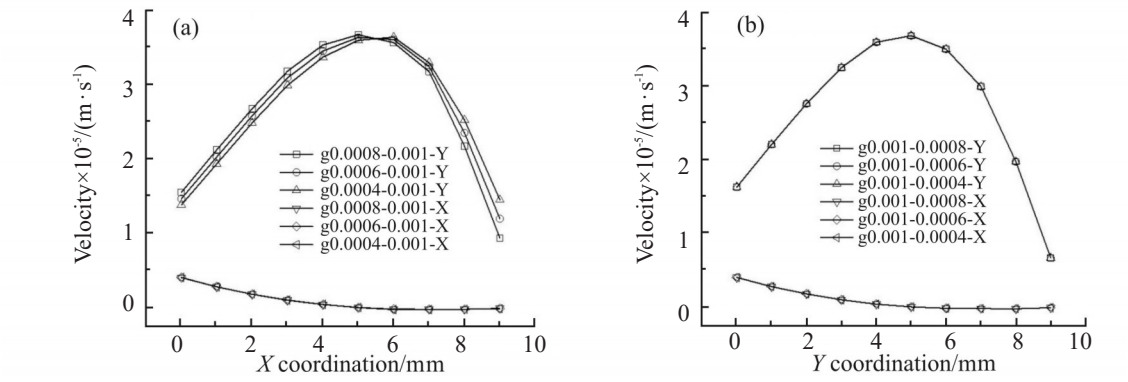


Fig. 11 (a)t_{in}<t_{out} and (b)t_{in}>t_{out} of *X*-velocity and *Y*-velocity on L1

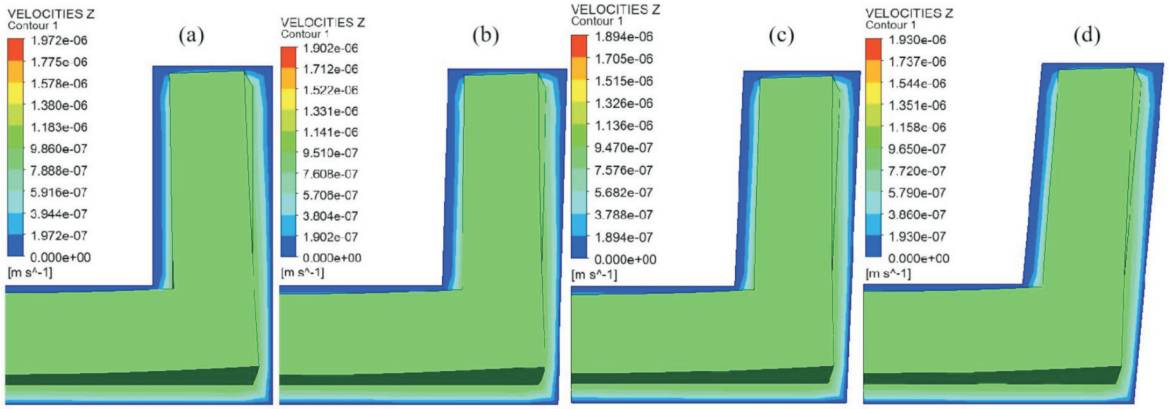


Fig. 12 (a)θ=90°, (b)θ=91.5°, (c)θ=93.5°, and (d)θ=95° of *Z*-velocity

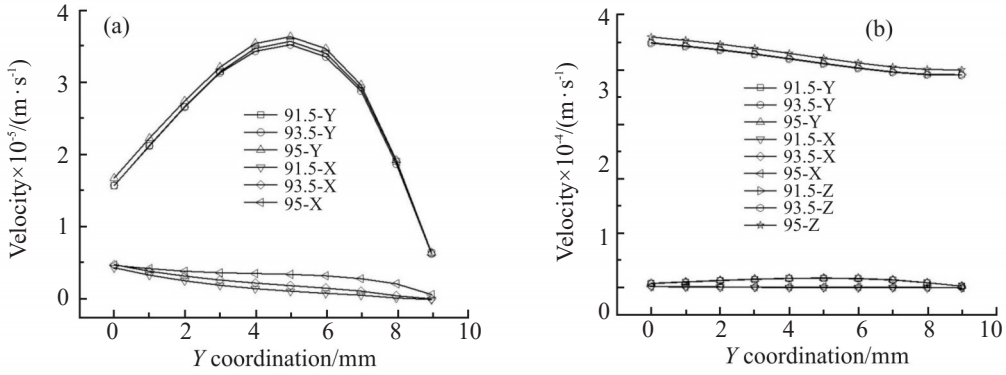


Fig. 13 (a)*X*-velocity and *Y*-velocity, (b)*X*-velocity, *Y*-velocity and *Z*-velocity on L1

