

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.03.012

PVC-U 挤出机头各参数对熔体流动的影响

于玉真¹, 赵博¹, 邸海宽¹, 王璐¹, 李伟², 张建平²

(1. 华北理工大学机械工程学院, 河北唐山 063210; 2. 唐山龙泉机械有限公司, 河北唐山 036306)

摘要:以聚氯乙烯(PVC-U)挤出机头为研究对象,运用ANSYS有限元软件,针对熔体在流道内等温流动过程进行数值模拟,研究流道的成型段长度、压缩段长度、压缩角以及扩张角等对熔体流动的影响情况。数值分析结果表明,随着成型段长度的增加,熔体的压降、速度及出口速度均减小,在长度为60 mm时,出口速度最大;随着压缩段长度的增加,熔体的压降、速度及出口速度均增大,在长度为210 mm时,速度变化最明显;随着压缩角的增大,熔体的压降、速度及出口速度均增大,压缩角为30°时,变化最小;而扩张角在66°~78°时,随着扩张角的增大,熔体的速度、压降及出口速度均变化不大。研究结果为管材挤出机头的设计提供了理论依据。

关键词: PVC-U; 挤出; 有限元; 机头流道; 数值模拟; 优化设计

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)03-0066-06

Influence of Various Parameters of PVC-U Tube Extrusion Head on Melt Flow

Yu Yuzhen¹, Zhao Bo¹, Di Haikuan¹, Wang Lu¹, Li Wei², Zhang Jianping²

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Tangshan Longquan Machinery Co. Ltd., Tangshan 036306, China)

Abstract: With rigid PVC (PVC-U) extruder head as the research object, the finite element software ANSYS was used to simulate the isothermal flow process of melt in the flow passage, and the influence of the flow passage forming section length, compression section length, compression angle and expansion angle on melt flow was studied. The numerical analysis results show that the pressure drop, velocity and outlet velocity of the melt decrease with the increase of the length of the forming section. As the length of the compression section increases, the pressure drop, velocity and outlet velocity of the melt all increase. When the length is 210 mm, the velocity changes most obviously. With the increase of the compression angle, the melt pressure drop, velocity and outlet velocity all increased. When the expansion angle is between 66° and 78°, the melt velocity, pressure drop and exit velocity all change little as the expansion angle increases. The study provides a theoretical basis for the design of tube extrusion head.

Keywords: PVC-U; extrusion; finite element; head stream; numerical simulation; optimal design

硬质聚氯乙烯(PVC-U)管材是一种以PVC树脂为主要原料,同时也是不掺加增塑剂的塑料管材,兼具质量轻、耐腐蚀、水流阻力小等优点,已被广泛应用于城市供、排水等方面^[1-3]。目前PVC-U排水排污管产品,由于机头模具结构多年未有改变,已不能满足市场的需求。同时,随着设备的不断升级,模具虽能满足生产要求,但产品性能要求逐渐提高,特别是管材冲击性能达标率低,增加了产品售后风险。

因此,为了加强管材的生产质量及提高生产效率,并且针对熔体在管材挤出机头中的流动进行研究,分析不同挤出机头结构参数对流道流场性能的影响,这都已成为设计工作中亟待解决的问题。

随着计算机辅助计算方法不断发展,2008年,辛辛那提公司^[4]对螺旋芯棒模具进行了创新优化,在其内部创新地融入了冷却系统,使模具的内部冷却成为现实。2009年,郝春燕等^[5]利用软件模拟

基金项目: 河北省省级专业学位教学案例(库)项目(KCJSZ2018059)

通讯作者: 于玉真,博士,教授,主要研究方向为弹塑性有限元仿真 E-mail: yu_yuzhen@163.com

收稿日期: 2019-12-24

引用格式: 于玉真,赵博,邸海宽,等. PVC-U挤出机头各参数对熔体流动的影响[J]. 工程塑料应用,2020,48(3):66-71.

Yu Yuzhen, Zhao Bo, Di Haikuan, et al. Influence of various parameters of PVC-U tube extrusion head on melt flow[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3):66-71.

