

挤压复合酶法制备玉米多孔淀粉工艺参数优化^{*}

刘宇欣¹ 肖志刚^{1,2} 杨庆余¹ 王利民¹ 许慧¹ 陈昊¹

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 沈阳师范大学粮食学院, 沈阳 110034)

摘要: 以挤压机机筒温度、物料含水率、螺杆转速、模孔直径为考察因素, 多孔淀粉吸油率为评价指标, 通过单因素与响应面试验, 经 Design-Expert 软件处理, 建立各因素对指标影响的数值模型, 分析模型各因素之间交互作用对指标的影响。试验结果表明, 在机筒温度 68℃、物料含水率 42%、螺杆转速 150 r/min、模孔直径 12 mm 挤压条件下, 多孔淀粉吸油率为 62.13%, 比未经挤压的多孔淀粉吸油率提高 29.78%。扫描电镜显示挤压复合酶法制备的多孔淀粉微观结构呈多孔的蜂窝状。

关键词: 挤压 多孔淀粉 吸油率 糊化度

中图分类号: TS234⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0171-08

Optimization of Technology Parameters of Corn Porous Starch by Extrusion – Enzyme Synergistic Method

Liu Yuxin¹ Xiao Zhigang^{1,2} Yang Qingyu¹ Wang Limin¹ Xu Hui¹ Chen Hao¹

(1. Food Science College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Grain Science and Technology College, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: Porous starch was produced with corn starch by using extrusion pretreatment before enzymolysis, and the effect of system parameters on oil absorption rate of porous starch were investigated. Barrel temperature, moisture content of material, rotation speed of screw and aperture diameter of extruding machine were considered as factors, the oil absorption rate of porous corn starch was employed as evaluation index. Through the experiment of single factor and response surface experiment, with the aid of Design-Expert, the mathematical model of response factors on the index was established. The effect of interaction between factors of models on index was analyzed. The results indicated that the optimal extrusion conditions were barrel temperature of 68℃, moisture content of material of 42%, screw speed of 150 r/min and the aperture diameter of 12 mm. Under the optimal conditions, the oil absorption rate was 62.13%, and the oil absorption rate had increased by 29.78% compared with that not treated with extrusion. SEM indicated that the microstructure of porous starch was alveolate.

Key words: Extrusion Porous starch Oil absorption rate Degree of gelatinization

引言

多孔淀粉 (Porous starch), 又称微孔淀粉 (Microporous starch) 或有孔淀粉, 是指用物理、机械

以及生物方法在低于淀粉糊化温度下水解各种生淀粉形成的一种中空的可变性淀粉^[1~3]。多孔淀粉在本质上仍然是淀粉, 与原淀粉有相似的性质, 但与原淀粉相比, 最明显的区别是由于多孔产生了很大的比

收稿日期: 2012-05-22 修回日期: 2012-06-26

^{*} 哈尔滨市学科带头人基金资助项目 (2012RFXXN107)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2012BAD34B02) 和黑龙江省教育厅科学技术研究重点资助项目 (12511Z006)

作者简介: 刘宇欣, 博士生, 主要从事粮食和油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: liuyuxindfxy@126.com

通讯作者: 肖志刚, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工及贮藏工程研究, E-mail: zhigangx@sina.com

表面积,因而具有很强的吸附能力,可用作吸附的载体,广泛应用于食品、医药等行业^[4~9]。

目前,多孔淀粉的制备方法主要有超声波照射、酸法、酶法等^[10~11]。酶法工艺简单易行,且得到的多孔淀粉具有较大的吸附量,故最有实用价值^[12]。不同原料或同一原料的不同处理方式均会影响多孔淀粉形成,因此寻求有效的预处理方法使淀粉原料适合多孔淀粉加工工艺要求,对提高多孔淀粉生产效率、降低生产成本、改善多孔淀粉性能有重要意义^[13]。

挤压加工是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化及成型等为一体的技术,在温度、水分、压力、剪切力的联合作用下,物料的性质发生了变化,其中重要的变化就是淀粉糊化^[14]。挤压膨化过程中淀粉是在低水分状态下的糊化过程,其糊化程度与挤压膨化过程中的工艺参数有着十分密切的联系。将原淀粉进行预糊化,可以使复合酶更有效地进行酶解,在淀粉颗粒上形成较好的孔洞,得到吸油率更高的多孔淀粉^[15]。本文对玉米淀粉挤压预处理后,再酶解制备多孔淀粉,研究不同挤压工艺参数对多孔淀粉吸附能力的影响,为进一步优化多孔淀粉制备工艺、提高多孔淀粉品质提供依据。

1 材料与方法

1.1 螺杆挤压机

挤压机为剖分式双螺杆挤压机,可沿轴向张开。其螺杆转速为 0~300 r/min 无级可调,机筒温度为 0~300℃ 连续可调。根据挤压机的工作原理和腔体内物料的运动特点,挤压机内物料运动过程可分为

