

玉米丸粒化种子的薄层干燥试验及其干燥模型

袁月明, 陈丽梅, 王鸿斌, 王朝辉, 尹海燕

(吉林农业大学工程技术学院, 长春 130118)

摘要: 玉米丸粒化种子刚制成后其含水率比较大, 必须及时干燥。其干燥工艺的合理选择对提高干燥效率, 减少能耗, 保证质量非常重要。采用正交试验的方法, 对玉米丸粒化种子进行了 3 因素 3 水平的干燥试验, 得出其干燥曲线为指数曲线, 并分析各试验因素对干燥特性的影响。同时对不同风温下的干燥曲线进行了模型比较, 采用多元线性回归分析程序, 经拟合得出适合于玉米丸粒化种子的数学模型为 Page 模型。玉米丸粒化种子干燥特性不同于非丸粒化种子, 丸粒化种子有其特定的薄层干燥方程。该模型能较好地预测各干燥阶段的干燥速率及含湿量, 确定合理的干燥工艺以便调控干燥环境, 达到高效低耗的目的。

关键词: 玉米丸粒化种子; 薄层干燥; 干燥模型; 干燥工艺

中图分类号: S351.1; S375

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)03-0169-05

1 引言

精密播种技术已为世界各国所重视, 但玉米机械精播的困难主要是由于玉米种子形状属于异形体, 同一品种玉米籽粒的尺寸、形状也不相同, 影响了机械精量点播。因此, 从统一玉米种子的尺寸、形状入手, 对玉米种子进行丸粒化成类球型, 提高其流动性和充种性能, 满足精播对种子的要求。刚制成的丸粒化种子外壳水分都比较大, 如不及时干燥, 种子就利用渗透作用通过种皮吸水, 种子吸水膨胀, 造成丸壳破裂, 这样就影响丸粒化种子的包装、运输、贮藏及精量播种。为保持玉米种子 12%~14% 的安全水, 防止发生霉变, 不影响发芽率, 丸粒化玉米种子在加工完成后, 必须及时进行干燥处理, 以满足含水率、丸壳强度、单籽率等指标的要求。

目前, 国内外对谷物的干燥有很多研究, 综合以往的研究结果, 影响玉米干燥速率的诸因素有玉米的初始含水率、热风温度、风量和热风相对湿度等。一些学者基于试验建立的各自不同的薄层干燥方程, 即使输入相同的原始数据, 得到的结果也有较大差异, 其原因很复杂。对玉米丸粒化种子来说, 其表面的丸粒化层对结果影响很大, 而且目前有关玉米丸粒化种子干燥的研究还很少。玉米丸粒化种子干燥特性不同于非丸化种子, 为满足丸化种子干燥效率高, 功率消耗低的要求, 我们采用加热介质及相对移动种子层错流式薄层干燥。

2 试验目的、设备和方法

2.1 试验目的

通过试验, 找到各试验因素对干燥特性的影响, 建立干燥特性曲线, 根据丸粒化种子湿度比和干燥时间, 找到适合丸粒化玉米种子的数学模型。

2.2 试验设备

试验结合生产进行, 利用生产设备, 包括糖衣机、空

气压缩机、喷枪、滚筒、风机、加热器等。

2.3 试验材料与试验方法

采用正交试验的方法, 选取 $L_9 3^4$ 正交表。本试验主要探讨丸化种子的干燥过程和工艺参数。试验材料选用刚加工完成的丸粒化玉米种子, 品种有本育 13 农大 108 四密 25。

风机吹向丸化种子的风速由 DEML 轻便三杯风速仪测定。电机和滚筒的转速由 DT2234A 转速表测定。环境温度采用 D- (100±0.5)℃ 水银温度计测量。相对湿度用干湿球温度计测量。热风温度的测量与环境温度测量相同。

