

基于旋风式烘干机的油菜籽干燥工艺优化

Optimized technology of rapeseed drying based on whirlwind dryer

吕磊¹ 吴明亮^{1,2,3} Cedric¹ 谢伟¹ 向伟¹
LU Lei¹ WU Ming-liang^{1,2,3} Cedric¹ XIE Wei¹ XIANG Wei¹

(1. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128;
3. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心, 长沙 410128)

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Hunan Province Modern Agricultural Equipment Engineering Technology Research Center, Changsha, Hunan 410128, China)

摘要:为探索油菜籽单位时间失水率影响因素,研究旋风式干燥方式下油菜籽的最佳干燥工艺参数,利用自制的旋风式油菜籽烘干机进行干燥试验。选取旋风式烘干机的干燥温度、气流速度、分级器内孔直径为主要因素进行单因素和多因素旋转正交试验。单因素试验发现旋风式烘干机的干燥温度、气流速度、分级器内孔直径 3 因素是影响油菜籽单位时间失水率的主要因素,其取值范围为:干燥温度 70~90℃,气流速度 17~22 m/s、分级器内孔直径 130~140 mm;多因素试验表明,影响油菜籽单位时间失水率的因素显著性顺序为:干燥温度>气流速度>分级器内孔直径;旋风式干燥方式下油菜籽的最佳干燥工艺参数为干燥温度 85℃、气流速度 19 m/s、分级器内孔直径 136 mm。

关键词:油菜籽;烘干机;旋风;分级器

Abstract: In order to explore the influencing factors of water loss rate per unit time during rapeseed drying, the optimum drying technological parameters of rapeseed under whirlwind drying were studied. The drying experiments were also carried out by using the self-made whirlwind drying machine of rapeseed. The single and multi factors rotating orthogonal tests were undertaken by choosing the main factors including drying temperature, air velocity and the diameter of the inner diameter of the whirlwind dryer. The single factor test showed that the drying temperature, the air velocity and the diameter of the inner hole of the whirlwind dryer were the three main factors that affected the water loss rate per unit time of the rapeseed.

基金项目:湖南省科技重大专项(编号:2014FJ1006);湖南省科技厅重点项目(编号:2016NK2120);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX2016B286)

作者简介:吕磊,男,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:吴明亮(1972—),男,湖南农业大学教授,博士。

E-mail: mlwu@hunau.edu.cn

收稿日期:2017-03-06

The drying temperature is 70~90℃, the air flow rate is 17~22 m/s, and the diameter of the inner hole of the classifier is 130~140 mm. The multi factor test on the other hand showed that the significant factors affecting the water loss rate per unit time of the rapeseed were in the order of Drying temperature, airflow speed and classifier inner hole diameter. It was also found that the optimum drying technological parameter of rapeseed in whirlwind mode drying at 85℃, with airflow velocity 19 m/s and grading hole diameter 136 mm. The research provided a theoretical basis for the drying process optimization of the rape whirlwind dryer.

Keywords: rapeseed; dryer; whirlwind; classifier

中国油菜的种植面积和总产量均占世界 25% 以上, 占国内油料作物产量的 60%^[1], 常年种植面积达 8.0×10⁶ hm², 总产量 1.2×10⁷ t, 并且呈现上升趋势^[2]。油菜籽粒间空隙小、堆积密度大, 干燥时受热面积小导致受热不均, 严重影响干燥效率, 同时油菜籽蛋白质含量高, 吸湿性强, 收储过程中因干燥不均匀会出现局部发热、生芽、霉变等现象, 影响菜籽油的品质^[3-4]。