输送区、过渡区和模头区 3 个区段。挤压机主机各部分的结构如图 1 所示。

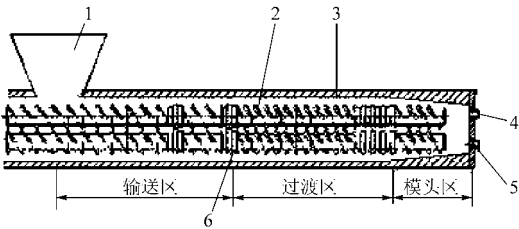


图 1 挤压机结构简图

Fig. 1 Extruder structure

1. 加料口 2. 螺杆 3. 机筒 4. 挤压料 5. 模孔 6. 阻流环

1.2 主要仪器与材料

市售玉米淀粉(淀粉质量分数 82.9%), α -淀粉酶(酶活力 3 000~5 000 U/g),糖化酶(10 万 U/g),磷酸氢二钠、柠檬酸、氢氧化钠等试剂均为国产分析纯。

DF110 型电子分析天平(中国轻工机械总公司常熟衡器工业公司),HH·SY11-Ni 4B 型恒温水浴锅(北京长风仪器仪表公司),HG101-1 型电热鼓风干燥箱(南京实验仪器厂),722 型可见光分光光度计(上海青华科技仪器有限公司),DS56-Ⅲ型双螺杆挤压膨化机(济南赛信膨化机械有限公司),DWF-100 型电动粉碎机(河北省黄州市科研仪器厂),循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司),低速离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司),磁力搅拌器(江苏省金坛市医疗仪器厂)。

1.3 试验方法

1.3.1 技术路线

技术路线如图 2 所示。

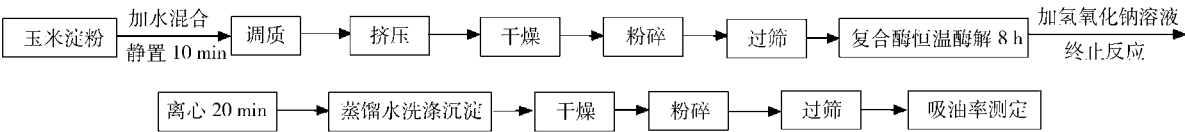


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

1.3.2 单因素试验

经预试验确定酶解条件为:复合酶(α -淀粉酶质量与糖化酶质量比为 1:4)添加质量分数 2.0%,酶解时间 8 h,溶液 pH 值 5.0,酶解温度 50℃、料液比 1:4(淀粉质量与缓冲溶液体积之比)。挤压条件优化试验均在此条件下进行。

针对机筒温度、物料含水率、螺杆转速、模孔直径 4 个因素,固定其他因素进行单因素挤压试验,考察各因素对酶解后淀粉吸油率的影响,同时结合糊化度指标分析挤压复合酶解制备多孔淀粉吸油率变化的原因。单因素试验条件为:挤压温度 35、45、

55、65 和 75℃;物料含水率 25%、30%、35%、40% 和 45%;螺杆转速 80、100、120、140 和 160 r/min;模孔直径 2、6、10、14 和 18 mm。

1.3.3 响应面试验

在单因素试验的基础上,确定各因素的取值范围,采取响应面中心组合设计,选出最佳的挤压工艺参数。由于吸油率是评价多孔淀粉质量的直观指标,所以在响应面试验中用吸油率作为唯一评价指标。以机筒温度、物料含水率、螺杆转速和模孔直径 4 个因素为自变量(X),以吸油率为响应值(Y),优化最佳参数。因素水平编码如表 1 所示。

表 1 因素水平编码
Tab.1 Factors and levels

水平	因素			
	机筒温度	物料含水率	螺杆转速	模孔直径
	$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/\%$	$x_3/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	x_4/mm
-2	55	35.0	120	6
-1	60	37.5	130	8
0	65	40.0	140	10
1	70	42.5	150	12
2	75	45.0	160	14

1.4 分析方法

1.4.1 多孔淀粉吸油率的测定

称取质量为 w_1 的多孔淀粉于 100 mL 烧杯中，量取适量大豆色拉油，恒温下混合搅拌 30 min，置于已知质量 w_0 的沙芯漏斗中抽滤 20 min，直至没有液滴滴下，称量沙芯漏斗与淀粉总质量 w_2 ，吸油率^[16]为

$$A_0 = \frac{w_2 - w_1 - w_0}{w_1} \times 100\%$$

1.4.2 糊化度的测定

参照碘呈色分析法^[17]测定。

2 单因素试验结果分析

2.1 机筒温度

图 3 为机筒温度对吸油率和糊化度的影响。从图 3 可以看出，吸油率随着机筒温度的升高而增加，在 65℃ 时达到最大，吸油率为 52.5%；当机筒温度继续升高时，吸油率下降。在 35~45℃ 时，由于温度较低、淀粉糊化现象并不明显，随着机筒温度升高到 55~65℃，淀粉开始部分糊化，这种轻度的糊化作用可以为酶解作用提供有利的酶解作用位点，有利于复合酶的作用，加快酶反应效率，增大淀粉孔径和孔深，从而使吸油率升高。而当机筒温度达到 75℃ 时，淀粉的糊化度过大，之后淀粉被过度酶解成较多的葡萄糖，淀粉颗粒面临崩溃，形成的孔穴效果变差，引起吸油率下降。综上所述，机筒温度选择 65℃。

