

# 基于摆线针轮传动的同轴异速 单螺杆挤出机的仿真分析

李 焱, 王丽艳

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 沈阳 110142)

**摘要:**为改善传统单螺杆挤出机在大豆蛋白加工过程中混合性能较差的问题,基于摆线针轮传动设计了一种同轴异速单螺杆结构,以提升单螺杆挤出机的挤出品质。以传统单螺杆为参照对象,运用 SolidWorks 软件建立对应的几何模型,基于有限元法,运用 ANSYS/CFX 软件模拟大豆蛋白在流场中的运动情况,借助 CFD-Post 软件提取流场模拟数据,通过对比分析压力场、速度矢量场和流线场、剪切应变速率和回流系数判定同轴异速单螺杆挤出机的挤出性能。结果显示:同轴异速单螺杆挤出机建压能力是传统单螺杆挤出机的 1.22 倍,变速输送段有效减缓了物料的流动速度,物料在同轴异速单螺杆挤出机变速输送段的停留时间是传统单螺杆挤出机的 1.86~2.19 倍;传统单螺杆挤出机平均剪切应变速率是同轴异速单螺杆挤出机变速输送段的 3.19 倍,同轴异速单螺杆挤出机有效改善了大豆蛋白因剪切稀化现象而停留时间缩短的问题;同轴异速单螺杆挤出机的回流系数(0.46)远高于传统单螺杆挤出机的,分布混合性能更优。综上,同轴异速单螺杆挤出机中变速输送段的存在增强了建压能力,延长了停留时间,改善了分布混合性能。

**关键词:**同轴异速;单螺杆;有限元法;回流系数;分布混合

中图分类号:TS223;TS222+.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)03-0089-07

## Simulation analysis of coaxial allometric single screw extruder based on cycloidal pin wheel drive

LI Yao, WANG Liyan

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of  
Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** To improve the poor mixing performance of traditional single screw extruder in soybean protein processing, a coaxial allometric single screw structure based on cycloidal pin wheel drive was designed to improve the extrusion quality of single screw extruder. Taking the traditional single screw as the reference object, the corresponding geometric model was established by SolidWorks software. Based on the finite element method, the motion of soybean protein in the flow field was simulated by ANSYS/CFX software, and the flow field simulation data was extracted by CFD-Post software. The extrusion performance of the coaxial allometric single screw extruder was determined by comparing the pressure field, velocity vector field and streamline field, shear strain rate, and reflux coefficient. The results showed that the pressure-building capacity of the coaxial allometric single screw extruder was 1.22 times that of the traditional single screw extruder, the variable speed conveying section effectively slowed down the flow speed of the material, and the residence time of material in the variable speed conveying section of coaxial allometric

single screw extruder was 1.86-2.19 times that of the traditional single screw extruder. The average shear strain rate of the traditional single screw extruder was 3.19 times that of the variable speed conveying section of coaxial allometric single screw extruder, and the coaxial allometric

收稿日期:2023-09-13;修回日期:2024-10-24

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(2021-MS-253)

作者简介:李 焱(1996),男,硕士研究生,研究方向为螺杆挤出设备结构优化(E-mail)yao\_li1996@163.com。

通信作者:王丽艳,副教授(E-mail>wangliyan1977@163.com。

single screw extruder could effectively improve the shortening of the residence time of soybean protein due to shear thinning phenomenon. The reflux coefficient of coaxial allometric single screw extruder (0.46) was much higher than that of traditional single screw extruder, and the distribution mixing performance was better. In summary, the existence of a variable speed conveying section in the coaxial allometric single screw extruder enhances the pressure - building capacity, prolongs the residence time, and improves the distributed mixing performance.

**Key words:** coaxial allometry; single screw; finite element method; reflux coefficient; distributed mixing

大豆起源于中国,现广泛分布于世界各地,是许多地区饮食中的重要组成部分。大豆蛋白作为大豆中最主要的营养成分之一,占大豆干基含量的40%以上,含有人体所需8种必需氨基酸,且氨基酸比例均衡,是理想的食用植物蛋白资源<sup>[1]</sup>。经粗略统计,我国大豆蛋白的消费量预计保持着10%的年增长速度<sup>[2]</sup>。另外,随着人们健康饮食意识的增强,大豆蛋白将成为人类主要的蛋白质来源之一。因此,如何深化研究大豆蛋白的生产制备已成为食品研究开发的热点之一<sup>[3]</sup>。

