

稻谷变温均质干燥装置工艺优化与性能试验

刘春山 陈思羽 肖世伟 马浏轩 张艳 陈苏

(佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007)

摘要: 为研究装置干燥均匀性和稻谷干燥特性,通过多因素试验,以干燥温度、滚筒倾角、滚筒转速为影响因素,以干燥时间和干燥速率为评价指标,考察指标对稻谷干燥特性的影响,分析不同干燥工艺对稻谷爆腰率的影响。试验结果表明,影响稻谷干燥时间和干燥速率的主次因素顺序为:干燥温度、滚筒倾角、滚筒转速,最优干燥工艺为干燥温度 55℃、滚筒倾角 2°、滚筒转速 40 r/min。验证试验通过含水率均匀度 K 判定,最佳干燥工艺参数为干燥温度 55℃、滚筒倾角 2°、滚筒转速 60 r/min。在此条件下,稻谷干燥时间为 191 min,干燥速率为 0.036%/min,稻谷含水率均匀度为 99.6%,稻谷干燥效果最优。研究结果可以为稻谷变温均质干燥装置研制和工艺制定提供参考。

关键词: 稻谷; 干燥特性; 均匀性; 爆腰率; 正交试验

中图分类号: S375 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)S1-0366-07

Process Research and Performance Verification of Variable Temperature Homogeneous Drying Device for Paddy

LIU Chunshan CHEN Siyu XIAO Shiwei MA Liuxuan ZHANG Yan CHEN Su

(College of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

Abstract: In order to verify the drying uniformity of the device and study the drying characteristics of paddy, through the multi-factor and multi-level test, taking drying temperature, drum inclination angle, drum speed as the influencing factors, and drying time and drying rate as the evaluation indexes, the influence of the indexes on the drying characteristics of paddy was investigated, and the influence of different drying processes on the paddy crackle ratio was analyzed. The test results showed that the order of the primary and secondary factors affecting the drying time and drying rate of the paddy was as follows: drying temperature, drum inclination angle, and drum speed. The optimal drying process for the drying temperature was 55℃, drum inclination angle was 2°, and drum speed was 40 r/min. Verification test through the moisture content uniformity of the K to determine the optimal drying process parameters for the drying temperature of 55℃, drum inclination angle of 2°, and drum speed of 60 r/min. Under these conditions, the drying time of the paddy was 191 min, the drying rate was 0.036%/min, and the uniformity of moisture content of paddy was 99.6%. The research results can provide certain reference value for the development and process formulation of paddy variable temperature homogeneous drying equipment.

Key words: paddy; drying characteristics; uniformity; crackle ratio; orthogonal test

0 引言

大米是世界大多数人口的主要食物,联合国粮农组织指出我国是稻谷产量大国^[1-2]。刚收割的新

鲜稻谷含水率高达 25%~30%,如果未将含水率降至安全含水率(14%~14.5%)就储藏,湿稻谷极易产生霉变、虫害^[3-4],极大影响稻谷品质,不仅对身体健康有害,也造成粮食的巨大损失,因此干燥是稻

收稿日期: 2023-07-18 修回日期: 2023-08-24

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023C059)

作者简介: 刘春山(1977—),男,副教授,博士,主要从事农产品干燥技术和装备研究,E-mail: liuchunshan_2001@163.com

通信作者: 陈思羽(1980—),女,副教授,博士,主要从事农产品储藏技术和装备研究,E-mail: chensiyu516@163.com

谷收获后的重要环节。

目前,稻谷干燥通常采用传统自然晾晒和机械干燥两种干燥方法^[5-6]。传统自然晾晒极易受天气和场地等因素影响。近些年来,国内干燥装置应用逐年增加,因此对稻谷干燥工艺的研究是十分必要的。为了保证干燥品质,探究稻谷最佳的干燥工艺,研究装置的均质干燥效果,本文对稻谷进行干燥试验,采用热风干燥技术,研究稻谷最佳干燥工艺参数,以期为稻谷变温均质干燥装置研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

本次试验采用自主研制的稻谷变温均质干燥试验装置,如图 1 所示。干燥装置主要由箱体、传动装置、滚筒、风量输送装置、加热装置、升降机构装置、控制系统等组成^[7]。装置工作原理是将高含水率稻谷装入滚筒后,在触摸屏上设定干燥温度和滚筒转速,电机带动链轮,链轮带动链条,使传动轴带动滚筒转动。转动时稻谷在抄板的作用下,随螺旋切向转动,再利用自身重力势能做抛落运动^[2],升降机构根据倾角的要求能够使内框架一侧升降,使滚筒与水平呈规定的角度,稻谷在工作过程中搅拌得更加均匀。滚筒网孔结构使杂质在其转动过程中去除,增加了稻谷与热风之间的接触面积。采集模块温度传感器读取干燥过程的温度,与预设干燥温度相比较,来控制加热管温度、风机转速和电机转速等,采集数据发送给 PLC,PLC 将数据转换反馈给人机交互界面,满足试验要求后,关闭装置电源结束干燥作业。

