

同向双螺杆挤出机中齿形元件的流动和混合模拟

董中华, 江波, 许澍华

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 应用 POLYFLOW 软件, 采用三维非等温、Cross 模型, 对高聚物熔体在双螺杆挤出机齿形元件和断裂螺纹元件中的流动和混合过程进行了数值模拟, 并用示踪粒子法研究了不同颜色粒子的流迹和停留时间、剪切速率、剪切应力、拉伸速率的分布。在此基础上, 对两种元件的分布性混合和分散性混合性能进行的量化分析对比发现, 与断裂螺纹元件相比, 齿形元件有着弱的输送能力和建压能力, 强的轴向温升能力, 强的分布性混合能力和分散性混合能力。

关键词: 同向双螺杆挤出机; 混合元件; 流动模拟; 混合模拟

中图分类号: TQ320.512 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-9278(2005)02-0090-05

Flow and Mixing Simulation for Turbine Mixing Elements
in a Co-rotating Twin Screw Extruder

DONG Zhong-hua, JIANG Bo, XU Shu-hua

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

Abstract: Non-Newtonian and non-isothermal flow simulations based on 3D FEM were applied to the turbine mixing element (TME) and the screw mixing element (SME) with POLYFLOW. Additionally, marked particle tracking analysis was carried out to evaluate the distributive and dispersive mixing judging from residence time distribution, shear rate distribution, stretching rate distribution and distributive performance of material points. The SME was examined in order to contrast flow and mixing patterns with the TME. Using the above analyses, the comparison of flow behavior and mixing performance of the TME and the SME was obtained.

Key words: co-rotating twin screw extruder; mixing element; flow simulation; mixing simulation

啮合同向双螺杆挤出机在橡胶、塑料混炼加工方面的应用越来越广泛, 其螺杆由多种螺杆元件组成。随着人们对挤出机性能要求的不断提高, 研究高混合效率的新型螺杆元件是一种趋势。啮合同向双螺杆挤出机中的混合元件主要有齿形元件 (TME) (包括直齿和斜齿) 和断裂螺纹元件 (SME)^[1]。TME 亦叫涡轮混合元件, 如图 1 所示。单个齿形元件像一个盘, 其圆周上分布若干齿, 状如齿轮。齿可以是直的, 也可以是斜的。TME 是一种很好的混合元件。在两根螺杆上的齿形盘非交错区可以对物料进行分流, 增加界面, 提供较小的能量输入, 有利于分布混合; 在交错区, 两根螺杆上的齿形盘可以对料流形成垂直于流动方向的剪

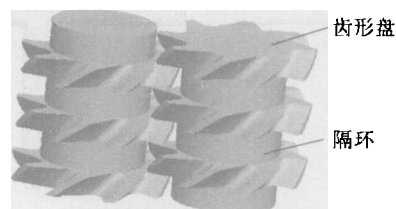


图1 TME 三维模型

Fig. 1 3D model for TME

切, 也有利于分布混合。如果两根螺杆上的齿形盘元件间的间隙很小, 因相互间的相对速度很大, 会产生很高的剪切速率, 有利于分散混合。SME 是由全螺纹元件沿着螺棱顶部开设沟槽而成, 其主要目的是增加轴向回流, 促进混合。对 TME 数值研究的报道几乎没有, 因而对其流动和混合的数值模拟研究对改善和提高高聚物在双螺杆挤出机加工过程中混炼能力有着十

收稿日期: 2004-10-25

高等学校博士学科点专项科研基金资助 (20010010002)

分重要的意义。

1 理论模型

1.1 物理模型

TME 为 30°斜齿、右旋,八齿均布。齿形盘的外径 20 mm,轴向长度 3 mm,中间隔环的轴向长度 4 mm,两端隔环的轴向长度 3.5 mm,TME 总的轴向长度为 20.5 mm。SME 的直径 20 mm,导程 20 mm,在螺纹元件的圆周方向上开设有 6 条导程为 40 mm 的左旋沟槽,取轴向长度也为 20.5 mm。机筒直径 21 mm,中心距 17 mm。采用 POLYFLOW 中网格重叠技术分别对 TME 和 SME 以及流体流经区域(机筒内腔)进行如图 2~4 所示的网格划分。

