

新型捏合盘元件不同螺杆构型混合性能的数值模拟

Numerical simulation of mixing performance for different screw configuration of new kneading disc element

王远, 马秀清*

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 采用 POLYFLOW 模拟软件分析了啮合同向双螺杆挤出机中新型捏合盘元件下物料的流动模式。考察了新型捏合盘元件的斜棱旋向、捏合块组合的错列角对物料在流道中的剪切速率、出入口压差以及回流量的影响。数值模拟分析结果表明: 4 种新型捏合块构型的输送特性和混合性能均有所不同。在正向输送能力方面, 右旋正向捏合块更佳, 在分布、分散混合性能方面, 左旋反向捏合块更佳, 并且捏合块的正反向比单片捏合块的螺旋方向在输送能力、混合性能上影响更大。

关键词: 同向双螺杆挤出机; 新型捏合盘; 捏合块; 螺杆构型; 混合性能

中图分类号: TQ320.667

文章编号: 1009-797X(2016)12-0063-05

文献标识码: B

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2016.12.027

啮合同向双螺杆挤出理念起源于 19 世纪 60 年代, 而真正用于塑料加工是在 20 世纪 30 年代末, 当时是由意大利 LMP 公司旗下的 Roberto Colombo 研究制造^[1]。此后, 从 20 世纪 70 年代开始, 现代同向双螺杆才真正发展起来。由于其采用正位移输送, 部分回流又会促进分布混合, 加之机筒和螺杆采用组合积木式设计, 故其优越于单螺杆和其它螺杆挤出机。双螺杆挤出机主要用于物料混合, 是现今聚合物共混改性使用最多的设备之一。捏合盘元件具有优异的熔融塑化、混合性能, 是啮合同向双螺杆挤出加工中的主要剪切元件。近些年, 随着 PC 技术的迅速发展以及各类 CFD 软件的出现, 国内外专家对螺杆元件的理论研究和结构设计创新不断发展。其中, 主要体现在所建立的三维物理模型与实际工作状态更为接近, 计算结果也就更加精确^[2]。Goffordd 等人对不同错列角的捏合块中的三维牛顿等温流动进行了数值分析, 得出了熔体流场的横向和纵向速度场、压力场等的分布情况^[3]。Yasuya Nakayama 和 Eiji Takeda 等人模拟了由新型捏合盘元件 ptKD 组合的不同捏合块构型下流道的三维流动, 并对部分流场进行了混合性能分析^[4]。张先明等利用 POLYFLOW 软件对挤出过程中不同捏合

块构型进行数值分析, 重点讨论了其局部停留时间分布 (LRTD), 并对流场模拟结果进行了相应地实验验证^[5]。

尽管对常规捏合盘元件的数值模拟研究已经比较成熟, 但对其结构改进创新的研究尚属空白。本文旨在设计新型捏合盘元件, 即改变顶棱与捏合盘轴线的倾斜角度, 设计斜棱捏合盘, 然后采用数值模拟软件表征新型捏合盘元件的输送特性和混合性能, 模拟分析了 4 种新型捏合块构型中物料的压力场分布、剪切速率分布以及回流量, 并对比不同构型的数值模拟计算结果, 从而得到新型捏合盘的斜棱旋向、捏合块组合的错列角对物料在流道中的剪切速率、出入口压差以及物料在轴向和径向混合效果的影响。

1 模拟条件确定

鉴于理论上单个捏合盘是成串、成对使用的, 故希望通过多个捏合盘组合出不同构型来模拟类似螺纹元件的混合性能。本文研究采用 SOLIDWORKS 软

作者简介: 王远 (1990-), 男, 在读研究生, 就读于北京化工大学机械工程专业, 研究方向为聚合物加工原理及设备。
收稿日期: 2016-03-23

件建立新型捏合盘元件、捏合块构型的物理模型,在 GAMBIT 软件中划分网格并选取边界条件,然后采用有限元分析软件 ANSYS 下 POLYFLOW 软件对熔体输送段的 4 种新型捏合块构型流道进行三维等温非牛顿流场模拟计算,并得出压力场、剪切速率以及回流量,进而讨论四种新型捏合块构型的输送特性和混合性能。

1.1 物理建模

现今同向双螺杆中大多数采用常规捏合盘元件,如图 1(a)所示。它的特点是顶棱与捏合盘的轴线平行,因此没有输送能力;而在一般挤出加工中是需要一定输送能力的,这样我们可以类比常规螺纹元件的特点,使用螺旋线改变顶棱倾斜角度,使其具有和它一样的输送能力,即设计新型捏合盘元件:左旋和右旋斜棱捏合盘,如图 1(b)和(c)所示。本文捏合盘几何模型的具体参数如表 1。