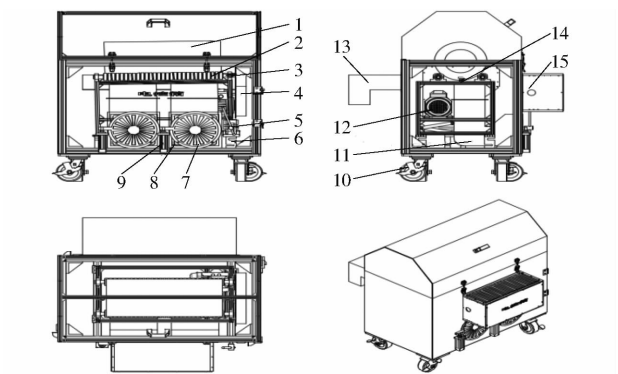


图 1 干燥装置结构图

Fig. 1 Drying device structure diagram

1. 滚筒 2. 橡胶圈 3. 传动轴 4. 传动装置 5. 升降机构
6. 称量传感器 7. 风量调节机构 8. 风机 9. 电动推杆 10. 脚轮 11. 进风管 12. 电机 13. 排风口 14. 限位轮 15. 电控箱

试验所需的仪器设备:HC103 型水分测定仪、ICS439-BB30 (Digital) 型台秤、AB204-L 型精密电子天平 (METTLER TOLEDO), DHG-9920A 型电

热鼓风干燥箱 (上海一恒科学仪器有限公司), FZ102 型粉碎机 (北京市永光明医疗仪器有限公司)^[8]。

1.2 试验材料

试验选用的稻谷品种为龙粳 40。龙粳 40 呈圆粒型,株高 87.0 cm 左右,每穗粒数 90 粒左右,具有发苗快、活秆成熟、抗倒伏能力强的优点,各指标达到国家一级米标准。试验期间稻谷初始含水率为 18%~27%,平均含水率 24.102%^[9]。

1.3 试验方法

选取饱满籽粒 (人工去除干瘪籽粒) 作为试验材料,将处理后的材料分为 9 组,每组称量 3 kg 并测量记录种子初始含水率,分组均匀地平铺在滚筒内,在每组干燥工艺开始前将温度设置为起始温度,并保证装置系统正常运行。

在干燥过程中,需根据试验要求调节装置干燥温度,并每隔 10 min 记录稻谷含水率、当前温度和干燥时间,以便对后期试验数据进行快捷处理^[10-11]。稻谷含水率降至安全储藏含水率 (14%~14.5%) 范围内停止。干燥完成的稻谷需要装入密封袋中封存,换取另一组试样进行试验,直到全部试验结束。

1.4 稻谷含水率和干燥速率测定

稻谷含水率计算公式为^[12]

$$W_t = \frac{M_t - M_c}{M_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W_t ——稻谷干燥至 t 时刻含水率, %

M_t ——稻谷干燥至 t 时刻质量, kg

M_c ——稻谷干燥后质量, kg

稻谷干燥速率计算公式为

$$V_t = \frac{W_t - W_{t+1}}{T_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中 V_t ——稻谷干燥至 t 时刻干燥速率, %/min

T_t —— t 时刻与 $t+1$ 时刻的间隔时间, h

含水率均匀度计算公式

$$K = \frac{\bar{X} - S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 $\bar{X}$ ——取样点含水率平均值

S ——取样点含水率标准差

K 越接近 100%, 则干燥越均匀。

1.5 正交试验设计

分别以干燥温度、滚筒倾角、滚筒转速为影响因素,以干燥时间、干燥速率为评价指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验表^[13],试验共 9 组,每组试验重复 3 次;研究各因素对干燥指标的交互影响,从而优化稻谷均质干燥工艺参数,正交试验编码如表 1 所示。