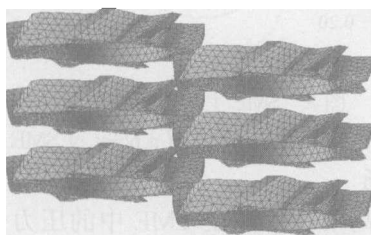


图 2 TME 网格划分

Fig. 2 Mesh division for TME

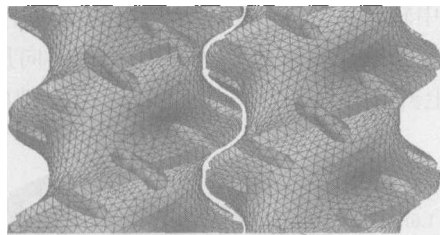


图 3 SME 网格划分

Fig. 3 Mesh division for SME

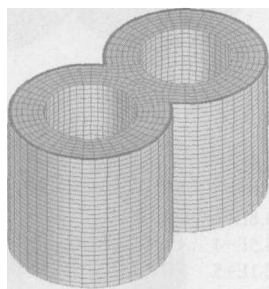


图 4 流经区域网格划分

Fig. 4 Mesh division for the flow domain

考虑到熔体输送段的具体工艺条件及高聚物的特性,作出如下简化假设:

- ①高聚物熔体为 Cross 流体;
- ②流动为稳定流动;
- ③流场为非等温流场;
- ④由于雷诺数较小,可认为流动为层流流动;

⑤由于惯性力,熔体的体积力远小于黏滞力,故可忽略不计;

⑥熔体为不可压缩流体。

1.2 数学模型

通过以上假设,连续性方程和动量方程可简化为式(1)、式(2)形式:

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

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

$$\text{能量方程: } \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{v} \quad (3)$$

$$\text{本构方程: } \boldsymbol{\tau} = 2\eta \mathbf{D} \quad (4)$$

式中 \mathbf{v} ——速度矢量

p ——压力

$\boldsymbol{\tau}$ ——应力张量

ρ ——密度

C_p ——热容

T ——温度

k ——热传导系数

η ——黏度

\mathbf{D} ——形变速率张量

η 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 和 T 的变化关系由式(5)给出。

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, T) = \eta_0(\dot{\gamma}) \cdot H(T) \quad (5)$$

在参考温度 T_0 下, $\eta_0(\dot{\gamma})$ 的表达式由式(6)所示的 Cross 模型给出。与幂律模型相比, Cross 模型能够适用于更宽的剪切速率范围,同时能给出 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 时的合理黏度值。

$$\eta_0(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m} \quad (6)$$

$H(T)$ 由式(7)所示的近似 Arrhenius 模型给出:

$$H(T) = \exp[-b(T - T_0)] \quad (7)$$

式中 η_0 ——零剪切速率黏度

λ ——自然时间

m ——Cross 模型指数

b ——温度敏感系数

T_0 ——参考温度

计算中所用到的物料为 PE(丹麦 Borealis 公司生产,牌号为 OE6417),其物性参数如表 1 所示。

表 1 PE 物性参数

Tab. 1 Physical properties of PE

项 目	性 能
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	800
$\eta_0/\text{Pa} \cdot \text{s}$	8 000
b/K^{-1}	0.0025
$k/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.5
λ/s	0.12
T_0/K	573
$C_p/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	2 500
m	0.75

1.3 边界条件

流动边界条件和热边界条件如表 2 所示。

表 2 边界条件

Tab.2 Boundary conditions

位 置	流动边界条件	热边界条件
流动入口	自然流动状态(流动的人口和出口都给零压力)	473 K
流动出口		热出口(无边界条件)
机筒内表面	无滑移	473 K
螺杆表面	由螺杆转速 480 r/min 计算表面线速度	绝热