2.2 物料含水率

图 4 为物料含水率对吸油率和糊化度的影响。从图 4 可以看出，物料含水率在 25%~40% 时吸油率随着水分的增加而增加，在 40%~45% 时吸油率呈下降趋势。当物料含水率在 25% 时淀粉在机筒内受强制流动的阻力较大，剪切作用加强，淀粉的糊化度较大，导致之后酶解过度，使淀粉的孔穴坍塌，故吸油率较小；当物料含水率增加到 40% 时淀粉在挤压机内所受的剪切强度降低，对淀粉分子间氢键的破坏减弱，使糊化度呈减小的趋势，这种程度提高

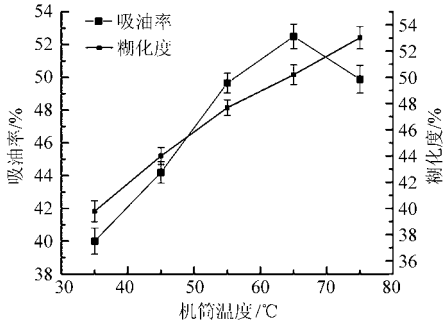


图 3 机筒温度对吸油率和糊化度的影响
Fig.3 Effect of barrel temperature on oil absorption rate and degree of gelatinization

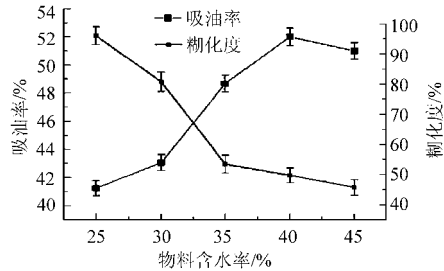


图 4 物料含水率对吸油率和糊化度的影响
Fig.4 Effect of moisture content on oil absorption rate and degree of gelatinization

后续的酶解作用，使淀粉的孔深增加、吸油率增加，最大值达到 52%；当物料含水率增大到 45% 时糊化度继续降低、使吸油率减小，同时较高的含水率不利于挤压机的运转。综上所述，物料含水率选择 40%。

2.3 螺杆转速

图 5 为螺杆转速对吸油率和糊化度的影响。从图 5 可以看出，吸油率随着螺杆转速的增加呈先增加后降低的趋势，140 r/min 时达到最大，吸油率为 52.7%。转速在 80~120 r/min 时随着螺杆转速的增加，剪切力逐渐增加，玉米淀粉分子结构空间增大，水分子易于渗入，糊化度上升，淀粉处于更容易被酶水解的状态，吸油率逐渐增加；当转速达到 160 r/min 时物料在挤压腔中停留时间逐步减小，淀粉的糊化度降低，使酶解作用的位点减少，吸油率下降。综上所述，螺杆转速选择 140 r/min。

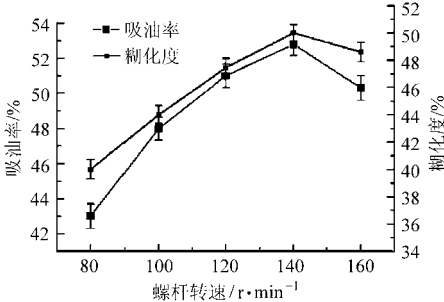


图 5 螺杆转速对吸油率和糊化度的影响
Fig.5 Effect of screw speed on oil absorption rate and degree of gelatinization

2.4 模孔直径

图 6 为模孔直径对吸油率和糊化度的影响。由图 6 可见,吸油率随模孔直径增大呈先增加后降低的趋势。这是因为当模孔直径过小时,模孔对物料阻滞作用加强,淀粉在挤压机内停留时间较长,受到的剪切力和压力也较大,导致淀粉发生过度糊化,酶解后的淀粉孔穴坍塌,吸油率较小;随模孔直径增大,物料在挤压机内受到的压力减小,淀粉糊化程度呈降低趋势,此时糊化程度利于复合酶作用,淀粉成孔效果较好,当模孔直径为 10 mm 时吸油率达到最大值 51.8%;当模孔直径继续增大时,淀粉在挤压机内停留时间过短,导致糊化程度不足,酶解效果变差吸油率降低。综上所述,模孔直径选择 10 mm。

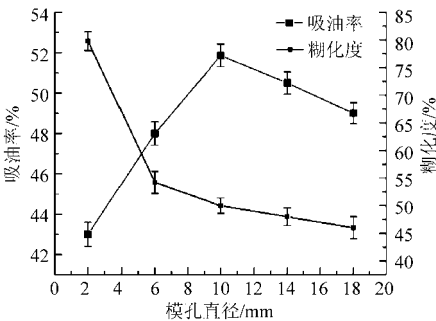


图 6 模孔直径对吸油率和糊化度的影响
Fig. 6 Effect of aperture diameter on oil absorption rate and degree of gelatinization

