

芯棒式管材挤出机头的流动模拟分析

邹武 唐跃

郝永亮

(青岛科技大学机电学院, 青岛 266061) (青岛产品质量监督检验所, 青岛 266101)

摘要 以实测高密度聚乙烯(HDPE)的性能参数为基础,提出了以挤出口模壁面附近的剪切速率、壁面附近的熔体流动速度与管中心熔体流动速度之比值来描述速度变化、用压力梯度描述压力变化的观点,采用 Ansys、Matlab 软件对芯棒式管材机头中挤出 HDPE 薄壁管的成型过程进行了模拟,并系统地描述、分析了成型段的长度及入口压力、入口速度发生变化时对成型段上的速度分布和压力分布的影响,得到了成型段长厚比与入口压力的优化值。

关键词 高密度聚乙烯 管材 挤出 剪切速率 压力梯度 模拟分析

在挤出成型过程中,物料特性及口模的结构极大地影响着挤出制品的质量。其中挤出口模是挤出成型的关键装置,模头流道的几何形状和尺寸决定了塑料熔体在模头内的流动状态,直接影响着挤出制品的质量和生产效率。

如果采用相对先进的生产技术生产的塑料管材合格率偏低,其中有一部分原因是由于模具结构不合理、加工和生产工艺控制不当引起密度、壁厚、环柔性、环刚度等不合格而造成的^[1-3]。塑料材料性能的复杂性决定了挤出成型过程的复杂性,有些挤出成型问题即使有经验的模具设计师也很难把握;管材的内在质量主要取决于塑料在挤出成型过程的流动行为,这就需要了解管材成型过程中各参数间相互影响的规律,从而对口模结构及成型加工工艺进行优化,因此很有必要对管材成型过程进行量化分析,通过模拟计算可以快速了解物料在口模内的变化规律,为设计者提供准确的参考数据。

笔者利用 Ansys 软件对在芯棒式口模中挤出高密度聚乙烯(HDPE)薄壁管材的过程进行了系统模拟分析,然后利用 Matlab 软件对这些结果数据进行了分析处理,清楚地描述了管材成型过程中各参数间相互影响的规律。

1 实验部分

1.1 原材料

HDPE: DGDB2480, 熔体流动速率(MFR)为 12.6 g/10 min(采用 GB/T 3682-2000 测得),密度为 0.961 g/cm³, 齐鲁石化公司。

1.2 实验设备

流变仪: Rosand Precision Rheometer C-VOR 型, 英国 Bohlin 仪器公司。

1.3 材料数据

HDPE 熔体的本构方程采用幂律模型,在熔体

温度为 190℃ 时,其稠度指数 $m = 1.21 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 测定幂律指数 $n = 0.42$,其它性能参数如表 1 所示。

表 1 DGDB2480 HDPE 的其它性能参数

热导率 / $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	比热容 / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	粘度 / $\text{kPa} \cdot \text{s}$	临界剪切速率 / $\dot{\gamma}_0 / \text{s}^{-1}$
0.481	2553	961	12.1	0.08

2 模拟分析

2.1 假设与模型

根据文献[4],当熔体温度在 190~220℃ 范围内变化时,可知:

(1) 在不同的剪切速率下,温度对熔融态 HDPE 的粘度影响较小;

(2) 在不同剪切速率下,温度对熔融态 HDPE 的非牛顿指数影响也较小。

因此,可以对该 HDPE 的挤出成型过程进行等温模拟分析。在综合考虑该 HDPE 的流变性质和挤出流动分析过程等因素的情况下,可以提出的假设为:①流体为幂律流体;②流场为等温流场,即某一横截面上流场各点温度一致(取平均温度);③流场为二维稳定轴对称流场,即流场分布和时间无关;④流体为粘性不可压缩流体;⑤流道壁面无滑移;⑥雷诺数较小,流动为层流流动;⑦惯性力、重力等体积力远小于粘滞力,可忽略不计。

根据以上假设,在 Ansys 中进行流动模拟分析为等温分析,故控制方程中只需考虑连续性方程和动量守恒方程的求解。

并采用 Ansys 中的幂律模型^[5]:

$$\text{当 } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0 \text{ 时, } \eta = \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\text{当 } \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0 \text{ 时, } \eta = \eta_0 \dot{\gamma}_0^{n-1}$$

式中: η ——粘度;

- η ——名义剪切粘度;
 γ_c ——临界剪切速率;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率;
 K ——稠度系数。

