

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.029

低温挤压加酶脱胚玉米粉生产糖浆糖化试验*

申德超¹ 奚可畏² 马成业¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

【摘要】 对低温挤压加酶脱胚玉米粉挤出物直接调浆糖化生产玉米糖浆进行了试验。该技术省去了双酶法生产玉米糖浆的淀粉生产和喷射液化工序和设备, 以及对应的水耗、电耗和环境污染。研究了挤出物的挤压-液化系统参数对糖液的主要考察指标的影响规律。实验室研究表明, 加酶脱胚玉米粉挤出物糖化 12 h 糖液的过滤速度、DE 值和淀粉出品率分别为 239.8 ~ 269.5 L/(m²·h)、89.2% ~ 89.3% 和 96.2% ~ 97.2%。生产试验结果表明, 添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米挤出物, 直接糖化 17 h 和 19 h, 糖浆的 DE 值分别为 95.89% 和 95.10%, 透光率分别为 98.5% 和 98.0%。

关键词: 脱胚玉米 挤压 糖化 酶制剂 试验

中图分类号: TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0140-06

Saccharifying Experiment of Degermed Corn with Added Enzyme Extruded at Low Temperature for Production of Corn Syrup

Shen Dechao¹ Xi Kewei² Ma Chengye¹

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. Engineering College, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract

Degermed corn grist with added enzyme extruded at low temperature was mashed and saccharified directly for production of corn syrup was carried out. Starch production and spraying liquescence procedure in traditional double enzyme method were omitted. Thereby the corresponding water consumption, electricity consumption and its environment pollution were all omitted. The influence regularity of parameters in extrusion-liquescence system to main indexes of syrup was analyzed. The laboratory experimental results indicated the filtration speed of syrup, the value of DE and the available ratio of starch in syrup for degermed corn extrudate with added enzyme when saccharified for 12 h were 239.8 ~ 269.5 L/(m²·h), 89.2% ~ 89.3% and 96.2% ~ 97.2%, respectively. The productive experimental results indicated the values of syrup DE of degermed corn extrudate with high temperature resistant α -amylase for 17 h and 19 h were 95.89% and 95.10%, respectively, the transperance percent of above syrup were 98.5% and 98.0%, respectively.

Key words Degermed corn, Extrusion, Saccharifying, Enzyme preparation, Experiment

引言

目前, 国内外双酶法生产玉米糖浆, 均先将玉米脱胚制成淀粉, 再用淀粉生产糖浆。文献[1]介绍

了直接用挤压脱胚玉米生产玉米糖浆的有关试验研究。生产试验表明, 脱胚玉米挤出物遇水易结块, 影响液化、糖化效果, 且需糖化 30 h 糖液的 DE 值达到 90% 左右。

收稿日期: 2010-01-01 修回日期: 2010-04-23

* 农业科技成果转化资金资助项目(05EFN213700158)、山东理工大学创新研究团队支持计划资助项目(CX0601)和山东省自然科学基金资助项目(Y2008B10)

作者简介: 申德超, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品、食品加工研究, E-mail: shendc@126.com

通常 β -淀粉酶、 α -淀粉酶、糖化酶、蛋白酶等酶制剂的最适温度为40~65℃,中温 α -淀粉酶最适温度为60~70℃,耐高温 α -淀粉酶最适温度为90~100℃^[2]。

低温挤压蒸煮技术,其挤压机套筒温度小于100℃。本文使用的挤压套筒温度范围为50~90℃,为挤压添加上述酶制剂的谷物,在挤压机内发生化学和生物学变化提供了可能。国内外学者有关研究挤压添加酶制剂的谷物淀粉及谷物的糊化、液化、糖化过程的研究文献[2~12]中,挤压机套筒温度为95~154℃,尚未见到低温挤压加酶脱胚玉米用于生产玉米糖浆的研究报道。