表 1 正交试验因素编码
Tab.1 Orthogonal factors and levels

编码	因素		
	干燥温度/℃	滚筒倾角/(°)	滚筒转速/(r·min ⁻¹)
-1	45	2	20
0	50	4	40
1	55	6	60

1.6 数据处理

使用 Excel 软件对试验数据整理分析,使用 Design-Expert 软件,进行三因素三水平中心组合试验。

2 试验结果与分析

2.1 单因素对稻谷干燥时间的影响

根据 Design-Expert 软件模型图功能分析单因素对干燥时间的影响,由图 2 可知,干燥温度对干燥时间有着显著的影响,温度由 45℃ 增加至 55℃ 时,干燥时间具有明显的下降趋势,这是由于当温度升高,稻谷初期的热量快速累积,加快水分蒸发速率^[14],但是温度过高会导致稻谷产生爆腰现象,影响稻谷的品质。滚筒倾角和滚筒转速对干燥时间没有显著的影响,但由图 3、4 可以看出,随着倾角和转速的增加,稻谷干燥时间具有上升的趋势,其中当滚筒倾角在 2° 时所需干燥时间最短,6° 时干燥时间最长。其原因是滚筒倾角增大容易使滚筒内部稻谷向一侧堆积,使一侧稻谷出现加热不均匀的现象,使稻谷内部依旧存有大量水分,不利于稻谷的干燥,使干燥时间增加^[15]。当滚筒转速提升时,稻谷被抄起次数增加,使稻谷在热风干燥方面产生了不均匀性,稻谷内部形成温度梯度,故干燥时间增加。

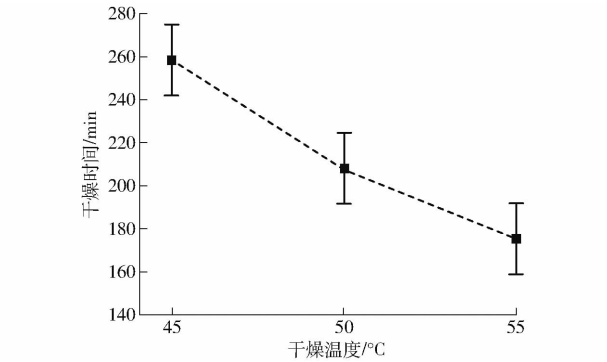


图 2 干燥温度对干燥时间的影响
Fig. 2 Effect of drying temperature on drying time

分析影响因素与评价指标之间关系^[16],如图 5 所示,为干燥温度与滚筒倾角对干燥时间的影响。由图 5 可知,干燥温度对时间的影响效果最为显著,柱状图之间高度相差较为明显,倾角柱状图之间高度幅度相差较小。当温度为 55℃、滚筒倾角为 2°

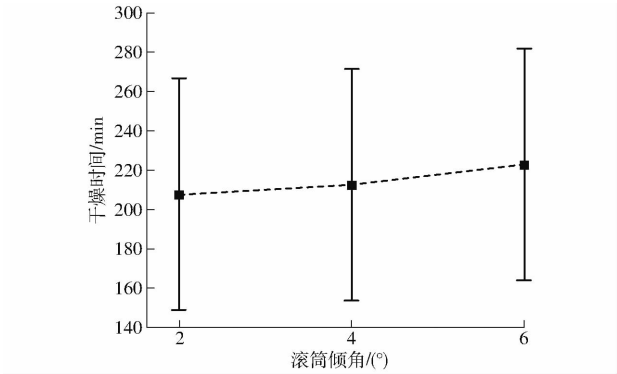


图 3 滚筒倾角对干燥时间的影响
Fig. 3 Effect of drum inclination angle on drying time

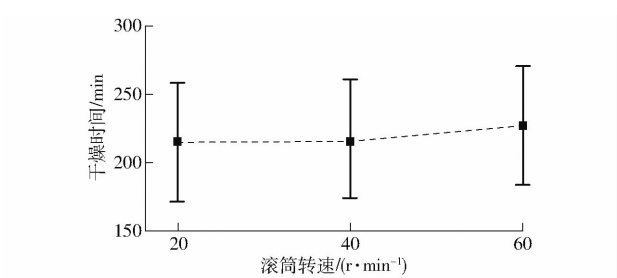


图 4 滚筒转速对干燥时间的影响
Fig. 4 Effect of drum speed on drying time

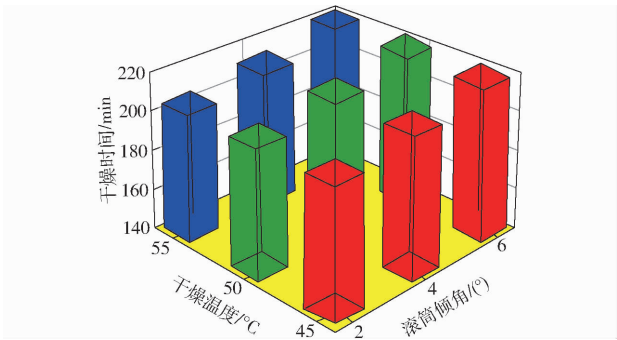


图 5 干燥温度和滚筒倾角对干燥时间的影响
Fig. 5 Effect of drying temperature and drum inclination angle on drying time

