

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.007

基于 FLUENT 软件对三螺杆挤出机 混合特性的模拟与分析

饶俊, 曾广胜

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于 FLUENT 软件, 对聚合物熔体在三螺杆挤出机 (TTSE) 中的流动规律进行了三维模拟, 利用示踪粒子技术分析了聚合物熔体在螺杆内的流动与混合规律, 求解得出了聚合物熔体在三螺杆挤出机中的剪切速率分布云图、混合指数云图以及聚合物在流道内的停留时间分布 (RTD), 并与双螺杆挤出机 (TSE) 的混合性能进行了对比分析。模拟结果表明, 三螺杆挤出机的分散混合能力与分布混合能力都强于双螺杆挤出机, 同时, 由于中心环流区的存在使得物料在三螺杆挤出机的停留时间更长。因此, 三螺杆挤出机在今后的实际生产应用中会有较好的前景。

关键词: FLUENT; 三螺杆挤出机; 三维模拟; 混合性能

中图分类号: TB486+.03

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0036-05

Simulation and Analysis of Mixing Characteristics of Three-Screw Extruder Based on FLUENT Software

RAO Jun, ZENG Guangsheng

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Based on FLUENT software, a three-dimensional simulation of polymer melt's flow pattern in the three-screw extruder (TTSE) was carried out, with the flow pattern and mixing pattern of polymer melt within the screw analyzed. Polymer melt's shear rate distribution map, the mixing index distribution map in three-screw extruder were obtained as well as polymer's residence time distribution (RTD) within the runner and were compared and analyzed with the mixing performance in twin-screw extruder (TSE). Results show that the dispersive mixing capability and distribution mixing capability of three-screw extruder were stronger than those of the twin-screw extruder, while the residence time of materials was longer because of the presence of the central circulation zone in the three-screw extruder. Therefore the three-screw extruder would have good prospects in practical production and application in the future.

Key words: FLUENT; three-screw extruder; three-dimensional simulation; mixing performance

收稿日期: 2015-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (61174100, 61170101), 湖南省科技计划基金资助项目 (2010JT4039), 湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (13JJ1024)

作者简介: 饶俊 (1991-), 男, 湖北天门人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高分子材料成型加工设备优化,
E-mail: 1165196693@qq.com

通信作者: 曾广胜 (1975-), 男, 湖南洞口人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事包装工程及高聚物加工工程方面的研究,
E-mail: guangsheng-zeng@126.com

0 引言

螺杆挤出机已经被广泛应用于食品、塑料、橡胶和医疗等行业,特别是塑料工业中,螺杆挤出的过程直接关系到产品的质量好坏。当前应用比较普遍的有单螺杆挤出机与双螺杆挤出机,相应地,对于单螺杆与双螺杆挤出机的挤出特性方面的模拟研究也较多^[1-4]。

近年来,随着新材料的不断涌现,以及在加工过程中对产品质量和产量的要求,常规双螺杆挤出机已不能很好地满足产品生产的需求,因此三螺杆挤出机被开发出来,它以灵活多变的排列方式、较小的长径比、优异的混合性能以及较高的产能比而迅速地发展起来。但是由于三螺杆挤出机的挤出结构较为复杂,当前对其研究相对较少^[5-6],且大部分的研究通过建立螺杆瞬态流场模型进行^[7-8],因而得出的结论不能直观地反映出三螺杆挤出机的混合能力。因此,本文拟运用计算流体方法(computational fluid dynamics, CFD)研究聚合物熔体在挤出机中的流动过程,通过FLUENT分析软件得到熔体在拟稳态流场内的剪切速率分布^[9]、混合指数分布^[10]以及停留时间分布^[11]等螺杆挤出特性,并将其和双螺杆挤出机的混合性能进行较为深入的比较,分析与验证了三螺杆挤出机有着比双螺杆挤出机更为出色的混合性能,以期为三螺杆挤出机以后的实际应用提供一定的理论参考。

1 数学模型的建立

本模拟采用高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)作为挤出对象。实际生产中,由于挤出加工过程是一个十分复杂的工艺流程,因此为便于计算,同时使实验研究过程近似地满足工程需求,根据聚合物物料和流道的特性,做如下假设:

1) 流场为等温稳定层流流场,即流场分布与时间无关,且过程是稳定的;

