

同向全啮合双螺杆植物蛋白挤出机不同螺杆元件的仿真分析

李 振^{1,2}, 相 海¹, 任嘉嘉^{1,2}, 卢黎明², 姚占斌², 周泓怡¹

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 中机康元粮油装备(北京)有限公司, 北京 100083)

摘要:为了明确和量化同向全啮合双螺杆挤出机各螺杆元件的功能,增加配置用于生产植物基肉双螺杆挤出机螺杆的合理性,以低温脱脂花生蛋白粉的物性参数为条件,对SLZ36型挤出机的3种元件长度为32 mm的螺杆元件双头螺旋元件、5啮合盘啮合元件及3齿形盘齿形元件的剪切速率、混合指数、物料停留时间、最大剪切应力分布进行仿真分析。采用Solidworks软件建立元件的几何模型,应用Gambit软件进行模型的网格划分及网格质量分析,在Polyflow软件中进行数值模拟,通过Fieldview软件对仿真结果进行后处理分析。结果表明:通过混合指数分析得到3种螺杆元件对物料的混合性能大小为齿形元件>啮合元件>螺旋元件;通过物料停留时间分析得到3种螺杆元件的轴向混合性能大小为齿形元件>螺旋元件>啮合元件;通过剪切速率及平均最大剪切应力分析得到对物料的剪切性能大小为啮合元件>螺旋元件>齿形元件。进行植物基肉双螺杆挤出机螺杆组合时,针对目前整个螺杆配置螺旋元件最多的情况,在进行物料更换时可以合理地配置啮合元件以增加螺杆剪切能力,配置齿形元件以增加螺杆的混合能力。

关键词:同向全啮合;螺旋元件;啮合元件;齿形元件;仿真分析

中图分类号:TQ935;TS229

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)03-0147-06

Simulation analysis of different screw elements of co-rotating full-meshing twin-screw vegetable protein extruder

LI Zhen^{1,2}, XIANG Hai¹, REN Jiajia^{1,2}, LU Liming²,
YAO Zhanbin², ZHOU Hongyi¹

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China;
2. China Machinery Kangyuan Cereals and Oils Equipment(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In order to clarify and quantify the functions of each screw element in the co-rotating full-meshing twin-screw extruder, and to increase the rationality of configuring screws for the twin-screw extruders used for the production of plant-based meat, the shear rate, mixing index, material residence time, and maximum shear stress distribution of double helix elements, 5-mesh disc meshing elements, and 3-tooth disc tooth shaped elements of 32 mm screw elements in the SLZ36 type extruder were simulated and analyzed under the condition of physical parameters of low-temperature defatted peanut protein powder. Solidworks software was used to establish the geometric model of the elements, Gambit software was used for mesh partitioning and mesh quality analysis of the model, numerical simulation was

收稿日期:2023-02-28;修回日期:2023-12-19

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目“大宗油料加工副产物综合利用关键技术与装备集成及产业化示范”(2021YFD2100405)

作者简介:李 振(1997),男,硕士,主要从事油脂加工技术与装备开发工作(E-mail)2802117701@qq.com。

通信作者:相 海,研究员(E-mail)xh9377@263.net。

conducted by Polyflow software, and the simulation results were post-processed and analyzed using Fieldview software. The results showed that the mixing performance order of the three screw elements on materials through mixing index was tooth shaped elements > meshing elements > helix elements, the axial mixing

performance order of three screw elements was tooth shaped elements > helix elements > meshing elements through material residence time analysis, the shear performance of materials order of three screw elements was meshing elements > helix elements > tooth shaped elements through the analysis of shear rate and average maximum shear stress. When combining the screws of twin - screw extruder used for production of plant - based meat, considering the helix elements is the maximum case of the whole screw, the meshing elements and tooth shaped elements can be reasonably configured to increase the shear capacity of the screw and the mixing ability of the screw, respectively.