分析了直角机头流道内熔体的流动过程。2012 年,陈俊^[6]在直通式管材的基础上进行了优化,增强了管材的密实度,改善和提高了物料的塑化性能和挤出稳定性。2015 年,陈开源^[7]模拟了螺旋芯棒式管材机头,根据分析结果优化了螺旋芯棒式管材机头的主要结构参数,从而提高了管材的质量和稳定性。2018 年,阮杨等^[8]运用有限元软件模拟机头流道,分析出机头入口与压缩段之间对熔体在此过程中流动的影响。

近年来运用有限元软件研究 PVC-U 管材挤出机头已成为一种主流的设计优化方法,一般是以挤出机头为研究对象,通过改变各参数来分析机头流道受到的影响。笔者运用有限元软件中的 Fluent 对挤出机头流道进行数值模拟,以此分析不同机头结构参数对流道流场的影响,从而得出机头各参数对熔体流动特性的影响规律。

1 有限元建模方法

1.1 物理模型

PVC-U 管材挤出机头流道物理模型如图 1 所示,是由入口段、扩张段、分流段、压缩段和成型段组成,其中分流段单独设有分流筋。熔体通过挤出机头的入口段进入,流过分流器后变为薄环状,在分流筋的影响下变成数股料流,受到压缩段施加的压力后,增强了塑化性能,最后流经成型段后生成管材。

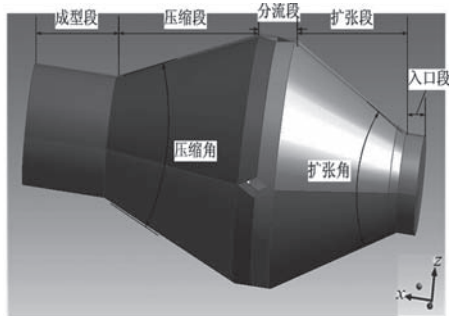


图 1 管材挤出机头流道模型

1.2 数学模型

分析过程采用幂律流体模型,为简化实际工况并建立数学模型,在满足工程要求前提下,对实际过程做如下假设^[9-11]:①流体为非牛顿黏性不可压缩流体;②流场为稳定及等温;③忽略惯性力与重力等体积力;④认为机头流道壁面无滑移以及流动为层流流动。

管材挤出机头中熔体的流动过程遵守三大基本物理定律,根据上述假设以及三大定律确定流体

的基本方程和本构方程,作为机头流道模拟的理论基础^[12-13]。

(1) 基本方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中: v_x, v_y, v_z 分别为 x, y, z 方向上的速度。

动量方程:

$$x \text{ 分量: } -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$y \text{ 分量: } -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$z \text{ 分量: } -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: P 为压力; τ_{ij} 为直角坐标系下的应力分量,其中 i, j 分别代表 x, y, z 。

能量方程:

$$\rho c \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \Phi \quad (5)$$

式中: $\rho c \frac{DT}{Dt}$ 为单位时间内单元体积的热量变化量;

$\lambda \nabla^2 T$ 为热源产生的能量变化; Φ 为温度的变化及相应的摩擦黏性热效应。

(2) 本构方程。

$$\tau = m |\dot{\gamma}|^{n-1} \dot{\gamma} \quad (6)$$

式中: τ 为剪切应力; m 为稠度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; n 为幂律指数。

1.3 管材挤出机头口模设计

(1) 成型段长度 (L_1)。

L_1 与塑料性质、壁厚、直径大小及牵引时的速度有关。 L_1 的数值可以根据外径 (d) 或者壁厚 (t) 来确定。

$$L_1 = (0.5 \sim 3) d \text{ 或 } L_1 = (18 \sim 33) t \quad (7)$$

(2) 压缩段长度 (L_2)。

L_2 的数值可以根据过滤板出口处的流道直径 (D) 大小来确定。

$$L_2 = (1.5 \sim 2.5) D \quad (8)$$

1.4 网格划分

用 ANSYS 有限元分析软件对挤出机头模型进行网格划分,依据其流道组合的几何特点,将流道划分成若干个达到研究要求的个体。针对成型段以及压缩段处的流道厚度,选择的是边尺寸控制,可以划

