

同向双螺杆挤出机挤出物料的混合特性研究

夏伟杰¹, 马 亮², 张 俊¹, 申春赞¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 布勒常州机械有限公司, 江苏 常州 213332)

摘要: 为了提升同向双螺杆挤出机的物料混合均匀性和挤出效率, 研究了不同螺杆结构对物料挤出过程的影响机制。首先, 建立了普通螺纹有/无啮合块和凹槽螺纹有/无啮合块 4 种螺杆结构模型; 然后, 在网格独立性和计算方法有效性试验验证的基础上, 建立了三维内流场数值计算模型; 最后, 基于 Ployflow 软件进行数值模拟并分析了流场压力、速度分布, 并通过示踪粒子轨迹跟踪法分析了物料停留时间及最大剪切应力等变化规律。结果表明: 普通螺杆对物料的混合性能低, 挤出效率高; 啮合块对于提高最大剪切应力有正向作用, 可增加混合性能, 但自洁能力降低; 螺杆上的凹槽结构可减小轴向速度、增大压力差、提高物料混合性能, 但降低了物料受到的最大剪切应力。综上, 物料通过具有凹槽和啮合块的螺杆结构能得到更好的混合效果。

关键词: 挤出机; 螺杆; 混合特性; 内流场; 黏性流体

中图分类号: TS201.1; TS223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2025)07-0138-07

Mixing characteristics of materials extruded by coaxial twin screw extruder

XIA Weijie¹, MA Liang², ZHANG Jun¹, SHEN Chunyun¹

(1. College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Bühler Changzhou Machinery Co., Ltd., Changzhou 213332, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the material mixing uniformity and extrusion efficiency of coaxial twin screw extruder, the influence mechanisms of different screw structures on the material extrusion process were investigated. Firstly, the four screw structure models of common thread with/without meshing block and grooved thread with/without meshing block were established; then, a three-dimensional internal flow field numerical calculation model was established on the basis of the experimental verification of the grid independence and the validity of the calculation method; finally, the flow field pressure, velocity distribution were simulated and analyzed based on the numerical simulation of the Ployflow software, and the changing rules of material retention time and maximum shear stress were analyzed by tracer particle trajectory tracking method. The results showed that the common screw had low mixing performance of material and high extrusion efficiency. The meshing block had a positive effect on increasing the maximum shear stress, which could enhance the mixing performance, but reduced the self-cleaning ability. The groove structure on the screw could reduce the axial velocity, increase the pressure difference and improve the mixing performance of material, but it reduced the maximum shear stress. In conclusion, the material can be mixed better through the screw structure with groove and meshing block.

Key words: extruder; screw; mixing characteristics; internal flow field; viscous fluid

挤压膨化技术是油脂加工中一项重要的加工技

术^[1], 而螺杆挤出是挤压膨化技术中使用时间最长、应用范围最广的一种方式。物料的混合效果、成型质量与螺杆结构有密切关系, 合适的螺杆结构能提高挤出效率和挤出物质量。对不同螺杆结构在挤出过程中的流动与混合特性进行研究, 能更好地促进挤压膨化技术发展。

收稿日期: 2024-03-28; 修回日期: 2025-01-17

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2400502)

作者简介: 夏伟杰(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为流体动力学与结构优化(E-mail) 1294394122@qq.com。

