

# 往复式单螺杆销钉挤出机典型螺纹元件混合性能研究

毕超, 江波

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

**摘要:** 使用 Polyflow 有限元软件对往复式单螺杆销钉挤出机(简称 Buss 机)的三类典型螺纹元件内物料流动和混合过程进行了数值模拟。流场分析中使用了网格重叠技术。在得到流场速度分布后, 基于粒子轨迹跟踪技术计算了物料微元在螺纹元件内的流动轨迹, 并分析了 Buss 机螺纹元件内物料的动态混合过程。以分布混合指数和分隔比例为指标定量地对比了螺纹元件的分布和分散混合性能, 在此基础上分析了加工条件、物料特性及销钉布置对 Buss 机混合性能的影响。数值模拟结果与前人研究有较好的吻合性。

**关键词:** 往复式单螺杆销钉挤出机; 分布混合; 分散混合

**中图分类号:** TQ320.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-9278(2008)01-0090-06

## Mixing Performances of Typical Screw Elements in Buss Kneader

BI Chao, JIANG Bo

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

**Abstract:** In the present study, the flow and mixing characters of the typical screw elements in the reciprocating pin single-screw extruder were studied using a Polyflow finite element package. Based on the statistical treatment of the flow trajectories for a large number of the mass points which were located at the entrance of the screw element, the dynamic mixing process was analyzed. Furthermore, the distribution index and the segregation scale were applied to evaluate the distribution mixing and the dispersive mixing, respectively. At last, the effects of the operating conditions, material viscosity and the pins on the mixing performances of the extruder were also analyzed. Some of the numerical results were compared with previous results.

**Key words:** reciprocating pin single-screw extruder; distributive mixing; dispersive mixing

往复式单螺杆销钉挤出机(简称 Buss 机)具有良好的分布和分散混合性能, 近年来越来越多地应用于塑料、粉体涂料以及食品的混合和加工<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代开始就有学者对 Buss 机内物料的流动机理进行研究<sup>[2~8]</sup>, 但是有关 Buss 机混合特性系统研究的论文还比较少<sup>[9,10]</sup>。自 2000 年以来北京化工大学等单位开始对该类机型的设计原理<sup>[11]</sup>和混合特性<sup>[10]</sup>进行研究, 并开发了若干种新型螺纹元件<sup>[12]</sup>。

本文使用 Polyflow 软件对 Buss 机内物料流动进行了三维动态模拟。在跟踪粒子运动轨迹的基础上, 以累计分布混合指数为量化指标, 比较了 Buss 机三类典型螺纹元件的分布、分散混合性能, 分析了加工条件和

物料特性及销钉布置对 Buss 机混合性能的影响, 并将部分模拟结果与文献中的结果进行了对比。

## 1 有限元数值模拟

采用网格重叠技术, 计算物料在 Buss 机螺纹元件内的流场。计算中综合考虑了螺杆的轴向旋转运动和轴向往复运动, 在螺杆的一个旋转周期内, 每隔 10° 计算一次速度场。在求得每个位置的速度场分布后, 应用粒子轨迹跟踪(PTA)技术, 计算了初始时布置在螺纹元件入口处 1 000 个粒子在螺纹元件内的流动轨迹, 使用统计模块 Polystat 计算螺纹元件内的粒子距离分布概率及分隔比例, 并使用 MATLAB 计算分布混合指数。

### 1.1 基本假设

(1) 物料在 Buss 机螺纹元件内的流动为三维、定

收稿日期: 2007-09-19

常、黏性、全展流动;

(2)物料在螺槽内的流动过程与外界不发生热交换;

(3)忽略重力和惯性力的影响;

