

魔芋片单层热风干燥特性的试验研究*

邱 凌¹ 仇农学² 薛惠岚² 吴万兴³

(1 西北农业大学干旱半干旱研究中心, 2 机械与电子工程学院, 3 陕西省林业科学研究所, 陕西杨陵 712100)

摘 要 利用自行设计的循环式热风干燥装置, 在风温 50~90 °C, 风速 0.5~1.5 m/s, 片厚 5~13 mm 三因素五水平二次正交旋转组合优化试验设计的 23 种工况下, 模拟魔芋片单层热风干燥过程, 研究了三因素对魔芋片干燥特性和效率的影响规律, 探讨了干燥机理和效应原因, 得到干燥速率数学模型。统计检验结果表明, 所得模型的置信度大于 99%, 可定量描述干燥速率随风温、风速、片厚的变化规律。

关键词 魔芋, 干燥特性, 干燥速率

中图分类号 TS225.35

热风干燥法是目前魔芋干制生产的主要方法^[1~4], 其过程存在着复杂的传热和传质。已有的研究^[1~3], 集中报道了根据生产经验所得到的干燥工艺和方法, 对干燥过程特性、机理和模型的研究则很少。本研究以干燥理论为基础, 采用先进的优化试验设计方法, 在试验分析的基础上, 建立了魔芋片单层热风干燥速率数学模型。该模型揭示了影响干燥效率的主因素效应, 描述了风温、风速、片厚三因素对干燥过程和效率的影响规律, 为指导魔芋干制生产和理论研究提供了量化基础资料。

1 试验设备

试验是在自行设计组装的电加热热风循环试验装置上进行的, 该装置由风机、加热管、干燥室、控温系统、风量调节装置组成(见图 1)。

1.1 干燥介质温度控制系统

由 4 根 GYQ₄-220/1.2 型和 2 根 GYQ₄-220/0.8 型电热管加热, 总功率 6.4 kW。通过自行设计的由 WM2K-01 型温控仪(10~100 °C, ±0.5 °C)和 CJ10-20 型交流接触器组成的控制电路(见图 2)自动控制干燥介质温度。

1.2 干燥介质流速控制系统

干燥介质流速动力由 CFG-1-75 型离心风机提供, 其额定排风量为 510 m³/h, 风压为 80 mm H₂O, 流速由日产 6151 型风速仪测定, 通过手动风量调节阀控制。

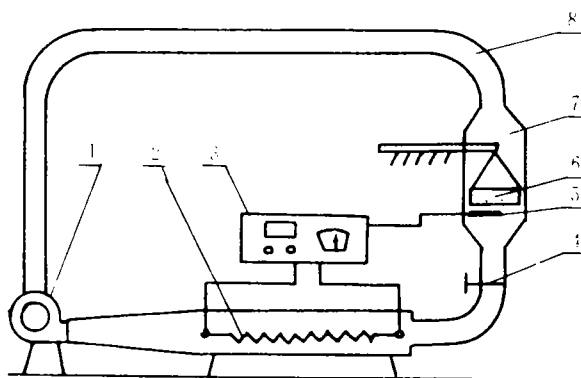


图1 热风干燥试验装置结构示意图

1. 风机; 2. 电热器; 3. 控温仪; 4. 风量阀;
5. 传感器; 6. 物料篮; 7. 干燥室; 8. 回风管

收稿日期: 1994-11-05
* 林业部“八五”攻关项目

1.3 干燥室与称量装置

干燥室容积为 $\Phi 30\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ ，物料可单层铺放，也可多层铺放，热风由下而上通过干燥室。干燥过程中用 EB-280 型数字式电子天平称量不同时刻物料的重量。