在油脂加工过程中,双螺杆挤出机可用于油料的预处理,如大豆等物料在螺杆和机筒组成的流道中,经过加压、剪切、混合作用,从口模中挤出并发生膨化^[2]。近年来,随着油脂加工技术的不断进步,双螺杆挤出机因其高效、多功能的特点在油脂生产加工中的应用逐渐增多。为实现高效、稳定和经济的加工过程,螺杆几何结构以及操作参数成为双螺杆挤出机主要的研究方向。陈玉芳^[3]采用试验与理论分析相结合的方法探讨了螺杆挤出机操作参数对大豆粕残油率的影响规律,发现原料中水分含量对挤压膨化料的浸出效果有显著影响,一定范围内大豆粕的残油率随着螺杆转速的增加而降低。Matsushita 等^[4]研究了不同填充水平对双螺杆挤出效果的影响,结果表明,高填充水平会增加物料强度,导致挤出物硬度增加,且压缩力与充填水平密切相关。胡志刚等^[5]采用双螺杆两阶九节榨螺的复合式设计,有效提高了压缩比,改善了油料压榨特性,与传统双螺杆挤出机相比节能 40% 以上。左晓甜等^[6]设计了一种装配内嵌式摆线齿轮减速器和反向螺纹的新型螺杆,这两种元件都可延长大豆粕在流道内的停留时间,增加物料的挤压剪切次数,从而增强挤出机的混合分布能力和挤压剪切效果。田东等^[7]开发了一款创新的双螺杆挤出机,该机型集成了行星齿轮系统并配备了啮合块,挤出效率相较于传统双螺杆挤出机提升了 20% ~ 25%。崔维真等^[8]通过在双螺杆挤出过程中使用指示剂来测定物料停留时间分布,并研究其影响因素,结果表明,由于淀粉、蛋白质等关键营养成分的结构较为复杂,目前关于停留时间分布的研究尚未全面,提示需要对此进行更详细和深入的研究。Tang 等^[9]探讨了同向旋转的双螺杆挤压机中反应混合流的特性,发现操作参数在决定反应混合流的停留时间分布、混合效率以及偏析程度方面扮演着关键角色。唐庆菊等^[10]以螺杆转速、机筒温度和送料速度为自变量,以产品比容和产品比能为指标,采用 3K 因子试验设计方法对食品用双螺杆挤出机操作参数进行了优化。王少峰等^[11]研究了在等温和非等温条件下,啮合异向双螺杆挤出机内部流道的分布特性,结果表明,在等温条件下,随着双螺杆转速的提升,挤出机出口方向的压力、黏度和剪切速率展现出不同的变化趋势,而在非等温条件下,从挤出机的入口到出口,温度呈线性上升的趋势,同时,温度会沿着中心向外径方向逐渐升高。Bauer 等^[12]对 5 种不同几何形状的螺杆元件进行了模拟研究,探讨了螺杆转速、

产量和螺杆长度对螺杆元件的局部热电阻以及局部停留时间分布的影响,深入揭示了潜在的流动机制。

综上,国内外学者通过改进双螺杆挤出机结构提升加工效率,同时对物料的混合效果开展了大量研究工作。通过数值仿真,可以获得物料在流道内的速度场、压力场和温度场,并分析影响挤出过程的因素。但是针对物料在不同结构螺杆挤出过程中混合特性的研究较少,关于螺杆结构对物料在挤出过程的影响不够深入。因此,本文通过 Ployflow 软件进行数值仿真,分析了不同螺杆结构的双螺杆挤出机内流场压力、速度分布,并采用示踪粒子轨迹跟踪法分析了物料停留时间及最大剪切应力变化规律,以期提高双螺杆挤出机的挤出效率与物料混合效果。

1 数值计算模型

1.1 结构模型

以某公司双螺杆挤出试验机的实际结构作为设计依据,建立凹槽螺纹有/无啮合块和普通螺纹有/无啮合块 4 种螺杆结构模型,如图 1 所示。

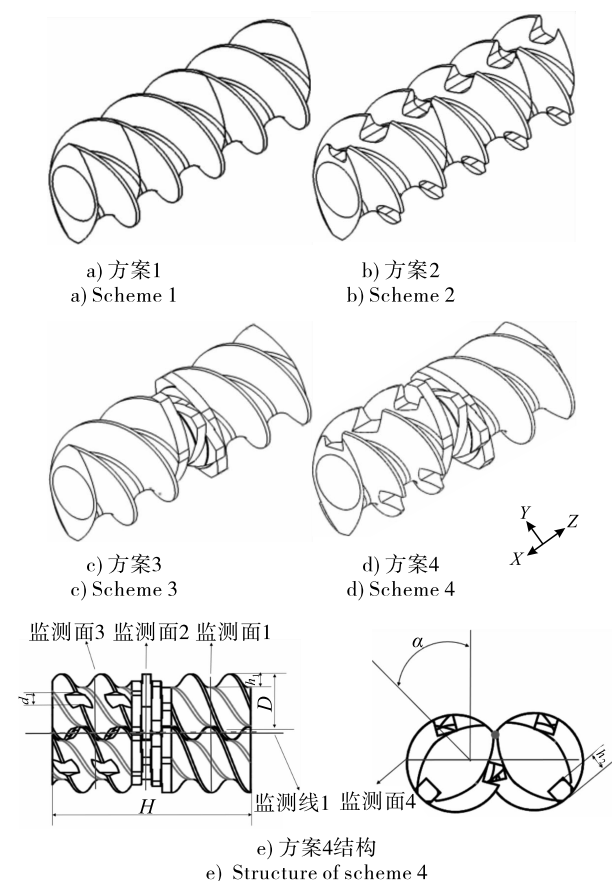


图 1 4 种方案结构示意图

Fig. 1 Structures diagram of four schemes

4 种方案的螺杆长度(H)均为 400 mm,其中:方案 1 为普通螺纹无啮合块,螺杆外径(D)为 78 mm,螺槽深度(h_1)为 32.5 mm;方案 2 为凹槽螺纹无啮

