



# 反向旋转微型锥形双螺杆挤出机混合性能的数值模拟

辛思成, 成文凯, 张先明

(浙江理工大学, a. 纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室; b. 材料科学与工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 选取反向旋转微型锥形双螺杆挤出机为研究对象, 通过三维有限元数值模拟方法(Finite element method, FEM)和网格叠加技术(Mesh superposition technique, MST)研究聚丙烯(Polypropylene, PP)的挤出流动过程, 结合粒子示踪技术对挤出机的混合性能进行分析, 并且考察螺杆螺距对速度分布和混合性能的影响规律。结果表明: 流速和剪切速率随着轴向距离的增大而减小, 在啮合区的速度大于筒壁边缘, 在啮合区的剪切速率小于筒壁边缘; 随着螺距增大, 流体在轴向上的速度分量随之增大, 最大剪切速率呈减小趋势; 平均对数拉伸长度随螺距的增大而减小, 时均混合效率随螺距的增大而增大。研究结果可为锥形双螺杆挤出机的优化设计提供指导。

**关键词:** 双螺杆挤出机; 数值模拟; 粒子示踪技术; 混合性能

**中图分类号:** TQ320.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2021)07-0527-07

## Numerical simulation of mixing performance in a miniature conical counter-rotating twin-screw extruder

XIN Sicheng, CHENG Wenkai, ZHANG Xianming

(a. National Engineering Laboratory for Textile Fiber Materials and Processing Technology; b. School of Materials Science & Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A miniature conical counter-rotating twin-screw extruder (MCTSE) was selected as the research object. The extrusion flow process of polypropylene (PP) was studied through 3D finite element method (FEM) and the mesh superposition technique (MST). Particle tracking technique was combined to evaluate the mixing efficiency of the extruder. Besides, the effect of screw pitch on velocity distribution and mixing performance was investigated. The results show that the flow velocity and shear rate decreased with the increase of axial distance, and the velocity in the intermeshing zone was larger than that near the barrel wall. The shear rate in the intermeshing zone was lower than that near the barrel wall. As the screw pitch increased, the axial velocity component of the fluid increased, and the maximum shear rate tended to decrease. The mean logarithmic stretched length decreased with the increase of the screw pitch, and the mean-time mixing efficiency rose with the increase of the screw pitch. The research results can provide guidance for the design and optimization of the conical twin-screw extruder.

**Key words:** twin-screw extruder; numerical simulation; particle tracking technique; mixing performance

## 0 引言

锥形双螺杆挤出机的螺杆直径从加料段到排料段逐渐减小, 剪切速率小, 因此特别适用于加工塑化

状态下对剪切敏感和易分解的物料, 如 PVC、PET 和 PLA 等<sup>[1]</sup>。与传统平行双螺杆挤出机相比, 微型锥形双螺杆挤出机 (Miniature conical twin-screw extruder, MCTSE) 一次加料量少, 可用于纳米新材

收稿日期: 2021-02-27 网络出版日期: 2021-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51973196); 浙江省重点研发计划项目(2020C01010)

作者简介: 辛思成(1995—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事聚合物加工及计算流体力学方面的研究。

通信作者: 张先明, E-mail: joolizxm@hotmail.com

料的制备<sup>[2-3]</sup>。锥形双螺杆挤出机凭借良好的建压能力<sup>[4-6]</sup>、正向输送能力和加工的灵活性,在聚合物加工领域展现出巨大的发展潜力<sup>[7]</sup>。

双螺杆挤出机结构极为复杂,难以通过常规的实验方法来获取挤出机内部的流体动力学和混合性能等信息,但是可以借助于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟方法<sup>[8]</sup>。现有关双螺杆挤出机内部流动和混合的研究主要集中在平行双螺杆挤出机,而对于锥形双螺杆挤出机的研究较少。例如, Xu 等<sup>[9-10]</sup>使用有限元方法(Finite element method, FEM)和网格叠加技术(Mesh superposition technique, MST)获取了一种新型的自清洁同向旋转的平行双螺杆挤出机的流速分布,通过粒子示踪技术直观地观察到物料在挤出机内的运动轨迹,并提出了一种新型的映射方法来研究不同加工条件对挤出机的分布混合的影响。Sobhani 等<sup>[11]</sup>结合 FEM 和虚拟域法对同向旋转的平行双螺杆挤出机中非牛顿流体的非等温流动进行模拟,并通过实验验证了该方法的可行性。Zhang 等<sup>[12]</sup>通过实验测量与 FEM 数值模拟的方法对平行双螺杆挤出机的停留时间分布进行了研究。边靖<sup>[13]</sup>利用 CFD 方法对不同种类的锥形双螺杆挤出机的熔体输送段的压力分布进行分析,发现双锥形双螺杆挤出机具有更好的建压能力。徐俊杰等<sup>[14]</sup>和陈世昌等<sup>[15]</sup>结合 FEM 和 MST 对锥形双螺杆挤出机的速度场进行分析,而后基于求得的速度场,使用粒子示踪技术评估 MCTSE 的混合性能,探究了不同的加工参数和螺杆构型对于螺杆混合性能的影响。