目前中国针对大田作物籽粒干燥技术及装备研究较多, 主要是针对水稻、小麦的干燥工艺参数及对应装备的研究, 其成果已在生产上得到广泛应用。刘春山等^[5]研究了粮食干燥工程中各个参数对干燥后粮食含水率的影响, 并采用降维法进行了相关的分析, 建立的数学模型为塔式干燥机参数的确定提供了相应的参考依据; 谢焕雄等^[6]研制了 5HG-2.5A 型箱式换向通风小麦干燥机, 并通过试验分析了空载和满载条件下干燥床面风场、水分和温度分布, 干燥机热效率和能耗等特性, 得到了箱式换向通风干燥机的最优工作参数; 李长友等^[7]设计了高湿粮食贮藏干燥机, 并从理论上分析粮食干燥状态参数和水分结合能的变化特性, 能同时完成多个品种粮食的干燥需求。然而, 油菜籽无论外观形状、机

械力学特性、微观结构组成等均不同于水稻和小麦,将现有稻、麦烘干机直接用于油菜籽干燥,无论从干燥装备还是工艺参数都难以满足油菜籽的干燥要求,因此有必要研究油菜籽专用干燥设备和干燥工艺。

旋风式干燥是一种通过风力输送物料将其连续加入干燥管内,在高速热气流的输送和分散中,物料与热气流并流,充分接触,使湿物料中的水分蒸发的干燥方式^[8]。为此,笔者结合油菜籽干燥工艺要求,为实现干燥效率高、干燥后的油菜籽含水率均匀的目的,设计了一台油菜籽旋风式烘干机。本研究拟利用旋风式烘干机干燥油菜籽,对影响油菜籽干燥性能的相关参数进行优化,以期对油菜籽旋风式烘干机干燥工艺的制定提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 材料

油菜籽:湘油 11 号,测定除杂后的新鲜油菜籽含水率 W_1 和经晾晒干燥的油菜籽含水率 W_0 ,并分别标记为样品 A 和样品 B,将油菜籽样品分别装入密封袋储存于 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰柜中。测得其含水率 $W_1=20.78\%$; $W_0=7.84\%$ 。

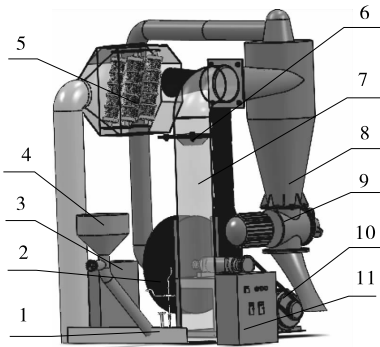
1.2 仪器与设备

水分测定仪:MA 35 型,量程 $0\sim 35\text{ g}$,精度 1 mg ,北京赛多利斯仪器有限公司;

智能压力风速风量仪:KMI-500A 型,量程 $0\sim 30\text{ m/s}$,精度 0.01 m/s ,上海日暮电子科技有限公司;

热电偶:TM902C 系列 K 型,量程 $-50\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,杭州滕策电子科技有限公司;

旋风式烘干机:实验室自制,主要由变频电机、调频控制器、高压离心风机、温度控制箱、电加热炉、加料器、加料器管、分级器、干燥器、旋风收料器、卸料器等组成,见图 1。干燥器进风口处安装有 TM902C 系列 K 型热电偶测定干燥器进风口温度,即干燥温度。干燥器进风口处同时安装有智能压力风速风量仪测定风速,即气流速度。干燥器的顶端设置有分级器,通过更换分级器实现对其内孔直径参数的改变。工作时,调频控制器调控变频电机转速,驱动高压离心风机产生可变气流,经电加热装置热交换形成热气流并经加料器



1. 加料器管 2. 高压离心风机 3. 温度控制箱 4. 加料器 5. 电加热炉 6. 分级器 7. 干燥器 8. 旋风收料器 9. 卸料器 10. 变频电机 11. 调频控制器

图 1 油菜旋风式烘干机结构简图

Figure 1 Rapeseed whirlwind dryer structure diagram

管道进入干燥器内;油菜籽从加料器中喂入,在加料器管道中随热气流一起切向进入干燥器内,随同高速低压的旋转气流在干燥器内做螺旋上升运动。同时油菜籽与热气流充分接触并实现热交换,水分逐渐除去。失水后的油菜籽因质量减少,所受惯性离心力随之变小而导致螺旋上升运动的旋转半径也逐渐变小,当其旋转半径 $\leq$ 分级器内孔直径时,籽粒则通过分级器内孔进入到旋风收料器内,完成油菜籽的干燥。