合块,螺杆外径(D)为 78 mm,螺槽深度(h_1)为 32.5 mm,凹槽为 3 条,槽宽(d_1)均为 32 mm,凹槽螺槽深度(h_2)均为 25 mm;方案 3 为普通螺纹有啮合块,螺杆外径(D)为 78 mm,螺槽深度(h_1)为 32.5 mm,啮合块数为 3 块,啮合块错位角(α)为 45° ;方案 4 为凹槽螺纹有啮合块。

监测面 1 距流域入口 80 mm;监测面 2 距流域入口 210 mm;监测面 3 距流域入口 320 mm;监测面 4 位于水平平面;监测线 1 位于双螺杆啮合区上端。

1.2 数学模型

在双螺杆物料挤出过程中,物料属于非牛顿型

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \end{cases} \quad (2)$$

式中: u 为速度, m/s; p 为压力, N; t 为时间, s; τ 为剪切应力, N/m²; g 为重力加速度, m/s²; x, y, z 为在不同方向上的分量。

在双螺杆挤出过程中,非牛顿型流体通常表现出剪切速率依赖的黏度变化,这直接影响到挤出过程的效率以及能耗。Bird - Carreau 模型是一种用于描述非牛顿型流体行为的黏弹性模型,特别是在复杂流体中的应用比较广泛。这个模型用于表示剪切应力与剪切速率之间的关系,考虑了非线性的剪切稀化和剪切增稠效应,如式(3)所示。

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

式中: η 为物料的表现黏度, Pa · s; η_∞ 为无穷大剪切力下的表现黏度, Pa · s; η_0 为零剪切力下的表现黏度, Pa · s; λ 为松弛时间, s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹; n 为流动行为指数。

1.3 物理参数及边界条件

双螺杆挤出机的模型包括螺杆部分和流体区域,为了对比 4 种螺杆在油料挤出过程中流动特性和混合特性的差异,4 种螺杆采用相同的流域模型。双螺杆挤出机的两个螺杆转向为同向,转速 60 r/min;物料密度 1 250 g/m³,黏度 1 620 Pa · s。

流域边界条件设置如图 2 所示,其中流域长度(H_1)为 410 mm,外径(D_1)为 160 mm,内径(D_2)为 90 mm,中心距(D_3)为 125 mm。从流域径向距离 5 ~ 400 mm 取 9 个等距的监测面。入口、出口的法向应力(F_n)和切向应力(F_s)均为 0,出入口流体均

流体,为简化问题,根据国内外相关研究作如下假设^[13-14]:①流体本身不可压缩;②流体认定为层流;③分析段流场均为等温、稳态流场;④忽略重力、惯性力;⑤机筒内壁与螺杆间无滑移。根据以上假设,物料在腔内的流动过程满足质量守恒定律,见式(1)。

$$\int_V \rho dV = \int_{V_0} \rho_0 dV_0 \quad (1)$$

式中: ρ 为密度, kg/m³; V 为体积, m³。

物料在腔内的流动过程满足动量守恒定律^[15],见式(2)。

自由流动;外壁面的法向速度(u_x)为 0,切向速度为 u_y ,边界无滑移;内壁面的法向速度为 0,切向应力为 0,流体不可贯穿该边界,属滑移边界;插值选用 Picard 迭代算法。

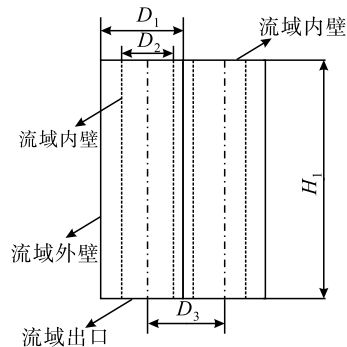


图2 流域结构示意图

Fig.2 Structure diagram of watershed

1.4 计算方法验证

本文基于 Ployflow 软件进行数值模拟并分析流场压力、速度分布,通过示踪粒子轨迹跟踪法分析物料停留时间及最大剪切应力的变化规律。为了提高螺杆部分的计算精度,对螺杆以及流域进出口部分进行加密处理。计算网格的质量通常从单元的偏度和纵横比来衡量,这两个参数必须尽可能低^[16]。本研究使用的网格中平均偏度为 0.085,95% 的网格偏度小于 0.1,平均纵横比为 4,95% 的网格纵横比小于 5,平均单元质量为 0.064。为了捕捉边界层区域,划分边界层网格,划分网格数分别为 1.1×10^6 、 1.5×10^6 、 2.3×10^6 、 2.7×10^6 、 2.9×10^6 、 3.7×10^6 、

