

• 研究论文 •

挤出机模块化结构管材环向增强机头的设计及有限元模拟分析

刘炳纲^{1,2} 孙书研^{1,2} 伊 迪^{1,2} 潘迪生^{1,2} 全恩宇^{1,2} 潘雨曦^{1,2,3,4*}

(大连理工大学¹精细化工全国重点实验室 智能材料前沿科学中心²化工学院 大连 116024)
(大连理工大学³辽宁省高性能树脂材料技术创新中心⁴大连高性能树脂工程研究中心 大连 116012)

摘要: 高分子材料在管材生产领域逐渐代替金属等成为最重要的原材料,仅通过改变高分子化学结构,添加玻璃纤维、碳纤维等材料共混的方式来提高管材性能已经不能满足要求。本研究以杂萘联苯聚芳醚树脂(PPEsk)为研究对象,对挤出机常用的机头进行了修改,加入类似吹膜原理的环向增强装置来提升管材强度。利用Ansys-Polyflow软件对设计机头的环向扩张效果进行模拟和分析,在扩张角度为30°时,具有合适的环向扩张速度分量为3.51 cm/s,此时熔体仍能保持很好的流动速度,没有产生明显的涡流和滞留。环向扩张速度可以使熔体内的分子链偏离原来的流动方向形成沿轴向的取向分布,增大管材环向抗压能力。

关键词: 机头设计; 环向增强; 有限元模拟; 复合材料管材制备; 挤出成型

The Design and Finite Element Simulation Analysis of a Modular Extruder Head for Circumferential Reinforcement of Pipes

LIU Bing-gang^{1,2}, SUN Shu-yan^{1,2}, YI Di^{1,2}, PAN Di-sheng^{1,2}, QUAN En-yu^{1,2}, PAN Yu-xi^{1,2,3,4*}

(¹State Key Laboratory of Fine Chemicals, Frontier Science Center for Smart Materials,

²School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

(³Liaoning Province Technology Innovation Center of High Performance Resin Materials,

⁴Dalian Engineering Research Center of High Performance Resin, Processing and Application,
Dalian University of Technology, Dalian 116012)

Abstract: Polymer materials have gradually replaced metals as the most important raw materials in the pipe production industry, leading to increasingly stringent requirements for pipe quality. However, improving pipe performance solely by modifying the chemical structure of polymers or incorporating fillers such as glass fiber and carbon fiber can no longer fully meet these demands. Taking poly(phthalazinone ether sulfone ketone) (PPEsk) as an example, this study modifies a conventional extruder head by incorporating an annular expansion strengthening device, analogous to the principle of film blowing, to enhance pipe strength. The annular expansion effect of the designed extruder head is simulated and analyzed using Ansys-Polyflow. At an expansion angle of 30°, a suitable annular expansion velocity component of 3.51 cm/s is obtained, under which the melt maintains favorable flow characteristics without significant vortex or stagnation. The velocity component in the annular expansion direction causes the molecular chains within the melt to deviate from their original flow direction and form an orientation along the axial direction, thereby improving the circumferential stress resistance of the pipe.

高分子加工专题; 2026-02-13 收稿, 2026-04-15 录用, 2026-05-20 网络出版

基金项目: 中央高校基本科研业务费(项目号 DUT22LAB605)

* 通信联系人: 潘雨曦, E-mail: panyx@dlut.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.074

Keywords: Design of extruder head; Annular strengthening; Finite element simulation; Composite material pipe preparation; Extrusion molding

引用: 刘炳纲, 孙书研, 伊迪, 潘迪生, 全恩宇, 潘雨曦. 挤出机模块化结构管材环向增强机头的设计及有限元模拟分析. 高分子通报, 2026, 39(6), 900–909.

Citation: Liu, B. G.; Sun, S. Y.; Yi, D.; Pan, D. S.; Quan, E. Y.; Pan, Y. X. The design and finite element simulation analysis of a modular extruder head for circumferential reinforcement of pipes. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(6), 900–909.

管材在使用过程中所受到的环向应力可能要超过轴向应力的2倍, 所以, 管材的环向抗压与抗拉强度对管材在承受内压、环向载荷或特定应用条件下的可靠性具有决定性影响^[1~3]。在常规挤出成型过程中, 聚合物熔体主要受到轴向挤出和牵引作用, 导致管材内部分子链的有序排列和取向多沿轴向分布^[4]。然而, 单一的轴向取向难以有效提升管材的环向承载能力, 限制了其在复杂服役环境中的应用。因此亟需开发新的加工方法以提升管材的环向承载能力。

在材料体系不变的情况下, 挤出制品性能的提升往往依赖于挤出机头的结构改进。近年来, 针对机头设计与优化的研究逐渐增多, 涉及旋转挤出机头^[5]、振动挤出机头^[6,7]以及面向橡胶性能提升而设计的专用机头^[8,9]。受天然竹子的竹节结构启发, 若分子链可沿轴向形成取向并有序排列, 将显著增强管材的环向抗压能力。1990年, Vlcek等^[10]对聚合物熔体进行了数值模拟分析, 并将模拟结果与实验数据对比, 验证了模拟结构的可靠性。Arpin、Lang和Yu等^[11~14]进一步优化了仿真分析中的关键细节, 均取得了良好效果。

针对杂萘联苯聚芳醚(PPESK)树脂较难加工的问题^[1,15,16], 本研究对挤出机机头进行了结构改进, 在最终管材成型之前, 先挤出一个截面积稍大于最终管材截面积的预制管, 随后利用挤出机流道形状截面的变化, 使管材在连续挤出过程中实现直径扩张。扩张的过程中, 分子链在垂直于轴向的力与速度共同作用下逐渐向外迁移, 形成沿轴向分布的有序排列结构, 从而有效提升管材的环向抗压性能。本研究通过Ansys-Polyflow软件^[17~19]分别从局部剪切速率、流动速度和环向扩张速度三个方面, 对PPESK熔体在所设计机头之中的流动状态进行了模拟分析, 并据此确定机头设计参数的最优值。根据模拟结果, 对机头进行了二次改进并给出相应的模拟结果。