本文选取反向旋转微型锥形双螺杆挤出机为研究对象,采用三维有限元数值模拟方法,结合网格叠加技术,研究聚丙烯在挤出机内的流动过程,并且通过粒子示踪技术来分析挤出机的混合性能,探究螺杆构型对流速分布和混合性能的影响规律,为锥形双螺杆挤出机的优化设计提供指导和思路。

### 1 三维数值模型

#### 1.1 锥形双螺杆几何构型

本文选取武汉瑞明公司的 SJZS-10B 反向旋转微型锥形双螺杆挤出机为研究对象,使用 SolidWorks 软件绘制螺杆及流道的几何形状,如图 1 所示。流道的总长度为 201.00 mm,流道的入口距离螺杆 3.00 mm,流道的入口直径为 25.00 mm,流道的出口直径为 11.00 mm,流道入口和出口的中心距分别为 23.00 mm 和 8.80 mm。设计了三

种不同结构的锥形双螺杆(Conical twin-screw, CTS),分别命名为 CTS1、CTS2 和 CTS3。三种螺杆除螺距外,其他结构尺寸保持一致。两根螺杆的总长为 196.00 mm,螺杆的入口直径为 23.74 mm,螺杆的出口直径为 9.90 mm,两根螺杆之间的夹角为 4°,螺纹的初始旋转角度为 17°。CTS1 的螺距为 12.00 mm,螺槽宽度为 6.96 mm;CTS2 的螺距为 15.00 mm,螺槽宽度为 8.70 mm;CTS3 的螺距为 18.00 mm,螺槽宽度为 10.44 mm。设定螺杆挤出方向为 Z 方向,选取 Z=0.01 m 处截面,分析流体的速度。设定螺杆水平中心的平面为 Y=0 m 截面,考察速度场、剪切速率以及混合指数的分布规律。

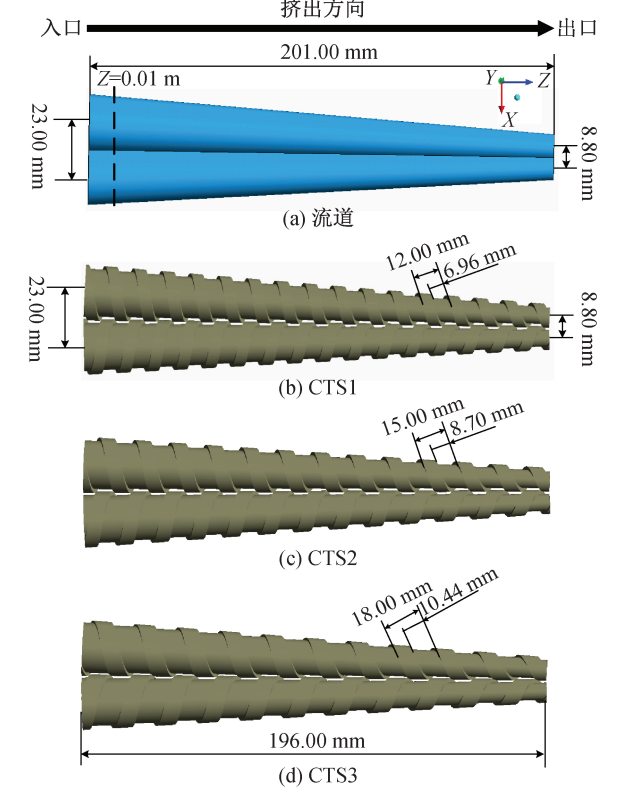


图 1 流道和三种锥形双螺杆结构示意图

#### 1.2 控制方程

假设熔体在挤出机内的流动是等温不可压缩的层流运动,且惯性忽略不计,连续性方程<sup>[16]</sup>定义如式(1)所示:

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

其中: $\mathbf{v}$  是速度, m/s。

流体域和实体域之间的边界在一个网格的宽度范围内很难界定,往往无法满足质量守恒定律。若有少量的流体泄漏到螺杆部分时,在连续性方程中需要添加一个极小的压缩因子<sup>[17]</sup>,修改后的连续性方程如式(2)所示:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{\beta'}{\eta(\gamma)} \Delta p = 0 \quad (2)$$

其中:  $\eta$  代表黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\gamma$  代表局部剪切速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $\beta'$  代表压缩系数;  $p$  代表压力,  $\text{Pa}$ 。

对于广义牛顿流体而言, 额外应力张量  $\mathbf{T}$  可以定义为:

$$\mathbf{T} = 2\eta(\gamma)\mathbf{D} \quad (3)$$

其中: 黏度  $\eta$  取决于剪切速率  $\gamma$ ,  $\mathbf{D}$  为应变速率张量。

动量方程定义如式(4)所示:

$$\nabla \cdot \mathbf{T} - \nabla p + \rho \mathbf{f} = \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \quad (4)$$

其中:  $\rho$  代表熔体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  代表流动时间,  $\text{s}$ ;  $\mathbf{f}$  代表体积力,  $\text{N}$ 。

MST 通常用于模拟双螺杆挤出机的复杂运动<sup>[18]</sup>。在网格叠加期间使用了惩罚项  $H(\mathbf{v} - \mathbf{v}_p)$ , 则动量方程变为如式(5)所示:

$$H(\mathbf{v} - \mathbf{v}_p) + (1 - H) \left[ -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{f} - \rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} \right] = 0 \quad (5)$$

其中:  $H$  是阶跃函数, 当网格点属于流场时,  $H=0$ ; 当网格点属于运动部件时,  $H=1$ , 此处坐标点速度与螺杆速度相同,  $\mathbf{v}_p$  是运动部件的速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

### 1.3 材料物性

模拟所使用的材料为山西延长石油(集团)延安石油化工厂生产的聚丙烯(PP), 产品牌号为 T30S, 密度为  $833 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 粒径约为  $2.50 \text{ mm}$ 。使用 Antoon Paar MCR-301 旋转流变仪测试 PP 在  $180^\circ\text{C}$  时剪切黏度与剪切速率的关系。Carreau 模型定义<sup>[16]</sup>如式(6)所示:

$$\eta(\gamma) = \eta_0 [1 + (\lambda\gamma)^2]^{(n-1)/2} \quad (6)$$

其中:  $\eta_0$  是零剪切黏度,  $\lambda$  是弛豫时间,  $\gamma$  是剪切黏度,  $n$  是幂律指数。Carreau 模型对应的参数<sup>[14-15]</sup>分别是:  $\eta_0 = 12973 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\lambda = 1.1059 \text{ s}$ ,  $n = 0.44178$ 。

### 1.4 模拟方法

锥形双螺杆挤出机的计算域如图 1 所示。使用 Gambit 软件分别对流道和螺杆部分进行网格划分, 网格模型如图 2 所示。流道部分使用结构化网格, 流道啮合区域的网格进行加密处理, 网格数量为 112104。螺杆部分使用非结构化网格, CTS1、CTS2 和 CTS3 的网格数量分别为 309734、307624 和 303224。

选用商业软件 Polyflow 来进行有限元计算。分别对锥形双螺杆挤出机的机筒以及双螺杆表面施加无滑移边界条件。螺杆转速设置为  $4.19 \text{ rad}/\text{s}$ , 将入口处的边界条件设置为流量入口, 质量流量为

