

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.04.012

异向双螺杆 S 型元件混炼效果的数值研究

刘湘河¹, 彭涛², 马永寿²

[1. 泰克国际贸易(天津)有限公司, 天津 300203; 2. 天华化工机械及自动化研究设计院有限公司, 兰州 730060]

摘要: 使用 Polyflow 软件, 数值模拟了高密度聚乙烯(PE-HD)/ 炭黑熔体在异向双螺杆挤出机流道内的流动, 数值计算了不同 S 型元件流道内熔体的三维等温流场, 采用粒子示踪分析法(PTA) 分析了不同 S 型元件流道内粒子的拉伸效果、分离尺度和停留时间, 考察了啮合方式和两螺杆装配方式对 S 型元件混炼效果的影响。研究表明, 啮合方式主要影响螺杆的输送能力、剪切能力和分布混合能力, 非啮合元件的输送能力约为部分啮合元件的 1.14 倍, 停留时间约为部分啮合元件的 2.5 倍, 但是其剪切能力仅为部分啮合元件 0.86 倍; 而螺杆的装配方式则影响其输送能力、拉伸能力和分布混合能力, 并列式装配元件的输送能力约为错列式装配元件的 1.11 倍, 停留时间约为错列式装配元件的 1.2 倍, 但是其拉伸能力不如错列式装配的元件。三种元件中, 部分啮合元件的分散混合性能最佳。

关键词: 异向旋转; 螺杆元件; 混炼效果; 数值分析

中图分类号: TQ315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)04-0051-05

Numerical Study on the Mixing Performance of Different S Screw Elements of Counter-rotating Twin Screw Extruder

Liu Xianghe¹, Peng Tao², Ma Yongshou²

[1. TAK International Trading(Tianjin) Co. Ltd., Tianjin 300203, China; 2. Tianhua Institute of Chemical Machinery & Automation Co. Ltd., Lanzhou 730060, China]

Abstract : The flow of high density polyethylene(PE-HD) / carbon black in channel of screw element of counter-rotating twin screw extruder was simulated by using the Polyflow software. A three dimensional isothermal flow field of melt in channel of different kinds of S-element was calculated. The logarithm stretching, segregation scale and resident time of particles in channel of different kinds of S-element was analyzed. The effect of screw meshing method and assembling method on mixing performance were studied. The mixing performance was compared with particle tracking analysis(PTA). The results show that the meshing method effects on the conveying capacity, shearing ability and distribution mixing of screw. The conveying capacity of non-intermeshing element was 1.14 times as much as part-intermeshing element, the residence time of non-intermeshing element is 2.5 times as much as part-intermeshing element, but the shearing ability of non-intermeshing element is only 0.86 times as much as part-intermeshing element. The assembling method effects on the stretching ability, distribution and dispersive mixing of screw. The conveying capacity of matched elements is 1.11 times as much as staggered elements, the residence time of matched elements is 1.2 times as much as staggered elements, but the stretching ability of matched elements is weaker than staggered elements. The dispersive mixing performance of part-intermeshing element is the best in all the three S-screw elements.

Keywords : counter-rotating ; screw element ; mixing performance ; numerical simulation

2012 年我国聚合物制品总量达到了 5781 万 t, 而同期我国型钢产量约为 6827 万 t, 聚合物越来越成为与钢材同等重要的基础材料之一。聚合物加工业的飞速发展带动了聚合物加工装备的发展。作为聚合物加工的重要装备之一的双螺杆挤出机也得到了越来越广泛的研究和应用。根据两螺杆旋转方向的不同, 可以将双螺杆挤出机分为同向旋转和异向旋转两种; 根据两螺杆中心距的不同, 可以将双螺杆挤出机分为完全啮合、部分啮合和非啮合 3 种^[1]。

尽管异向旋转双螺杆挤出机的自清理能力远不如同向旋转双螺杆挤出机, 但是其物料输送能力和计量挤出性能优越, 特别适合于高黏度、高硬度物料如橡塑共混、硬质聚氯乙烯等的挤出。