1 挤出机头的设计

采用螺杆直径为45 mm的单螺杆挤出机, 料筒内径为46 mm。最终制品为内径16 mm, 外径20 mm的管材。图1为挤出机机头的三维截面示意图, 其主要设计参数如图2所示。在设计过程中, 首先需要确定的是口模的长度。口模是压力损失最大的区域, 其长度 L_1 可以按公式(1)计算^[20]:

$$L_1 = \frac{\Delta p H}{2} \left(\frac{k W H^2}{2(m+2)q_v} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

式中: Δp 为压力降; k 为真实流动常数; W, H 为几何流道尺寸; m 为非牛顿指数, q_v 为体积流量。其中, $H = R_0 - R_i$, $W = \pi(R_0 + R_i)$, R_0 与 R_i 是与流道结构有关的参数。

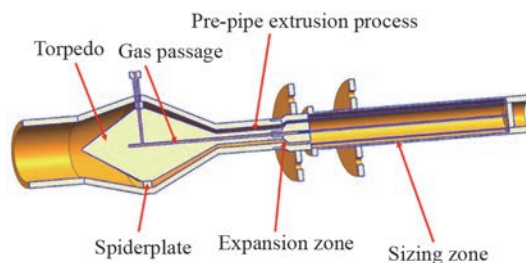


图1 挤出机机头部分3D示意图

Figure 1 3D schematic diagram of the extruder head section

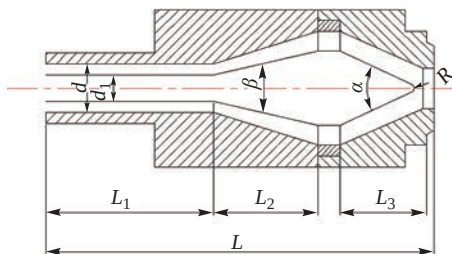


图2 挤出机设计主要参数图(α : 延伸角, β : 压缩角, L_1 : 模头长度, L_2 : 压缩段长度, L_3 : 分配段长度, d : 外径, d_1 : 内径, R : 鱼雷形圆角半径)

Figure 2 Schematic of the main parameter of extruder design (α : extending angle, β : compressing, L_1 : length of die, L_2 : length of compress, L_3 : length of allocation, d : external diameter, d_1 : inner diameter, R : torpedo fillet radius)

由于PPESK树脂加工温度高达390℃,在此条件下黏度达到 $8 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,故式(1)中 m 、 k 、 Δp 测定难度较大,限制了式(1)在口模长度定量计算中的直接应用。因此我们首先利用经验公式来确定口模长度:

$$L_1 = (14 \sim 22)t \quad (2)$$

式中 t 为管材壁厚,单位为mm。

其他设计主要参数见表1。

表1 挤出机主要参数设计值

Table 1 The value of main extruder design parameter

α	β	L_1	L_2	L_3	R	压缩比
60°	45°	60 mm	61.56 mm	60 mm	0.5 mm	10

较小的分流锥圆角可以有助于防止物料停滞。压缩比是指分流锥支架出口处截面积与口模环隙面积之比,对于PPESK树脂^[21~23],经过分流锥支撑件之后,熔体会产生一定的分离,因此需设置适当的压缩比以增强熔体间的结合能力,降低分离现象,从而减少最终制品上的熔接痕^[24]。

为实现所需压缩比,收缩角 β 需要小于扩张角,根据收缩角和压缩比的值,可以计算出压缩段 L_2 的长度。分流锥支撑件的设计界面如图3所示,该结构能够确保熔体顺利分流并绕开分流锥而不发生停滞。同时在绕过之后,熔体之间容易重新熔合,形成完整的熔体,减少熔接痕的产生。

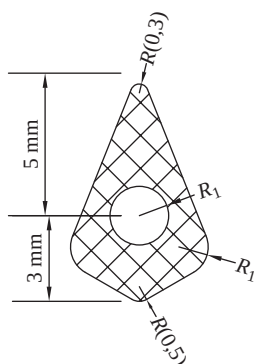


图3 分流锥支撑件示意图

Figure 3 Schematic of the spiderplate section

经过上述加工过程,成型的预制管内径为9 mm,外径为15 mm。随着挤出机持续推送物料,预制管以熔体状态进入管材环向扩张段。该段的主要作用在于利用芯棒和机头直径的变化,使熔体在与具有一定倾斜角度的内壁接触过程中,受到垂直于轴向的力,从而在挤出过程中,一部分沿轴向分布的分子链或者局部链段在机械力的作

用下,沿垂直于轴向的方向产生运动,实现分子链在扩张后的管材内部规整有序排列,最终成型的管材内形成类似竹子纹理的纵向纤维束结构。该结构能够在管材承受环向压力的时候共同承担压力,降低分子链在受力过程中从纠缠的状态中滑移、脱出,进而减小微观局部破坏聚集,减少宏观上产生裂纹的可能性^[25]。因此,该结构的引入,能够有助于管材在加工过程中形成沿轴向的取向,提升管材抗环向应力的能力,拓展管材的使用范围。

由于预制管管径与最终成型管材管径均已确定,PPESK熔体由预制管流动至最终成型段的流道路径,即扩张段,成为本研究设计与研究的重点。为表征不同路径,用流道的倾斜角度进行表示。分别探究了倾斜角度为10°、20°、30°、40°、45°、50°、60°、70°、80°的流道,以确定形成具备抗环向应力能力的有序分子链结构管材的最佳工艺参数。为简化实验,首先对管材的扩张段进行改进:在扩张段的芯棒上添加外螺纹,并在机头部分的芯棒上添加了内螺纹,便于芯棒的更换和拆卸,从而节约设备制造成本与更换时间,料筒亦进行了相同改进。在改进之后,管材的扩张段转变成类似积木的模块化标准件,可以根据实际需求灵活更换扩张段的芯棒与料筒。