1.3 试验方法

为研究旋风式烘干机工作参数对油菜籽干燥性能的影响,选择干燥温度、气流速度和分级器内孔直径对单位时间失水率的影响规律开展试验研究。

1.3.1 油菜籽单位时间失水率的测定 更换安装于干燥器顶端分级器内孔直径,设定气流速度 v ,调控干燥温度 T ;称取质量为 m_0 、含水率为 W_1 的油菜籽样品 A 从加料器中喂入,用秒表计时,记录从油菜籽喂入至卸料口处没有物料排出时的时间 t ,称量排出的油菜籽质量 m_2 ,用 MA35 型水分测定仪测定其含水率 W_2 。由式(1)计算单位时间失水率^[8],试验重复 3 次,取平均值为试验结果。

$$V = \frac{A}{t}, \tag{1}$$

$$m_1 = \frac{m_2 (1 - W_2)}{1 - W_1}, \tag{2}$$

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

式中:

m_2 ——排料口排出的油菜籽质量,kg;

m_1 ——烘干机实际干燥质量,kg;

W_1 ——油菜籽初始含水率,%;

W_2 ——油菜籽最终含水率,%;

A ——失水率,%;

V ——单位时间失水率,%/min;

t ——试验时间,min。

1.3.2 最低气流速度初选 为保障油菜籽干燥过程中能悬浮于气流场中,通过调节风机转速,测试烘干机内气流速度对油菜籽正常排出情况进行试验,从而得到旋风式烘干机正常工作的最低气流速度。

试验时,干燥器顶端不安装分级器,通过调频控制器配合智能压力风速风量仪测定调控气流速度 v ,每次气流速度改变量为 1 m/s ,将质量 m_j 的油菜籽从加料器中喂入,记录卸料口中排出的油菜籽质量,每组试验重复 3 次,取平均值记为该试验风速下排出的油菜籽质量 m_c 。由式(4)计算出籽率。试验结果见图 2。

$$C = \frac{m_c}{m_j} \times 100\%, \tag{4}$$

式中:

C ——出籽率,%;

m_j ——喂入量,kg;

m_c ——出籽量,kg。

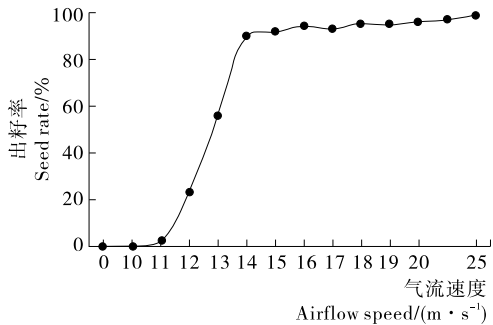


图 2 不同气流速度对出籽率的影响

Figure 2 Effect of different airflow speed on seeds yield

由图 2 可知:随着气流速度的增大,出籽率逐渐增大,当气流速度达到 14 m/s 时,油菜籽从干燥器内排出率接近 100%,即在此气流速度下,油菜籽经烘干机作业能完全排出,不会残留在烘干机内;查文献[9]可知,油菜籽的悬浮速度为 6.52~7.46 m/s,综上所述烘干机正常作业的最低气流速度为 14 m/s。

1.3.3 分级器内孔直径初选 为保障油菜籽经干燥后其含水率能达到安全含水率标准,通过更换分级器内孔直径,进行不同含水率油菜籽的干燥试验,从而得到旋风式烘干机工作适宜的分级器内孔直径范围。