分成5层。由于扩张段处具有不规则几何体,将其划分成四面体单元,其余的部分都划分为六面体单元。生成好后的网格如图2所示,它有34.2万个单元和18.3万个节点。

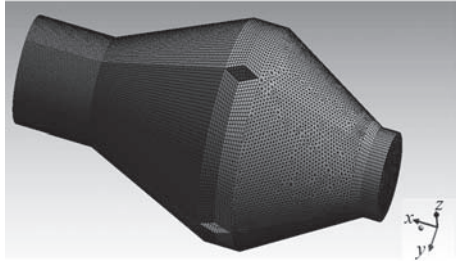


图2 管材挤出机头流道模型网格划分

1.5 边界条件

管材所用到的材料主要为PVC,它的密度为 1.36 g/cm^3 ,黏度为 $25720 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。边界条件如下:

入口边界,采用压力入口,入口压力取 12 MPa ;

出口边界,采用压力出口,出口压力为 0 MPa ;

壁面边界,机头流道壁面可以定义为无滑移,在模壁接触面上,熔体的速度设置为 0 。

2 模拟结果及分析

为了研究机头各参数对流道流场和挤出均匀性的直接或间接影响,选用了模型中的成型段长度 L_1 、压缩段长度 L_2 、压缩角 (β) 和扩张角 (α) ,并且针对机头流道内压力和速度分布的影响进行了数值计算。

2.1 成型段长度对流场的影响

(1) 参数变化值。

以管材直径 110 mm ,壁厚 3.2 mm 的管材机头流道为例,根据公式(7)可知 L_1 的取值范围为 $57.6 \sim 105.6 \text{ mm}$ 。管材挤出机头流道其它几何参数见表1,根据经验对 L_1 进行取值,结果见表2。

表1 管材机头流道几何尺寸

项目	数值	项目	数值
入口外径/mm	90	扩张段长度/mm	130
出口外径/mm	110	$\beta/(\circ)$	42
L_2/mm	150	$\alpha/(\circ)$	66
分流段长度/mm	40	入口段长度/mm	20

表2 L_1 的取值

项目	模型号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
L_1	60	75	90	105

(2) 压力场分析。

由于机头部分的压力损失主要集中在压缩段

末与成型段上,所以用成型段为研究对象,绘制出不同成型段长度 L_1 时,成型段内的压降曲线对比见图3。从图3可以看出,随着 L_1 的增加,机头流道成型段内的压降越小,说明速度越小,管材挤出时机头部分所需要的能量越少。

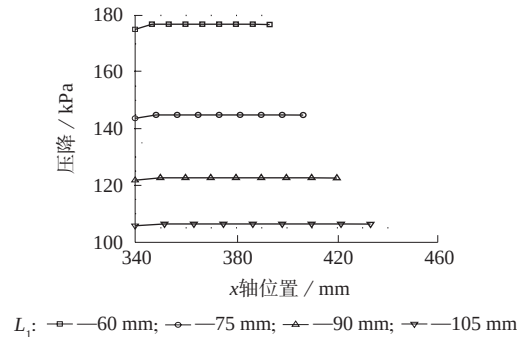


图3 不同成型段长度时成型段压降

(3) 速度场分析。

不同成型段长度 L_1 时,成型段内沿挤出方向上的中间层速度变化曲线见图4。从图4可以看出,不同 L_1 时,熔体速度在成型段中间层截面上有相同的变化趋势:由于熔体经过压缩段的加压,速度逐渐增加,在进入成型段时,熔体速度继续增加,随后趋于平缓,到成型段末端后,熔体速度有轻微下降。随着 L_1 增加,熔体在成型段的速度越小,熔体速度趋于平缓时的长度越长,速度变化值越小。

