

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.11.012

振动力场下螺旋芯棒式管材机头内熔体流动的数值模拟

陈开源¹, 李柏青¹, 朱秀娟¹, 周南桥²

(1. 佛山职业技术学院机电工程系, 广东佛山 528137;

2. 华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心, 聚合物成型加工工程教育部重点实验室, 广州 510640)

摘要: 为了研究振动力场作用下螺旋芯棒式管材机头内熔体的流动特性, 考虑非定常流动, 使用 Polyflow 软件首次对熔体的流场进行了全三维非牛顿等温数值模拟。研究表明, 随着振动力场的引入, 流道内熔体的剪切速率、黏度、剪切应力、压力和速度等呈周期性规律变化。另一方面, 随着振动频率或振幅的增加, 流场的剪切速率平均值增加, 而流场的黏度平均值、剪切应力平均值和压力平均值下降。

关键词: 振动力场; 螺旋芯棒式机头; 管材; 数值模拟; Polyflow

中图分类号: TQ320.66

文献标识码: A

文章编号: 1001-3539(2012)11-0046-06

Numerical Simulation of Melt Flow in Spiral Mandrel Die for Pipe under Vibration Force Field

Chen Kaiyuan¹, Li Baiqing¹, Zhu Xiujuan¹, Zhou Nanqiao²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Foshan Polytechnic College, Foshan 528137, China;

2. Key Laboratory of Polymer Processing Engineering of Ministry of Education, National Engineering Research Center of Novel Equipment for Polymer Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to reveal the flow characteristics of melt flow in spiral mandrel die for pipe under vibration force field, the melt flow field was firstly studied by three-dimensional non-Newtonian and isothermal numerical simulation using the Polyflow software under time-dependent flow. The research showed that the melt shear rate, viscosity, shear stress, pressure and velocity had the cycle change when the vibration force field was introduced. On the other hand, the average value of shear rate increased with the increase of the vibration frequency or amplitude, but the average value of the viscosity, shear stress and pressure decreased.

Keywords: vibration force field; spiral mandrel die; pipe; numerical simulation; Polyflow

塑料管材在建筑、市政建设、水利工程、农田灌溉、燃气输送等领域有着广泛和重要的应用。随着使用范围的日益扩大, 人们对管材的质量要求愈来愈高, 既要具有良好的物理力学性能, 还要具有较长的使用寿命^[1]。在聚烯烃管材的生产中, 过去一般采用传统的支架式机头。随着管材管径的增大和产量的提高, 传统机头已无法解决熔体流动不均和熔接痕等问题, 会造成管材壁厚不均、制品周向强度下降等缺陷。对于高质量大直径聚烯烃管材的生产, 只有采用螺旋芯棒式机头才能达到要求。自从 Procter 首次报道分析熔体在螺旋芯棒吹膜机头内流动的简化方法以来, 许多学者采用不同方法分析和模拟了螺旋芯棒式机头内的熔体流动^[1-4]。但这些模型均作了大量的假设, 简化为一维流动模型或二维流动模型, 所以只能得到粗略的结果。然而熔体在机头内的流动是一个三维、复杂的过程, 过多的简化会造成解的精度降低, 甚至造成解的失真。近

年来, 计算机技术和数值计算方法的快速发展, 使得计算机数值模拟成为可能, 并且流动过程的模拟也越来越接近真实情况。

在聚合物加工成型中引入振动力场的研究逐渐成为热点之一。申开智等研究了振动参数对挤出制品性能的影响, 发现振动力场的引入可明显改善制品的结晶性能和力学性能^[5-7]。瞿金平提出了聚合物全振动加工技术^[8-9], 突破了以往加工过程中局部施加振动的限制, 发挥了振动力场的强化作用。电磁动态塑化挤出机与普通挤出机相比具有优异的性能, 振动力场的引入具有降低能耗、降低熔体黏度、提高制品性能和混炼混合效果好等优点^[9-13]。

