

机械与模具

波状双螺杆元件混合性能的研究

武学伟, 马秀清*, 李彦辉, 田 军

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 对同向波状双螺杆元件和常规螺纹元件的分散混合性能进行了数值模拟, 分析了2种元件流场的平均剪切应力、最大剪切应力分布、最大拉伸应力分布等混合性能参数, 并对其进行了实验研究。模拟结果与实验结果基本吻合。结果表明, 波状双螺杆元件有较强的分散混合能力。

关 键 词: 啮合同向双螺杆挤出机; 波状双螺杆元件; 混合性能; 数值模拟

中图分类号: TQ320.66⁺3 文献标识码: B 文章编号: 1001-9278(2010)07-0098-04

Study on Mixing Performance of Wave Twin-screw Elements

WU Xuewei, MA Xiuqing*, LI Yanhui, TIAN Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The flow fields of wave-like and regular twin-screw elements in an intermeshing co-rotating twin-screw extruder were simulated. Based on the simulation results, the weighted average shear stress, distribution of the maximum shear stress, distribution of the maximum tension stress were compared for the two elements. The mixing performance of the two elements was also studied through the experiments. Numerical results were in agreement with experimental results. It was shown that the wave-like twin-screw element had a stronger dispersion mixing capability.

Key words: intermeshing co-rotating twin screw extruder; wave twin-screw element; mixing performance; numerical simulation

0 前言

波状螺杆^[1]是由美国 HPM 公司 Kruder 等最早提出, 然后在美国及其他国家发展起来的一种异形螺杆元件, 它最初是用于单螺杆挤出机上的。由于波状螺杆元件的螺槽深度沿轴向呈波浪形周期性地变化, 所以塑化时物料受到强挤压和剪切作用, 且物料在由波谷流动到波峰的过程中由于流道截面的变化而产生了拉伸作用。本文将波状螺杆概念引入到双螺杆挤出机中并进行了一些研究。李继刚^[2]、方炜^[3]将波状螺杆元件应用到了非啮合异向双螺杆挤出机中, 结果表明波状双螺杆元件的混合性能优于非啮合常规双螺杆元件。朱春雁^[4]设计了一种用于啮合同向双螺杆挤出机

中的波状双螺杆元件, 并对其进行了二维流场分析。

本文在文献[4]的基础上, 对波状双螺杆元件的结构参数进行优选后, 使用 Polyflow 软件对该元件和常规螺纹元件的流场进行了三维数值模拟及分析, 并对2种元件的分散混合能力进行了实验研究。

1 模拟部分

1.1 数学模型

为拟定流场, 考虑到熔体输送的具体条件和聚合物的特性以及双螺杆挤出过程中熔体输送段的具体情况, 作如下假设:

- (1) 熔体为不可压缩的流体;
- (2) 流场为稳定、等温流场;
- (3) 雷诺数较小, 流动为层流流动;
- (4) 惯性力、重力等体积力要远小于黏滞力, 可忽略不计;

收稿日期: 2010-02-02

* 联系人, maxq@mail.buct.edu.cn

(5) 流道壁面无滑移;

(6) 熔体在流道中全充满。

基于以上假设,在直角坐标系下,连续性方程简化为:

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

动量方程为:

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial P}{\partial x} + \left\{ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right\} \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial y} + \left\{ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right\} \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial z} + \left\{ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right\} \end{cases} \quad (2)$$

基于等温假定,不考虑能量方程,需要根据连续性方程、动量方程和本构方程来求解速度场。

流体为非牛顿流体,选用 Bird-Carreau 模型,其本构方程为:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_0 (1 + \lambda_c^2 \dot{\gamma}^2)^{(n-1)/2} \quad (3)$$

式中 η_0 ——零剪切黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

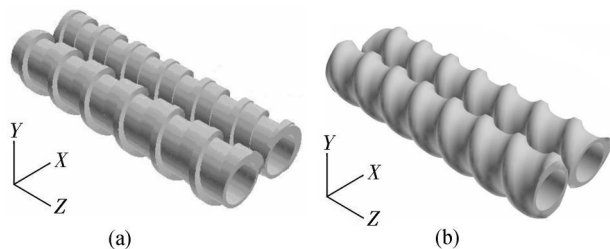
λ_c ——时间常数, s

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1}

n ——非牛顿指数

1.2 物理模型及有限元模型

波状双螺杆元件及常规螺纹元件的结构如图 1 所示。WS26/160/1 表示单头的、螺纹导程为 26 mm, 波状周期为 360° , 长度为 160 mm 的波状双螺杆元件; SE45/160/2 表示双头的、导程 45 mm、长度为 160 mm 的常规螺纹元件。