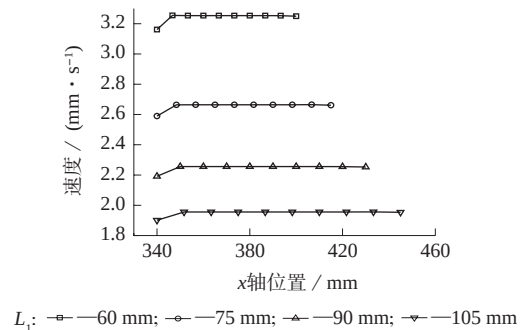


图4 不同成型段长度时成型段速度

图5为不同成型段长度 L_1 时流道出口截面上沿半径方向速度曲线的对比。从图5可以看出, L_1 对出口速度的影响主要体现在出口中线周围,当 L_1 为 60 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 3.24 mm/s ;随着 L_1 的增加,熔体速度随之降低,当 L_1 增加至 105 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 1.95 mm/s 。

2.2 压缩段长度对流场的影响

(1) 参数变化值。

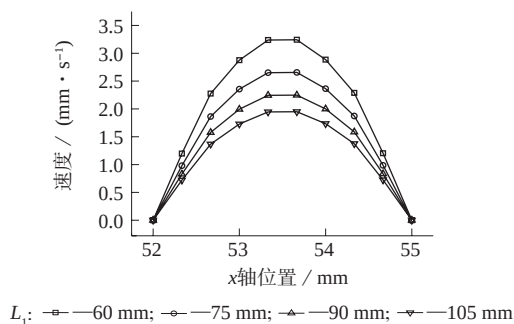


图5 不同成型段长度时出口速度

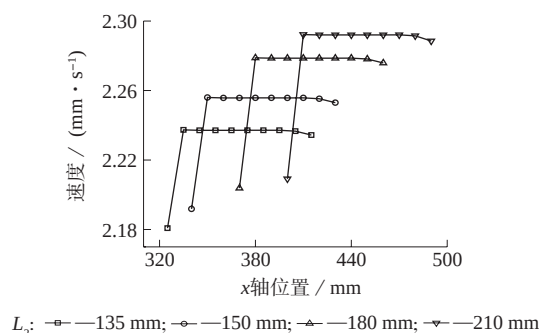


图7 不同压缩段长度时成型段速度

在模拟计算中,分析不同压缩段长度 L_2 对流场的影响时,成型段长度 L_1 选取 90 mm,根据公式(8)可知 L_2 的取值范围为 135 ~ 225 mm,根据经验取值见表 3,其它参数与表 1 一致。

表 3 L_2 的取值

项目	模型号			
	5 [#]	3 [#]	6 [#]	7 [#]
L_2	135	150	180	210

(2) 压力场分析。

不同压缩型段长度 L_2 时,成型段内的压降曲线见图 6。从图 6 可以看出,随着 L_2 的增加,成型段内的压降越大,说明速度越大,管材挤出时机头部分所需要的能量越多。

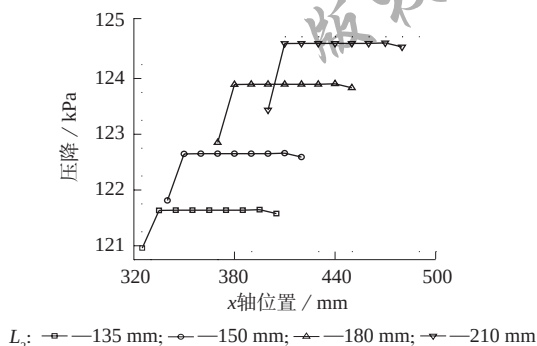


图6 不同压缩段长度时的成型段压降

(3) 速度场分析。

不同压缩段长度 L_2 时,成型段内沿挤出方向上的中间层速度曲线见图 7。从图 7 可以看出,不同 L_2 时,熔体速度在成型段中间层截面上有相同的变化趋势。随着 L_2 的增加,熔体在成型段的速度增大,熔体速度趋于平缓时的长度越长,速度变化值越大。