(4)壁面无滑移。

## 1.2 网格划分及边界条件

笔者以自行研制的 WXJ-45 型往复式单螺杆销钉挤出造粒机组为对象。其螺杆组合形式如图 1 所示,三类典型螺纹元件见图 2。图 3 和图 4 分别给出了螺纹元件和机筒销钉的网格划分情况。由于螺纹元件和机筒销钉的结构形式比较复杂,所以选择适应性较强的四面体网格对实体进行网格划分。采用网格重叠技术进行计算,可以简化物料区域的三维模型,物料区域采用环形端面圆柱体模型,如图 5 所示。由于模型几何形状相对简单,可采用六面体网格来划分实体,以提高数值计算精度。

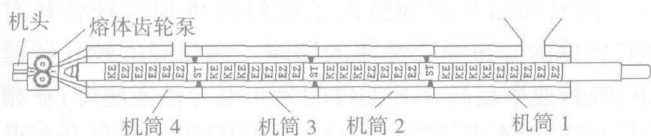
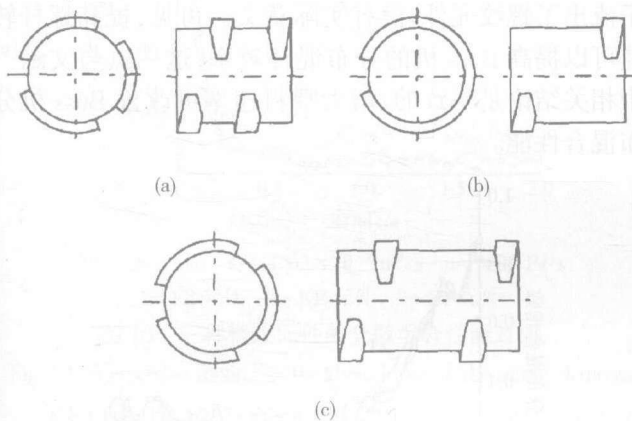


图 1 螺杆组合形式

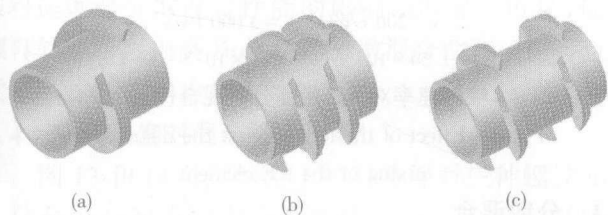
Fig.1 Schematic of the screw configuration



(a)KE 元件 (b)EZ 元件 (c)ST 元件

图 2 螺纹元件三维模型

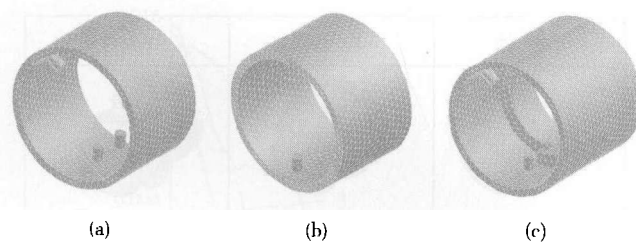
Fig.2 3D Models of the screw elements



(a)KE 元件 (b)EZ 元件 (c)ST 元件

图 3 螺纹元件网格

Fig.3 Grids of the screw elements



(a)KE 元件 (b)EZ 元件 (c)ST 元件

图 4 机筒及销钉网格

Fig.4 Grids of the barrels and pins

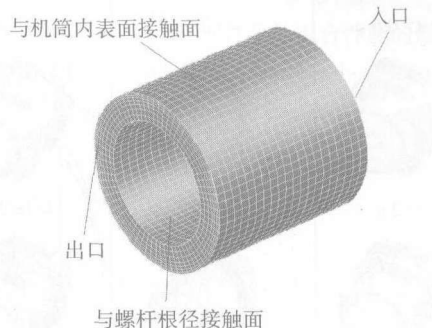


图 5 流体区域网格划分及边界条件

Fig.5 Grid of the fluid field and the boundary conditions

如图 5 所示,流道入口施加边界条件给定体积流量;出口处施加边界条件;与机筒内表面接触面速度为零;与螺杆根径接触面速度与螺杆速度相同,由圆周速度和往复速度两部分组成。圆周速度即为螺杆转动角速度  $\omega$ :