因此, 研究振动力场作用下聚合物熔体在机头内的速度、压力、剪切速率、黏度等流场分布规律以

联系人: 陈开源, 博士, 讲师, 主要从事机械设计及模具 CAD/CAE 的教学和研究工作

收稿日期: 2012-08-23

及熔体对振动力场的响应具有重要的意义。但是聚合物熔体内部的流动状况很难用实验方法测得。笔者在以前工作的基础上^[14],使用 Polyflow 软件,首次对振动力场作用下螺旋芯棒式管材机头内熔体的流动特性进行数值模拟,为深入研究聚合物动态成型机理、优化聚合物振动挤出成型工艺参数和振动挤出成型机头的结构参数提供理论基础和依据。

1 模型的建立

1.1 几何模型

在 Pro/E 软件里建立螺旋芯棒式管材机头流动模型,如图 1 所示,采用流道真实尺寸,不作简化。为方便描述,将机头分为四段:入口段、螺旋分配段、压缩段和成型段。主要结构参数如表 1 所示。

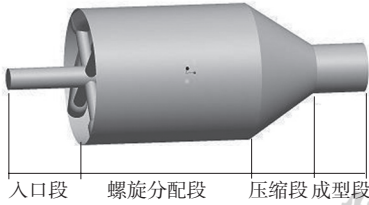


图 1 螺旋芯棒式管材机头流道的几何模型

表 1 螺旋芯棒式管材机头的主要结构参数

参数	数值
螺旋芯棒直径/mm	90
螺旋芯棒锥角/(°)	3.5
螺槽个数/个	4
螺旋升角/(°)	12.4
螺槽初始宽度/mm	14
螺槽初始深度/mm	13
螺旋消退角/(°)	4

1.2 数学模型

振动力场作用下的熔体流动为非定常流动。为了便于分析、推导和计算,对机头中的熔体作如下假设:(1)重力可以忽略;(2)熔体不可压缩;(3)流场内温度不变,为等温流动过程。基于上述假设,熔体在机头中流动的控制方程为:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (4)$$

式中: ρ 为熔体密度; t 为时间; V_x, V_y, V_z 分别为 x, y, z 方向上的速度; 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 。

(3) 本构方程

在聚合物熔体的振动剪切流场中,振动频率、振幅以及振动持续作用的时间都对熔体的内部结构产生较大影响。聚合物熔体的内部结构十分复杂,它们在振动剪切流场中经历着复杂的动态变化过程。为了描述聚合物熔体在振动力场作用下的流变行为,需要建立一个适合于振动力场作用下的聚合物熔体流动的本构方程。

振动力场的引入使得原本就很复杂的聚合物熔体在螺旋芯棒式管材机头内的流动变得更加复杂。笔者采用振动力场下修正的 Ostwald 幂律方程^[15],既可以更真实地模拟熔体在振动力场下的流变行为,同时不至于使实际问题变得复杂而难以求解。

振动力场下修正的 Ostwald 幂律方程^[9,15]表达式为:

$$\bar{\tau}_w = K_v \cdot \bar{\gamma}_w^m = \psi(A, w) \cdot K \cdot \bar{\gamma}_w^n \quad (5)$$

式中: $\bar{\tau}_w$ 为平均壁面剪切应力; $\bar{\gamma}_w$ 为平均壁面剪切速率; K_v 为动态稠度; m 为动态条件下的流动指数; K 为稳态稠度; n 为稳态条件下的流动指数; $\psi(A, w)$ 定义为振动力场对聚合物熔体动态稠度的影响因子。在一定的剪切速率范围和一定的振动参数范围内,动态条件下的流动指数 m 可认为与稳态条件下的流动指数 n 近似相等,但振动参数对稠度影响较大,经公式推导,故引入动态稠度影响因子 $\psi(A, w)$ 。

其中:

$$K_v = \psi(A, w) \cdot K \quad (6)$$

$$m = n \quad (7)$$

$$\psi(A, w) = \left[\frac{3n+1}{3n+1+n \cdot M_B \cdot \bar{\eta}_0 \cdot \frac{w}{a} \cdot g(A, w) \cos \varphi} \right]^n \cdot g(A, w) \quad (8)$$

$$M_B = 8R_0^2(L_d + N_B R)/R^4 \quad (9)$$

式中: M_B 为毛细管动态流变仪的结构几何参数; $\bar{\eta}_0$ 为稳态挤出条件下毛细管壁面的剪切应力 τ_w 与表观壁面剪切速率 γ_N 比值在测量范围内的平均