单螺杆挤出机作为挤压组织技术实现的重要载体,因具有操作简单、价格低廉、工艺易控、性能稳定等优点,已成为食品加工行业的主要设备之一。但由于单螺杆挤出机只有一个螺杆,流道较短,存在物料停留时间短和混合效果欠佳等问题,因此通过创新螺杆结构来改善单螺杆挤出机的性能对食品加工行业具有一定的意义<sup>[4]</sup>。目前,学者们作出了诸多探索,如:刘忠萍等<sup>[5]</sup>对大豆蛋白加工工艺进行了研究,发现物料在螺杆中的停留时间对产品质量影响较大,但并未提出如何改变物料在螺杆中停留时间的方法;汤霖森等<sup>[6]</sup>通过在螺杆内部嵌入行星轮实现同轴不同速,改变了物料在螺杆中的停留时间,但受制于螺杆尺寸,难以实现较大变速比,无法使混合效果达到最佳。

本文基于摆线针轮传动机构尺寸小、变速比大的优点,设计了一种同轴异速单螺杆结构,以传统单螺杆为参照对象,以黏性流体力学<sup>[7]</sup>为理论依据,以 ANSYS/CFX 有限元分析软件<sup>[8]</sup>为分析平台,近似模拟物料在螺杆中的运动情况,借助 CFD - Post 软件提取流场模拟数据并进行分析,以期单螺杆挤出机的混合性能优化提供一定的设计依据。

## 1 同轴异速单螺杆模型与参数

### 1.1 摆线针轮传动机构模型

与标准针轮相啮合,并且和针齿共轭且无啮合间隙的摆线轮齿形称为标准齿形。选择摆线轮的几何中心作为坐标原点,通过原点并与摆线轮齿槽的对称轴重合的轴线作为  $x_c$  轴,通过原点作  $x_c$  轴的

垂直线,然后沿  $x_c$  轴移动距离  $a$  作为  $y_c$  轴,得摆线轮齿廓曲线(图1),则摆线轮的标准齿廓参数方程如公式(1)所示<sup>[9]</sup>。

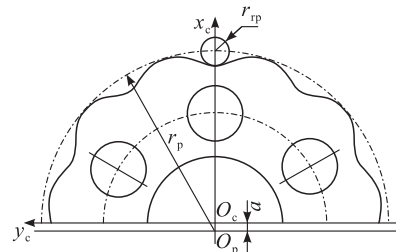


图1 摆线轮齿廓曲线

Fig.1 Cycloid profile curve

$$\begin{cases} x_c = [r_p - r_{tp}\varphi^{-1}(K_1, \varphi)] \cos(1 - i^H)\varphi - \\ [a - K_1 \cdot r_{tp}\varphi^{-1}(K_1, \varphi)] \cos(i^H\varphi) \\ y_c = [r_p - r_{tp}\varphi^{-1}(K_1, \varphi)] \sin(1 - i^H)\varphi + \\ [a - K_1 \cdot r_{tp}\varphi^{-1}(K_1, \varphi)] \sin(i^H\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $r_p$  为针齿中心圆半径,mm; $r_{tp}$  为针径套半径,mm; $a$  为偏心距,mm; $K_1$  为标准齿形的短幅系数, $K_1 = az_p/r_p$  (其中  $z_p$  为针轮齿数); $\varphi$  为转臂相对某一针齿中心矢径的转角,即啮合相位角, $(^\circ)$ ;  $i^H$  为摆线轮和针轮的相对传动比, $i^H = z_p/z_c$  (其中  $z_c$  为摆线轮齿数); $\varphi^{-1}(K_1, \varphi) = (1 + K_1^2 - 2K_1 \cos \varphi)^{-1/2}$ 。

理论上标准的摆线轮齿与针齿之间是共轭且无啮合间隙的,而在实际应用中,由于制造误差、装拆需要润滑要求等,摆线轮齿与针轮齿之间必须留有啮合间隙,所以必须对其进行修形。摆线轮的齿廓修形方式有移距修形法、等距修形法、转角修形法3种。其通用的摆线轮齿廓参数方程见公式(2)<sup>[9]</sup>。

$$\begin{cases} x_c = [r_p + \Delta r_p - (r_{tp} + \Delta r_{tp})\varphi^{-1}(K'_1, \varphi)] \\ \cos[(1 - i^H)\varphi - \delta] - \frac{a}{r_p + \Delta r_p} [r_p + \Delta r_p - \\ z_p(r_{tp} + \Delta r_{tp})\varphi^{-1}(K'_1, \varphi)] \cos(i^H\varphi + \delta) \\ y_c = [r_p + \Delta r_p - (r_{tp} + \Delta r_{tp})\varphi^{-1}(K'_1, \varphi)] \\ \sin[(1 - i^H)\varphi - \delta] + \frac{a}{r_p + \Delta r_p} [r_p + \Delta r_p - \\ z_p(r_{tp} + \Delta r_{tp})\varphi^{-1}(K'_1, \varphi)] \sin(i^H\varphi + \delta) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $K'_1$  为有移距修形时齿形的短幅系数,  $K'_1 = a z_p / (r_p + \Delta r_p)$ ;  $\Delta r_p$  为移距修形量, mm;  $\Delta r_p$  为等距修形量, mm;  $\delta$  为转角修形量, ( $^\circ$ )。