2 流动的模拟计算结果

2.1 TME 上的速度场

垂直于轴线截面上的法向速度分布和平行于轴线截面上的轴向速度分布如图 5、图 6 所示。由图 5 看出,齿形盘中物料的流动速度很大,而齿形盘间隔环上的物料的流动速度较小。由图 6 看出,在齿形盘间隔环上的大部分区域内,轴向速度为零,即在此区域内,物料在轴线方向上不作运动,这有可能造成物料的停滞和分解;而在齿形盘交错区域,轴向速度变化复杂,不但速度大小不一样,方向也不相同,这对混合十分有益。

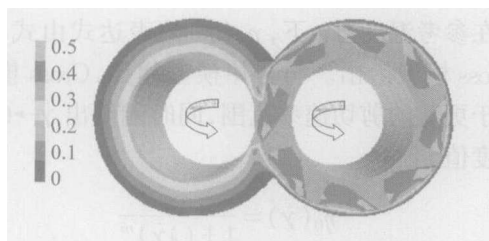


图 5 垂直于轴线截面上的法向速度

Fig.5 Normal velocity for the cross section perpendicular to axes

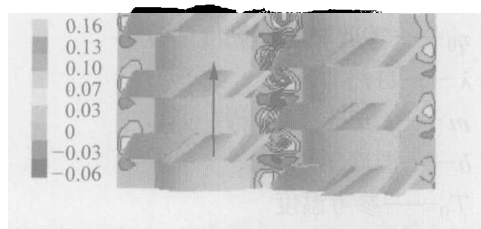


图 6 平行于轴线截面上的轴向速度

Fig.6 Axial velocity for the cross section parallel to axes

在流动的人口处任意位置布置一个粒子,通过速度对时间的积分,能获得该粒子在三维空间的流迹。图 7 和图 8 分别为 TME 和 SME 上任意一质点的流迹。图中颜色深浅表示轴向速度值的大小。从质点的流动轨迹可以看出,质点在 TME 上流动过程中,在两根螺杆上不断交换,但相比于 SME,其轴向运动能力比较弱,因为在 SME 上,质点经过很短的路程就能到达出口。计算 TME 和 SME 的出口流量分别为

$4.65 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $10.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。与 SME 相比, TME 的输送能力降低了 53.96 %。