图 8 为不同压缩段长度 L_2 时流道出口截面上沿半径方向速度曲线。从图 8 可看出, L_2 对出口速度的影响很小。当 L_2 为 135 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 2.24 mm/s;随着 L_2 增

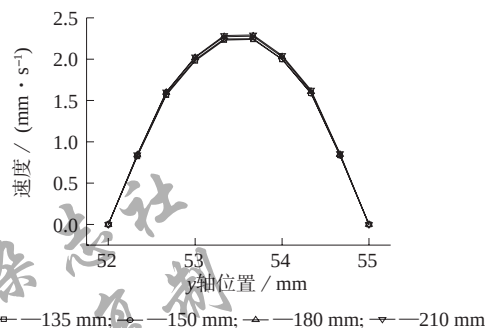


图8 不同压缩段长度时出口速度

加,熔体速度随之增大,当 L_2 增大到 210 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 2.3 mm/s。

2.3 压缩角对流场的影响

(1) 参数变化值。

在模拟计算中,成型段长度 L_1 选取 90 mm,压缩角 β 一般取 30° ~ 60°,根据经验取值见表 4,其它参数与表 1 一致。

表 4 β 的取值

项目	模型号				
	8 [#]	9 [#]	3 [#]	10 [#]	11 [#]
β	30	36	42	48	54

(2) 压力场分析。

不同压缩角 β 时,成型段内的压降曲线对比见图 9。从图 9 可以看出,随着 β 的增加,机头流道成

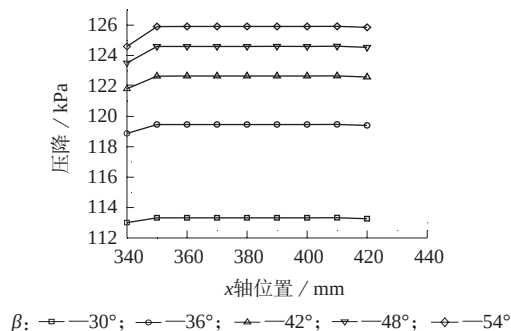


图9 不同压缩角时成型段压降

型段内的压降越大,增大程度越来越小,说明速度越大,管材挤出时机头部分所需要的能量越多。

(3) 速度场分析。

不同压缩角 β 时成型段内沿挤出方向上的中间层速度变化曲线对比见图10。从图10可以看出,不同 β 时,熔体速度在成型段中间层截面上有相同的变化趋势。 β 越大,熔体在成型段的速度越大,在成型段开端的速度变化值越大。

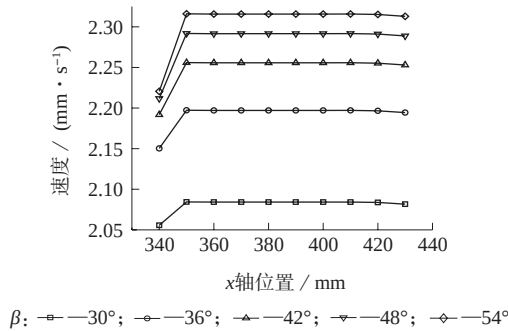


图10 不同压缩角时成型段速度

图11为不同压缩角 β 时流道出口截面上沿半径方向速度曲线的对比。从图11可以看出, β 对出口速度的影响主要体现在出口中线周围,当 β 为30°时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为2.08 mm/s;随着 β 的增大,熔体速度随之增大,当 β 增大到54°时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为2.32 mm/s。

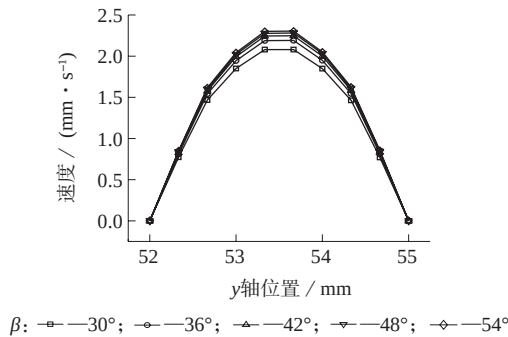


图11 不同压缩角时出口速度

2.4 扩张角对流场的影响

(1) 参数变化值。

在模拟计算中,成型段长度 L_1 选取90 mm,扩张角 α 的取值范围为60°~80°,根据经验取值见表5,其它参数与表1一致。

表5 α 的取值 (°)