值; w 为角频率; a 为毛细管压力降幅值 P_a 与激振源振幅 A 的比例系数; φ 为毛细管内熔体体积流量与压力降的相位角; $g(A, w)$ 为动态条件下平均压力降与稳态条件下压力降的比值; R_0 为毛细管动态流变仪的料筒半径; L_d 为毛细管长度; R 为毛细管半径; N_B 为Bagley修正系数。

各个参数的具体确定方法如下:

$K, n, \overline{\eta}_0$ 可以用稳态流动曲线 $\tau_w-\dot{\gamma}_N$ 的关系来确定; $w = 2\pi F$, F 为振动频率; a 可通过 P_a-A 的实验曲线图确定; $g(A, w)$ 在角频率 w 和振幅 A 已知的条件下由 $\overline{\Delta p}(A, w)/\Delta p_0$ 获得; φ 可以通过毛细管动态流变仪数据采集系统同步采集的振动位移和毛细管入口压力信号波进行时域分析比较求得。

笔者选取高密度聚乙烯(PE-HD)为挤出材料,挤出温度为195℃。其物性参数为: $K=21\,694.27\text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $n = m = 0.41$, $\rho = 956\text{ kg/m}^3$ 。采用毛细管动态流变仪进行动态挤出实验^[16],得到聚合物熔体的流变性能数据,其中不同振动参数下的动态稠度 K ,如表2所示。只要给定振动频率 F 和振幅 A ,由表2和公式(5),即可得到振动力场下修正的Ostwald幂律方程。

表2 不同振动参数下的动态稠度 K , $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$

F/Hz	$A/\mu\text{m}$				
	0	50	100	150	200
2	21 694.27			20 284.14	20 132.28
6	21 694.27			19 806.87	19 589.93
10	21 694.27	19 980.42	19 698.40	19 372.98	18 678.77
14	21 694.27	19 741.79	19 438.06	18 960.79	18 049.63

注:振幅 A 为0时表示稳态挤出工况条件下。

2 数值模拟

2.1 网格划分

螺旋芯棒式管材机头的流道模型呈旋转周期性,为了加快运算速度,选取其中一个周期单元即1/4模型来进行网格划分和计算。网格划分方案见参考文献[14]。

2.2 边界条件

边界包括入口、出口、壁面和周期性边界。壁面假设无滑移,即熔体在与模壁接触面上的速度为零。入口边界为充分发展的流动。

利用电磁动态塑化挤出机产量波动将振动力场引入,设定机头入口体积流率^[17]为:

$$Q(t) = \overline{Q}(1 + \varepsilon_q \cos wt) \quad (10)$$

式中: $\overline{Q}$ 取稳态挤出条件下的体积流率, $\overline{Q} = 6.25 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; w 为螺杆振动的角频率, $w =$

$2\pi F$; ε_q 为体积流率脉动幅值系数,它与振幅 A 和角频率 w 成正比,与螺杆直径 D_s 和螺杆转速 N_s 成反比, $\varepsilon_q = Aw/(\pi D_s N_s)$ 。这里 $D_s = 0.03 \text{ m}$, $N_s = 60 \text{ r/min}$ 。只要给定振动频率 F 和振幅 A ,则机头入口处瞬时体积流率 $Q(t)$ 由式(10)确定,这样便可以将振动力场引入。

Polyflow软件提供了渐变函数 $f(s) = a \cos(bs + c) + d + es$,在进行数值模拟时,参数 s 代表时间 t , $f(s)$ 代表瞬时体积流率 $Q(t)$,通过定义参数 $c = e = 0$, $a = \overline{Q}\varepsilon_q = \overline{Q}Aw/(\pi D_s N_s)$, $b = w$, $D = \overline{Q}$,可实现机头入口瞬时体积流率的引入,从而能够模拟对机头引入的振动力场。

2.3 模拟计算

使用Polyflow软件为计算工具。由于材料物性参数中,非牛顿指数 n 较小,采用Picard迭代法进行计算。

时间步进算法采用隐式欧拉法。需要设置的迭代参数为:初始时间值为0;最终时间值为振动周期 T 的2~5倍($T=1/f$);初始时间步为0.01 s;最小时间步为0.0001 s;最大时间步为0.25 s;时间步进误差为0.01 s;成功计算的最大步数为200。

