

水力旋流器固液分离特性的数值模拟与优化

Numerical simulation and optimization on solid-liquid separation performance of hydrocyclone

王勇 曾涛 徐银香 刘少北 张长练 何雨

WANG Yong ZENG Tao XU Yin-xiang LIU Shao-bei ZHANG Chang-lian HE Yu

(四川理工学院过程装备与控制工程四川省高校重点实验室,四川 自贡 643000)

(Key Laboratory in Sichuan Colleges on Industry Process Equipments and Control Engineering,
Sichuan University of Science & Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China)

摘要:采用计算流体力学(CFD)软件对水力旋流器内玉米淀粉颗粒的分离效能和分离过程进行数值模拟,对比分析进口流速、分流比和进料浓度变化对旋流器分离效率的影响及其变化规律,考察不同粒径淀粉颗粒在旋流器内的体积分数分布。运用响应面法(RSM)中Box-Behnken试验设计对水力旋流器进行参数优化,分析进口流速、分流比和进料浓度对玉米淀粉分离效率的影响规律,并建立二次多项回归模型。结果表明:进口流速、分流比、进料浓度对玉米淀粉分离效率均有影响,且影响分离效率的大小顺序为:分流比>进料浓度>进口流速;适当调整进口流速、分流比和进料浓度有利于提高旋流器的分离效率;通过响应面法优化得到的最佳参数条件为:进口流速8 m/s、分流比5%、进料浓度12%,该条件下水力旋流器分离效率为98.84%。

关键词:水力旋流器;分离效率;数值模拟;参数优化

Abstract: Numerical simulation of the corn starch granule dynamics were performed by software of computational fluid mechanics to characterize the separation performance and separation process of hydrocyclone. The effects of parameters such as inlet velocity, split ratio, and feed concentration on separation efficiency of hydrocyclone were compared and analyzed, and the volume fraction distribution of different size starch granules in hydrocyclone was investigated. The response surface methodology (RSM) analysis of Box-Behnken experimental design to optimize parameters. The influence of inlet ve-

基金项目:四川省科技厅支撑计划项目(编号:2014GZ0132);四川省科技厅重点研发项目(编号:2017SZ0167);过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金科研项目(编号:GK201704);四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(编号:2017TD0027);四川理工学院创新基金项目(编号:y2017022)

作者简介:王勇,男,四川理工学院在读硕士研究生。

通信作者:曾涛(1967—),女,四川理工学院教授,博士。

E-mail: 396109721@qq.com

收稿日期:2017-09-22

locity, split ratio, and feed concentration on hydrocyclone separation efficiency were measured, and quadratic regression equations were constructed to examine the optimization parameter. The results indicated that the inlet velocity, split ratio, and feed concentration had an effect on the separation efficiency of the corn starch and order of effect as followed: split ratio > feed concentration > inlet velocity, and could be adjusted properly to improve the separation efficiency of hydrocyclone. The optimum parameter condition was as followed: inlet velocity was 8 m/s, split ratio was 5%, feed concentration was 12%. Under the optimal parameter condition, the separation efficiency of hydrocyclone was 98.84%.

Keywords: hydrocyclone; separation efficiency; numerical simulation; parameter optimization

淀粉是高等植物内主要的碳水化合物来源,不仅给人类和动物提供营养^[1],而且具有价廉、绿色环保、可生物降解和生物相容性好等优点,因此在食品保鲜、包装薄膜、医用胶囊和纳米填充材料等食品与非食品领域中广泛应用^[2-3]。因受基因遗传和环境影响,各类植物的淀粉颗粒形状和大小都有所不同。一般情况下,天然植物的原淀粉粒径为1~35 μm,如玉米、小麦、木薯等,但马铃薯的原淀粉粒径为10~100 μm^[4-5]。淀粉颗粒的大小直接影响到淀粉的结晶性质、直链和支链淀粉比例、糊化性、流变性、改性效果、热力学性质及消化性质等^[6]。因此,对淀粉颗粒进行分离分级是有必要的。

水力旋流器是淀粉分离分级的重要设备,具有不动件、设备体积小、成本低、操作简单及分离效率高等优点而被广泛应用。由于水力旋流器中存在较高的剪切力,可以破坏颗粒间的凝聚,十分有利于固相颗粒的分离^[7-9]。基于响应面法对淀粉分离旋流器进行操作参数和物性参数的优化分析缺乏全面研究,本研究拟采用多相流混合模型(Mixture Model),用雷诺应力模型(RSM)描述湍流,对玉米淀粉分离