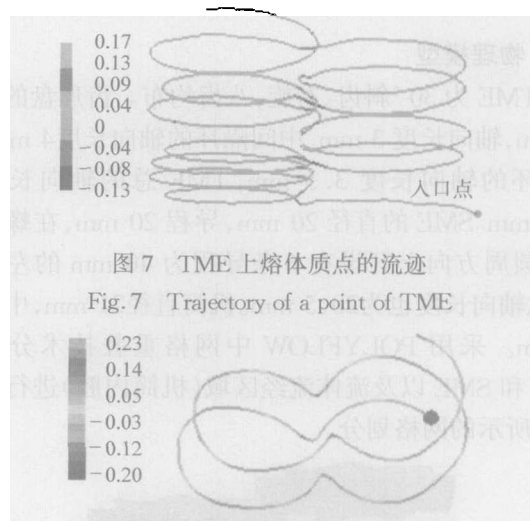


图 7 TME 上熔体质点的流迹

Fig.7 Trajectory of a point of TME

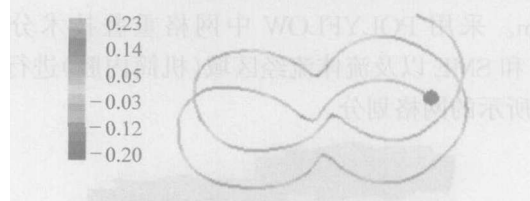
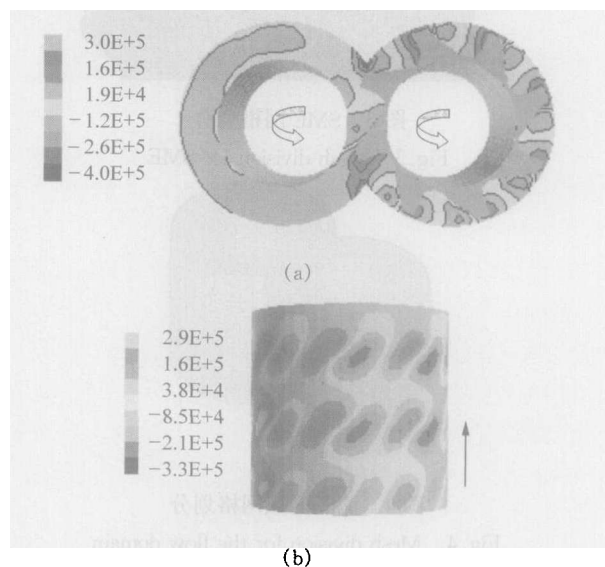


图 8 SME 上熔体质点的流迹

Fig.8 Trajectory of a point of SME

2.2 压力场

图 9 为高聚物熔体在 TME 中的压力分布。沿轴向取若干点,通过计算可以得到熔体在 TME 和 SME 中流动的轴向压力的变化,如图 10 所示。由图 10 看出, SME 中轴向压力呈波浪起伏,且呈不断上升趋势,说明 SME 有一定的建压能力; TME 中轴向压力仅有起伏,而上升趋势几乎看不出来,说明该元件的建压能力很弱。



(a)垂直于螺杆轴线截面上的压力分布

(b)机筒内表面的压力分布

图 9 TME 压力分布

Fig.9 Pressure field of TME

2.3 温度场

TME 中平行于轴线截面上温度分布如图 11 所

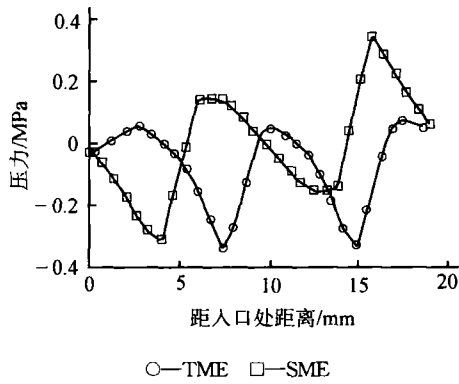


图 10 轴向压力分布比较

Fig. 10 Comparison of the axial pressure distribution

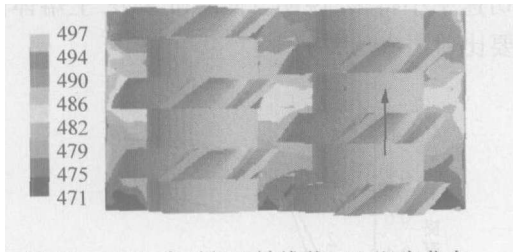


图 11 TME 中平行于轴线截面上温度分布

Fig. 11 Temperature distribution of TME

示,温度在轴线方向上不断上升,说明有机械能转化为热能从而使物料的温度逐渐上升。比较熔体在 TME 和 SME 中流动的轴向温度变化,如图 12 所示,可以看出,TME 中熔体在轴向距离上的温升要比 SME 剧烈得多。能够得出,TME 提供给单位体积流量熔体的耗散功要比 SME 多得多。计算 TME 和 SME 整个流动区域的耗散功分别为 229 W 和 214 W,再由前面两者流量计算可得单位体积流量熔体所消耗的耗散功分别为 $49.25 \times 10^6 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 和 $21.19 \times 10^6 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

