

基于微旋流装置的大米淀粉吸附亚甲基蓝性能研究

Study on the removal of methylene blue using rice starch as an adsorbent by mini-hydrocyclone

吴 撼^{1,2} 俞建峰^{1,2} 姜雨婷^{1,2} 何诗元^{1,2} 赵 江^{1,2}

WU Han^{1,2} YU Jian-feng^{1,2} JIANG Yu-ting^{1,2} HE Shi-yuan^{1,2} ZHAO Jiang^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:以大米淀粉为吸附剂,在微旋流器中吸附亚甲基蓝水溶液模拟的印染废水。通过单因素试验分析淀粉浓度、分流比和进料流量对吸附效率和分离效率的影响规律。运用响应面分析法,对试验参数进行优化。结果表明:淀粉浓度、分流比和进料流量对吸附效率和分离效率均有影响,对吸附效率影响的大小顺序为淀粉浓度>分流比>进料流量,对分离效率影响的大小顺序为分流比>进料流量>淀粉浓度。综合考虑吸附效率和分离效率后得到最佳参数条件为:淀粉浓度 1.0%,分流比 19%,进料流量 1 080 kg/h,该条件下吸附效率为 69.2%,分离效率为 74.3%。

关键词:微旋流装置;旋流吸附;大米淀粉;亚甲基蓝

Abstract: Rice starch was used as an adsorbent to adsorb the dyeing wastewater simulated by methylene blue in mini-hydrocyclone. The single experiments were used to explore the effect of starch concentration, split ratio and feed flow rate on the efficiency of adsorption and separation. Moreover, the response surface analysis method was used to optimize process parameters. The results showed that the starch concentration, split ratio and feed flow rate all influenced the efficiency of adsorption and separation. The order of effect on adsorption efficiency was as followed: starch concentration > split ratio > feed flow rate, and the order of effect on separation efficiency was as followed: split ratio > Feed flow rate > starch concentration. The

optimal parameters condition obtained by response surface method was as followed: starch concentration was 1.0%, split ratio was 19%, and feed flow rate was 1 080 kg/h. Under the control of these conditions, the efficiency of adsorption and separation was 69.2% and 74.3%, respectively.

Keywords: mini-hydrocyclone; cyclone adsorption; rice starch; methylene blue

大米是中国及东南亚国家的主要粮食,其主要成分为淀粉。大米产量很大,仅中国年产量就达到 1.4×10^8 t,可用于加工淀粉及其深加工产品^[1]。常见淀粉有好几种,如玉米淀粉,小麦淀粉和马铃薯淀粉,相较于前几种淀粉,大米淀粉因其特殊的理化特性,常被作为增稠剂、胶凝和填充剂应用于各类食品加工和工业生产中。目前,对于大米淀粉结构性质与应用的研究已成为众多国内外学者研究的课题^[2-4]。

淀粉及其衍生物均因具有良好的吸附性,可应用于印染污水的处理^[5]。目前,对于印染污水的处理方法主要有物理法(絮凝沉淀法^[6]、吸附法^[7])、化学法(电化学法^[8]、氧化法^[9])和生物法^[10]等。其中,吸附法由于具有高效、简便、稳定等优点,成为了处理印染废水的主要手段之一^[11]。同时,相较于其他物质,大米淀粉作为一种常见物质,具有可再生、无污染、来源广泛、成本低廉等优点,可作为一种较好的吸附剂来吸附印染污水。张甲奇等^[12]研究了大米多孔淀粉对亚甲基蓝的吸附效果,Guo 等^[13]探讨了交联多孔淀粉的吸附性能,均取得了较好的效果。

水力旋流器作为一种重要的分离装置,具有结构简单、操作简单、分离效果好等优点,广泛应用于石油、化工、食品、环保等行业^[14]。目前对于淀粉及其衍生物吸附印染废水的研究较多,但使用水力旋流器作为试验装置并探讨旋流器参数对试验结果影响的研究较少,对于基于微旋流装置的大米淀粉吸附亚甲基蓝性能的研究尚未见报道。本研究拟采用

基金项目:国家食品科学与工程一流学科建设项目资助(编号:JUF-STR20180205);江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(编号:FMZ201807);2017 年江苏省研究生实践创新计划项目(编号:SJCX17_0484);2017 年江苏省大学生创新创业训练计划项目(编号:2017126Z);2018 年江苏省研究生实践创新计划项目(编号:SJCX18_0627)

作者简介:吴撼,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:俞建峰(1974—),男,江南大学教授、博士。

Email: robotmecu@126.com

收稿日期:2018-03-05

微旋流器为试验装置,以大米淀粉为吸附剂对亚甲基蓝进行吸附,通过单因素试验及响应面分析法对试验参数进行优化分析,以期为大米淀粉在印染污水处理领域的应用提供理论支持。