由于“等距 + 移距”组合修形方式修磨出的摆线轮在主要工作区可以近似与标准齿廓共轭,而在齿根和齿顶处有一定的啮合间隙,所以“等距 + 移距”组合修形在摆线轮修形中应用最广,实际运用最多的是“正等距 + 负移距”和“负等距 + 正移距”组合修形方式<sup>[10]</sup>。在相同的径向间隙条件下,“正等距 + 负移距”组合修形方式,可以获得更加均衡的轮齿受力<sup>[11]</sup>。因此,本文采用“正等距 + 负移距”的修形方式,以摆线轮齿数 9, 针轮齿数 10, 针齿中心圆半径 19 mm, 偏心距 1 mm, 针径套半径 2 mm, 移距修形量 0.056 8 mm, 等距修形量 0.066 8 mm, 转角修形量 0.000 58 $^\circ$  为设计参数,根据式(2)参数方程,通过 SolidWorks 中方程式驱动的曲线、拉伸、装配等功能即可得到传动比  $i$  为 -9 的摆线针轮传动机构,如图 2 所示。

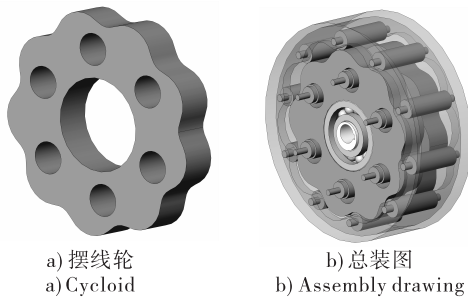


图 2 摆线针轮传动机构

Fig. 2 Cycloidal pin wheel drive mechanism

### 1.2 同轴异速单螺杆三维模型和流道有限元模型

图 3 为同轴异速单螺杆的 SolidWorks 三维模型。

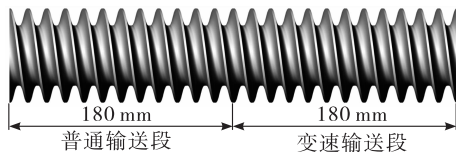


图 3 同轴异速单螺杆三维模型

Fig. 3 Three-dimensional model of coaxial allometric single screw

螺杆结构参数参照科倍隆 ZSK 76 Mv PLUS 实验室用挤出机。由图 3 可知,螺杆由普通输送段和变速输送段两部分组成,各占 180 mm,总长 360 mm,螺距 15 mm,外径 76 mm,根径 48 mm,右旋双头螺杆。

普通输送段逆时针旋转,变速输送段嵌入摆线针轮传动机构,通过齿形花键连接传递动力,实现顺时针旋转。图 4 为同轴异速单螺杆内部结构。



图 4 同轴异速单螺杆内部结构

Fig. 4 Internal structure of coaxial allometric single screw

图 5 为同轴异速单螺杆的流道有限元模型,将模型导入到 ANSYS 仿真软件中,进行流道填充和布尔求差后得到流道模型。导入到 mesh 模块中对流道进行四面体网格划分<sup>[12]</sup>,设定网格尺寸为 1.2 mm,求解完成后得到网格节点数为 755 841 个,元素数为 3 596 190 个。

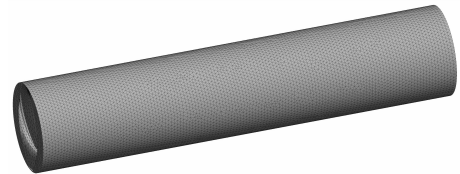


图 5 同轴异速单螺杆的流道有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the flow channel of coaxial allometric single screw

## 2 同轴异速单螺杆数学模型

### 2.1 基础状态假设

在模拟过程中,根据物料的特性和熔体输送的具体条件,作出如下假设<sup>[13]</sup>:①由于熔体流动的雷诺数较小,因此流动为层流运动;②惯性力、质量力相较于流体的黏滞力可忽略不计;③熔体充满整个流道;④机筒内壁与螺杆表面无滑移;⑤熔体为非牛顿等温流体,在流场中各点的温度相同;⑥熔体为不可压缩流体。