图 1 捏合盘模型

表 1 模型几何参数

螺杆元件	头数	螺杆根径 /mm	螺杆外径 /mm	厚度/mm	导程/mm
常规捏合盘	二头	25.4	34.0	7.5	
左旋捏合盘	二头	25.4	34.0	7.5	240.0
右旋捏合盘	二头	25.4	34.0	7.5	240.0

1.2 数学建模

1.2.1 基本假设

鉴于啮合同向双螺杆在挤出过程中计量段的工艺条件,以及聚合物的特性,为方便流场的拟定,作如下假设:

- (1) 流道内熔体全充满,不可压缩,即 ρ 为定值;
- (2) 雷诺数比较小,可表示为层流流动;
- (3) 所有流场均为等温、稳定流场,即流场与 T 和 t 无关;
- (4) 由于黏滞力远远大于自身的体积力、惯性力,故后者可忽略不计;
- (5) 流道内壁面无滑移;
- (6) 流体为广义牛顿流体,常用的本构方程有

Cross 模型、Carreau 模型和幂律模型等,其中前面两个模型多用于较宽剪切速率范围,而本课题中鉴于 PP(聚丙烯)物料的剪切速率比较低,故采用 Cross 模型。其表观黏度与剪切速率的关系如下:

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

式中: λ —模型参数;

η_0 —零剪切黏度, Pa·s;

m —非牛顿指数;

$\dot{\gamma}$ —剪切速率, 1/s。

可表示为:

$$\dot{\gamma} = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} & 2\frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} & 2\frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

本文 Cross 模型中,对其进行流场模拟,所用 PP 的参数为: $\eta_0=9\ 560$ Pa·s, $\lambda=0.3\ 664$ s, $m=0.737\ 2$ 。

根据上述基本假设,在笛卡尔直角坐标系下,其控制方程包括连续性方程、运动方程及能量平衡方程,而考虑到流场是等温的,故能量平衡方程这里不作讨论。

连续性方程为:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

运动方程为:

$$\begin{cases} 0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ 0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \\ 0 = -\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P —静压力, Pa;

ρ —聚合物密度, kg/m³;

v_i —表示速度分量,即在 i 方向上的分量, m/s;

τ_{ij} —应力张量,其中 j 表示应力作用面的外法线方向,表示应力分量的作用方向^[6]。

在基本假设条件下,利用(1)、(3)和(4)组建方程组,并对流场进行求解。

1.2.2 几何模型及边界条件

本文所构建的新型捏合盘元件,源自于德国 Leistritz 双螺杆挤出机中螺杆的实际尺寸,设计模型

的具体几何参数见表2所示,不同捏合块构型的几何模型如图2所示。

为了简化描述,以下使用代码表述,如NKB(L) 16/120/45/240,指捏合盘元件为16片,长度为120 mm,错列角为45°,导程为240 mm,为左旋,不加标注的为右旋。而本文研究的四种构型参数比较统一,捏合块只存在错列角(正向、反向捏合块)及捏合盘结构(左旋、右旋捏合块)不同,故可以统一命名:如NKBLB,为左旋反向捏合块,其中L为左旋捏合盘(R为右旋捏合盘),B为反向捏合块(为正向捏合块),以下不再赘述。

表2 不同捏合块构型的几何参数

螺杆构型	机筒内径 /mm	捏合盘片数 /mm	错列角 /°	中心距 /mm	计算域长度 /mm
NKBLB	34.6	16	135	30	120
NKBRB	34.6	16	135	30	120
NKBLF	34.6	16	45	30	120
NKBRF	34.6	16	45	30	120

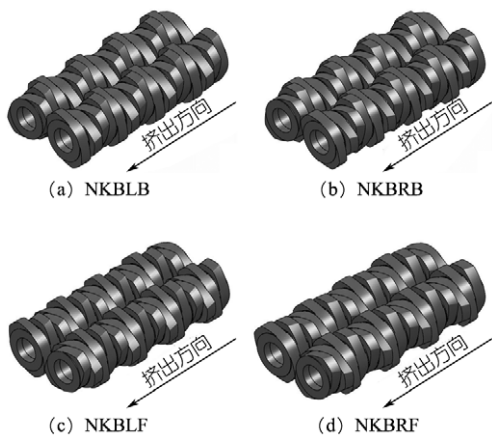


图2 不同捏合块构型的物理模型

1.2.2.1 坐标系的选择

为使求解更加方便,本课题采用直角坐标系。这里为了方便POLYDATA软件中参数的设置,按照右手定则,取Z轴正方向为挤出方向。

1.2.2.2 网格的划分

鉴于啮合同向双螺杆流道比较复杂,而网格划分的好坏又直接决定了模拟结果的准确性,故在GAMBIT软件中采用四面体网格划分。捏合块构型的具体网格划分参数如表3所示。

表3 网格划分参数

螺杆构型	网格尺寸	网格数
NKBLB	1.6	141 121
NKBRB	1.6	135 038
NKBLF	1.6	134 046
NKBRF	1.6	143 349