试验时,通过更换干燥器顶端的内孔直径的分级器(分级器内孔直径 D 取 80~160 mm,每次分级器内孔直径 D 改变量为 10 mm),通过调频控制器配合智能压力风速风量仪测定调控气流速度 v ,因安装有分级器,故将进行试验的风速设置为 20 m/s。分别将质量为 m_1 的样品 A 和样品 B 油菜籽从加料器中喂入,记录从卸料口中排出的对应的油菜籽质量。每组试验重复 3 次,取平均值记为该分级器内孔直径下的样品 A 和样品 B 油菜籽排出质量 m_c ,由式(4)计算其出籽率,试验结果见图 3。

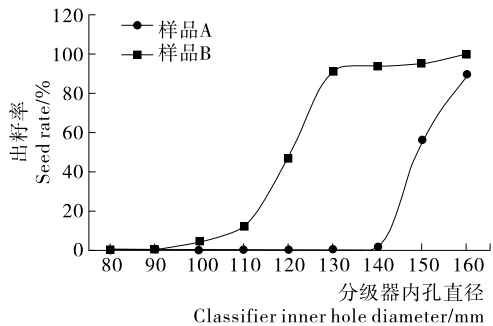


图 3 分级器内孔直径对出籽率的影响

Figure 3 Effect of different classifier inner hole diameter on seeds rate

分级器内孔直径 D 取值 150~160 mm 时,样品 A、样品 B 试验的出籽率均大于 50%,故烘干机使用此区间的内孔直径进行试验时,有未干燥或未干燥完全的油菜籽排出;分级器内孔直径 D 取 80~110 mm 时,样品 A、样品 B 试验的出籽率均低于 20%,此时烘干机干燥后的油菜籽无法正常排出;分级器内孔直径 D 取 110~140 mm 时,样品 B 试验的出

籽率逐渐增大接近至 100%,样品 A 试验的出籽率几乎为 0。综上所述分级器内孔直径 D 取 110~140 mm 时,能够同时满足烘干机内油菜籽安全储藏含水率 $W_0 \leq 8\%$ 正常排出,油菜籽含水率 $W_1 = 20.78\%$ 不出籽的设计要求。

2 结果与分析

2.1 干燥温度对单位时间失水率的影响

油菜籽品质受温度影响较大,应根据不同干燥机类型严格控制干燥过程中的最高料温。干燥机一般的干燥温度为 75~85 ℃,不得超过 90 ℃^[7],故选取干燥器进风口温度 $T = 60 \sim 90$ ℃ 进行试验。试验时,称取油菜籽样品 A,每组 5 kg,取气流速度 $v = 20$ m/s、分级器内孔直径 $D = 140$ mm,测定进风口温度在 60, 70, 80, 90 ℃ 对单位时间失水率的影响。试验结果见图 4。

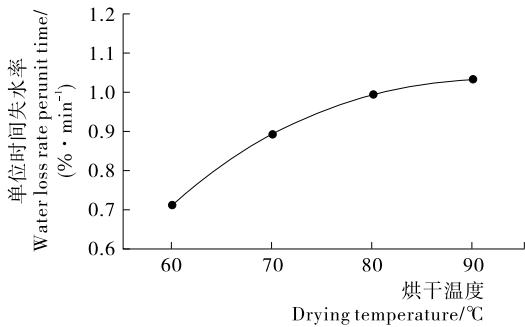


图 4 烘干温度对单位时间失水率的影响

Figure 4 Effects of different drying temperature on water loss rate per unit time

结果表明:随着温度的升高,单位时间失水率逐渐增大。温度从 60 ℃ 增大到 80 ℃ 时,单位时间失水率增大明显,温度从 80 ℃ 增大到 90 ℃ 时,单位时间失水率较高,且单位时间失水率基本维持在 1%/min 左右,可以预测,温度继续增大,其单位时间失水率变化很少,能量消耗将会大幅增加。故油菜籽干燥温度宜取 70~90 ℃。