4.5×10^6 , 采用方案 1 进行无关性验证, 选取监测面 1 的轴向平均速度作为判断依据, 网格无关性验证结果如图 3 所示。

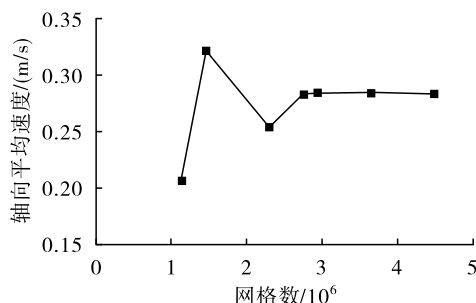


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

由图 3 可知, 当网格数大于 2.7×10^6 时, 监测面 1 的轴向平均速度变化趋于稳定, 不再受网格数的影响。因此, 本文选定网格数为 2.7×10^6 。

为验证数值计算模型的有效性, 结合韩进^[15]挤出机实验数据进行对比分析。采样频率区间为 12 ~ 84 kHz, 测量并记录普通螺杆构型在 160、170、180 r/min 3 种螺杆转速下双螺杆挤出机计算流域的进出口压力值, 计算得到挤压质量。结果表明: 普通螺纹无啮合块双螺杆挤出机在转速 160、170、180 r/min 的条件下, 挤出质量分别为 28.52、29.98、30.94 g/s; 在相同的操作参数下, 挤出质量的仿真结果分别为 32.81、33.24、34.01 g/s。试验测量结果与数值模拟结果吻合较好, 相对误差约为 12%, 证明了数值计算方法有效可行。

2 结果与分析

2.1 压力场分析

图 4 及图 5 分别为 4 种双螺杆挤出机内部流场在监测面上的平均压力变化曲线和在监测线 1 上的压力变化曲线。

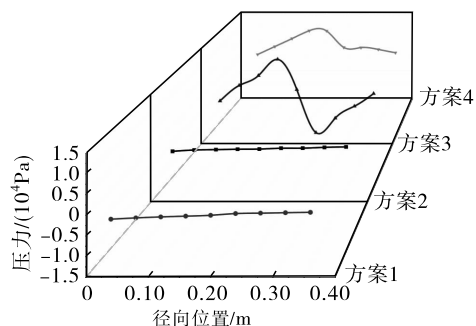


图 4 监测面上的平均压力变化曲线

Fig. 4 Average pressure change curve on the monitoring surface

由图 4 可知, 双螺杆挤出机的内部流场压力变化受螺杆类型影响很大。在径向位置 0.05 ~ 0.16

m 上方案 3 和方案 4 压力增长梯度均大于方案 1 和方案 2, 说明方案 3 和方案 4 的增压能力优于方案 1 和方案 2, 前端更高的压力增长梯度有利于物料的传输与混合。方案 3 和方案 4 在径向位置 0.16 m 处压力达到峰值, 其中方案 3 压力峰值最高, 方案 4 压力峰值仅次于方案 3。在径向位置 0.16 ~ 0.36 m 上, 方案 1 和方案 2 保持压力连续性增长, 而方案 3 和方案 4 受啮合块结构的影响压力波动较大, 在啮合块处的压力波动说明物料在啮合块处得到了充分混合。从图 5 可以看出, 方案 1 和方案 2 在监测线 1 上的压力变化较为均匀, 而方案 3 和方案 4 在监测线 1 (螺杆啮合处) 上的压力波动较大, 在啮合块处较为明显。螺杆啮合处的压力波动有利于物料混合, 但是会加剧螺杆的磨损, 进而对螺杆挤出的稳定性产生影响。