$$\omega = 2\pi N \quad (5)$$

式中  $N$ ——螺杆转速,分别设为 100、200、300 r/min

$\omega$ ——螺杆转动角速度,rad/s

螺杆的往复速度  $V_z$  可表示为:

$$V_z(t) = S_0 \omega \cos \omega t \quad (6)$$

式中  $V_z$ ——螺杆往复速度,m/s

$S_0$ ——螺杆往复运动的摆幅, $S_0 = 3.375$  mm

$t$ ——时间,s

## 2 结果与分析

### 2.1 动态混合分析

图 6 表示了 Buss 机三类典型螺纹元件在螺杆转速  $N = 100$  r/min 和喂料速率  $Q = 1.54 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s 的工艺条件下,时间 0~20 s 内粒子动态混合过程。由图可见,在加工过程中 KE 元件( $t = 5$  s)和 ST 元件( $t = 10$  s)粒子分布混合情况较好。当  $t = 20$  s 时,大部分粒子都已经离开了 KE 和 EZ 元件,而此时 ST 元件内尚存大量粒子,可见 KE 元件与 EZ 元件的输送能力基本相似,物料在这两种元件内的平均停留时间基本相同,由于止逆环元件的减压和阻碍作用,ST 元件内物

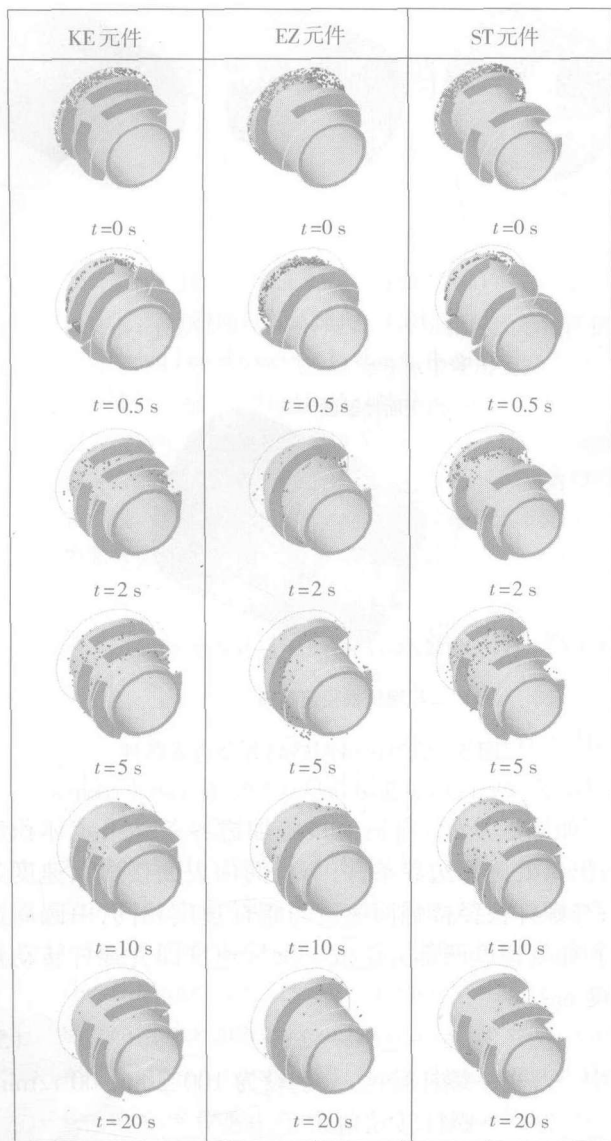


图6 螺纹元件动态混合过程

Fig.6 Dynamic mixing process for screw elements

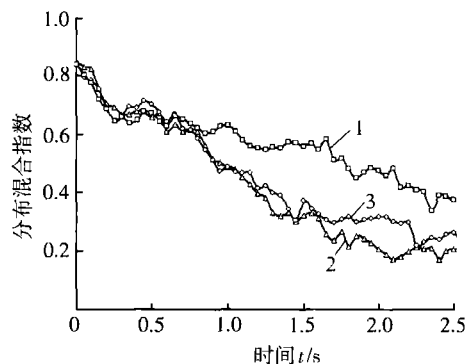
料的平均停留时间最长。

## 2.2 分布混合

分布混合指数是定量评价系统内分布混合性能的重要指标<sup>[13,14]</sup>。分布混合指数越小,分布混合效果越好。将如图5所示的环形空间作为一个封闭空间,并将大约1000个粒子任意布置在这一空间内。以KE元件作为转子进行混合,取KE元件旋转10圈后的粒子分布为最优分布 $f_{opt}(d)$ 。