本文对挤压添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米粉生产玉米糖浆进行实验室和生产中试研究。

1 材料与方 法

1.1 设备与材料

挤压设备为自制的单螺杆挤压 机,生产率为50 kg/h和1 500 kg/h,前者用于实验室研究,后者用于生产中试研究。实验室的挤压 机由组合套筒和螺杆组成,螺杆转 速为0~1 200 r/min无级可调。套 筒温度为0~300℃连续可调,配有 温度数显仪表闭环自控系统。挤 压机模孔孔径有级可调,如图1所 示。

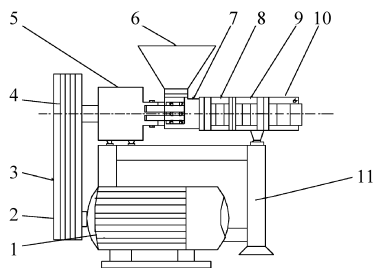


图1 单螺杆挤压糖浆原料设备

Fig. 1 Single extruder for extrusion of raw material for syrup

1. 电动机 2. 小带轮 3. 胶带 4. 大带轮 5. 轴承座 6. 喂料斗
7. 第一节套筒 8. 第二节套筒 9. 第三节套筒 10. 第四节套筒
11. 机架

脱胚玉米购于山东淄博市潘庄粮食市场,含水率14%、淀粉质量分数72.0%,粉碎后全部通过孔径为 $\phi 2 \sim \phi 3$ 的筛片。

液体型耐高温 α -淀粉酶,酶活力20 000 U/mL,泰安华星生物技术有限公司。

高转化率液体型糖化酶,酶活力100 000 U/mL,泰安华星生物技术有限公司。

1.2 方 法

DE值按GB/T 20882—2007测定。

固形物含量按GB/T 22428.4—2008测定。

淀粉含水率按GB/T 12087—2008直接干燥法测定。

淀粉含率按GB/T 5009.9—2008酶水解法测定。

糖液过滤速度以单位时间内通过单位面积的体积表示,单位为L/(m²·h)。本试验采用布氏漏斗(直径d=9 cm)过滤,滤纸为定量快速滤纸,以收集100 mL糖液的时间 τ (h)来计算过滤速度 v 。即

$$v = \frac{V}{\frac{1}{4}\pi d^2 \tau} = \frac{100 \times 10^{-3}}{\frac{1}{4}\pi (9 \times 10^{-2})^2 \tau} = 15.719\tau^{-1} \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

淀粉出品率按文献[13]的方法测定。

加酶脱胚玉米粉挤出物糖化工艺^[14-15]:加酶脱胚玉米粉的挤出物→调浆,料液比(质量比)为0.5,调pH值为6~6.2,添加适量耐高温 α -淀粉酶(0.6~1.5 L/t)→升温至90℃液化,保温15~30 min→冷却至60℃→糖化,调pH值为4~4.5,添加适量糖化酶(1.0~1.5 L/t),糖化保温12 h→灭酶(80~95℃,保温3~20 min)→冷却(60~70℃)→过滤→糖浆。

不挤压脱胚玉米粉对照糖化工艺^[15]:基本与上述加酶脱胚玉米粉挤出物糖化工艺相同。区别在于,不挤压脱胚玉米粉调浆后需升温至100℃液化,其余均同。

参照文献[14~16],确定试验因素为:挤压 机套筒温度 T (℃)、物料含水率 W (%)、螺杆转速 N (r/min)、挤压前脱胚玉米粉中耐高温 α -淀粉酶的添加量和挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量,分别记为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 和 x_5 ,因素水平编码如表1所示。

表1 因素水平编码

Tab. 1 Factors and levels

编码值	x_1 /℃	x_2 /%	x_3 /r·min ⁻¹	x_4 /L·t ⁻¹	x_5 /L·t ⁻¹
-2	50	25	90	0.15	0.1
-1	60	30	100	0.45	0.2
0	70	35	110	0.75	0.3
1	80	40	120	1.05	0.4
2	90	45	130	1.35	0.5

2 结果与分析

糖浆原料的糖化过程是其中的淀粉在外加耐高温 α -淀粉酶和糖化酶等酶制剂作用下,降解成糊精、低聚糖、麦芽糖和葡萄糖等糖类的过程^[17]。如

果糖液的过滤速度较快、DE 值较高、糖浆原料的淀粉出品率较高,表明糖液的糖化过程进行得彻底。为此,考察指标为糖液的过滤速度、DE 值和淀粉出品率。采用二次正交旋转组合设计^[18],进行试验研究。试验安排及结果如表 2 所示,表中考察指标测试结果均为至少 2 次重复试验的均值。