1.2.2.3 边界条件

边界条件的选取与设置对后面流场模拟具有重要影响,根据本文流道复杂程度,故在有限元模型中设定5个边界条件,即机筒内表面边界、入口边界、出口边界、左螺杆表面边界以及右螺杆表面边界,设置如下:

- (1) 机筒内表面壁面无滑移, $V_b=0$;
- (2) 计算域的入口边界设为体积流率 $Q=5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$;
- (3) 出口边界设为压力 $P=10 \text{ MPa}$;
- (4) 左、右螺杆由于转速相同,根据流变学中运动边界条件,即螺杆外表面壁面无滑移,转速 $N_s=60 \text{ r/min}$ 。

2 模拟结果及分析

2.1 压力场

图3为四种不同捏合块构型流道的压力场分布图,其中图3(a)和(b)所示为错列角135°的左旋、右旋捏合块,它们的压力沿挤出方向是逐渐降低的,入口压力大,出口压力小,则此类元件是阻力元件,不具有正向输送能力。而图3(c)和(d)所示为错列角45°的左旋、右旋捏合块,它们的压力沿挤出方向是逐渐升高的,入口压力小,出口压力大,则此类元件是输送元件,具有一定正向输送能力。

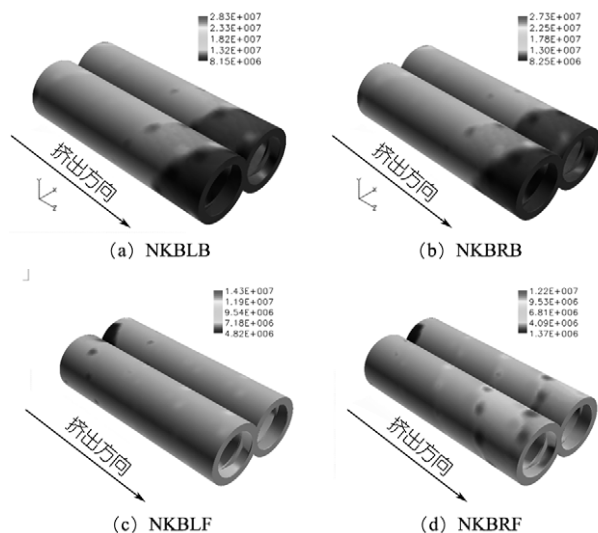


图3 不同捏合块构型下流道的压力场分布云图 /Pa

图4为四种不同捏合块构型下流道的出入口压差图,由图可见,NKBLF和NKBRF的出入口压差为负值,其余流道均为正值,其中NKBRF的正向输送能力最强,这是因为正向捏合块是输送元件,并且在正向捏合块中NKBRF的顶棱与轴线倾斜角度和捏合盘

之间错开角度的方向一致;而反向捏合块中NKBLB则恰恰相反,这是由于反向捏合块是阻力元件,故输送能力最弱。

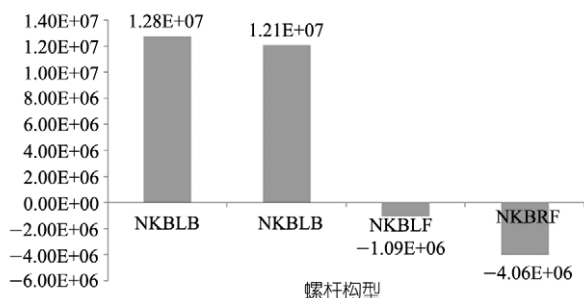


图4 不同捏合块构型下流道的出入口压差图 /Pa

2.2 剪切速率场

图5为四种不同捏合块构型流道的剪切速率场分布图。由图可见,捏合盘元件的顶棱和两螺杆啮合区部位平均剪切速率最大,而其根径和两螺杆非啮合区部位平均剪切速率较小。这是因为捏合盘元件的顶棱与机筒的间距较小,速度梯度较大,导致顶棱部位的剪切速率较大^[7];而在螺杆相互啮合时其间距最小,故剪切速率最大。此外,捏合盘元件的根径和非啮合区部位与机筒的剪切速率相对较小。