如图7所示,在相同的加工条件下,KE元件内分布混合指数最小,即KE元件的分布混合性能最好。这是由于KE元件内往复运动造成的回流大且销钉搅拌作用强所造成的。与KE元件相比,ST元件的分布混合性能稍微降低,这是由于止逆环元件阻挡了物料的回流。EZ元件为单头螺纹,且销钉数量较少,所以其

分布混合性能最差,分布混合指数最大,主要起输送物料的作用。



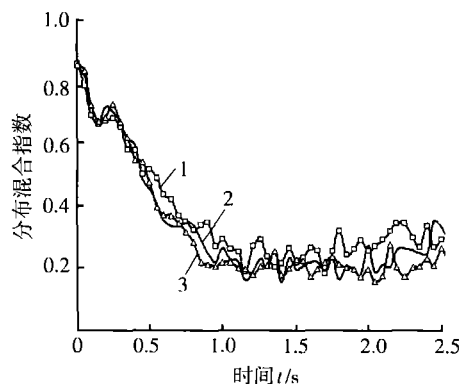
$N = 100 \text{ r/min}$   $Q = 1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$   $\mu = 3000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

1—EZ元件 2—KE元件 3—ST元件

图7 三种螺纹元件的分布混合性能对比

Fig.7 Distributive mixing in the three kinds of the screw elements

图8和图9分别给出了喂料速率和螺杆转速对KE元件的分布混合性能的影响。在相同的螺杆转速下,喂料速率越高,KE元件的分布混合性能越好;在相同的喂料速率下,增加螺杆转速可使KE元件的分布混合效率显著提高,但分布混合效果变化并不显著。对于 $N = 300 \text{ r/min}$ 情况,曲线的上升段内已经有大量粒子流出了螺纹元件,没有实际意义。可见,提高螺杆转速可以提高Buss机的分布混合效率,这一点与文献<sup>[9]</sup>中相关结论是一致的,增大喂料速率可改善Buss机分布混合性能。



$N = 200 \text{ r/min}$   $\mu = 3000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$Q/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ : 1— $1.54 \times 10^{-6}$  2— $3.09 \times 10^{-6}$  3— $4.63 \times 10^{-6}$