2.4 后处理说明

Polyflow软件已记录了各子步的求解结果,由Fluent/Post软件显示计算结果。主要对Polyflow软件计算得到的速度场、压力场、剪切速率场、黏度场等场量的模拟结果进行后处理和分析,总结出振动参数对流场的影响规律。

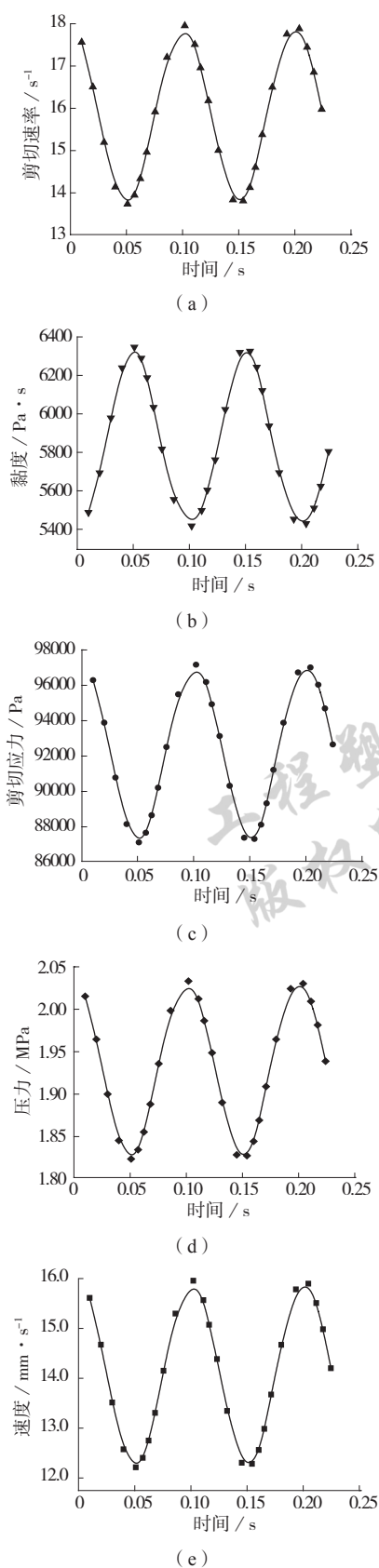
3 结果与讨论

3.1 振动力场下流场随时间的变化规律

以振动频率 $F=10 \text{ Hz}$ 、振幅 $A=200 \mu\text{m}$ 时为例,模拟参数最终时间值设置为0.3 s,模拟了在0.3 s内,即3个振动周期内流场的分布。

图2给出了 $z=214 \text{ mm}$ 平面内剪切速率、黏度、剪切应力、速度和压力随时间变化的曲线图($F=10 \text{ Hz}$, $A=200 \mu\text{m}$ 条件下)。其中图2c中的数值是根据图2a和图2b中的数值计算得到的。

振动力场作用下的流场与稳态过程有很大不同,在稳态过程中,流场的各个参数不随时间而变化。从图2可知,振动力场下聚合物熔体的剪切速率、黏度、剪切应力、速度和压力都不再是稳定值,而是随着时间的变化而变化。熔体的剪切速率、黏度、剪切应力、速度和压力均随时间呈周期规律性变化,变化的频率与所施加的振动力场的频率一致,从而



a—剪切速率; b—黏度; c—剪切应力; d—压力; e—速度

图2 振动力场下流场随时间的变化

可推测整个流道的熔体剪切速率、黏度、剪切应力、速度和压力在振动力场的作用下作周期性变化。

3.2 振动力场下振动参数对流场的影响

为了便于研究振动参数对流场的影响规律,以及振动参数对聚合物熔体流变性能的影响,将熔体的剪切速率、黏度、剪切应力、速度和压力的瞬时值在一个周期内分别求平均值,周期内的平均值可以更直接地反映出振动力场对流场的影响程度。