3 响应面试验数据分析

旋转中心组合设计试验安排与结果如表 2 所示。

3.1 吸油率回归方程

通过响应面回归过程数据分析,建立吸油率 Y 的二阶响应回归模型,并进而分析各试验因素 X 对响应值 Y 的影响。经分析整理,剔除不显著项,得到挤压复合酶法制备的多孔淀粉吸油率各因素编码值的回归方程为

$$Y = 58.96 + 2.53X_1 + 2.46X_2 + 2.32X_3 + 1.96X_4 + 1.49X_1X_3 - 1.80X_1^2 - 2.50X_2^2 - 1.22X_3^2 - 0.90X_4^2$$

3.2 回归方程方差分析

由表 3 方差分析可以看出,模型 p 小于 0.01,模型方程极显著,失拟 p 值大于 0.05 不显著,并且该模型 $R^2 = 0.9331$ (大于 0.8000),说明该方程与试验拟合良好,自变量与响应值之间线性关系显著,试验误差小,模型能较好地反映数据,同时此模型能充分地表明各因素之间的关系。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 、 X_4^2 项对挤压多孔淀粉的吸油率有显著影响,其他因素影响不显著。由 F 检验可以得到各因素贡献率由大到小为: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ,即机筒温度、物

表 2 试验安排及试验结果

Tab. 2 Experimental arrangement and results					
编号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y/\%$
1	1	1	1	1	62.78
2	1	1	1	-1	60.23
3	1	1	-1	1	57.70
4	1	1	-1	-1	51.63
5	1	-1	1	1	57.14
6	1	-1	1	-1	56.29
7	1	-1	-1	1	51.60
8	1	-1	-1	-1	44.92
9	-1	1	1	1	55.80
10	-1	1	1	-1	53.92
11	-1	1	-1	1	50.89
12	-1	1	-1	-1	49.32
13	-1	-1	1	1	48.89
14	-1	-1	1	-1	44.32
15	-1	-1	-1	1	51.63
16	-1	-1	-1	-1	44.28
17	2	0	0	0	56.00
18	-2	0	0	0	47.30
19	0	2	0	0	52.84
20	0	-2	0	0	44.89
21	0	0	2	0	58.55
22	0	0	-2	0	49.39
23	0	0	0	2	59.16
24	0	0	0	-2	51.39
25	0	0	0	0	59.06
26	0	0	0	0	59.23
27	0	0	0	0	58.45
28	0	0	0	0	59.44
29	0	0	0	0	58.61
30	0	0	0	0	59.15
31	0	0	0	0	60.68
32	0	0	0	0	57.34
33	0	0	0	0	59.01
34	0	0	0	0	60.43
35	0	0	0	0	55.86
36	0	0	0	0	60.29

表 3 方差分析

Tab. 3 Results of variance analysis					
方差来源	自由度	平方和	平均平方和	F	p
X_1	1	153.22	153.22	59.48	<0.0001
X_2	1	145.53	145.53	56.50	<0.0001
X_3	1	129.36	129.36	50.22	<0.0001
X_4	1	92.28	92.28	35.82	<0.0001
X_1X_3	1	35.34	35.34	13.72	0.0010
X_1^2	1	104.16	104.16	40.44	<0.0001
X_2^2	1	200.07	200.07	77.67	<0.0001
X_3^2	1	47.95	47.95	18.62	0.0002
X_4^2	1	25.80	25.80	10.02	0.0039
模型	9	933.72	103.72	40.27	<0.0001
失拟项	15	47.12	3.14	1.74	0.1788
误差	11	19.86	1.81		
总和	35	1000.69			

料含水率、螺杆转速、模孔直径。

3.3 自变量交互作用对响应值的影响规律

图 7~12 直观地反映了所建立模型各因素交互作用对挤压复合酶法制备的多孔淀粉吸油率的影响。

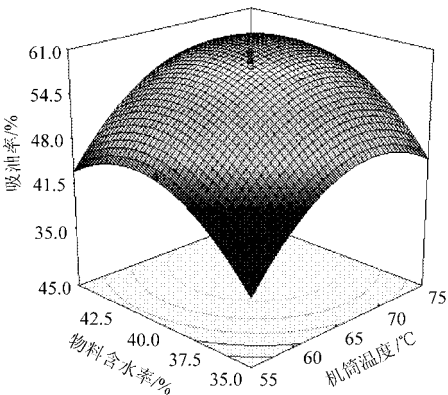


图 7 机筒温度和物料含水率对吸油率影响的响应面
Fig.7 Response surface for effects of barrel temperature and moisture content of material on oil absorption rate

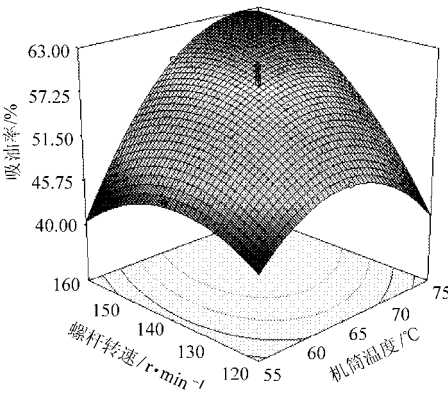


图 8 机筒温度和螺杆转速对吸油率影响的响应面
Fig.8 Response surface for effects of barrel temperature and screw speed on oil absorption rate