为了有效改善U型件侧壁外倾的趋势,本文随之修正了口模侧壁倾角。将倾角θ分别取95°,93.5°,91.5°及垂直情况(90°时)进行分析比对研究,模拟结果如Fig.12。由图可知,模具结构的修正对样件自由端的影响比较明显。由此在模具成型部分,修正U型件开口臂的倾角将对成型结果有很大的影响。

当U型件侧壁有一定的倾角时,*Y*向速度中心线直线L1坐标往侧壁外侧有少量偏移,倾角的变化对U型件侧壁最上端的*Y*向速度几乎没有影响,对*X*向速度有一定的影响,倾角越大,*X*向速度越大,如Fig.13。

3 结论

通过模拟发现，型腔的优化有利于熔体的流动，但是对于样件在口模出口处的流率平衡并没有很好的效果。引入气体辅助技术可以更好地让熔体*Z*向流动速度比较均匀。但是由于U型件上下不对称，所以在出口处会有*Y*向速度，以至于样件在挤出口模后，样件会往开口的方向收缩，开口壁也会由外向内收缩，使得开口侧壁与地面不再垂直，而是侧壁与底面的夹角小于90°，越远离口模出口，侧壁与底面夹角越小。为改善这一现象，本文引入有差别的内外气体层，分别将U型材的内外气体层设置为内厚外薄及内薄外厚2种情况，共6组数据，模拟发现，当气体层取内层厚，外层稍薄时有利于改善这一现象。本文也尝试着修改口模侧壁斜度来调整上述开口壁收缩现象，模拟结果显示，修改口模侧壁斜度可以很好的补偿由外向内的收缩变形。

运用这些模拟结果，在挤出工艺中优化口模型腔，可以提高流速，进而提高生产效率；也可以引入气体辅助技术，以求得较好地模流平衡；或是在口模制造过程中合理调整口模的斜度以补偿制件后期的变形；还可以在口模安装过程中调整内外壁的气体层厚度，使得内层偏厚一些而外层偏薄一些，这也有利于减小U型件挤出后由外向里的收缩变形。在以后类似的异形件挤出成型过程中也可以采用优化口模型腔以提高挤出成型的效率、调整口模角度以补偿变形、或引入气体辅助技术，通过调节气体层厚度来调整制件挤出成型后的收缩变形。

参考文献:

[1] 敖万路,吴书杭,蒋标.PVC型材挤出口模均匀出料的控制措施[J].聚氯乙烯,2019,47(7):17-19.
Ao W L,Wu S H, Jiang B. Control measure to uniformly discharge PVC profile at extrusion die[J]. Polyvinyl Chloride, 2019, 47(7):17-19.

[2] Dai Y K, Zheng H, Zhou C X, *et al.* Quick profile die balancing of automotive rubber seal extrusion by CAE technology[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A:Pure and Applied Chemistry, 2008, 45:1030-1038.

[3] Pauli L, Behr M, Elgeti S. Towards shape optimization of profile extrusion dies with respect to homogeneous die swell[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2013, 200:79-87.

[4] Zolfaghari A, Behravesh AH, Shakouri E, *et al*. Flow balancing in die design of wood flour/HDPE composite extrusion profiles with consideration of rheological effect[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 50:543-549.

[5] 陆跃,杨卫发.UPVC再生料共挤模头设计[J].模具工业, 2020, 46(2):63-65.
Lu Y,Yang W F. Design of co-extrusion die head for UPVC recycle-material[J]. Die & Mould Industry, 2020, 46(2):63-65.

[6] Sharma S, Sarkar K,Goswami M, *et al*. An approach to design extrusion dies for complex shaped rubber profiles using finite element analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57:700-711.