时,干燥时间最短^[17];当干燥温度为 45℃、滚筒倾角为 6° 时,干燥时间最长。由此可知,当温度越低、倾角越大时,干燥时间越久。

2.2 单因素对稻谷干燥速率的影响

分析单因素对干燥速率的影响,由图 6 可知,当干燥温度由 45℃ 提升至 55℃ 时,干燥速率具有明显的上升趋势,温度是提升稻谷干燥速率的主要因素之一^[18-19];由图 7 可知,当滚筒倾角为 2° 时,此时干燥速率最大,当倾角为 4° 时,速率最小;由图 8 可以看出,滚筒转速在 20 ~ 60 r/min 时对干燥速率的影响不显著,干燥速率基本稳定不变。

图 9 为干燥温度与滚筒倾角对干燥速率的影响^[20]。由图 9 可知,当干燥温度为 50℃ 和 55℃ 时,柱形图高度比较接近,在 55℃ 下干燥速率最快,但是与 45℃ 相比,与其高度相差明显,此时干燥速率

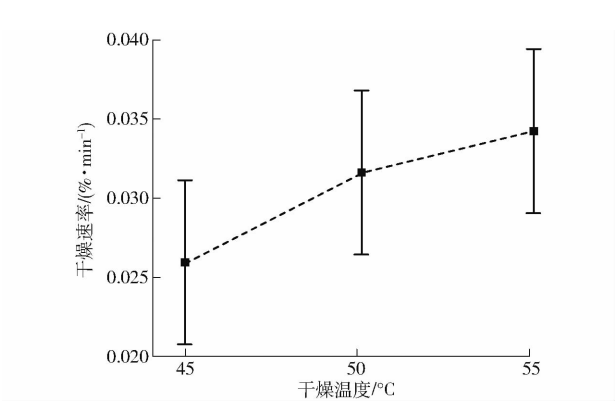


图 6 干燥温度对干燥速率的影响

Fig. 6 Effect of drying temperature on drying rate

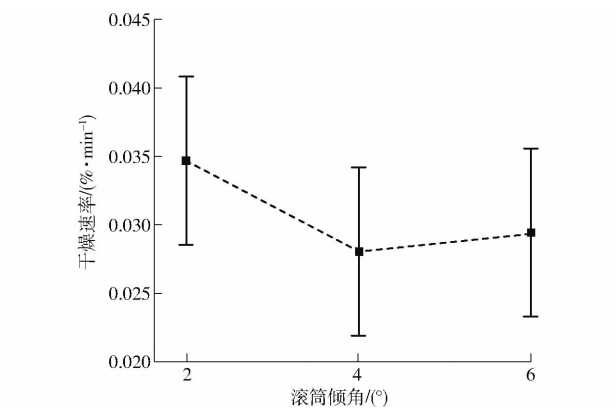


图 7 滚筒倾角对干燥速率的影响

Fig. 7 Effect of drum inclination angle on drying rate

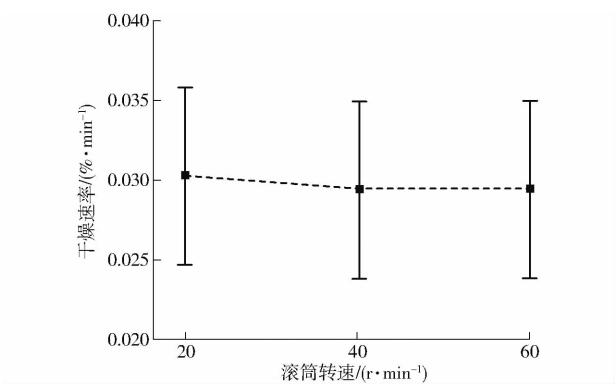


图 8 滚筒转速对干燥速率的影响

Fig. 8 Effect of drum speed on drying rate

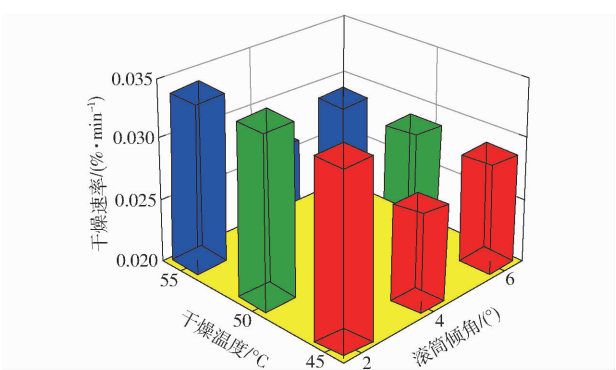


图 9 干燥温度和滚筒倾角对干燥速率的影响

Fig. 9 Effect of drying temperature and drum inclination angle on drying rate

最慢;当滚筒倾角为 2°时,此角度干燥速率最快,4°和 6°时干燥速率相近。由此可知,当干燥温度为 55℃、滚筒倾角为 2°时,稻谷干燥速率最快;当温度为 45℃时、倾角为 4°时,干燥速率最慢。由此可知,当温度越高、倾角越小时,干燥速率更优。

2.3 稻谷干燥正交试验

按照表 1 中的数据进行试验,试验方案^[21]及结果如表 2 所示,表中 A、B、C 分别为干燥温度、滚筒倾角、滚筒转速编码值。

表 2 稻谷干燥工艺正交试验设计和试验结果