表 1 试验因素水平表

Table 1 Experimental factors and levels

编号	A /℃	B /m·s ⁻¹	C /min	D	RH /%	M ₀ /%	M _e	t /min
1	1(27)	1(5.4)	1(20)	1	60	27.5	19.1	65
2	2(32)	2(6.7)	1(20)	2	64	29.1	19.0	70
3	3(38)	3(7.7)	1(20)	3	68	28.3	18.0	55
4	1(27)	3(7.7)	2(40)	2	60	30.8	19.0	60
5	2(32)	2(5.4)	2(40)	3	65	28.9	19.3	75
6	3(38)	1(6.7)	2(40)	1	68	30.1	19.4	60
7	1(27)	2(6.7)	3(60)	3	62	29.5	19.6	65
8	2(32)	3(7.7)	3(60)	1	64	28.6	19.2	60
9	3(38)	1(5.4)	4(60)	2	69	28.0	19.2	65
时 间	(\bar{Y}_{i1}) ₁	63.33	62.5	68.33	61.7			
	(\bar{Y}_{i2}) ₁	67.5	68.33	65	65			
	(\bar{Y}_{i3}) ₁	61.67	60	58.33	65			
	(R_j) ₁	5.83	8.33	10	3.3			
	较优水平	A ₃	B ₃	C ₃				
功 耗	因素主次顺序	A	C	B				
	(\bar{Y}_{i1}) ₂	5.18	5.52	4.8787	4.687			
	(\bar{Y}_{i2}) ₂	4.88	5.277	5.065	5.482			
	(\bar{Y}_{i3}) ₂	5.192	4.6687	5.37	5.185			
	(R_j) ₂	0.312	0.8513	0.493	0.795			
	较优水平	A ₂	B ₃	C ₁				
	因素主次顺序	B	C	A				

注: M ——相对湿度; M_0 ——初始含湿量 (d. l%); M_e ——终止含湿量 (d. l%); t ——干燥持续时间, min (即从干燥开始至将丸化种子干燥到安全水所需时间)。

收稿日期: 2002-08-05

基金项目: 吉林省科技厅资助项目

作者简介: 袁月明, 女, 硕士生导师, 副教授, 吉林大学博士生, 长春市吉林农业大学工程技术学院, 130118

丸化种子含水率采用 300℃烘箱测定法 测定方法有两种: 1)将谷物磨碎,而后在烘箱内以 130℃温度烘干 1~ 2 h; 2)将完整的谷粒放入烘箱,以 100℃温度烘干 72~ 96 h 为了精确测定含水率,必须防止样品去水后吸水 办法是在样品取出烘箱后,在样品的上面盖上玻璃盖板,并在样品与容器都已经冷却之后再称质量 每隔 10 min 采样一次,每次采样计录时间、物料质量、温度和湿度 试验因素有 3 个: 风温 $A(^{\circ}\text{C})$ 和风速 $B(\text{m/s})$, 加热器通电时间 C (即干燥介质加热时间,以分钟计) 每个因素选取 3 个水平 具体安排如表 1

3 试验结果分析

每组试验均有 9 个试验,每个试验采用表 1 所列方案进行。

试验指标为: 1)干基含水率 $h = (G_t - G_g) / G_g$; 2)湿基含水率 $h_w (\%)$, $h_w = (G_t - G_g) / G$; 3)湿度比 MR , $MR = (h - h_2) / (h_1 - h_2)$ 两式中, G_t G_g G 为物料初始、 t 时刻、干物质质量; h_1 h_2 h_2 为物料初始、 t 时刻、平衡含水率(干基)

3.1 玉米丸粒化种子的干燥曲线

干燥初期含湿量 M 随干燥时间 t 的增加下降较快,干燥后期 M 下降非常缓慢。图 1 为风温 27℃、风速 5.4 m/s 加热时间为 60 min 工况下的 $M - t$ 关系曲线 在图中看出丸粒化玉米种子干燥过程中水分蒸发近似指数规律下降,这为建立干燥模型提供了依据。

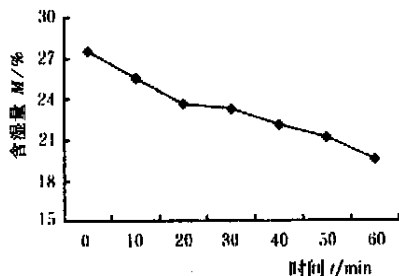


图 1 含湿量与干燥时间曲线

Fig. 1 Curve of the relationship between moisture contents and drying time

3.2 介质温度对干燥特性的影响

图 2 为在 5.4 m/s 风速下,风温 27℃、32℃、38℃ 3 种工况的 $MR - t$ 干燥曲线,由图可见,湿度比与干燥时间之间也近似指数关系 在风速恒定时,随着温度的升高,曲线的曲率有所增大,即温度越高,干燥速度越快,干燥时间越短。