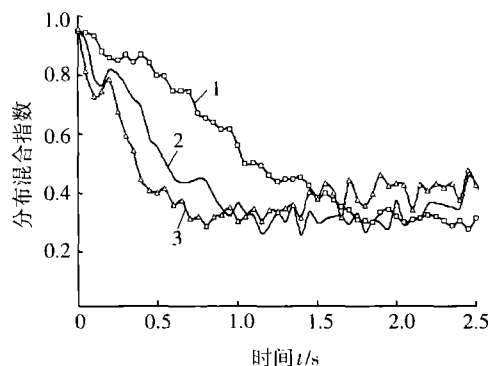
图8 喂料速率对KE元件分布混合性能的影响

Fig.8 Effect of the feed rate on the distribution mixing of the KE element

## 2.3 分散混合

分隔比例是定量评价分散混合性能的重要指标<sup>[15]</sup>。分隔比例越小,分散混合效果越好。

图10给出了三种螺纹元件在相同加工条件下分



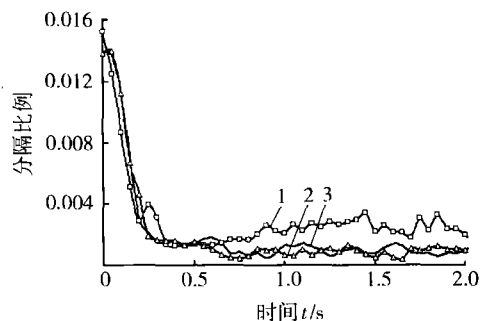
$$Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad \mu = 3000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$N/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}: 1-100 \quad 2-200 \quad 3-300$$

图 9 螺杆转速对 KE 元件分布混合性能的影响

Fig. 9 Effect of the screw speed on the distribution mixing of the KE element

散混合性能的对比。从图中可见,KE 元件的分散混合性能最强,并且图中 KE 元件曲线的斜率最大,可见其混合效率也最高。虽然 ST 元件的销钉数量和螺纹几何与 KE 元件基本相同,但是止逆环元件对回流的限制作用,限制了 ST 元件分散混合性能的发挥。EZ 元件主要起输送物料的作用,其分散混合性能最差。



$$N = 300 \text{ r/min} \quad Q = 4.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad \mu = 3000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$1\text{—EZ 元件} \quad 2\text{—KE 元件} \quad 3\text{—ST 元件}$$

图 10 三种螺纹元件的分散混合性能对比

Fig. 10 Dispersive mixing in the three kinds of the screw elements

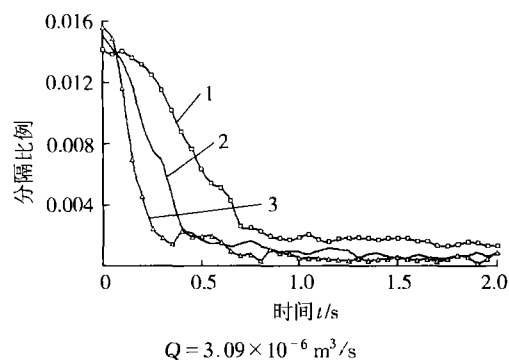
图 11 和图 12 分别给出了螺杆转速和喂料速率对 KE 元件分散混合性能的影响。从图 11 可以看出,提高螺杆转速,可以增强 KE 元件的分散混合性能,又可以提高其混合效率;如图 12 所示,当螺杆转速相同时,喂料速率对分散混合性能的影响不明显。可见,提高螺杆转速可以提高 Buss 机的分散混合性能。这一点与文献<sup>[9]</sup>中相关结论是一致的。

## 2.4 物料黏度对混合性能影响

图 13 和 14 分别给出了物料黏度对三种螺纹元件的分布混合和分散混合性能的影响。从图中可以看出,物料黏度变化对 Buss 机混合性能影响很小。

## 2.5 销钉对混合性能影响

拆除安装在机筒上的销钉,分析只有螺杆往复运

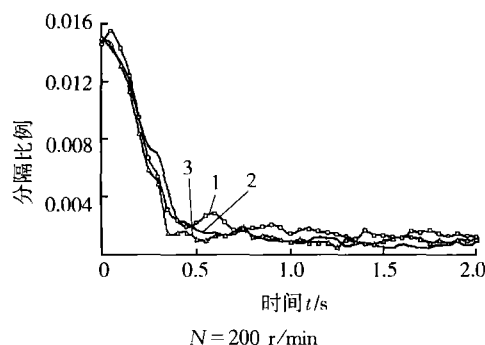


$$Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$N/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}: 1-100 \quad 2-200 \quad 3-300$$

