

## 新型锥形双螺杆混合元件三维流场分析

刘志芳, 冯连勋, 董力群

(北京化工大学机电工程学院, 北京, 100029)

**摘要:** 利用 ANSYS 有限元分析软件对带有混合块的新型锥形双螺杆的混合段流场进行了三维模拟分析。通过速度场求出流量, 并求出剪切速率、剪切应力及回流量来衡量混合效果。找出了混合块几何条件(间隙、错列角)及操作条件(转速、压差等)对挤出机混合效果的影响。

**关键词:** 锥形双螺杆, 三维流场, 混合元件

**中图分类号:** TQ320.5; **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-9278(2002)02-0087-09

锥形双螺杆挤出机产生的主要原因之一是为了解决平行双螺杆挤出机传动系统中传动轴和轴承布置的难题, 同时也为了满足用户对高产量的要求, 因此, 一经出现就在市场上占据了很重要的地位。但是, 由于其混合效果较差, 它的应用受到了一定的限制。董力群等研制出了新型锥形双螺杆<sup>[1,2]</sup>, 从而大大地改善了锥形双螺杆的混炼效果, 对拓宽锥形双螺杆的应用范围起到了一定的促进作用。

由于双螺杆结构复杂, 物料在其中的流动状态难以用解析法计算。在此, 本文用数值法对新型锥形双螺杆的流场进行了初步研究。计算中, 采用流道的真实尺寸和机筒静止、螺杆旋转的实际运转条件, 运用 ANSYS 软件, 在参数改变的条件下, 对经后处理得出的三角形混合元件和腰鼓形混合元件流场的流量、回流量、加权平均剪切速率和加权平均剪切应力进行模拟计算, 分析讨论这两种混合元件的混合能力、挤出性能与各参数之间的关系。在模拟计算过程中, 均采用改变其中一个参数而其他参数固定的方法, 来考察某一参数对流场的影响。

## 1 理论模型

### 1.1 物理模型

本文所建立的三维物理模型(如图1所示), 是没有经过任何简化的流道的真实形状, 包括机筒和混合块(螺杆)的间隙、混合块和混合块(螺杆和螺杆)的间隙。计算中采用图2所示的笛卡儿坐标系,  $O$  为坐标原点。图3、4所示分别为六个腰鼓形混合块互成  $60^\circ$  排列和六个三角形混合块互成  $30^\circ$  排列的物理模型。

为了计算和分析的方便并且结合物料的实际流动

情况, 作出如下假设:

- ① 流体为幂律流体;
- ② 流体为等温层流的稳定流动;
- ③ 流体为不可压缩流体;
- ④ 流道是全充满的;
- ⑤ 流道壁面无滑移。

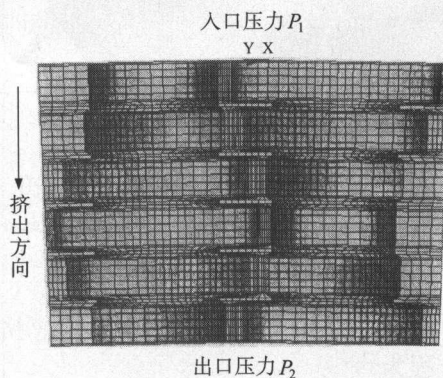


图1 锥形双螺杆混合段物理模型  
(以腰鼓形混合块为例)

Fig.1 Physical model of mixing region in conical twin-screw  
(with waist mixing block)

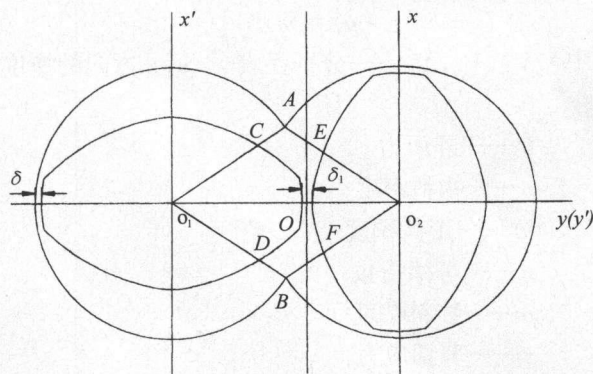


图2 计算用坐标

Fig.2 Calculating coordinate

收稿日期: 2001-11-28

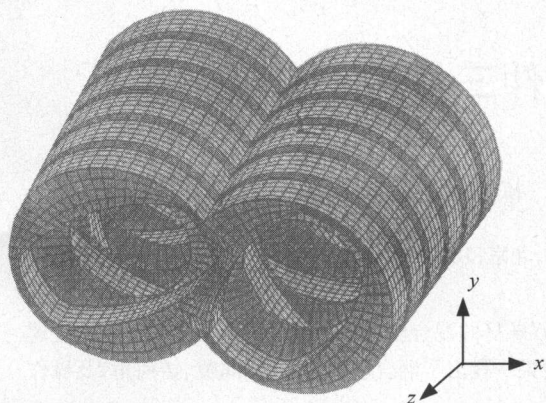


图3 腰鼓形混合块(60°错列角)流道图

Fig.3 Waist mixing block(60°stagger)channel

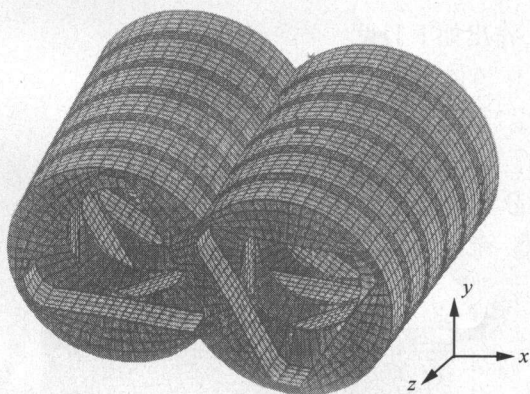


图4 三角形混合块(30°错列角)流道图

Fig.4 Triangle mixing block(30°stagger) channel

## 1.2 数学模型

对于等温层流不可压缩的牛顿流体,忽略体力,其连续性方程为<sup>[3,4]</sup>:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