为了确保熔体内部分子链产生沿扩张方向运动并形成规整有序排列,将扩张段与定径段的距离缩短,以抑制高分子熔体的松弛作用。定径段采用的压缩空气外定径法,通过分流锥支架中预留的气体流道通入预热的压缩空气。同时为保持管内的气压,采用由金属链牵引、固定于挤出机头芯棒上的橡胶塞,该橡胶塞通过与冷却后的管材内壁滑动配合来防止漏气,实现密封。定径套内采用冷却水进行冷却,并在定径套前部加装绝热材料,防止冷却水降低机头温度。自行设计的挤出机机头结构如图4所示。

2 挤出机机头熔体的流动模拟

利用Ansys公司开发的Polyflow软件对机头内部的熔体流动进行有限元分析。首先,利用Simens公司的NX软件构建PPESK在挤出机机头内的熔体形态三维模型。为了节约计算量和模拟时间,取各角度下熔体模型的1/4作为分析对象,不同角度下的熔体形态结构如图5所示。

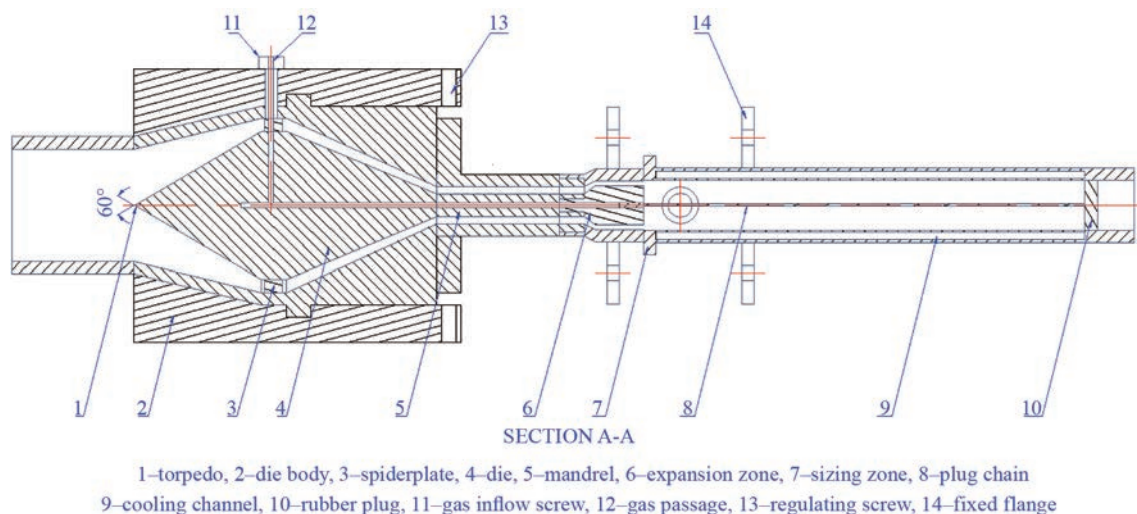


图4 挤出机机头结构示意图

Figure 4 The design drawing of the extruder head

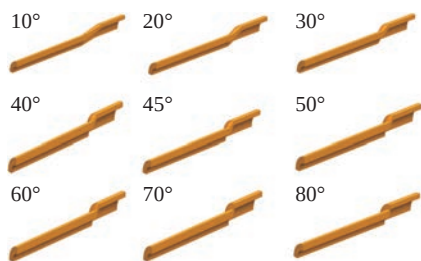


图5 熔体3D形态图

Figure 5 Sketch illustrating 3D model of the melt

将熔体模型导入Polyflow软件中后,对各个表面进行命名,并对熔体模型进行有限元的网格划分。基于PPESK树脂模型是圆柱形,采用sweep方式划分网格,生成结构化六面体单元。网格越细密,对于熔体的流动分析就越精确,越接近真实的流动状态,扩张段为本研究的重点区域,对其的网格进行了细化处理,细化后,网格的最大尺寸为 5×10^{-4} m,划分后的网格数量大概为 1×10^4 以上。

在模拟过程中,对挤出口模内聚合物熔体成型过程作如下假设:(1)熔体不可压缩;(2)忽略重力和惯性力;(3)等温层流;(4)忽略入口效应^[26]。熔体为等温流动,无需求解能量方程,且流动行为服从三大守恒定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。

熔体的黏度模型直接影响模具内流场的分布情况。Cross模型作为一种可以同时描述高剪切速率时的幂律流变行为和零剪切速率附近的牛顿流变行为的经验模型,具有物理概念明确、形式简单的特点^[27],在高分子材料成型加工数值模拟

中得到了广泛的应用。因此,本实验采用Cross模型描述熔体黏度 η ^[26,28]。Cross方程如下^[17]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n} \quad (3)$$

式中, η_0 为零剪切黏度, λ 为松弛时间, n 为幂律指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

挤出时,入口速度5 mm/s,出口压力1 MPa,熔体初始温度为380 °C,该过程是一个稳态过程,模拟模式设置为广义牛顿流体的等温流动模拟,Cross模型适用于低剪切速率下的模拟,之后将材料的物性参数输入Cross方程,零剪切黏度 $\eta_0 = 3 \times 10^6$ Pa·s,松弛时间 $\lambda = 1$ s,幂律指数 $n = 0.4$ 。同时为了模拟计算的简化,忽略在熔体流动过程中的壁面滑移,即假设壁面处的PPESK熔体流动速率为0。本研究对高分子熔体在挤出机机头中的局部剪切速率、流动速率以及垂直轴向的运动速率分量(z 分量)进行了分析。

2.1 局部剪切速率

不同流道角度的熔体模型局部剪切速率模拟结果如图6所示。可以看出,所有流道扩张角度模型中,预制管挤出部分的剪切速率均较小,但当熔体进入管材扩张段后,剪切速率迅速增大。造成该现象的主要原因有2个,首先,尽管扩张前与扩张后的管材截面积基本不变,但是在扩张过程中局部截面积明显减小,导致聚合物熔体通过时产生加速效应,而壁面处熔体流速仍为0,这样就使得熔体内部产生比较大的速度差,产生一定剪切速率;第二个原因是扩张段壁面在熔体流动过程中施加了改变流动方向的力,该力在壁面附近