图 11 螺杆转速对 KE 元件分散混合性能的影响

Fig. 11 Effect of the screw speed on the dispersive mixing of the KE element

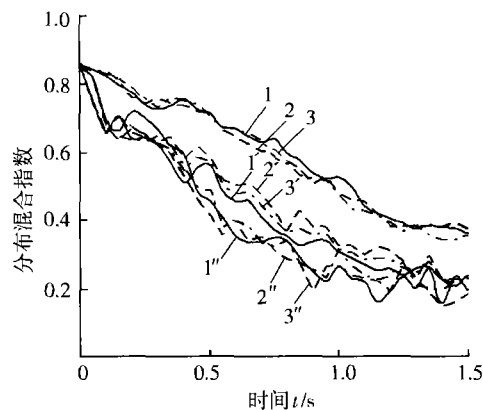


$$N = 200 \text{ r/min}$$

$$Q/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}: 1-1.54 \times 10^{-6} \quad 2-3.09 \times 10^{-6} \quad 3-4.63 \times 10^{-6}$$

图 12 喂料速率对 KE 元件分散混合性能的影响

Fig. 12 Effect of the feed rate on the dispersive mixing of the KE element



$$\text{ST: } N = 100 \text{ r/min}, Q = 1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}; \text{ KE: } N = 200 \text{ r/min}, Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}; \text{ EZ: } N = 300 \text{ r/min}, Q = 4.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

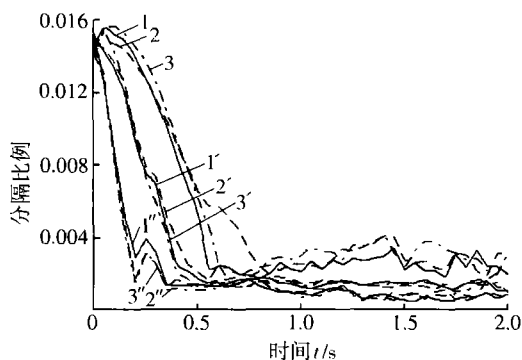
$$1, 2, 3\text{—ST 元件} \quad 1', 2', 3'\text{—EZ 元件} \quad 1'', 2'', 3''\text{—KE 元件}$$

$$\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}: 1, 1', 1''\text{—}3000 \quad 2, 2', 2''\text{—}7500 \quad 3, 3', 3''\text{—}12000$$

图 13 物料黏度对分布混合的影响

Fig. 13 Effect of the viscosity on the distributive mixing performance

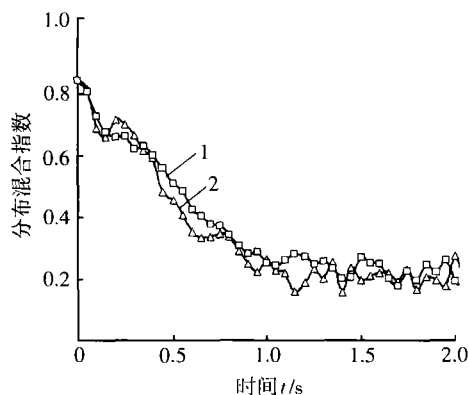
动时 KE 元件的分布和分散混合性能。如图 15 所示,在没有销钉的搅拌、掺混和分流作用后,KE 元件的分布混合性能有所降低。从图 16 中可以看到,销钉与螺旋棱间的剪切作用对 KE 元件的分散混合性能具有一定



ST:  $N = 100 \text{ r/min}$ ,  $Q = 1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ; KE:  $N = 200 \text{ r/min}$ ,  
 $Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ; EZ:  $N = 300 \text{ r/min}$ ,  $Q = 4.63 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$   
 1, 2, 3—ST 元件 1', 2', 3'—EZ 元件 1'', 2'', 3''—KE 元件  
 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$ : 1, 1', 1''—3 000 2, 2', 2''—7 500 3, 3', 3''—12 000