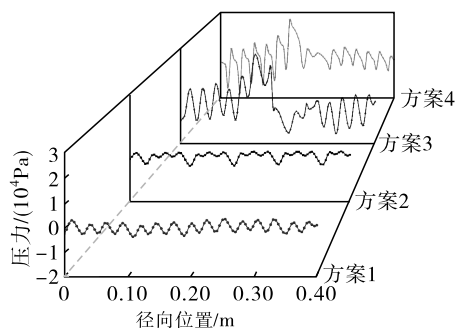


图 5 监测线 1 上的压力变化曲线

Fig. 5 Pressure change curve on monitoring line 1

图 6 为不同监测面上的压力分布云图。

由图 6 可以看出, 压力峰值出现在螺杆螺峰处, 且螺峰的转动方向一侧的压力大于另一侧, 压力分布不均匀, 部分位置压力较高, 大部分位置压力较低, 存在一定的压力差。压力差是流体流动的动力, 压力差越大, 越有利于流体被挤出。螺杆挤出过程是物料增压减速的过程, 由于啮合块的存在, 在监测面 1 上, 方案 3 和方案 4 的平均压力较大, 大于方案 1 和方案 2; 在靠近出口的监测面 3 上具有啮合块结构的螺杆 (方案 3 和方案 4) 流场内部出现大面积的负压, 说明存在回流现象, 带有啮合块的螺杆有更好的建压能力; 方案 2 和方案 4 凹槽部分与周围压力变化明显, 说明具有凹槽的螺杆更容易形成较大的压力差, 更利于物料混合。

2.2 速度场分析

螺杆挤出机内部流场的速度分布云图如图 7 所示。监测面 2 位于中间段, 速度变化不明显, 因此不作考察。

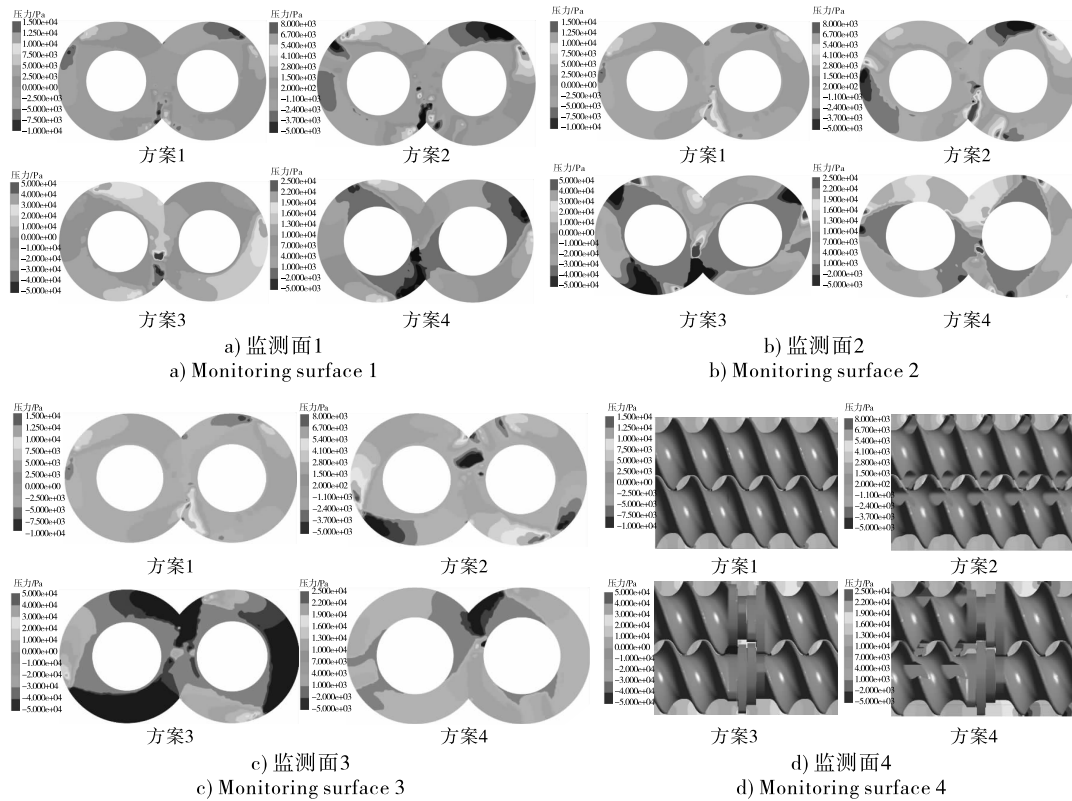


图6 各监测面上压力分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of pressure distribution on each monitoring surface