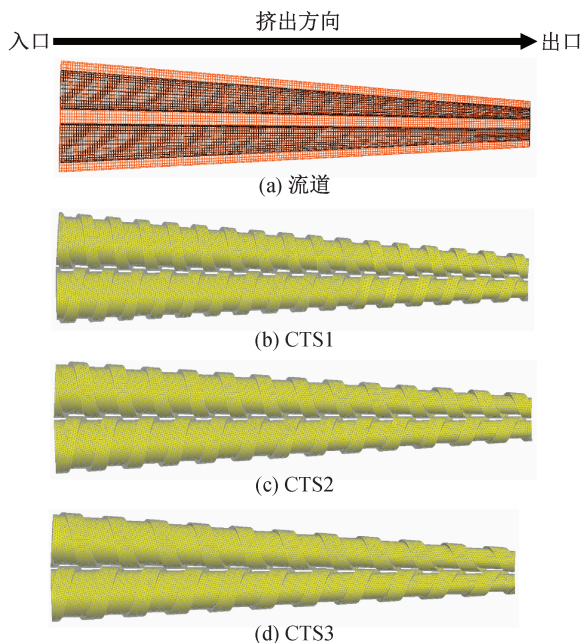


图 2 流道和三种锥形双螺杆的网格模型

$1.75 \text{ kg}/\text{h}$ , 出口处设置为流量出口。

### 1.5 混合表征

基于求解流场后所得的速度场, 使用粒子示踪技术来评估 MCTSE 的混合性能。在入口区域放置 2000 个示踪粒子, 忽略粒子的质量、体积和相互作用。粒子的运动轨迹使用局部坐标系中的四阶 Runge-Kutta 程序计算得到。

混合性能在很大程度上受流场特性的影响, 根据分散混合理论, 拉伸流比剪切流更有效<sup>[19]</sup>。Cheng 等<sup>[20]</sup>提出了使用混合指数 ( $\lambda_{MZ}$ ) 来评价分散混合性能, 其取值范围为  $[0, 1]$ 。当  $\lambda_{MZ} = 0$  时, 流场为旋转流; 当  $\lambda_{MZ} = 0.5$  时, 流场为剪切流;  $\lambda_{MZ} = 1$  时, 对应的流场为拉伸流。混合指数虽然可以区分流场类型, 但流场内的混合效果还受到剪切应力影响, 因此在评估挤出机混合效果时应将这两个参数综合考虑。混合指数的定义如式(7)所示:

$$\lambda_{MZ} = \frac{|\mathbf{D}|}{|\mathbf{D}| + |\mathbf{\Omega}|} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{\Omega}$  是涡量张量。

对于黏性流体, 流体单元的伸展和取向都可以定义为层流混合, 使用动力学方法来跟踪流体单元在流场中所经历的变形或拉伸量来评估混合性能。在初始流场中, 单位取向为  $M$  的线段  $d\mathbf{X}$ , 在  $t$  时间后变为单位取向为  $m$  的线段  $d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X}$ , 其中  $\mathbf{F}$  为变形梯度。

拉伸长度定义如式(8)所示:

$$\lambda = \frac{|d\mathbf{x}|}{|d\mathbf{X}|} \quad (8)$$



平均对数拉伸长度定义如式(9)所示:

$$\overline{\ln \lambda} = \frac{\sum_{i=1}^N \ln \lambda_i}{N}$$

(9)

其中: $N$  代表示踪粒子的数量:

瞬态混合效率适用于定性地表征混合过程中的拉伸速率,取值范围为 $[-1,1]$ 。如果所有的能量耗散都用于材料的拉伸,则相应的瞬态混合效率值为1;若所有的能量耗散都用于压缩物料,对应的瞬态混合效率值为-1。瞬态混合效率 $e_\lambda^{[21]}$ 为:

$$e_\lambda = \frac{D \ln \lambda / Dt}{(\mathbf{D} : \mathbf{D})^{1/2}}$$

(10)

其中: $t$  是混合时间, s。分母表示应变速率张量 $\mathbf{D}$ 双点积平方根,最终结果是标量。

瞬态混合效率的平均值 $\overline{e_\lambda}$ 定义为:

$$\overline{e_\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^N (e_\lambda)_i}{N}$$

(11)

除了瞬态效率,还定义了时均混合效率 $\langle e_\lambda \rangle$ 为:

$$\langle e_\lambda \rangle = \frac{1}{t} \int_0^t e_\lambda dt$$

(12)

平均时均混合效率 $\langle e_\lambda \rangle$ 可以通过式(13)计算:

$$\overline{\langle e_\lambda \rangle} = \frac{\sum_{i=1}^N \langle e_\lambda \rangle_i}{N}$$

(13)

2 结果与讨论

2.1 速度场分析

不同螺杆构型在 $Z=0.01\text{ m}$ (如图1所示)处的速度矢量图分布如图3所示。从图3中可以看出,左右两根螺杆的旋转方向分别是逆时针和顺时针方向。流体在啮合区受到两根螺杆的强制输送作用,使得它的速度大于在筒壁边缘的速度。