Key words: co - rotating full - meshing; helix element; meshing element; tooth shaped element; simulation analysis

我国是世界上最大的花生生产国和消费国,花生主要用于榨油和直接食用。2021年我国花生总产量1 830.8万t,其中900.0万t用于制油,占总产量的近50%,向国内市场提供约315万t食用花生油^[1]。脱脂花生粕是花生提油后的副产物,其干基的蛋白质含量高达50%以上^[2]。据估计,我国每年有500万t以上花生饼粕亟待开发利用,可折合花生蛋白250万t以上^[3]。近年来随着制油工艺的改进,未完全变性的花生蛋白的再利用已成为各国农产品加工的热点。以植物蛋白为原料,采用挤压组织化技术生产的组织化植物蛋白产品已广泛进入市场,显著提升了油料榨油副产物的附加值^[4]。

双螺杆挤出机作为挤压组织化的重要载体,其应用于组织化加工植物蛋白的时间还较短,目前主要是在加工聚合物的基础上,更改加工工艺参数以使其适用于加工植物蛋白。针对其关键核心部件的螺杆元件公开研究较少,且各制造商均有各自的螺杆设计思路导致难以形成标准并被推广。目前,关于植物蛋白挤出机的螺杆元件对流动道影响的研究较少,且大多采用粒子示踪法模拟聚合物粒子在流动道中的运动轨迹,分析挤出机用于生产聚合物时流动道的情况^[5-6]。生产植物基肉的双螺杆挤出机的螺杆大多配置螺旋元件、啮合元件以及齿形元件。本文对低温脱脂花生蛋白粉在同向全啮合双螺杆挤出机中的流动道进行数值模拟,使用Solidworks软件对SLZ36挤出机的3种螺杆元件建立几何模型,使用

Gambit软件对模型进行有限元网格划分并分析网格质量,利用Polyflow软件对网格模型进行数值模拟,并采用粒子示踪法模拟粒子在流动道内的运动轨迹,使用Fieldview软件对仿真结果进行后处理分析,主要从剪切速率、混合指数、物料停留时间以及最大剪切应力分布几个方面,分析对比3种螺杆元件对花生蛋白流动道的影响,为实际加工生产植物蛋白挤压组织化的同向全啮合双螺杆挤出机提供一定的设计依据。

1 螺杆元件模型的建立及有限元网格的划分

使用Solidworks软件建立3种螺杆元件,包括双头螺旋元件SER/32/32、5啮合盘啮合元件KBR/5/32及3齿形盘齿形元件TME/3/32及其相应流动道的几何模型,然后将模型导入到Gambit软件进行有限元网格划分。

1.1 Solidworks软件建模

SER/32/32:右旋螺旋元件,双头螺旋,螺旋外径(D)36 mm,螺距16 mm,元件长度32 mm,螺旋底部直径(d)24 mm,中心距(A)30 mm,且满足 $A = D - (D - d)/2$ 。KBR/5/32:右旋啮合元件,啮合盘数量5,元件长度32 mm,啮合盘错列角 45° ,啮合盘间隙0.88 mm。TME/3/32:齿形元件,齿形盘数量3,元件长度32 mm,双轴啮合后的齿形盘间隙0.5 mm,齿形盘厚度4.75 mm。3种螺杆元件流动道均相同,挤出机内筒固定直径为37 mm。图1为3种螺杆元件及流动道几何模型。

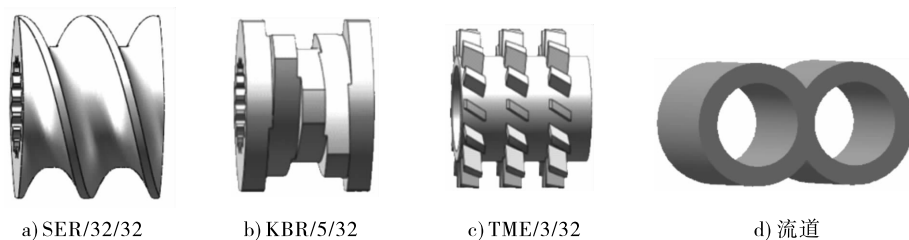


图1 3种螺杆元件及流动道的几何模型

1.2 Gambit 软件划分网格

将 Solidworks 软件建立的模型导入 Gambit 软件,对 3 种元件进行网格划分并评估网格质量。由于螺杆元件的几何形状相对复杂,因此采用四面体网格直接对其进行体网格划分,同时流道的模型相对较规则,因此采用六面体规则性网格对通道进行网格划分^[7]。由于啮合元件及齿形元件中啮合盘、齿形盘之间存在轴向间隙,因此需要考虑间隙后重新划分啮合元件及齿形元件的通道网格。3 种元件及其流道的有限元模型分别见图 2~图 4。