这些参数可由上述的数据来确定。现对公称直径为 0.022 m、厚度为 0.002 m 的 HDPE 管材挤出过程进行建模和流动分析。

2.2 有限元模型

在建立有限元模型时,从模具流道的结构和物料数学模型出发,并考虑流道的对称性和物料的流动规律来简化模型结构。由于该模具流道有轴对称的特点,在综合考虑建模效率、计算耗时及分析结果可靠性三大因素的情况下,采用了二维模型,用 Ansys 中二维 Fluid 141 单元关于 x 轴对称的行为来模拟分析流体在流道中的速度场和压力场的变化情况。考虑到流体在流道中以层流流动时壁面有很大的速度梯度,在对模型进行网格划分时采用了映射网格划分,并且网格密度从壁面到中心呈由密到疏的变化,其中管壁第一排单元节点距管壁的距离为 0.171 mm,如图 1 所示。

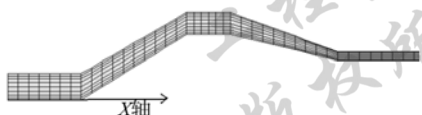


图 1 流道的有限元模型

3 结果与讨论

在 HDPE 管材的挤出成型过程中,能控制、测量的比较直观的物理量一般为压力、温度及流量(分析中流量可转化为流速来表示)。对于压力、速度来说,由于它们不但相互影响,而且还不同程度地受到塑料粘度、温度等其它一些因素的影响。如果在控制工艺条件时将这些影响因素全部考虑在内,就不能突出关键因素对成型工艺的影响,从而不能获得可行的成型工艺条件。对于挤出特定规格的管材,在模拟分析时可以固定某个物理量来观察它对其它物理量的影响,然后通过分析得到它对其它物理量的影响规律。这样在一定成型条件下对管材的成型工艺条件进行调节时才能把握影响成型时的主要因素,进行更有效的调节。

模拟中主要分析了成型段的长度、入口速度、入口压力这三个物理量相互影响的规律。在进行数据处理和分析时,由于设定的入口速度、入口压力或成型段长度有差别,若将分析的所有相关数据整合在

一张图表中,则会由于数据之间数量级的差别而引起图表曲线的“失真”。为了更清楚地在图表中描述各种条件下速度和压力的变化规律,使所得结果更具有通用性,对成型段长度及速度作了无量纲处理,即用成型段长度除以管壁厚度即长厚比(L/h)来表述成型段长度的变化,用壁面附近的熔体流动速度与管中心的熔体流动速度之比(以下简化为“管壁附近速度与中心速度”)来描述速度的变化。当了解了剪切速率大小和壁面附近速度后,很容易推知成型段出口断面速度(以下简化为“出口速度”)的大致分布情况。其次,由于在成型段中压力一般呈线性变化,当已知出口压力和成型段长度的情况下,根据成型段压力梯度的大小较容易得知成型段长度上某点大致的压力。因此对压力变化进行分析时,就用压力梯度的变化来表示压力变化的趋势。

3.1 成型段长度对成型段压力梯度及出口速度的影响

(1) 固定入口流量(这里用入口速度表示),分析成型段长度(用 L/h 表示)变化对成型段上的压力梯度和出口速度分布的影响。

根据挤出 HDPE 管材所测的实验数据^[4],并取入口速度为 0.05 m/s,成型段长度以步长为 $L/h = 5$ 增加时,计算的数据经数学处理后,得到 L/h 值与壁面附近(距壁面 0.171 mm)速度与中心速度之比的变化,如图 2 所示。成型段长度与壁面附近剪切速率的变化如图 3 所示。图 4 示出不同 L/h 值对成型段压力梯度的影响。

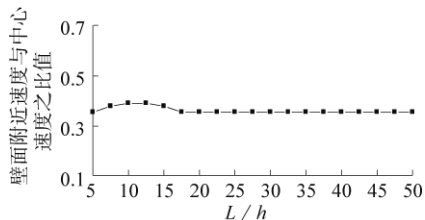


图 2 不同 L/h 值对壁面附近速度与中心速度之比的影响

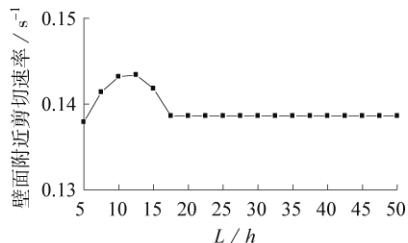


图 3 不同 L/h 值对壁面附近剪切速率的影响

从图 2 可以看出,在入口速度保持为 0.05 m/s

不变的情况下,若成型段长度较短时,壁面附近在成型段的流动很不稳定,这主要由入口效应所致,从而引起剪切速率不稳定,反映在图3中,即速度不稳定而导致剪切速率不稳定。而当成型段 L/h 足够大即 L/h 大于20时,成型段出口速度分布基本保持稳定。