表 2 中糖液的过滤速度 Y_1 、DE 值 Y_2 和淀粉出品率 Y_3 ,均为糖液糖化 12 h 对应指标测定值。对照工艺的糖液过滤速度、DE 值和淀粉出品率,为糖液糖化 12 h 测定的对应值,它们分别为 219.7 ~ 227.5 L/(m²·h)、74.8% ~ 75.4% 和 92.9% ~ 93.6%。

用 REDA 软件处理试验数据。各试验因素对各考查指标影响规律的回归方程为

$$Y_1 = 272.532 + 0.667X_1 + 27.072X_2 - 13.818X_3 + 39.917X_4 + 13.397X_5 - 30.373X_1^2 - 2.025X_1X_2 - 6.929X_1X_3 + 6.755X_1X_4 + 10.259X_1X_5 - 1.073X_2^2 + 7.180X_2X_3 + 53.4997X_2X_4 - 13.205X_2X_5 - 27.503X_3^2 - 4.468X_3X_4 - 5.904X_3X_5 - 25.089X_4^2 + 2.082X_4X_5 - 34.407X_5^2$$

$$(\alpha = 0.05) \quad (1)$$

$$Y_2 = 85.572 - 0.159X_1 - 1.244X_2 + 0.162X_3 + 0.392X_4 + 0.230X_5 - 0.543X_1^2 + 0.096X_1X_2 - 0.096X_1X_3 - 0.066X_1X_4 - 0.016X_1X_5 + 0.851X_2^2 + 0.407X_2X_3 + 1.002X_2X_4 + 0.154X_2X_5 - 0.422X_3^2 - 0.317X_3X_4 - 0.437X_3X_5 + 1.561X_4^2 - 0.396X_4X_5 + 1.428X_5^2$$

$$(\alpha = 0.05) \quad (2)$$

$$Y_3 = 94.374 + 0.023X_1 + 0.790X_2 - 0.007X_3 + 1.127X_4 - 0.508X_5 + 0.674X_1^2 - 0.090X_1X_2 - 0.271X_1X_3 - 0.765X_1X_4 + 0.789X_1X_5 - 0.078X_2^2 - 0.777X_2X_3 - 1.504X_2X_4 - 0.056X_2X_5 - 0.254X_3^2 - 0.362X_3X_4 + 0.465X_3X_5 + 0.090X_4^2 + 0.099X_4X_5 + 0.041X_5^2$$

$$(\alpha = 0.05) \quad (3)$$

表 3 为添加酶制剂的脱胚玉米粉的挤压-液化系统主要参数的因子贡献率。

由表 3 可知,对于过滤速度各因素对其影响的主次顺序为:挤压前脱胚玉米粉中耐高温 α -淀粉酶的添加量、含水率、液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量、螺杆转速、套筒温度。

对于糖浆 DE 值各因素对其影响的主次顺序为:物料含水率、挤压前脱胚玉米粉中耐高温 α -淀粉酶添加量、液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量、套筒温度、螺杆转速。

对于淀粉出品率各因素对其影响的主次顺序为:挤压前脱胚玉米粉中耐高温 α -淀粉酶的添加

表 2 挤压系统参数对考察指标影响的试验安排及结果

Tab.2 Experimental arrangement and results for the influence of parameters of extrusion system on observed indexes