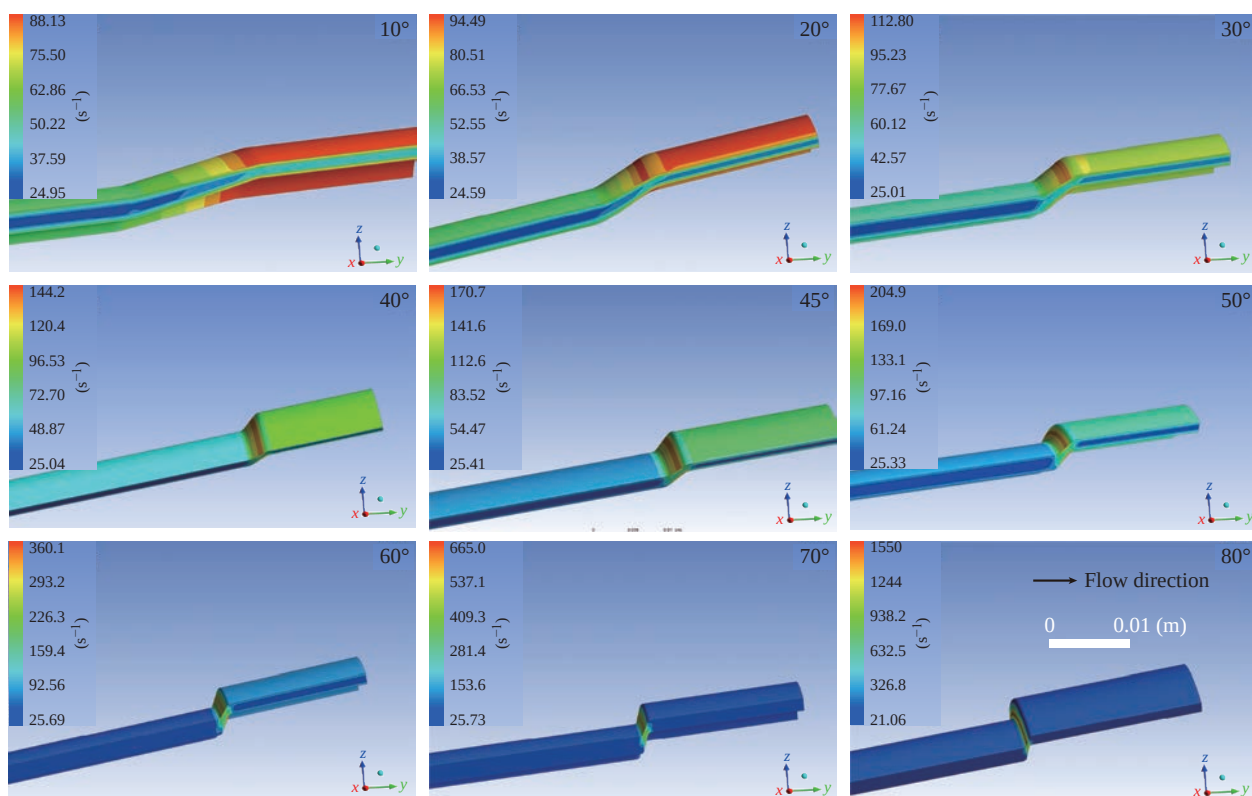


图6 各个流道角度的熔体模型局部剪切速率模拟结果

Figure 6 The simulation results of local shear rate

引发显著剪切作用,尤其在扩张段结构的拐角处,剪切速率达到熔体在整个机头内所受剪切速率的极值。

从图6可以看出,随着扩张段角度的变大,局部的剪切速率也随之增大,尤其是角度达到 60° 以后,PPESK在扩张段所受到的剪切速率明显高于挤出段的,这种剪切速率容易引发黏度比较大的熔体发生剪切生热,从而破坏了高分子熔体分子链的有序取向结构^[24],降低制品质量。所以 60° 以上的扩张角度可能不利于实际的加工过程。

还有一个值得注意的现象是,在扩张后的成型段,壁面处的剪切速率比预制管的成型段的剪切速率更大,而且不论扩张角度如何变化,这个剪切速率均保持在 $80\sim 90\text{ s}^{-1}$ 。这种变化可以使高分子管材成品的皮层加厚,如果在预制管段的剪切速率影响下,可以形成 0.2 mm 左右的皮层厚度,则在后续成型段可进一步形成 $0.3\sim 0.4\text{ mm}$ 厚的皮层^[29]。由于外层的流动速率高于内层,导致取向诱导现象发生,同时冷却过程是由外部向中心发展,因此容易将外层发生取向诱导的部分固定下来形成皮层。皮层内部分子链的取向和局部有序结构丰富,该结构不论是在增强管材拉伸性能和

环向抗应力能力上都有着很好的作用。而剪切速率不变的原因可能是尽管扩张角增大使熔体流动方向发生显著变化,但熔体在流出扩张段后流动速度急剧下降,不同扩张角下的速度降幅差异对剪切力增益的影响有限,最终导致壁面剪切速率基本稳定。各个扩张角度机头熔体的剪切速率最大值以及成型段壁面剪切速率如表2所示。

表2 局部剪切速率模拟结果

Table 2 Results of local shear rate simulation

扩张角	最大剪切速率(s^{-1})	成型段壁面剪切速率(s^{-1})
10°	88.13	85.00
20°	94.49	87.50
30°	112.80	85.00
40°	144.20	84.61
45°	170.70	83.52
50°	204.90	88.20
60°	360.10	90.00
70°	665.00	89.65
80°	1550.00	91.00

