

新型非对称同向自洁型双螺杆混合过程模拟表征*

喻慧文¹ 徐百平² 刘跃军¹ 王玫瑰² 王小龙¹

(1. 湖南工业大学, 先进包装材料与技术湖南省普通高校重点实验室, 株洲 412008;

2. 广东轻工职业技术学院, 广东省高校高分子材料加工工程技术开发中心, 广州 510640)

摘要 介绍了新型非对称同向自洁型双螺杆端面造型特点及运动关系,建立了转速比为2/1的两根螺杆端面造型的物理模型。基于准静态假设,采用叠加网格技术,借助商用Polyflow软件,分别对新型非对称双螺杆和传统双螺杆端面内的周期性二维流动和混合进行数值模拟研究。以分散准数为指标,进行了静态混合及动力学行为表征。通过粒子示踪技术,得出累积分散准数和最大分散准数,分析新型非对称双螺杆和传统双螺杆的二维流场混合行为的差异,进一步探索螺杆造型对混合过程的影响规律。

关键词 新型非对称同向自洁型双螺杆 叠加网格技术 Polyflow 混合 分散准数

同向自洁积木式双螺杆挤出机由于具有良好的混合能力、自清洁能力和排气性能,在聚合物加工工业中已得到广泛应用。但是,普通同向双螺杆两根螺杆的转速相同,螺纹头数皆为整数,两根螺杆的形状完全相同,只是安装时相差一个相位角。由于两根螺杆存在着一致性(对称性),从而导致流体沿着两根螺杆前行过程中经历的几何空间存在一致性,缺少流体加工空间几何形状的转换,剪切过程中再取向作用减弱,混合效果有限,尤其是位于螺槽内的大部分流体混合仍属于层流混合,界面随时间呈线性增加。为克服这种缺陷,徐百平等^[1]根据分形思想,打破传统结构,提出螺纹头数可以为非整数、两根螺杆的转速可以不同,提出了新型非对称的同向自洁型双螺杆造型方法,并申请了发明专利。此时两根螺杆形状不同,但同样能够实现彼此刮擦来达到自洁效果,这样,物料在挤出过程中,将经历输运空间和作用力场的不对称,引入混沌动力学对称破缺效应,从而进一步提高挤出加工过程的传热、传质效率。因此,对新型非对称同向自洁双螺杆内的流动和混合行为表征非常必要。

目前,国内外对混合过程研究已经提出了许多表征指标,动力学研究逐渐成为焦点。国内外学者已通过Polyflow、Ansys等数值模拟软件对双螺杆挤出机的混合特征进行了一系列研究。Kajiwara等^[2]运用周期性边界,对双螺杆挤出机内流体流动进行数值模拟,分析了挤出过程压力、产量等。F. Bertrand等^[3]对包含转子的二维流场进行模拟时,运用内嵌边界虚控制区技术,不需要根据转子的转动重新划分网格,降低了网格划分的难度。T. Avalosse^[4]提出了用叠加网格技术来模拟同向双螺杆挤

出机加工过程,避免了重复进行网格划分和更新,而且网格划分比较容易,其实质就是简化了的内嵌边界虚控制区技术。

已有的研究表明,对于同向双螺杆挤出机来说,由于流体的高黏度,混合主要是由螺杆横截面内流动行为决定的,二维研究能够揭示更详细的混合动力学细节,这也是近来研究热点转向二维研究的主要原因。笔者将沿袭以上研究思路,基于新型非对称同向螺杆的专利造型,选取转速比为2/1的一组螺杆端面造型,进行二维流动混合行为表征,并与传统单头双螺杆几何造型进行对比分析;利用Polyflow软件进行模拟,通过粒子示踪技术,得出累积分散准数及最大分散准数,从而分析新型非对称双螺杆流场混合行为的不同,进一步探索螺杆造型对混合过程的影响规律,为进一步模拟三维流场奠定基础。

1 新型非对称同向双螺杆端面造型

针对两根螺杆A、B转速比为2/1的一组螺杆造型进行研究,其运动关系如图1所示。其中,图1a代表初始位置,黑色部分代表流体区域,随着螺杆的转动,流体由一个整体的空间分布到两个独立的部分,如图1b;接着空间慢慢缩小,物料不断被挤压(图1a~图1f),当挤压到一定程度后,物料所占的空间又进一步扩大,如图1g;从图1h~图1l,流体区域又经历一个先变大再变小的循环。