3.3 风速对干燥特性的影响

图 3 和图 4 为 27℃ 和 32℃ 两种介质温度时,风速分别为 5.4 6.7 m/s 和 7.7 m/s 工况下的 $MR - t$ 曲线,由图可见,5.4 m/s 的干燥曲线曲率低于 6.7 m/s 和 7.7 m/s 说明增大风速可以缩短干燥时间。

3.4 介质加热时间对干燥特性的影响

图 5 为在风温 32℃、加热时间为 20 40 60 min 的 3 种工况的 $MR - t$ 干燥曲线,由图可见随着加热时间的延长,干燥速度加快,因而随着加热时间延长可以缩

短干燥时间。

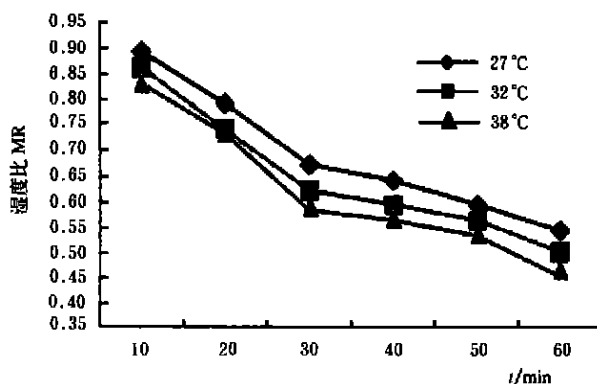


图 2 不同介质温度曲线

Fig. 2 Temperature curves for different drying media

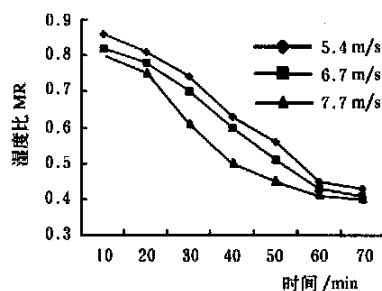


图 3 介质温度 27℃ 时不同风速的干燥曲线

Fig. 3 Drying curves of different air speed at medium temperature of 27℃

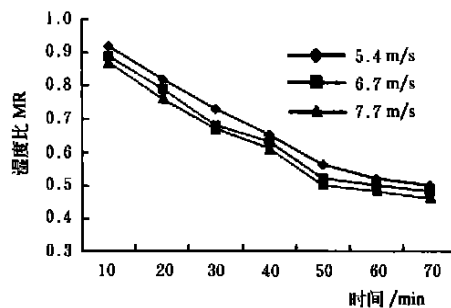


图 4 介质温度 32℃ 时不同风速的干燥曲线

Fig. 4 Drying curves of different air speed at medium temperature of 32℃

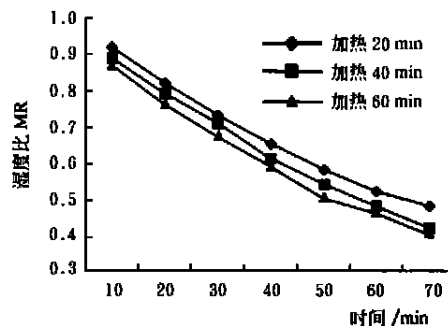


图 5 介质温度 32℃ 时不同加热时间干燥曲线

Fig. 5 Drying curves at medium temperature of 32℃ at different heating time

3.5 丸粒化种子干燥特性

玉米丸粒化种子是由外层的填充剂和内部的玉米种子二部分组成,外表填充剂的主要成分是膨润土,其主要矿物成分为蒙脱石,吸水性能强,干燥后还有较好的强度指标。刚加工完成后丸化种子外层水分要高于种子水分,所以在干燥初期丸化种子吸收热量,主要是外层填充料失水即蒙脱石晶层间水分扩散到表面被蒸发到干燥介质空气中。内部的玉米种子由于在加工过程中是先喷入胶液使其吸附膨润土,所以其种皮及胚的含水率较高。干燥时由于外层膨润土水分的扩散作用逐渐增强,所以在膨润土吸附作用下,种子将失水。这样形成一个由玉米种子种皮及胚-膨润土晶层间-干燥空气的水分蒸发过程。