运动方程为:

$$[\nabla \cdot \rho v v] = -\nabla P - [\nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}] \quad (2)$$

本构方程为:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = m \dot{\gamma}^{n-1} \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

式中  $V_x, V_y, V_z$ ——分别代表  $x, y, z$  方向的速度分量

$P$ ——静压力

$\rho$ ——物料密度

$m$ ——熔体稠度

$n$ ——幂律指数

$\mu$ ——物料粘度

$\tau$ ——剪切应力

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率

## 1.3 边界条件

根据锥形双螺杆挤出机的实际运转条件以及流道

边界无滑移的假设,给出流道的速度边界,即机筒边界速度为零,螺杆旋转,混合块和螺纹元件边界速度为其角速度与螺杆元件边界半径的乘积。对于锥形双螺杆来讲,螺杆元件的径向尺寸沿轴向连续变化,因此,其加速度边界、压力边界需要通过编程进行特殊的后处理。混合段加入压力边界条件(如图1所示):出口面压力为  $P_2$ ,入口面压力为  $P_1$ 。

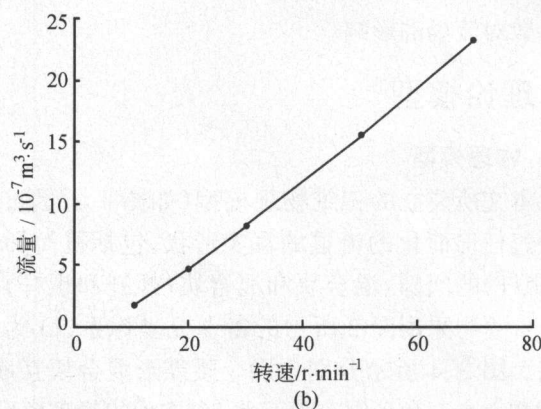
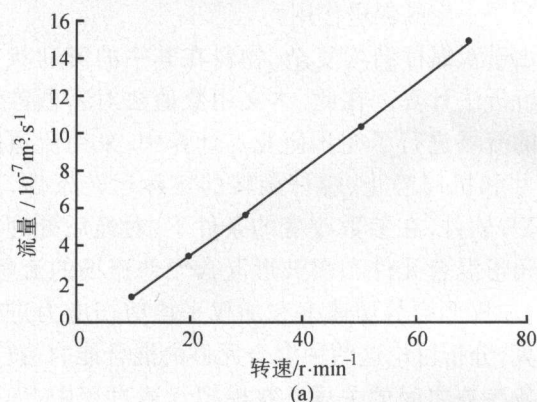
## 2 模拟计算结果与讨论

### 2.1 流量和回流量与各参数的关系

流量是双螺杆挤出机输送能力的重要指标之一,而物料的回流增加了物料在机筒内的停留时间,使物料混合更加充分,常用来判定流场分布性混合的能力。所以流量和回流量的计算和分析是很重要的。本节将对腰鼓形混合元件(60°错列角)和三角形混合元件(30°错列角)流场的流量、回流量与各个参数的关系进行讨论。这些参数包括:螺杆转速、压差、混合块的错列角以及螺杆和机筒的间隙。

#### 2.1.1 流量和回流量与螺杆转速的关系

螺杆转速是挤出机最主要的操作参数。转速的变



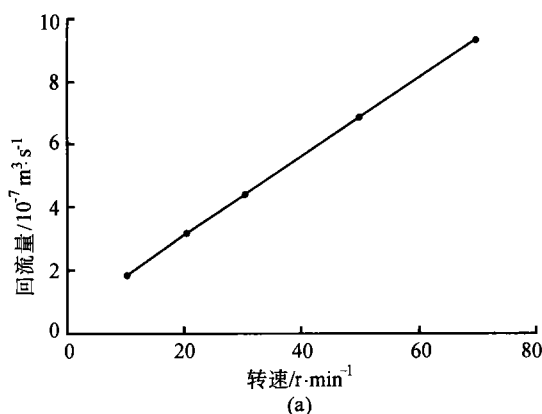
(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图5 流量和螺杆转速的关系

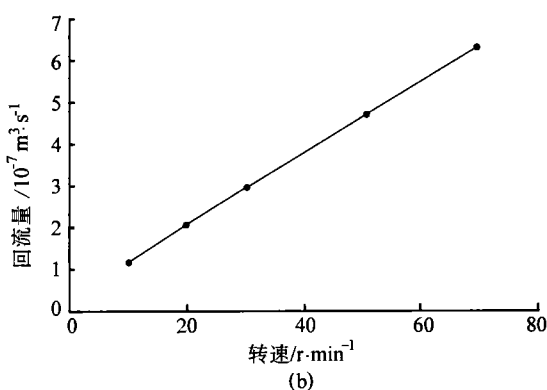
Fig.5 Relationship of flow rate and screw rotation speed

化对挤出过程的影响很大,螺杆转速的选择必须考虑挤出产量的要求,同时又必须考虑混合性能和挤出工

艺条件的要求。这两种混合元件流场的流量与螺杆转速关系如图 5 所示。



(a)腰鼓形混合元件



(b)三角形混合元件

图 6 回流量和螺杆转速的关系

Fig. 6 Relationship of back flow rate and screw rotation speed

由图可以看出,流量与螺杆转速呈线性关系。显然,这是因为这两种元件的混合块凸棱错列排列,形成类似螺纹状,随螺杆转速的增加,物料受到混合元件的作用,各个微元速度的轴向分量  $V_2$  随之增大,流量自然也增大。此两种元件均具有输送能力。