$Y=0\text{ m}$  截面处流体的速度分布云图影响如图4所示。从图4中可以看出,流体速度并没有随着螺距的增加而发生明显变化,而在该结构下,物料在啮合区受到更强的正向位移输送,因此螺杆啮合区的流体速度大于筒壁周围流体的速度。螺杆构型对流体在 $Z$ 方向上的速度 $V_z$ 的影响如图5所示。从图5中可以看出随着轴向距离的增加,螺杆直径不断减小, $V_z$ 在逐渐增大。当螺距增加时,单位距离上螺棱的数量减少,流体在挤出机内滞留的时间变短,更容易从挤出机中流出。

2.2 分散混合性能分析

螺杆构型对流体局部剪切速率分布云图的影响

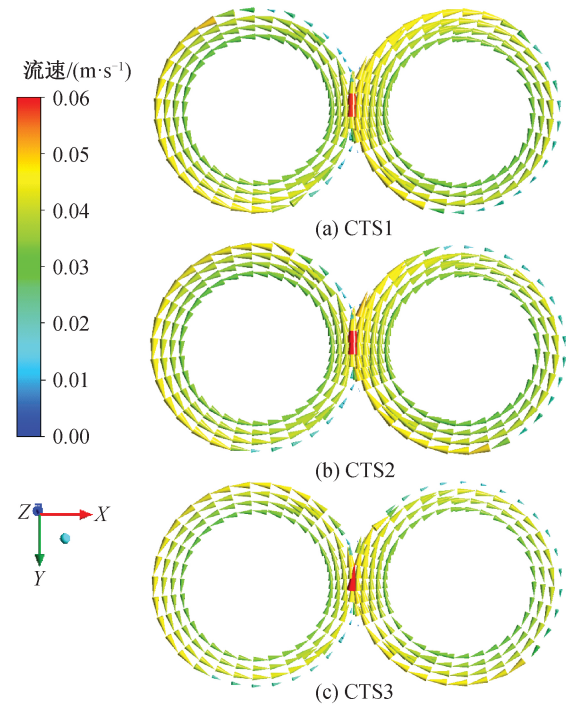


图3 三种锥形双螺杆在 $Z=0.01\text{ m}$ 平面的速度矢量图

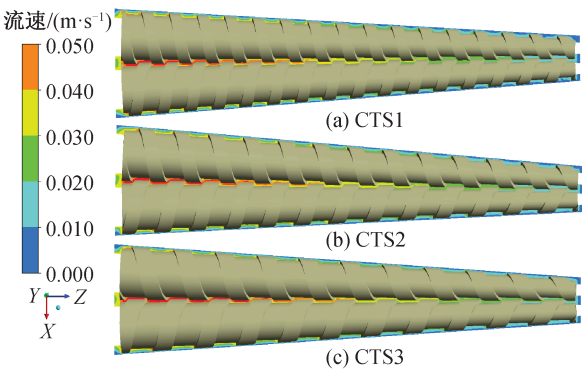


图4 三种锥形双螺杆在 $Y=0\text{ m}$ 平面上的速度分布云图

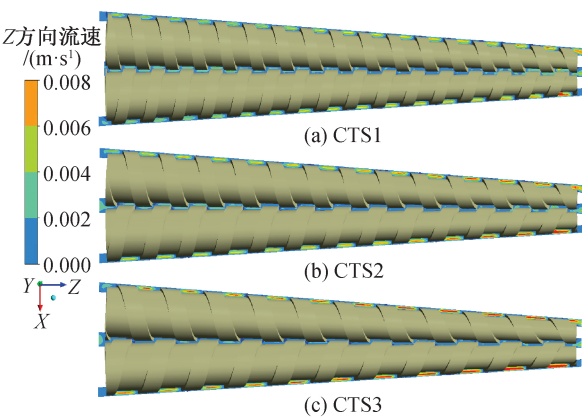


图5 三种锥形双螺杆在 $Y=0\text{ m}$ 平面上 $Z$ 方向速度分布云图

如图6所示。从图6中可以看出,随着螺距的增加,流体剪切速率略有降低。靠近筒壁的螺棱边缘处间隙较小,此处的流体剪切速率较大,啮合区域的流体较多,螺杆对此处流体的剪切作用弱于机筒壁面附