结合干燥曲线和试验得到的含水率变化数据,可以将干燥过程分为以下几个阶段: 1)快速干燥阶段。此阶段丸化种子的水分传递过程主要发生在表层。通过对丸化种子丸壳及种子含水率分别测量得知,中部和心部的含水率几乎为零。此阶段丸化种子由里及表呈温度梯度,为下一阶段大量去创造有利条件。2)等速干燥阶段。在此阶段由里及表呈水分梯度,与温度梯度同向,其中部和心部的水分经表层和芽部迅速向外扩散。3)降速干燥阶段。丸化种子的热量部分用于水分的汽化,另一部分用于种子升温,丸化种子温度梯度不大,温度传导作用不强,存在阻止内部水分向外移动的作用,使丸化种子的水分下降速度减慢。

4 丸化玉米种子干燥的数学模型

建立薄层干燥模型对摸索干制规律,预测不同干制工艺下的干燥参数具有重要的意义。而物料的干燥特性不仅受干燥介质温度、湿度、流速等影响,而且因物料种类、内部结构、物理化学性质及外部形状的不同而存在着明显差异。对玉米来说,因为气候条件、玉米品种不同、玉米颗粒的尺寸、形状、种皮厚度和颗粒质地软硬程度等差异,所以在干燥过程中玉米水分扩散速率也不同。许多数学模型已经被建立起来了,然而却很少有关于玉米丸粒化种子的模型,运用试验数据与理论分析相结合的方法,获得适合玉米丸粒化种子的数学模型。

4.1 干燥模型

常见用于描述农产品物料薄层干燥的模型有 4 种,见表 2。

表 2 常见的谷物薄层干燥模型		
Table 2 Drying models for thin layer grain		
序号	模型名称	方 程
1	指数模型	$MR = \exp(-K_d t)$
2	Page 模型	$MR = \exp(-K_d t^n)$
3	单项扩散模型	$MR = a \exp(-K_d t)$
4	经验模型	$t = A \ln MR + B (\ln MR)^2$

4.2 玉米丸粒化种子数学模型的选择

为了探求丸粒化玉米种子薄层干燥规律,综合试验指标当中的功耗和干燥至安全水所需时间,由两指标回

归系数检验可知,参量风温对干燥曲线影响较大,本文选取对干燥曲线影响最大的参量——风温,对图 2 的数据进行表 2 中 4 个模型的拟合。为了比较模型的好坏,本文采用 3 个指标:回归方程的 F 值、(复)相关系数 R 和剩余标准差 B 。

本文采用多元线性回归分析程序,故首先将各模型化为线性模型如下。

1) 指数模型 参量 K_d 可假设成 Arrhenius 型方程: $K_d = a_0 \exp(-b_0/T)$, 式中: a_0, b_0 为常数; T 为干燥介质绝对温度。则原模型可化为: $\ln[\ln(1/MR)] - \ln t = \ln a_0 - b_0/T$, 令 $Y = \ln[\ln(1/MR)] - \ln t, K_0 = \ln a_0, K_1 = -b_0, X = 1/T$, 则 $X - Y$ 关系见表 3。

表 3 指数模型下 $X - Y$ 关系 (加热 60 min)

Table 3 Relationship of $X - Y$ under index model (heating for 60 min)

测点号	1	2	3	4	5	6	
$X(\times 10^{-3})$	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	
Y	-0.10	-0.057	-0.34	-0.33	-0.36	-0.23	
测点号	7	8	9	10	11	12	
$X(\times 10^{-3})$	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	
Y	-0.69	-0.35	-0.46	-0.44	-0.46	-0.09	
测点号	13	14	15	16	17	18	19
$X(\times 10^{-3})$	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
Y	0.11	-0.35	-0.34	-0.20	-0.27	-0.37	-0.19

2) Page 模型

此模型是 Page (1949) 在指数模型的基础上修改成的形式。取 $K_d = a_0 \exp(-b_0/T), n = c_0 + d_0 T + e_0 T^2$, 则原模型可化为: $\ln[\ln(1/MR)] = \ln a_0 - b_0/T + c_0 \ln t + d_0 T \ln t + e_0 T^2 \ln t$, 令 $Y = \ln[\ln(1/MR)], k_0 = \ln(a_0), K_1 = -b_0, X_1 = 1/T, K_2 = C_0, X_2 = \ln t, K_3 = d_0, X_3 = T \ln t, X_4 = T^2 \ln t$, 其 $X_i - Y$ 关系见表 4。