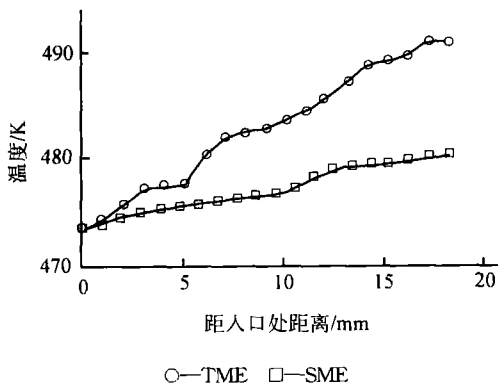


图 12 轴向温度分布比较

Fig. 12 Comparison of the axial temperature distribution

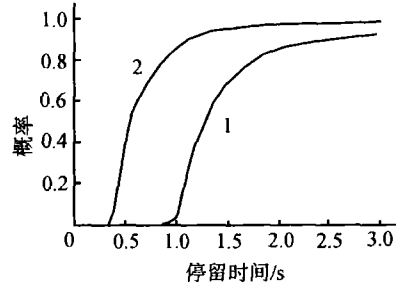
3 混合的模拟计算结果

聚合物混合包括分布性混合和分散性混合^[2]。对于分布性混合,主要从统计的停留时间分布和粒子的分布状态图进行分析;对于分散性混合,主要从统计的

剪切速率分布、剪切应力分布和拉伸速率分布进行分析。

3.1 停留时间分布与分布性混合

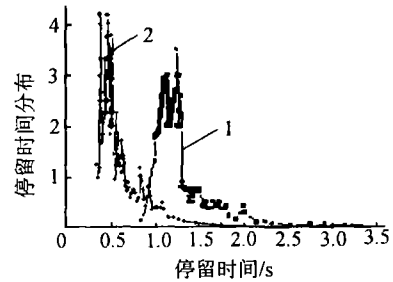
在入口处布置约 1 000 个粒子,统计计算这些粒子流经 TME 和 SME 到达出口所用的时间。计算得到的停留时间概率函数 p ,如图 13 所示。停留时间概率函数密度也称停留时间分布函数(RTD),它是通过 $\text{RTD} = \partial p / \partial t$ 计算获得,如图 14 所示。从图 14 能够看出 SME 的 RTD 分布窄,停留时间短。而 TME 的 RTD 分布宽,停留时间长。



1—TME 2—SME

图 13 停留时间概率函数

Fig. 13 Probability function of the residence time



1—TME 2—SME

图 14 停留时间概率函数密度

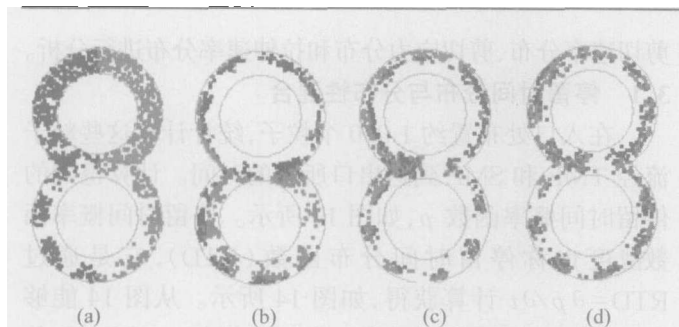
Fig. 14 Density of probability function of the residence time

把入口的粒子分成两种颜色,模拟计算这些粒子在 TME 和 SME 中轴向不同长度上,垂直于轴线截面内的分布性混合状况如图 15、图 16 所示,图中 d 表示距离入口位置的轴向长度,从中可以直观地观察到粒子在 TME 上的分布均匀性要比 SME 的好。

3.2 分散性混合

分散混合过程是粒子的粒径不断减小的过程,分散混合主要是通过剪切应力和拉伸应力起作用,即剪切速率和拉伸速率是决定性的变量。剪切速率和拉伸速率越高,越有利于分散;物料通过高应力区的次数越多,越有利于分散。