笔者使用 Polyflow 软件, 数值模拟了质量分数为 30% 炭黑增强高密度聚乙烯(PE-HD) 熔体在异

联系人: 刘湘河, 工程师, 大学本科, 主要从事引进化工设备, 负责整个过程的跟踪, 包括参与技术方案确定、设计协调、现场安装等

收稿日期: 2014-01-15

向双螺杆挤出机 S 型元件流道内的流动,数值计算了 3 种 S 型元件流道内熔体的压力场和剪切速率场,采用粒子示踪分析法(PTA)分析了不同元件流道内粒子的拉伸度对数、分离尺度和累积停留时间,考察了啮合方式和装配方式对其混炼效果的影响,研究结果可为异向双螺杆 S 型元件的选型提供参考。

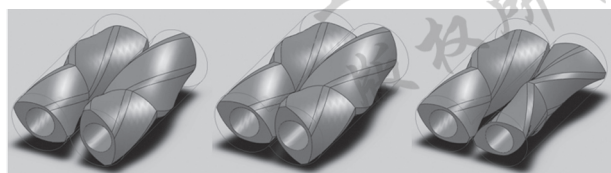
1 数学物理模型

研究的 S 型元件属于形状较特殊的新型螺杆元件,由正、反两段螺纹组成,总长 270 mm,其中正旋螺纹导程为 56 mm,长 160 mm;反旋螺纹导程为 56 mm,长 105 mm。

(1) 啮合方式:两螺杆端面中心线互相垂直(错列式装配)时,非啮合(中心距为 100 mm)与部分啮合(中心距为 82 mm);

(2) 装配方式:两螺杆非啮合时,错列式装配(两螺杆端面中心线互相垂直)与并列式(两螺杆端面中心线互相平行)装配。

根据以上描述,将 3 种 S 型元件两两组合进行比较,考察啮合方式以及装配方式对其混炼效果的影响。使用 Solidworks 软件建立了不同 S 型元件的几何模型,如图 1 所示。



(a) 非啮合错列式元件; (b) 部分啮合元件;
(c) 非啮合并列式元件

图 1 S 型元件的几何模型

根据双螺杆挤出机的实际工况以及所加工的物料性质,对熔体的流动进行了如下假设:

(1) 假设流物料全部熔融且充满流道,流道壁面无滑移;

(2) 由于聚合物熔体的高粘性,流动的雷诺数较小,可视作层流流动;

(3) 流动充分发展,流道内熔体作三维等温稳态流动;

(4) 熔体为不可压缩纯粘性非牛顿流体,不考虑熔体的弹性;

(5) 由于熔体的高粘性,与粘性力相比,惯性力和质量力可忽略。

根据以上基本假设,得到了描述流道内物料熔

体流动的控制方程^[2]如下:

$$\text{连续性方程: } \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\text{运动方程: } -\nabla p I + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

$$\text{本构方程: } \boldsymbol{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\mathbf{D}:\mathbf{D}} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}') \quad (5)$$

式中: $\mathbf{u}$ ——速度向量, m/s;

p ——压力, Pa;

I ——单位张量;

$\boldsymbol{\tau}$ ——剪切应力张量, Pa;

η ——表观黏度, Pa·s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹;

$\mathbf{D}$ ——变形速率张量, s⁻¹;

$\mathbf{u}'$ ——速度向量的转置。

根据实验测得的流变学数据,拟合出物料熔体表观黏度与剪切速率的关系符合 Carreau 模型:

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

式中: η_0 ——零剪切黏度,其值为 32 696.59 Pa·s;

λ ——松弛时间,其值为 0.975 540 5 s;

n ——非牛顿指数,其值为 0.295 314 1。

螺杆转速为 200 r/min,反外向旋转,边界条件设置如下:

$$\text{进、出口零压差: } f_n = 0, f_s = 0 \quad (7)$$

$$\text{机筒表面无滑移: } u_n = 0, u_s = 0 \quad (8)$$

$$\text{螺杆表面速度: } u_t = N \cdot 2\pi r \quad (9)$$

式中: N ——螺杆转速, 200 r/min;

r ——螺杆元件的半径, m。

在边界条件(7)~(9)下,控制方程组(1)~(6)封闭有解。但是,由于其具有强烈的非线性,无法采用解析法求解,只能采用数值分析。使用 Polyflow 软件,压力采用线性插值,速度采用 Min-element 插值,黏度采用皮卡儿迭代,用隐式欧拉法数值求解控制方程组。