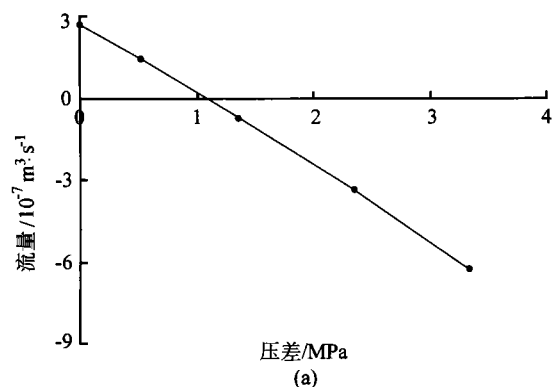
两种混合元件流场的回流量与转速的关系如图 6 所示。此图表明,回流量与螺杆转速也呈线性关系。回流量的增大,有利于物料的混合。

### 2.1.2 流量和回流量与压差的关系

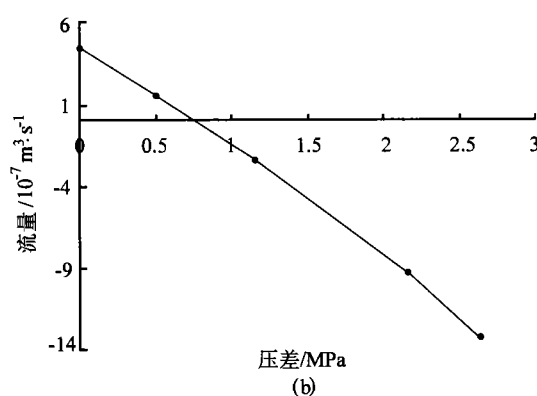
腰鼓形混合元件和三角形混合元件流场的流量与压差的关系如图 7 所示。压差指的是入口压力和出口

压力的差值。在计算过程中将两端的压差作为操作条件先进行计算,然后得到一定压差条件下的流量,即  $\Delta P$  决定了  $Q$ 。计算多组压差条件下的流量,得出压差和流量之间的定量关系。

图中显示,随着压差的增大,流量降低。实际上,压差对流量的关系是可以预见的,因为压力对流量的影响是通过压力回流作用的,而压力回流和压力差的大小是成正比的。压力差越大,压力回流也越大,正向流量也就越小。因此,大的流量要求元件两端的压差小。



(a)腰鼓形混合元件



(b)三角形混合元件

图 7 流量和压差的关系

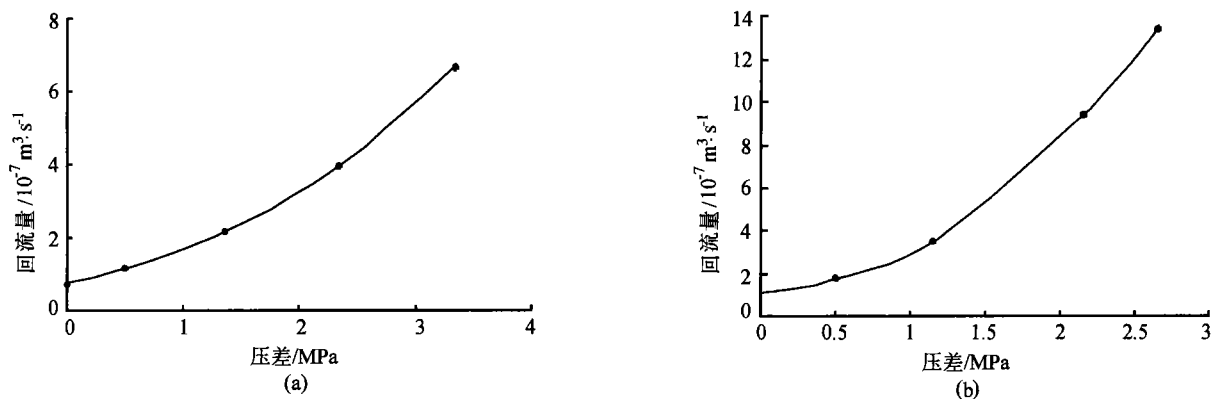
Fig. 7 Relationship of flow rate and pressure difference

图 8 为两种混合元件流场的回流量与压差的关系。图中可以看出,回流量与压差基本上呈指数关系。这是因为随着压差的增大,压力反流具有呈指数增大的趋势,压差越大,物料就越难向前输送。