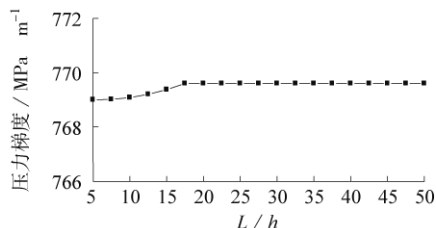


图4 不同 L/h 值对成型段压力梯度的影响

综合图2~图4可知,在保持一定的入口速度的情况下,要使熔融物料在狭窄通道的成型段上稳定地流动,必须使 L/h 值大于一个临界值。但是,并不是 L/h 值越大流动稳定性越好。 L/h 值越大,成型段长度越长,物料在机头中停留的时间相应地延长,而且成型段上的压力差也就越大,导致整个机头中的压力差增大,从而使消耗的能量增加。

(2) 固定入口压力,分析成型段长度变化对成型段上的压力梯度和出口速度分布的影响。

根据以往实验测量的入口压力范围,取入口压力为35 MPa进行分析。成型段的 L/h 值以步长为5增加,计算得到不同 L/h 值对壁面附近剪切速率的影响,如图5所示。图6为不同 L/h 值对壁面附近速度与中心速度之比的影响。图7为不同 L/h 值对成型段压力梯度的影响。

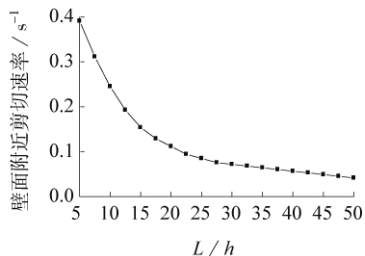


图5 不同 L/h 值对壁面附近剪切速率的影响

从图5、图6可以看出,在入口压力保持不变的情况下,当 L/h 值由小到大变化时,成型段出口速度曲线开始变化较大,然后趋于平稳。

由图5~图7可知,在入口压力保持一定的情况下,若 L/h 值过小,则在成型段上就会产生较大的压力差,使得成型段出口速度分布曲线形状不稳定;在 L/h 值增大到一定程度后,成型段上的压力梯度呈线性缓慢地变化,而且由于壁面附近的速度

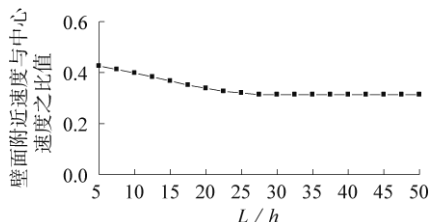


图6 不同 L/h 值对壁面附近速度与中心速度之比的影响

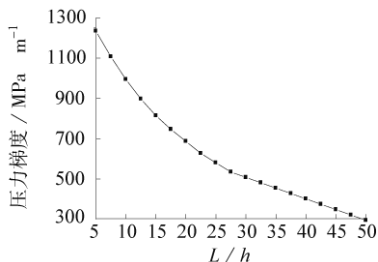


图7 不同 L/h 值对成型段压力梯度的影响

梯度呈线性变化以及壁面附近速度与中心速度之比保持恒定,这样使速度分布波动较小,有利于稳定地挤出管材。

3.2 入口速度对成型段压力梯度和出口速度的影响

固定成型段长度,观察入口速度改变时对成型段上的压力梯度和出口速度分布的影响。

在成型段长度为45 mm,即 $L/h = 22.5$ 的条件下,不同入口速度对壁面附近剪切速率和壁面附近速度与中心速度之比的影响分别见图8、图9。图10为成型段长度为45 mm时不同入口速度对成型段压力梯度的影响。