2.2 气流速度对单位时间失水率的影响

试验时,称取油菜籽样品 A,每组 5 kg,取干燥温度 $T = 80$ ℃、分级器内孔直径 $D = 140$ mm,测定进风口风速在 17, 19, 22, 25 m/s 时对单位时间失水率的影响。试验结果见图 5。

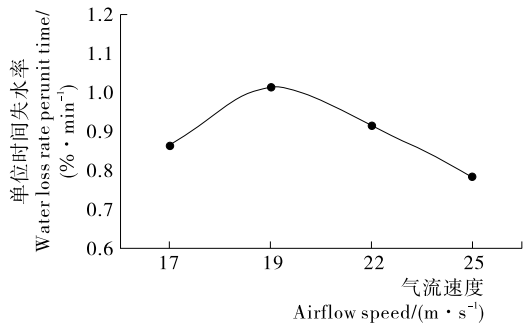


图 5 气流速度对单位时间失水率的影响

Figure 5 Effects of different airflow speed on water loss rate per unit time

结果表明:随着气流速度的增大,单位时间失水率呈先增大后减小的趋势,且在气流速度 19 m/s 时取得最大值。通过对气流速度与单位时间失水率的分析,故干燥适宜的气流速度在 17~22 m/s。

2.3 分级器内孔直径对单位时间失水率的影响

试验时,称取油菜籽样品 A,每组 5 kg,取干燥温度 $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、气流速度 $v=19\text{ m/s}$,测定分级器内孔直径在 110,120,130,140 mm 对单位时间失水率的影响。试验结果见图 6。

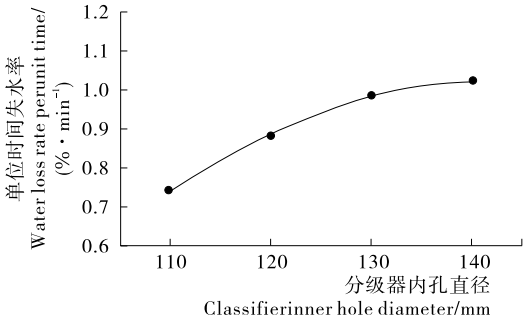


图 6 分级器内孔直径对单位时间失水率影响
Figure 6 Effects of different diameter of classifier inner hole diameter on water loss rate per unit time

结果表明:随着分级器内孔直径的增大,单位时间失水率逐渐增大,当内孔直径在 130~140 mm 时,单位时间失水率增长缓慢,基本维持在 1%/min 以上。分析分级器内孔直径与单位时间失水率的关系,选取分级器内孔直径为 130~140 mm 时较为适宜。

2.4 多因素正交旋转试验

2.4.1 多因素试验因素水平设计 为获得 3 因素组合下的最优解,在单因素试验的基础上,选取适当的气流速度、干燥温度、分级器内孔直径为试验因素,使用 Design-Expert 软件进行二次回归正交旋转组合试验方法的数据处理及分析^[10]。二次回归正交旋转组合试验各因素水平编码见表 1。

将因素水平编码表代入 Design-Expert 8.0 软件中,软件将自动生成试验参数组合^[11]。根据所得到的试验参数组合进行多因素试验,取各影响因素水平值为自变量,油菜籽单位时间失水率为评价指标。最终试验结果记录并代入软件中,见表 2。

表 1 试验因素及水平编码表

Table 1 Coding with experimental factors and levels			
规范变量	x_1 烘干温度/ ℃	x_2 气流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	x_3 分级器内孔 直径/mm
下星号臂	70	17	130
下水平(-1)	74	18	132
零水平(0)	80	19	135
上水平(1)	86	20	138
上星号臂	90	22	140
变化间距 Δj	6	1	3