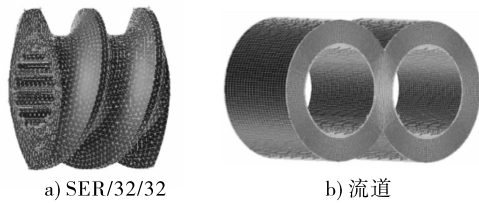


图 2 螺旋元件及其流道的有限元模型

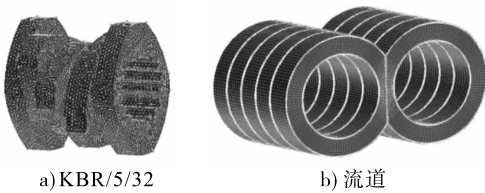


图 3 啮合元件及其流道的有限元模型

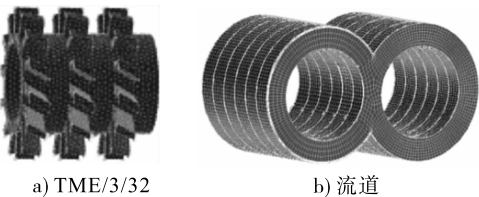


图 4 齿形元件及其流道的有限元模型

采用 EquiSize Skew 指标,通过单元大小计算的歪斜度来评估网格质量,EquiSize Skew 在 0~1 之间,0 为网格质量最好,1 为网格质量最差^[8]。经评估,上述 6 种有限元模型 EquiSize Skew 在 0~0.4 之间的网格数均占 99.5% 以上,说明 6 种有限元模型的网格划分质量极高^[9]。

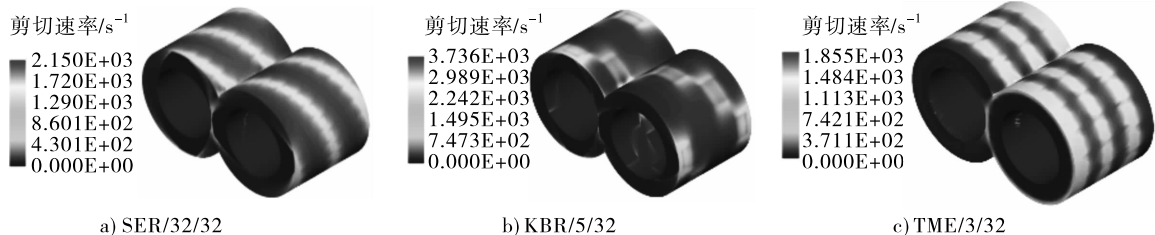


图 5 剪切速率云图

沿挤出方向,建立 3 种螺杆元件最外侧剪切速率变化曲线,如图 6 所示。其中横轴是沿着挤出方

2 仿真及结果分析

以花生蛋白的物性参数为条件,使用 Polyflow 软件进行数值模拟,通过 Fieldview 软件对仿真结果进行后处理分析。

2.1 基本假定及边界条件

基本假定:在进行仿真前,考虑花生蛋白的性质以及挤出过程中流道内复杂的流动情况,作出如下假定,并在此基础上进行数值模拟^[10-11]:

- ①与时间相关的非牛顿流体计算问题;
- ②流道为等温且稳定的流道;
- ③元件与机筒表面间隙流动为层流流动;
- ④忽略惯性力、重力等体积力的影响;
- ⑤熔体在流道中全充满;
- ⑥流道壁面无滑移。

物性参数设定:花生蛋白加热熔融后属于非牛顿流体,采用 Bird - Carreau 本构方程(公式 1)来描述其流变特性^[12]。

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

式中: η 为物料黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; η_{∞} 为无穷大剪切速率下的黏度, $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; η_0 为零剪切黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为松弛时间, s ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为幂率指数。

花生蛋白的物性参数设置为^[13] $\eta_0 = 1\ 620 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\lambda = 4 \text{ s}$, $n = 0.35$ 。

边界条件设定:入口和出口处流体自由流动,法向力 f_n 为 0,切向力 f_s 为 0;内孔边界属于滑移边界,流体无法穿透且流体所受的切向力为 0,法向速度 V_n 为 0,切向速度 V_s 为 0;外壁面无滑移^[13-14], V_n 、 V_s 均为 0;螺杆转速根据右手定则设置为 -340 r/min 。