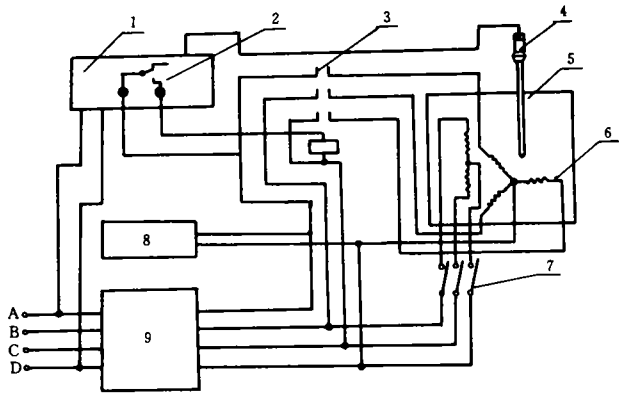


图 2 热风干燥试验装置电路图

1. 控温仪；2. 继电器；3. 交流接触器；4. 传感器；
5. 干燥室；6. 电热器；7. 电闸；8. 风机；9. 电度表

2 材料与方 法

2.1 试验材料

供试原料取自陕西省西乡县丰宁乡同一产地、大小一致、表面光圆、生长年代相同的花魔芋 (*Amorphophallus rivieri* Durieu) 块茎。原料洗净晾干后，保存于 5℃ 冰箱备用。

2.2 试验方法

影响魔芋干制效果的因素很多，其中较为重要的有：介质温度、介质速度、介质相对湿度、切分状态、原料品种、成熟度等^[4]。为了确定干燥主要因素及其范围，首先进行了单因素试验。结果表明，在试验范围内，介质相对湿度实测值为 9%~10%，可近似视为不变因素；依据干制生产实际状况^[1~3]，切分方式确定为片状 (长×宽为 40 mm×50 mm)，片厚 5~13 mm，风温 50~90℃，风速 0.5~1.5 m/s^[5]；原料为同产地、同品种、同年代魔芋块茎，故原料品种和成熟度视为不变因素。

多因素试验采用二次正交旋转组合优化试验设计，为消除试验因素量纲及取值的影响，使回归系数标准化，对三因素五水平试验设计进行了无量纲线性编码代换^[6]，见表 1。

表 1 魔芋热风干燥试验因素水平及编码

试验因素	因素水平及编码值 ($r=1.682$)				
	$-r$	-1	0	1	r
风温 $Z_1(^{\circ}\text{C})$	50	58.11	70	81.89	90
风速 $Z_2(\text{m/s})$	0.5	0.7	1.0	1.3	1.5
片厚 $Z_3(\text{mm})$	5	6.62	9	11.38	13

2.2 试验过程

首先预热试验装置，待风温、风速稳定于设定值后，将魔芋剥皮，并按试验设计厚度切

片,称量 200 g,单层铺放于干燥室物料篮内,记录起始时间。同时,称取 10 g 材料,用 SC69-20 型水分快速测定仪测定材料初始含水率。试验中,定时快速取出物料称重,并按下式计算不同时刻的湿基含水率。

$$W_t = (G_t - G_s)/G_t = [G_t - G_0(1 - W_0)]/G_t$$
 (1)

式中: G_0, G_t, G_s 分别为材料的初始重量、 t 时刻重量和烘干后的恒重; W_0 和 W_t 分别为材料的初始含水率和 t 时刻的含水率。

当含水率 W_t 烘至 12% 时,停止试验,记录结束时刻。干燥速率 DR 用下式计算:

$$DR = (W_0 - W_t)/t$$
 (2)

式中: t 为干燥过程总时间; W_0 和 W_t 同(1)式。

3 结果与分析

3.1 魔芋热风干燥特性曲线

根据风温、风速、片厚单因素干燥试验实测数据,得到图 3,4 所示干燥曲线和干燥速率曲线。由图 4 可见,魔芋热风干燥过程分为 AB、BC、CD 三个明显不同的阶段。