Tab.2 Orthogonal test and results of paddy drying technology					
试验序号	因素			干燥时间	干燥速率 Y ₂ /
	A	B	C	Y ₁ / min	(% · min ⁻¹)
1	-1	-1	-1	247	0.030
2	-1	0	0	302	0.021
3	-1	1	1	280	0.025
4	0	-1	0	204	0.035
5	0	0	1	245	0.029
6	0	1	-1	310	0.021
7	1	-1	1	191	0.036
8	1	0	-1	219	0.032
9	1	1	0	177	0.041
干燥时间	K ₁	829	642	776	
	K ₂	759	766	683	
	K ₃	587	767	716	
	极差	242	125	93	
干燥速率	K ₁	0.077	0.101	0.083	
	K ₂	0.085	0.082	0.097	
	K ₃	0.109	0.087	0.090	
	极差	0.032	0.019	0.014	
最优方案	A ₃	B ₁	C ₂		
因子主次	1	2	3		

通过对极差分析可知,影响稻谷干燥时间和干燥速率的主次因素顺序为:干燥温度、滚筒倾角、滚筒转速,正交试验对于干燥时间和干燥速率最优干燥工艺为 A₃B₁C₂,即干燥温度为 55℃、滚筒倾角为 2°、滚筒转速为 40 r/min。

3 稻谷爆腰率分析

在 35℃ 干燥 40 min,在 40、45、50、55℃ 分别干燥 60 min,每 20 min 取一个样品,共计 15 样品。为了保证稻谷品质,对其爆腰率进行分析,稻谷变温干燥含水率与爆腰率曲线如图 10 所示。

由图 10 可以看出,随干燥温度、时间的不断变化,稻谷含水率也会随之变化,时间和温度与含水率成反比,爆腰率也有所变化,与爆腰率成正比;随干燥温度递增,稻谷内的含水率逐渐降低;

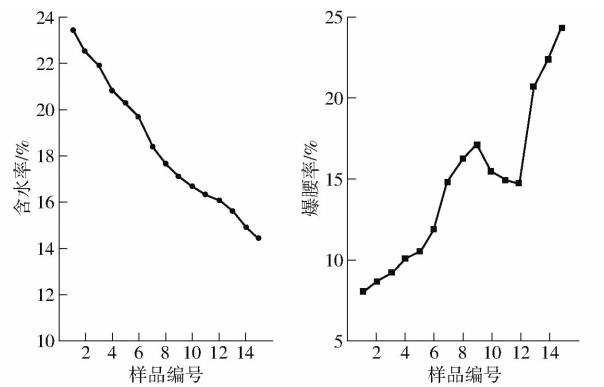


图 10 稻谷变温干燥含水率与爆腰率曲线

Fig. 10 Curves of moisture content and paddy crackle ratio during variable temperature drying

高温干燥稻谷的爆腰率比低温干燥的爆腰率大，在稻谷缓苏阶段，爆腰率有所降低，但温度继续上升，爆腰率也随之增加。当温度达到 40 ~ 50℃，爆腰率有明显增加。在其他因素相同的情况下，同一品种，干燥温度越高，稻谷含水率下降越快，爆腰稻谷出现越多。