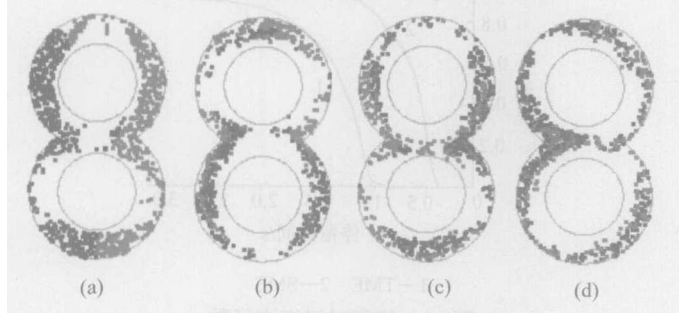
统计粒子所经历的最大剪切速率和最大剪切应力,得到最大剪切速率概率函数和最大剪切应力概率函数分别如图 17、图 18 所示,由这两个图看出,TME 上整体粒子所经历的最大剪切速率和最大剪切应力要



d/mm: (a)0 (b)5 (c)10 (d)17

图 15 TME 中粒子分布

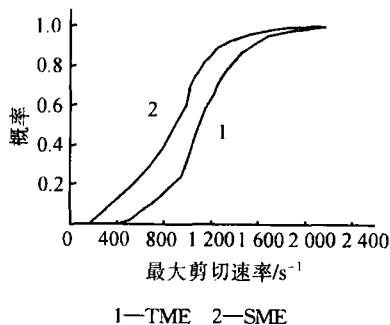
Fig. 15 Distribution of material points of TME



d/mm: (a)0 (b)5 (c)10 (d)17

图 16 SME 中粒子分布状态

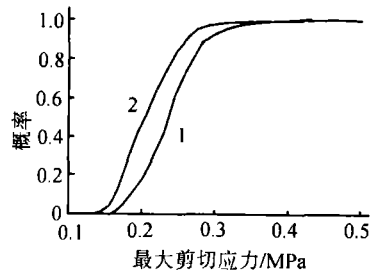
Fig. 16 Distribution of material points of SME



1—TME 2—SME

图 17 最大剪切速率概率函数

Fig. 17 Probability function of the maximal shear rate



1—TME 2—SME

图 18 最大剪切应力概率函数

Fig. 18 Probability function of the maximal shear stress

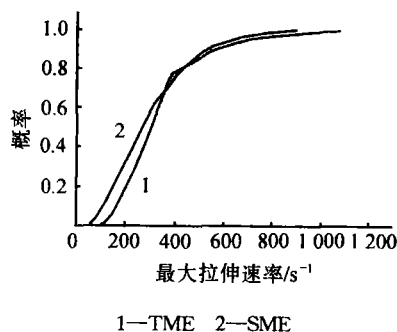
比 SME 的高。

对于分散混合,拉伸流动比剪切流动起到的作用更大。故近来的研究越来越偏重于拉伸流动的分析。拉伸速率 $\dot{\epsilon}$ 的计算如式(8)所示^[1]:

$$\dot{\epsilon} = [u^2 u'_x + v^2 v'_y + w^2 w'_z + uv(u'_y + v'_x) + uw(u'_z + w'_x) + vw(v'_z + w'_y)] / (u^2 + v^2 + w^2) \quad (8)$$

式中 u, v, w ——分别表示 x, y, z 方向上的速度

统计粒子所经历的最大拉伸速率,得到最大拉伸速率概率函数如图 19 所示。由图 19 可见,两元件上粒子所经历的最大拉伸速率相差不大。对比图 17 和图 19 中剪切速率和拉伸速率的数值,发现拉伸速率要比剪切速率小得多,说明 TME 和 SME 上熔体的拉伸流动要比剪切流动弱。



1—TME 2—SME

图 19 最大拉伸速率概率函数

Fig. 19 Probability function of the maximal stretching rate

4 结论

(1)TME 的轴向输送能力比较弱,几乎没有什么建压能力,轴向温升要比 SME 的剧烈。

(2)TME 上粒子的停留时间分布函数宽,停留时间长,其分布性混合能力要比 SME 强。

(3)TME 上整体粒子所经历的最大剪切速率、最大剪切应力要比 SME 高,所经历的最大拉伸速率与 SME 的接近。TME 的分散混合能力要比 SME 强。

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. 232.
- [2] Z. Tadmor, G. Gogos. Principles of Polymer Processing[M]. New York: Wiley, 1979. 235.

欢迎订阅, 欢迎投稿, 欢迎发布宣传资料!