项目	模型号			
	12 [#]	3 [#]	13 [#]	14 [#]
α	60	66	72	78

(2) 压力场分析。

不同扩张角 α 时,成型段内的压力降曲线对比见图12。从图12可以看出,随着 α 的增加,机头流道成型段内的压降越小,说明速度越小,管材挤出时机头部分所需要的能量越少。

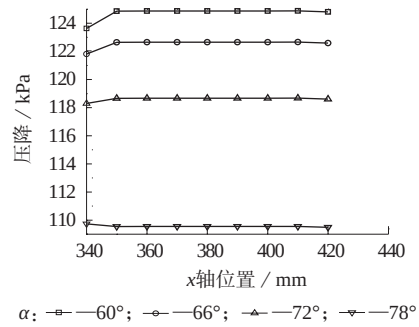


图12 不同扩张角时成型段压降

(3) 速度场分析。

不同扩张角 α 时,成型段内沿挤出方向上的中间层速度变化曲线对比见图13。从图13可以看出,不同 α 时,熔体速度在成型段中间层截面上有相同的变化趋势。 α 越大,熔体在成型段的速度越小,在成型段开端的速度变化值越小。

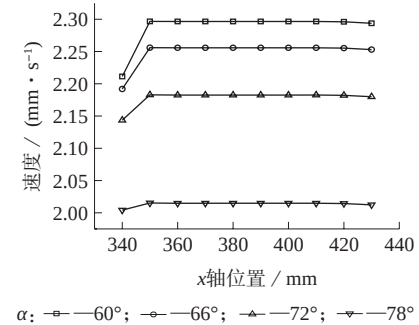


图13 不同扩张角时成型段速度

图14为不同扩张角 α 时流道出口截面上沿半径方向速度曲线的对比。从图14可以看出, α 对出

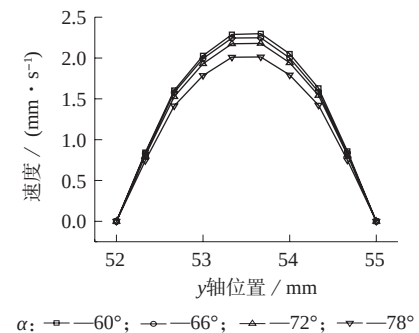


图14 不同扩张角时出口速度

口速度的影响主要体现在出口中线周围,由于假设的壁面边界速度为零,所以靠近两边的位置速度越来越小,最终趋于零。当 α 为 60° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 2.30 mm/s ;随着 α 的增大,熔体速度随之降低,当 α 增大到 78° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 2.01 mm/s 。

3 结论

(1) 成型段长度 L_1 越长,成型段内的压降越小,消耗的能量也就越少,熔体在成型段内的速度越小,挤出速度越均匀。当 L_1 为 60 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 3.24 mm/s ;当 L_1 增加至 105 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 1.95 mm/s 。采用合适的 L_1 有利于提高熔体的流动均匀性和挤出速度。

(2) 压缩段长度 L_2 越长,成型段内的压降越大,速度值越大,挤出均匀性越差。当 L_2 为 135 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 2.24 mm/s ;当 L_2 增大到 210 mm 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 2.3 mm/s 。合适的 L_2 可以有效提高熔体的挤出均匀性。

(3) 随着压缩角 β 的增大,机头流道内的熔体速度增加,当 β 为 30° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 2.08 mm/s ;当 β 增大到 54° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 2.32 mm/s 。而熔体的挤出均匀性有轻微的降低,熔体速度的突变位置向机头出口方向移动,但对机头流道内的压力分布影响不大。