2.2 流动速率

不同扩张角度下熔体的轴向流动速率如图7所示,对比各图可以发现,在预制管成型阶段,熔

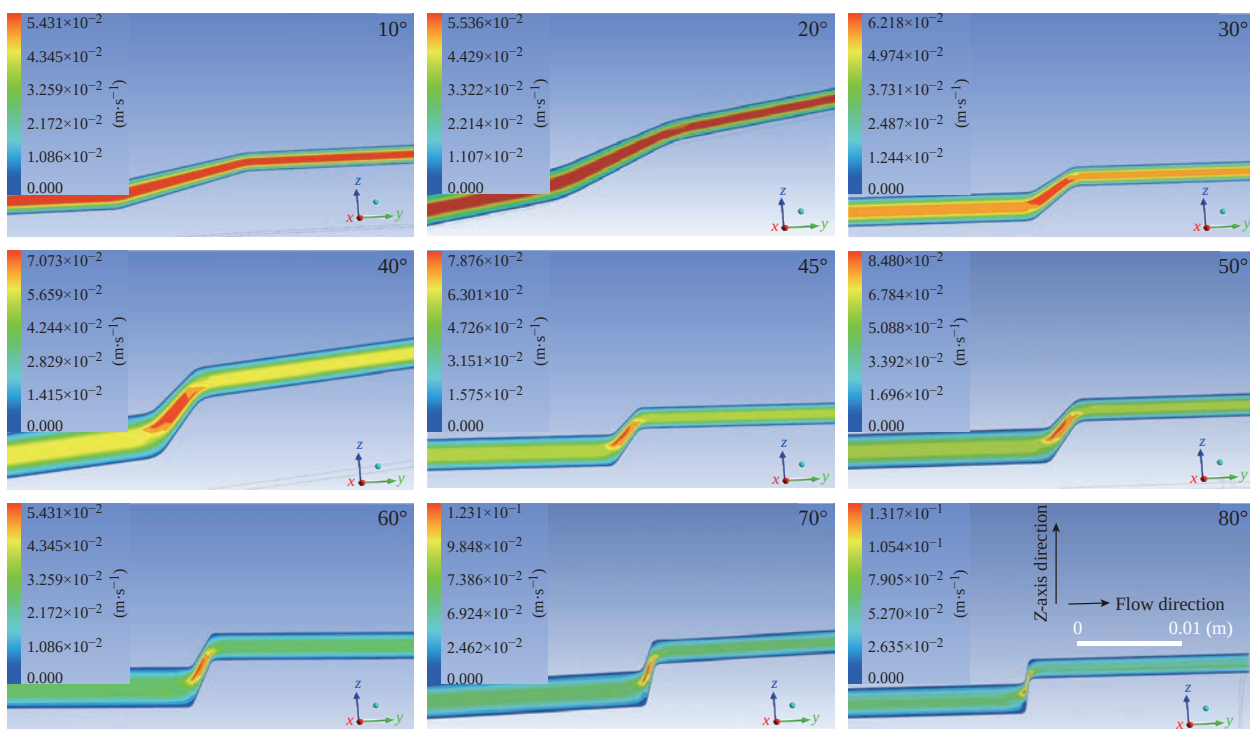


图7 速度模拟结果

Figure 7 The simulation results of velocity

体的流动速率基本保持在5 cm/s左右,而速度的提升主要发生在管材扩张的部分,并且随着扩张的角度增大,速度增加越明显。究其原因,主要是由于挤出机流道变窄,内部流动压力变大,驱动熔体流动速率增加。

值得注意的是,在各个扩张角的流道扩张段中,拐角处的速度都会下降,在扩张角度为30°时,拐角处距离壁面0.8 mm处的速度为5 cm/s左右,而中心的流动速度约为6.2 cm/s;在扩张角度为45°时,拐角处距离壁面0.8 mm处的速度为4.5 cm/s,中心的流动速度约为7.9 cm/s;在扩张角度为80°时,拐角处距离壁面0.8 mm处的速度为3.9 cm/s,中心流动速度高达13.1 cm/s。可以看出,随着角度增加,拐角处熔体内部的流动速度与中心的最大流动速度的差距就越大,而这种速度的差距在分子的流动过程中,非常容易发生滞流和涡流现象,阻碍高分子熔体向前输送,导致制品质量降低,还可能造成高分子物料在拐角处长时间滞留而降解。因此,对于拐角处流速低于预制管挤出阶段熔体流速的扩张角设计,应不予考虑。

从图8中可以看出,当扩张角度大于40°时,熔体的滞流现象比较明显,后续的高速熔体受到低速熔体的阻挡而对低速熔体产生撞击,使低速

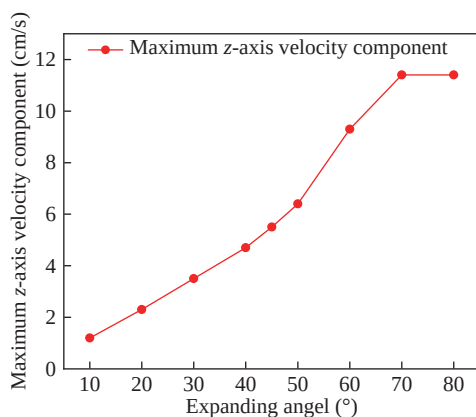


图8 各个扩张角度z方向的速度分量

Figure 8 Curve for simulation results of z-axis velocity component

的熔体在挤出机内产生旋转甚至逆向流动,影响挤出管材的质量。在大扩张角模拟结果中可以观察到z方向的速度分量为负值的情况,也可以证明上述这一观点。各个扩张角度机头熔体的中心流动速度和拐角处距离壁面0.8 mm处的速度如表3所示。