基于上述假设,描述流体的连续性方程、运动方程可简化为公式(3)和公式(4)。

$$\nabla v = 0 \quad (3)$$

$$\nabla p = \nabla \tau \quad (4)$$

式中: $v$  为速度矢量, m/s;  $p$  为流体压力, Pa;  $\tau$  为剪切应力张量, Pa。

大豆蛋白属于典型的非牛顿流体,可用幂律方程公式(5)来描述其流变特性<sup>[14]</sup>。

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1}, \tau = m \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

式中: $\eta$  为物料黏度, Pa·s;  $m$  为熔体稠度,  $N \cdot s^n / m^2$ ;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $n$  为幂律指数。其中,物料黏度与剪切速率的关系见公式(6)<sup>[15]</sup>。

$$\eta(\dot{\gamma}) = [(\tau_0 / \dot{\gamma})^n + \mu_\infty^n]^{1/n} \quad (6)$$

式中: $\tau_0$  为屈服应力, Pa;  $\mu_\infty$  为高剪切极限黏

度, Pa·s。

采用 120℃ 的大豆蛋白作为模拟材料,物性参数<sup>[16-17]</sup>:密度 1 220 kg/m<sup>3</sup>;黏度 1 620 Pa·s;幂律指数 0.35。

## 2.2 边界条件

参照科倍隆 ZSK 76 Mv PLUS 实验室用挤出机,将其实际工作条件作为模拟条件进行如下分析:①螺杆普通输送段转速( $n_1$ )为 360 r/min,变速输送段( $n_2$ )为 -40 r/min;②流道进口速度( $v$ )定为 0.06 m/s,出口压力定为 1 MPa;③机筒内壁无滑移,机筒转速为 0。

## 3 同轴异速单螺杆模拟结果及分析

### 3.1 压力场分析

#### 3.1.1 压力云图

压力场可以直观地反映螺杆的压力分布状况和建压能力强弱,而建压能力直接决定了物料的输送能力,通常用出入口压差( $\Delta p$ )来判断<sup>[18]</sup>。传统单螺杆和同轴异速单螺杆的压力云图如图 6 所示。

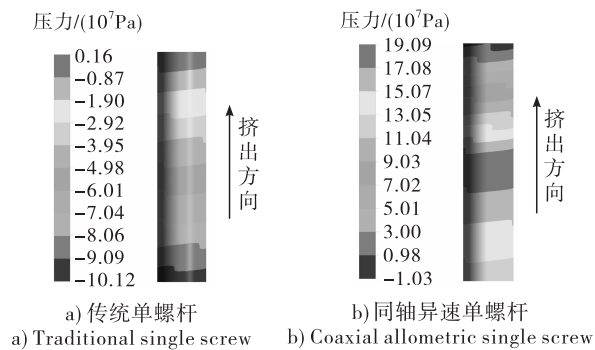


图 6 2 种单螺杆的压力云图

Fig. 6 Pressure clouds of two single screws

由图 6a 可知,传统单螺杆的挤出压力沿挤出方向逐渐增加且均匀分布,压力区域界线光滑平缓并无波动,说明物料在螺杆中的输送状态较为平稳,回流现象极不明显,不能被反复挤压。由图 6b 可知,同轴异速单螺杆中的挤出压力呈现先增后减的趋势,这是因为摆线针轮传动机构的存在使变速输送段螺杆旋转方向与普通输送段相反,起到了反向螺旋元件的作用,在该段产生反压,对物料的输送形成阻挡,提升了螺杆内的物料充满度,延长了物料的停留时间,增强了混合效果。

#### 3.1.2 轴向压力分布

为更加直观地观察 2 种单螺杆沿挤出方向上的压力分布,在 2 种单螺杆流场中沿挤出方向设置一条压力取样线,通过 Origin 软件对取样数据进行处理得到轴向压力分布,如图 7 所示。

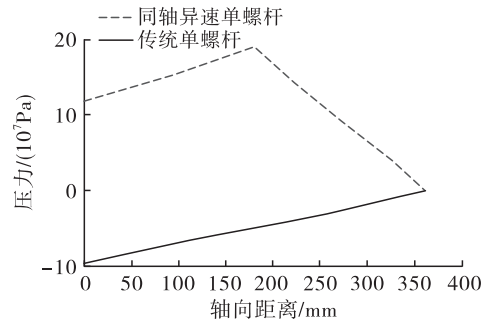


图 7 2 种单螺杆沿挤出方向的轴向压力分布  
Fig. 7 Axial pressure distribution along the extrusion direction of two single screws