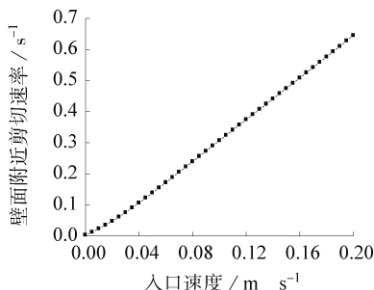


图8 不同入口速度对壁面附近剪切速率的影响

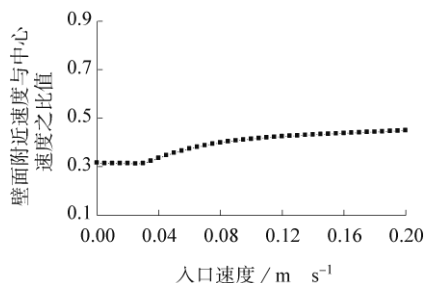


图9 不同入口速度对壁面附近速度与中心速度之比的影响

从图 8、图 9 可以看出, 当入口速度较小时, 壁面附近的剪切速率大体上呈斜率为 1 的线性增加, 壁面附近速度与中心速度之比值保持恒定, 这表明成型段出口速度分布曲线形状大致保持不变; 而当入口速度较大时, 壁面附近的剪切速率又呈斜率略大于 1 的线性增加, 壁面附近速度与中心速度之比值也大致保持恒定, 这表明随着入口速度的增加, 壁面附近的速度增大, 由于管壁厚度一定, 所以中心附近的速度梯度减小, 即成型段出口速度曲线形状有呈柱塞状的趋势。这有利于挤出管材的成型质量。

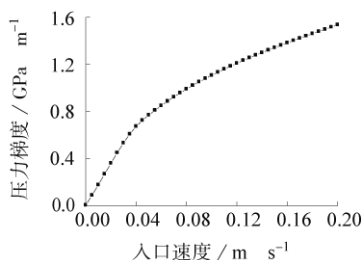


图 10 不同入口速度对成型段压力梯度的影响

综合图 8 ~ 图 10 可知, 在保持成型段长度不变的情况下, 将入口速度由小到大变化时, 成型段上的出口速度曲线和压力分布曲线大致可分为大变化区和小变化区两个阶段。出现这种现象可能是由于在入口速度较小时成型段中熔融物料的流动速度还没有达到稳定状态。因此为了使物料能在成型段中有较好的流动状态, 入口速度不能过低; 但是入口速度也不能过大, 因为过大的入口速度会引起壁面滑移、熔体破裂等^[6]。合适的入口速度既能保证熔体稳定地流动又可提高管材的产量。经计算, 当入口速度为 0.06 ~ 0.16 m/s 时, 成型段上的压力梯度较稳定, 有利于管材的挤出。

3.3 入口压力对成型段压力梯度和出口速度的影响

图 11、图 12 分别为在固定成型段长度为 45 mm 的条件下不同入口压力对壁面附近剪切速率和壁面附近速度与中心速度之比值的影响。由图 11、图 12 可见, 在保持成型段长度为 45 mm 不变的情况下, 当入口压力较小时, 由于壁面附近的剪切速率呈线性变化, 且壁面附近速度与中心速度之比值保持恒定, 所以此时成型段出口速度分布曲线形状保持不变; 当入口压力较大时, 由于壁面附近剪切速率呈线性变化的斜率大于 1, 而且壁面附近速度与中心速度之比值有变大的趋势, 所以此时成型段出口速度分布曲线形状趋于平缓。

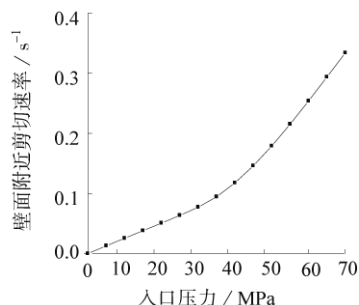


图 11 不同入口压力对壁面附近剪切速率的影响

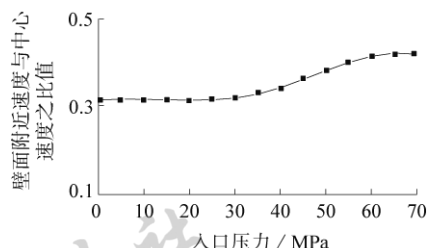


图 12 不同入口压力对壁面附近速度与中心速度之比的影响

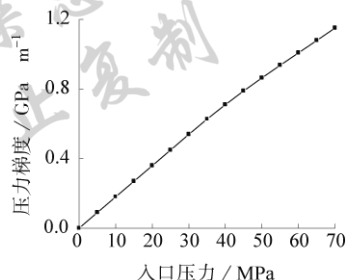


图 13 不同入口压力对成型段压力梯度的影响

图 13 为成型段长度为 45 mm 时, 不同入口压力对成型段压力梯度的影响。从图 13 可以看出, 在保持成型段长度不变的情况下, 当入口压力变化较小时, 成型段上的成型段压力梯度斜率变化不大。