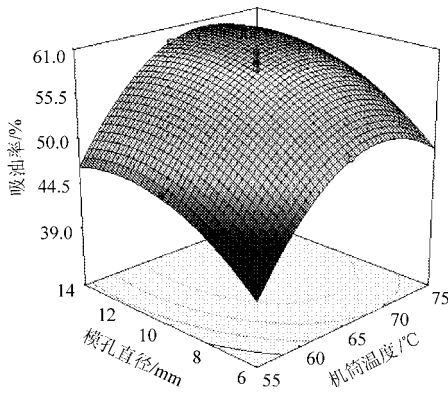


图 9 机筒温度和模孔直径对吸油率影响的响应面
Fig.9 Response surface for effects of barrel temperature and aperture diameter on oil absorption rate

由图 8 可知，在物料含水率 40%、模孔直径 10 mm 时，机筒温度和螺杆转速的交互作用显著，同时机筒温度对多孔淀粉吸油率的响应曲面相比螺杆

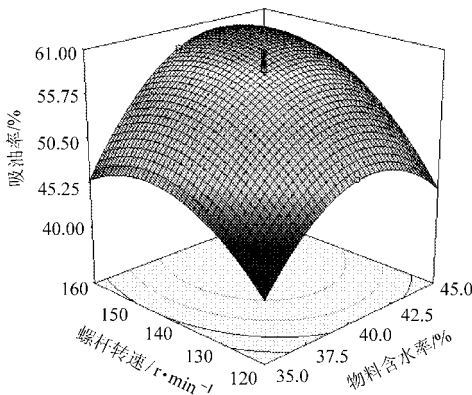


图 10 物料含水率和螺杆转速对吸油率影响的响应面
Fig.10 Response surface for effects of moisture content of material and screw speed on oil absorption rate

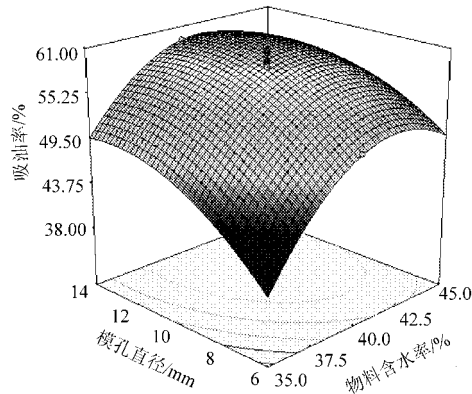


图 11 物料含水率和模孔直径对吸油率影响的响应面
Fig.11 Response surface for effects of moisture content of material and aperture diameter on oil absorption rate

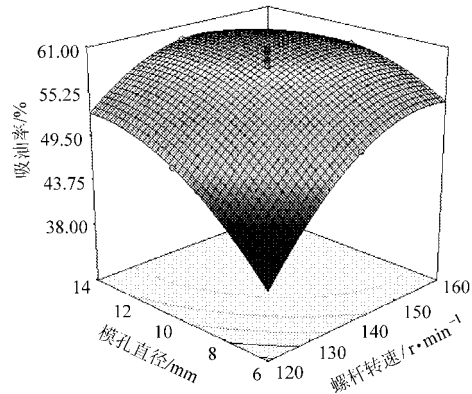


图 12 螺杆转速和模孔直径对吸油率影响的响应面
Fig.12 Response surface for effects of screw speed and aperture diameter on oil absorption rate

转速对多孔淀粉吸油率的响应曲面变化更为陡峭，说明机筒温度比螺杆转速对多孔淀粉吸油率的影响强度更大。机筒温度在 65.0~72.5℃，螺杆转速在 135~150 r/min 时，多孔淀粉的吸油率较高；而温度和螺杆转速过高或过低，都会导致吸油率下降。

如图 7、9 可知，在物料含水率 40%、螺杆转速 140 r/min、模孔直径 10 mm 的条件时，机筒温度和物料含水率，机筒温度和模孔直径的交互作用不显

著,相应的响应曲面较为平滑,但机筒温度的响应面变化趋势比物料含水率和模孔直径的变化趋势更为明显,说明机筒温度比物料含水率和模孔直径对多孔淀粉吸油率的影响作用更大。由图 10、11 可知,在机筒温度 65℃、螺杆转速 140 r/min、模孔直径 10 mm 时,物料含水率和螺杆转速,物料含水率和模孔直径的交互作用不显著,但物料含水率的变化趋势比螺杆转速和模孔直径的变化趋势更明显,说明物料含水率比螺杆转速和模孔直径对多孔淀粉吸油率的影响作用更大。由图 12 可知,在机筒温度 65℃,物料含水率 40% 时,螺杆转速和模孔直径的交互作用不显著,螺杆转速比模孔直径对多孔淀粉吸油率的影响作用更大。

3.4 自变量对响应值的影响规律

由图 7~9 可知,在挤压过程中机筒温度小于 60℃ 时,淀粉的糊化度相对较低。当温度介于 60~70℃ 时,机体内达到淀粉糊化温度,淀粉粒开始膨胀,淀粉的糊化程度逐渐增加,其糊化程度有利于复合酶的酶解作用,增大酶解过程中淀粉的孔径和孔深,从而使吸油率也逐渐增加;当温度继续升高时,淀粉糊化过度,使淀粉被酶解过度,淀粉的孔穴崩溃,导致吸油率下降。