2.2 仿真结果分析

2.2.1 剪切速率

3 种螺杆元件的剪切速率云图如图 5 所示。由图 5 可看出,3 种螺杆元件的剪切速率高值区均出现在机筒内壁面沿着棱处及啮合处的顶部位置,其中:螺旋元件的剪切速率高值达 $2\ 150 \text{ s}^{-1}$,啮合元件的剪切速率高值达 $3\ 736 \text{ s}^{-1}$,齿形元件的剪切速率高值达 $1\ 855 \text{ s}^{-1}$ 。

向距离入口截面的距离,入口截面处为 0 m,出口截面处为 0.032 m。由图 6 可以看出,啮合元件的剪

切速率多峰值且可以达到 840 s^{-1} 以上,最大可达 $1\ 260 \text{ s}^{-1}$,螺旋元件的剪切速率峰值仅能达到 500 s^{-1} ,齿形元件的剪切速率峰值可以达到 560 s^{-1} 以

上。啮合元件剪切速率高值是齿形元件的 2 倍以上,且远高于螺旋元件的剪切速率高值,啮合元件的剪切作用明显更强。

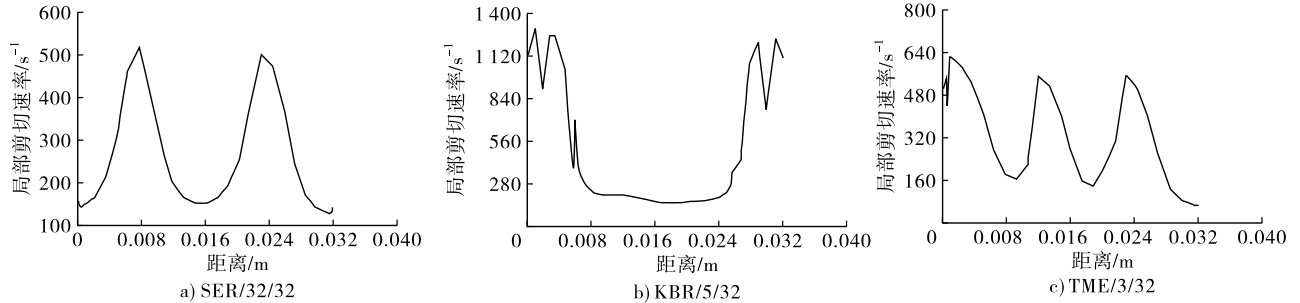


图 6 剪切速率分布

2.2.2 混合指数

在食品加工领域,颗粒和粉末的充分混合是确保食品高质量加工的重要因素。混合指数是了解和评估各种食品加工设备混合状态的重要参数^[15]。3 种螺杆元件的混合指数云图见图 7。由图 7 可以看出,啮合元件和齿形元件的混合指数高值均能达到

0.9 以上,说明这两种螺杆元件的混合能力较强,而螺旋元件的混合指数高值约为 0.6,混合能力较差。因此,配置螺杆元件时考虑在螺杆上采用齿形或啮合元件,在提供大剪切作用的同时可以提供更强的物料混合能力。

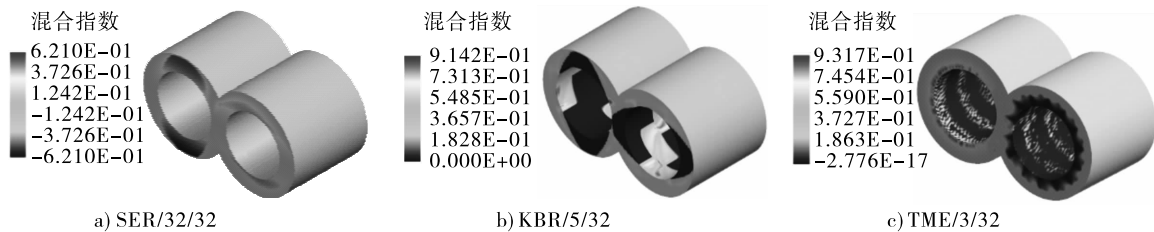


图 7 混合指数云图

2.2.3 物料停留时间

物料停留时间分布是衡量螺杆元件轴向混合性能的重要指标,分为累积停留时间分布和停留时间分布,分别由概率和概率密度表示。采用示踪粒子轨迹跟踪法,在流道入口处布置 4 000 个示踪粒子,利用 Polystat 模块计算示踪粒子在流道内的运动轨迹,并通过累积停留时间和停留时间分布,计算出粒子通过流道的平均停留时间。结果显示,3 种螺杆