表 2 试验结果

Table 2 The results of test				
试验序号	x_1	x_2	x_3	y 单位时间失水率/ ($\%\cdot\text{min}^{-1}$)
1	1	-1.68	-1	0.95
2	0	0	0	1.10
3	-1	1	-1	0.89
4	-1	1	1	0.82
5	1	1	1	1.02
6	0	0	1.68	1.04
7	0	0	-1.68	1.02
8	0	1.68	0	0.94
9	0	-1.68	0	0.88
10	1	1	-1	0.99
11	-1	-1	1	0.80
12	0	0	0	1.05
13	0	0	0	1.09
14	-1	-1	-1	0.85
15	1	-1	1	0.98
16	0	0	0	1.10
17	-1.68	0	0	0.80
18	0	0	0	1.06
19	0	0	0	1.09
20	1.68	0	0	1.13

2.4.2 响应曲面分析 使用 Design-Expert 8.0 软件的 ANOVA 功能对表 2 的试验结果建立回归模型。得到下列单位时间失水率二次多元回归拟合方程^[12]:

$$y=1.08+0.09x_1+0.02x_2-1.93x_3-0.67x_1x_2+0.02x_1x_3-2.50x_2x_3-0.05x_1^2-0.07x_2^2-0.03x_3^2。$$

(5)

由表 3 可知,目标函数 y 的模型失拟值 P 为 0.06,满足失拟值 $P>0.05$ 的一般要求^[13],表明不存在失拟因素,试验结果可用二次回归模型方程进行预测与分析。按影响显著性^[14]大小顺序依次为干燥温度、气流速度、分级器内孔直径。其中试验因素 x_1 、 x_1^2 、 x_2^2 项对单位时间失水率影响极其显著, x_1x_2 、 x_3^2 项对单位时间失水率有显著影响。

2.4.3 验证实验 利用二次回归方程预测获得最优参数组合^[15]为:干燥温度 85.20 $^{\circ}\text{C}$ 、气流速度 19.16 m/s、分级器内孔直径 135.90 mm,此时烘干机对油菜籽单位时间失水率的软件分析值为 1.12%/min,响应曲面见图 7。经取整,干燥温度 85 $^{\circ}\text{C}$ 、气流速度 19 m/s、分级器内孔直径 136 mm。对上述最优参数组合进行 3 次平行验证实验。烘干机对油菜籽干燥的实际单位时间失水率为 1.11%/min,油菜籽干燥后的含水率为 7.65%。单位时间失水率实际值与模型预测值相比,误差为 0.01%/min,可忽略不计,验证了模型是合理可靠的。

表 3 试验结果的回归模型方差分析[†]

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P	显著性
模型	0.21	9	0.02	18.18	<0.000 1	* *
x_1	0.09	1	0.09	73.92	<0.000 1	* *
x_2	4.25	1	4.25	3.33	0.098 0	*
x_3	5.09	1	5.09	0.04	0.845 7	
x_1x_2	1.83	1	1.83	10.87	0.013 9	*
x_1x_3	4.05	1	4.05	3.17	0.105 2	
x_2x_3	5.00	1	5.00	0.04	0.847 1	
x_1^2	0.04	1	0.04	30.04	0.000 3	* *
x_2^2	0.07	1	0.07	56.97	<0.000 1	* *
x_3^2	0.01	1	0.01	9.24	0.012 5	*
残差	0.01	10	1.28			
失拟项	0.01	5	2.10	4.59	0.060 0	
纯误差	2.28	5	4.57			
总和	0.22	19				