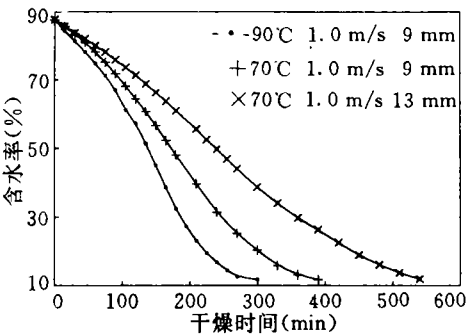


图 3 魔芋热风干燥脱水曲线

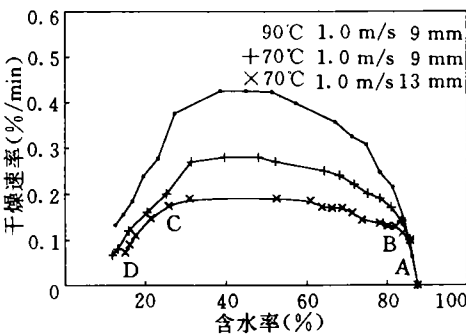


图 4 魔芋热风干燥速率曲线

AB: 升温段;BC: 恒速干燥段;CD: 降速干燥段

在升温段 AB,气固两相进行传热和传质,热空气传给鲜芋片的热量,一部分用于提高芋片的温度,使其由初始温度逐渐提高到热空气状态下的湿球温度;另一部分热量用于汽化水分,故芋片含水率下降较慢,干燥曲线较平缓,该段所需时间较短。在恒速干燥段 BC,芋片温度维持热空气状态下的湿球温度不变,热空气传递给芋片的热量全部用于汽化水分,含水率呈直线下降,干燥速率基本保持不变。此阶段是干燥过程的主要阶段,所用时间较长。在降速干燥段 CD,芋片温度开始上升,热空气传递的热量,一部分用于提高芋片温度,另一部分用于汽化水分,故芋片含水率下降速率变慢,干燥速率呈下降趋势。同时,由图 3,4 可见,风温越高,风速越大,切片越薄,干燥时间越短,干燥速率越大。且风温、片厚对干燥速率的影响效应大于风速。

3.2 干燥速率数学模型建立与检验

为探讨多因素及交互作用对干燥速率的影响及其规律,按三因素五水平二次正交旋转组合试验设计^[6],进行了 23 组试验,结果见表 2。

表 2 魔芋干燥速率试验方案与结果

试验 编号	因素编码值			干燥速率 -DR	试验 编号	因素编码值			干燥速率 DR
	x_1	x_2	x_3			x_1	x_2	x_3	
1	-1	-1	-1	12.4604	13	0	0	-r	20.4325
2	-1	-1	1	5.3002	14	0	0	r	6.4325
3	-1	1	-1	13.9940	15	0	0	0	10.7198
4	-1	1	1	8.0782	16	0	0	0	10.7539
5	1	-1	-1	22.8870	17	0	0	0	11.2134
6	1	-1	1	12.1448	18	0	0	0	10.3584
7	1	1	-1	24.4206	19	0	0	0	11.0351
8	1	1	1	14.9228	20	0	0	0	10.1246
9	-r	0	0	9.4595	21	0	0	0	10.2378
10	r	0	0	23.9846	22	0	0	0	11.1243
11	0	-r	0	10.2574	23	0	0	0	10.6792
12	0	r	0	13.8835	平均				12.8219

应用该方法的计算机数据分析软件^[7]处理表 2 结果,得到如下干燥速率回归模型:

$$DR = 10.7234 + 4.318x_1 + 1.078x_2 - 4.1636x_3 - 0.8955x_1x_3 + 0.3111x_2x_3 + 2.1204x_1^2 + 0.4645x_2^2 + 0.9494x_3^2$$
 (3)

式中: x_1, x_2, x_3 分别表示风温、风速、片厚编码值, $-1.682 \leq x_i \leq 1.682$ ($i=1,2,3$)。

模型(3)的显著性检验,拟合性检验和回归系数检验结果见表 3。

统计检验结果表明,回归模型极显著,其置信度大于 99%,并拟合得很好,表明模型可用于定量描述干燥速率随风温、风速、片厚的变化规律。

3.3 干燥速率数学模型效应分析

3.3.1 主因素效应分析 根据模型(3)各项回归系数绝对值及对应 F 检验值的大小,得到影响干燥速率的主因素效应为:风温>片厚>风速。

3.3.2 单因素效应分析 对模型(3)进行降维处理,得到图 5 所示单因素效应曲线。由图 5 可见,干燥速率随风温、风速的升高而增大,随片厚的增加而减小。这是因为风温、风速的升高,使传热和传质动力加大,促进了干燥过程中芋片中水分的运移和蒸发;而片厚的增加,增大了干燥过程中的传质阻力,水分运移距离加长,干燥时间相应加长。