旋流器的多相流场模拟分析;研究了水力旋流器的工作参数(进口流速、进料浓度和分流比)对旋流器分离效率和不同粒径淀粉颗粒体积分布的影响;并采用响应面法综合考量了各影响因素对淀粉颗粒分离效率评价指标的影响程度,以求获得有效可靠的优化参数。

1 水力旋流器结构与原理

水力旋流器基本工作原理是利用不互溶介质间的密度差而进行离心分离,密度小的介质向轴心运动,密度较大的介质则向边壁移动,在流场作用下分别从水力旋流器的溢流口和底流口排出^[10]。混合物料沿切线方向进入旋流器后旋转形成漩涡,并在圆柱腔内产生高速旋转流场。在高速旋转流场下,混合物中大比重物料沿着轴向向下、径向向外的螺旋式运动,到达内径逐渐减小的圆锥段后,混合物料加速旋转并沿旋流器壁向下运动,直至沿底流口排出,形成了外旋流场;而混合物中小比重物料沿着压力较低的轴线中心处形成向上运动的内旋流,由溢流口排出,形成了内旋流场,从而强化淀粉分离。水力旋流器的结构示意图见图1,其基本结

构参数由溢流口直径 D_c 、溢流管插入深度 h 、旋流腔直径 D 、筒体柱段高度 L 、锥角 θ 、锥段长度 L_{co} 、底流口直径 D_d 和矩形进料口参数等组成。溢流口在圆柱体的上端与顶盖连接,进料口在圆柱体上部沿侧面切向进入圆柱腔内^[11]。水力旋流器结构尺寸见表1。

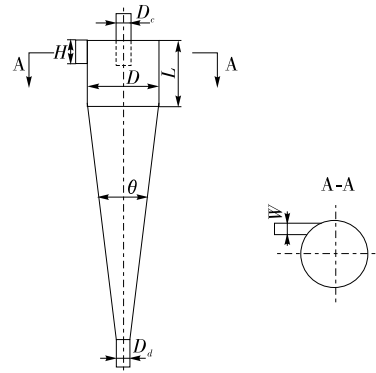


图1 旋流器结构示意图

Figure 1 Structure diagram of hydrocyclone

表1 旋流器结构尺寸

Table 1 Structure parameter size of hydrocyclone

溢流口直径 D_c /mm	旋流腔直径 D /mm	底流口直径 D_d /mm	溢流管插深度 h /mm	锥角 $\theta/(\circ)$	筒体柱段高度 L /mm	锥段长度 L_{co} /mm	进料口断面 $H \times W$ /(mm \times mm)
10	35	5	20	8	56	214.5	12 \times 4

2 计算模型与优化方法

2.1 数学模型

水力旋流器内部为强旋流动的湍流流体,满足不可压缩的连续介质运动规律;控制方程采用 Mixture 多相流模型(Mixture Model),用雷诺应力模型(RSM)描述湍流。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_m u_{m,i}) = 0, \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m u_{m,i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = - \frac{\partial p_m}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu_m \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} - \rho_m \overline{u'_{m,i} u'_{m,j}}) + \rho_m g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{dri,k} u_{drj,k}), \quad (2)$$

式中:

- ρ_m ——混合流体的密度,kg/m³;
- g_i ——重力加速度在第 i 方向的分量;
- p_m ——混合流体的压强,Pa;
- $u_{m,i}$ ——质量平均速度在第 i 方向的分量,m/s;
- μ_m ——混合流体的动力黏度,Pa \cdot s;
- $u'_{m,i}$ ——脉动速度在第 i 方向的分量,m/s;
- α_k ——第 k 相的体积分数;
- $u_{dri,k}$ ——第 k 相的偏移速度 $u_{dr,k}$ 在第 i 方向的分量,m/s;
- x_i, x_j ——笛卡尔坐标在第 i, j 方向的分量;

ρ_k ——第 k 相的密度,kg/m³;

n ——相数;

$\rho_m \overline{u'_{mi} u'_{mj}}$ ——流体脉动产生的雷诺应力,Pa。

颗粒相体积分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p u_{m,j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha_p \rho_p u_{drj,p}) = 0, \quad (3)$$

式中:

α_p ——颗粒相 p 的体积分数;

ρ_p ——颗粒相 p 的密度,kg/m³;

$u_{m,j}$ ——质量平均速度在第 j 方向的分量,m/s;

$u_{drj,k}$ ——颗粒相 p 的偏移速度 $u_{dr,k}$ 在第 j 方向的分量,m/s。

其中,偏移速度: $u_{dri,p} = u_{qp,i} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} u_{qk,i}$; 滑移速