近的流体。可见,边缘处的螺棱能有效地对流体进行剪切,使其表现出良好的分散混合特性。

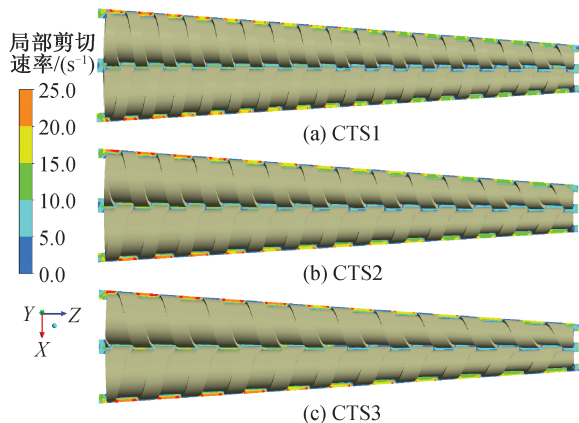


图 6 三种锥形双螺杆在  $Y=0$  m 平面上的剪切速率分布云图

螺杆构型对示踪粒子最大剪切速率的影响如图 7 所示。从图 7 中可以看出,对于相同百分含量的示踪粒子,随着螺距的增大,最大剪切速率随之减小。因此,增大螺距不利于提高 MCTSE 的分散混合性能,与徐俊杰<sup>[22]</sup>的研究中有关螺杆构型对流体最大剪切速率的影响规律一致。

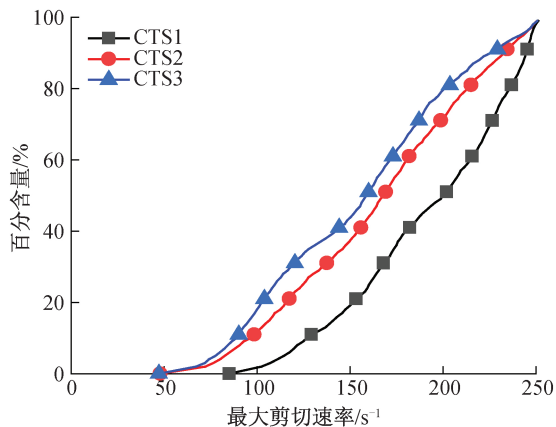


图 7 螺距对最大剪切速率的影响

螺杆构型对示踪粒子混合指数的影响如图 8 和图 9 所示。由图 8 可以发现,螺距的改变对示踪粒子混合指数的影响较小。从图 9 中也可以看出,对于相同百分含量的示踪粒子,随着螺距的增大,最大混合指数略微增加,流场中拉伸流的比例略微增加。然而随着单位长度的螺棱数量减少,螺杆对物料的剪切作用减弱。因此,螺距的增加虽能略微提升拉伸流的比例,但螺杆整体的分散混合能力却还是呈减弱趋势。

### 2.3 混合效率分析

平均对数拉伸长度随轴向距离的变化如图 10 所示。从图 10 中可以看出,平均对数拉伸长度沿着轴向距离方向呈指数变化。Ottino<sup>[23]</sup> 和 Zhang