### 2.1.3 流量和回流量与错列角的关系

错列角指的是,混合元件中相邻两混合块之间的

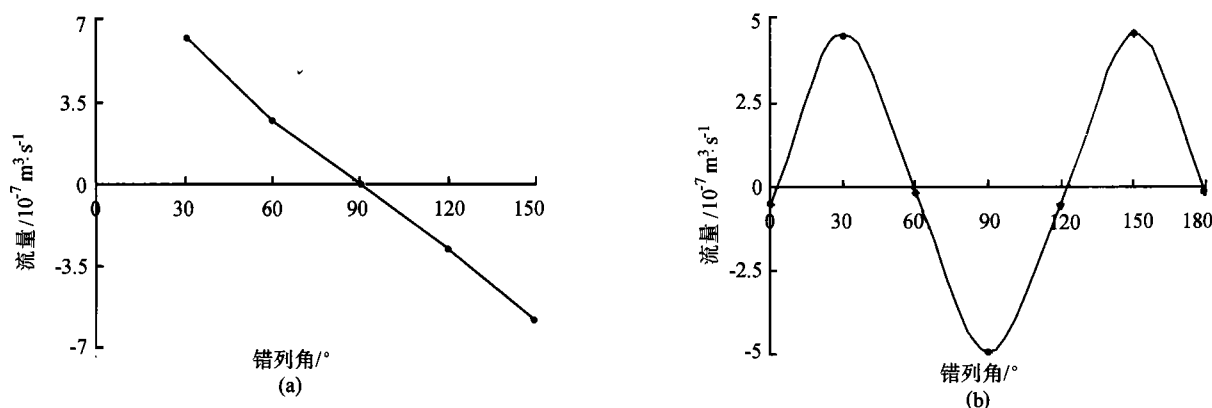
相位角。由腰鼓形混合元件流场的流量与错列角的关系图 9(a)可以看到,随着错列角的增大,流量减小,且基本成反比关系。这是因为,错列角为  $30^\circ$  或  $60^\circ$  时,混合元件凸棱构成的类螺纹的旋向与常规螺纹元件的旋向相同,即形成所谓的正向混合元件,对物料的输送起促进作用,因此,流量为正。错列角为  $90^\circ$  时,混合元



(a)腰鼓形混合块 (b)三角形混合块

图 8 回流量和压差的关系

Fig. 8 Relationship of back flow rate and pressure difference



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 9 流量和错列角的关系

Fig. 9 Relationship of flow rate and stagger

件形成所谓的中性混合元件,即元件无输送能力,因此,流量为零。而错列角为  $120^{\circ}$  或  $150^{\circ}$  时,混合元件凸棱构成的类螺纹的旋向与常规螺纹元件的旋向相反,即形成所谓的反向混合元件,对物料的输送起阻碍作用,因此,流量为负。

由三角形混合元件流场的流量与错列角的关系图 9(b) 可以看到,关系曲线与前述的腰鼓形混合元件的有所不同。错列角为  $30^{\circ}$  时,流量最大,而错列角为  $90^{\circ}$  时,流量最小。因为,对于三角形混合元件来说,错列角  $30^{\circ}$  时混合元件凸棱构成的类螺纹的旋向与常规螺纹元件的旋向相同,同样也形成了所谓的正向混合元件,对物料的输送起促进作用。错列角为  $60^{\circ}$  时,为中性元件,流量为零。错列角为  $90^{\circ}$  时,即变成了反向混合元件,对物料的输送起阻碍作用,流量为负。错列角为  $120^{\circ}$  时,相当于整体式的三角形混合块,输送能力也很差,错列角为  $150^{\circ}$  时的情况与  $30^{\circ}$  是完全相同的。从该图中还可以看出,在  $0^{\circ}$  到  $30^{\circ}$  和  $90^{\circ}$  到  $150^{\circ}$  的范围内,流量和错列角成正比关系;在  $30^{\circ}$  到  $90^{\circ}$  和  $150^{\circ}$  到  $180^{\circ}$  的范围内,流量和错列角成反比关系。

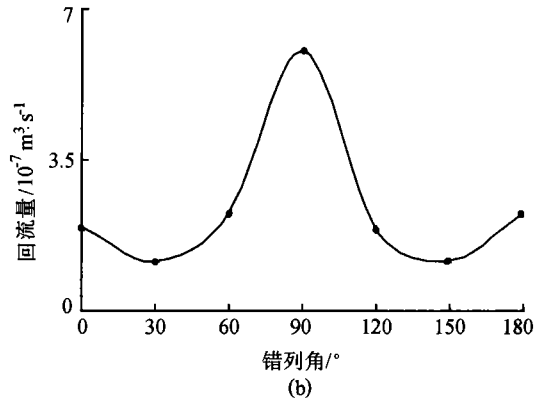
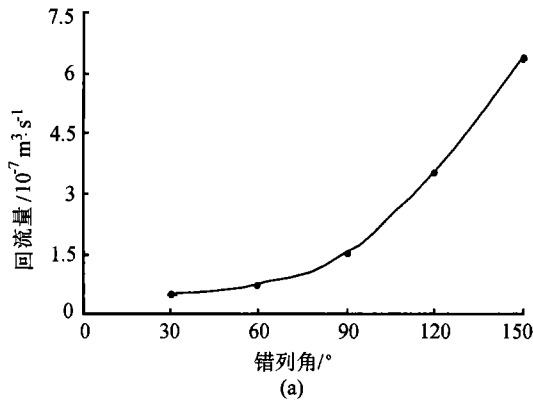
图 10 为两种混合元件回流量与错列角的关系。由图 10(a) 可以看出,腰鼓形混合元件的错列角为  $30^{\circ}$  时回流量最小,而在反向  $30^{\circ}$  度错列角,即  $150^{\circ}$  错列角时回流量最大。对于腰鼓形混合块,错列角小于  $30^{\circ}$  时,相邻两块混合块紧密贴合在一起,物料无法从相邻混合块之间漏过去,此时,混合块的输送原理类似于正向螺纹元件,输送能力较强,因而回流量较小;随着错列角增大,相邻混合块之间的缝隙也随之增大,物料可以从混合块之间的缝隙漏过去,因而回流量也逐渐增大。错列角越大,回流量越大,流场的分布性混合就越好,这和以往实验中发现的反向混合块混合效果强于正向混合块的现象是一致的。