可见,A、B两根螺杆形状不一致,A螺杆的转速是B螺杆转速的2倍,两根螺杆时刻彼此啮合导致自洁功能的实现。在螺杆转动过程中,左右流体区

* 广东省自然科学基金项目(10151030007000001)、广东轻院自然科学基金项目(200902)

收稿日期:2011-05-23

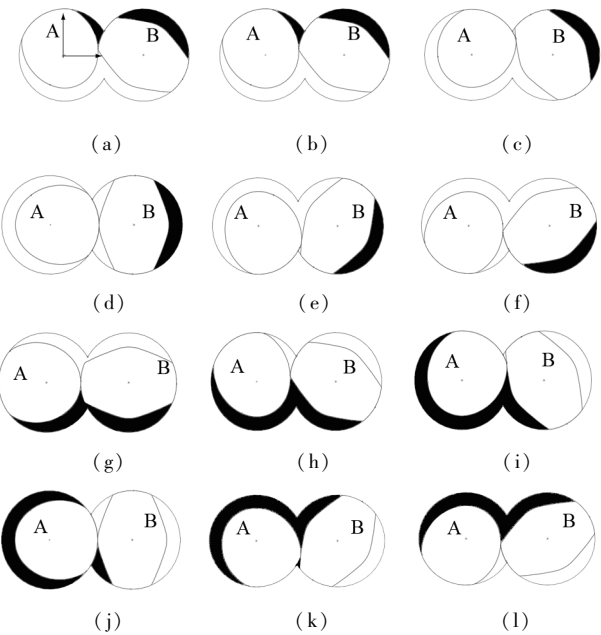


图1 新型非对称自洁型双螺杆运动关系

域空间始终不对称,空间几何形状变化复杂,物料流动空间周期性变化,有利于聚合物的混合混炼。

为进行混合效果表征,选取传统的同向单头自洁型双螺杆端面造型作为对比研究,其运动关系如图2所示。其中图2a为初始位置,黑色部分代表流体区域,随着螺杆的转动,流体所占的空间逐渐增大(如图2b、图2c),由一个整体的空间分布到两个独立的部分(图2d),物料扩散到整个流道后(图2e),空间慢慢缩小,物料不断被挤压(图2f);整个过程中,物料的空间由小变大再由大变小,物料被不断的“压缩”、“膨胀”。

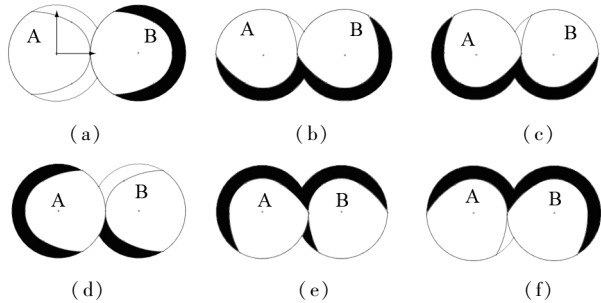


图2 传统双螺杆运动关系

2 端面周期性运动数值模拟

为进行数值模拟研究,建立如图1、图2所示的物理模型,所建立的坐标系及初始位置如图1a和图2a,以A螺杆中心为原点,指向B螺杆中心的方向为x轴方向,螺杆顺时针转动。为方便比较,两根螺杆的外径、内径及中心距均相同,具体尺寸见表1。

2.1 数学模型

采用以下假设:(1) 流体为等温、不可压缩流

表1 模型尺寸图

mm

项目	数值
料筒内径	35.6
螺杆外径	35.0
螺杆内径	25.0
中心距	30.6
两螺杆间隙	0.6

体;(2) 流体与流道壁面无滑移;(3) 流体的雷诺数较小,流体流动状态为层流;(4) 粒子间无相互作用力,忽略重力及惯性力,流动为准稳态过程。

描述流场的连续性方程、运动方程及本构方程为:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$$
 (1)

$$-\vec{\nabla} p + \nabla \cdot \vec{\tau} = \vec{0}$$
 (2)

$$\vec{\tau} = 2\eta \dot{\gamma} \vec{D}$$
 (3)