(a) WS26/160/1 (b) SE45/160/2

图 1 波状双螺杆元件及常规螺纹元件外形

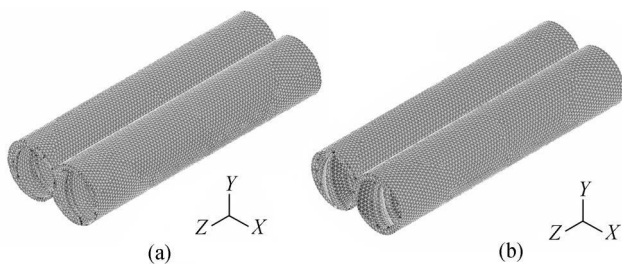
Fig.1 Outline of wave twin-screw element and common twin-screw element

图 2 为 2 种元件流道的有限元模型, 为了对 2 种元件的模拟结果进行比较, 各有限元模型选用相同的坐标系, 有限元网格划分的疏密程度一致。

1.3 物性参数及边界条件

在流场模拟计算中, 采用的高密度聚乙烯的物性参数为: $\eta_0 = 2100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda_c = 0.07 \text{ s}$, $n = 0.54$ 。

本文用入口流量与出口压力共同定义流道的出入



(a) WS26/160/1 (b) SE45/160/2

图 2 2 种元件流道的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the two kinds of the screw elements 口边界。入口端面给定与实验加料量对应的体积流量 $Q = 3.385 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, 出口压力 $P = 10 \text{ MPa}$ 。对流场的其他 3 个边界给定速度边界条件, 根据壁面无滑移的假设, 在螺杆外表面上为轴向转动速度边界, 根据实验工艺条件, 左右两螺杆转速 $N_s = 30 \text{ r/min}$; 而机筒是静止不动的, 因此机筒内表面速度 $V_b = 0$ 。

2 实验部分

2.1 主要原料

高密度聚乙烯 (PE-HD), 5000S, 中国石油大庆石化化工总厂;

聚苯乙烯 (PS), HIPS825, 盘锦乙烯有限责任公司。两种物料的质量比为 $\text{PE-HD/PS} = 80/20$ 。

2.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机, LSM30/34, 德国 Leistritz 公司; 扫描电子显微镜 (SEM), Hitachi S-4700, 日本 Hitachi 公司。

2.3 螺杆构型、机筒组合及温度条件

图 3 为本实验用到的机筒组合及常规螺杆构型, 波状双螺杆构型是将常规螺杆构型中的 SE45/240/2 置换为 WS26/240/1。

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_9 的温度分别为: 230°C 、 240°C 、 240°C 、 240°C 、 240°C 、 230°C 、 230°C , T_7 、 T_8 的温度同 T_6 。

2.4 性能测试与结构表征

设定螺杆转速为 30 r/min , 加料量为 11.70 kg/h , 分别用常规螺杆构型和波状双螺杆构型挤出试样, 然后进行 SEM 分析。最后统计共混物中较少组分 PS 的数均粒径 (D_n)、重均粒径 (D_w)、体均粒径 (D_v) 及粒径分布指数 (PDI)。

