

同向旋转双螺杆挤出机捏合盘元件的熔体 输送特性及混合机理的研究

王 蓉 耿孝正

(北京化工学院)

摘 要

本文作者建立了一种描述在同向旋转啮合型双螺杆挤出机中广泛应用的捏合盘元件的熔体输送特性及混合特性的三维、等温、幂律流动理论模型,并利用流体有限元方法及大型计算机程序对流场进行数值求解,得出了流场的速度分布,压力分布及剪应力分布。这些结果较全面地反映了捏合盘的几何尺寸、物料特性和运转条件之间的关系,得出了许多前人所建立的模型不曾得出的结论,这对认识捏合盘的工作机理、指导捏合盘设计和选择挤出工艺有一定指导意义。

第一部分 理论模型的建立

一、物理模型

众所周知,捏合盘是成组使用的,各盘之间有一定的错列角,因此,由成组捏合盘与机筒组成的流道在螺杆轴向有突变,故欲全面而真实地描述捏合盘熔体输送段的流场,应建立三维流动模型。

捏合盘组合流道可分为两部分,以曲边三角形捏合盘为例,一部分为由每个盘的曲边与机筒壁面组成的月牙形轴向流道错列而成,另一部分为啮合区,即机筒两圆孔相交部位与左右两捏合盘相互滑过的区域所组成的轴向流道。

第一部分是我们要研究的重点,称之为基本物理模型,如图1.1中A所示。由于捏合盘与机筒间隙的存在,因而两相邻月牙形轴向流通面积间在圆周方向相互连通,当捏合

盘转动时,便形成沿机筒圆周向熔体的环流(即间隙流);由于机筒 ∞ 形孔及捏合盘的几何对称性,从而形成了周向对称的流道及流场运动边界,因而捏合盘组合流道三维基本物理模型沿周向的两个边界的流动状态相同。根据现有理论知:基本物理模型的轴向流量与总挤出量的关系近似为

$$Q = Q_{\text{总}} / (2 \cdot M - 1) \quad (1.1-1)$$

式中 Q ——基本物理模型的轴向流量

$Q_{\text{总}}$ ——挤出流量

M ——捏合盘头数(或螺纹数, $M = 1, 2, 3$)

关于第二部分(啮合区),由于该区几何边界的复杂性及其多变性,想完美而准确地描述物料在这一区域的流动是很困难的,只能对其进行简化,建立简化物理模型,如图1.1B所示,假定啮合区的上下边界(即进出口)压力相等 $P_1 = P_2$ 。

二、数学模型

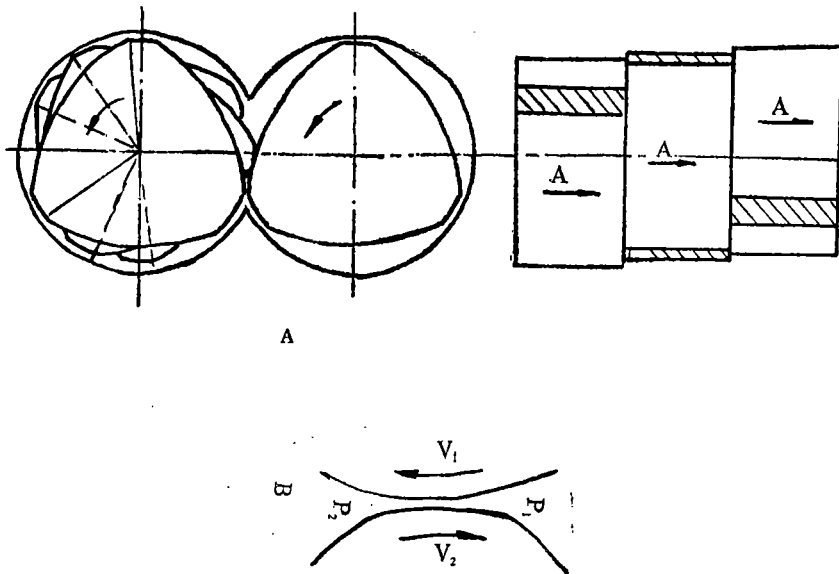


图1.1 捏合盘物理模型 A—基本物理模型 B—啮合区

1.假定：流场是稳定的、层流、等温、忽略惯性力及重力，熔体为不可压缩的牛顿流体或幂律流体，壁面无滑移，忽略流道曲率，部分流场轴向充分发展（因其出、入口效应区的流道长度为流道高度的2~3倍）。