由图 7 可知,同轴异速单螺杆压力先增后减,为了使物料能成功通过变速输送段,需要在变速输送段入口处建立起足够的压力,故在普通输送段和变速输送段相接处压力达到峰值。另外,同轴异速单螺杆的流道压力曲线高于传统单螺杆(二者出入口压差分别为 117.8、96.2 MPa),建压能力是传统单螺杆的 1.22 倍。研究表明,回流量与压差存在正相关的关系,压差增大,回流量增大,分布混合能力增强<sup>[19]</sup>。

### 3.2 速度场分析

#### 3.2.1 速度矢量

图 8 为传统单螺杆和同轴异速单螺杆的速度矢量图。

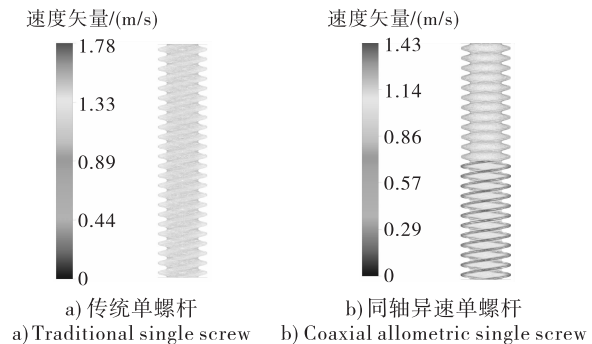


图 8 2 种单螺杆的速度矢量图

Fig. 8 Velocity vectors of two single screws

图中矢量箭头颜色的深浅可以表征物料输送速度的大小,颜色越深、箭头越密则分别表明物料输送速度越大、在流道中的流动性越好<sup>[20]</sup>。由图 8a 可知,物料在传统单螺杆流道中的输送速度均匀,整体无变化且速度较大,说明传统单螺杆的剪切模式几乎固定不变,此状态下物料的混合效果较差。由图 8b 可知,同轴异速单螺杆前后段速度矢量出现明显差异,变速输送段物料输送速度明显减缓,这是由于摆线针轮传动机构使变速输送段螺杆转速变为原来的 1/9,且方向相反,物料停留时间极大延长,提升

了螺杆的混合性能。

### 3.2.2 截面速度矢量

为了更直观地观察同轴异速单螺杆中不同位置的速度矢量分布,以螺杆导程为间距,沿挤出方向,

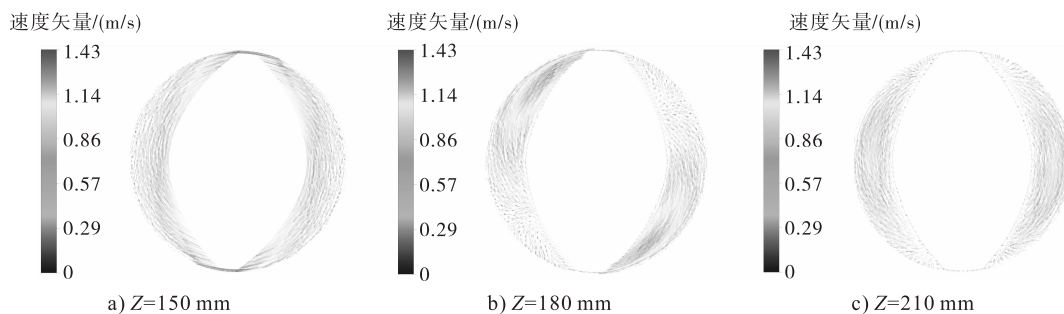


图 9 同轴异速单螺杆中不同位置的速度矢量分布

Fig. 9 Velocity vector distribution at different positions in coaxial allometric single screw

由图 9 可知,同轴异速单螺杆中物料的运动方向在两输送段相接处发生变化,这是由于摆线针轮传动机构使螺杆产生异速反转,速度矢量发生 2 次变化从而产生了较大的速度差,使物料因速度矢量变化而产生的对流打破了物料原有的运动状态,进而改善了螺杆的混合能力。

### 3.2.3 轴向速度

为更加直观地观察 2 种单螺杆的速度分布情况,在 2 种单螺杆流场沿挤出方向设置一条速度取样线,通过 Origin 软件对取样数据进行处理得到 2 种单螺杆的轴向速度分布图,如图 10 所示。