2 数值计算结果与讨论

为了便于分析计算结果,分别选取流道入口($z=0.030$ m)且垂直于旋转轴的截面为 A-A 参考面,正反螺纹交界处($z=0.165$ m)且垂直于旋转轴的截面为 B-B 参考面,流道出口($z=0.240$ m)且垂直于旋转轴的截面为 C-C 参考面,如图 2 所示。

2.1 流场计算

图 3 给出了 3 种元件各参考截面熔体的压力场。由图 3 可知,螺棱处熔体压力较大,物料回流,

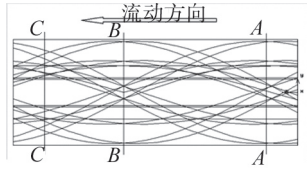
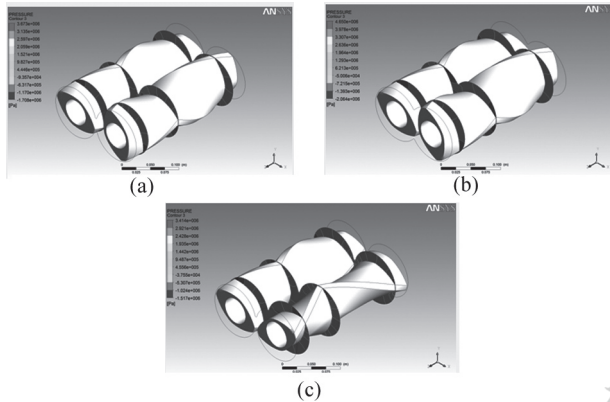


图2 A-A、B-B和C-C截面参考面的位置示意图

螺槽处熔体压力较小,物料向前输送。沿旋转方向,螺棱前端熔体的压力大于后端,非啮合并列式元件的压力场十分对称。



a—非啮合错列式元件; b—部分啮合元件; c—非啮合并列式元件

图3 各参考截面熔体的压力场

各参考截面熔体压力的平均值如表1所示。由表1可知,沿挤出方向,三种元件流道内熔体的平均压力均先增大后减小,即正反螺纹的交界处B-B截面熔体的压力最大,而流道出口C-C截面熔体的压力均小于流道入口A-A截面。这表明3种元件均具有一定的输送能力,可以用流道进出口压差表征元件输送能力的大小,如表2所示。

表1 各元件流道内熔体的压力平均值 Pa

项目	非啮合错列式元件	部分啮合元件	非啮合并列式元件
A-A面	398 319.3	355 357.1	409 780.8
B-B面	865 546.2	851 785.7	893 760.5
C-C面	173 109.2	157 142.9	159 359.2

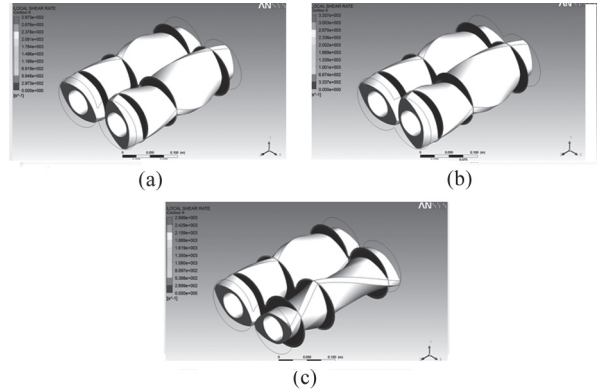
表2 各元件流道内熔体的进出口压差 Pa

非啮合错列式元件	部分啮合元件	非啮合并列式元件
225 210.1	198 214.2	250 421.6

考察啮合方式可以看出,非啮合错列式元件的流道进出口压差约为部分啮合元件的1.14倍;考察装配方式可以看出,并列式装配的元件流道进出口压差约为错列式元件的1.11倍。因此,啮合方式和装配方式均能影响元件的输送能力,非啮合错列式元件的输送能力为部分啮合元件的1.14倍,并列式装配元件的输送能力约为错列式装配元件的1.11倍。