式中: $\vec{v}$ 为速度向量; p 为压力; $\vec{\tau}$ 为应力张量; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; $\vec{D}$ 为应变速率张量。

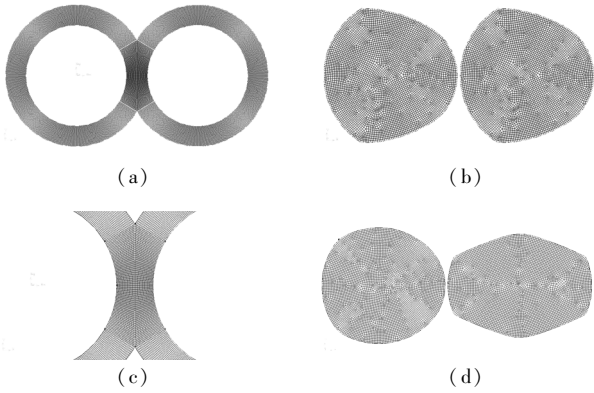
表观黏度与剪切速率的关系选用 carreau 模型:

$$\eta = \eta_0 (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}}$$
 (4)

式中: η 为表观黏度; η_0 为零剪切黏度; λ 为松弛时间; n 为非牛顿指数。

2.2 网格划分

采用网格叠加技术,对流体区域进行静态网格划分,采用四边形网格;螺杆端面采用三角形网格划分。根据不同时刻螺杆端面位置,对机筒静态网格进行边界设定。两种螺杆划分密度一致,传统螺杆网格数为 8974,新型螺杆网格数为 9085,流体区域网格数为 19303。两种情况的网格划分如图3所示。



a—流体区域网格; b—传统螺杆网格;

c—流体区域中间部分网格加密; d—新型螺杆网格

图3 流体区域及螺杆端面网格划分

假设两种情况螺杆B的转速相同,均为 60 r/

min。这样,新型非对称双螺杆 A 螺杆转速为 120 r/min,而传统型仍为 60 r/min。对两种情况来说,当螺杆 B 每转 9° 输出一个结果,这样各需要进行 40 种不同端面位置准稳态迭代。计算得到两种情况螺杆 B 转过一周不同角度的速度场,然后输出结果进行后处理。

在两种模型上取关于螺杆中心连线中垂线对称的两点: $p_1(0, 15)$ 和 $p_2(30.6, 15)$, 得到这两点速度随时间的变化规律, 如图 4 所示。

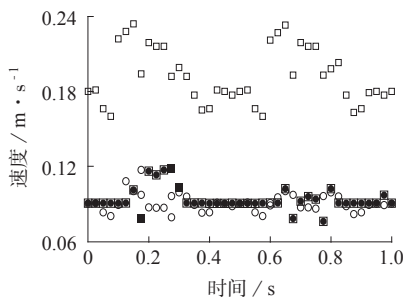


图 4 两种螺杆速度对称性对比

由图 4 可见, 新型非对称螺杆加工过程中速度存在非对称效应, 速度大小不同, 周期规律分布不同, 而传统的同向双螺杆造型速度分布是一致的, 具有相同的周期和速度量值, 这对于混合动力学过程来说不利。

2.3 混合行为表征

为进行混合表征, 在流体区域随机释放 1000 个粒子, 假设粒子与流体的物性相同, 进行粒子追踪计算, 到达 240 s 结束。采用 J. J. I. Cheng 等^[5]提出的用分散准数 (λ_{MZ}) 描述流场中拉伸流动程度, 其定义为:

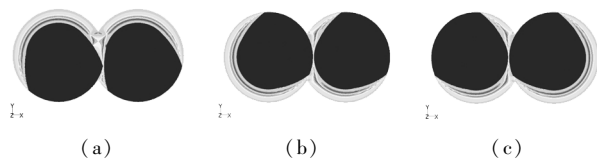
$$\lambda_{MZ} = \frac{|\bar{D}|}{|\bar{D}| + |\bar{\omega}|} \quad (5)$$

式中: $|\bar{D}|$ ——应变速率张量, s^{-1} ;