1 材料与方法

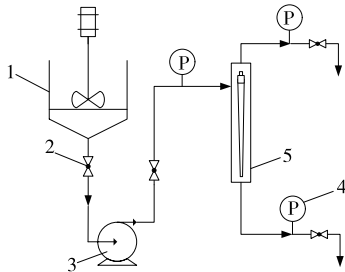
1.1 材料与仪器

大米淀粉:含水量 6.1%(根据 GB/T 12087—2008 测定),破碎淀粉含量约为 2.5%^[15],安徽省联河米业有限公司;

亚甲基蓝:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
超重力微旋流装置(图 1):旋流管直径 8 mm,实验室自制;

电子精密天平:ARB120 型,奥豪斯国际贸易有限公司;
恒温鼓风烘干干燥箱:DHG-9076 型,上海精宏实验设备有限公司;

可见分光光度计:722 型,上海欣茂仪器有限公司;
高速离心机:TGL-16C 型,上海安亭科学仪器厂。



1. 物料罐 2. 控制球阀 3. 多相流泵 4. 压力表 5. 旋流管
图 1 微旋流装置示意图

Figure 1 The schematic of mini-hydrocyclone

1.2 主要试验方法

1.2.1 试验样品的配置与旋流时间 试验前准确称取符合试验条件所需浓度的淀粉与亚甲基蓝,将配置试验样品的自来水分 2 份,分别将淀粉与亚甲基蓝倒入进行配置,防止样品在未加入到旋流器试验装置前即发生吸附。试验时,将二者同时倒入微旋流装置的物料罐中,搅拌使其分散均匀后即可开始试验。因大米淀粉对亚甲基蓝的吸附较快且为了防止因旋流时间过长,导致温度上升对试验结果产生影响,故采用单次旋流的方法。

1.2.2 吸附效率的测定 淀粉对亚甲基蓝的吸附效果可通过测量吸附前后亚甲基蓝的浓度变化获得。通过分光光度法测量亚甲基蓝浓度^[16],首先建立亚甲基蓝浓度标准曲线,试验时对旋流器的底流和溢流分别进行取样,对溢流口样品进行离心,取上清液,在分光光度计中测量其吸光度,根据建立的浓度标准曲线,获得亚甲基蓝的浓度。每次取 3 组样品,分别测量后取平均值作为亚甲基蓝出口浓度。淀粉对亚甲基蓝的吸附效率按式(1)计算:

$$\eta = \frac{C_o - C_i}{C_o} \times 100\%, \tag{1}$$

式中:

η —— 亚甲基蓝吸附效率,%;
 C_o —— 亚甲基蓝进口质量浓度,mg/L;
 C_i —— 亚甲基蓝溢流口出口质量浓度,mg/L。

1.2.3 分离效率的测定 总分离效率是反映旋流器性能的重要参数^[17],总分离效率定义为分离出的颗粒量与进入旋流器的颗粒总量之比^[18]。

(1) 分流比 F 测定:旋流器的分流比通过装置的阀门进行调节,而流量则通过量筒和秒表的配合使用得出,分别计算出旋流装置的底流和溢流质量流量,按式(2)计算分流比。

$$F = \frac{Q_u}{Q_o + Q_u} \times 100\%, \tag{2}$$

式中:

F —— 微旋流装置分流比,%;
 Q_u —— 微旋流装置的底流质量流量,kg/h;
 Q_o —— 微旋流装置的溢流质量流量,kg/h。

(2) 底流质量浓度测量:对每个试验点进行 3 次取样,取样后将底流样品分别放入烘干机中进行烘干处理,测量烘干前后样品质量,取 3 组样品的平均值为最终的底流质量浓度,按式(3)计算底流淀粉质量浓度。

$$C_u = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\%, \tag{3}$$

式中:

C_u —— 底流淀粉质量浓度,%;
 m_0 —— 空烘干器皿的质量,g;
 m_1 —— 样品与烘干器皿的总质量,g;
 m_2 —— 烘干后样品与烘干器皿的总质量,g。

(3) 总分离效率的测定:计算方法见式(4)。

$$E = \frac{Q_u C_u}{Q_i C_i} \times 100\%, \tag{4}$$

式中:

E —— 微旋流装置的总分离效率,%;
 Q_u —— 微旋流装置的底流质量流量,kg/h;
 Q_i —— 微旋流装置的进料质量流量,kg/h;
 C_u —— 微旋流装置的底流质量浓度,%;
 C_i —— 微旋流装置的进料质量浓度,%。

1.2.4 单因素试验设计 分别以淀粉浓度、分流比和进料流量为变量,以吸附效率和分离效率为评价指标,进行单因素试验以确定变量的适宜范围。

(1) 淀粉浓度:固定分流比 35%,进料流量 1 150 kg/h,设置淀粉浓度分别为 0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%,1.2%。