2) 质量力与惯性力远小于黏滞力,可忽略不计;

3) 流体为非牛顿黏性不可压缩流体。

将上述条件简化后,可以得到该幂律流体的各数学表达式。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}; \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{2} \eta \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

以上各式中: u, v, w 为 x, y, z 方向的速度; p 为压力; τ_{ij} 为应力张量分量; η 为表观黏度; ρ 为物料密度; c_p 为物料比热容; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; k 为热导率。

模型的物性参数设为 $c_p=1350 \text{ J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$,非牛顿流体指数 $n=0.48$,黏度 $\eta=4680 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\rho=864 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 物理模型的建立

利用FLUENT公司研发的前处理器模块Gambit及Pro/e软件共同构建出三螺杆的元件和机筒尺寸,螺杆单元的具体尺寸如下:螺杆外径为32.4 mm,根径为25 mm,螺杆中心距为29 mm,机筒内径为33 mm,螺纹元件的长度为135 mm,为3个导程长。建立三螺杆的三维流体模型,并对边界条件进行设定,如图1所示。

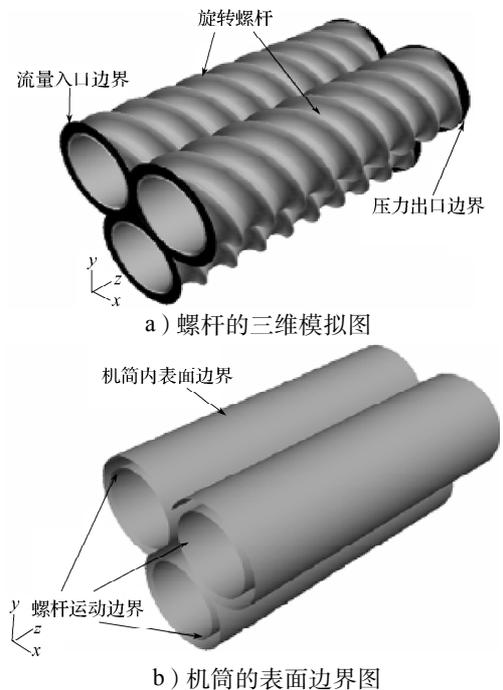


图1 流场边界条件图

Fig. 1 Boundary conditions of flow field

三螺杆的三维流体模型两端采用流量入口和压力出口为边界条件,机筒内表面设定为无滑移转动壁面,外表面为无滑移静止壁面,即聚合物熔体在螺杆表面的速度与螺杆轴向速度相同,螺杆为逆时

针转动，转速为 100 r/min。螺杆z轴的负方向为挤出方向。对螺杆与机筒组合模型进行叠加，然后导入 Fluent 分析软件，进行前处理四面体网格划分，所得网格数为 98 592 个，网格模型如图 2 所示。

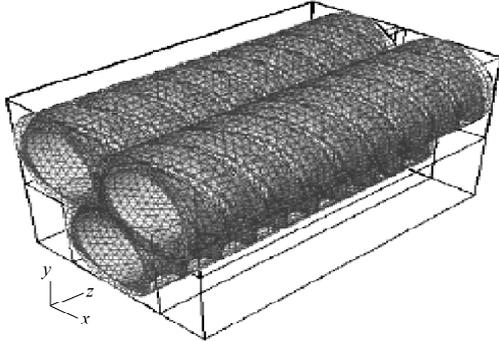


图 2 螺杆的流体网格模型
Fig. 2 The fluid grid model of screw

3 计算结果后处理

为了能更直观可靠地分析三螺杆与双螺杆挤出机的混合性能，引入示踪粒子对熔体在流道中的混合情况进行三维数值模拟。设 $t=0$ 时，在流道进口处随机释放 1 000 个示踪粒子，然后对这些粒子所进行的运动轨迹进行统计。通过 Fluent 求解后，可直接得到物料流动的压力场、速度场、剪切速率场等基本场量。然后，通过相应的后处理，可以得到对挤出机混合性能有直接影响的一些参数，例如平均剪切速率、回流量、混合指数、停留时间分布等。根据参数的结果分布来讨论三螺杆在挤出过程中的混合能力大小。