(4) 增大扩张角 α 会提高机头流道内成型段的压降,降低熔体速度,当 α 为 60° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最大,为 2.30 mm/s ;当 α 增大到 78° 时,熔体在出口截面上的最大速度值最小,为 2.01 mm/s ,但是对整体压力分布影响不大。

参考文献

- [1] 马建华,郑化安,王小宪,等. PVC-U管材的技术现状和发展趋势[J]. 聚氯乙烯,2017,45(9):7-10.
Ma Jianhua, Zheng Huanan, Wang Xiaoxian, et al. Technical status and development trend of PVC-U pipes[J]. Polyvinyl Chloride, 2017,45(9):7-10.
- [2] 孙晋,华晔,者东梅,等. 挤出工艺对聚乙烯管材残余应力分布的影响[J]. 中国塑料,2019,33(5):56-60.
Sun Jin, Hua Ye, Zhe Dongmei, et al. Effect of extrusion processing on residual stress distribution of polyethylene pipe[J]. China Plastics, 2019,33(5):56-60.
- [3] Buick J M. Lattice Boltzmann simulation of power-law fluid flow in the mixing section of a single-screw extruder[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(1):52-58.
- [4] 杨超美. 管材生产领域的巨大突破[J]. 国外塑料,2008,26(12):60-61.
Yang Chaomei. A huge breakthrough in the field of pipe production[J]. World Plastics, 2008,26(12):60-61.
- [5] 郝春燕,董传涛,张振扬. 直角机头流道结构参数对流动平衡的影响[J]. 橡塑技术与装备,2009,35(1):1-7.
Hao Chunyan, Dong Chuantao, Zhang Zhenyang. Influence of structural parameters of T die to the flow balance[J]. China Rubber / Plastics Technology and Equipment, 2009,35(1):1-7.
- [6] 陈俊. 带阻流装置的管材机头设计[J]. 塑料制造,2012(6):85-87.
Chen Jun. Blocking device with head pipe design[J]. Mould Design, 2012(6):85-87.
- [7] 陈开源. 螺旋芯棒式管材机头的优化设计[J]. 机械工程师, 2015(7):121-123.
Chen Kaiyuan. Optimal design of spiral mandrel die for pipe[J]. Mechanical Engineer, 2015(7):121-123.
- [8] 阮杨,宋稼祺. 机头流道结构对管材挤出成型的影响[J]. 山东工业技术,2018(15):9-10.
Ruan Yang, Song Jiaqi. Influence of nozzle runner structure on pipe extrusion molding[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(15):9-10.
- [9] 张礼华,贾辉,邱建成. 微层挤出机头的流道建模与仿真研究[J]. 塑料工业,2018,46(1):37-39.
Zhang Lihua, Jia Hui, Qiu Jiancheng. The finite element simulation and optimization of the runner for micro-layer extrusion blow molding head[J]. China Plastics Industry, 2018,46(1):37-39.
- [10] Kolosov A E, Sakharov A S, Sidorov D E, et al. Aspects of profile shaping of corrugated tubular components part 3: Extrusion shaping of tubular polymeric blanks for manufacture of corrugated pipes[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2012, 48(3-4):199-206.
- [11] Kolutawong C, Giacomini A J, Nontakaew U. Viscous dissipation in plastic pipe extrusion[J]. Polymer Engineering and Science, 2013,53(10-11).doi:10.1002/pen.23464.
- [12] 傅志红,刘卫,易琪,等. 微通道塑料薄膜挤出机头流道优化及整体设计[J]. 塑料,2017,46(2):106-109.
Fu Zhihong, Liu Wei, Yi Qi, et al. Optimization of flow channel and integral design for the extrusion die of microcapillary film[J]. Plastics, 2017,46(2):106-109.
- [13] 于玉真,王璐,邸海宽,等. PVC-U管材挤出机头流道优化设计[J]. 工程塑料应用,2019,47(3):60-64.
Yu Yuzhen, Wang Lu, Di Haikuan, et al. Optimization design of head flow channel for PVC-U pipe extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2019,47(3):60-64.