(2) 分流比:固定淀粉浓度 0.6%,进料流量 1 150 kg/h,设置分流比分别为 10%,20%,30%,40%,50%,60%。

(3) 进料流量:固定淀粉浓度 0.6%,分流比 35%,设置进料流量分别为 900,1 000,1 100,1 200,1 300,1 400 kg/h。

1.2.5 响应面优化试验设计 基于单因素试验的结果,以大米淀粉浓度、分流比、进料流量为自变量,以吸附效率(Y_1)和分离效率(Y_2)为响应值,采用 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,用 Design-Expert 8.0.5b 软件设计三因素三水平

响应面试验,并对试验结果进行分析,根据结果确定各项参数的最佳条件。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 淀粉浓度对吸附效率和分离效率的影响 由图 2 可知,随着淀粉浓度的逐渐增加,淀粉对亚甲基蓝的吸附效率不断提高,最终趋向于平稳。可能是淀粉作为吸附剂,其浓度越高,吸附效果越好,当淀粉浓度达到一定程度时,淀粉的吸附能力达到饱和,最终趋向稳定。随着淀粉浓度的逐渐增加,淀粉的分离效率呈先增加后下降的趋势,当淀粉浓度为 0.8%时,分离效率达到最高(75.6%)。可能是初始浓度一定程度的增大有利于分离,但随着淀粉浓度的不断增大,颗粒间的碰撞产生的能耗也在增加,导致旋流器中流体的离心加速度和切向速度减小,导致分离效率降低,最终超过旋流器的分离能力。

2.1.2 分流比对吸附效率和分离效率的影响 由图 3 可知,随着分流比的逐渐增加,吸附效率和分离效率均呈先上升后下降的趋势,当分流比为 21%时,吸附效率和分离效率均达到最大值,分别为 60.1%和 77.6%,随后开始下降。可能是分流比会对旋流器内流体的流型产生影响,流型主要反映回流区的大小与位置。分流比较小时,一定程度上的增大,会增

大回流区的范围,增加颗粒的停留时间,有利于吸附与分离过程的进行;但是分流比过大时,回流区范围过大,停留时间过长,在底流口附近会引起夹带,导致吸附效率和分离效率的降低^[19]。

2.1.3 进料流量对吸附效率和分离效率的影响 由图 4 可知,随着进料流量的逐渐增加,淀粉对亚甲基蓝的吸附效率呈先上升后下降的趋势,当进料流量为 1 099 kg/h 时,吸附效率和分离效率均达到最高值,分别为 58.5%和 73.4%。可能是随着流量的增大,淀粉与亚甲基蓝充分接触,吸附效率增大,进料流量达到一定程度后,过大的流量产生流体的震荡则会破坏淀粉对亚甲基蓝的吸附,吸附效率降低;同时进料流量的增加使得旋流器内离心力增大,有利于分离的进行,但流量达到一定程度后,剪切力的增加会破坏流体的连续性,使得水滴破碎,导致分离效率降低^[20]。

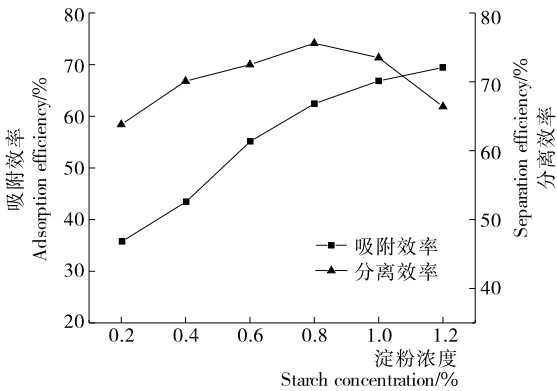


图 2 淀粉浓度对吸附效率和分离效率的影响

Figure 2 Effect of starch concentration on adsorption efficiency and separation efficiency

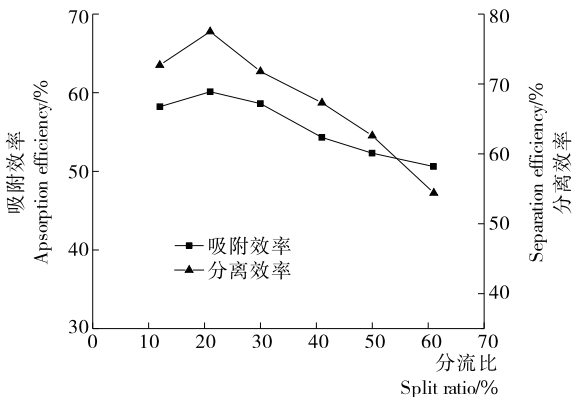


图 3 分流比对吸附效率和分离效率的影响

Figure 3 Effect of the split ratio on adsorption efficiency and separation efficiency

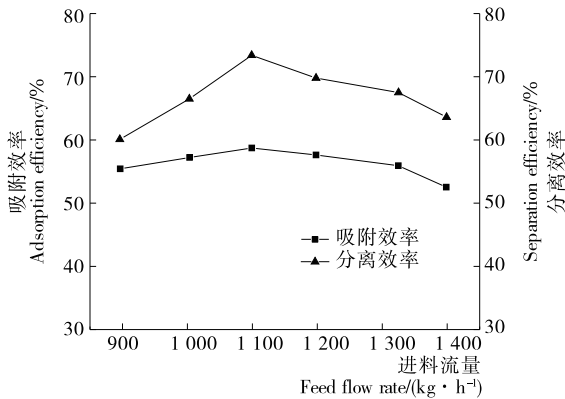


图 4 进料流量对吸附效率和分离效率的影响

Figure 4 Effect of the feed flow rate on adsorption efficiency and separation efficiency