元件的物料平均停留时间分别为螺旋元件 1.290 s、啮合元件 0.761 s、齿形元件 4.036 s。结合物料累积停留时间分布(见图 8)和停留时间分布(见图 9)得出:3 种螺杆元件中齿形元件的物料平均停留时间最长,其停留时间分布曲线的横轴较螺旋和啮合元件更长,轴向混合性能最好,但自清洁能力较差^[5],螺旋元件和啮合元件的轴向混合能力较差,但是自清洁能力较强。

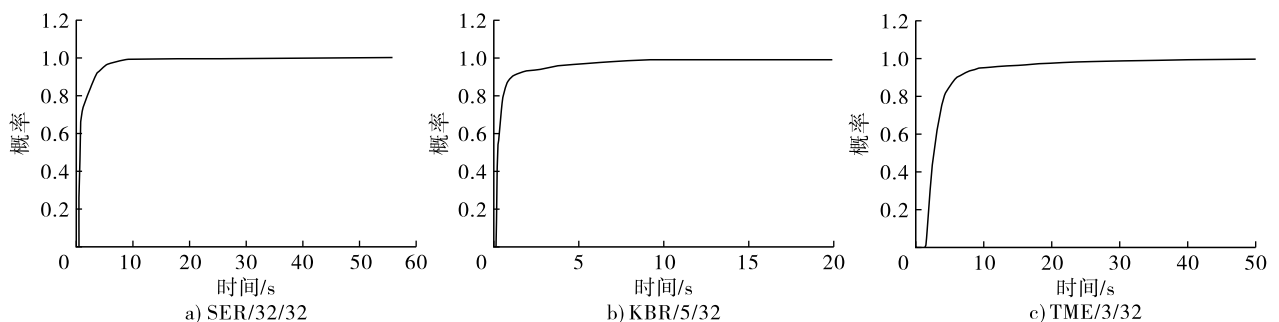


图 8 累积停留时间分布曲线

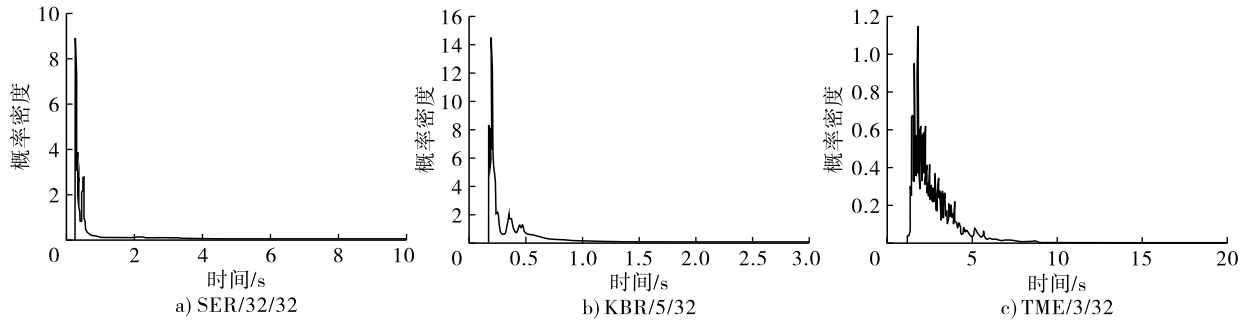


图9 停留时间分布曲线

2.2.4 最大剪切应力

最大剪切应力定义为示踪粒子从进入流道到离开流道过程中所经历剪切应力的最大值,主要有最

大剪切应力概率函数曲线和最大剪切应力概率密度函数曲线。图10、图11是3种模型示踪粒子对应的两种曲线。

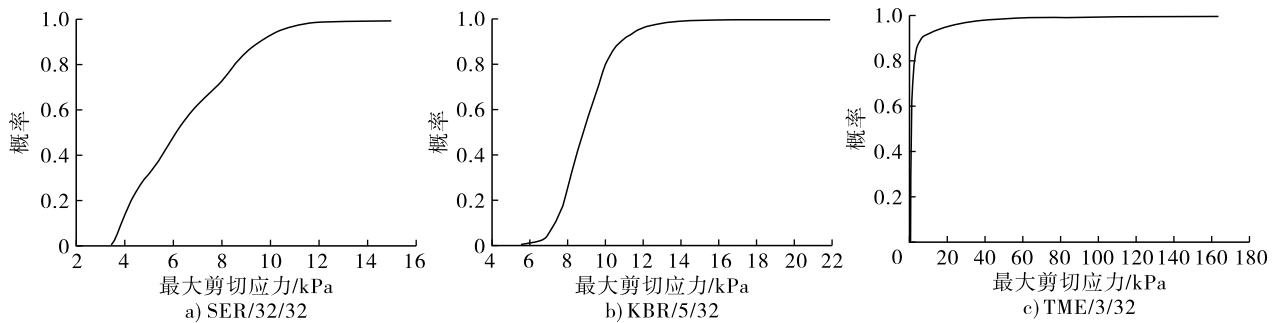


图10 最大剪切应力概率函数曲线

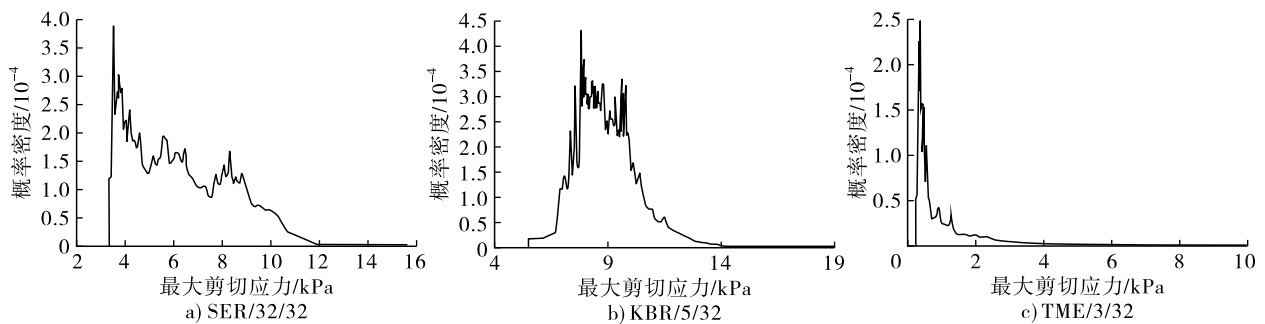


图11 最大剪切应力概率密度函数曲线

由于最大剪切应力无法量化每种元件所有通过流道粒子的剪切力的平均情况,无法直观对比3种元件的剪切作用大小,通过最大剪切应力概率密度函数及通过粒子数计算的平均最大剪切应力,以此来反映螺杆的分散能力。平均最大剪切应力的计算结果为螺旋元件6489.193 Pa、啮合元件8981.387 Pa、齿形元件4100.933 Pa,说明啮合元件对花生蛋白粉的分散效果最好,有利于细化微粒。