度: $u_{qp,i} = u_{p,i} - u_{q,i}$ 。

由于水力旋流器内的流动规律复杂,具有明显的非向同性湍流流体,两方程模型难于考虑旋转流动及流动方向表面曲率变化的影响;因此,在上述动量方程(2)中采用 Reynolds 应力方程模型(RSM)计算雷诺应力^[12]。

2.2 网格划分与边界条件

本研究采用 UG NX10.0 软件建立 $\Phi 35$ mm 水力旋流器流体区域三维模型,并通过 ICEM-CFD 中采用 Block 虚拟拓扑法创建六面体结构网格,溢流口部分采用 O 型网格,以确保 Block 网格质量在 0.5 以上,网格数量为 572 552,旋流器网格划分见图 2。



图 2 旋流器网格划分

Figure 2 Mesh generation of hydrocyclone

进口边界条件设置为速度入口,水相和淀粉颗粒相速度相同,且均匀分布于进口;利用湍流强度 I 和水力直径 D_H 定义湍流,其中入口湍流强度 $I=0.16(Re)^{-1/8}$,水力直径相当于入口的当量直径^[13];溢流口和底流口都设置为自由出口,旋流器内壁面采用无滑移边界条件,默认壁面粗糙度为 0.5,采用标准壁面函数法求解边界湍流,颗粒相采用碰撞条件,颗粒—壁面碰撞恢复系数为 0.9。

2.3 物性参数与求解器设置

水力旋流器模拟主相为水相,温度为常温,密度为 998.2 kg/m^3 ,黏度为 $0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。次相为物料,平均密度为 1650 kg/m^3 ,黏度为 $1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,混合物中的玉米淀粉颗粒非单一粒径,6 种颗粒粒径 d_s 分别为 $1, 5, 10, 15, 20, 30 \mu\text{m}$ 。求解器设置为压力隐式瞬态三维求解器,压力—速度耦合方式为 SIMPLE,为利于计算的稳定性,压力梯度采用 Green-Gauss Cell Based,压力离散格式采用 PRESTO,动量离散格式选用 QUICK,湍动能及湍动能耗散率采用二阶迎风格式,设置收敛残差精度为 1×10^{-6} ,计算过程中以进出口各相流量时均平衡作为计算收敛的判断依据。

3 计算结果与讨论

3.1 操作参数对旋流器内玉米淀粉分离效率的影响

分离效率是指旋流器底流口固相颗粒质量流率与进料口固相颗粒质量流率的比值,是衡量水力旋流器分离性能的最重要指标。其表达式为:

$$E = \frac{M_u}{M_i} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

E ——分离效率, %;

M_u ——底流口固相颗粒质量流率, kg/s ;

M_i ——进料口固相颗粒质量流率, kg/s 。

3.1.1 进口流速对玉米淀粉分离效率的影响 进口流速 Q_i 是水力旋流器内最重要的操作参数,与分离效率密切相关。由图 3 可知,在分流比 F 为 10% 和进口淀粉颗粒体积浓度为 12% 时,随着进口流速 (3~15 m/s) 的增加,颗粒分离效率先增大后趋于平缓。这是由于进口流速增大,切向速度就增大,引起旋流场中离心力增大,从而使得分离效率增大。当进口流速由 3 m/s 增大到 10 m/s 时,颗粒分离效率迅速上升至 96.12% 左右,之后增长变化基本趋于平缓,主要是由于进口流速达到某一程度时,旋流器内切向速度过高,产生了

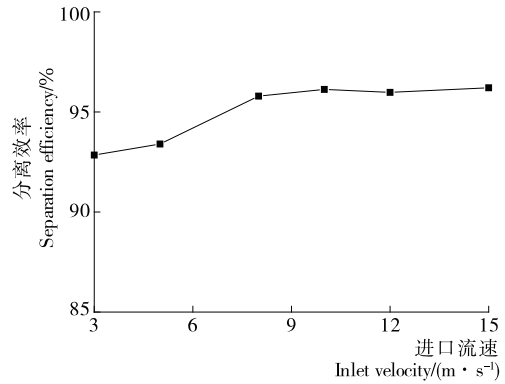


图 3 进口流速对玉米淀粉分离效率的影响

Figure 3 Effects of the inlet velocity on the separation efficiency of corn starch

较大的剪切力,湍流强度也显著增大,同时颗粒易受湍流脉动的影响,可能在进料口处就由溢流口逃逸出去或滞留在旋流器内而未有效分离。此范围内,选取进口流速为 10 m/s 时,淀粉分离效果较佳。

3.1.2 分流比对玉米淀粉分离效率的影响 分流比 F 也是一个直接影响旋流器分离效率的重要操作参数。它是指旋流器溢流口流量 Q_o 与进料口流量 Q_i 的比值,反映了溢流口与底流口的流量平衡程度。其表达式为:

$$F = \frac{Q_o}{Q_i}, \quad (5)$$

式中:

F ——分流比, %;

Q_o ——溢流口流量, m^3/h ;

Q_i ——进料口流量, m^3/h 。

在进口流速为 10 m/s、进口颗粒体积浓度为 12% 时,颗粒最大分离效率 97.99% 对应的分流比 F 为 5%,分流比为 10%, 15%, 20%, 30% 时的分离效率依次递减,且分别为 96.12%, 93.27%, 90.17%, 84.90%。由图 4 可知,分离效率与溢流分流比在 5%~30% 时呈负相关,与底流分流比在 70%~95% 时呈正相关,是因为颗粒的分离通道变得越来越宽。此范围内,选取分流比为 5% 时,淀粉分离效果较佳。

3.1.3 进料浓度对玉米淀粉分离效率的影响 水力旋流器

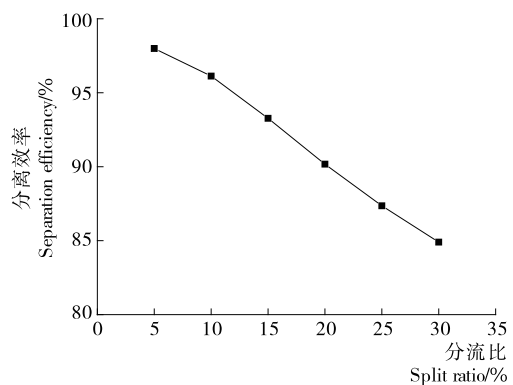


图 4 分流比对玉米淀粉分离效率的影响

Figure 4 Effects of the split ratio on the separation efficiency of corn starch

内颗粒运动行为与其浓度密切相关,因此进料浓度是水力旋流器设计中最重要的物性参数。通过模拟得出进料浓度对分离效率的影响规律,见图5。当进口流速为10 m/s、分流比 F 为10%时,随着进料浓度的增加,水力旋流器分离效率先大幅下降后变缓,是因为进料浓度的增大,水相的切向速度减小,致使分离效率降低。由此可知,进料浓度对分离效率的影响较大,且进料口较小的水力旋流器,在进料浓度较低时更有利于微细颗粒的去除。此范围内,选取进料浓度为12%时,淀粉分离效果较佳。

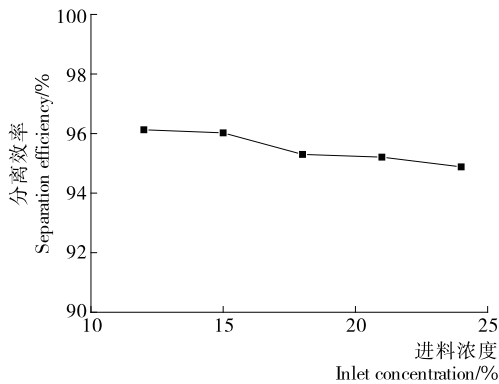


图5 进料浓度对玉米淀粉分离效率的影响

Figure 5 Effects of the inlet concentration on the separation efficiency of corn starch

3.2 水力旋流器内玉米淀粉颗粒体积分数分布

由图6可知,在旋流器器壁附近,粒径 $\leq 5 \mu\text{m}$ 颗粒体积分数分布比粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 颗粒的要低,且粒径越大,体积分数就越大;在旋流器轴心附近,粒径 $\leq 5 \mu\text{m}$ 颗粒体积分数却比粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 颗粒的要高,且粒径越大,体积分数就越小。粒径 $\leq 5 \mu\text{m}$ 颗粒在旋流器器壁与轴心处的体积分数变化不是很明显,而粒径 $\geq 5 \mu\text{m}$ 颗粒在旋流器轴心比器壁处的体积分数要小很多,并出现较大幅度变化,表明绝大部分颗粒已经分离出。在旋流器轴心附近颗粒粒径越大,其体积分数越小,主要是由于粒径越大,受到的切向力越大,滑移速度也越大,所以大粒径淀粉颗粒就易于分离。该水力旋流器能高效地分离出 $5 \mu\text{m}$ 以上淀粉。

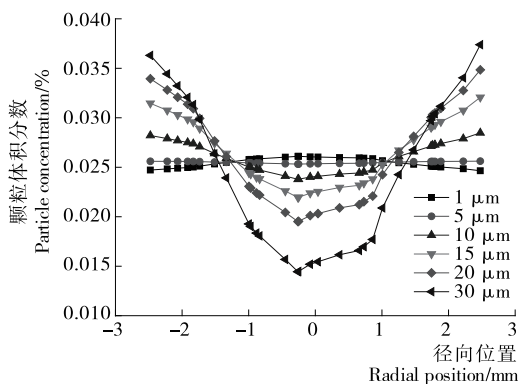


图6 底流口玉米淀粉颗粒体积分数分布曲线

Figure 6 The volume fraction distribution curve of corn starch granule at the bottom outlet