3.1 不同时间下干燥温度对稻谷爆腰率的影响

稻谷原始含水率为 23.424%，最初爆腰率为 7.64%，分为 5 个时间段，各时间段为 60 min，缓苏温度 50℃，试验结果如图 11 所示。

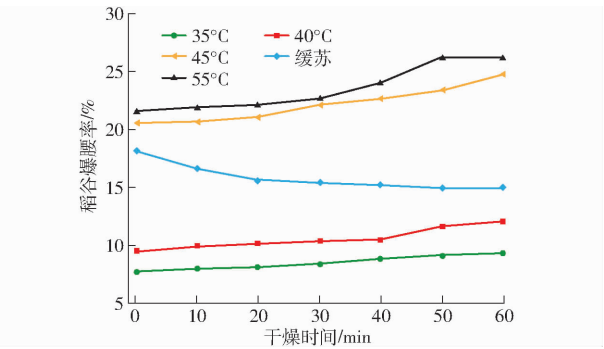


图 11 干燥温度与稻谷爆腰率曲线

Fig. 11 Curves of drying temperature and paddy crackle ratio

分析数据可知不同时间下干燥温度对稻谷爆腰率的作用：稻谷爆腰率随着干燥温度增加而上升，与无缓苏的爆腰率相比，缓苏后的稻谷爆腰率相应减小，稻谷缓苏的时间与稻谷爆腰率成反比，时间越长爆腰率就越低。稻谷干燥温度在 35℃ 和 40℃ 时，稻谷内部受热相对缓和，产生应力较小，稻谷爆腰率幅度平缓；随着温度上升到 45℃，稻谷内部存储一定热量，爆腰率有所上升；干燥温度在 50 ~ 55℃ 时，无缓苏时间，稻谷内部受到巨大应力，爆腰率最大，干燥温度在缓苏阶段时，缓苏对稻谷爆腰产生了显著的影响，根据缓苏时间的叠加，爆腰率也显著降低，缓苏时间 40 min，爆腰率接近平稳状态。

3.2 不同时间下水分对稻谷爆腰率的影响

稻谷原始含水率为 24.629%，最初爆腰率为 6.85%，分为 5 个时间段，各时间段为 60 min，缓苏温度 55℃，试验结果如图 12 所示。

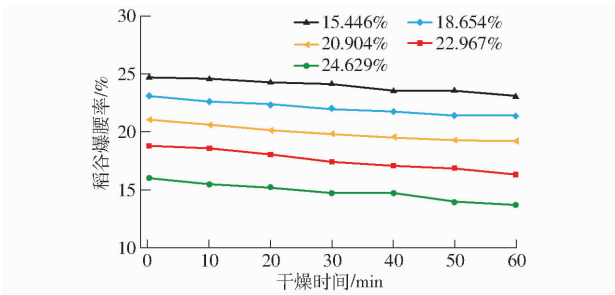


图 12 初始含水率与稻谷爆腰率曲线

Fig. 12 Curves of initial moisture content and paddy crackle ratio

由图 12 可知，当初始含水率为 24.629% 时，随着时间的推移，稻谷干燥降水幅度 0.0267%/min；当初始含水率为 20.904% 时，稻谷干燥降水幅度为 0.029 63%/min；当初始含水率为 15.446% 时，稻谷干燥降水幅度为 0.038 4%/min。干燥时间在 0 ~ 30 min，随着时间的增加，含水率逐步降低，干燥时间在 30 ~ 60 min，稻谷爆腰变化幅度很小，趋于平稳，当含水率为 15.446% 时，缓苏后与无缓苏爆腰率减少，可见缓苏过程对爆腰率具有影响，所形成的现象与稻谷干燥温度、稻谷水分紧密相关。

4 稻谷干燥均匀度

为验证装置干燥稻谷的均匀性^[22-23]，本次正交试验为 9 组试验，在每组干燥试验结束后，将干燥后的稻谷从滚筒取出平铺在地面上，将稻谷划分为 6 个取样点，取样点分布如图 13 所示，在每个测试点随机取样测含水率并记录，如表 3 所示。依据 GB 5009.3—2010 中直接干燥法，测定各测定点的含水率，利用含水率均匀度 K 描述稻谷干燥均匀性。