图4给出了三种元件各参考截面熔体的剪切速率场。由图4可知,螺棱与机筒内壁间隙处熔体的

剪切速率较大,而螺槽内熔体的剪切速率相对较小。这是因为螺棱与机筒内壁的间隙较小,此处的速度梯度较大,所以产生的剪切速率较大。非啮合错列式装配的元件剪切速率场十分对称。



a—非啮合错列式元件; b—部分啮合元件;

c—非啮合并列式元件

图4 各参考截面熔体的剪切速率场

各参考截面熔体剪切速率的平均值如表3所示。沿挤出方向,非啮合螺杆元件流道内熔体的剪切速率先增大后减小,即入口A-A截面熔体的剪切速率最小,而正反螺纹的交界处B-B截面熔体的剪切速率最大;部分啮合元件流道内熔体的剪切速率则先减小后增大,即B-B截面熔体的剪切速率最小,而出口C-C截面熔体的剪切速率最大。可能的原因是由于部分啮合螺杆存在啮合区,两螺杆之间干涉较明显所致。

表3 3种元件各参考截面熔体的剪切速率平均值 s^{-1}

项目	非啮合错列式元件	部分啮合元件	非啮合并列式元件
A-A面	128.6	135.3	129.8
B-B面	137.8	132.6	134.9
C-C面	130.3	155.0	130.7

各元件流道内熔体的剪切速率平均值如表4所示。考察啮合方式可以看出,部分啮合元件平均剪切速率约为非啮合错列式元件的1.16倍,二者相差 $33.9 s^{-1}$;考察装配方式可以看出,非啮合错列式元件和非啮合并列式元件整体剪切速率相差不大,仅为 $0.3 s^{-1}$ 。因此,啮合方式能影响元件的剪切能力,而装配方式对元件的剪切能力影响不大。

表4 三种元件流道内熔体的剪切速率平均值 s^{-1}

非啮合错列式元件	部分啮合元件	非啮合并列式元件
214.1	248.0	214.4

2.2 混合效果

在上述流场分析的基础上,在流道入口截面随机放置1000个粒子,采用PTA计算粒子的运动轨迹,假设^[3]:

①放置的粒子无体积;②粒子的存在不影响流场;③粒子与粒子之间不存在相互作用;④粒子的运动仅由速度场决定。

(1) 评价混合的指标。

用拉伸度和分离尺度评价各元件的分散混合性能,用停留时间评价其分布混合性能。

不可压缩的流体的拉伸度可表示为:

$$\xi = \sqrt{\hat{N}^T (C^{-1}) \hat{N}} \quad (10)$$

式中: $\hat{N}$ —— dA 面的法线方向;

t ——时间;

C^{-1} ——Finger 形变张量。

拉伸度越大,说明分散混合效果越好。

令 $c(r, t)$ 表示混合过程中一种流体的浓度。由于两种流体互不相容, c 的值为 0 或 1, 且沿粒子的轨迹线 c 值保持不变。分析 t 时刻流场中相距为 r 的 m 对质点 (质点总数 $n=2m$) 的浓度分布。对于第 j 对质点, 令 c'_j 和 c''_j 分别表示这两个质点处的浓度。令 c_i 表示 n 个质点中第 i 个质点的浓度, 其值为 0 或 1; $\bar{c}$ 表示所有质点的平均浓度, 即 $\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i$ 。在 t 时刻, 一对相距为 r 有相同浓度的随机质点的概率, 即浓度相关系数 $R(r, t)$ 为:

$$R(r, t) = \frac{\sum_{j=1}^m (c'_j - \bar{c})(c''_j - \bar{c})}{m\sigma_c^2} \quad (11)$$