2.2 响应面优化

2.2.1 响应面优化试验 在单因素试验的基础上,采用响应面 Box-Behnken 模型,设计三因素三水平的试验,试验因素和水平的选取见表 1,试验设计方案及处理结果见表 2。

2.2.2 二次回归方程和方差分析 对表 2 数据进行多元二次方程回归拟合与方差分析,得到的二次回归方程:

$$Y_1 = 66.18 + 3.66A - 0.36B + 0.050C - 0.25AB - 0.58AC - 0.025BC + 0.01A^2 - 1.39B^2 - 0.86C^2, \quad (5)$$

$$Y_2 = 76.24 - 0.19A - 0.62B + 0.44C - 0.050AB - 1.18AC - 0.15BC + 2.91A^2 - 7.68B^2 - 1.26C^2. \quad (6)$$

由表 3 可知,吸附效率模型与分离效率模型均极显著 ($P < 0.001$),且 2 个模型的失拟项不显著 ($P > 0.05$),表明非

表 1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

编码	A 淀粉浓度/ %	B 分流比/ %	C 进料流量/ (kg · h ⁻¹)
-1	0.6	10	1 000
0	0.8	20	1 100
1	1.0	30	1 200

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface experiments

试验号	A	B	C	Y ₁ 吸附效率/%	Y ₂ 分离效率/%
1	−1	−1	0	61.3	66.7
2	1	−1	0	68.6	66.5
3	−1	1	0	61.5	64.9
4	1	1	0	67.8	64.5
5	−1	0	−1	60.9	70.2
6	1	0	−1	69.9	72.1
7	−1	0	1	61.9	74.4
8	1	0	1	68.6	71.6
9	0	−1	−1	64.3	67.5
10	0	1	−1	63.2	67.2
11	0	−1	1	64.7	67.7
12	0	1	1	63.5	66.8
13	0	0	0	66.3	75.8
14	0	0	0	66.0	76.6
15	0	0	0	66.2	75.9
16	0	0	0	66.5	75.9
17	0	0	0	65.9	76.3

试验因素影响较小,模型较为适宜。吸附效率模型与分离效率模型的相关系数 R^2 分别为 0.989 7 和 0.978 5,表明吸附效率和分离效率实际值与预测值误差小;校正系数 R^2_{Adj} 分别为 0.976 5 和 0.965 4,说明模型能够用于解释 97.65% 和 96.54% 响应值的变化;变异系数 CV 分别为 0.65% 和 0.98%,均小于 10%;信噪比分别为 26.027 和 21.651,均大于 4。综上所述,模型可用于分析和预测试验的吸附效率和分离效率。

模型中 A 对 Y₁ 的影响极显著($P<0.01$),对 Y₂ 的影响不显著($P>0.05$),B 对 Y₁ 和 Y₂ 的影响均显著($P<0.05$),C 对 Y₁ 和 Y₂ 的影响均不显著($P>0.05$);交互项 AB 和 BC 对 Y₁ 和 Y₂ 的影响均不显著($P>0.05$),AC 对 Y₁ 和 Y₂ 的影响均极显著($P<0.01$);二次项 A² 对 Y₁ 的影响不显著($P>0.05$),对 Y₂ 的影响极显著($P<0.01$),B² 和 C² 对 Y₁ 和 Y₂ 的影响均显著($P<0.01$)。

2.2.3 响应面交互作用分析 由图 5、8 可知,淀粉浓度对吸附效率影响大于分流比,而分流比对分离效率影响大于淀粉浓度。二者交互作用响应面图较陡峭,等高线图趋向于椭圆,说明有一定的交互作用,但由方差分析可知交互作用不

表 3 回归模型方差分析[†]

Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	指标	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	Y ₁	121.87	9	13.54	74.90	<0.000 1 **
	Y ₂	319.81	9	35.53	74.71	<0.000 1 **
A	Y ₁	107.31	1	107.31	593.58	<0.000 1 **
	Y ₂	0.28	1	0.28	0.59	0.467 1
B	Y ₁	1.05	1	1.05	5.81	0.046 7 *
	Y ₂	3.12	1	3.12	6.57	0.037 4 *
C	Y ₁	0.02	1	0.02	0.11	0.749 2
	Y ₂	1.53	1	1.53	3.22	0.115 9
AB	Y ₁	0.25	1	0.25	1.38	0.278 1
	Y ₂	0.01	1	0.01	0.02	0.888 8
AC	Y ₁	1.32	1	1.32	7.32	0.030 4 **
	Y ₂	5.52	1	5.52	11.61	0.011 3 **
BC	Y ₁	2.50×10 ^{−3}	1	2.50×10 ^{−3}	0.01	0.909 7
	Y ₂	0.09	1	0.09	0.19	0.676 7
A ²	Y ₁	4.21×10 ^{−4}	1	4.21×10 ^{−4}	2.33×10 ^{−3}	0.962 9
	Y ₂	35.59	1	35.59	74.83	<0.000 1 **
B ²	Y ₁	8.14	1	8.14	45.00	0.000 3 **
	Y ₂	248.51	1	248.51	522.47	<0.000 1 **
C ²	Y ₁	3.15	1	3.15	17.43	0.004 2 **
	Y ₂	6.66	1	6.66	14.00	0.007 2 **
残差	Y ₁	1.27	7	0.18		
	Y ₂	3.33	7	0.48		
失拟差	Y ₁	1.04	3	0.35	6.07	0.067 1
	Y ₂	2.76	3	0.92	6.43	0.052 1
纯误差	Y ₁	0.22	4	0.06		
	Y ₂	0.57	4	0.14		
总变异	Y ₁	123.13	16			
	Y ₂	323.14	16			

† ** 表示差异极显著,P<0.01; * 表示差异显著,P<0.05。

显著。由图 6、9 可知,淀粉浓度对吸附效率影响大于进料流量,进料流量对分离效率影响大于淀粉浓度。二者交互作用响应面图较陡峭,等高线图趋向于椭圆,交互作用显著。由图 7、10 可知,分流比对吸附效率和分离效率影响均大于进料流量,二者交互作用等高线图趋向于椭圆,说明有一定的

交互作用,但由方差分析可知交互作用不显著。2.2.4 最佳参数条件验证 通过对吸附效率和分离效率回归模型进行分析,在综合考虑 2 个试验结果和实际操作情况下得到最佳参数组合为:淀粉浓度 1.0%、分流比 19%、进料流量 1 080 kg/h,该条件下吸附效率为 69.2%,分离效率为

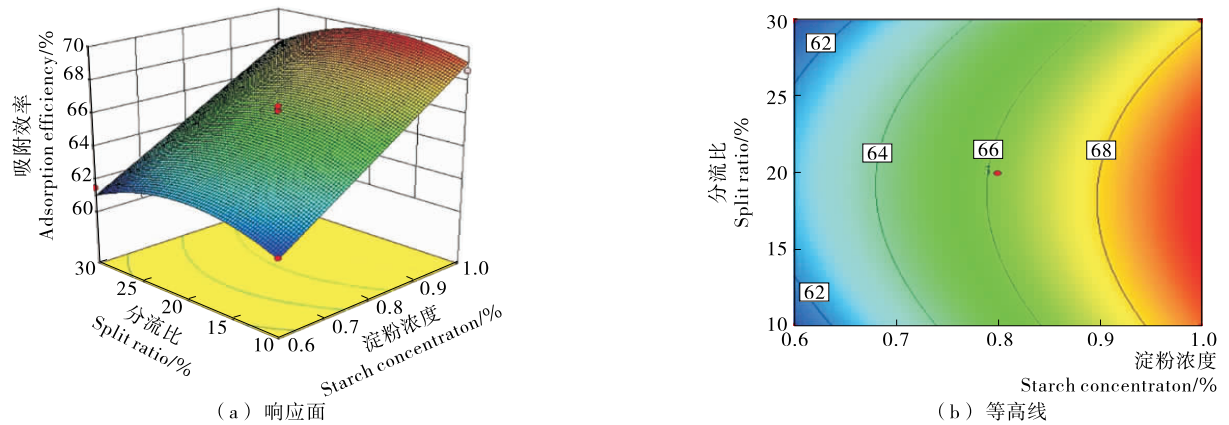


图 5 淀粉浓度和分流比对吸附效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 5 Response surface and contour plots for the interaction effects of starch concentration and split ratio on the adsorption efficiency