3.3 基于响应面分析法的操作参数优化

3.3.1 响应面试验方案设计 响应面分析方案及试验结果见表2、3。

3.3.2 模型建立与方差分析 对表3数据进行多元二次方程回归拟合和回归方差分析,得到二次回归方程如下:

$$E = 95.32 + 0.22X_1 - 2.81X_2 - 0.31X_3 + 0.55X_1X_2 + 0.11X_1X_3 - 0.21X_2X_3 + 0.24X_1^2 + 0.010X_2^2 + 2.750 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (6)$$

运用 Design Expert 10.0.4 软件对数据进行处理,进行多元二次方程回归拟合,回归方差分析结果见表4。由表4可知,该模型的 F 值为41.13和 P 值为 $0.0001 < 0.01$,表明该模型方程极显著,能很好地反映各参数间的关系。同时,一次项 X_2 ($P=0.0001 < 0.01$)和交叉项 X_1X_2 ($P=0.0345 < 0.05$)对响应值都有显著影响。各控制因素对水力旋流器分离效率影响的大小顺序为:分流比 $>$ 进料浓度 $>$ 进口流速。失拟项的 P 值为 $0.54 > 0.05$,表明试验误差很小,差异不显著,即该模型是正确的。

表2 响应面试验因素编码与水平

Table 2 The codes and levels of experiment factors in the response surface design

编码	进口流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	分流比/%	进料浓度/%
-1	8	5	12
0	10	10	15
1	12	15	18

表3 水力旋流器 Box-Behnken 中心组合设计试验方案及结果

Table 3 Central composite design arrangement and corresponding results for the hydrocyclone

试验编号	X_1	X_2	X_3	分离效率 E /%	
				模拟值	预测值
1	-1	-1	0	98.93	98.71
2	1	-1	0	98.31	98.04
3	-1	1	0	91.72	91.98
4	1	1	0	93.31	93.53
5	-1	0	-1	95.79	95.75
6	1	0	-1	95.98	95.99
7	-1	0	1	94.93	94.92
8	1	0	1	95.54	95.58
9	0	-1	-1	97.99	98.25
10	0	1	-1	93.27	93.04
11	0	-1	1	97.81	98.04
12	0	1	1	92.27	92.01
13	0	0	0	94.87	95.32
14	0	0	0	95.07	95.32
15	0	0	0	95.25	95.32
16	0	0	0	95.40	95.32
17	0	0	0	96.02	95.32

由表 5 可知,回归方程的决定系数 $R^2=0.9814>0.8$,表明各因数与分离效率之间的线性关系很好,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.9576$;试验所得 C.V. 值为 $0.44\%<10\%$,表明该模型具有较高的可信度和精确度;信噪比 Adeq Precision 为 $20.767>4$ 。综上所述,该模型可以很好地用于水力旋流器固液分离效率的预测与分析。

3.3.3 响应面分析与参数最优化 由图 7 可知在进料浓度为 15% 时,旋流器分离效率随着进口流速的增大而略有降低,随着分流比的增大而减小。由图 8 可知在分流比为 10% 时,水力旋流器分离效率随着进口流速的增大而增大,却随

着进料浓度的减小而增大。由图 9 可知在进口流速为 10 m/s 时,水力旋流器分离效率随着分流比的减小而逐渐增大,随着进料浓度的增大而略有减小。

利用 Design Expert 10.0.4 分析得出水力旋流器最佳工作参数条件为:进口流速为 8 m/s、分流比为 5%、进料浓度为 12%,该条件下旋流器分离效率预测值为 98.92%。在上述最佳工作参数条件下设计两组平行实验进行验证,获得水力旋流器分离效率为 98.84%,与预测值的相对偏差为 0.08%,表明拟合度较高,该模型对试验结果有较好的预测效果。

表 4 响应面方差分析[†]