表 4 Page模型下 $X_i - Y$ 关系

Table 4 Relationship of $X_i - Y$ under Page model

测点号	1	2	3	4	5	6
$X_1(\times 10^{-3})$	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
X_2	- 1.79	- 1.10	- 0.69	- 0.41	- 0.18	0
X_3	- 537.6	- 329.6	- 208.0	- 121.7	- 54.7	0
$X_4(\times 10^3)$	- 161.3	- 98.9	- 623.9	- 365.0	- 16.4	0
Y	- 1.89	- 1.16	- 1.03	- 0.74	- 0.54	- 0.22

测点号	7	8	9	10	11	12
$X_1(\times 10^{-3})$	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28	3.28
X_2	- 1.79	- 1.10	- 0.69	- 0.41	- 0.18	0
X_3	- 546.5	- 335.1	- 211.4	- 123.7	- 55.6	0
$X_4(\times 10^3)$	- 166.7	- 102.2	- 64.5	- 37.7	- 16.96	0
Y	- 2.48	- 1.45	- 1.16	- 0.84	- 0.34	- 0.09

测点号	13	14	15	16	17	18	19
$X_1(\times 10^{-3})$	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
X_2	- 1.79	- 1.10	- 0.69	- 0.41	- 0.18	0	0.08
X_3	- 557.3	- 341.7	- 215.6	- 126.1	- 56.7	0	24.9
$X_4(\times 10^3)$	- 173.3	- 106.3	- 67.05	- 39.2	- 17.6	0	7.7
Y	- 1.68	- 1.45	- 1.03	- 0.61	- 0.45	- 0.37	- 0.11

3) 单项扩散模型

此模型为扩散模型的第一项,令 $K_d = b + cT + dT^2$,则原模型可化为: $\ln MR = \ln a - b - ct - dt^2$,令 $Y = \ln MR, k_0 = \ln a, K_1 = -b, X_1 = t, K_2 = -c, X_2 = tT, K_3 = -d, X_3 = tT^2$ 则 $X_i - Y$ 关系见表 5

表 5 单项扩散模型下 $X_i - Y$ 关系
Table 5 Relationship of $X_i - Y$ under
singel item diffusion model

测点号	1	2	3	4	5	6	7
X_1	0.17	0.33	0.50	0.67	0.83	1.00	0.17
X_2	50.0	100	150	200	250	300	50
$X_3(\times 10^3)$	15	30	45	60	75	90	15.5
Y	-0.15	-0.22	-0.25	-0.34	-0.40	-0.54	-0.87
测点号	8	9	10	11	12	13	14
X_1	0.33	0.50	0.67	0.83	1	0.17	0.33
X_2	101.7	152.5	203.3	254.2	305	51.8	103.7
$X_3(\times 10^3)$	31.0	46.5	62	77.5	93.0	16.1	32.2
Y	-0.06	-0.13	-0.30	-0.46	-0.60	-0.76	-0.92
测定点	15	16	17	18	19		
X_1	0.50	0.67	0.83	1	1.08		
X_2	155.5	2.703	259.2	311	337		
$X_3(\times 10^3)$	48.4	64.5	80.6	96.7	104.8		
Y	-0.094	-0.29	-0.39	-0.49	-0.58		

4) 经验模型

原模型可化为: $t / \ln MR = A + B \ln MR$,令 $Y = t / \ln MR, K_0 = A, K_1 = B, X = \ln MR$,则 $X - Y$ 关系见表 6

表 6 经验模型下 $X_i - Y$ 关系
Table 6 Relationship of $X_i - Y$ under experience model

测点号	1	2	3	4	5	6	7
X	-0.15	-0.31	-0.36	-0.48	-0.58	-0.80	-0.08
Y	-1.1	-1.06	-1.40	-1.39	-1.44	-1.25	-2.00
测点号	8	9	10	11	12	13	14
X	-0.24	-0.31	-0.43	-0.71	-0.92	-0.19	-0.24
Y	-1.41	-1.59	-1.55	-1.17	-1.09	-0.89	-1.41
测定点	15	16	17	18	19		
X	-0.36	-0.54	-0.63	-0.69	-0.89		
Y	-1.40	-1.22	-1.31	-1.44	-1.22		

计算机计算结果见表 7及表 8 从表中可知,最适合的模型为 Page 模型, $MR = \exp(-K_d t^n), K_d = a^0 \exp(-b^0 / T), n = c^0 + d^0 + e^0 T^2$,其模型常数为 $a^0 = 0.59, b^0 = 77.56, c^0 = -929.33, d^0 = 6.09, e^0 = -0.00998$ 经检验,此模型回归的方程高度显著,因此得出的模型能较好地预测各干燥阶段的干燥速率及含水量,也可以根据最佳干燥工艺合理调控干燥环境,为提高干燥效率,减少能耗,保证质量提供技术依据