2.3 z方向的速度分量

不同扩张角度下熔体沿z方向的速度分量如图9所示,图中背景为流动速度场,箭头的颜色表示z方向速度分量的大小,箭头的方向表示此处

表3 速度结果

Table 3 Results of velocity

扩张角	距离壁面 0.8 mm 的 拐角处的熔体速度 (cm/s)	熔体中心 流动速度 (cm/s)
10°	5.200	5.431
20°	4.983	5.536
30°	4.974	6.218
40°	4.244	7.073
45°	3.938	7.876
50°	3.392	8.480
60°	3.236	10.790
70°	2.462	12.310
80°	2.635	13.170

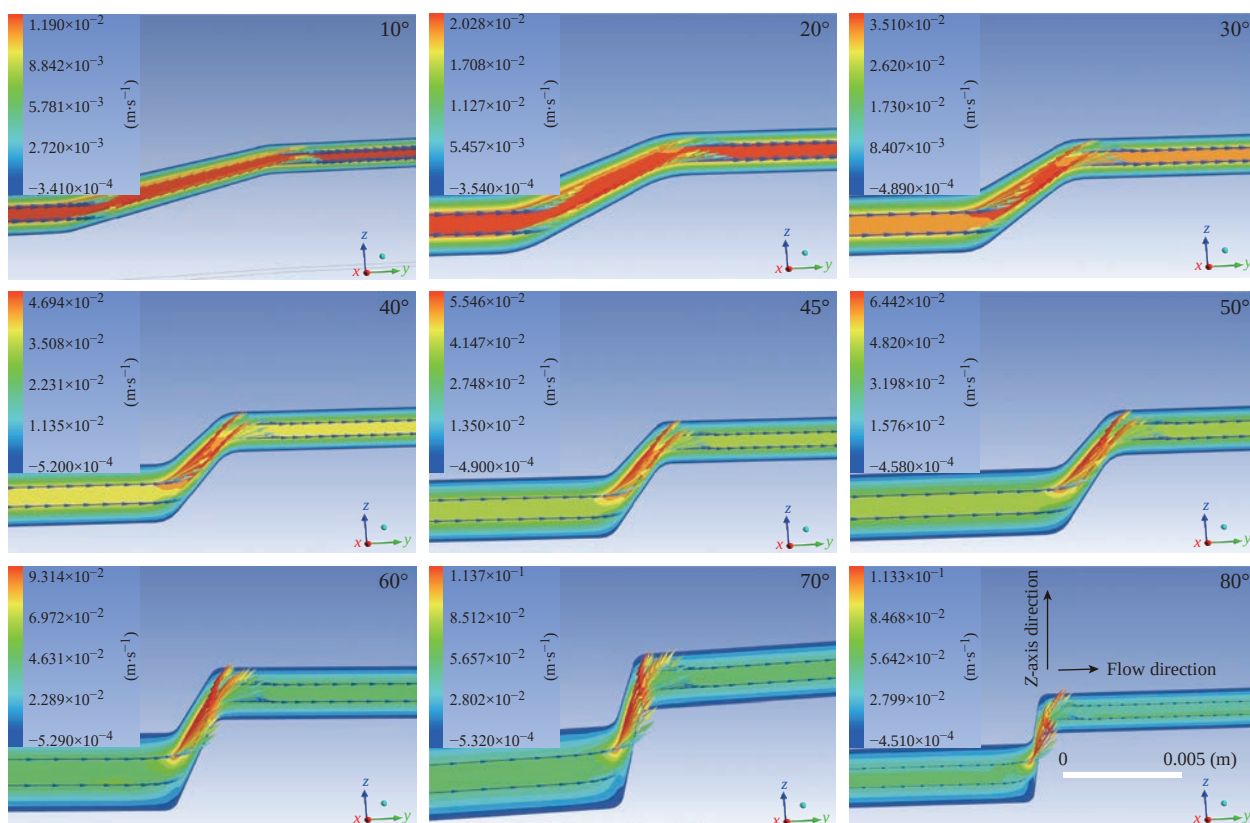
物料的流动方向,图中箭头颜色表示速度大小。观察发现随着扩张角度的增大,箭头颜色的变化也越来越快,变化范围越来越大,证明速度梯度产生较大变化,有利于分子链取向结构的形成。

在前期的挤出过程中,分子链和链段已经沿流动方向形成一定程度的短程有序结构,接着进入扩张段后,在垂直于轴向的力作用下,这些结构沿 z 方向运动并向外扩展,使原本处于弯曲或物理缠结状态的分子链得以拉伸,分子链有序

程度显著提高。特别注意的是,这种有序结构并非贯穿整个分子链,未形成规则结构的部分被埋在其他链中并相互纠缠。分子链之间的缠结可以防止取向链段在周向应力作用下发生剥离,从而改善了管道的性能。链条运动的示例如图10所示。

观察图9可以看出,在扩张角度较小时,流道的下部沿 z 方向的速度分量较高,而当扩张角度达到45°以后,流道的上部沿 z 方向的速度分量较高。这一现象可能与 z 方向速度分量的产生机制有关:该速度分量源于流道物理结构的变化,其充分发展需要一定的流动发展长度。随着扩张角的增大,流道越来越窄,速度提升所对应的位置也随之改变。进一步分析,如果最大的 z 方向速度分量出现在距离上壁面比较近的位置,那么分子链还来不及充分运动就与壁面接触,被壁面所阻碍,不利于有序结构的形成,所以扩张的角度也不宜过大。

综上所述,当扩张角为30°时,管材的环向增强效果最为理想,在这个扩张角度下,高分子熔体在扩张段具有比较高的 z 方向速度分量,可以

图9 z 轴速度分量的模拟结果Figure 9 The simulation results of z -axis velocity component

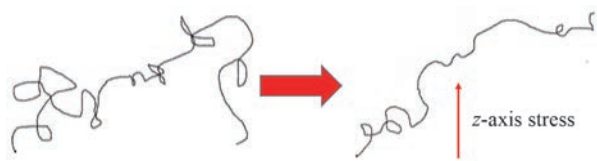


图 10 分子链运动示例

Figure 10 Schematic illustrating the orientation occur in the expansion zone

形成有效的有序结构,同时有效避免扩张前后熔体滞留现象的发生,从而保证制品的质量。此外,在成型段还可以形成比较厚的皮层,进一步提升高分子管材的轴向和环向抗应力能力。