Table 4 Analysis of variance for a quadratic response surface model

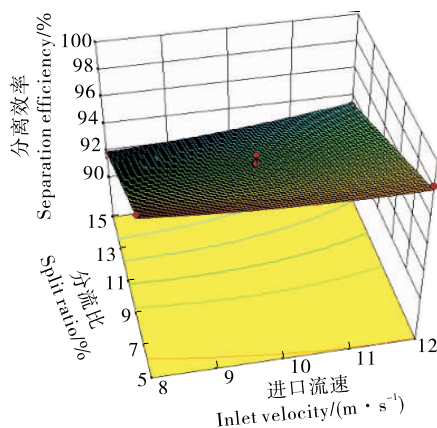
方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性
模型	65.94	9	7.33	41.13	<0.000 1	* *
X ₁	0.39	1	0.39	2.20	0.181 7	
X ₂	63.11	1	63.11	354.28	<0.000 1	* *
X ₃	0.77	1	0.77	4.32	0.076 4	
X ₁ X ₂	1.22	1	1.22	6.85	0.034 5	*
X ₁ X ₃	0.044	1	0.044	0.25	0.634 0	
X ₂ X ₃	0.17	1	0.17	0.94	0.363 7	
X ₁ ²	0.23	1	0.23	1.31	0.290 3	
X ₂ ²	4.424×10^{-4}	1	4.424×10^{-4}	2.483×10^{-3}	0.961 6	
X ₃ ²	0.318×10^{-4}	1	0.318×10^{-4}	1.787×10^{-4}	0.989 7	
残差	1.25	7	0.18			
失拟项	0.48	3	0.16	0.84	0.540 0	不显著
纯误差	0.77	4	0.19			
总和	67.19	16				

[†] “*”表示对响应值的影响显著,P<0.05;“**”表示对响应值的影响极显著,P<0.01。

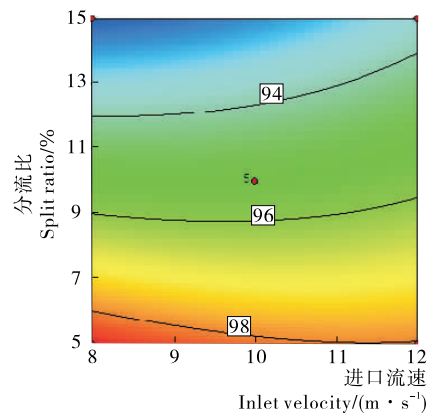
表 5 模型可信度分析

Table 5 Reliability analysis of model

标准差	平均值	变异系数 C.V./%	预测误差平方和	拟合度	校正拟合度	预测拟合度	信噪比
0.42	95.44	0.44	8.89	0.981 4	0.957 6	0.867 7	20.767



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图 7 进口流速与分流比对水力旋流器分离效率的影响

Figure 7 Response surface plot and contour plot showing the separation efficiency as a function of the inlet velocity and split ratio

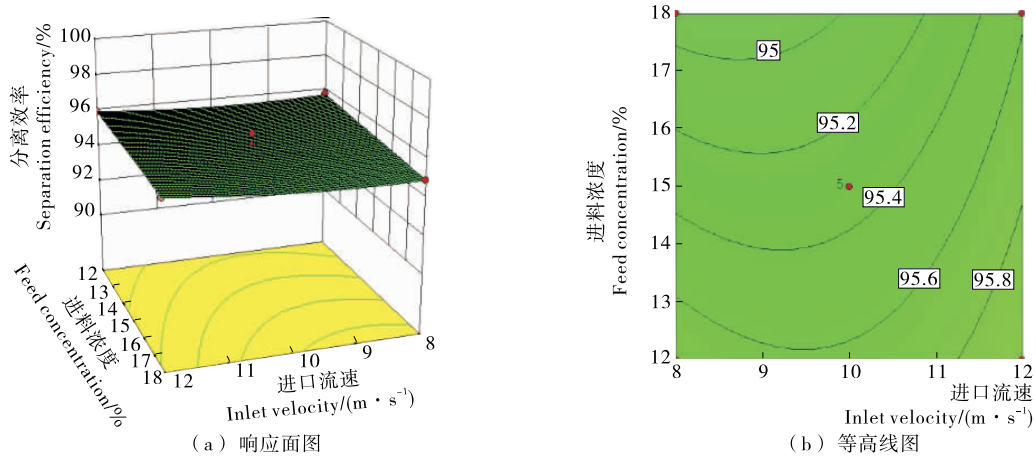


图8 进口流速与进料浓度对水力旋流器分离效率的影响

Figure 8 Response surface plot and contour plot showing the separation efficiency as a function of the inlet velocity and feed concentration