3 结论

应用 Polyflow 软件对花生蛋白在 SLZ36 挤出机中3种螺杆元件的流动过程进行了仿真分析,使用 Fieldview 软件将计算结果进行可视化后处理,对剪切速率场、混合指数场、停留时间分布曲线和平均最

大剪切应力进行对比分析。结果表明,在 SLZ36 挤出机上的3种螺杆元件,对花生蛋白的挤压组织化功能具有明显的差异,其中:KBR/5/32 剪切速率的高值达 $3\ 736\ \text{s}^{-1}$,平均最大剪切应力为 $8\ 981.387\ \text{Pa}$,能够在花生蛋白挤压组织化过程中提供更强的剪切力,有利于细化微粒及蛋白质二级结构的展开及重新交联,但由于存在较短的物料停留时间(0.761 s)和略低于齿形元件的混合性能,因此在构建整个螺杆时,在螺杆的中后段可以适当增多其排布以提供较大剪切作用来保证蛋白质二级结构的展开及重新交联;TME/3/32 具有更长的物料停留时间(4.036 s),混合指数高值达0.9以上,剪切速率高值和平均最大剪切应力较 SER/32/32 和 KBR/5/32 的低,因此在构建整个螺杆元件时,可以将原啮合元件排布的螺杆前中段中的一个或两个啮合元件换

成相同长度的齿形元件,适当降低过高的剪切所造成的蛋白质二级结构破坏;SER/32/32的剪切速率($2\ 150\ \text{s}^{-1}$)、平均最大剪切应力($6\ 489.193\ \text{Pa}$)及平均停留时间($1.290\ \text{s}$)在啮合元件和齿形元件之间,综合性能较好,在螺杆配置过程中,配置于螺杆的前中后段,将啮合元件和齿形元件适当地插入螺旋元件之间使螺杆综合性能达到最优。