由图 11 ~ 图 13 可以看出, 在保持成型段长度不变的情况下, 当入口压力不太大时, 成型段上的压力梯度变化和出口速度曲线形状是稳定的; 当入口压力较大时, 成型段上的压力梯度变化稳定但数值减小, 同时出口速度曲线形状有变柱塞状的趋势。总之, 入口压力不大于 40 MPa 时挤出较为稳定。

4 结论

(1) 用壁面附近的剪切速率、壁面附近速度与中心速度之比值来描述速度变化, 用压力梯度来描述压力变化, 能很好地描述 HDPE 管材挤出过程中熔体的流动规律, 能清楚地了解上述因素对成型段速度分布、压力分布的影响。

(2) 在一定的入口压力或入口速度条件下, 要使成型段上的压力梯度变化稳定、出口速度分布保持稳定, 对成型段应取适当的长度 (L/h 略大于

20)。

(3) 当成型段长度一定时,入口速度在一定范围内成型段出口速度分布均匀,有利于 HDPE 管材的挤出。

(4) 入口压力不太大(低于 40 MPa)时,成型段上熔融物料的流动状态较为理想。

参考文献

- [1] 刘伯元,华晔.塑料管材质量问题应引起重视[J].化学建材,2005(2):20-21.
- [2] 崔科增.我国 HDPE 管材的现状和发展前景[J].塑料工业,2002,16(7):1-6.
- [3] 钱恒河.HDPE 管材的开发现状及其应用前景[J].现代塑料加工应用,2002,16(3):36-41.
- [4] 张延恒,唐跃,蔡黎明.HDPE 在挤出温度条件下流变行为的研究[J].工程塑料应用,2003,31(8):26-27.
- [5] 商跃进.有限元原理与 ANSYS 应用指南[M].北京:清华大学出版社,2005:224-234.
- [6] 何曼君,陈维孝,董西侠.高分子物理[M].修订版.上海:复旦大学出版社,2004:290-294.

SIMULATION ANALYSIS OF FLOW IN MANDREL TUBE EXTRUSION DIE

Zou Wu, Tang Yue

(Qingdao University of Science and Technology, College of Electromechanical Engineering, Qindao 266061, China)

Hao Yongliang

(Qingdao Products Quality Supervision and Test Center, Qingdao 266101, China)

ABSTRACT By taking the actual high density polyethylene(HDPE) natural parameter as the foundation, the methods of describing the speed change with the shear rate nearby the mold wall surface and the ratio of speed nearby the wall surface to the central speed and describing the pressure variation with the pressure gradient are put forward. With ANSYS, MATLAB to analyse the extrusion process of thin-wall tube in mandrel tube extrude mold, and making a full description of the corresponding influence of the velocity distribution and the pressure distribution in the constant outline section when the inlet pressure, inlet velocity as well as the length of the constant outline section change, the optimization values about inlet pressure and the ratio of the length of the constant outline section to the thickness of the tube were got.

KEYWORDS high density polyethylene, tube, extrusion, rate of shear, pressure gradient, simulation analysis

优惠销售 2000 ~2007 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000 ~2007 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 8 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,尤其突出了我国工程塑料行业“十一五”发展规划、加入 WTO 的对策等行业规划、政策。现尚有部分《论文集》以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 《论文集》, 优惠价为 220 元/套, 单册价格如下:

《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 50 元/册;

《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 346 页, 含中国工程塑料工业“十一五”发展规划, 45 元/册;

《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 338 页, 40 元/册;

《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 337 页, 35 元/册;

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 105 篇, 正文 373 页, 30 元/册;

《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,

论文 100 篇, 正文 351 页, 25 元/册;

《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》, 论文 80 篇, 正文 270 页, 20 元/册;

《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 339 页, 20 元/册。

2. 论文集光盘, 优惠价为 160 元/盘。

本光盘除收录上述 8 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 1600 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者, 请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。

邮局汇款:

收款单位: 山东济南市 108 信箱杂志社

邮编: 250031

电话: (0531) 85878057 85878223 85878278

传真: (0531) 85947355 85878224

银行汇款:

户 名: 中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购:

<http://www.epa1973.com>