3.3.3 双因素交互作用效应分析 由表

3 可知,交互项 x_1x_3 呈极显著, x_2x_3 呈显著水平,表明高风温、薄片厚的交互作用和高风

表 3 干燥速率回归模型统计检验结果

检验项目	F 值	关系	F_{α} 值	显著性
显著性	439.15	>	4.19 [$F_{0.01}(9,13)$]	**
拟合性	1.00	<	1.66 [$F_{0.25}(5,80)$]	**
x_1	1668.77	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_2	103.99	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_3	1551.51	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_1x_2	2.98×10^{-12}	<	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	剔除
x_1x_3	42.04	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_2x_3	5.07	>	4.67 [$F_{0.05}(1,13)$]	*
x_1^2	468.23	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_2^2	22.47	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**
x_3^2	93.86	>	9.07 [$F_{0.01}(1,13)$]	**

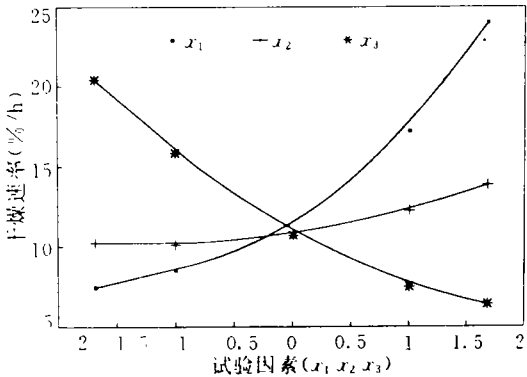


图 5 干燥速率单因素效应曲线

风速不能无限增大,片厚不能无限减小,它们受产品质量和加工工艺的制约,应合理匹配^[8]。

4 结 论

1)魔芋片的干燥过程分为三个阶段,前期为升温段,干燥速率逐渐提高;中期为恒速干燥段,干燥速率基本不变;后期为降速干燥段。风温越高,切片越薄,恒速干燥段越短,干燥速率越大。

2)研究和建立了魔芋片单层热风干燥速率数学模型,该模型的置信度大于 99%,可定量描述干燥速率随风温、风速、片厚的变化规律。

3)分析了影响干燥速率的因素及其效应,其主因素效应为:风温>片厚>风速;各因素与干燥速率呈开口向上的二次曲线;风温、片厚的交互作用对干燥速率的效应极显著。

参 考 文 献

- 1 王昌祥.魔芋制品加工技术与菜谱、方剂选介.湖南农业科学,1985(6),35~38
- 2 朱平固,乔辉莉.魔芋的八种加工方法.江苏农业科学,1986(7),13~14
- 3 郑孝荣.魔芋的栽培与加工.福建农业科技,1986(2),26~27
- 4 化工手册编委会.化学工程手册第 16 篇—干燥.北京:化学工业出版社,1989.86~102
- 5 白崇仁,谢秀英,李敬欣等.胡萝卜丝热风干制参数的研究.农业工程学报,1991,7(4),88~93
- 6 任露泉.试验优化技术.北京:机械工业出版社,1987.147~162
- 7 朱伟勇,胡展江,陈惠森等.最优设计的计算机证明与构造.沈阳:东北工学院出版社,1987.461~488
- 8 邱凌.魔芋热风干燥与真空冷冻干燥工艺的研究:[学位论文].陕西杨陵:西北农业大学机电学院,1994

An Experimental Study on Hot Air Drying Properties for Thin Layer-sliced Konjak

Qiu Ling¹ Qiu Nongxue² Xue Huilan² Wu Wanxing³

(1 Arid and Semiarid Area Research Centre; 2 College of Mechanical and Electronic Engineering,
Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

(3 Institute of Shaanxi Forest Science, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract Simulated hot air drying tests for thin layer-sliced konjak were performed by using a self-designed recycle hot air drying device under the conditions of 50℃~90℃ for air temperature, 0.5~1.5 m/s for airflow velocity and 5~13 mm for thickness of the sliced konjak. The effect of the air temperature, the airflow speed, the slice thickness and the drying rate was studied in particular. From an analysis of the drying mechanism and the effect of different factors on drying process, the mathematic model of drying rate was obtained. The results concluded from the monte carlo method showed that the confidence level of the model was higher than 99%. So it could quantitatively describe the changing rules of the drying rate with air temperature, airflow velocity and slice thickness.

Key words Konjak (*Amorphophallus rivieri*), drying property, drying rate