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	过滤速度	DE 值	出品率
						Y_1	Y_2	Y_3
						/L·(m ² ·h) ⁻¹	/%	/%
1	1	1	1	1	1	325.22	89.69	95.18
2	1	1	1	-1	-1	340.00	87.25	94.83
3	1	1	-1	1	-1	314.38	88.02	95.67
4	1	1	-1	-1	1	125.75	84.75	97.64
5	1	-1	1	1	-1	76.06	90.61	94.04
6	1	-1	1	-1	1	150.50	90.25	94.88
7	1	-1	-1	1	1	226.35	91.97	95.36
8	1	-1	-1	-1	-1	104.02	91.14	91.43
9	-1	1	1	1	-1	314.38	89.20	96.25
10	-1	1	1	-1	1	107.99	85.25	95.28
11	-1	1	-1	1	1	314.38	89.23	96.63
12	-1	1	-1	-1	-1	98.93	83.45	96.82
13	-1	-1	1	1	1	126.88	90.22	97.36
14	-1	-1	1	-1	-1	114.09	92.08	93.15
15	-1	-1	-1	1	-1	103.26	90.35	97.07
16	-1	-1	-1	-1	1	169.43	90.27	88.35
17	2	0	0	0	0	105.58	82.37	97.38
18	-2	0	0	0	0	124.64	82.28	96.16
19	0	2	0	0	0	241.83	87.95	94.34
20	0	-2	0	0	0	222.79	87.85	93.19
21	0	0	2	0	0	82.73	82.44	92.52
22	0	0	-2	0	0	170.45	83.18	93.60
23	0	0	0	2	0	164.50	89.38	97.40
24	0	0	0	-2	0	107.99	92.10	91.47
25	0	0	0	0	2	94.31	91.71	90.84
26	0	0	0	0	-2	103.64	88.71	97.64
27	0	0	0	0	0	219.33	84.64	92.69
28	0	0	0	0	0	252.63	85.92	94.43
29	0	0	0	0	0	336.84	86.68	96.10
30	0	0	0	0	0	297.83	88.12	94.22
31	0	0	0	0	0	277.39	86.30	95.55
32	0	0	0	0	0	291.69	85.19	94.44
33	0	0	0	0	0	212.74	85.52	92.43
34	0	0	0	0	0	321.53	87.85	95.18
35	0	0	0	0	0	261.98	82.22	95.52
36	0	0	0	0	0	325.22	85.43	93.78

表 3 挤压-液化系统主要参数的因子贡献率

Tab.3 Factor contribution ratio of main parameters of extruding-liquefying system

考察指标	挤压系统主要参数的因子贡献率				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
过滤速度	0.879	1.259	1.076	2.191	1.080
DE 值	0.435	1.960	0.063	1.265	0.918
淀粉出品率	1.566	1.629	0.503	1.710	1.100

量、物料含水率、套筒温度、液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量、螺杆转速。

可见,添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米粉在挤

压机内的淀粉降解程度直接影响挤出物的后期糖化过程的效果。要使添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米粉的挤出物的糖化效果理想,必须使其在挤压机内降解得彻底。

分析可知,挤压过程中脱胚玉米粉含水率、挤压前耐高温 α -淀粉酶的添加量、液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量对糖液的过滤速度、DE 值和淀粉出品率的影响较大,如果糖液的 DE 值较高,其过滤速度、淀粉出品率均较大。

表 4 为根据频数优选法^[18],计算的挤压-液化系统主要参数较优值及其验证结果。

表 4 挤压-液化系统主要参数较优值验证结果

Tab.4 Verified results of better values for main parameters of extrusion-liquefying system

挤压-液化系统主要参数的较优值					验证结果(糖化 12 h)		
$x_1/^\circ\text{C}$	$x_2/\%$	$x_3/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$x_4/\text{L}\cdot\text{t}^{-1}$	$x_5/\text{L}\cdot\text{t}^{-1}$	$Y_1/\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
59 ~ 61	27.6 ~ 39.4	108 ~ 110	0.82 ~ 0.91	0.28 ~ 0.30	239.8 ~ 269.5	89.2 ~ 89.3	96.2 ~ 97.2

为了进一步分析各试验因素对诸考察指标的影响规律,参考表 2 的试验结果和表 4 的优选结果,取较优试验因素组合的 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_5 的编码值分别为 -1、-1、0、1 和 0 水平。研究任一试验因素 X_i ($i=1,2,3,4,5$) 对各考察指标 Y_i ($i=1,2,3$) 的影响规律时,改变这个因素的编码值其余 4 个因素分别取上述的较优值,如图 2 ~ 4 所示。