图 13 稻谷含水率测定点分布

Fig. 13 Distribution of paddy moisture content measurement points

求得含水率平均值、标准差和含水率均匀度 K ，如表 4 所示。

表 3 取样点含水率

Tab.3 Water content values at sampling points %						
试验 序号	取样 点 1	取样 点 2	取样 点 3	取样 点 4	取样 点 5	取样 点 6
1	14.4	14.2	14.4	14.3	14.2	14.3
2	14.5	14.4	14.7	14.5	14.4	14.6
3	14.3	14.4	14.4	14.3	14.5	14.5
4	14.4	14.4	14.3	14.4	14.5	14.4
5	14.4	14.4	14.6	14.4	14.7	14.5
6	14.5	14.4	14.8	14.5	14.5	14.7
7	14.4	14.4	14.3	14.4	14.3	14.4
8	14.5	14.4	14.4	14.5	14.5	14.4
9	14.5	14.4	14.6	14.3	14.4	14.4

由表 2、4 可知,当温度 55℃、滚筒倾角 2°、滚筒转速 60 r/min 时,稻谷干燥时间为 191 min,干燥速率为 0.036%/min,此工艺下稻谷含水率均匀度高,K 平均值为 99.6%,为最优干燥工艺参数。结合研究结果与实际验证,该装置对稻谷具有良好的均质干燥效果。

5 结束语

通过正交试验设计稻谷干燥工艺,研究干燥温

表 4 K 测定结果

Tab.4 K value measurement results %			
试验序号	平均值 $\bar{X}$	标准差 S	K
1	14.30	0.089	99.4
2	14.52	0.117	99.2
3	14.40	0.089	99.4
4	14.40	0.063	99.6
5	14.50	0.134	99.1
6	14.57	0.151	99.0
7	14.36	0.052	99.6
8	14.45	0.055	99.6
9	14.43	0.103	99.3

度、滚筒倾角和滚筒转速对干燥时间和干燥速率的影响。试验结果表明,9 组试验后稻谷含水率均匀性都较好,该装置能保证均质的干燥效果。当干燥温度 55℃、滚筒倾角 2°、滚筒转速 60 r/min 时,稻谷含水率均匀度为 99.6%,采用此干燥工艺,能缩短稻谷干燥时间,提高干燥速率,稻谷干燥均匀度为优,该研究结果可以为稻谷变温均质干燥装置研制和工艺制定提供参考。

参 考 文 献

[1] 邵小龙,徐文,时小转,等.不同收储条件对梗稻南粳 5055 储藏品质的影响[J].中国粮油学报,2020,35(5):130-136,143. SHAO Xiaolong, XU Wen, SHI Xiaozhuan, et al. Effect of different harvest and storage conditions on storage quality of japonica rice Nanjing 5055[J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2020,35(5):130-136,143. (in Chinese)

[2] 潘铮,袁鹏,姚倩,等.稻谷热风干燥储藏的探讨[J].粮食与食品工业,2022,29(2):1-2. PAN Zheng, YUAN Peng, YAO Qian, et al. Study on the influence of rice storge by hot-air drying[J]. Cereal and Food Industry,2022,29(2):1-2. (in Chinese)

[3] 王克如,李璐璐,鲁镇胜,等.黄淮海夏玉米机械化粒收质量及其主要影响因素[J].农业工程学报,2021,37(7):1-7. WANG Keru, LI Lulu, LU Zhensheng, et al. Mechanized grain harvesting quality of summer maize and its major influencing factors in Huanghuaihai region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(7): 1-7. (in Chinese)

[4] 李卓珍,渠琛玲,王红亮,等.优质稻谷准低温储藏与常温储藏品质变化的比较研究[J].中国粮油学报,2020,35(11):104-110. LI Zhuozhen, QU Chenling, WANG Hongliang, et al. Comparative study on the quality changes of the high quality paddy during quasi-low temperature storage and conventional temperature storage[J]. Journal of the Chinese Cereals & Oils Association, 2020,35(11):104-110. (in Chinese)

[5] 陈明明.机械烘干对稻谷储存品质的影响[J].粮食科技与经济,2022,47(5):70-74. CHEN Mingming. Effect of mechanical drying on storage quality of rice[J]. Food Science and Technology and Economy,2022, 47(5):70-74. (in Chinese)

[6] 王炫凯,曲宝成.我国稻谷储藏技术的发展现状及未来趋势[J].粮食问题研究,2022(1):44-48.