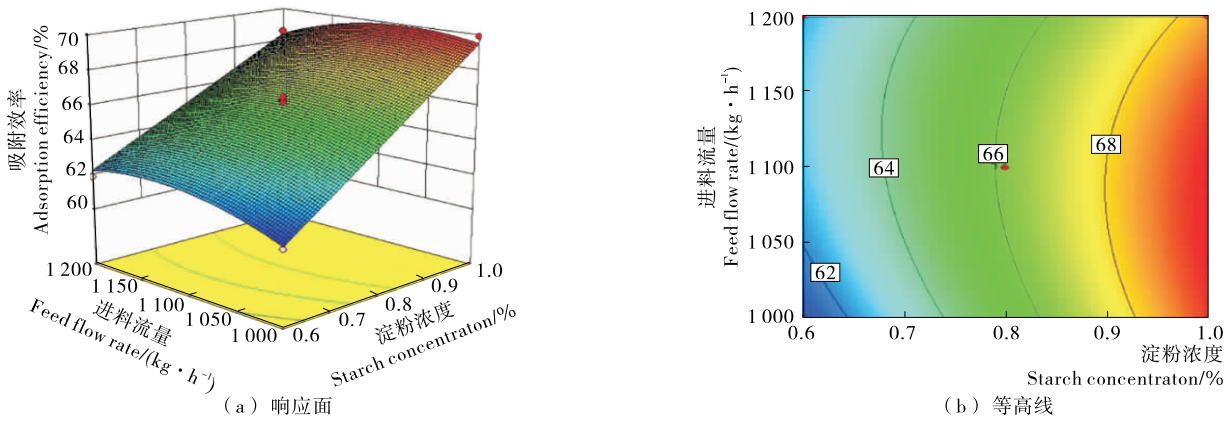


图 6 淀粉浓度和进料流量对吸附效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 6 Response surface and contour plots for the interaction effects of starch concentration and feed flow rate on adsorption efficiency

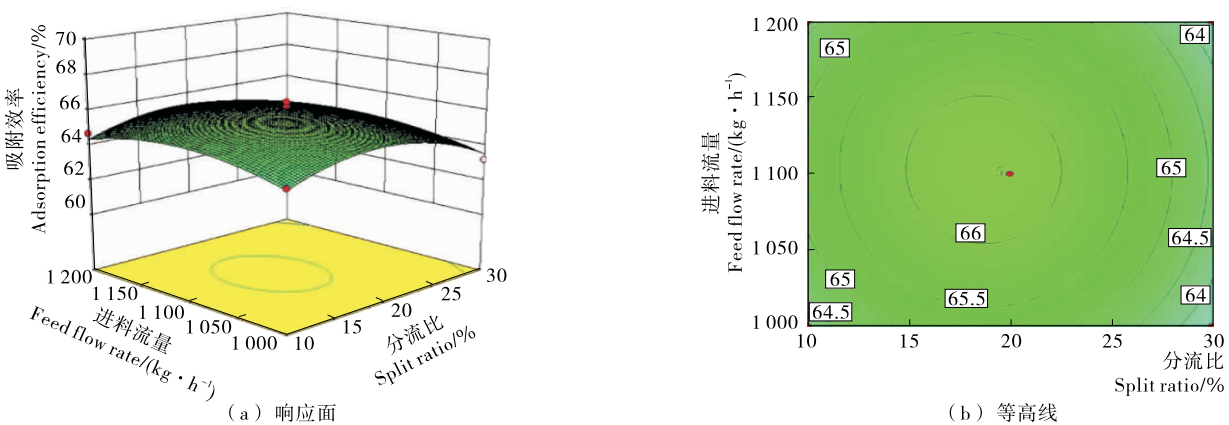


图 7 分流比和进料流量对吸附效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 7 Response surface and contour plots for the interaction effects of split ratio and feed flow rate on adsorption efficiency

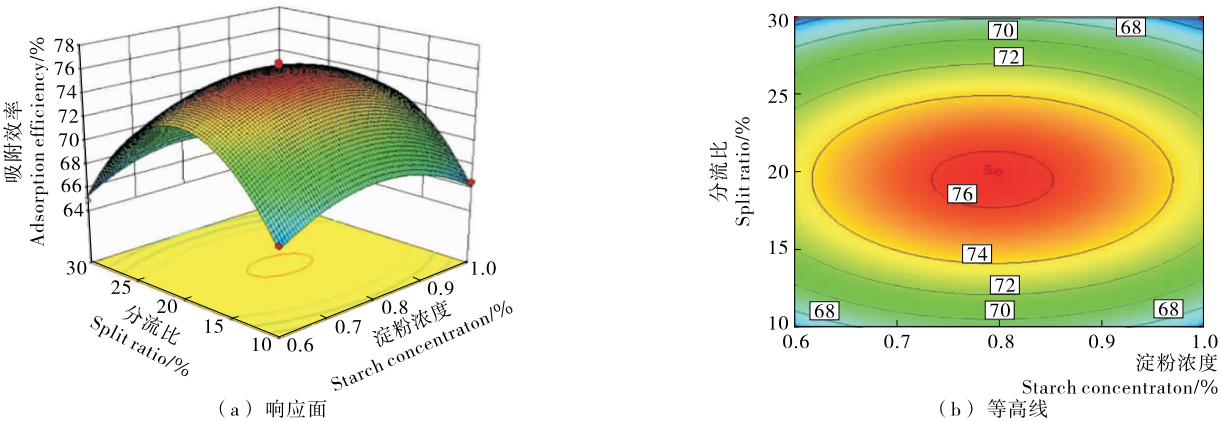


图 8 淀粉浓度和分流比对分离效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 8 Response surface and contour plots for the interaction effects of starch concentration and split ratio on separation efficiency