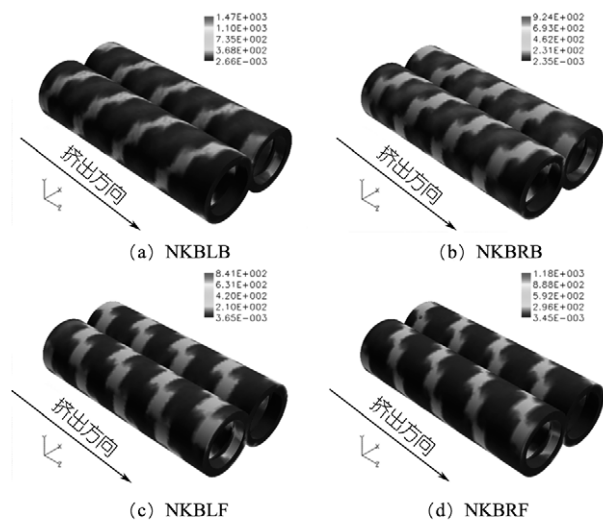


图5 不同捏合块构型下流道的剪切速率场分布云图 (/s⁻¹)

图6为四种不同捏合块构型从入口到出口各个截面上平均剪切速率变化图。由图可见,四种捏合块构型的流道平均剪切速率变化较大,沿轴向分别存在16个波峰和波谷。这是因为波峰和波谷分别对应捏合盘的顶棱和根部,而捏合块不像螺纹元件那样,螺棱沿

着螺旋方向是不连续的,它们之间存在一定的错角,捏合块的顶棱部位与机筒之间会产生较小间隙,致使速度梯度变大,故剪切速率上升;而在捏合盘的根径部位间隙较小,速度梯度较大,所以剪切速率会升高。

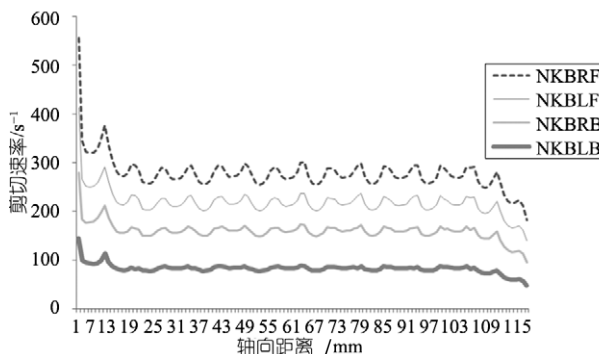


图6 不同捏合块构型下流道的平均剪切速率分布曲线 /s⁻¹

根据场分析结果,进一步处理平均剪切速率得到四种捏合块构型下流道的加权平均剪切速率。按照混合理论,流道内物料的加权平均剪切速率越大,物料内部之间的速度梯度越大,混炼元件的剪切效果越强,分散混合性能越好。其加权计算公式如下:

$$\lambda = \frac{\iiint_{\Omega} \lambda d\Omega}{\iiint_{\Omega} d\Omega} \quad (5)$$

式中, λ —平均剪切速率, s⁻¹。

图7为四种不同捏合块构型下流道的加权平均剪切速率对比图。由图可见,左旋、右旋捏合块的加权平均剪切速率总体变化不大,左旋捏合块略大于右旋捏合块。由于前者是阻力元件,会增加物料在流道内的停留时间,进而增加其所受剪切次数,故剪切速率稍大;此外,相对于正向捏合块,反向捏合块的加权平均剪切速率更大。

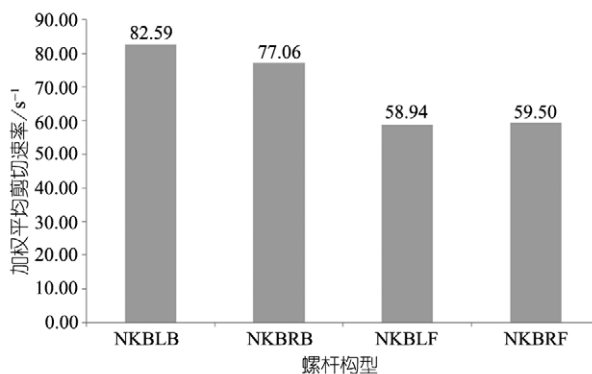


图7 不同捏合块构型下流道的加权平均剪切速率图 (/s⁻¹)

2.3 回流系数

分布性混合作为衡量聚合物加工质量的重要指标,研究其混合效果具有重要意义。而由于体积对流置换中的回流能很好实现分布混合,故本文计算回流量及相关回流系数。回流,是指一部分物料通过螺杆与机筒之间间隙反流回去,向着与物料挤出方向相反的方向流动所形成的漏流。回流与多种因素有关,包括螺杆转速、两根螺杆的布置、捏合块本身的结构及出入口压差等。