$$D_n = \frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

$$D_w = \frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i} \quad (5)$$

$$D_v = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^3} \quad (6)$$

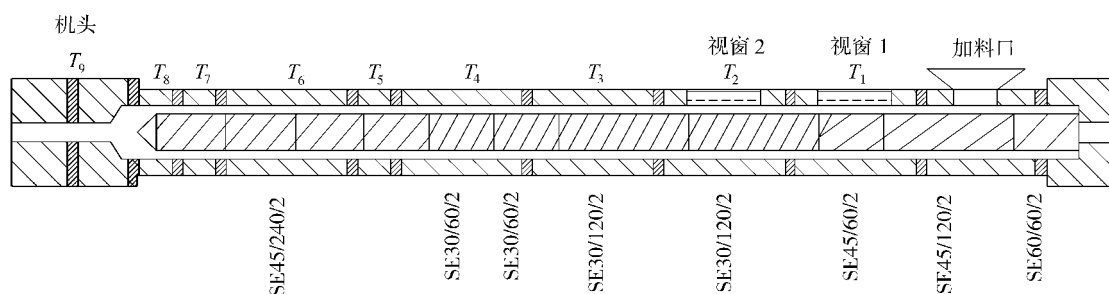


图3 螺杆构型与机筒组合

Fig.3 Configuration of the screw and barrel

$$PDI = \frac{D_w}{D_n} \quad (7)$$

式中 N_i —— 粒径为 D_i 的粒子个数

D_i —— 粒径, μm

PDI —— 粒径分布指数

3 结果与讨论

3.1 模拟结果

3.1.1 平均剪切应力

从图4可以看出,波状双螺杆元件的平均剪切应力略小于常规螺纹元件,一方面可能是由于波状双螺杆元件的波谷部分与机筒内壁间隙较大,产生的剪切作用较小。另一方面,本文所使用的波状双螺杆元件为单头、导程26 mm,即螺距为26 mm,常规螺纹元件为双头,导程45 mm,即螺距为22.5 mm,因此在相同的计算域内,波状双螺杆元件的螺棱数较少,剪切较小。但从数值来看,2种元件流场的加权平均剪切应力相差不大。

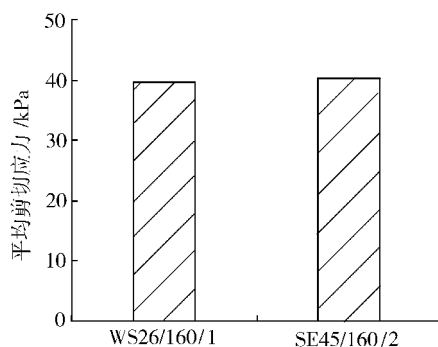
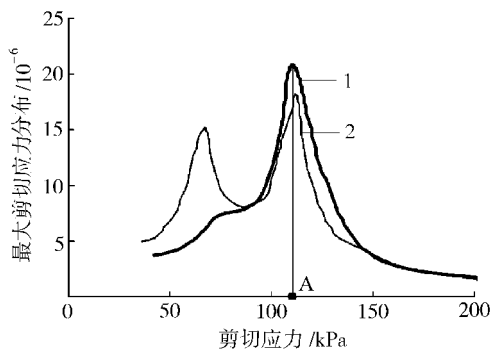


图4 2种元件流场的加权平均剪切应力

Fig.4 Weighted average shear stress of screw elements in the flow fields

3.1.2 最大剪切应力分布

从图5可以看出,波状双螺杆元件流场的最大剪切应力分布曲线较窄,流体经历了A点附近的较大剪切应力作用。而且在大于A点的剪切应力范围内,波状双螺杆元件的曲线在常规螺纹元件的上方,说明波



1—WS26/160/1 2—SE45/160/2

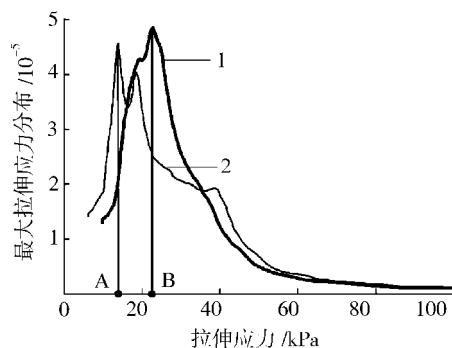
图5 最大剪切应力分布

Fig.5 Distribution of maximum shear stress

状双螺杆元件流场中,有更多流体经受比常规螺纹元件大的剪切作用。

3.1.3 最大拉伸应力分布

从图6可以看出,波状双螺杆元件流场的最大拉伸应力分布曲线较窄,因此流体经受了B点附近的较大拉伸应力作用,而常规螺纹元件流场中的流体经受的拉伸应力作用集中在A点附近,B点的拉伸应力值大于A点,因此,进入波状双螺杆元件流场中的流体可以经受较大的拉伸作用,文献[5]和[6]中均表述了拉伸对混合效果的作用。因此,波状双螺杆元件较强的拉伸作用对含量少的组分的分散更为有利。



1—WS26/160/1 2—SE45/160/2

图6 最大拉伸应力分布

Fig.6 Distribution of maximum stretching stress

3.2 实验结果及分析

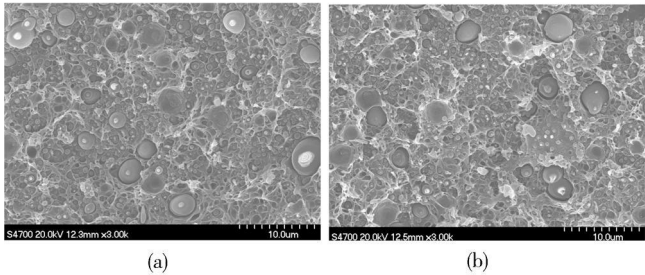
图 7 所示为波状双螺杆构型与常规螺杆构型在相同工艺条件下挤出试样的 SEM 照片。