由图 2 可知,随着挤压前脱胚玉米粉中耐高温 α -淀粉酶的添加量和挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量、螺杆转速、套筒温度取值的增加,糖液的过滤速度有增加的趋势,各值越过零水平时,过滤速度有减小的趋势。其中随物料含水率取值的增加,糖液的过滤速度有增加的趋势。

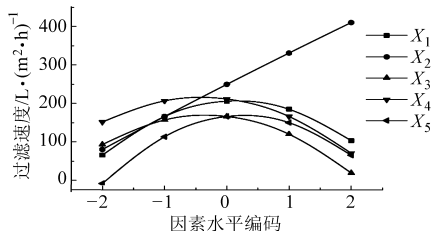


图 2 挤压-液化系统主要参数对糖液过滤速度的影响

Fig.2 Influence of main parameters of extrusion-liquefying system on filtration speed of syrup

其主要原因是,随着挤压前耐高温 α -淀粉酶的添加量和物料含水率、螺杆转速、套筒温度取值的增加,脱胚玉米中的淀粉降解的速度增加,挤出物液化时随着耐高温 α -淀粉酶的添加量的增加,淀粉降解的程度也增加,所以过滤速度增加。淀粉降解的过程中,挤压机中挤压前添加的耐高温 α -淀粉酶的活性也在逐渐减小,至零水平时,酶的失活成为主要现

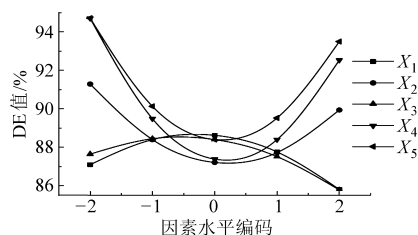


图 3 挤压-液化系统主要参数对糖液 DE 值的影响

Fig.3 Influence of main parameters of extrusion-liquefying system on the value of DE of syrup

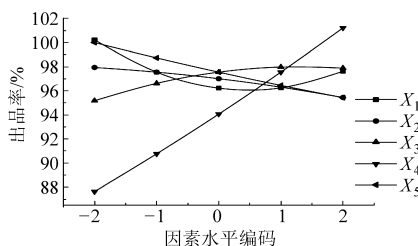


图 4 挤压-液化系统主要参数对淀粉出品率的影响

Fig.4 Influence of main parameters of extrusion-liquefying system on the available ratio of starch in syrup

象,制约淀粉降解的程度,所以试验因素从零水平至 2 水平时,脱胚玉米中淀粉降解得不好,使过滤速度减慢。唯有物料含水率的增加,易于酶的活性增加,利于淀粉降解,使过滤速度增加。

由图 3 可知,随着挤压前脱胚玉米中耐高温 α -淀粉酶的添加量、物料含水率、挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量取值的增加,糖浆的 DE 值先减小,后增加,零水平时 DE 值最小。随着螺杆转速和套筒温度取值的增加,糖浆的 DE 值先增加后下降。零水平时 DE 值最大。

其主要原因是,随着挤压前脱胚玉米中耐高温

α -淀粉酶的添加量、物料含水率、挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量取值从 -2 水平经零水平至 2 水平增加时,利于脱胚玉米中淀粉降解。上述因素在 -2 水平和 2 水平时,糖液的还原糖含量较其固形物含量多,使 DE 值较大。零水平时糖液的还原糖含量较其固形物含量低,使 DE 值较小。

随着螺杆转速增加,被挤压物料受到的剪切、磨擦、挤压等机械作用强度也增加,加速被挤压物料细胞壁破坏,利于酶制剂与细胞内的淀粉接触,促使淀粉降解,同时使酶制剂失活加速。试验表明,零水平时淀粉降解的效果较好,糖浆的 DE 值较大,零水平至 2 水平时,酶制剂失活不利于淀粉降解的影响是主要的,使糖浆的 DE 值逐渐减小。

由图 4 可知,随着挤压前脱胚玉米中耐高温 α -淀粉酶的添加量、螺杆转速的增加,淀粉出品率有增加的趋势。随着挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量、物料含水率的增加,淀粉出品率有减小的趋势。随着套筒温度取值的增加,淀粉出品率有先下降后上升的趋势。