1) 平均剪切速率。平均剪切速率 $\dot{\gamma}$ 是衡量挤出机分散混合性能的一个重要参数。如果平均剪切速率大，说明其分散混合的能力强。平均剪切速率的计算公式如下：

$$\dot{\gamma} = \frac{\iiint_{\Omega} \dot{\gamma} ds}{\iiint_{\Omega} ds} \quad (6)$$

2) 回流量。回流量 Q_b 也是衡量挤出机分散混合性能的一个重要参数，它反映了物料的分混合情况。回流量越大，说明挤出机的反混能力越强，分布效果越好。回流量就是单位截面内负值轴向速度 V_b 的积分，具体的表达式为：

$$Q_b = \iint V_b ds \quad (7)$$

3) 停留时间分布。停留时间分布反映的是聚合物熔体在流道内的时间历程，其停留时间的长短可被用来评价轴向混合性能的大小，常用停留时间分布密度函数 $f(t)$ 来描述，其表达式为

$$f(t) = C_i / \sum_{i=1}^{N_s} C_i \Delta t_i \quad (8)$$

式中： C_i 为 t_i 时刻的物料浓度；

Δt_i 为相邻的 2 次取样间隔时间；

N_s 为取样次数。

4 结果分析与讨论

为了能更好地观察与分析流场中场量的分布情况，选取z轴方向上一个单位导程结束处 ($z=45$ mm 处) 的横截面，以及三螺杆中上面双螺杆的 2 个对称轴面 ($z=24 \sim 64$ mm) 作为轴截面进行研究，测定其剪切速率、混合指数等的分布情况。

4.1 剪切速率分布

试验模拟所得三螺杆横截面和轴截面的剪切速率分布情况见图 3，三螺杆与双螺杆的横截面上平均剪切速率的轴向分布对比图见图 4。

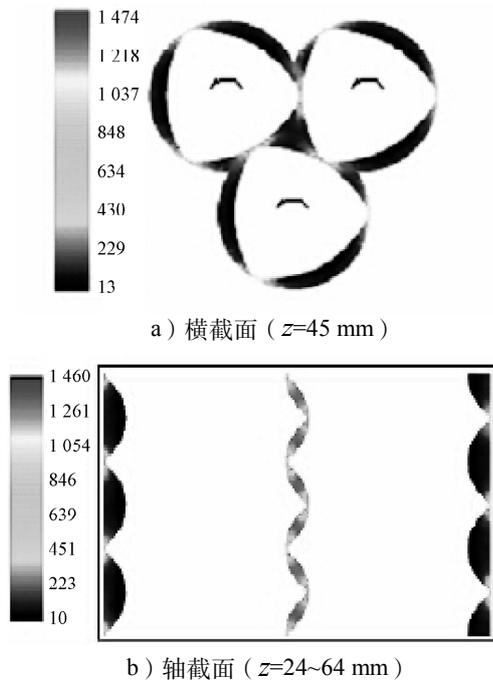


图 3 三螺杆横截面和轴截面的剪切速率分布
Fig. 3 Shear rate distribution in cross and axial sections of three-screw extruder

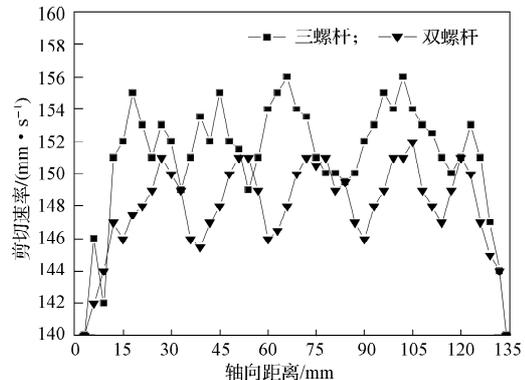


图 4 横截面上平均剪切速率的轴向分布图
Fig. 4 The average shear rates in cross sections

从图3中可以看出三螺杆在指定截面的剪切速率分布情况,其中螺棱与机筒的接触区以及啮合区是高剪切速率的区域。从三螺杆横截面速率分布图还可看到,高剪切速率的区域有9个,且基本上都是在螺杆的啮合部位。

从图4所示三螺杆与双螺杆的剪切速率对比图可知,它们的平均剪切速率均沿着轴向呈周期性波动。但是,三螺杆的波峰与波谷的剪切速率都比相应双螺杆的要大,由此可以说明,物料在流道内的挤出过程中受到更高强度剪切作用的几率更大,物料在熔融混合的过程中所受的剪切力更强,因此,三螺杆挤出物料的分散混合性能强于双螺杆的。