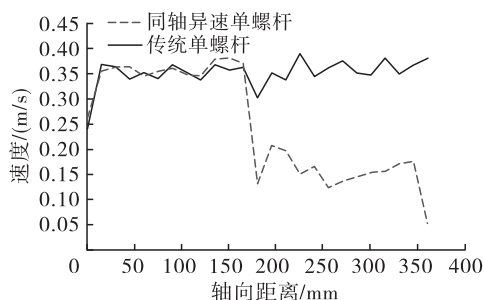


图 10 2 种单螺杆的轴向速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution of two single screws

由图 10 可知:在 0 ~ 172.5 mm 轴向距离区域内,同轴异速单螺杆和传统单螺杆曲线变化差异很小,说明 2 种单螺杆的速度并无太大差距,原因是 2 种单螺杆在该区域的螺杆样式并无差异;在 172.5 ~ 360 mm 轴向距离区域内,由于摆线针轮传动机构使螺杆转速降低,转向相反,对物料的正向输送产生阻挡,故同轴异速单螺杆的输送速度明显减慢,与传统单螺杆的速度差距变大。传统单螺杆平均速度为 0.35 m/s,在 225 mm 处取得最大速度 0.39 m/s,而同轴异速单螺杆普通输送段平均速度为 0.36 m/s,在 150 mm 处取得最大速度 0.38 m/s,变速输送段

分别在速度矢量场中取 Z(Z 轴)在 150 mm(物料进入变速输送段前)、180 mm(物料在两输送段相接处)、210 mm(物料进入变速输送段后) 3 处截面进行对比分析,结果如图 9 所示。

平均速度为 0.16 m/s,在 195 mm 处取得最大速度 0.21 m/s。传统单螺杆平均速度、最大速度与同轴异速单螺杆普通输送段的平均速度、最大速度几乎相同,但却是同轴异速单螺杆变速输送段平均速度的 2.19 倍、最大速度的 1.86 倍。另外,根据速度、位移与时间的关系可知,物料在同轴异速单螺杆变速输送段的停留时间是传统单螺杆的 1.86 ~ 2.19 倍。

### 3.2.4 速度流线

2 种单螺杆的速度流线图如图 11 所示。

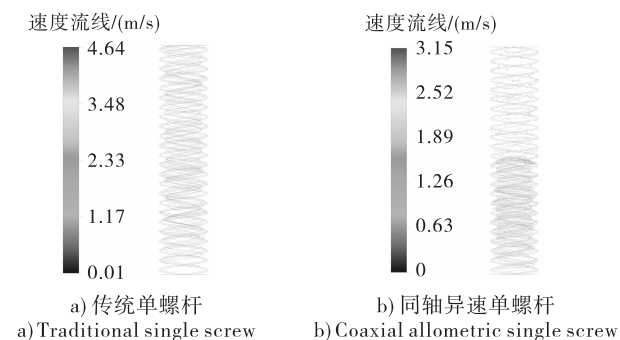


图 11 2 种单螺杆的速度流线图

Fig. 11 Velocity streamline diagrams for two single screws

由图 11a 可知,传统单螺杆的速度流线均匀且连续,近似环状,流线间交织现象不明显,说明物料在螺杆中混合效果一般。由图 11b 可知,同轴异速单螺杆中变速输送段起到了反向螺纹的作用,物料在此处的流线断开产生异向,物料回流导致流线杂乱无序,改变了物料原有的层流运动状态,改善了物料的混合效果。

## 3.3 剪切应变速率分析

### 3.3.1 剪切应变速率

剪切应力与压力场、速度场均是衡量挤出机性能的重要指标。剪切应力定义为剪切速率与黏度的乘积,而剪切速率则可用剪切应变速率与黏度的乘

积来表示,因此可用剪切应变速率来表征剪切应力的变化情况。2种单螺杆的剪切应变速率如图12所示。



图12 2种单螺杆的剪切应变速率

Fig. 12 Shear strain rates of two single screws

由图12a可知,传统单螺杆的剪切应变速率在螺棱顶部较大,在螺槽底部较小,原因是螺棱顶部的速度梯度较大,螺槽底部的速度梯度较小,而流体会沿着此梯度从高剪切应变速率区向低剪切应变速率区流动<sup>[21]</sup>。由图12b可知,同轴异速单螺杆在普通输送段的剪切应变速率变化趋势与传统单螺杆相同,但在变速输送段螺棱顶部与螺槽底部间的剪切应变速率相近,故流体在该区域的流动速度减缓,停留时间延长。