图 10(b) 为三角形混合块回流量和错列角的关系,由该图可以知道,错列角为  $30^{\circ}$  时回流最小,  $90^{\circ}$  时回流最大。因为,对于三角形混合块组来讲错列角为  $30^{\circ}$  时为正向混合块,有较强的输送能力,物料往回流的自然要少一些;错列角为  $60^{\circ}$  时为中性混合块,对物料的输送没有太多的影响,回流量比  $30^{\circ}$  时要多一些;错列角为  $90^{\circ}$  时是反向混合块,有使物料往回输送的效果,



所以回流量最大。该图中还表明,在  $0^\circ$  到  $30^\circ$  和  $90^\circ$  到  $150^\circ$  的范围内,回流量随着错列角的增大而减小;在

$30^\circ$  到  $90^\circ$  和  $150^\circ$  到  $180^\circ$  的范围内,回流量随着错列角的增大而增大。



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

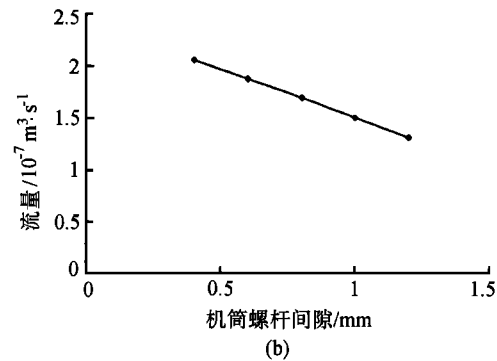
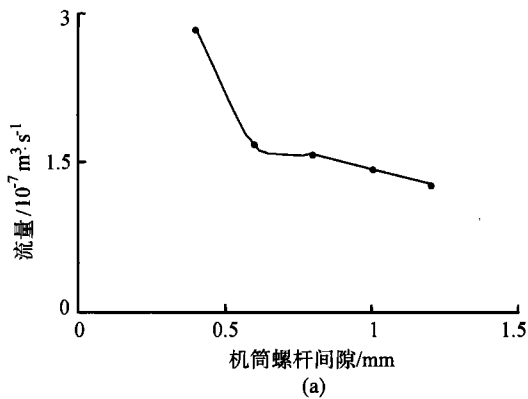
图 10 回流量和错列角的关系

Fig. 10 Relationship of back flow rate and stagger

#### 2.1.4 流量和回流量与间隙的关系

图 11 和图 12 分别为两种混合元件流场的流量、回流量与混合元件和机筒之间间隙的关系。由图

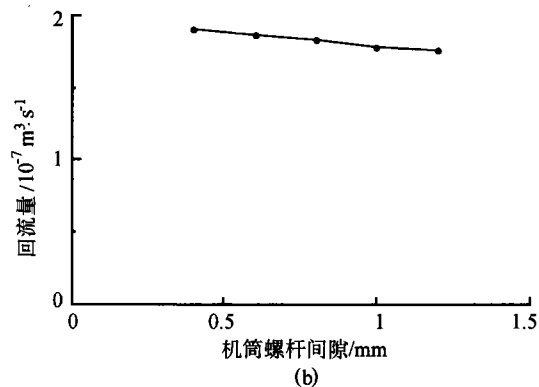
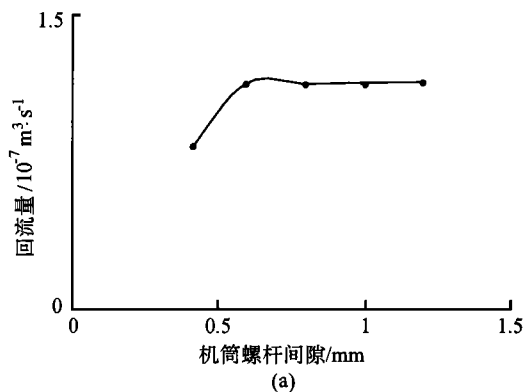
11(a)可以看出,间隙小于  $0.5 \text{ mm}$  时,腰鼓形混合块流场的流量受间隙的影响很大,而间隙大于  $0.5 \text{ mm}$  时,流量受间隙的影响不大。由图 12(a)可以看出,间隙小



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 11 流量与机筒间隙的关系

Fig. 11 Relationship of flow rate and barrel clearance



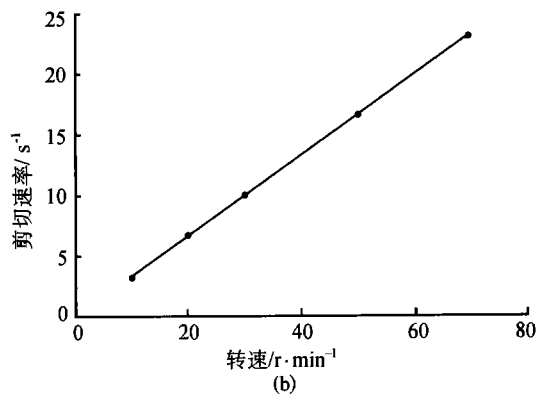
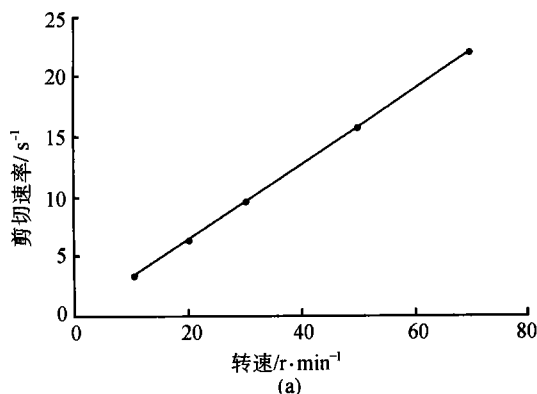
(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 12 回流量与机筒间隙的关系