2.数学模型

图1.2a所示为啮合区数学模型流场流道示意图，图1.2b为基本数学模型流道示意图。

（捏合盘展开且固定，机筒展开且运动）根据部分流场轴向充分发展的假定，将其划分为四个区，如图所示：

1区：组合流道流场入口效应区

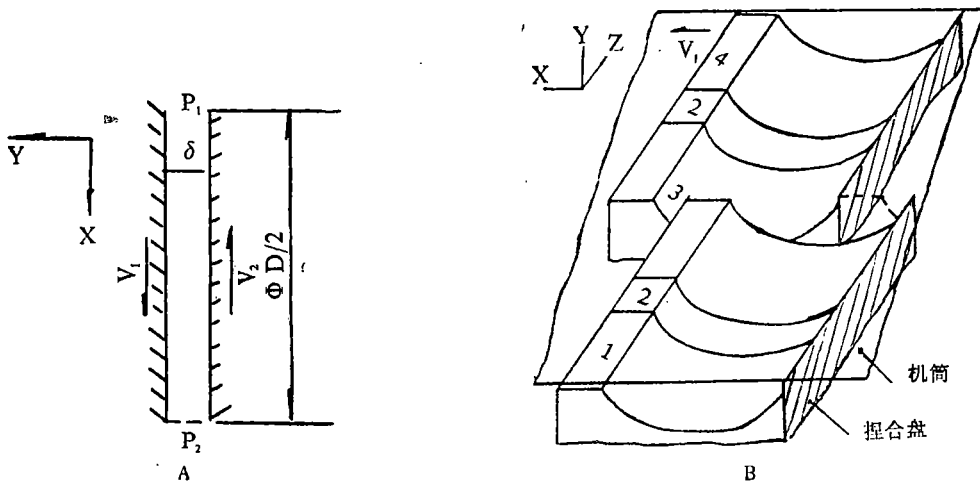


图1.2 数学模型

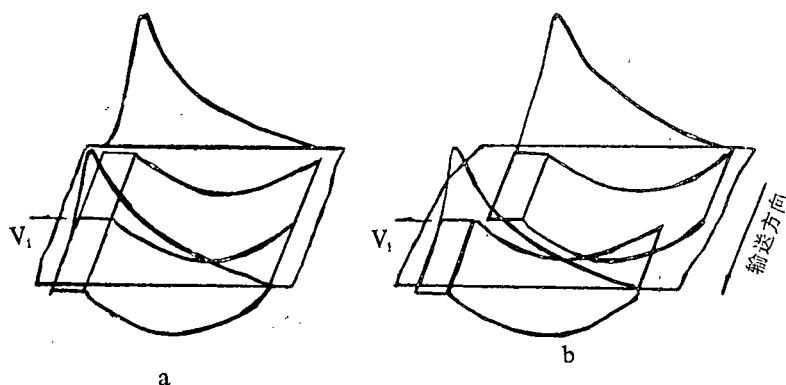


图 1.2-2

该应变难以求得, 且不易表征, 因此需要找另一个变量。由于分布混合是以流体的体积对流置换来实现的, 故以与熔体输送方向相反的回流量作为分布混合的衡量参数。如图 1.2-3 所示, 在一个槽区及间隙区 (i) 中, 沿输送方向有 Q_1 、 Q_4 的主流动和 Q_2 、 Q_3 、 Q_5 、 Q_6 的支流。其中 Q_1 为进入 (i) 的主流动, Q_2 、 Q_3 则为与主流动不同方向进入 (i) 的回流。若把总回流 $Q_{\text{回}}$ 分为 $Q_{x\text{回}}$ 和 $Q_{z\text{回}}$, 则有

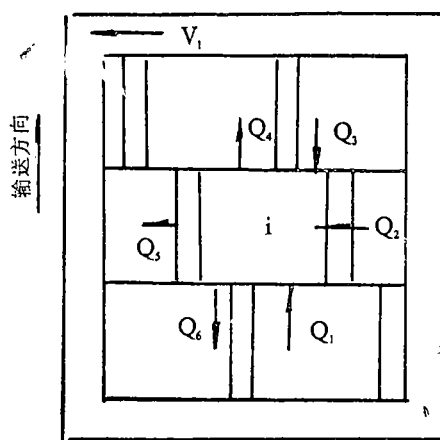


图 1.2-3

$$Q_{x\text{回}} = \sum_i^M Q_2 \quad (1.2-13)$$

$$Q_{z\text{回}} = \sum_L^M Q_3 \quad (1.2-14)$$

$$Q_{\text{回}} = Q_{x\text{回}} + Q_{z\text{回}} \quad (1.2-15)$$

其中 $Q_{x\text{回}}$ 为间隙流量, 形成周向分布混合, $Q_{z\text{回}}$ 形成轴向分布混合。

第二部分

一、三维基本模型流场计算

1. 流场计算方法:

由于捏合盘组合流道流场几何边界极其复杂, 故采用流体有限元方法进行数值计算。对于基本模型中 1、3、4 部分选取等参数六面体单元。为保证流场的连续性, 求解压力场选用一次插值函数, 求解速度场则选用二次插值函数。为保证高阶函数的连续性, 坐标函数取二次插值函数。对于基本模型部分 2, 选用等参四边形单元; 同样, 对压力场选用一次插值; 速度场选用二次插值, 坐标函数取为二次插值。

根据有限元法分析原理, 由数学模型基本方程组 1.2~3~1.2~11 得单元有限元方程, 后经坐标转换、积分、集成, 得总体有限元方程。

2. 边界条件的处理

为求解各模型区流场, 即将各总体有限元方程转化为可解方程组, 还需对其引入边界条件的处理。自然边界条件已为单元有限元方程的强迫向量所包含。关于本质边界条

件, 本文在综合运用现在常用的三种本质边界条件处理方法的基础上, 采取了一种所谓全功能边界修正法, 有效地解决了边界条件的引入。

二、迭代理论的应用

粘度迭代: 假定各单元粘度为常数, 但不同单元粘度随运动状态而不同。以初设各单元粘度值代入基本方程组, 得速度场, 求得新的各单元粘度值, 又以新粘度值求速度场, 反复迭代, 至收敛。

压力迭代: 对部分 2, 为求解基本方程组, 分析轴向流动, 先确定 $\frac{\partial P}{\partial Z}$ 。但轴向流为压力流, 而压力流中流量与压力梯度呈函数关系, 故可用迭代法, 通过流量 Q 对 $\frac{\partial P}{\partial Z}$ 迭代求值。本文采用牛顿迭代。

三、最大剪切应力求解

流场内任一点熔体承受的最大剪应力等于该点剪应力张量的第一、三主应力差的一

半:

$$\tau = \eta_s \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3-1)$$

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \quad (2.3-2)$$

式中 $I_1 = \tau_{11}$, $I_2 = \frac{1}{2} (I_1^2 - \tau)$,

$$I_3 = |\tau|。$$

(式 2.3-2) 中的根 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) 即为剪应力的第一、二、三主应力, 故

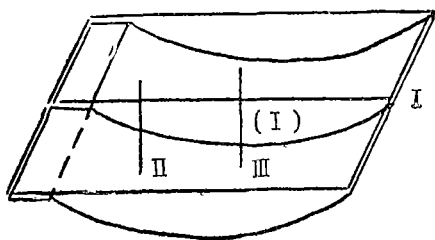
$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2.3-3)$$

第三部分: 理论模型计算结果

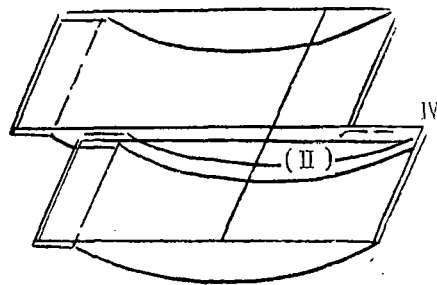
一、计算结果

由于捏合盘组合流道几何形状及边界条件的限制, 径向流动对场内流动贡献不大, 故在我们的分析中, 速度场仅以周向速度 V_x 及轴向速度 V_z 来表示, 剪切速率以 $\frac{\partial V_x}{\partial Y}$,

$\frac{\partial V_z}{\partial Y}$ 表示。图 3.1 给出了以下流场分析中使用的截面及截线位置。



部分 2



部分 3

图 3.1

1. 捏合盘组合流道流场的周向压力分布

周向压力不仅决定着周向流动, 而且是捏合盘组合流道形成输送能力的前提。图 3.1-1~3.1-3 表示出了捏合盘与机筒间隙 δ 、捏合盘错列角 λ 及螺杆转数对周向压力的影响, 其中图 3.1-1 所示为图 3.1 的 I 截面, 图 3.1-2~3.1-3 所示为图 3.1 中 IV 截