[7] 刘春山,肖世伟,陈思羽,等.农产品滚筒式均质干燥装置的设计与试验研究[J].农机化研究,2023,45(6):120-123,131. LIU Chunshan, XIAO Shiwei, CHEN Siyu, et al. Design and experimental research of drum-type homogeneous drying device for agricultural products[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(6):120-123,131. (in Chinese)

[8] 郑先哲,刘辉,沈柳杨,等.基于玻璃化转变的稻谷变温热风干燥工艺研究[J].农业机械学报,2020,51(1):331-340. ZHENG Xianzhe, LIU Hui, SHEN Liuyang, et al. Hot-air drying technology of changing temperature for paddy rice based on glass transition theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 331-340. (in Chinese)

[9] 王洁,王文钰,陶冬冰,等.变温干燥工艺对稻谷干燥特性和品质的影响[J].沈阳农业大学学报,2022,53(2):239-247. WANG Jie, WANG Wenyu,TAO Dongbing,et al. Effect of variable temperature on drying characteristics and quality of paddy rice[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2022,53(2):239-247. (in Chinese)

[10] 陈坤杰,梁静,蒋维银,等.储藏温度与初始含水率对稻谷和糙米食用品质的影响[J].农业机械学报,2022,53(9):390-398.

CHEN Kunjie, LIANG Jing, JIANG Weiyan, et al. Effect of storage temperature and initial moisture content on eating quality of rice and brown rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 390 – 398. (in Chinese)

[11] 徐建国, 张森旺, 徐刚, 等. 莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 303 – 309.

XU Jianguo, ZHANG Senwang, XU Gang, et al. Thin-layer hot air drying characteristics and moisture diffusivity of lotus seeds [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 303 – 309. (in Chinese)

[12] 孙庆运, 张宗超, 贾振超, 等. 玉米果穗深床层热风干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 285 – 292, 337.

SUN Qingyun, ZHANG Zongchao, JIA Zhenchao, et al. Hot air drying characteristics in deep bed of corn ear[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 285 – 292, 337. (in Chinese)

[13] 李双, 赵赞, 陈志周, 等. 正交试验优化喷雾干燥工艺制备香菇粉[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 85 – 89.

LI Shuang, ZHAO Yun, CHEN Zhizhou, et al. Optimization of spray drying technology for preparation of *Lentinus edodes* powder by orthogonal experiment[J]. China Condiment, 2020, 45(4): 85 – 89. (in Chinese)

[14] 高瑞丽. 水稻负压干燥均匀性与品质变化规律的试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.

GAO Ruili. Experimental study on uniformity and quality change of negative pressure drying in rice[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[15] WANG J, WANG D Y, ZHAN T Y, et al. Effect of tempering drying on the physicochemical properties of paddy rice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(3): E16374.

[16] 陈思羽, 李捷涵, 刘春山, 等. 稻谷热风干燥水分扩散特性及含水率预测[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 188 – 192.

CHEN Siyu, LI Jiehan, LIU Chunshan, et al. Water diffusion characteristics and prediction of moisture content in hot air drying of rice[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(6): 188 – 192. (in Chinese)

[17] 刘辉. 稻谷恒温与变温热风干燥工艺及过程模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.

LIU Hui. Study on paddy drying technology under constant and varying temperature and process simulation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[18] 李媛媛. 苜蓿方捆远红外组合干燥工艺参数的优化[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.

[19] 袁小峰, 阮征, 张飞, 等. 正交试验优化蜜柚真空冷冻干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 100 – 105.

YUAN Xiaofeng, RUAN Zheng, ZHANG Fei, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process of honey pomelo by orthogonal test[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 100 – 105. (in Chinese)

[20] 林子木, 刘国辉, 王德华. 基于响应面试验优化稻谷品质深层干燥工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 61 – 64.

LIN Zimu, LIU Guohui, WANG Dehua. Optimization of deep drying technology for paddy rice quality based on response surface analysis[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(2): 61 – 64. (in Chinese)

[21] 禄璐, 米佳, 罗青, 等. 正交试验设计优化喷雾干燥工艺制备枸杞鲜颗粒冲剂[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 133 – 138.

LU Lu, MI Jia, LUO Qing, et al. Orthogonal design optimization of spray drying process for preparation of fresh wolfberry granule[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(6): 133 – 138. (in Chinese)

[22] 宋月. 微波泡沫干燥浆果果浆均匀性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.

SONG Yue. Study on uniformity of berry puree under microwave assisted foam-mat drying[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[23] 唐玉婷, 杨盛翔, 杨进平, 等. 基于正交试验法下对喷灌均匀性影响因子的综合分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(11): 1145 – 1150.

TANG Yuting, YANG Shengxiang, YANG Jinping, et al. Comprehensive analysis of influence factors on sprinkler irrigation uniformity based on orthogonal experiment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(11): 1145 – 1150. (in Chinese)