### 3.3.2 剪切应变速率轴向分布

为更加直观地观察2种单螺杆剪切应变速率的变化情况,以1/2螺距为间距设置取样点,沿挤出方向分别对2种单螺杆取样,通过Origin软件对取样数据进行处理得到2种单螺杆的剪切应变速率分布,如图13所示。

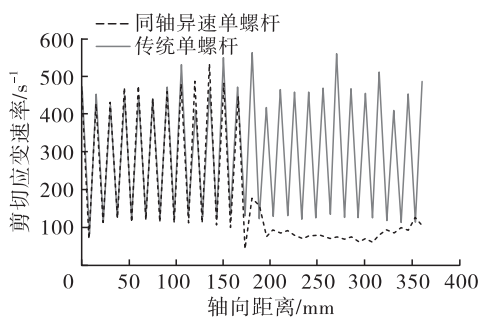


图13 2种单螺杆的剪切应变速率分布

Fig. 13 Shear strain rate distribution of two single screws

由图13可知:2种单螺杆由于在0~172.5mm轴向区域距离内的螺杆样式与转速一致,剪切应变速率并无太大差距,二者曲线几乎重合;在172.5~360mm轴向区域距离内,同轴异速单螺杆由于螺杆转速的降低,其剪切应变速率大幅减小且变化平缓,螺棱顶部与螺槽底部间剪切应变速率变化较小;传统单螺杆平均剪切应变速率是同轴异速单螺杆变速输送段的3.19倍。结合大豆蛋白的流变特性以及

黏度与剪切应力的关系可知,大豆蛋白黏度随着剪切应力的增大而减小,呈现显著的剪切稀化现象,在高剪切应力下流动性增强,不利于物料的混合,但同轴异速单螺杆由于变速输送段的存在,使在高剪切速率区黏度减小的物料得以在此段流动速度减缓,延长了物料停留时间,改善了混合效果。

### 3.4 回流系数

挤出过程中物料的回流量与净流量之比,反映了稳态流场的分布混合情况,称为分布混合系数,即回流系数( $G$ )<sup>[19]</sup>。回流量越大,物料在挤出过程中的停留时间越长,停留时间分布也越宽,回流系数则越大,流场的返混能力越大,分布混合效果就越好。通过公式(7)结合图10数据可计算得出,同轴异速单螺杆回流系数约为0.46,而传统单螺杆在相同参数下回流系数趋近于零,远低于同轴异速单螺杆的,故同轴异速单螺杆分布混合能力更强。

$$\begin{cases} Q_z = \iint_S v_z dS \\ Q_{\text{back}} = \iint_S v_{\text{back}} dS \\ G = Q_{\text{back}}/Q_z \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_z$ 为体积流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $v_z$ 为轴向速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $S$ 为横截面面积, $\text{m}^2$ ;  $v_{\text{back}}$ 为负的轴向速度, $\text{m}/\text{s}$ ;  $Q_{\text{back}}$ 为回流量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 4 结论

(1)同轴异速单螺杆挤出机出入口压差更大,是传统单螺杆挤出机的1.22倍,建压能力更强,变速输送段的反向旋转对物料的输送形成阻挡,提升了普通输送段螺杆内的物料充满度,转速的降低延长了物料的停留时间,是传统单螺杆挤出机的1.86~2.19倍,极大地改善了物料的混合效果。

(2)同轴异速单螺杆挤出机的剪切应变速率在变速输送段减小,减缓了物料的流动,延长了物料的停留时间,有利于大豆蛋白等剪切稀化非牛顿流体的混合。

(3)同轴异速单螺杆挤出机在变速输送段的作用下,产生反压,回流量增大,回流系数(0.46)远大于传统单螺杆挤出机的,流场的返混能力更强,分布混合效果更好。

### 参考文献:

- [1] 阎欣, 郭兴凤. 挤压膨化处理对大豆蛋白功能特性影响[J]. 粮食加工, 2017, 42(6): 33-37.
- [2] 金讯. 大豆蛋白行业发展前景广阔[J]. 中国油脂, 2006, 31(10): 81.