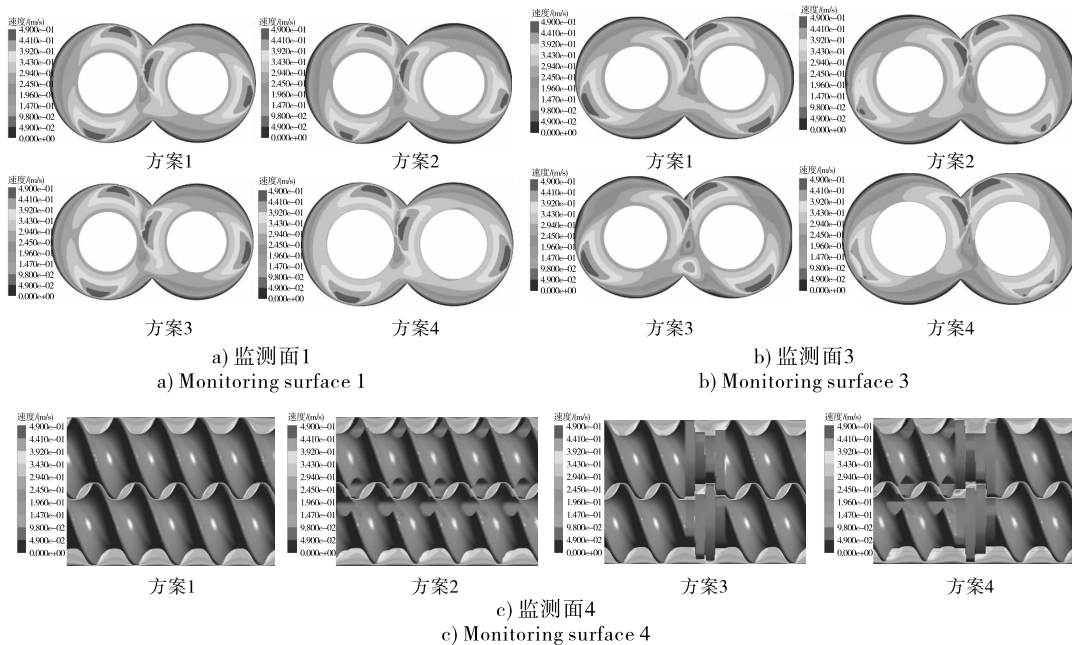


图7 各监测面上速度分布云图

Fig. 7 Cloud diagram of velocity distribution on each monitoring surface

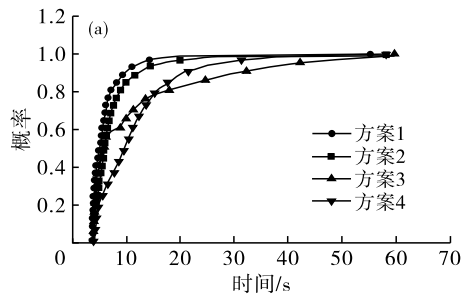
由图7可知,4种螺杆结构的双螺杆挤出机内部流场的速度峰值出现在螺杆的螺峰处,高速区域分布从螺峰开始向两侧延伸,在两螺杆啮合区域出现速度激增。在监测面1上,方案3和方案4的较高流速区域大于方案1和方案2,各方案平均速度大小为方案4>方案3>方案1>方案2。物料速度

越大,说明物料在该区域的流动性较好,但是不利于物料混合。在监测面3上,因为存在凹槽螺杆的设计,方案2和方案4的轴向速度相对较低,出口段的低轴向速度有助于物料充分混合。速度上的差异为物料间的混合提供了有利条件,在监测面4上,具有啮合块结构的螺杆在径向速度上表现出较大的差

异,可以促进不同物料之间的相互作用,从而改善整体的混合效果。

2.3 累积停留时间分析

累积停留时间是指物料从入口到流域内经过复杂运动后离开流域到出口所用的时间。停留时间分布曲线越宽,表明物料在挤出机内停留的时间越长,



物料之间接触的概率增加,有利于物料间的混合,但挤出机的自洁能力相对弱一些。通过示踪粒子轨迹跟踪法,在流道入口设置 3 000 个示踪粒子,并借助 Polystat 模块对示踪粒子在流道中的运动轨迹进行计算与分析。4 种螺杆结构下的累积停留时间概率与概率密度见图 8。

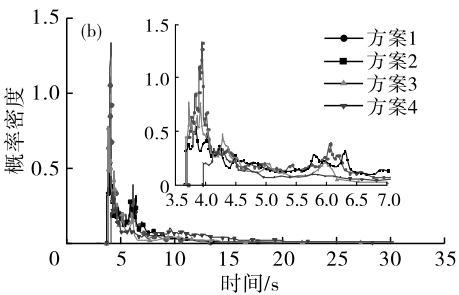


图 8 4 种螺杆结构下累积停留时间概率与概率密度

Fig. 8 Cumulative residence time probability and probability density under four screw structures