由图 7、10 和 12 可知,多孔淀粉的吸油率与物料含水率在一定范围内呈正相关性,当物料含水率为 37.5%~42.5% 时,多孔淀粉吸油率随物料含水率的增加而较快增加。这是因为水是一种高效增塑剂和润滑剂,随着物料含水率的增加,物料粘性降低,流动阻力减小,淀粉在挤压机内所受的剪切强度降低,对淀粉分子间维系空间螺旋结构的氢键破坏减弱,使水解按螺旋路径不断深入^[2],可以使酶液更易进入淀粉颗粒内部反应,增加酶作用位点,从而加快酶反应效率,有利于淀粉产生多孔结构,使吸油率增加。

由图 8、10 和 12 可以看出,多孔淀粉的吸油率随螺杆转速的升高而先增加后降低。螺杆转速在 130~150 r/min 时,吸油率增长趋势较明显。这是因为在这一范围内的剪切作用可破坏淀粉颗粒表面的水束层,使水分易于进入淀粉颗粒内部,有利于淀粉的酶解。同时,螺杆转速产生的剪切力也可切断淀粉的长链,为酶解淀粉提供了更多的酶解位点。

由图 9、11、12 可知,多孔淀粉的吸油率随着模孔直径的增大而出现先增后降的趋势。当模孔直径较小时,淀粉受到了较大的压力和剪切力作用,糊化和降解较严重;当直径增大后,在挤压机各因素的作用下,糊化程度趋向利于复合酶的作用,吸油率增大。

3.5 最优条件的确立及验证

利用 Design-Expert 软件进一步对模型进行分析表明,在机筒温度 68.47℃、物料含水率 41.76%、螺杆转速 147.79 r/min、模孔直径 11.35 mm 的情况下,吸油率达到理论最大值 62.96%。考虑到试验条件的可操作性,将最优条件修正为:机筒温度 68℃,物料含水率 42%,螺杆转速 150 r/min,模孔直径 12 mm。

为了考察吸油率数值模型方程的可靠性,选 5 组具有代表性的挤压加工参数组合,分别通过数值模型方程进行吸油率的预测,并进行试验。试验结果如表 4 所示。

表 4 验证性试验结果
Tab.4 Experiment data for test validation

试验号	机筒温度 $x_1/^\circ\text{C}$	物料含水率 $x_2/\%$	螺杆转速 $x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	模孔直径 x_4/mm	吸油率预测值 /%	吸油率实测值 /%	相对误差 /%
1	68	42	150	12	62.96	62.13	1.34
2	70	40	140	12	60.75	58.88	3.18
3	75	40	140	14	57.14	56.17	1.73
4	60	40	140	8	51.77	53.22	2.72
5	55	40	140	6	39.18	40.45	3.14

表 4 表明,通过数值模型方程预测多孔淀粉吸油率与实测值的相对误差均小于 5%,说明本试验所建立的挤压玉米淀粉吸油率的数值模型方程是可靠的,可以通过数值模型方程对试验结果进行有效预测。

4 对照试验

4.1 工艺对照

与未经挤压玉米淀粉进行对照试验。多孔淀粉的酶解时间通常为 8~24 h,本文首先将原玉米淀粉在复合酶(α -淀粉酶质量与糖化酶质量比为 4:1)添加量为 2.0%,溶液 pH 值为 5.0,酶解温度 50℃、料液比 1:4 的条件下酶解 8 h,对淀粉洗涤、干燥、过筛后,所得多孔淀粉吸油率为 32.35%;又对玉米淀粉酶解 24 h(其他酶解条件与上述同),所得多孔淀粉的吸油率为 40.62%(图 13)。挤压工艺多孔淀粉吸油率为 62.13%,比未经挤压制备多孔淀粉吸油率有显著提高:与未挤压淀粉酶解 8 h 与 24 h 相比,吸油率分别提高 29.78% 和 21.51%。

4.2 微观结构的对照

图 14~18 分别为玉米淀粉、挤压后玉米淀粉、酶解 8 h 玉米淀粉、酶解 24 h 玉米淀粉和挤压复合酶法制备的多孔淀粉的 SEM($\times 1\,000$)图。