其主要原因是,随着挤压前脱胚玉米中耐高温 α -淀粉酶的添加量增加,淀粉降解的程度也增加。使淀粉出品率有增加的趋势。螺杆转速的增加,加速被挤压物料细胞壁破坏,利于酶制剂与细胞内的淀粉接触,促使其降解,同时使酶制剂失活加速。这使得螺杆转速从 -2 水平至零水平时,淀粉降解得较好,出品率增加;从零水平至 2 水平时酶制剂失活成为主要现象,不利于淀粉降解,使出品率有增加的趋势,但是变化不大。

随着套筒温度的增加,利于酶制剂在淀粉中扩散,同时也使酶制剂在剪切、挤压等机械作用下失活。试验表明,套筒温度为零水平时,淀粉降解得不好,淀粉出品率低。套筒温度在 -2 水平(50℃)时,挤压前脱胚玉米中耐高温 α -淀粉酶的活性保持得较好,利于在后续液化、糖化时发挥作用,淀粉出品率较高。套筒温度在 2 水平时,虽然添加的耐高温 α -淀粉酶失活加剧,可是在挤压机模孔处淀粉降解得较好,还原糖较多,使得淀粉出品率较高。物料含水率的较优值为 -1 水平(即含水率为 30%)。总的看,随着物料含水率的增加,被挤压物料在挤压机内受到的磨擦力减小,不利于细胞壁破碎,淀粉被酶

解,使挤出物中还原糖含量减少,将使糖化后的糖浆中葡萄糖含量减少,淀粉出品率降低。

随着挤出物液化时耐高温 α -淀粉酶的添加量的增加,糖浆液化时 DE 值增加,促使糖浆糖化的 DE 值减少^[15],即使糖浆中固形物含量减少,淀粉出品率也呈降低的趋势。

3 生产试验

2008 年 8 月 5~6 日和 2008 年 11 月 12~13 日应用表 4 中的挤压-液化系统主要参数的较优值,挤压添加耐高温酶 α -淀粉酶脱胚玉米,在禹城的保龄宝生物股份有限公司,进行了两次 500 L 玉米糖浆的生产中试(糖化工艺同本文的加酶脱胚玉米粉挤出物糖化工艺),试验结果如表 5 所示。

表 5 500 L 玉米糖浆的生产试验结果

Tab. 5 Productive test results for 500 L corn syrup

试验日期	糖化时间/h	DE 值/%	透光率/%
2008-08-5~6	17	95.89	98.5
2008-11-12~13	19	95.10	98.0

注:表中糖化时间均大于 12 h,主要原因是糖化罐的保温效果差所致。

实验室试验和 500 L 玉米糖浆生产中试表明,使用低温挤压加酶脱胚玉米挤出物直接调浆生产玉米糖浆,可以省去传统玉米淀粉糖浆生产过程中的淀粉生产过程和喷射液化过程及设备,省去其水耗、电耗和环境污染。且糖化时间仅为传统糖化时间的 1/2~1/3。

4 结论

(1) 采用本研究的较优的挤压-液化系统主要参数,以及使用挤压添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米粉的糖化工艺,使挤压加酶脱胚玉米浆液糖化 12 h,DE 值可以达到 89.2%~89.3%。且可以省去传统玉米淀粉糖浆的淀粉生产过程和喷射液化过程及设备,省去其水耗、电耗和环境污染。

(2) 生产 500 L 玉米糖浆的中试结果表明,应用本研究的较优挤压-液化系统主要参数,添加耐高温 α -淀粉酶的脱胚玉米挤出物,直接调浆,糖化 17 h 和 19 h,糖浆的 DE 值分别为 95.89% 和 95.10%,透光率分别为 98.5% 和 98.0%。

参 考 文 献

- 1 申德超,肖志刚. 基于量纲分析的函数理论建立挤压脱胚玉米生产淀粉糖浆的糖化液过滤问题的经验公式[J]. 农业工程学报,2005,21(12): 25~29.