表 1 给出了对 2 种试样的 SEM 照片进行处理后得出的粒径及粒径分布指数。波状双螺杆构型挤出试样的粒径分布指数略大,说明它的分散相粒径均一性略差,这是由于流体在波状双螺杆元件波峰处经受的剪切作用较强,而波谷处剪切作用较弱,因此剪切较不均匀所致。比较在相同工艺条件下挤出试样的粒径,可以看出在波状双螺杆构型下挤出试样的数均粒径、重均粒径以及体均粒径都较小,由此可知波状双螺杆

元件的分散混合能力较强。对比数值模拟结果,可以得出模拟结果与实验结果基本吻合。

4 结论

- (1)在波状双螺杆元件流场中,更多的流体经受了较强的剪切应力作用;
- (2)波状双螺杆元件可以产生比常规螺纹元件更强的拉伸流动,有利于混合;
- (3)在啮合同向双螺杆挤出机中,相同的操作条件下,使用波状双螺杆元件可以获得比常规螺纹螺杆元件更小的分散相粒径,模拟结果与实验结果一致。



(a) 波状双螺杆构型 (b) 常规螺杆构型

图 7 试样的 SEM 照片

Fig. 7 SEM micrographs for the samples

表 1 试样的粒径

Tab. 1 Particle sizes of the samples

螺杆构型	数均粒径/ μm	重均粒径/ μm	体均粒径/ μm	PDI
波状双螺杆构型	2.26	2.53	3.04	1.12
常规螺杆构型	2.37	2.62	3.07	1.11

参考文献:

[1] 陈 胜, 顾平灿. 波状螺杆参数化建模[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2009, (1): 80-81.

[2] 李继刚, 耿孝正. 错列型非啮合异向旋转波状双螺杆挤出机性能的研究[J]. 中国塑料, 1994, 8(1): 60-65.

[3] 方 炜, 耿孝正. 非啮合异向旋转波状双螺杆挤出机性能的研究[J]. 中国塑料, 1993, 7(2): 44-49.

[4] 朱春雁, 耿孝正. 啮合同向旋转双螺杆挤出机中波状螺杆元件的熔体输送和混合机理研究[J]. 中国塑料, 1991, 5 (2): 86-91.

[5] Chris R. New Dispersive Mixers Based on Elongational Flow[J]. Plastics, Additives and Compounding, 1999, 1 (4): 21-23.

[6] Tokihisa M, Yakemoto K, Sakai T. Extensional Flow Mixer for Polymer Nanocomposites[J]. Polymer Engineering & Science, 2006, 46(8): 1040-1050.

宝理塑料的COC树脂TOPAS®

COC 树脂 TOPAS® 是一种基于独创的茂金属催化剂技术的高品质和高纯度非晶形环状树脂。在标准要求很严的医疗器械装置和检查诊断器具等医疗领域,作为高品质和高成本的石英玻璃和聚二甲基硅氧烷(PDMS)等的替代材料, TOPAS® 具有最佳特性和性价比。

预充注射器与塑料瓶 以欧洲为中心的广大地区正在改用塑料来制作预充注射器以取代玻璃材料。预充注射器可改善制造过程中的破损废品率,减轻质量,不会产生金属类溶出物,同时还具有最佳的水蒸气阻透性(长期保存性)以及不亚于玻璃的高透明性等优良特性,因此是玻璃材料的最佳替代材料。塑料瓶也保持着同样的特性,特别适合需要长期保存的场合。

微量滴定板 TOPAS® 也被用于微量滴定板和生物芯片等检测器械。微量滴定板是用于生化分析和临床检查的一种实验和检测器械。用 TOPAS® 制作的多孔型微量滴定板(384 孔)有助于节省作业时间、减少样品用量并使数据更加精密,因而符合一次需要处理多种试样和信息的现代化学和生物学的流程。在对特殊有机溶剂(如二甲亚砜)和耐热性有要求的 DNA 和蛋白质分析等场合, TOPAS® 堪称最佳塑料材料。此外,由于荧光自发性低而耐药品(除油类和非极性溶剂)性高,因此它也适用于 UV 检测容器。

生物芯片 在以判定疯牛病和禽流感为目的的简易测量仪器中,有望被用作反应池的生物芯片应具有细微转录性、低荧光自发性 and 耐热性等。TOPAS® 既可满足上述特性要求,同时还具有其自身的高流动性所带来的高模具转录性以及良好的性价比,因而被认为是面向这一用途的最佳塑料材料。

宝理塑料 宝理塑料是生产和销售聚甲醛、聚对苯二甲酸丁二酯,以及作为工程塑料备受关注的液晶高分子,聚苯硫醚和透明树脂的环烯共聚物等高性能树脂的专业厂家。