面。

3. 捏合盘组合流道流场的轴向压力分布
影响轴向压力分布的有流量、几何参数 (δ , M , λ)。如图 3.1-4~3.1-7 所示。

4. 捏合盘组合流道的剪切速率场
影响组合流道剪切速率场的参数有螺杆转数、流量、机筒与捏合盘间隙。图 3.1-

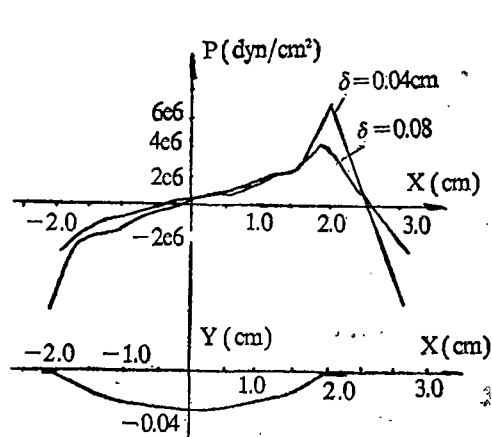


图3.1-1

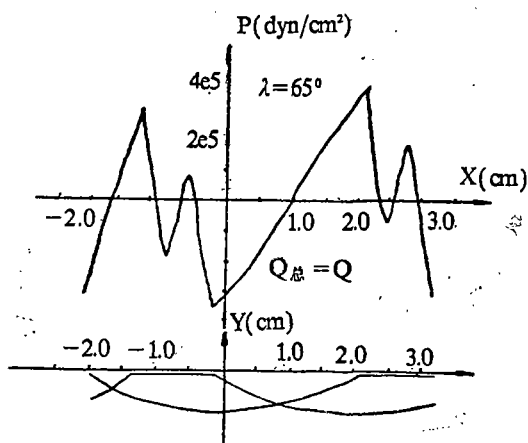


图3.1-2

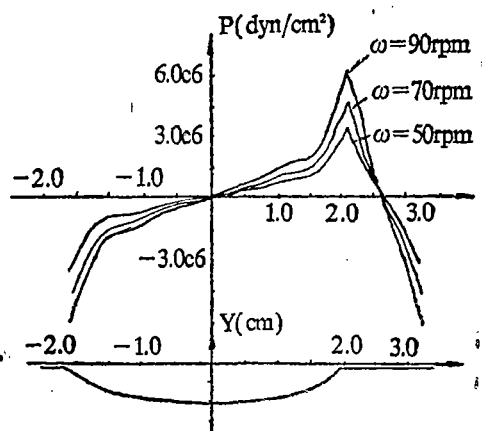


图3.1-3

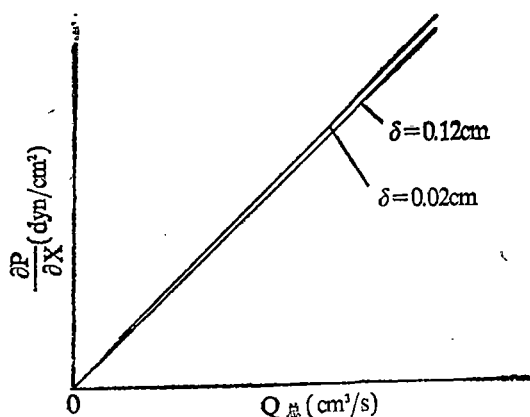


图3.1-4

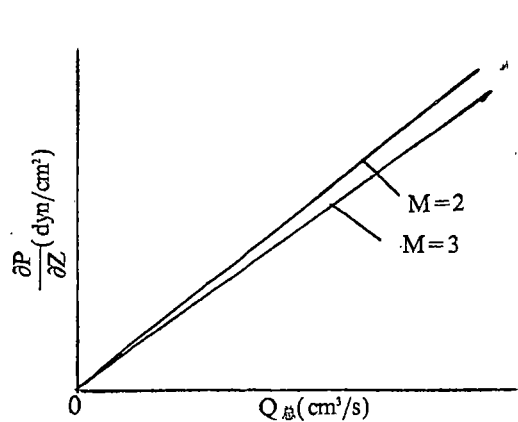


图3.1-5

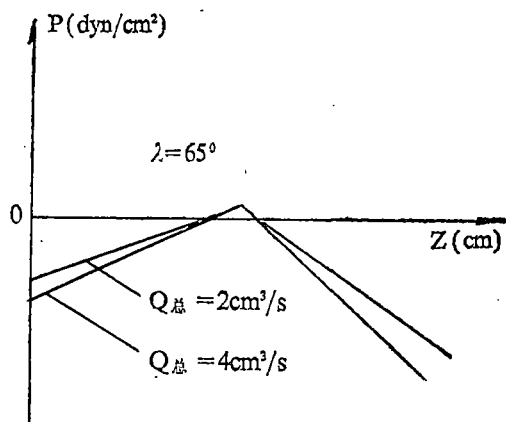


图3.1-6

8~3.1-10表示出了它们的影响。

5. 捏合盘组合流道的周向最大压差 $\Delta P_{m,x}$