式中: σ_c ——浓度的标准偏差, 即 $\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}$ 。

相距为 r 的两点处浓度 (体积分数) 间相关系数的积分则为物料粒子的分离尺度, 分离尺度越小, 说明物料的分散混合效果越好。

$$S(t) = \int_0^\xi R(r, t) dr \quad (12)$$

式中: S ——物料粒子的分离尺度;

ξ ——相关系数 $R(r, t)=1$ 处两质点间的距离。

停留时间分布 (RTD) 反映了所有被加工物料在挤出机内停留的时间范围, 记累积的外部停留时间函数为:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (13)$$

(2) 混合效果分析。

将 3 种 S 型元件流道从入口到出口分成 54 个间距为 0.005 m 的截面, 计算各截面物料的浓度分布, 由式 (10)~(13) 得出流道内粒子的拉伸度对数、

分离尺度、累积停留时间。

图 5 给出了不同 S 型元件流道内粒子拉伸度自然对数的分布。由图 5 可知, 部分啮合元件流道内粒子的拉伸度自然对数沿挤出方向是逐渐增大的, 说明沿挤出方向物料的混合作用不断增强。尽管非啮合元件离流道入口不远处存在峰值, 但是其拉伸度对数沿挤出方向变化的整体趋势是增大的。非啮合错列式元件流道出口粒子的拉伸度对数约为 8.169, 部分啮合元件约为 8.222, 非啮合并列式元件约为 6.441。

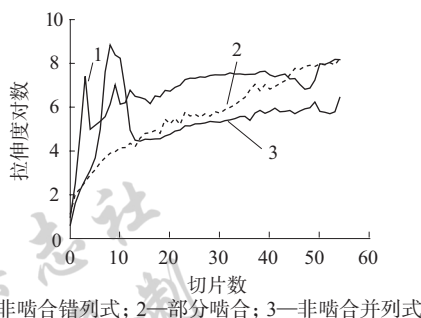


图 5 不同 S 型元件流道内粒子的拉伸度对数

图 6 给出了各元件流道内粒子的分离尺度。考察啮合方式可知, 沿挤出方向, 两种元件流道内粒子的分离尺度均先减小后趋于平缓。流道入口处, 非啮合错列式元件内粒子的分离尺度减小的速度稍大于部分啮合螺杆元件, 流道出口处, 两元件粒子的分