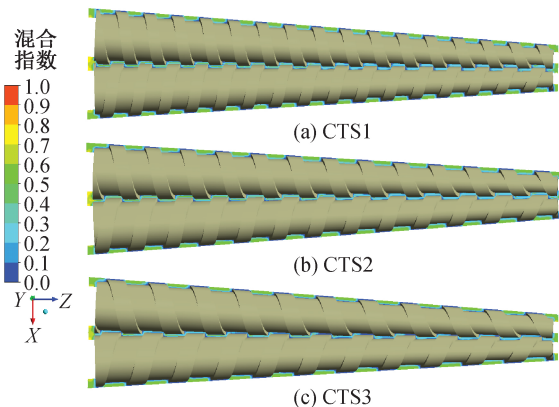


图 8 三种锥形双螺杆在  $Y=0$  m 平面上的混合指数分布云图

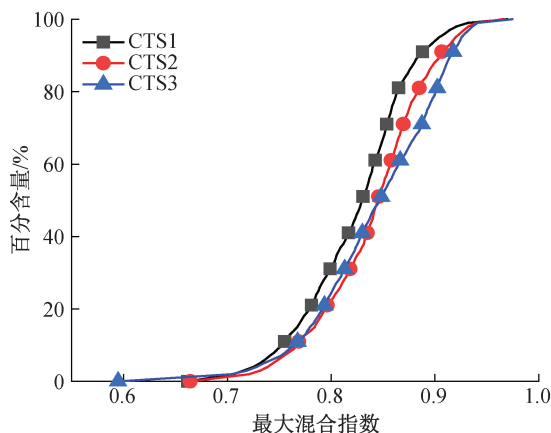


图 9 螺距对最大混合指数的影响

等<sup>[12]</sup>认为物料在连续反应器中,平均对数拉伸长度随轴向距离呈指数变化是混合器具有良好层流混合特性的必要条件,这表明 MCTSE 具有较好的层流混合特性。随着螺距的增加,平均对数拉伸长度相应地缩短,这表明小的螺距反而有利于提高螺杆的分布混合能力,与徐俊杰<sup>[22]</sup>的研究中有关螺杆构型对平均对数拉伸长度的影响规律一致。

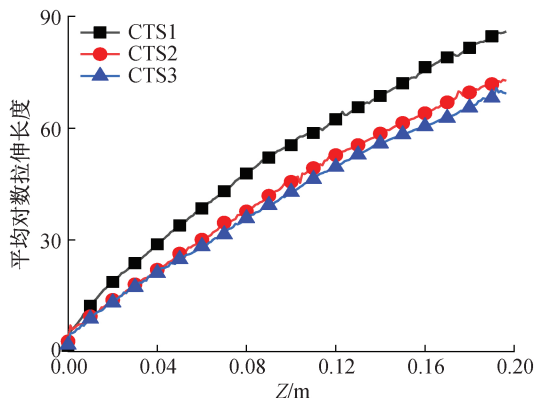


图 10 螺距对平均对数拉伸长度的影响

时间平均混合效率能表征混合器的整体混合效率<sup>[16]</sup>。平均时均混合效率随轴向距离的变化如图 11 所示。图 11 显示,平均时均混合效率在初始阶

段出现极快速的的增长,而后逐渐下降,最终趋于平稳,其原因是当物料刚进入挤出机内部时,伴随着螺杆的转动,短时间内挤出机的混合效率会出现一个峰值,而当流体随着螺杆的转动趋于稳定时,在累积的时间内,平均时均混合效率会逐渐下降<sup>[24]</sup>;平均时均混合效率一直保持正值,这表明物料在挤出机内部发生强烈的重定向。随着螺距的增加,平均时均混合效率呈现增大的趋势,表明随着螺距的增大,挤出机的混合效率也会随之提高,与徐俊杰<sup>[22]</sup>和陈世昌等<sup>[15]</sup>的研究中有关螺杆构型对时均混合效率的影响趋势一致。

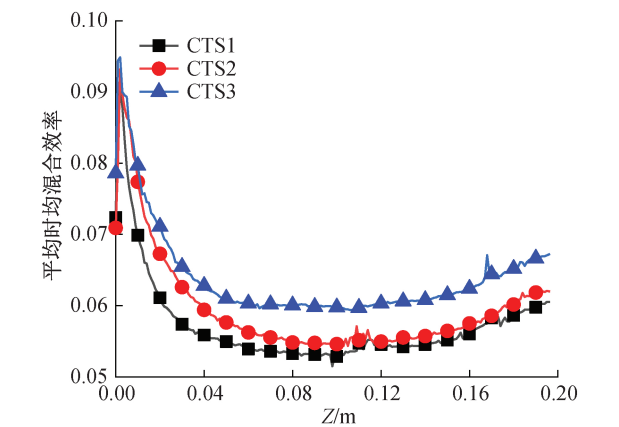


图 11 螺杆构型对平均时均混合效率的影响

3 结 论

本文采用三维有限元方法结合网格叠加技术,模拟了聚丙烯(PP)在反向旋转微型锥形双螺杆挤出机(MCTSE)中的流动过程,并通过粒子示踪技术来分析挤出机的混合性能,得到以下结论:

- a) 流体在螺杆啮合区的速度要大于筒壁周围速度,且随着轴向距离的增大而减小;随着螺距的增加,流体在挤出机内滞留的时间缩短,流体在轴向上的速度分量增大,流体更容易从挤出机中流出。
- b) 流体在啮合区的剪切速率小于筒壁边缘,随着轴向距离的增大而减小;当螺距增大时,单位距离上的螺棱数量减少,螺杆对流体的剪切作用减弱;最大混合指数虽然会随着螺距的增大而稍有增加,最大剪切速率却随之减小。
- c) 随着轴向距离的增加,流体平均对数拉伸长度呈指数式增长,增大螺距,平均对数拉伸长度减小,增大螺距不利于提高其分布混合能力,时均混合效率随着螺距的增大而增大。

参考文献:

[1] 何亮. 锥形双螺杆挤出机螺杆的优化设计[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(4): 48-52.