$\bar{\omega}$ ——涡量, s^{-1} 。

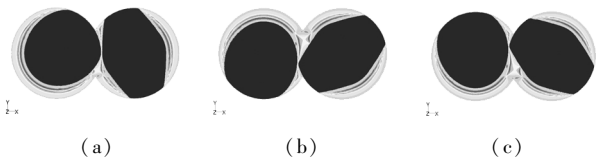
λ_{MZ} 的变化范围为 0 ~ 1, 当 $\lambda_{MZ} = 0$ 时, 反应器中不存在混合, 只为单纯有旋运动; 当 $\lambda_{MZ} = 0.5$ 时, 拉伸流动与剪切流动相当, 为简单剪切流动; 当 $\lambda_{MZ} = 1$ 时, 流动为纯拉伸运动, 混合效果最强。图 5 和图 6 示出两种螺杆转过不同角度时的分散准数。

从图 5、图 6 可以看出, 沿螺杆表面分散准数较低; 分散准数高的区域主要分布在螺杆与料筒的空隙的中心区及螺杆之间的啮合区附近。这是因为螺杆转动过程中, 螺杆与料筒之间的空隙体积经历了



a—0.3 s; b—0.6 s; c—0.9 s

图 5 传统双螺杆在不同时刻下分散准数分布图



a—0.3 s; b—0.6 s; c—0.9 s

图 6 新型非对称双螺杆在不同时刻下分散准数分布图

一个从小到大再从大到小的过程, 聚合物为不可压缩流体, 受到挤压时物料被迫运动到空隙较大处, 这个挤压的过程也是一个拉伸流动的过程, 聚合物熔体伴随着该过程经历了拉伸变形, 有利于分散混合。随着端面的转动, 空隙体积也在不断无规则变化着, 使物料在这个过程中被反复拉伸和挤压, 对分散相聚合物的分散混合尤为有利。为进行比较, 对分散准数分布进行统计分析, 当 $t = 0.8$ s, 螺杆 B 转过 288° 时, 得到分散准数分布统计结果, 如图 7 所示。

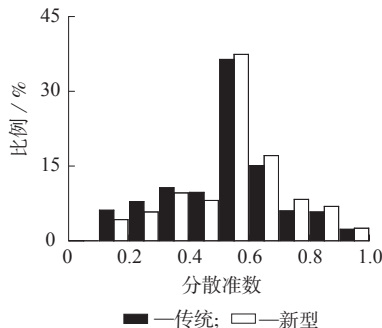
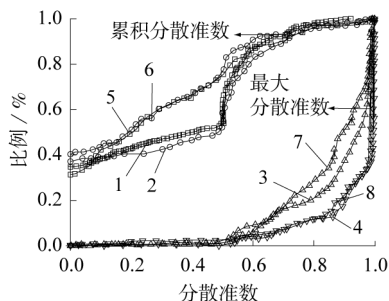


图 7 螺杆 B 转过 288° 时流场分散准数统计图

由图 7 可看出, 两种流场分散准数分布趋势一致, 多数集中在 0.5 ~ 0.7, 新型非对称双螺杆分散准数大于 0.5 的比例为 72.24%, 而传统型该项指标比例为 65.61%, 新型比传统型提高了 10.1%。进一步分析发现, 分散准数在 0.7、0.8、0.9 时, 新型比传统型分别提高了 13.2%、38.4% 和 19.1%, 表明新型非对称自洁双螺杆的拉伸场混合性能优于传统双螺杆。

在上述结果基础上, 进一步进行混合过程动力学表征。运用粒子示踪分析方法 (PTA), 在 $t = 0$ 时刻向流场中释放 1000 个粒子后, 通过 Polystat 进行统计分析, 可以得到每个时间点的累积分散准数及最大分散准数分布。当 $t = 60$ s、180 s

时间点的累积分散准数及最大分散准数分布结果如图8所示。



1,3— $t=60\text{ s}$, 新型; 2,4— $t=180\text{ s}$, 新型;
5,7— $t=60\text{ s}$, 传统; 6,8— $t=180\text{ s}$, 传统