4.2 混合指数分布图

试验所得三螺杆横截面和轴截面的混合指数分布见图5,三螺杆和双螺杆的横截面上平均混合指数轴向分布示意图见图6。

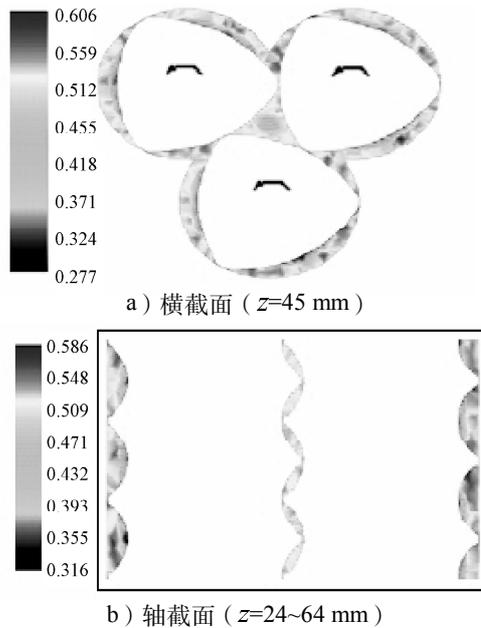


图5 三螺杆横截面和轴截面的混合指数分布
Fig. 5 Mixing index distribution in cross and axial sections of three-screw extruder

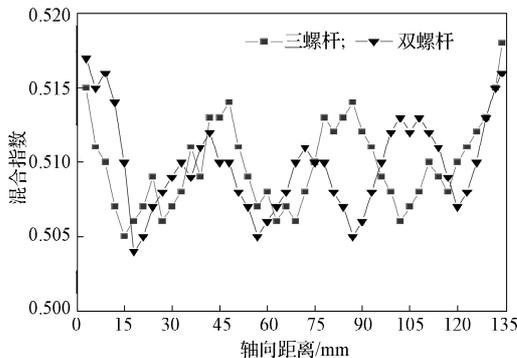


图6 横截面上平均混合指数轴向分布图
Fig. 6 The average mixing indexes in cross sections

从图5所示三螺杆在指定截面的混合指数分布情况图可以看出,螺杆与螺槽接触区域的混合指数要低于其他区域,同时螺槽的中间部位是高混合指数区。这是由于聚合物熔体不可压缩,物料一方面在螺棱的推力面作用下不断地被向前挤压,另一方面在其拖曳面又被拉伸,使得该区域螺槽内的物料形成回流拉伸作用,同时由于啮合区域的体积不断变化,非常有利于物料混合。

从图6所示三螺杆与双螺杆的轴向分布图可看出,它们的平均混合指数起伏波动的幅度差不多,但三螺杆的波峰与波谷都略大于双螺杆,说明就整体的平均混合指数而言,三螺杆流场的更高,综合分布混合性能更好。

4.3 停留时间概率分布图

图7所示为试验所得三螺杆挤出机与双螺杆挤出机的停留时间概率分布情况。

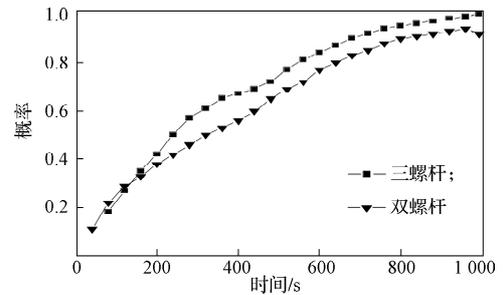


图7 停留时间概率分布图
Fig. 7 The probability function distribution of residence time

从图7所示三螺杆挤出机与双螺杆挤出机的停留时间概率分布情况可知,三螺杆的最小停留时间要稍低于双螺杆的,但其整体的平均停留时间要远高于双螺杆的。这是由于在三螺杆中心区物料出现了环流现象,而环流的出现使得物料的停留时间增大,因此,三螺杆挤出机有更好的轴向混合能力。

5 结论

本文利用Fluent软件模拟研究了聚合物熔体在三螺杆挤出机中的流动规律,得到了能表征螺杆挤出机混合性能大小的相关特性参数,并与双螺杆挤出机进行对比,可得出如下结论:

- 1) 由于聚合物熔体在三螺杆挤出机中所承受高剪切拉伸的概率更大,物料在流动过程中所承受的剪切力也会变大,因此三螺杆挤出机相对于双螺杆会有更好的分散混合性能;
- 2) 三螺杆挤出机因为其独特的几何结构(1个中心区和3个啮合区)的存在,会使得物料出现较明

显的回流现象,增大了物料的回流量,使得其有更优异的分混合性能;

3)当示踪粒子全部离开流场时,三螺杆挤出机的平均停留时间要高于双螺杆挤出机,这表明三螺杆挤出机有更出色的轴向分布混合性能。

基于以上结论,可知三螺杆挤出机具有多种优越的混合性能,因而在今后的实际工程应用上会有很好的前景。

参考文献:

- [1] 耿孝正. 双螺杆挤出机及其应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003: 30-31.
GENG Xiaozheng. Twin Screw Extruder and Application [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003: 30-31.
- [2] POTENTE H, KRETSCHMER K, HOFMANN J, et al. Process Behavior of Special Mixing Elements in Twin-Screw Extruders[J]. Ploymer Process, 2002(XVII): 341-350.
- [3] MANAS Ica, YANG Haur-horon. Flow Field Analysis of the Kneading Disc Region in a Co-Rotating Twin Screw Extruder[J]. Polymer Engineering and Science, 1992, 32(19): 1411-1417.
- [4] 王礼银, 韩霖, 肖文飞, 等. 可连续生产的生物质包装材料配方与工艺研究[J]. 包装学报, 2015, 7(4): 13-18.
WANG Liyin, HAN Lin, XIAO Wenfei, et al. Study on Formula and Process of Continually Producibile Biomass Packing Material[J]. Packaging Journal, 2015, 7(4): 13-18.
- [5] 马兴巍, 姜南, 郭奕崇. 三螺杆挤出机螺纹元件流场分析[J]. 中国塑料, 2005, 19(9): 93-97.
MA Xingwei, JIANG Nan, GUO Yichong. Analysis of Velocity Field in Screw Element Region of a Triple Screw Extruder[J]. China Plastics, 2005, 19(9): 93-97.
- [6] 朱向哲, 谢禹钧, 苗一. 三螺杆挤出机常规螺纹元件挤出过程的CAE研究[J]. 塑料工业, 2004, 32(9): 29-32.
ZHU Xiangzhe, XIE Yujun, MIAO Yi. CAE Study on Extrusion Process of Flight Element of Tri-Screw Extruder [J]. China Plastics Industry, 2004, 23(9): 29-32.
- [7] 张文呈, 姜南, 信春玲. 母粒制备中三螺杆挤出机的填充和分散效果分析[J]. 塑料, 2007, 36(4): 1-4, 31.
ZHANG Wencheng, JIANG Nan, XIN Chunling. Analysis of Effect on Loading and Dispersion of the Tri-Screw Extruder in Preparation of Masterbatch[J]. Plastics, 2007, 36(4): 1-4, 31.
- [8] 庞军舰, 何亚东, 信春玲, 等. 三螺杆挤出机螺杆元件混合特性的数值模拟[J]. 中国塑料, 2012, 26(1): 103-108.
PANG Junjian, HE Yadong, XIN Chunling, et al. Numerical Study on Mixing Characteristics of Screw Element in Three-Screw Extruders[J]. China Plastics, 2012, 26(1): 103-108.
- [9] 朱向哲, 袁惠群. 三螺杆挤出机挤出特性的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(3): 32-35, 40.
ZHU Xiangzhe, YUAN Huiqun. Numerical Simulation of Extrusion Characteristics of Intermeshing Co-Rotating Tri-Screw Extruder[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(3): 32-35, 40.
- [10] CHENG Hongfei, MANAS-ZLOCZOWER I. Study of Mixing Efficiency in Kneading Discs of Co-Rotating Twin Screw Extruders[J]. Polymer Engineering Science, 1997, 37(6): 1082-1090.
- [11] 张先明. 挤出过程停留时间分布的实验研究和数值模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2008.
ZHANG Xianming. The Extrusion Process of Residence Time Distribution Experiment Research and Numerical Simulation[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2008.

(责任编辑: 廖友媛)