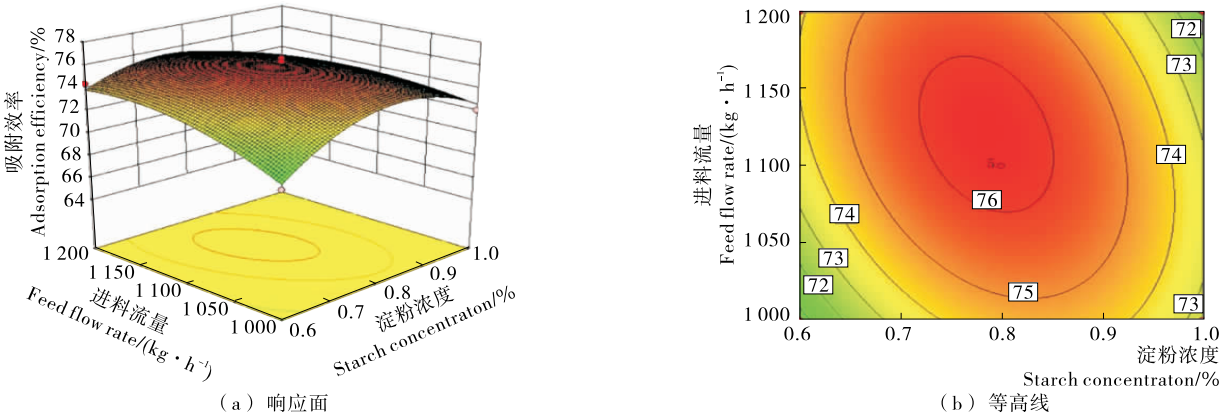


图 9 淀粉浓度和进料流量对分离效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 9 Response surface and contour plots for the interaction effects of starch concentration and feed flow rate on separation efficiency

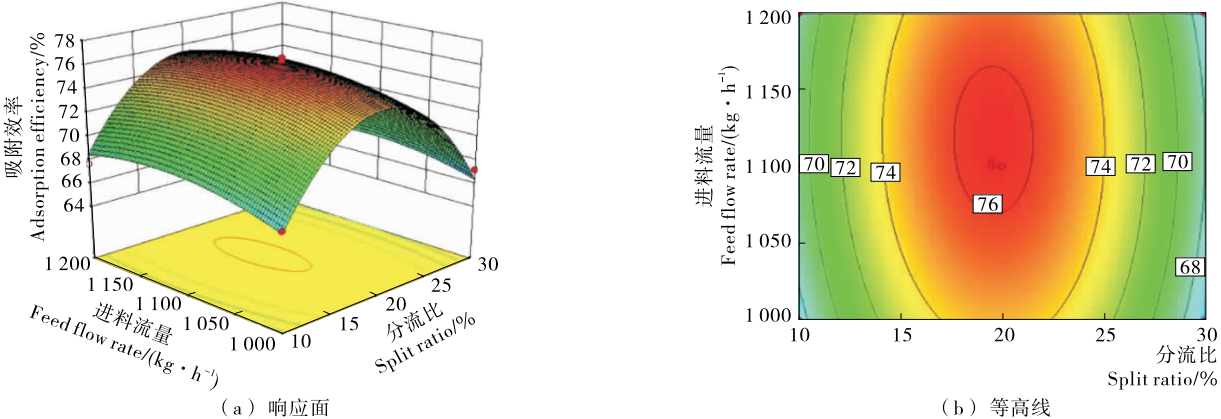


图 10 分流比和进料流量对分离效率交互作用的响应面图和等高线

Figure 10 Response surface and contour plots for the interaction effects of split ratio and feed flow rate on separation efficiency

74.3%。按此工艺参数进行 3 次平行实验验证,测得的吸附效率为 68.1%,分离效率为 73.6%,与预测值相差较小,所以所建立模型能够较好地预测吸附效率和分离效率。

3 结论

本试验探讨了淀粉浓度、分流比和进料流量对淀粉吸附

亚甲基蓝过程中吸附效率和分离效率的影响,并通过响应面法对试验的参数进行优化。结果表明,淀粉浓度对吸附效率的影响较大,其次为分流比和进料流量,而对分离效率影响较大的是分流比,其次为进料流量和淀粉浓度。此外,通过响应面法得知淀粉浓度与进料流量之间的交互作用明显,说明旋流器的各个参数对旋流器的性能影响存在交互作用,这

为旋流器应用于旋流吸附方面研究提供了参考。

影响旋流器性能的参数较多,如结构参数、操作参数和物性参数^[21]。本试验仅仅研究了操作参数和物性参数的一部分,而忽略了结构参数和其他因素对旋流器性能的影响,同时,淀粉的性质如破碎淀粉的含量、试验温度等,均会对吸附效果产生影响,这些将在接下来的研究中进行探讨。

参考文献

[1] 顾正彪,李兆丰,鸿雁,等. 大米淀粉的结构、组成与应用[J]. 中国粮油学报, 2004(2): 21-27.

[2] 周林秀,丁长河. 大米淀粉的提取及其在食品工业中的应用[J]. 农产品加工: 学刊, 2012(11): 191-193.