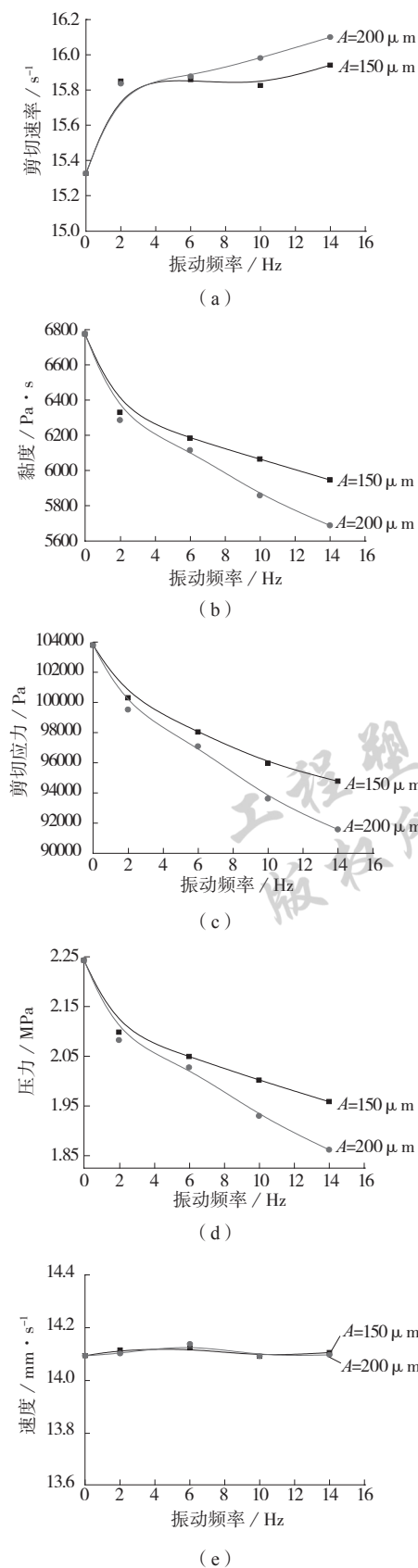
笔者模拟了一个振动周期内流场的分布,对数值计算得到的数据结果进行统计分析。同样作了 $z=214$ mm平面,分析振动力场对流场的影响规律。

(1) 振动频率对流场的影响

图3示出在一个振动周期内的熔体剪切速率平均值、黏度平均值、剪切应力平均值、压力平均值、速度平均值随振动频率 F 的变化情况。由图3a可知,剪切速率平均值随振动频率的增加有小幅度的增加,且其数值均大于稳态时的剪切速率平均值。由图3b可知,施加振动力场后,聚合物熔体的黏度迅速降低,且随着振动频率的增加呈下降趋势。当 $F=14$ Hz, $A=200$ μm 时,黏度平均值比稳态时降低了19.1%。由图3c可知,施加振动力场后,剪切应力平均值均比稳态时下降,随着振动频率的增加,剪切应力平均值呈下降趋势。当 $F=14$ Hz, $A=200$ μm 时,剪切应力平均值比稳态时降低了13.4%。由图3d可知,随着振动频率的增加,熔体的压力平均值逐渐降低,振动频率越大,压力平均值越低。由图3e可知,随着振动频率的增加,熔体速度平均值变化非常小。当 $F=6$ Hz, $A=200$ μm 时,熔体速度平均值达到最大,为14.137 mm/s,与稳态时相比(14.092 mm/s),偏差为0.32%。可以认为基本不变。