Fig. 12 Relationship of back flow rate and barrel clearance

于 0.5 mm 时,回流量随间隙的增大而增大,而间隙大于 0.5 mm 时,回流量几乎不受间隙的影响,曲线趋于水平。以上说明,间隙达到一定值后,再增大间隙,流量和回流量都不会有很大的变化。由图 11(b)和 12(b)可以看出,三角形混合元件流场的流量、回流量与元件和机筒之间的间隙都是成反比关系。

从上述讨论可以得出,在较小间隙范围内,腰鼓形混合元件流场的流量和回流量对间隙的大小极其敏感,而三角形混合元件流场的流量和回流量在所考察的间隙范围内变化平缓。



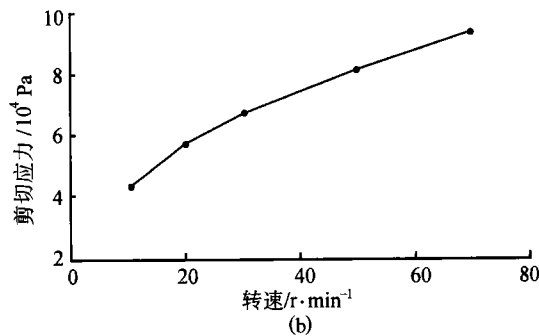
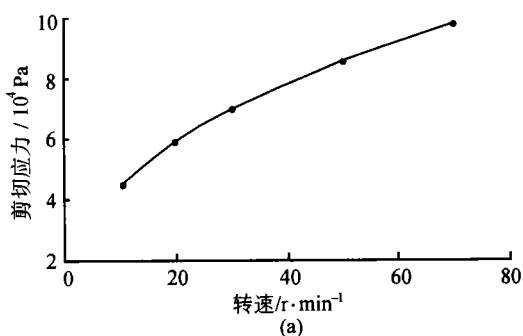
(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 13 平均剪切速率与螺杆转速的关系

Fig. 13 Relationship of average shear rate and screw rotation speed

图 14 为平均剪切应力与螺杆转速的关系。由图可以看出,平均剪切应力随着螺杆转速的增大而增大,基本上也是成线性关系。由剪切速率计算公式可知,

剪切速率随着螺杆转速的增加而增加,剪切应力随剪切速率的增大而增大,流场平均剪切应力也随螺杆转速的增大而增大。



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 14 平均剪切应力与螺杆转速的关系

Fig. 14 Relationship of average shear stress and screw rotation speed

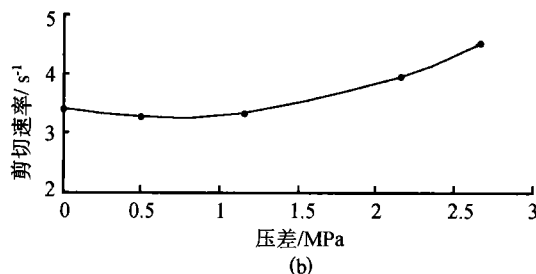
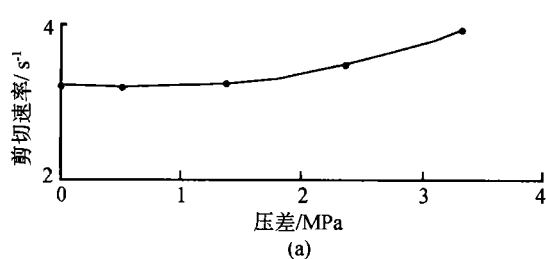
### 2.2.2 平均剪切速率和平均剪切应力与压差的关系

图 15、图 16 分别为平均剪切速率和平均剪切应力与压差的关系。由图 15 可知,两种混合元件流场的平均剪切速率随着压差的增大而增大。但在压差较小时,压差对剪切速率的影响不大,而压差较大时,其对剪切速率的影响逐渐增大。从图 16 中可以看出,两种混合元件流场的平均剪切应力在压差较小时基本不受

其影响,而压差增大到一定程度后所受影响增大。由上面两图还可以看出,平均剪切应力随两端压差的变化趋势与平均剪切速率随两端压差的变化趋势大致相同。剪切应力随着剪切速率的增大而增大,剪切速率同流场各点的速度分量是一次关系,也就是跟流量的变化是一致的。而在其他条件都固定时,流量的变化趋势同压差的变化趋势是一致的。当朝着机头的压力

梯度逐渐减小至零并转为朝着加料口方向时,物料的流量也逐渐减小至零,此时的剪切速率达到最小值,剪切应力也达到最小值。当朝着加料口的压力梯度再逐

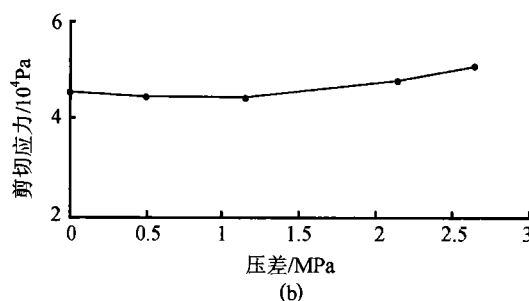
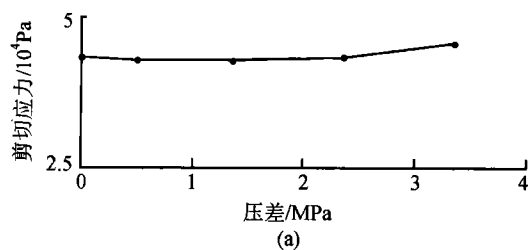
渐增大时,此时出现逐渐增大的反向流量,因而剪切速率又随之增大,剪切应力也随之增大。