图 14 表明,原玉米淀粉颗粒大部分呈圆形、多

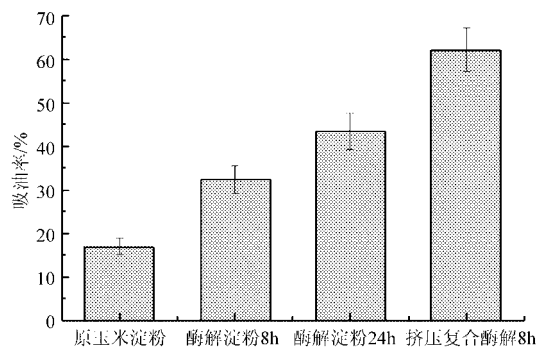


图 13 不同处理方法多孔淀粉吸油率

Fig. 13 Oil absorption rates of different treatment methods

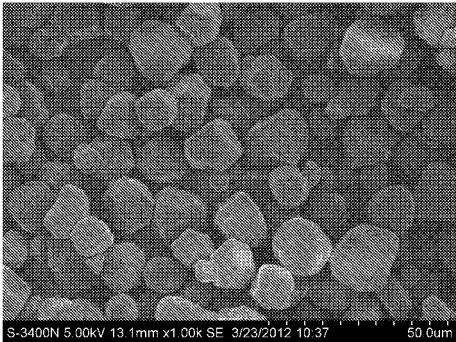


图 14 原玉米淀粉 SEM (× 1 000) 图

Fig. 14 SEM photograph of native corn starch

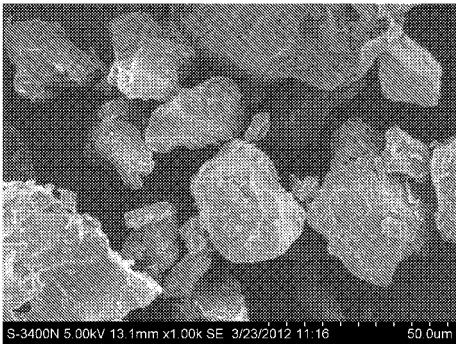


图 15 挤压后玉米淀粉 SEM (× 1 000) 图

Fig. 15 SEM photograph of extruded corn starch

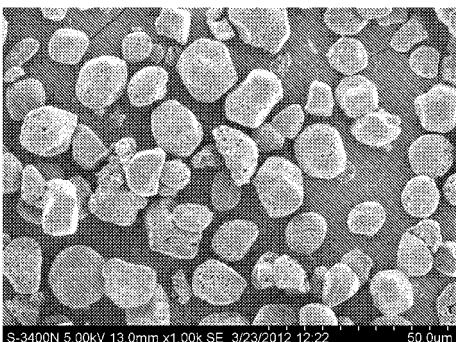


图 16 酶解 8 h 制备的多孔淀粉 SEM (× 1 000) 图

Fig. 16 SEM photograph of porous starch after enzymatic treatment 8 h

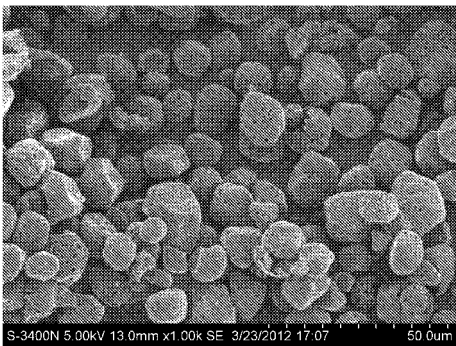


图 17 酶解 24 h 制备的多孔淀粉 SEM (× 1 000) 图

Fig. 17 SEM photograph of porous starch after enzymatic treatment 24 h

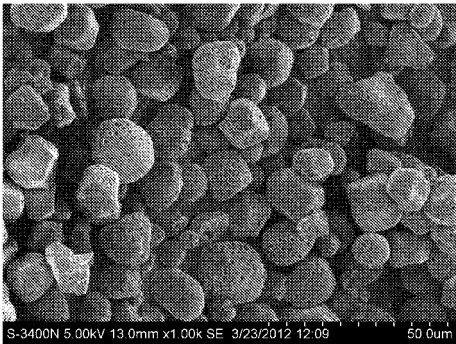


图 18 挤压复合酶解 8 h 制备的多孔淀粉 SEM (× 1 000) 图

Fig. 18 SEM photograph of porous starch after extrusion – enzymatic treatment 8 h

质发生了部分变化造成的,这种粗糙的结构可在酶解反应中为复合酶提供更多的吸附位点,加快酶的反应速率,增加淀粉的孔数和孔深。图 16 表明,淀粉经直接酶解 8 h 后制成的多孔淀粉表面布有小孔和一些凹陷的部位,孔径较大,孔数较少且孔只是出现在淀粉颗粒的表面,孔深较小。这是因为淀粉并未经过任何的预处理,酶解反应速率较慢造成的。图 17 表明,酶解 24 h 的淀粉颗粒表面的孔径较酶解 8 h 的孔深、孔数多、孔径大,颗粒较为完整。图 18 表明,经挤压复合酶解制备的多孔淀粉表面布满小孔,孔数较多,孔径较小,小孔由颗粒表面伸向中心,颗粒形状类似于蜂窝状,比表面积较玉米原淀粉增大,颗粒表面粗糙,这也从微观上说明了经过挤压预处理之后,吸油率明显提高。其主要原因是淀粉在挤压过程中,受到温度、转速、剪切力的综合作用,淀粉的内部结构和性质发生了一定的变化。其中淀粉颗粒比表面积增大,发挥了酶的最大作用,使得淀粉颗粒表面产生粗糙不均的深而小的空隙,最终提高了吸油率。

5 结束语

挤压工艺参数对玉米多孔淀粉吸油率影响大小顺序依次为机筒温度、物料含水率、螺杆转速和模孔

角形,棱角显著,表面光滑。图 15 表明,经过挤压处理后的淀粉颗粒呈块状,表面较为粗糙,凹凸不平。这是由于在挤压机各作用参数综合作用下,淀粉性

直径。因素交互作用分析表明,机筒温度和螺杆转速的交互作用对响应值的影响显著。挤压复合酶法制备多孔淀粉的最佳挤压工艺参数为:机筒温度 68℃,物料含水率 42%,螺杆转速 150 r/min,模孔直径 12 mm,此条件下制得的玉米多孔淀粉吸油率为