图3.1-11~3.1-13表示出 $\Delta P_{m,x}$ 与螺杆转速、捏合盘与机筒间隙、捏合盘头数、物料特性的关系。

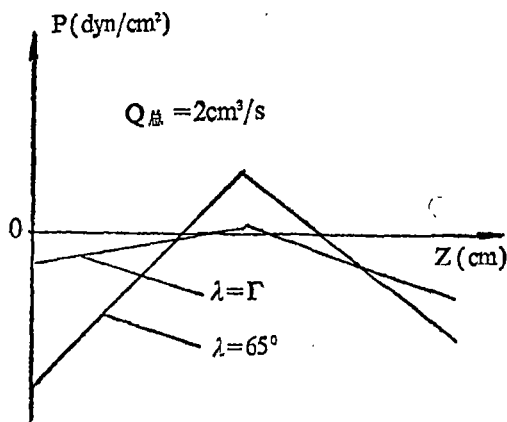


图3.1-7

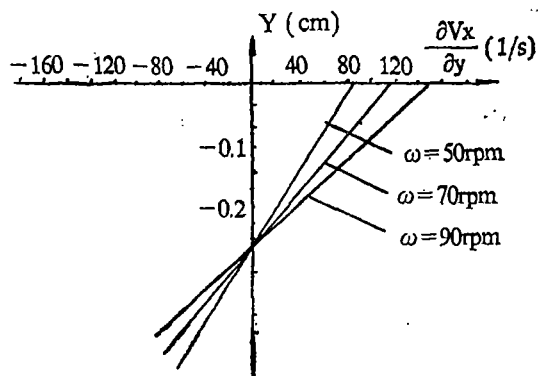


图3.1-8 ■—截线位置

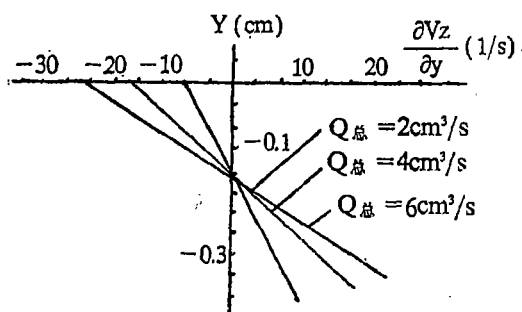


图3.1-9 ■—截线位置

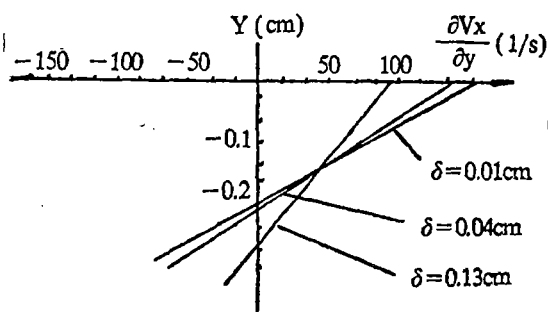


图3.1-10 ■—截线位置

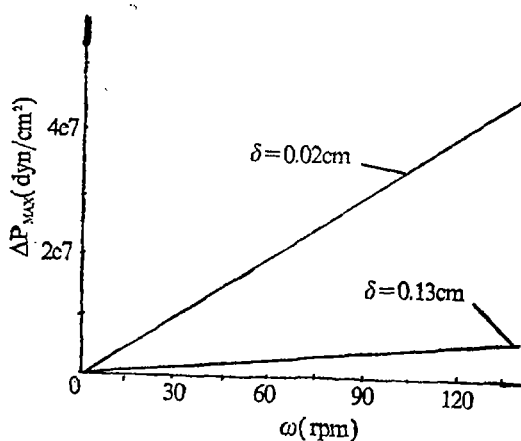


图3.1-11

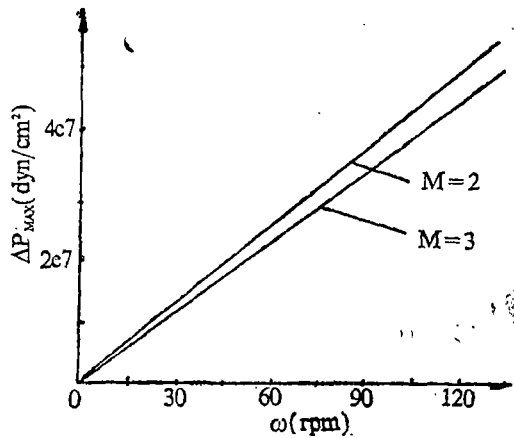


图3.1-12

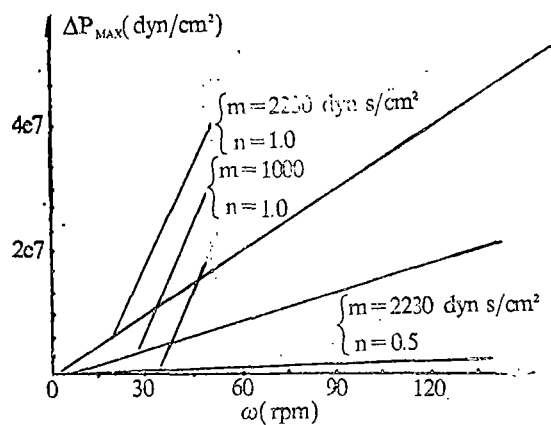


图3.1-13

6. 捏合盘组合流道的熔体输送能力

图3.1-14~图3.1-16表示出错列角、机筒与捏合盘间隙、捏合盘头数和螺杆转速之间的关系。