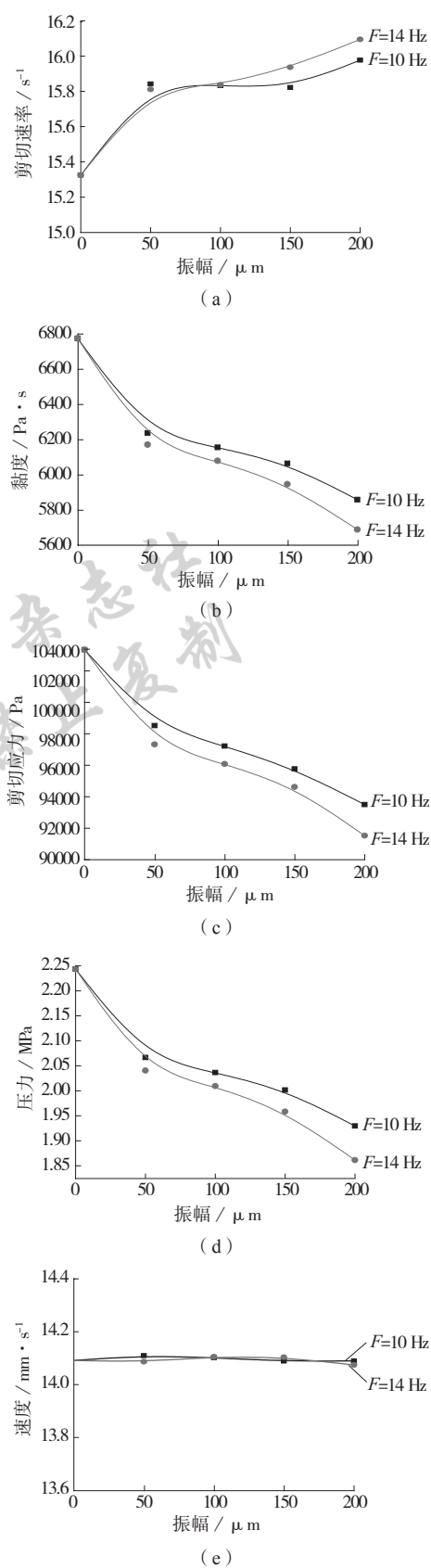
(2) 振幅对流场的影响

图4示出在一个振动周期内的熔体剪切速率平均值、黏度平均值、剪切应力平均值、压力平均值、速度平均值随振幅 A 的变化情况。由图4a可知,随振幅的增加,剪切速率平均值呈逐渐增加趋势,但幅度不大,由此推断增加振幅也能在一定程度上提高流场的剪切速率。由图4b可知,施加振动力场后,聚合物熔体的黏度平均值迅速降低,且随着振幅的增加呈下降趋势,这表明振动力场的引入可以大大地降低熔体的黏度。由图4c可以发现,施加振动力场后熔体的剪切应力平均值变小,而且随着振幅的增大,剪切应力平均值不断减小。由图4d可知,随



a—熔体剪切速率; b—熔体黏度; c—熔体剪切应力;
d—熔体压力; e—熔体速度

图3 振动力场下振动频率对流场的影响



a—熔体剪切速率; b—熔体黏度;
c—熔体剪切应力; d—熔体压力; e—熔体速度

图4 振动力场下振幅对流场的影响

着振幅的增加,熔体的压力平均值逐渐降低。由图 4e 可知,随着振幅的增加,熔体速度平均值变化非常小,当 $F=10\text{ Hz}$, $A=50\text{ }\mu\text{m}$ 时,熔体速度平均值达到最大,为 14.11 mm/s ,与稳态时相比 (14.092 mm/s),偏差为 0.13% ,可认为基本不变。

3.3 分析与讨论

振动力场改变了聚合物熔体的流变行为,使熔体的流动特性发生改变。由于在聚合物熔体流动过程中叠加振动力场后,振动对流场不断产生的瞬时挤压和释放作用,有效地促进了高分子解缠与取向,减小了分子链段之间的摩擦阻力。大分子链的解缠和取向降低了聚合物熔体流动时的阻力,宏观上表现为熔体黏度降低。熔体黏度的减小,使熔体通过机头的阻力减小,即机头的压力降低。熔体速度基本不变,分析其原因,是因为熔体速度平均值取的是 $z=214\text{ mm}$ 截面的速度平均值,由施加的边界条件可知,机头入口体积流率在一个振动周期内是不变的,即一个振动周期内 $z=214\text{ mm}$ 面内平均体积流率也是不变的,故该截面上的速度平均值也是不变的,与理论分析吻合。至于数值模拟的结果与稳态时相比有非常小的差异,这是数值模拟的误差所造成的,同时从另一个侧面也验证了笔者所采用数值模拟方法的正确性。

4 结论

基于合理的假设,考虑非定常流动,建立了数学模型。使用 Polyflow 软件,基于修正的 Ostwald 幂律本构方程,首次对振动力场作用下螺旋芯棒式管材机头内熔体的流动特性进行了三维数值模拟,结果表明:随振动力场的引入,流道内熔体的剪切速率、黏度、剪切应力、压力和速度等呈周期性规律变化。另一方面,随着振动频率或振幅的增加,流场的剪切速率平均值有一定程度的增加,而流场的黏度平均值、剪切应力平均值和压力平均值均有一定程度的下降。