Shen Dechao, Xiao Zhigang. Empirical formulas relating to extrusion of degermed maize for production of starch syrup based on function theory of dimension analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(12):

- 25 ~ 29. (in Chinese)
- 2 姜锡瑞,段钢. 酶制剂实用技术手册[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003:21~37.
 - 3 Mercier C, Linko P, Harper J M. Extrusion cooking[M]. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists, Inc., 1989:235~245.
 - 4 Linko P, Linko Y Y, Olkku J. Extrusion cooking and bioconversions[J]. Journal of Food Engineering, 1982, 2(4):243~257.
 - 5 Linko P, Hahulin S, Linko Y Y. HTST-extrusion cooking in ethanol production from starch materials[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1984, 6(10):457~461.
 - 6 Tomas R L, Oliveira J C, McCarthy K L. Rheological modelling of enzymatic extrusion of rice starch[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 32(2):167~177.
 - 7 Govindasamy S, Camparella O H, Oates C G. Enzymatic hydrolysis and saccharification optimization of sago starch in a twin-screw extruder[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 32(4):427~446.
 - 8 Govindasamy S. Enzymatic hydrolysis of sago starch in a twin-screw extruder[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 32(4):403~426.
 - 9 Vasanthan T. Dextrinization of starch in barley flours with thermostable alpha-amylase by extrusion cooking[J]. Starch/Staerke, 2001, 53(12):616~622.
 - 10 Time B, Frans H J, Anja K, et al. Towards an optimal process for gelatinisation and hydrolysis of highly concentrated starch-water mixtures with *alpha*-amylase from *B. licheniformis*[J]. Journal of Cerael Science, 2008,47(3):214~255.
 - 11 孙于庆,冉旭. 麦芽糊精挤压生产的试验研究[J]. 食品科技,2006(10):123~125,137.
Sun Yuqing, Ran Xu. Research of production of maltodextrin by extrusion[J]. Food Science and Technology, 2006(10):123~125,137. (in Chinese)
 - 12 冉旭,李玲玲,蒋林茂,等. 挤压加工条件对玉米淀粉酶转化程度的影响[J]. 粮食与饲料工业,2006(7):23~25.
Ran Xu, Li Lingling, Jiang Linmao, et al. Influence of extrusion conditions on conversion extent of corn amylase[J]. Cereal & Feed Industry, 2006(7):23~25. (in Chinese)
 - 13 尤新. 淀粉精品生产与应用手册[M]. 北京:中国轻工业出版社,2000:92~93.
 - 14 申德超. 挤压加酶淀粉糖浆原料的加工方法、装置和糖化方法;中国,200710015601. X[P]. 2007-05-11.
Shen Dechao. Processing method, device and saccharification method for starch syrup raw material by extruding and adding enzyme;China, 200710015601. X[P]. 2007-05-11. (in Chinese)
 - 15 奚可畏. 挤压蒸煮玉米淀粉、脱胚玉米制取葡萄糖浆的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.
Xi Kewei. The study of produccing glucose syrup with extrded corn starch and degermed maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2007. (in Chinese)
 - 16 肖志刚. 挤压膨化脱胚玉米生产淀粉糖浆的试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2002.
Xiao Zhigang. The experiment of extruded maize without germ to produce starch syrup[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2002. (in Chinese)
 - 17 刘亚伟. 玉米淀粉生产及转化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
 - 18 徐中儒. 农业试验最优回归设计[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1988:359~368.
 - 19 马成业,申德超. 脱胚玉米添加中温酶挤出物制取葡萄糖浆试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(5):126~130.
Ma Chengye, Shen Dechao. Experiment on extrusion parameters of producing glucose syrup with extruded degermed maize added moderate temperature amylase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(5):126~130. (in Chinese)
 - 20 申德超,张春野. 低温挤压加酶脱胚玉米粉生产酒精试验[J]. 农业机械学报,2009,40(11):156~160.
Shen Dechao, Zhang Chunye. Experiment on productive of ethanol for extruded corn grist degermed with enzyme preparation at low temperature [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):156~160. (in Chinese)