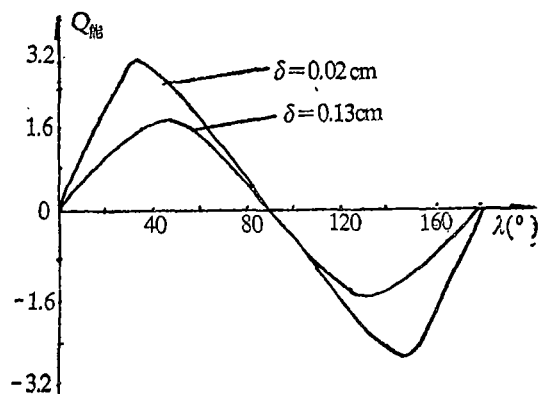


图3.1-14

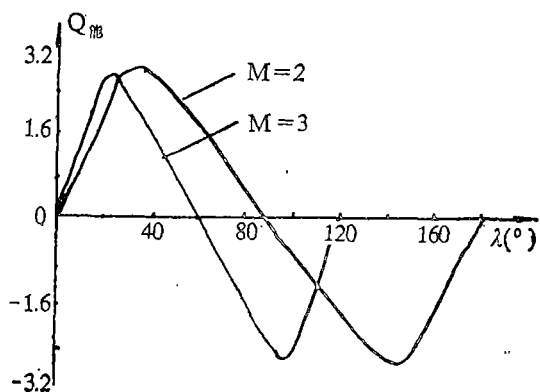


图3.1-15

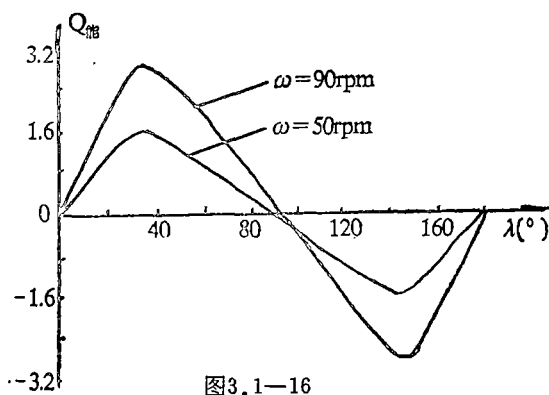


图3.1-16

7. 捏合盘组合流道的混合性能

图3.1-17~3.1-22表示出流场参数与周向分布混合、轴向分布混合、分散混合的关系。

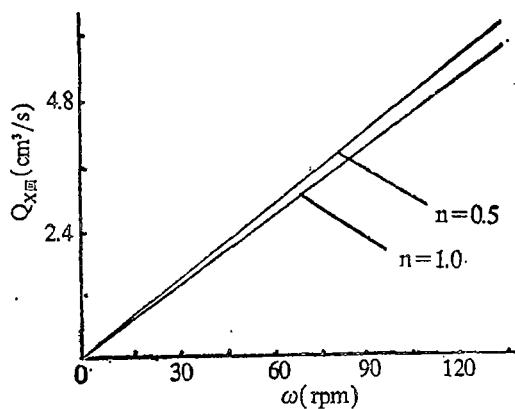


图3.1-17

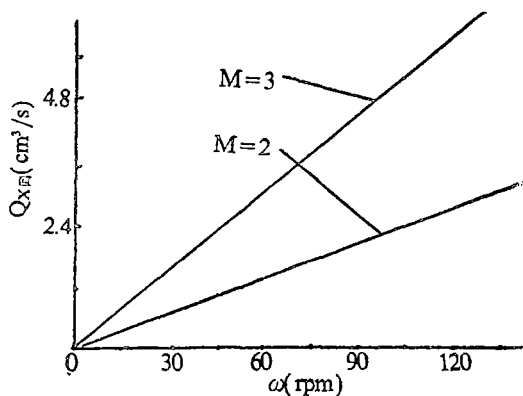


图3.1-18

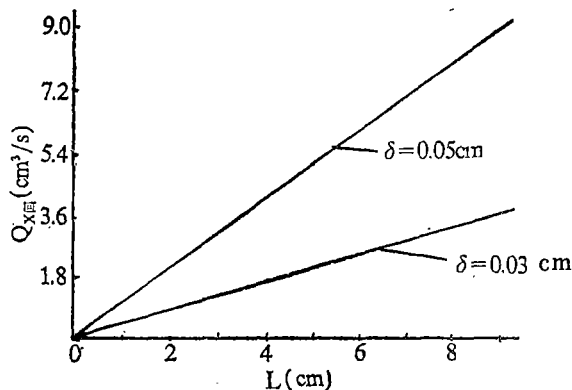


图3.1-19

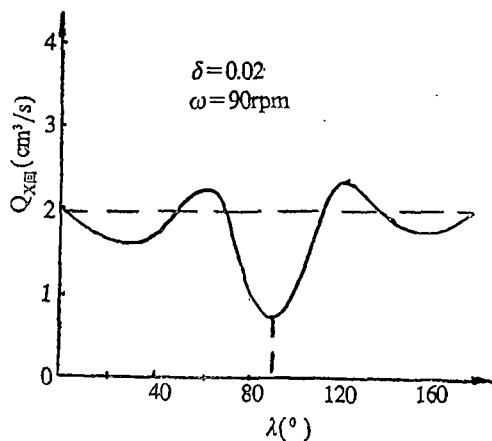


图3.1-20

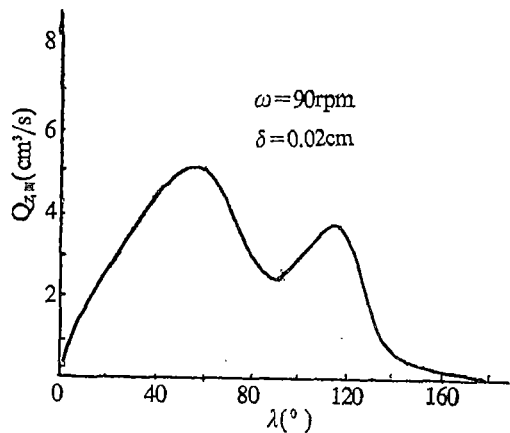