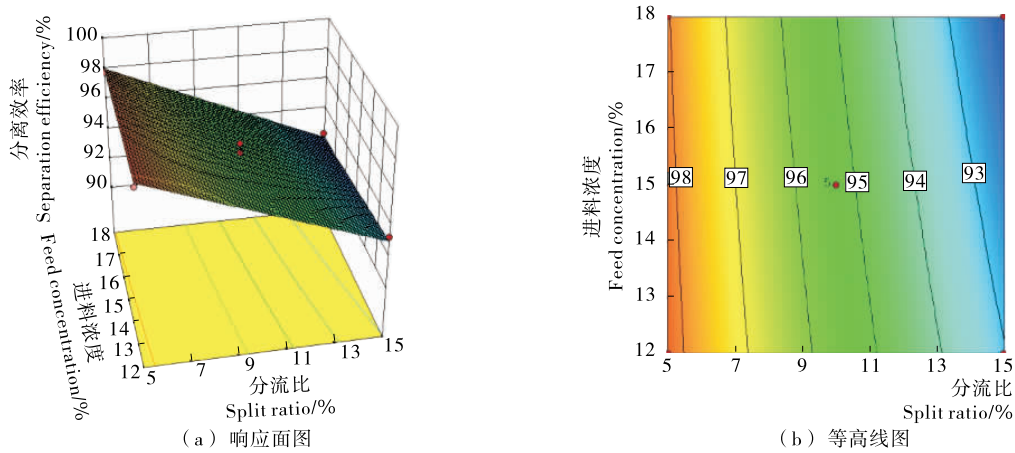


图9 分流比与进料浓度对水力旋流器分离效率的影响

Figure 9 Response surface plot and contour plot showing the separation efficiency as a function of the split ratio and feed concentration

4 结论

本研究分别讨论了进口流速、分流比和进料浓度对淀粉分离旋流器分离效果的影响,并通过引入 Box-Behnken 响应面法优化分析工艺参数期望最大化利用旋流器提高分离效率。研究表明,进口流速、分流比和进料浓度对玉米淀粉颗粒分离效率均有很大的影响,其中分流比对其分离效率影响极显著,进料浓度和进口流速依次减小。在运用响应面法建立旋流分离性能与关键工艺参数的数学模型下对最佳工艺进行预测,发现预测值与实际值误差在5%以内,说明响应面法优化旋流器操作工艺参数是合理可行的,同时也为解决其他分离设备的分离性能优化提供了参考。

通过多因素联合试验可知,旋流器进口流速和分流比的交互效应显著,说明了旋流器操作工艺参数两两交互作用对分离性能存在影响,而并非简单的线性关系,也提高了一定的准确性。这不仅验证了俞建峰等^[14]指出的大米淀粉旋流分离中操作工艺参数间存在交互效应,以及旋流器分离不同物料时的最佳操作工艺参数有所差异,而且该优化方法更加简便、高效。同一最佳工艺参数下的不同结构旋流器对淀粉

分离性能也存在影响,本试验仅从关键的物性和操作参数优化旋流器提高了淀粉分离效率,却未考虑分离效率受旋流器结构参数(入口、溢流口、圆柱段、锥段、底流口等)限制的影响,以及该旋流器处理不同物料种类的分离性能如何都需要进一步探究。

参考文献

- [1] HE Wei, WEI Cun-xu. Progress in C-type starches from different plant sources[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 73: 162-175.
- [2] 陈启杰,周丽玲,董徐芳,等. 淀粉基膜的制备及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 211-215.
- [3] PRZETACZEK-ROZNOWSKA I. Physicochemical properties of starches isolated from pumpkin compared with potato and corn starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 101: 536-542.
- [4] 张力田. 变性淀粉[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1992: 4-6.
- [5] CHAN Wang, TANG Chuan-he, XIONG Fu, et al. Granular size of potato starch affects structural properties, octenyl succinic anhydride modification and flow ability[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 453-459.

(下转第 208 页)

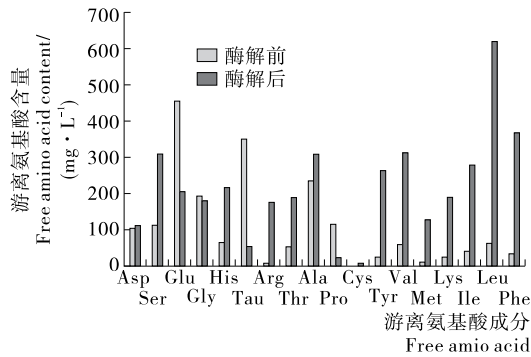


图3 酶解后游离氨基酸组成的变化

Figure 3 The changes of free amino acid before and after enzymatic hydrolysis

水解效果最佳。还通过正交试验优化了酶解工艺,结果发现在酶解温度 50 ℃、pH 值 8.5、中性蛋白酶和 Flavourzyme 的加酶量分别为 0.75% 和 1.50%、底物浓度 5%、水解时间 2.5 h 条件下酶解效率最高,水解度和氮收率分别为 37.11% 和 92.5%,酶解产物澄清无苦味及腥味。经酶解后,鸡骨泥的游离氨基酸含量显著增加,尤其是亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、酪氨酸等含量显著提高。本试验所开发的双酶水解鸡骨泥工艺对提高鸡骨利用效率有一定的应用价值。