(下转第109页)

- 114988 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114988>.
- [12] HE S, ZHANG B, DONG X, et al. Differentiation of goat meat freshness using gas chromatography with ion mobility spectrometry [J/OL]. *Molecules*, 2023, 28 (9): 3874 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.3390/molecules28093874>.
- [13] SONG Z, CAO Y, QIAO H, et al. Analysis of the effect of *Tenebrio molitor* rennet on the flavor formation of Cheddar cheese during ripening based on gas chromatography - ion mobility spectrometry (GC - IMS) [J/OL]. *Food Res Int*, 2023, 171: 113074 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113074>.
- [14] WANG X, LI X, SU M, et al. The construction of volatile profiles of eight popular peach cultivars produced in Shanghai using GC - MS and GC - IMS [J/OL]. *Horticulturae*, 2023, 9 (3): 382 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030382>.
- [15] 孟新涛, 潘俨, 邹淑萍, 等. 不同储藏条件下鲜牛肉特征风味动态变化分析 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42 (15): 289 - 298.
- [16] CHEN T, CHEN X, LU D, et al. Detection of adulteration in canola oil by using GC - IMS and chemometric analysis [J/OL]. *Int J Anal Chem*, 2018, 2018: 3160265 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.1155/2018/3160265>.
- [17] SUN X, WANG Y, LI H, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and oxidative stability of flaxseed oil during heating at different temperatures [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 151: 112137 [2023 - 09 - 08]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112137>.
- [18] LEE S, CHO H, LEE K G. Volatile compounds as markers of tofu (soybean curd) freshness during storage [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(3): 772 - 779.
- [19] 唐春红, 陈旭华, 张春晖, 等. 不同卤制方法对鸡腿肉中挥发性风味化合物的影响 [J]. *食品科学*, 2014, 35 (14): 123 - 129.
- [20] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review [J]. *Food Chem*, 2007, 100 (1): 273 - 286.
- [21] CROWE T D, CROWE T W, JOHNSON L A, et al. Impact of extraction method on yield of lipid oxidation products from oxidized and unoxidized walnuts [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2002, 79(5): 453 - 456.
- [22] EL MONFALOUTI H, CHARROUF Z, GIORDANO M, et al. Volatile compound formation during argan kernel roasting [J]. *Nat Prod Commun*, 2013, 8(1): 33 - 36.
- 
- (上接第 94 页)
- [3] 王瑞元. 创新抢占大豆蛋白开发利用的至高点 [J]. *中国油脂*, 2021, 46(3): 1 - 2.
- [4] 朱玉珩, 黄瑶, 邹鲲, 等. 单螺杆挤出的进料均匀性分析及其结构优化设计 [J]. *塑料工业*, 2022, 50(2): 80 - 86.
- [5] 刘忠萍, 华聘聘, 华欲飞. 大豆蛋白的挤压组织化研究 [J]. *中国油脂*, 2003, 28(5): 64 - 66.
- [6] 汤霖森, 郭树国, 王丽艳. 基于 ANSYS 的带行星轮同轴变速单螺杆挤出机三维流场分析 [J]. *食品与机械*, 2021, 37(5): 107 - 110.
- [7] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [8] 陈晋南, 胡冬冬, 彭炯. 计算流体力学 (CFD) 及其软件包在双螺杆挤出中的应用 [J]. *中国塑料*, 2001(12): 14 - 18.
- [9] 朱孝录. 齿轮传动设计手册 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [10] 张昕, 于广滨, 亓士远, 等. RV 减速器摆线针轮齿形参数对啮合刚度的影响 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2021, 26(3): 38 - 44.
- [11] 赵大兴, 明廷伯, 余金舫, 等. 摆线针轮传动中摆线轮齿廓修形技术研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017(6): 45 - 49.
- [12] 张洪才. ANSYS14.0 理论解析与工程应用实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [13] 陈峰峰, 李浩杰, 王一飞, 等. 基于 Polyflow 的反螺旋元件对粒子分散性仿真研究 [J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(9): 82 - 86.
- [14] 金日光, 马秀清. 高聚物流变学 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
- [15] 金政. 聚合物成型加工原理 [M]. 哈尔滨: 黑龙江大学出版社, 2013.
- [16] 王洪武, 林炳鉴. 大豆蛋白质单螺杆挤压熔体输送段的数值模拟 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(9): 75 - 78.
- [17] 王洪武. 大豆蛋白质挤压加工的实验与数值模拟研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2002.
- [18] 陶璿, 闫宝瑞, 信春玲, 等. 三螺杆挤出机的建压能力与功耗特性 [J]. *塑料*, 2016, 45(3): 45 - 49.
- [19] 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.
- [20] 徐文海, 陈安柱, 苏宏林. 开槽三头啮合块双螺杆挤出机数值模拟 [J]. *饲料工业*, 2017, 38(15): 9 - 12.
- [21] 张雪晨, 张丽梅, 黄志刚, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆构型对其流场的影响 [J]. *食品与机械*, 2022, 38(4): 99 - 103, 206.