图3.1-21

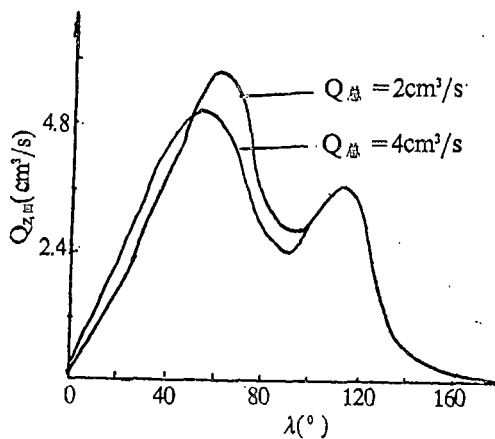


图3.1-22

第四部分 理论模型的实验验证

一、实验装置

全部实验在以西德Brabander 测示用双螺杆挤出机为基础改装的模拟实验台上进行。机筒内径为34mm,螺杆中心距为30mm。机筒上流体测压点如图4.1所示。实验用介质为硅油(粘度系数为 $2.23 \times 10^3 \text{ dyns/cm}^2$ 幂律指数 $n=1.0$, 密度 $\rho=0.99 \text{ g/cm}^3$)。

二、实验验证

1. 轴向压力分布规律的验证

图4.2—1, 4.2—2为实测流量、机筒间

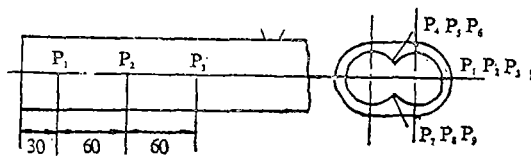


图4.1

隙与压力梯度的关系。图中×为测量值, —为计算值。

2. 周向压力分布规律的验证

图4.2—3为 $\lambda=0$, 不同螺杆转数下周向压力分布的模拟计算结果, 而图4.2—4为相应条件下实测的动态周向压力分布。其中划线区a—b为一个间隙区及槽区的压力分