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 15 平均剪切速率与压差的关系

Fig. 15 Relationship of average shear rate and pressure difference



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 16 平均剪切应力与压差的关系

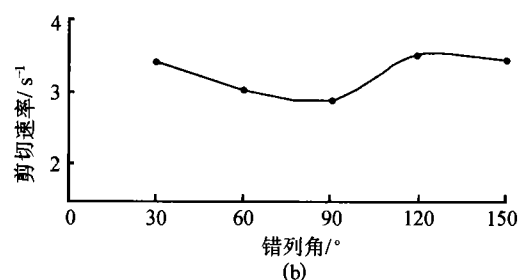
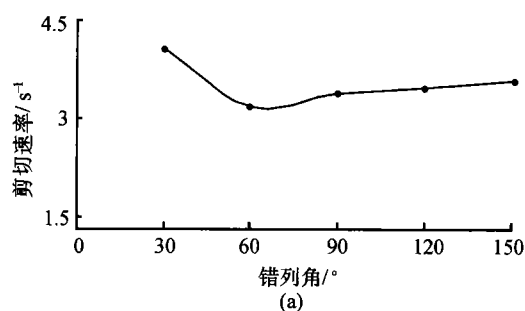
Fig. 16 Relationship of average shear stress and pressure difference

### 2.2.3 平均剪切速率和平均剪切应力与错列角的关系

图 17 和图 18 分别为平均剪切速率和平均剪切应力与错列角的关系。由图 17(a)可知,错列角为 30° 时,腰鼓形混合元件的平均剪切速率最大,错列角 60° 时,平均剪切速率最小,错列角大于 60°,平均剪切速率基本不随错列角的增大而增大。由图 18(a)可知,错列

角 30° 时,腰鼓形混合元件的平均剪切应力达到最大,错列角为 60° 时,平均剪切应力最小,随着错列角度的增大,平均剪切应力增大。

由图 17(b)和图 18(b)可知,三角形混合元件流场的平均剪切速率和平均剪切应力随错列角变化的趋势基本相同。错列角为 90° 时,平均剪切速率和平均剪切应力均达到最小。