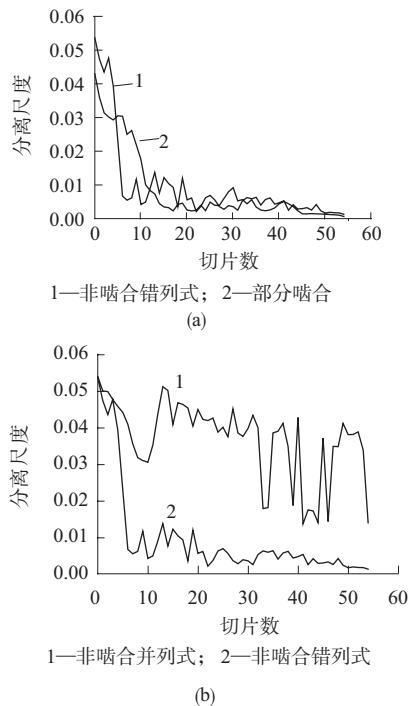


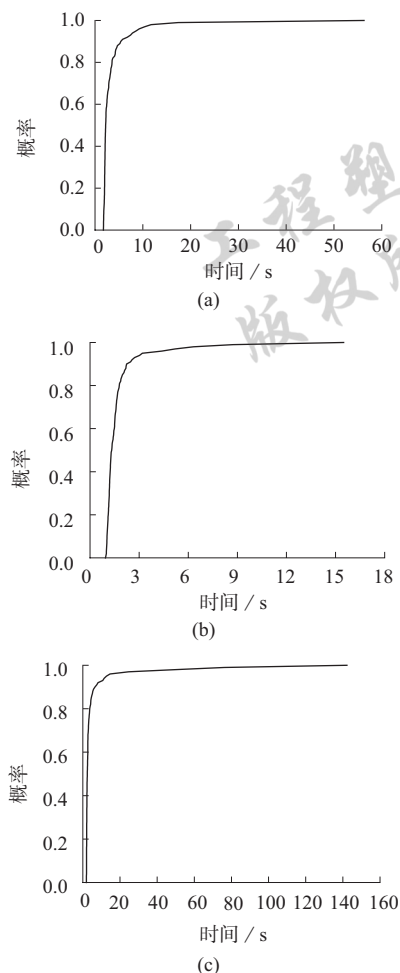
图 6 各元件流道内粒子的分离尺度

离尺度相差不大,非啮合错列式元件约为 0.001 3,部分啮合元件约为 0.000 6。

考察非啮合元件的装配方式可知,沿挤出方向,非啮合并列式元件流道内粒子的分离尺度呈震荡趋势。流道出口处,非啮合并列式元件的分离尺度约为 0.013 9,因此其分散混合性能不如错列式装配元件。

综上可知,啮合方式对流道内粒子的分离尺度影响较小,而两螺杆装配方式对流道内粒子的分离尺度影响较大。3 种元件中,部分啮合元件的分散混合性能最优。

图 7 给出了 3 种元件流道内粒子的累积停留时间分布。由图 7 可知,对于非啮合错列式元件,全部粒子流出约耗时 56.3 s;对于部分啮合元件,全部粒子流出约耗时 15.5 s;对于非啮合并列式元件,全部粒子流出约耗时 142.2 s。为了避免壁面无滑移假



a—非啮合错列式元件; b—部分啮合元件; c—非啮合并列式元件

图 7 各元件流道内粒子的累积停留时间分布

设对累积停留时间造成的影响,采用 90% 粒子的累积停留时间作为基准考察不同 S 型元件的混合性能,如表 5 所示。

表 5 各元件流道内 90% 粒子的累积停留时间 s		
非啮合错列式元件	部分啮合元件	非啮合并列式元件
5.4	2.2	6.5

由表 5 可知,部分啮合元件流道内粒子的累积停留时间仅为非啮合元件的 0.41 倍,二者约相差 3.2 s;并列式装配的元件其流道内粒子的累积停留时间约为错列式装配元件的 1.2 倍,二者约相差 1.1 s。

3 结论

(1) 啮合方式能影响元件的输送能力、以剪切为主的分散混合能力和分布混合能力。非啮合元件的输送能力较强,约为部分啮合元件的 1.14 倍,停留时间较长,约为部分啮合元件的 2.5 倍,但是其剪切能力不如部分啮合元件,仅为 0.86 倍。

(2) 装配方式能影响元件的输送能力、以拉伸为主的分散混合能力和分布混合能力。并列式装配元件的输送能力较强,约为错列式装配元件的 1.11 倍,停留时间较长,约为错列式装配元件的 1.2 倍,但是其拉伸能力不如错列式装配的元件。

(3) 3 种 S 型元件,非啮合元件的输送能力较强,非啮合错列式装配的元件,其停留时间适中,适合于聚合物的型材挤出;非啮合并列式装配的元件,其停留时间较长,适合于反应过程比较柔和,反应时间较长的反应挤出,如溶液聚合。部分啮合元件的剪切和拉伸能力较强,停留时间较短,适合对表面更新和传质要求高的反应挤出,如阴离子聚合、自由基聚合。

参考文献

- [1] 詹姆斯 L. 怀特[美],金永奎[韩]. 双螺杆挤出—技术与原理[M]. 北京:化学工业出版社,2013:4-5.
White J L[USA], Kim E K[KOR]. Twin screw extrusion—technology and principles[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013:4-5.
- [2] 陈晋南. 传递过程原理[M]. 北京:化学工业出版社,2004:75-89.
Chen Jinnan. Principle of transfer processes[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004:75-89.
- [3] Hu Dongdong, Chen Jinnan. Simulation of polymer melt flow fields in intermeshing co-rotating three-screw extruders[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2006, 15(3): 360-365.

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告