在相同的入口流量下,回流量越大,回流系数越大,横向分布混合能力越强^[8];因此,回流系数计算如下:

$$\mu = \frac{Q_b}{Q_i} \quad (6)$$

$$Q_b = \iint_S v_b dS \quad (7)$$

$$Q_i = \iint_S v_i dS \quad (8)$$

式中: Q_b —回流量, m^3/s ;

Q_i —入口流量, m^3/s ;

v_b —轴负方向速度, m/s ;

v_i —轴速度, m/s ;

μ —回流系数。

表4为四种不同捏合块构型下流道的回流参数表。由数据可见,在捏合块与机筒内壁之间间隙相同条件下,左旋捏合块比右旋捏合块的回流量稍大,而反向捏合块相对于正向捏合块则具有更大的回流量,分布混合能力更强。这是因为左旋捏合块是阻力元件,正向输送能力较弱,致使物料向着与挤出方向相反的方向流动,导致在机筒中的停留时间更长,回流量更大。

图8为四种不同捏合块构型下流道的回流系数对比图。由图分析可知,右旋捏合块的回流系数略小于左旋捏合块的回流系数,这是因为右旋捏合块的正向输送能力强于左旋捏合块,同时反向捏合块的回流系数比正向捏合块大将近10倍,因此正向捏合块的输送能力远远大于左旋捏合块。

表4 不同捏合块构型下流道的回流参数

螺杆构型	NKBLB	NKBRB	NKBLF	NKBRF
回流量/($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$)	-2.09	-1.70	-0.30	-0.16
净流量/($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$)	4.41	3.94	5.18	4.85

3 结论

(1) 通过压力场的表征可知:在正向输送能力方

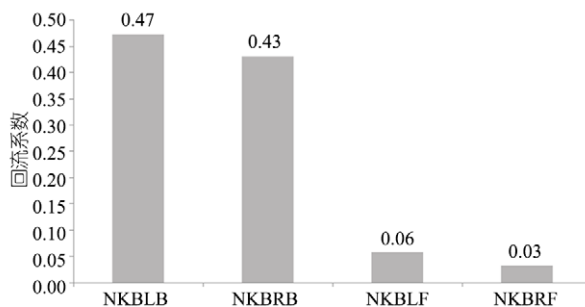


图8 不同捏合块构型下流道的回流系数

面,右旋正向捏合块的输送能力最强,左旋反向捏合块最弱。

(2) 通过剪切速率场的表征可知:在分散混合性能方面,左旋反向捏合块的加权平均剪切速率最强,右旋正向捏合块最弱。

(3) 通过回流量和回流系数的表征可知:在分布混合性能方面,左旋反向捏合块的回流量和回流系数最大,右旋正向捏合块最小,同时正反向捏合块比左右旋捏合块在分布混合能力上更优越。

参考文献:

- [1] 耿孝正,张沛.塑料混合及设备[M].北京:中国轻工业出版社,1992:1.
- [2] 邱国庆.同向旋转双螺杆挤出机螺旋状捏合盘元件混炼机理研究[D].北京:北京化工大学,2010.
- [3] D. J. Van Der Wal, D. Goffart, E. M. Klomp, H. W. Hoogstraten, L. P. B. M. Janssen. Three-dimensional flow modeling of a self-wiping co-rotating twin screw extruder. Part II: the kneading section[J]. Polymer Engineering & Science, 1996, 36(7):912-924.
- [4] Yasuya Nakayama, Eiji Takeda, Takashi Shigeishi, Hideki Tomiyama, Toshihisa Kajiwaru. Melt-mixing by novel pitched-tip kneading disks in a co-rotating twin-screw extruder[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(1):103-110.
- [5] Xian-Ming Zhang, Lian-Fang Feng, Wen-Xing Chen, Guo-Hua Hu. Numerical simulation and experimental validation of mixing performance of kneading discs in a twin screw extruder[J]. Polymer Engineering & Science, 2009, 49(9):1772-1783.
- [6] 章梓雄,董曾南.黏性流体力学[M].北京:清华大学出版社,2011:21.
- [7] 刘青峰.同向双螺杆挤出过程不同螺杆组合的混合性能分析[D].北京:北京化工大学,2006.
- [8] 朱向哲,陈德荣,谢禹钧.基于CFD多螺杆反应器挤出特性的分析[J].辽宁石油化工大学学报,2006,26(1):60.

(R-03)