[†] * 表示为显著(P<0.05), * * 表示为极显著(P<0.05)。

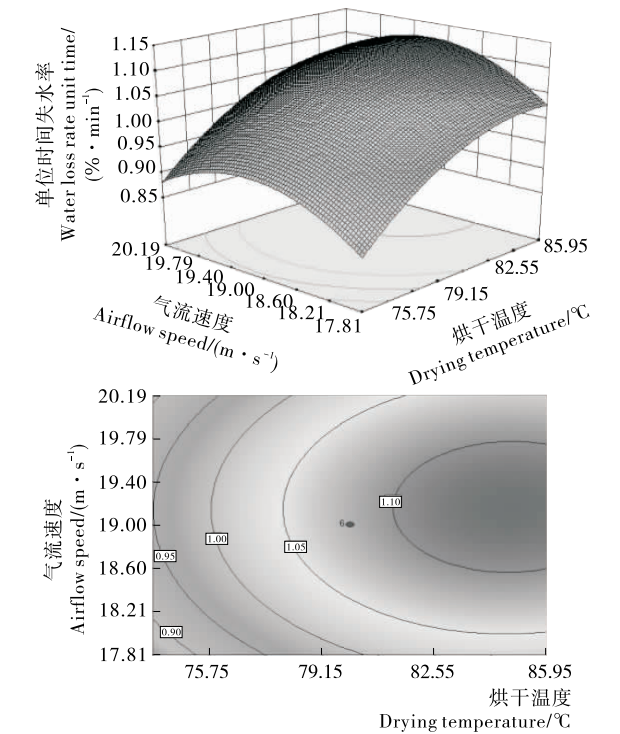


图 7 烘干温度和气流速度对单位时间失水率影响的相应曲面

Figure 7 The response surface of the drying temperature and airflow speed on water loss rate per unit time

3 结果

本研究利用自制的旋风式油菜籽烘干机进行干燥工艺优化试验,在单因素试验的基础上,选取气流速度、干燥温度、分级器内孔直径 3 因素进行二次回归正交旋转组合试验,采用 Design-Expert 软件对试验数据进行分析 and 处理,确定最佳工艺参数为:干燥温度 85 ℃、气流速度 19 m/s、分级

器内孔直径 136 mm。此条件下所得油菜籽单位时间失水率的实际值与模型预测值相比,误差仅为 0.01%/min。研究结果解决了油菜籽干燥效率低、干燥不均匀的问题,为油菜籽的产业化提供了技术参考。本研究对油菜籽干燥工艺应用还处于小试阶段,有待进行大规模生产。

参考文献

[1] 何应荣, 向风玲. 播期、种植密度及施氮水平对稻茬免耕直播油菜产量的影响[J]. 作物研究, 2014, 28(7): 787-791.

[2] 杨玲, 杨明金, 郭孟报. 油菜籽热风干燥传热传质与优化的研究进展[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 306-313.

[3] 谢奇珍, 师建芳, 刘进, 等. 油菜籽的储藏与管理[J]. 中国油脂, 2007(2): 57-60.

[4] 王彦超, 张来林, 周杰生, 等. 不同储藏条件对油菜籽生理活性的影响研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2012, 33(2): 57-60.

[5] 刘春山, 杨海, 刘洪义, 等. 谷物干燥过程数学模型的建立与参数分析[J]. 农机化研究, 2010(4): 55-57.

[6] 谢焕雄, 颜建春, 胡志超, 等. 5HG-2.5A 型箱式换向通风干燥机小麦产地烘干性能[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 190-195.

[7] 李长友, 张烨, 麦智炜. 高湿粮食贮藏干燥机[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 231-236.

[8] 张翀. 油菜籽烘干工艺及旋风烘干机试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 13-16.

[9] 沈宇峰. 油菜脱出物风力清选装置研究与优化[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016: 22-25.

[10] 吴苏喜, 刘瑞兴, 杨文风, 等. 低温循环式烘干机对南方高水分稻谷干燥的实践[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 192-194, 240.

[11] 王丽红, 梁荣庆, 秦金伟, 等. 加工番茄果秧分离参数优化及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 23-28.

[12] 曹雄, 艾芳, 刘梦瑶, 等. 葛根素醇提工艺的优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 167-171.

[13] TIAN Yu-ting, ZHAO Ying-ting, HUANG Ji-ju, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms[J]. Food Chemistry, 2016, 197(3): 714-722.

[14] 钱革兰, 崔政伟. 响应面分析热风微波耦合干燥胡萝卜片的形变[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 38-41.

[15] 孙翠, 王钰, 沈小瑞, 等. 杏鲍菇热风-真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 189-193.