3 多段式扩张挤出机机头的改进

根据模拟结果,对挤出机的机头进行了一定的改进。该分段式扩张结构可使熔体在流动过程中承受周期性受力,有利于 PPESK 熔体分子链的取向运动。改进后管材的初始内径为 4 mm,外径为 18 mm,最终扩张后的内径为 36 mm,外径为 40 mm。我们对该扩张方式的熔体进行建模,如图 11 所示。之后对 PPESK 熔体仍然采用 sweep 方式进行网格划分,生成结构化六面体单元,网格数量为 126636 个。在相同的条件下对熔体模型进行模拟,结果如图 12 所示。

模拟结果表明,每次扩张后壁面处的熔体剪切速率均有所提高,这同样有利于皮层增厚,进而提高高分子管材制品的性能。从流动速率分布



图 11 改进后挤出机机头中熔体三维模型示意图

Figure 11 Sketch illustrating 3D model of the melt in improved extruder head

上看,第一次扩张时,仅有少部分区域的熔体能达到比较高的流动速率,而进入第二段扩张处,达到较高流动速率的熔体区域逐渐增多,在最后一个扩张段,几乎整个扩张段内的熔体均以机头内的最高速度流动。这说明通过前 2 次扩张段的作用,在最后一个扩张段内流动的高分子熔体已经形成了很好的沿着流动方向的取向结构,分子链间的缠结与拖曳作用显著减弱。由于各段流道的截面积基本相同,可排除流道面积收缩导致速率变化的因素。这说明这种多段式的扩张方式有利于管材形成较多的有序结构,增强管材环向的抗压能力。

从 z 方向速度分量分布图中(图 12c)可以看出,各个扩张段均有较高的沿 z 方向的速度分量,这些速度分量对高分子熔体的取向流动起到了至关重要的作用。虽然随着挤出过程的进行, z 方向的速度分量有所减小,但是降幅较小,这可能与高分子熔体内有序结构增多有关,并且也与 z 方向速度分量形成位置距离壁面越来越远,分子链继续向外移动形成有序结构难度增加导致的。

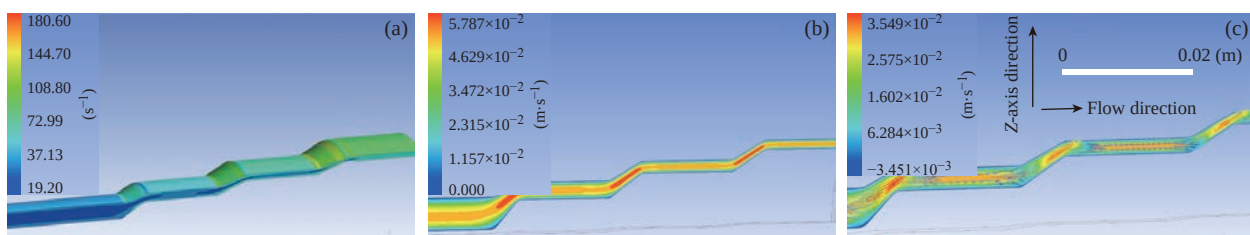
图 12 改进后挤出机机头模拟结果:(a)剪切速率模拟;(b)速度模拟;(c) z 轴速度分量模拟

Figure 12 Simulation results of improved extruder head: (a) shear rate; (b) velocity; (c) z -axis velocity component

4 结论

通过模拟针对设计的模块化结构管材环向增强挤出机机头进行分析,从局部剪切速率、速率分布以及 z 方向上的速度分量三个方面综合考虑,结果表明,扩张角度为 30° 时,机头对高分子熔体沿着轴向的有序结构形成有最佳的促进作用。根据该模拟结果,发现多段式增强结构的效果优于

单段式结构,模拟结果进一步表明,该增强方式对高分子熔体有序结构的形成具有显著的促进作用。

下一步,将选取若干典型扩张角度进行加工与制造,开展实验研究以验证模拟结果的准确性^[28]。此外,拟在芯棒中增设气体通路,将气体引入扩张段,以减少高分子熔体与内壁面之间的接触与摩擦,改善熔体流动状态,进一步提升挤