(a)腰鼓形混合元件 (b)三角形混合元件

图 17 平均剪切速率和错列角的关系

Fig. 17 Relationship of average shear rate and stagger

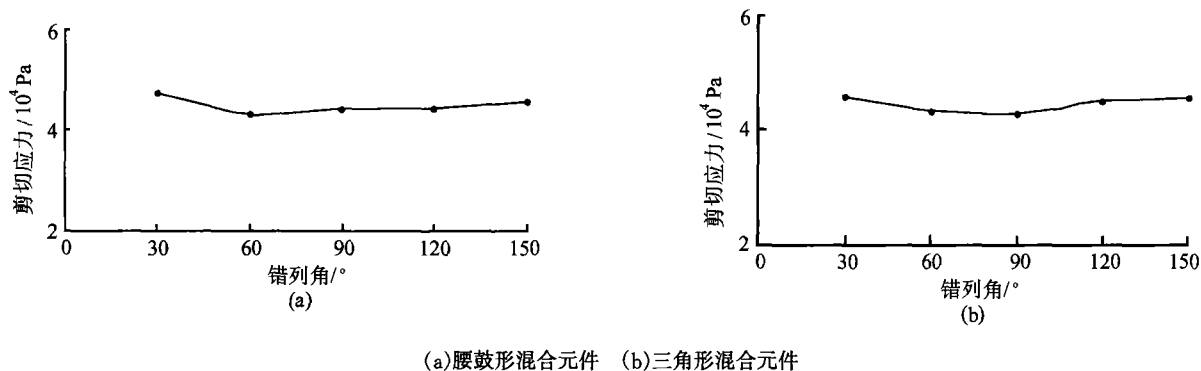


图 18 平均剪切应力与错列角的关系

Fig. 18 Relationship of average shear stress and stagger

## 2.2.4 平均剪切速率和平均剪切应力与机筒间隙的关系

平均剪切速率和平均剪切应力与机筒间隙的关系

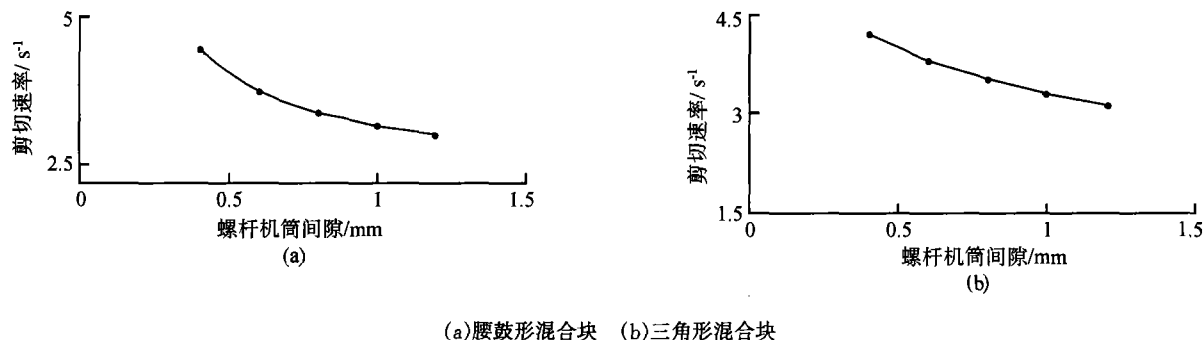


图 19 平均剪切速率和机筒间隙的关系

Fig. 19 Relationship of average shear rate and barrel clearance

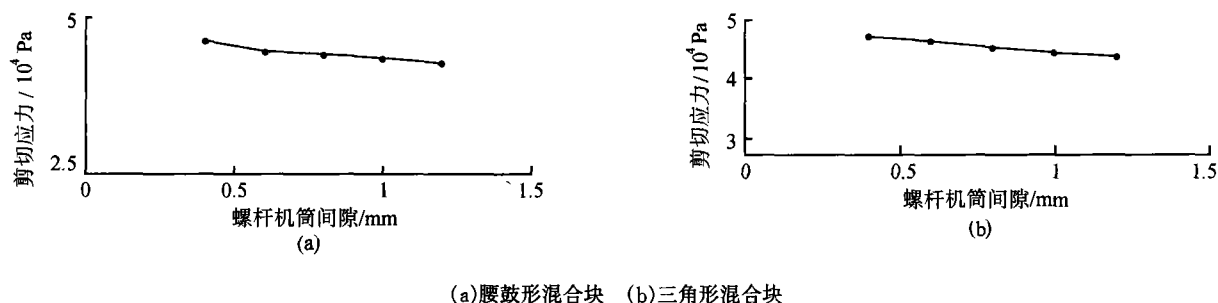


图 20 平均剪切应力和机筒间隙关系

Fig. 20 Relationship of average shear stress and barrel clearance

## 3 结论

(1) 建立了新型锥形双螺杆混合段流道的真实三维模型,利用 ANSYS 有限元软件求出了流道内的速度场、压力场并通过后处理求出了流量、回流量、剪切速率和剪切应力。

(2) 腰鼓形混合元件和三角形混合元件的流量与压差均成线性关系。它们的回流量与压差基本成幂次关系。

(3) 错列角为 60° 的三角形混合元件无输送能力和

分别如图 19 和图 20 所示。从两图可以看出,随着混合元件与机筒之间间隙的增大,流场平均剪切速率和平均剪切应力均逐渐减小。

建压能力。错列角为 90° 的腰鼓形混合元件也无输送能力和建压能力,错列角为 120° 和 150° 时也形成了反向螺纹,所以输送能力最差,但回流也很大。

(4) 腰鼓形混合元件的流量与错列角基本成线性关系,回流量与错列角成幂次关系。

(5) 螺杆和机筒间隙较小时,流量与间隙成反比关系,回流量与间隙成正比关系。在间隙大于 0.5mm 时,流量和回流量随间隙的变化改变不大。

(6) 平均剪切速率和平均剪切应力与螺杆转速基本成正比关系,且两者受压差的影响不大。平均剪切



速率和平均剪切应力与螺杆和机筒间隙成反比关系。

### 参考文献:

- [1] 董力群. 北京化工大学硕士学位论文, 1999.  
[2] 董力群, 等. 一种锥形双螺杆[P], 专利号 98241666. O,

1995, 5.

- [3] 李 鹏, 耿孝正. 同向双螺杆挤出机混合块流道三维流场分析[J]. 中国塑料, 2000, 3: 75.  
[4] 阎 琦, 耿孝正. 高聚物成型原理[M]. 北京化工大学讲义, 1990: 38.

## Analysis and Comparison of Three-Dimensional Flow Field of Mixing Element in New Conical Twin Screw

LIU Zhi-fang, FENG Lian-xun, DONG Li-qun

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

**Abstract:** Three-dimensional flow simulation of mixing blocks in a conical twin screw extruder is performed with a finite element package, ANSYS. Goal of these calculations is to study the dependence of several factors that influence mixing, such as shear rate, shear stress, on design variables (tolerance and stagger angle) and processing conditions (rotating speeds and axial pressure gradient). Pressure profiles of barrel surface and nip region are obtained.

**Key words:** conical twin screw extruder; three-dimensional flow field; mixing element

### 彩 色 广 告 目 录

- |                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| 封面 香港万通塑胶原料有限公司       | 18 张家港华明机械有限公司       |
| 封二 常熟市同大机械有限公司        | 19 江苏白熊机械有限公司        |
| 封三 LG 化学              | 20 江苏科亚化工装备有限公司      |
| 封底 舟山市金海机械有限公司        | 21 承德市金建检测仪器有限公司     |
| 插 1 上海金纬机械制造有限公司      | 22 深圳市空微特种材料有限公司     |
| 2 巴顿菲尔·震雄塑料设备有限公司     | 23 上海昌东机器制造有限公司      |
| 3 成都金石东方工业有限公司        | 24 第五届亚太国际橡塑工业展览会    |
| 4 利源机械(花都市)有限公司       | 25 《中国塑料》杂志社         |
| 5 顺德市秦川恒利塑机有限公司       | 26 联塑机械制造有限公司        |
| 6 张家港白熊科技美机械有限公司      | 27 联塑机械制造有限公司        |
| 7 香港万通塑胶原料有限公司        | 28 上海金湖挤出设备有限公司第一分公司 |
| 8 北京 CK 塑料机械有限公司      | 29 上海金湖挤出设备有限公司      |
| 9 甘肃金利实业有限公司          | 30 凯威赫(大连)管道有限公司     |
| 10 湖北轻工业机械厂           | 31 济宁市金工机器制造有限公司     |
| 11 北京丰阳塑化工程技术有限公司     | 32 张家港德华机械制造有限公司     |
| 12 南京橡塑机械厂            | 33 余姚华泰橡塑机械有限公司      |
| 13 江苏南京金陵奥普特高分子材料有限公司 | 34 协定(东莞)工业股份有限公司    |
| 14 承德精密试验机有限责任公司      | 35 精诚模具机械有限公司        |
| 15 杭州华洋化工有限公司         | 36 舟山汉龙塑料机械有限公司      |
| 目录前 威利坚机器有限公司         | 37 南京中观机械电子有限公司      |
| 17 无锡市江南塑料机械有限公司      | 38 都江堰钙品股份有限公司       |