由图 8 可知,方案 4 中的第一个粒子穿越流道所需的时间最长,说明方案 4 在混合性能上优于方案 1、方案 2 以及方案 3。

在挤出过程中,由于流体的高黏度特性,流域内的颗粒可能会滞留,会使颗粒完全离开流场的时间变长。为了有效比较不同方案下的混合效果,采用两个关键时间指标:第一个粒子离开流场的时间定义为 t_0 ,流域内 75% 的粒子离开流场所需的时间定义为 t_{75} ,以此反映流体的混合性能^[17]。定义 $\Delta t = t_{75} - t_0$, Δt 值越大,说明物料在挤出机内的混合效果越佳。表 1 为 4 种螺杆结构下流域内的粒子停留时间。

由表 1 可以看出,方案 4 的 Δt 最大,为 10.20 s,相比于停留时间最短的方案 1 高出 7.39 s,说明方案 4 粒子平均停留时间较长。4 种双螺杆挤出机混合效果从大到小为方案 4 > 方案 3 > 方案 2 > 方案 1。结果表明:啮合块与凹槽结构能有效提高螺杆挤

出机内部物料停留时间,其中啮合块与凹槽的组合效果最好。

表 1 4 种螺杆结构下流域内的粒子停留时间

Table 1 Particle residence time in the watershed under

螺杆结构	four screw structures			s
	t_0	t_{75}	Δt	
方案 1	3.70	6.51	2.81	
方案 2	3.66	7.96	4.30	
方案 3	3.67	12.96	9.29	
方案 4	3.95	14.15	10.20	

2.4 最大剪切应力分析

示踪粒子经历最大剪切应力表示了示踪粒子在双螺杆挤出机内经历的剪切过程。最大剪切应力与螺杆的分散效果有关,经过高剪切的示踪粒子越多,表明该螺杆的分散效果越好。4 种螺杆结构下最大剪切应力概率及最大剪切应力概率密度如图 9 所示。

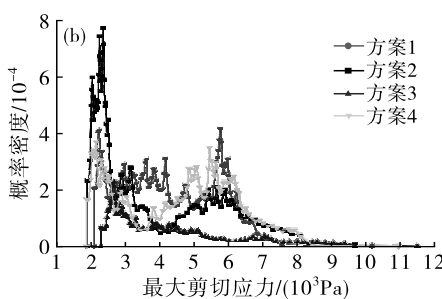
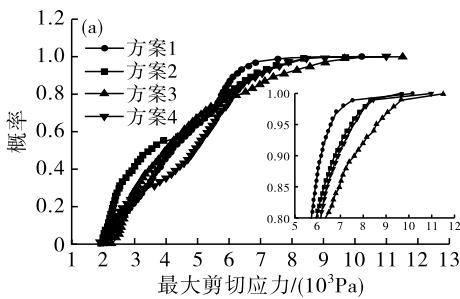


图 9 4 种螺杆结构下最大剪切应力概率与概率密度

Fig. 9 Maximum shear stress probability and probability density under four screw structures

从图 9a 可以看出,方案 1 最大剪切应力最高值为 10 182 Pa,方案 2 的最高值为 9 678 Pa,方案 3 的最高值为 11 504 Pa,方案 4 的最高值为 10 954 Pa,

最大剪切应力越大,其出现的概率越大,剪切效果较好。由图 9b 可以看出,4 种方案的最大剪切应力主要分布在 2 000 ~ 7 000 Pa。物料在螺杆挤出过程中

受到的最大剪切应力从大到小排序是方案3 > 方案4 > 方案1 > 方案2。结果表明:啮合块元件对于提高最大剪切应力有正向作用,而凹槽螺杆元件会降低物料受到的最大剪切应力。

3 结 论

本文建立了双螺杆挤出机的凹槽螺纹有/无啮合块和普通螺纹有/无啮合块的4种螺杆结构模型,在网格独立性和计算方法有效性试验验证的基础上,研究了挤出机的三维内流场特性,主要分析了流场压力、速度分布,并通过示踪粒子轨迹跟踪法分析了物料停留时间及最大剪切应力等变化规律,主要得到以下结论。