图 14 物料黏度对分散混合的影响

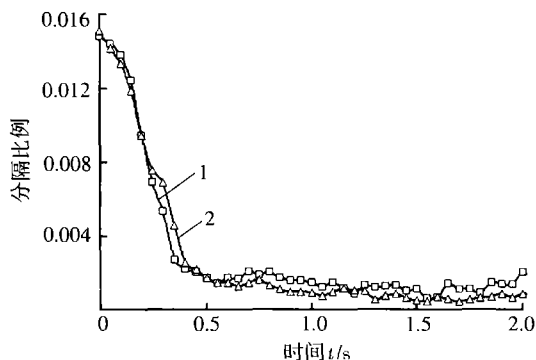
Fig. 14 Effect of the viscosity on the dispersive mixing performance  
 影响, 安装销钉可以提高 KE 元件的分散混合性能。可见, 在机筒上安装销钉有利于改善挤出机的分布和分散混合性能。关于销钉对 Buss 机混合特性影响的结果与文献<sup>[10]</sup>中相关结论是一致的。



$N = 200 \text{ r/min}$   $Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$   $\mu = 3 000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$   
 1—无销钉 2—有销钉

图 15 销钉对 KE 元件分布混合性能的影响

Fig. 15 Effect of the pins on distributive mixing in the KE element



$N = 200 \text{ r/min}$ ,  $Q = 3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\mu = 3 000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$   
 1—无销钉 2—有销钉

图 16 销钉对 KE 元件分散混合性能的影响

Fig. 16 Effect of the pins on the dispersive mixing in the KE element

### 3 结论

(1) 混合元件 KE 的分布混合性能和分散混合性能最好。EZ 元件的混合性能最差, 在加工中主要起输送作用。

(2) 提高螺杆转速可以提高 Buss 机的分布和分散混合效率, 提高螺杆转速还可以改善挤出机的分散混合性能, 而对分布混合性能影响不大; 在相同的螺杆转速下, 增加喂料速率, 可改善分布混合性能, 但对分散混合影响不明显; 物料黏度对挤出机的分布混合和分散混合性能影响不明显; 机筒上安装销钉有助于提高挤出机的混合性能。

(3) 通过与文献中相关结论的对比表明, 采用的有限元数值模拟、粒子轨迹跟踪技术及统计分析相结合的方法, 定量计算和分析 Buss 机混合性能具有较高正确性和实用价值, 对 Buss 机的设计和工艺条件确定具有一定指导意义。

### 参考文献:

- [1] White J. L., Lyu M. Y.. Development of the Modern Buss Kneader and the Study of Its Flow and Mixing Mechanisms [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 1998, 37 (3): 385-410.
- [2] Elemans P. H. M., Meijer H. E. H.. On the Modeling of Continuous Mixers. Part II. the Cokneader [J]. Polymer Engineering and Science, 1990, 30(15): 893-904.
- [3] Lyu M. Y., White J. L.. Models of Flow and Experimental Studies on a Modular List/Buss Kneader [J]. International Polymer Processing, 1995, 10(4): 305-313.
- [4] Lyu M. Y., White J. L.. Modelling of a Viscous Non-Newtonian Polymer Melt in a List/Buss Kneader and Comparison to Experiment [J]. International Polymer Processing, 1996, 11(3): 208-221.
- [5] Lyu M. Y., White J. L.. Simulation of Non-isothermal Flow in a Modular Buss Kneader and Comparison with Experiment [J]. International Polymer Processing, 1997, 12 (2): 104-109.
- [6] Lyu M. Y., White J. L.. Non-isothermal Non-Newtonian Analysis of Flow in a Modular List/Buss Kneader [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1997, 16(16): 1445-1460.
- [7] Lyu M. Y., White J. L.. Simulation of Linear Viscoelastic Flow Behavior in the Buss Kneader [J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(3): 623-635.
- [8] Lyu M. Y., White J. L.. Simulation of Non-linear Viscoelastic Flow Behavior in the Buss Kneader [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2000, 19(10): 756-

791.