参考文献:

- [1] 王瑞元. 2022年我国粮油产销和进出口情况[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 1-7.
- [2] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京:中国农业科学院, 2019.
- [3] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 1-9.
- [4] 徐飞, 刘丽, 石爱民, 等. 亚基水平上花生蛋白组成、结构和功能性质研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(7): 264-269.
- [5] BUMM S H, WHITE J L, ISAYEV A I. Glass fiber breakup in corotating twin screw extruder: Simulation and experiment[J]. Polym Compos, 2012, 33(12): 2147-2158.
- [6] 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.

- [7] 张超, 樊瑜瑾, 田野. 啮合同向双螺杆挤出机滑移条件下的仿真分析[J]. 塑料科技, 2019, 47(8): 71-75.
- [8] 梁荣亮, 过学迅, 陈见. 基于 Gambit 的液力缓速器流道网格生成技术[J]. 上海汽车, 2008(4): 31-33, 38.
- [9] 张雪贝, 王驰, 陈红丽. 基于 FLUENT 的 UDS 和 UDF 功能的中子扩散耦合计算研究与快堆应用分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(2): 324-332.
- [10] 张雪晨, 张丽梅, 黄志刚, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆元件对其流道的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 99-103, 206.
- [11] 张宏建, 黄志刚, 李梦林, 等. 啮合同向双螺杆挤出机不同螺杆流道仿真分析[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(9): 70-74.
- [12] 毕超. Polyflow 软件基础及其在双螺杆挤出仿真过程中的应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2018: 10-74.
- [13] 黄志刚, 刘凯, 李梦林, 等. 单螺杆挤出机计量段模拟研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 63-67.
- [14] 郎珊珊. 双螺杆元件及挤压参数的建模与试验研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.
- [15] JIN X, CHANDRATILLEKE G R, WANG S, et al. DEM investigation of mixing indices in a ribbon mixer[J]. Particuology, 2022, 60: 37-47.

(上接第 146 页)

(1) 维修便捷。可提式微孔曝气器可单独拆除提出水面进行维护、维修,无需停机、停产排空水池,无需冒险入池作业即可完成维修,避免了曝气头破损不能及时维修的情况,保障曝气系统稳定运行。

(2) 曝气效率高。可提式微孔曝气器为管式曝气器,具备 360° 曝气效果,较原有的盘式曝气器曝气效率高,作用范围覆盖所有区域,避免了曝气死区;曝气效率提高,能耗降低。

(3) 曝气管道风压大幅度下降。改造后曝气管道阻力下降幅度较大,风压由 $75\ \text{kPa}$ 下降至 $50\ \text{kPa}$,有效规避了曝气管道超压的风险,无需旁通排气降压,节约能耗;目前运行状态保持较好,无需进行酸洗。

(4) 设备故障率低。随着管道阻力下降,鼓风机电机负荷降低,电机电流由 $80\ \text{A}$ 下降至 $68\ \text{A}$,改造后未出现过载、超压、变频器故障的情况,节省电能的同时降低了设备故障率。

(5) 运行成本降低。改造后不仅保障了出水达标排放,减小环保风险,还取得了可观的经济效益,实现节约包括维修费、电费、清洗药剂费等约 15 万

元/年。

6 结 语

环保政策始终保持高压态势,污水治理、节能环保成为油脂加工行业污染治理的重中之重。一方面督促老旧企业、工厂进行提标改造;另一方面,对新建企业、工厂实行更为严格的环保标准,从而使环保工艺设施达标、稳定运行,尤其是污水处理工艺。可提式微孔曝气器曝气效果好,综合能耗低,维修保养便捷,在油脂加工行业污水处理中的应用优势较大,具有较大的推广价值。

参考文献:

- [1] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制和维护管理[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [2] 梁远, 王佳伟, 李洁, 等. 微孔曝气器充氧性能变化对污水处理厂能耗的影响[J]. 给水排水, 2011, 47(1): 42-45.
- [3] 方冰. 某污水处理厂管式微孔曝气系统诊断性研究[J]. 山东化工, 2017, 46(14): 196, 199.
- [4] 彭永臻, 郭建华. 活性污泥膨胀机理、成因及控制[M]. 北京:科学出版社, 2012.