参考文献

[1] 赵霞, 马丽珍. 骨的综合利用[J]. 食品科技, 2003(4): 87-90.
 [2] 曹雁平. 我国禽畜骨综合加工利用的现状[J]. 粮油加工与食品机械, 2001(9): 6-8.
 [3] 李睿, 王海燕, 尚永彪. 鸡骨的综合利用研究进展[J]. 肉类工业, 2010(11): 54-57.
 [4] 丁小燕, 张雯, 陈延锋, 等. 复合风味蛋白酶水解鸡骨泥工艺条件的研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 88-92.
 [5] 汪兰, 吴文锦, 李新, 等. 复合酶解鸡骨泥工艺[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 4-8.
 [6] 马亚萍, 白腾辉, 康壮丽, 等. 响应面法优化鸡骨蛋白酶解工艺条件[J]. 食品工业科技, 2015, 36(19): 219-223.
 [7] 张楨, 马海霞, 杨贤庆, 等. 罗非鱼下脚料酶解液脱腥去苦的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 27-30.
 [8] 张恒, 邹应龙. 鸡骨的酶解及酶解液的电泳分析[J]. 食品与发酵工业, 2010(9): 102-105.
 [9] ALDER-NISSEN J. Enzymic hydrolysis of food protein[M]. London, UK: Elsevier Applied Science, 1986: 110-131.
 [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.124—2016 食品中氨基酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
 [11] 吴贵生. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 76-107.

(上接第 53 页)

[12] INAZU T, IWASAKI K I, FURUTA T. Effect of temperature and relative humidity on drying kinetics of fresh Japanese noodle (udon) [J]. Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie, 2002, 35(8): 649-655.
 [13] 王杰, 张影全, 刘锐, 等. 挂面干燥工艺研究及其关键参数分析[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 88-93.
 [14] 武亮, 刘锐, 张波, 等. 干燥条件对挂面干燥脱水过程的影响[J]. 现代食品科技, 2015(9): 191-197.
 [15] LIU Yun-hong, SUN Yue, MIAO Shuai, et al. Drying characteristics of ultrasound assisted hot air drying of Flos Lonicerae [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4 955-4 964.

[16] SHI Qi-long, XUE Chang-hu, ZHAO Ya, et al. Drying characteristics of horse mackerel (Trachurus japonicus) dried in a heat pump dehumidifier [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(1): 12-20.
 [17] 李叶贝, 任广跃, 屈展平, 等. 不同粒度马铃薯全粉对复合面条品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(19): 55-60.
 [18] 杨玲. 甘蓝型油菜籽热风干燥传热传质特性及模型研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 40-51.
 [19] 孟岳成, 王君, 房升, 等. 熟化红薯热风干燥特性及数学模型适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 387-392.
 [20] 孟岳成, 王雷, 陈杰, 等. 姜片热风干燥模型适用性及色泽变化[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 100-105.

(上接第 83 页)

[6] FARMAKIS L, KOLIADIMA A, KARAIKAKIS G, et al. Study of the influence of surfactants on the size distribution and mass ratio of wheat starch granules by sedimentation/steric field-flow fractionation [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6): 961-972.
 [7] 蒋明虎. 旋流分离技术研究及其应用[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(5): 101-109.
 [8] 曹仲文, 袁惠新. 旋流器中分散相颗粒动力学分析[J]. 食品与机械, 2006, 22(5): 74-76, 92.
 [9] ABDOLLAHZADEH L, HABIBIAN M, ETEZAZIAN R, et al. Study of particle's shape factor, inlet velocity and feed concentra-

tion on mini-hydrocyclone classification and fishhook effect[J]. Powder Technology, 2015, 283: 294-301.
 [10] 黄圣鹏. 液-液分离旋流器数值模拟及应用研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2008: 1-2.
 [11] 牛伟. 溢流管直径对旋流器分离效率影响的数值模拟[J]. 化工技术与开发, 2015, 44(1): 45-48.
 [12] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 132-137.
 [13] 曾兴钢, 邓松圣, 肖玉林, 等. 油-水旋流器颗粒体积分数及粒级效率数值模拟[J]. 后勤工程学院学报, 2013, 29(1): 16-20.
 [14] 俞建峰, 傅剑, 谢耀聪, 等. 淀粉分离用超重力微旋流装置分离性能研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 99-103.