出机头对高分子管材制品环向抗压能力的增强效果。

参考文献

- 1 Qiao, Y.; Jia, H.; Zhang, Y.; Zhao, W. Q.; Zhang, E. M.; Zhang, S. H.; Jian, X. G.; Liu, C. Comprehensive evaluation of interfacial interactions optimization for CF reinforced high-performance thermoplastic composites by electrochemical deposition of conjugated polymers. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 258, 110863.
- 2 Huang, Y.; Gentle, C. R.; Lacey, M.; Prentice, P. Analysis and improvement of die design for the processing of extruded plastic pipes. *Mater. Des.*, **2000**, 21(5), 465–475.
- 3 Chen, K. Y.; Zhou, N. Q.; Liu, B.; Wen, S. P. Effect of vibration extrusion on the structure and properties of high-density polyethylene pipes. *Polym. Int.*, **2009**, 58(2), 117–123.
- 4 Pan, Y. X.; Gao, X. Q.; Lei, J.; Li, Z. M.; Shen, K. Z. Effect of different morphologies on the creep behavior of high-density polyethylene. *RSC Adv.*, **2016**, 6(5), 3470–3479.
- 5 皮林, 聂敏, 王琪. 芯棒几何结构对旋转挤出聚乙烯管结构和性能的影响. *塑料工业*, **2016**, 44(5), 84–87.
- 6 王中武, 胡娟, 高雪芹, 邓聪, 申开智. 振动挤出对 HDPE/碳纤维复合材料流变行为和性能的影响. *塑料科技*, **2012**, 40(10), 31–35.
- 7 Fridman, M. L.; Peshkovsky, S. L.; Vinogradov, G. V. The rheology of thermoplastics under conditions of spiral flow and vibrations on extrusion. *Polym. Eng. Sci.*, **1981**, 21(12), 755–767.
- 8 Zhou, H. C.; Jiang, Z.; Li, W. C.; Wang, G. L.; Tu, Y. J. Optimal design for an extruder head runner based on response surface method and simulated annealing algorithm. *Int. J. Polym. Sci.*, **2018**, 2018(1), 7239618.
- 9 Zhao, F.; Zhou, B.; Zhu, X. X.; Wang, H. J. A novel viscoelastic constitutive model of multi-shape memory polymer. *Mech. Adv. Mater. Struct.*, **2024**, 31(20), 4955–4968.
- 10 Mrkvickova, L.; Danhelka, J.; Eeeevlcek, P. Characterization of poly(2-ethylhexyl acrylate). *Polym. Commun.*, **1990**, 31, 416–417.
- 11 Arpin, B.; Lafleur, P. G.; Sanschagrin, B. A personal computer software program for coathanger die simulation. *Polym. Eng. Sci.*, **1994**, 34(8), 657–664.
- 12 Lang, U.; Michaeli, W. Development of a mathematical model for the calculation of the pressure drop in extrusion dies. *J. Reinf. Plast. Compos.*, **1998**, 17(12), 1110–1118.
- 13 Yu, Y. W.; Liu, T. J.; Hsu, C. L.; Yang, Y. S. A hybrid 3D/2D finite element technique for polymer processing operations. *Polym. Eng. Sci.*, **1999**, 39(1), 44–54.
- 14 Zhang, X. M.; Zhai, L. Z.; Li, H. B.; Qi, G. Q.; Gao, X.; Yang, W. H. Molecular simulation study on the hydrogen permeation behavior and mechanism of common polymers. *Polymers*, **2024**, 16(7), 953.
- 15 Ding, X. X.; Gu, Z. W.; Hou, X. N.; Xia, M.; Ismail, Y.; Ye, J. Q. Effects of defects on the transverse mechanical response of unidirectional fibre-reinforced polymers: DEM simulation and deep learning prediction. *Compos. Struct.*, **2023**, 321, 117301.
- 16 Pan, X. T.; Wang, C. H.; Gu, H. J.; Liu, Q.; Jia, Y. C.; Yang, J. L.; Pan, Y. X.; Jian, X. G. Evolution of condensed structural and mechanical behavior in high-viscosity amorphous/semicrystalline PPESK/PEKK blends. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2025**, 7(13), 8581–8596.
- 17 Schneider, T.; Colton, M. F.; McCauley, K. M.; Maia, J. Microlayer and nanolayer tubing and piping via layer multiplication coextrusion. II. Rheologically mismatched systems. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2020**, 137(20), 48684.
- 18 Khezzar, L.; Filali, A.; AlShehhi, M. Flow and heat transfer of FENE-P fluids in ducts of various shapes: effect of Newtonian solvent contribution. *J. Non Newton. Fluid Mech.*, **2014**, 207, 7–20.
- 19 Kfuri, S. L. D.; Silva, J. Q.; Soares, E. J.; Thompson, R. L. Friction losses for power-law and viscoplastic materials in an entrance of a tube and an abrupt contraction. *J. Petrol. Sci. Eng.*, **2011**, 76(3–4), 224–235.
- 20 Young, R. J. Screw dislocation model for yield in polyethylene. *Materials Forum*, **1988**, 11: 210–216.
- 21 Gu, H. J.; Hu, Y. L.; Fan, K. Y.; Liu, B. G.; Wang, D. H.; Dong, S. Y.; Dong, X. B.; Pan, X. T.; Pan, Y. X.; Song, C.; Liu, C.; Jian, X. G. High-performance poly(aryl ether sulfone ketone)s with balanced heat resistant and solution processability by side-phenyl-modified bisphthalazinone moieties. *Eur. Polym. J.*, **2025**, 239, 114285.
- 22 Gu, H. J.; Hu, Y. L.; Fan, K. Y.; Liu, B. G.; Zhou, H. M.; Chen, X.; Wang, D. H.; Chen, Y. S.; Liu, C.; Pan, Y. X.; Song, C.; Jian, X. G. Synthesis of poly(bisphthalazinone sulfone ketone)s for long-term use above 300 °C with excellent environmental aging resistance, solvent recyclability, and intrinsic flame retardancy. *Macromolecules*, **2025**, 58(23), 12798–12814.
- 23 Zhao, W. Q.; Jia, H.; Qiao, Y.; Zhang, Y.; Wu, J. Y.; Jian, X. G.; Liu, C. Enhancing interfacial locking of the CF and PBPEK resin by *in-situ* electrochemical deposition of MOF nanoparticles. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 288, 111888.
- 24 Sakai, T. Screw extrusion technology: past, present and

- future. *Polimery*, **2013**, 58(11/12), 847–857.
- 25 Zhuang, J.; Wang, M. J.; Yu, T. M. Study on the effects of wall slip on melt filling flow in micro injection molding. *China Mechanical Engineering*, **2007**, 18(16): 1995–1999.
- 26 Pantani, R. Validation of a model to predict birefringence in injection molding. *Eur. Polym. J.*, **2005**, 41(7), 1484–1492.
- 27 杨晓东, 刘保臣, 刘春太, 赵振峰, 申长雨. 高分子聚合物熔体 Cross 黏度模型的改进. *高分子材料科学与工程*, **2010**, 26(11), 172–174.
- 28 Kim, S. W.; Jeon, B. G.; Hahm, D.; Kim, M. Failure behavior for the thickness change of pipe elbows in nuclear power plant piping system. *Int. J. Press. Vessels Pip.*, **2025**, 218, 105626.
- 29 Pan, X. T.; Pan, Y. X.; Zhao, H. Y.; Liu, C.; Zeng, W. G.; Guo, Y. J.; Song, C.; Jian, X. G. Annular expansion for enhanced orientation and mechanical properties of extruded amorphous PPESK/PES pipes. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, 141(18), e55326.