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

[8] 黄雪梅,柳和生,黄兴元,等.U型件的气体辅助挤出成型工艺的数值模拟与实验研究[J].中国塑料, 2022, 36(7):94-103
Huang X M, Liu H S, Huang X Y, *et al*. Numerical simulation and experimental study on gas-assisted extrusion process of U-shaped parts[J]. China Plastics, 2022, 36(7):94-103.

[9] Ellingham T, Yilmaz G, Turng L S. Non-linear rheological response as a tool for assessing dispersion in polypropylene/polycaprolactone/clay nanocomposites and blends made with subcritical gas-assisted processing[J]. Polymer Engineering and Science, 2020,60:55-60.

[10] 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.

[11] 柳和生,何建涛,黄兴元,等.L型异型材气辅共挤胀大及变形的数值模拟和实验验证[J].高分子材料科学与工程, 2014, 30(10):113-116.
Liu H S, He J T, Huang X Y, *et al*. Numericai simulation and experimental validation of die swell and deformation in L-shaped profile gas-assisted coextrusion[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2014, 30(10):113-116.

[12] 宋建辉,黄兴元.方形口模气辅挤出成型的挤出胀大计算机模拟[J].塑料,2013,42(3):100-102.
Song J H, Huang X Y. Computer simulation on die swell of gas-assisted extrusion from square die[J]. Plastics, 2013, 42(3):100-102.

[13] 徐磊,柳和生,黄兴元,等.T形异型材挤出口模的逆向数值模拟[J].中国塑料,2010,24(1):103-106.
Xu L, Liu H S, Huang X Y, *et al.* Inverse numerical simulation of T-shape dies for the extrusion of plastics profiles[J]. China Plastics, 2010, 24(1):103-106.

[14] 黄雪梅,柳和生,黄兴元,等.U型件开口臂尺寸和熔体入口流率对其拐角处挤出成型的影响[J].工程塑料应用, 2022,50(4):58-

64.
Huang X M, Liu H S, Huang X Y, *et al.* Effects of opening arm length of U- shaped part and melt inlet flow rate on extrusion molding at its corner[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):58-64.

[15] 蒋标,方艳华,徐瑞.塑料异型材三面压花挤出模设计[J].模具工业,2023,49(1):46-48.
Jiang B, Fang Y H, Xu R. Design of three- sided embossing extrusion die for plastic profile[J]. Die & Mould Industry, 2023, 49(1):46-48.

[16] Shahbaz M, Pardis N, Moon J, *et al.* Microstructural and mechanical properties of a material processed by streamline proposed vortex extrusion die[J]. Metals and Materials International, 2020, 27:522-529.

[17] Rajkumar A, Ferras L L, Fernandes C, *et al*. Guidelines for balancing the flow in extrusion dies: the influence of the material rheology[J]. Journal of Polymer Engineering, 2017, 38:197-211.

[18] Jiang S Y, Liu H S, Huang X Y, *et al.* Numerical and experimental studies on the effect of thickness difference between up and down gas layers on sheet polymer gas- assisted extrusion forming[J]. Polymer Engineering and Science, 2020, 60: 2470-2486.

Design of U-Shaped Extrusion Die Structure Optimization Based on Die Flow Balance

Xuemei Huang[1], Hesheng Liu[1,2], Xingyuan Huang[1]

(*1. Advanced Manufacturing School, Nanchang University, Nanchang 330031, China*;
2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

ABSTRACT: The U-shaped part model, U-shaped part model with different thickness of the inner and outer gas auxiliary layer, and U-shaped part model with inclined opening angle were built by Polyflow software. Numerical simulation was carried out under three conditions of traditional extrusion, different thickness of auxiliary gas in inner and outer layers, and different inclination of opening. Some results were analyzed by Origin software. It is found that using gas- assisted technology is more beneficial to mold flow balance than cavity structure optimization. And when the thickness of the inner and outer gas assistant layers is different, the inner gas layer is larger and the outer gas layer is thinner, which is more advantageous to restrain the deformation of the U-shaped piece. And it is more advantageous to reduce or adjust the deformation of the opening contraction of the U-shaped part by modifying the inclined angle of the opening arm of the die.

Keywords: mode flow balance; extrusion forming; U-shape; optimal design; numerical simulation