(1)双螺杆挤出机的内部流场变化受螺杆类型变化影响很大。普通螺杆以及带凹槽螺杆在两螺杆啮合线上的压力变化较为均匀,具有啮合块以及啮合块与凹槽组合的螺杆在螺杆啮合处的压力波动较大,在啮合块处较为明显。螺杆啮合处的压力波动有利于物料混合,但是会加剧螺杆的磨损,对螺杆挤出的稳定性产生影响。

(2)在同样的工作条件下,具有凹槽结构的螺杆相比普通螺杆有较低的轴向速度,容易形成较大的压力差,但其通过性较低,不利于物料的流出,且自洁能力较差;有啮合块结构的螺杆相比于普通螺杆显示出更优秀的建压能力和混合性能,啮合块的存在有效地增强了物料在螺杆间的相互作用,不仅促进了物料的均匀混合,也提高了螺杆挤出机的挤出效率,其优势在于能够增强混合效果,适用于要求高混合质量和效率的应用场景;普通螺杆适用于对压力要求低,混合要求低,但是对物料的挤出质量或螺杆自洁能力有要求的工作环境。

(3)具有凹槽结构和啮合块结构的双螺杆挤出机中的物料停留时间高于普通螺杆的挤出机,啮合块对物料停留时间的影响大于凹槽结构,物料在其中的停留时间更长,混合效率更好,凹槽结构和啮合块结构的双螺杆挤出机有更高混合效率;啮合块元件对于提高最大剪切应力有正向作用,而凹槽螺杆元件会降低物料受到的最大剪切应力。同时,具有凹槽结构和啮合块结构的双螺杆挤出机能在提高物料混合效率以及保证物料受到合适剪切效果中起到重要作用。

参考文献:

- [1] 潘小莉,张兆国. 大豆双螺杆挤压膨化系统参数优化试验[J]. 中国油脂,2011, 36(10): 81-84.
- [2] 梁畅. 同向双螺杆挤出机熔融段熔融传热过程研究

- [D]. 北京:北京化工大学,2012.
- [3] 陈玉芳. 挤压膨化加工对大豆浸出性能的影响[J]. 中国油脂,2004, 29(10): 16-19.
- [4] MATSUSHITA M, OHSAKI S, NARA S, et al. Effect of fill level in continuous twin-screw granulator: A combined experimental and simulation study [J/OL]. Adv Powder Technol, 2022, 33(11): 103822 [2024-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103822>.
- [5] 胡志刚,刘金波,张永林,等. SYZX340型冷热两用双螺杆榨油机研制[J]. 中国油脂,2017, 42(1): 149-52.
- [6] 左晓甜,郭树国,金子云. 带有反向螺纹的同轴变速单螺杆三维流场分析[J]. 中国油脂,2017, 42(1): 149-152.
- [7] 田东,郭树国,王丽艳. 基于ANSYS/CFX渐加速双螺杆设计及三维流场分析[J]. 食品与机械,2023, 39(6): 99-104.
- [8] 崔维真,陶海腾,崔波. 双螺杆挤压过程中停留时间分布的测定及影响因素研究[J]. 食品与机械,2020, 36(4): 8-14.
- [9] TANG H, ZONG Y, ZHAO L. Numerical simulation of micromixing effect on the reactive flow in a co-rotating twin screw extruder [J]. Chin J Chem Eng, 2016, 24(9): 1135-1146.
- [10] 唐庆菊,盛小龙,孙超,等. 食品双螺杆挤出机操作参数的优化研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2008(3): 358-362.
- [11] 王少峰,张媛,刘美莲,等. 不同温度状态下啮合异向双螺杆挤出机的流道分布规律[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 71-74.
- [12] BAUER H, MATIC J, EVANS R C, et al. Determining local residence time distributions in twin-screw extruder elements via smoothed particle hydrodynamics [J]. Chem Eng Sci, 2022, 247: 995-1005.
- [13] 韩海川. 螺杆挤出机螺杆结构对挤出流场影响的数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2021.
- [14] 金子云,郭树国. 新型混炼单螺杆植物蛋白挤出机的仿真分析与参数优化[J]. 中国油脂, 2024, 49(11): 146-152.
- [15] 韩进. 组合式双螺杆挤压膨化机设计及有限元分析[D]. 沈阳:沈阳化工大学,2019.
- [16] ZHANG J, GAO Y, CHEN C, et al. Effect of combined water-jet inlets on the hydrodynamic performances in square arc-corner aquaculture tanks [J/OL]. Ocean Eng, 2023, 289:116234 [2024-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116234>.
- [17] 邹思雨,任建民,朱向哲. 新型单螺杆挤出机组合螺杆混合特性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报,2023, 43(1): 54-60.