62.13%,比未经挤压淀粉酶解 8 h 和 24 h 多孔淀粉吸油率分别提高 29.78% 和 21.51%。SEM 图像表明,与未经挤压多孔淀粉相比,挤压复合酶法制备多孔淀粉颗粒具有更加明显孔径小、孔数多的蜂窝状结构特征。

参 考 文 献

1 段善海,缪铭. 新型有机吸附剂——多孔玉米淀粉的研究与分析[J]. 食品工业科技,2007,28(1):240~244.
Duan Shanhai, Miu Ming. New organic adsorbent—research and analysis of porous corn starch[J]. Science and Technology of Food Industry,2007,28(1):240~244. (in Chinese)

2 徐忠,缪铭. 功能性变性淀粉[M]. 北京:中国轻工业出版社,2010.

3 Yan Hong, Zheng Biao. Morphology of modified starches prepared by different methods[J]. Food Research International,2010,43(3):767~772.

4 Yao Weirong, Yao Huiyuan. Adsorbent characteristics of porous starch[J]. Starch,2002,54(6):260~263.

5 张洪伟,翟爱华,崔素萍. 复合酶法制备多孔淀粉条件的优化[J]. 中国粮油学报,2010,25(4):65~68.
Zhang Hongwei, Zhai Aihua, Cui Suping. Optimized preparation of porous starch by compound enzymes[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2010,25(4):65~68. (in Chinese)

6 朱培蕾,赵贵云,汪名春,等. 玉米多孔淀粉生成条件及其成孔过程的研究[J]. 安徽农业大学学报,2011,38(2):164~169.
Zhu Peilei, Zhao Guiyun, Wang Mingchun, et al. Formation conditions and pore forming process of porous corn starch[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2011,38(2):164~169. (in Chinese)

7 Whistler R L, Michael A M. Surface derivatization of corn starch granules[J]. Cereal Chemistry,1998,75(1):72~74.

8 Zhao Jingan, Madson M A, Whiistler R L. Cavities in porous corn starch provide a large storage space [J]. Carbohydrates, 1996, 73(3):379~380.

9 Zhu Renhong, Yao Weirong, Zheng Shuming, et al. Application of porous starch in interior decorative coatings[J]. Paint Coatings Indurstry, 2005,35(1):53~55.

10 Qian Junqing, Chen Xingyu, Ying Xuexiao. Optimization of porous starch preparation by ultrasonic pretreatment followed by enzymatic hydrolysis [J]. International Journal of Food Science & Technology,2011,46(1):179~185.

11 Yamada T, Hisamatsa M, Teranish K, et al. Components of the porous maize starch granle prepared by amylase treatment[J]. Starch,1995,47(9):358~362.

12 袁美兰,伍小华. 多孔淀粉的研究进展[J]. 河北农业科学,2010,14(3):40~42.
Yuan Meilan, Wu Xiaohua. Review on porous starch[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2010, 14(3):40~42. (in Chinese)

13 杨景峰,罗志刚,罗发兴,等. 淀粉预处理方法对多孔淀粉的影响[J]. 食品科技,2007(7):50~53.
Yang Jingfeng, Luo Zhigang, Luo Faxing, et al. Influences of starch pretreatment on porous sarch [J]. Food Science and Techology, 2007(7):50~53. (in Chinese)

14 杜双奎,魏益民,张波. 挤压膨化过程中物料组分的变化分析[J]. 中国粮油学报,2005,20(3):39~43.
Du Shuangkui, Wei Yimin, Zhang Bo. Changes of material components during extrusion[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2005,20(3):39~43. (in Chinese)

15 周坚,沈汪洋,万楚筠. 微孔淀粉制备的预处理工艺研究[J]. 食品科学,2005,26(11):154~156.
Zhou Jian, Shen Wangyang, Wan Chuyun. Study on pretreatment technology of the microporous starch production[J]. Food Science,2005,26(11):154~156. (in Chinese)

16 李莹. 酶水解和交联改性制备玉米多孔淀粉[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
Li Ying. Producing of corn porous starch by enzymatic hydrolysis and cross-linking modification[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2007. (in Chinese)

17 冯秋娟,肖志刚,郑广钊,等. 低温加酶挤压玉米淀粉糊化度的研究[J]. 食品工业科技,2011,32(8):287~290.
Feng Qiujuan, Xiao Zhigang, Zheng Guangzhao, et al. Study on the gelatinization of corn starch by enzyme-added extrusion at low temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011,32(8):287~290. (in Chinese)

18 郑广钊,肖志刚,孙树坤,等. 挤压加工参数对重组米崩解值的影响[J]. 农业机械学报,2012,43(2):121~127,169.
Zheng Guangzhao, Xiao Zhigang, Sun Shukun, et al. Effect of extrusion processing parameters on breakdown value of restructuring rice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):121~127,169. (in Chinese)

19 李杰,罗志刚,肖志刚,等. 挤压超声联用提取米糠多糖工艺优化[J]. 农业机械学报,2013,44(3):174~179.
Li Jie, Luo Zhigang, Xiao Zhigang, et al. Optimization of extraction technology of rice bran polysaccharide by extrusion in conjunction with ultrasound[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(3):174~179. (in Chinese)