[2] Lin B, Sundararaj U, Pötschke P. Melt mixing of polycarbonate with multi-walled carbon nanotubes in miniature mixers [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2006, 291(3): 227-238.

[3] Cui L L, Paul D R. Evaluation of amine functionalized polypropylenes as compatibilizers for polypropylene nanocomposites[J]. Polymer, 2007, 48(6): 1632-1640.

[4] 郭冰,王克俭.锥形单螺杆挤出机建压能力模型分析[J]. 中国塑料, 2013, 27(9): 85-88.

[5] 王克俭,郭冰.锥形螺杆挤出机在塑炼设备中的应用及其建压机理[J]. 塑料, 2013, 42(3): 76-78.

[6] 耿孝正. 各种双螺杆挤出机的性能及应用[J]. 中国塑料, 1995, 9(5): 66-72.

[7] Seifert S. Comparison of parallel and conical twin screw extruders from the processing point of view [J]. Plastics, Rubber and Composites, 2005, 34(3): 134-142.

[8] Yu H W, Xu B P, Wu H W, et al. A visualization of flow patterns of viscoelastic fluid partially filled in a corotating nontwin screw extruder [J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(S1): 24-32.

[9] Xu B P, Liu Y, He L, et al. Numerical study of mixing dynamics inside the novel elements of a corotating nontwin screw extruder [J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(7): 2478-2496.

[10] Xu B P, Yu H W, Turng L S. Distributive mixing in a corotating twin screw channel using Lagrangian particle calculations [J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(6): 2215-2229.

[11] Sobhani H, Anderson P D, Meijer H H E, et al. Non-isothermal modeling of a non-Newtonian fluid flow in a twin screw extruder using the fictitious domain method [J]. Macromolecular Theory and Simulations, 2013, 22(9): 462-474.

[12] Zhang X M, Feng L F, Chen W X, et al. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder [J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(9): 1772-1783.

[13] 边靖.不同类型锥形双螺杆挤出机熔体输送段的模拟分析[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(14): 26-28.

[14] 徐俊杰,张先明,陈文兴,等.微型锥形双螺杆挤出机混合性能的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(3): 128-132.

[15] 陈世昌,张先明,徐俊杰,等.微型锥形双螺杆挤出机的

- 循环混合特性[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1217-1223.
- [16] Cheng W K, Ye Y, Jiang S X, et al. Mixing intensification in a horizontal self-cleaning twin-shaft kneader with a highly viscous Newtonian fluid[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 201: 437-447.
- [17] Jongen T. Characterization of batch mixers using numerical flow simulations[J]. AIChE Journal, 2000, 46(11): 2140-2150.
- [18] Vyakaranam K V, Ashokan B K, Kokini J L. Evaluation of effect of paddle element stagger angle on the local velocity profiles in a twin-screw continuous mixer with viscous flow using finite element method simulations[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(4): 585-599.
- [19] Yang H H, Manas-Zloczower I. Flow field analysis of the kneading disc region in a co-rotating twin screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 1992, 32(19): 1411-1417.
- [20] Cheng J J, Manas-Zloczower I. Hydrodynamic analysis of a banbury mixer-2-D flow simulations for the entire mixing chamber[J]. Polymer Engineering & Science, 1989, 29(15): 1059-1065.
- [21] Connelly R K, Kokini J L. Mixing simulation of a viscous Newtonian liquid in a twin sigma blade mixer[J]. AIChE Journal, 2006, 52(10): 3383-3393.
- [22] 徐俊杰. 微型锥形双螺杆挤出机混合性能的数值模拟[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 38-42.
- [23] Ottino J M. The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos and Transport[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1989: 1-396.
- [24] Salahudeen S A, Elleithy R H, AlOthman O, et al. Comparative study of internal batch mixer such as cam, banbury and roller: numerical simulation and experimental verification[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66: 2502-2511.

(责任编辑:唐志荣)