辽宁千亿元聚酰亚胺产业基地开工

不久前,由正威国际集团和君华科技材料有限责任公司共同投资的中国聚酰亚胺产业基地暨高威(辽宁)铜业项目在营口仙人岛能源化工区开工建设。

中国聚酰亚胺产业基地项目预算总投资为 1080 亿元。一期项目计划投资 151 亿元,设计年产聚酰亚胺单体 1.1 万 t、聚酰亚胺及多层共挤出薄膜 3 万 t、高性能复合材料 1.3 万 t;二期项目投资 397 亿元,2017 年完成,形成年产聚酰亚胺单体及高纯精细化学品 4 万 t、高性能树脂 4.5 万 t、聚酰亚胺

参考文献

- [1] 毛维友,汪映寒,林师沛. 挤管用螺旋芯棒机头内熔体流动分析[J]. 高分子材料科学与工程,1992(4): 99-107.
- [2] Procter B. Flow analysis in extrusion dies [J]. SPE Journal, 1972, 28(2): 34-41.
- [3] Huang C C. A systematic approach for the design of a spiral mandrel Die [J]. Polym Eng Sci, 1998, 38(4): 573-582.
- [4] 占国荣,周南桥. 螺旋芯棒薄膜机头的计算机辅助设计[J]. 塑料,2003,32(5): 74-77.
- [5] 申开智,胡文江,向子上,等. 聚丙烯在单向拉伸力场中形成双向自增强片材及其结构与性能的研究[J]. 高分子材料科学与工程,2002,18(1): 145-148.
- [6] 高雪芹,申开智,陈长森. 振动挤出对 HDPE 力学性能及凝聚态结构的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2006,22(2): 197-200.
- [7] 李义兵,陈静,申开智. 复合拉伸力场挤出 HDPE 片材的力学性能[J]. 合成树脂及塑料,2008,25(2): 53-56.
- [8] 瞿金平. 电磁动态塑化挤出方法及设备: 中国,90101034 [P]. 1992-11-25.
- [9] 瞿金平. 聚合物动态塑化成型加工理论与技术[M]. 北京: 科学出版社,2005: 1-130.
- [10] 刘泽,瞿金平,向华. 衣架式机头动态挤出 PP 的力学性能[J]. 塑料工业,2007,35(5): 33-36.
- [11] 陈开源,周南桥,刘斌,等. 振动挤出 HDPE 管材的结构与力学性能[J]. 合成树脂及塑料,2008,25(6): 50-54.
- [12] 陈开源,周南桥,刘斌,等. 振动力场下 PP 增强管材的制备及性能研究[J]. 工程塑料应用,2009,37(5): 31-34.
- [13] 刘跃军,江太君,曾广胜. 振动力场下圆管内聚合物熔体速度场的数值模拟[J]. 塑料工业,2009,37(10): 37-40.
- [14] 陈开源,周南桥,刘斌,等. 螺旋芯棒式管材机头内熔体流动的数值模拟[J]. 塑料科技,2010,38(7): 77-81.
- [15] 潘映雪. 毛细管脉动挤出过程中聚合物熔体幂律定律的修正[D]. 广州: 华南理工大学,2006.
- [16] 陈开源. 聚烯烃管材脉动挤出制备及自增强机理研究[D]. 广州: 华南理工大学,2010.
- [17] Qu Jinping, Zhang Xiaoming. Modeling of coat-hanger die under vibrational extrusion [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(2): 1006-1019.

及多层共挤出薄膜 3.5 万 t、高性能纤维 5000 t 的能力;三期项目投资 532 亿元,2020 年前完成,形成年产聚酰亚胺单体及高纯精细化学品 10 万 t、高性能树脂 12 万 t、聚酰亚胺及多层共挤出薄膜 3.9 万 t、高性能纤维 1 万 t 的能力。

高威(辽宁)铜业项目总投资 8 亿美元,包括建设年产 25 万 t 低氧光亮铜杆系列、年产 10 万 t 精密铜线系列、年产 10 万 t 精密线缆系列、年产 5 万 t 合金铜线系列以及研发中心、物流中心及配套项目。项目建成后,将成为中国第一、亚洲最大的铜精深加工生产基地。(慧聪塑料网)