- [9] Booy M. L., Kafka F. Y.. Isothermal Flow of Viscous Liquids in the Mixing Section of a Buss Kneader[C]. Antec, 1987. 140-145.
- [10] 武停启,江波,许澍华. 往复式销钉螺杆挤出机混合机理概述[J]. 中国塑料,2002,16(9):7-10.
- [11] 武停启,江波,王春芬. 往复式销钉螺杆挤出机设计原理[J]. 中国塑料,2002,16(1):70-73.
- [12] 张宝辉,许澍华,江波. WXJ-140 往复式销钉螺杆挤出机的研究与开发[J]. 塑料,2006,35(2):78-80.
- [13] Wong T. H., Manas-zloczower I.. Two-dimensional Dynamic Study of the Distributive Mixing in an Internal Mixer[J]. International Polymer Processing, 1994, 9(1): 3-10.
- [14] Yang H. H., Manas-zloczower I.. Analysis of Mixing Performance in a VIC Mixer[J]. International Polymer Processing, 1994, 9(4): 291-302.
- [15] Dankwertz P. V.. The Definition and Measurement of some Characteristics of Mixtures[J]. Applied Science Research. Section A, 1952, 3: 279-296.

## 2008 中国国际塑料橡胶注射成型工业展览会(CIM)

### 将于 2008 年 10 月在中国天津隆重召开

中国国际塑料橡胶注射成型工业展览会(CIM)将于 2008 年 10 月 14~16 日在中国天津滨海国际会展中心举办。“2008 中国国际塑料橡胶注射成型工业展览会”是由多家我国塑胶工业及相关行业的权威机构主办,北京中轻亚泰塑料科技有限公司与美国最大的展览公司之一的美国克劳斯国际展览公司(EJK)联合承办,“2008 中国国际塑料橡胶注射成型工业展览会”展出面积将达到 15 000 m<sup>2</sup>,预计将有来自世界各地的 300 余家海内外知名企业展出其最新产品,并将邀请国内外汽车、电子、家电、医药等应用领域的 20 000 名专业观众参观本届展览会。

继长江三角洲、珠江三角洲之后,中央又提出以北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东、辽宁七省区市组成的工业密集区域——环渤海经济圈,并将滨海新区纳入国家总体战略发展布局,该区域正在形成我国经济增长的“第三极”,成为拉动北方经济的发动机。各地政府也都紧紧抓住这一重要战略机遇期,制定了完善、系统的发展战略以及各种相应政策,加大了引进外资的力度,吸引了很多境外投资者的目光,使区内各省市的境外投资企业数量及投资额快速增长。

环渤海地区塑料橡胶注射成型市场潜力巨大。环渤海地区经济的发展及产业群的形成,给塑料橡胶注射成型设备提供了良好的机遇为国内外塑料橡胶设备制造企业及原料生产企业扩大市场份额、开拓新市场创造了最佳时机。

2008 中国国际塑料橡胶注射成型工业展览会(CIM)将更加贴近应用领域,成为塑料橡胶行业又一大亮点,继续打造塑料橡胶注射成型工业集交流、贸易、合作的平台,为企业扩大市场份额、开拓新市场、提高产品技术的最佳良机,促进塑料橡胶注射工业的发展。

展会同期将有各塑料橡胶注射成型高层论坛、峰会、研讨会等多项活动。

**承办:** 北京中轻亚泰塑料科技有限公司

**地址:** 北京西城区东斜街 14 号

**邮编:** 100032

**电话:** 010-6603 9043; 6603 9351

**传真:** 010-6606 7681

**电邮:** cim@cimexpo.cn

**网址:** www.cimexpo.cn