[3] 赵冰,陈佩,庞宇辰,等. 不同直链淀粉含量大米淀粉性质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 72-75..

[4] CHUNG H J, LIU Q, LEE L, et al. Relationship between the structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of rice starches with different amylose contents[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 968-975.

[5] 杨波,杨光,刘灿召,等. 玉米微孔淀粉与原淀粉吸附性质的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 122-124.

[6] 吴忠,王亮. 黏土吸附-絮凝沉淀去除水中亚甲基蓝和罗丹明 B[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 220-222, 227.

[7] RASTOGI K, SAHU J N, MEIKAP B C Meikap, et al. Removal of methylene blue from wastewater using fly ash as an adsorbent by hydrocyclone[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(2/3): 531-540.

[8] 葛建团,曲久辉. 电化学方法用于酸性红 b 模拟废水脱色试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(5): 12-14.

[9] 陈志刚,郭亭亭,李霞章,等. 凹凸棒土负载 CeO₂催化氧化处理

亚甲基蓝染料废水[J]. 功能材料, 2009, 40(10): 1 709-1 712.

[10] MONDAL P K, CHAUHAN B. Microbial degradation of dye-containing wastewater[J]. Environment Science and Engineering, 2012, 12: 317-338.

[11] 廖钦洪,刘庆业,蒙晁武,等. 稻壳基活性炭的制备及其对亚甲基蓝吸附的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(11): 2 447-2 452.

[12] 张甲奇,张燕燕. 大米多孔淀粉及大米多孔酯化淀粉吸附特性的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 108-111.

[13] GUO Lei, LI Gui-ying, LIU Jun-sheng, et al. Adsorption decolorization of methylene blue by crosslinked porous starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 93(2): 374-379.

[14] 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): 76-74, 92.

[15] 李玥,牟伯中,罗昌荣,等. 不同分离方法对大米淀粉理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15 796-15 798, 15 827.

[16] 涂逢樟,姚辉梅,林竹光,等. 分光光度法研究粉煤灰对亚甲基蓝的吸附及其机理研究[J]. 光谱实验室, 2010, 27(3): 1 116-1 121.

[17] 王勇,曾涛,徐银香,等. 水力旋流器固液分离特性的数值模拟与优化[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 78-83, 208.

[18] 袁惠新. 分离过程与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 38-40.

[19] 李雪斌,袁惠新. 影响水力旋流器分离性能因素分析[J]. 化工装备技术, 2005(5): 11-13.

[20] 刘洋,王振波. 水力旋流器分离效率影响因素的研究进展[J]. 流体机械, 2016, 44(2): 39-42.

[21] 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.

(上接第 64 页)

[18] 周竹,李小昱,高海龙,等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128-133.

[19] DONG Jin-lei, GUO Wen-chuan. Nondestructive determination of apple internal qualities using near-infrared hyperspectral reflectance imaging[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(10): 2 635-2 646.

[20] 文韬,洪添胜,李立君,等. 基于高光谱技术的霉变稻谷脂肪酸含量无损检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 233-239.

[21] GUO Wen-chuan, ZHAO Fan, DONG Jin-lei. Nondestructive measurement of soluble solids content of kiwifruits using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(1): 38-47.

[22] 蔡健荣,王建黑,陈全胜,等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报, 2009, 29(1): 127-131.

[23] 孙晔,顾欣哲,王振杰,等. 高光谱图像对灰葡萄球菌、匍枝根霉、炭疽菌的生长拟合及区分[J]. 食品科学, 2016, 37(3): 137-144.

[24] 许思,赵光武,邓飞,等. 基于高光谱的水稻种子活力无损分级检测[J]. 种子, 2016, 35(4): 34-40.

[25] 袁莹,王伟,褚璇,等. 光谱特征波长的 SPA 选取和基于 SVM

的玉米颗粒霉变程度定性判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 226-230.

[26] NIE Li-xing, DAI Zhong, MA Shuang-cheng. Enhanced accuracy of near-infrared spectroscopy for traditional chinese medicine with competitive adaptive reweighted sampling[J]. Analytical Letters, 2016, 49(14): 2 259-2 267.

[27] 潘磊庆,王振杰,孙柯,等. 基于计算机视觉的稻谷霉变程度检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 272-280.

[28] PU Hong-bin, SUN Da-wen, MA Ji. Using wavelet textural features of visible and near infrared hyperspectral image to differentiate between Fresh and frozen-thawed pork[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(11): 3 088-3 099.

[29] DONG Jin-lei, GUO Wen-chuan. Nondestructive determination of apple internal qualities using near-infrared hyperspectral reflectance imaging[J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(10): 2 635-2 646.

[30] 王玲娜,孙希芳,张芳,等. 金银花储藏过程中的美拉德反应[J]. 山东农业科技, 2017, 49(9): 82-87.

[31] 葛朝晖,张海娟. 基于化学成分含量变化的金银花药材保质期预测[J]. 中国药房, 2017, 28(12): 1 677-1 680.