图8 累积分散准数概率和最大分散准数概率

图8表明,同一螺杆造型在各时间点上累积分散准数分布趋势基本一致。从累积分散准数概率分布来看,新型螺杆在 $\lambda_{MZ}=0.5$ 附近存在着一个较大的阶跃。具体来看,传统双螺杆流场对应的累积分散准数在 $0\sim0.5$ 的比例较多,占到约70%, $0.5\sim1$ 之间占比例较少,表明传统双螺杆简单剪切流动为主;而新型双螺杆流场对应的累积分散准数在 $0\sim0.5$ 的比例较低,累积分散准数在 $0.5\sim1$ 的部分比传统双螺杆高20%。对比图7的静态统计结果,说明粒子随着流场的输运过程,打破了对称性,使得更多的粒子经历了拉伸作用,表明新型螺杆流场内更多的粒子经历了拉伸流动,累积分散混合性能优于普通双螺杆。从最大分散准数来看,当 $t=180\text{ s}$ 时,两者的最大混合分散准数统计结果基本一致。 $t=60\text{ s}$ 时,新型螺杆的混合效率更高,更接近 $t=180\text{ s}$ 的混合统计结果。以上的动力学分析表明,新型非对称双螺杆具有更好的混合动力学行为,能够实现

高效混合。

3 结论

(1)展示了新型非对称同向自洁型双螺杆端面造型及运动关系,建立了端面二维流动物理模型及数学模型,借助商用 Polyflow 软件,采用叠加网格技术进行了准稳态数值模拟,得到了周期性速度场,并进一步进行了混合行为表征;

(2)采用分散准数作为评价混合目标,以传统同向双螺杆挤出机作为比较对象,进行了混合过程流场表征和动力学混合行为表征。静态模拟结果表明,新型非对称双螺杆分散准数大于0.5的比例高于传统双螺杆;动力学模拟表明,新型非对称双螺杆在分散准数0.5附近出现了阶跃,累积分散准数在 $0.5\sim1$ 的部分比传统双螺杆高20%;分散准数统计结果表明新型非对称螺杆能够实现更高效的混合。

参考文献

- [1] 徐百平,王玫瑰,何亮,等.同向非一致自洁多螺杆塑化排气挤出装置与方法:中国,CN101879777A[P].2010-11-10.
- [2] Kajiwar, Yuki Nagashima, et al. Numerical study of twin-screw extruder by three-dimensional flow analysis-development of analysis technique and evaluation of mixing performance for full flight screws[J]. Polymer Engineering Science, 1996, 36(16): 2142 - 2152.
- [3] Bertrand F, Tanguy P A, Thibault F. A 3D fictitious domain method for incompressible fluid flow problems[J]. International Journal of Numerical Methods Fluids, 1997(25): 719 - 736.
- [4] Avalosse T. Numerical simulation of distributive mixing in 3-D flows[J]. Macromolecular Symposium, 1996, 112: 91.
- [5] Cheng J J I, Manas Z. Hydrodynamic analysis of Banbury mixer-2D flow simulations for the entire chamber[J]. Polym Eng Sci, 1989, 29(15): 1059 - 1065.

SIMULATION AND CHARACTERIZATION OF MIXING PERFORMANCE IN NOVEL CO-ROTATING NON-SYMMETRIC TWIN SCREWS

Yu Huiwen¹, Xu Baiping², Liu Yuejun¹, Wang Meigui², Wang Xiaolong¹

(1. Key Laboratory of Advanced Materials and Technology for Packaging of Hunan Colleges and Universities, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China; 2. Guangdong Macromolecular Materials Processing Engineering Technology Development Center, Guangdong Industry Technical College, Guangzhou 510300, China)

ABSTRACT The cross-section geometry and motion behavior of the novel co-rotating non-symmetric twin screws are introduced, and the physical model of the cross-section of such screws is established with the rotation ratio of 2/1. Based on the quasi-steady assumption, using the mesh superposition technique, the two-dimensional periodical flows and mixing performance in the traditional twin screws and the novel co-rotating non-symmetric twin screws are simulated respectively with the aid of the finite element package Polyflow. In terms of mixing index, the characterization of the static mixing condition and the dynamic behavior are carried out. Adapting the particle tracking technique, the distributions of cumulative mixing index and the maximum mixing index are obtained, then the mixing behavior differences between traditional twin screws and novel co-rotating non-symmetric screws are analyzed. It follows that the relationship between the screw cross-section shape and the mixing performance is investigated.

KEYWORDS novel co-rotating non-symmetric twin screw, mesh superposition technique, Polyflow, mixing, mixing index