表 7 玉米丸粒化种子的薄层干燥模型系数

Table 7 Thin-layer drying model coefficient of pelleted corn seeds

模型名称	K_d					n			a	A	B
	a_0	b_0	b	c	d	c_0	d_0	e_0			
指数模型	1.27	157.31									
Page模型	0.59	77.56				-929.33	6.09	-0.00998			
单项扩散			40.16	-0.27	0.00046				0.675		
经验模型										-1.46	-0.28

表 8 玉米丸粒化种子的干燥模型比较

Table 8 Drying model comparison of pelleted corn seeds

模型名称	F	R	B
指数模型	0.034	0.002	0.56
Page模型	100.9	0.966	0.26
单项扩散模型	0.091	0.018	1.117
经验模型	1.57	0.084	0.95

5 结 论

1) 玉米丸粒化种子干燥特性与非丸粒化种子不同,玉米丸粒化种子应有其特定的薄层干燥方程。

2) 玉米丸粒化种子干燥曲线为典型的指数曲线,其干燥速率取决于干燥介质的温度、流速和加热器通电时间。温度越高,流速越大,电热器通电时间越长,干燥速率越快。

3) 采用多元线性回归分析程序,比较了 4种常见谷物的薄层干燥模型,经拟合得出最佳模型为 Page模型。

4) 上述结果,能够较好的预测各干燥阶段速率及含水量,也可以根据最佳干燥工艺合理调控干燥环境,为提高干燥效率,减少能耗,保证质量提供技术依据。

参 考 文 献

[1] 王登峰,李慧珍.影响玉米薄层干燥速率的诸因素研究[J].农业工程学报,1993,9(2):6,102~107.
[2] 王修兰.金针菇干燥特性及数学模型[J].农业工程学报,1992,8(1):105~111.
[3] 李洪江,杨林青.花生仁薄层干燥试验研究[J].农业工程学报,1992,8(2):56~61.
[4] 张悠,王成芒.预处理刀豆的薄层干燥试验及其干燥模型[J].农机化研究,1992,4,14~19.
[5] 曹崇文.水稻干燥模型与干燥机性能预测[J].北京农业工程大学学报,1995,15(2):58~65.
[6] 连政国.玉米过热蒸汽薄层干燥数学模型[J].农业机械学报,1999,30(6):68~72.
[7] 江永辉.喷动床谷物干燥的试验研究[J].北京农业工程大学学报,1991,11(1):46~52.
[8] 曹崇文.谷物干燥工艺的试验研究[J].北京农业工程大学

学报, 1995, 15(2): 51~ 57.

[9] Ajibola O O. Thin-layer drying of melon seed[J]. Journal of Food Engineering, 1989, 9, 305~ 320.

[10] 张文华, 杨孟春. 渗后胡萝卜丝热风干燥的研究 [J]. 农机

与食品机械, 1998, 3, 9~ 10.

[11] Parti M. Selection of mathematical model for drying grain in thin-layers [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 54, 339~ 352

Experiment on thin layer drying of pelleted corn seed and its drying model

Yuan Yueming, Chen Limei, Wang Hongbin, Wang Zhaohui, Yin Haiyan

(College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract It is necessary to dry it in time because of high moisture content after corn seed is pelleted. The selection of reasonable drying technology has great effect on raising drying efficiency, reducing energy consumption and improving quality. Drying experiment of pelleted corn seed was conducted through three-factor and three-level orthogonal experimental design, its drying characteristic curve was obtained as an index curve, and the effects of various experimental factors on drying property were analyzed. Model comparisons of drying curves at different air temperatures were made. Multiple element linear regression analysis program was employed to simulate the model. It is obtained that the mathematical model suitable for pelleted corn seed is Page model. The drying property of pelleted corn seed is quite different from that of non-pellet corn seed. The former has its own thin layer drying equation. This model can better estimate drying speed and moisture content at different drying stages, determine reasonable drying technology so that it can adjust and control the drying environment, and achieve higher efficiency and lower energy consumption.

Key words pelleted corn seed; thin layer drying; drying model; drying technology