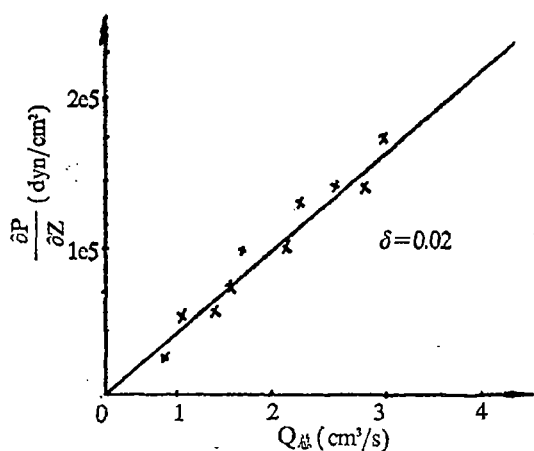


图4.2-1

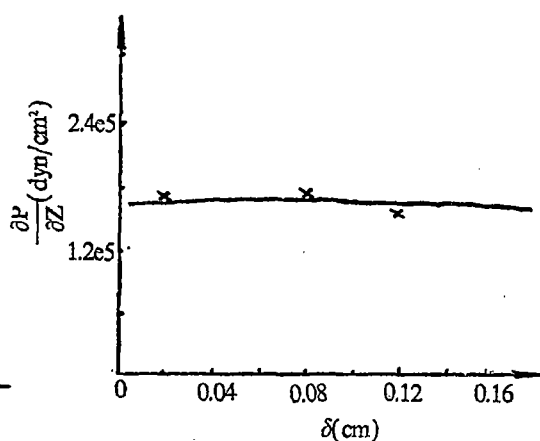


图4.2-2

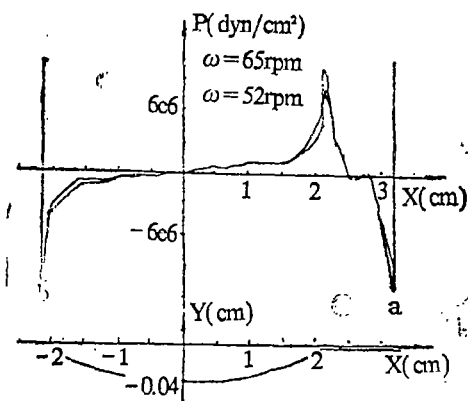


图4.2-3

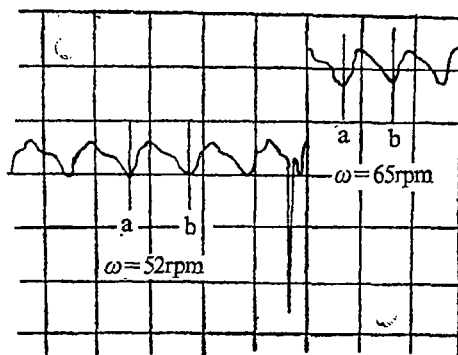


图4.2-4

布情况(两图相对应)。通过比较可知,计算结果与实测结果具有相同的压力分布规律。实测压力峰值较计算值小得多,是由于实验所用压力传感器的感受头是个小平面而不是一个点,且压力峰附近的周向压力变化极为敏感,从而大大削弱了峰值信号的接受,波峰愈尖,削弱愈严重。另外,实验数据是用L23—400函数记录仪记录的,其响应时间较长,进一步削弱峰值信号,导致少量的波形滞后及滞后变形。若不考虑上述诸因素影响,可以得出 $\lambda = 0$ 时模型计算结果和实验结果基本吻合的结论。我们还实测了 $\lambda = 36.4^\circ$, $Q = 2\text{cm}^3/\text{s}$ 的情况,结论相同。

结 论

(1) 本文所描述的同向啮合双螺杆熔体输送段捏合盘组合流道的等温、幂律三维流动模型,全面真实地反映了流场情况,涉及到实际挤出过程的各种参数(且考虑了啮合区的作用),因而较前人所建立的模型有较大的进步。

(2) 本文首次成功地利用三维流体有限元方法对流场数值求解,并建立和使用全功能边界修正法,后者既将方程限制在尽可能少的维数上,又确保了计算结果的准确

性。

(3) 本文通过分析计算, 得出了捏合盘组合流道中速度场及压力场的分布规律和剪切速率场, 进而得出了熔体输送能力、混合能力与捏合盘几何形状、物性参数和运转条件之间的关系, 这些结果对认识捏合盘元件的性能、设计和使用捏合盘元件都有重要价值。

(4) 本文所进行的实验验证说明作者所建立的物理模型和数学模型以及采用的计算方法是成功的。

参 考 文 献

- [1] Han werner « Des Betriebsnerhalten der Zweiwelligen kentscheiben—schneckonpress vom TYy ZSK Bei der Verarbeitung von Hoeviskosen Flüssig keiten » (1976)
- [2] James L.white « modeling co-rotating twin screw extrusion » (1986)
- [3] Kenneth H.Hnebner « 工程师用有限元素法 » (1981) 中译本。

The Investigation on Melt Pumping and Mixing Mechanism of Kneading Discs in Co-rotating Intermeshing Twin Screw Extruder

Wang Rong Geng Xiaozheng

(Beijing Institute of Chemical technology)

ABSTRACT

In this paper, a new three dimensional isothermal and power law flow model that can be used to describe the melt pumping and mixing characteristics of kneading discs widely used in co-rotating intermeshing twin screw extruders, have been established. By solving the flow field numerically through finite element analysis of flow and large computer programm, the profiles of velocity, pressure, and shear stress in the flow field were obtained. These results can express the relationships among kneading discs geometries, materials properties, and running conditions more comprehensively, and also induce some conclusions never being gotten with those models by precedent authors. These are of great significance for understanding of working mechanism of kneading discs and guiding of discs design and extrusion technology selection,