

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.039

稻谷热风干燥工艺分析与模型探究

刘春山 陈 苏 陈思羽 张 艳 王安冉 高晓伟

(佳木斯大学机械工程学院, 佳木斯 154007)

摘要: 为探究装置不同干燥工艺对稻谷干燥特性及品质的影响,通过多因素试验,以干燥温度、初始含水率和滚筒转速为影响因素,以稻谷干燥速率、爆腰率、蛋白质含量、脂肪酸值和食味值为评价指标,探究稻谷最佳干燥工艺参数,对比6种数学模型在热风干燥中的适用性。结果表明:干燥温度对稻谷干燥特性和品质的影响最大,其次是稻谷初始含水率和滚筒转速,随着干燥温度的升高,稻谷的干燥速率增大,稻谷爆腰率、蛋白质含量、脂肪酸值增大,食味值减小;采用自然晾晒方式将稻谷含水率降至18%,在干燥温度40℃、滚筒转速30 r/min的干燥条件下,稻谷干燥品质最佳;最佳数学模型为Wang and Singh模型;随着干燥温度的升高稻谷水分有效扩散系数也升高,干燥温度由40℃升到60℃,其稻谷水分有效扩散系数由 9.433×10^{-11} 升到 1.885×10^{-10} ,稻谷的干燥活化能为30.153 kJ。

关键词: 稻谷; 干燥品质; 热风干燥; 数学模型; 正交试验

中图分类号: S375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)S1-0364-09

Analysis and Model Exploration of Paddy Hot Air Drying Process

LIU Chunshan CHEN Su CHEN Siyu ZHANG Yan WANG Anran GAO Xiaowei

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

Abstract: To explore the effects of different drying processes on the drying characteristics and quality of paddy, a self-made paddy drum hot-air drying device was used for hot-air drying experiments with drying temperature, initial moisture content, and drum speed as influencing factors, and paddy cracking rate, protein content, fatty acid value, and taste value as evaluation indicators. Single factor and orthogonal experimental methods were used to explore the effects of different factors on the drying characteristics and quality of paddy, and the optimal drying process for paddy was analyzed. The applicability of six drying mathematical models in hot-air drying was compared. The results showed that drying temperature had the greatest impact on the drying characteristics and quality of paddy, followed by initial moisture content and drum speed. As the drying temperature was increased, the drying rate of paddy was increased, and the cracking rate, protein content, fatty acid value, and taste value of paddy were increased, while the taste value was decreased. The moisture content of paddy was reduced to 18% by natural drying method, and the drying quality of paddy was the best at drying temperature of 40℃ and rotating speed of roller of 30 r/min. The optimal drying mathematical model was Wang and Singh model. As the drying temperature was increased, the effective diffusion coefficient of paddy moisture was also increased. When the drying temperature was increased from 40℃ to 60℃, its effective diffusion coefficient of paddy moisture was increased from 9.433×10^{-11} to 1.885×10^{-10} , and the drying activation energy of paddy was 30.153 kJ.

Key words: paddy; dry quality; hot air drying; mathematical model; orthogonal test

0 引言

2023年我国粮食作物播种面积达 1.19×10^8 hm²,总

产量为 6.95×10^8 t,其中稻谷占粮食作物总产量的29.71%^[1]。稻谷收获后需要及时干燥处理,将含水率降至13.5%~14.5%,以避免稻谷后期贮藏时发生霉

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2024-09-22

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023C059)、黑龙江省教育厅基本业务费项目(2022KYYWF0587)和佳木斯大学国家基金培育项目(JMSUGPZR2023-014)

作者简介: 刘春山(1977—),男,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

变、腐烂,保证其经济价值等^[2-5]。

目前,稻谷干燥方式主要为自然晾干和机械干燥方式^[6]。小型机械干燥装置凭借轻便、利民等优势越来越受人们的喜爱,其中,滚筒热风干燥是一种高效的干燥装置,具有干燥能力强、处理量大的优点,但也有能量利用率低以及干燥品质难以控制的缺点。本文基于自行设计的稻谷滚筒热风干燥装置,探究不同干燥条件对稻谷干燥特性及品质的影响,采用正交试验通过极差、方差分析探究最佳干燥工艺,分析不同干燥温度下稻谷干燥数学模型以及稻谷水分有效扩散系数,并计算稻谷干燥活化能,以期对稻谷干燥装置的发展以及稻谷干燥品质变化规律提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用的稻谷品种为宏发17,购于黑龙江省双鸭山市友谊农场,初始湿基含水率为27%。干燥试验前,选取初始爆腰率低、个头饱满的籽粒(人工去除干瘪稻谷)作为试验原料,用于稻谷热风干燥试验。

1.2 试验方法

试验在干燥实验室进行,环境温度15~25℃,相对湿度25%~38%。根据试验要求,将稻谷均匀平铺于地面,采用自然晾晒方式调节样品初始湿基含水率,分别为18%、20%、22%和23%,达到设定值,将稻谷用密封袋封装保存用于试验备用。

每组试验开始前,称取3 kg所需稻谷装入滚筒,设置干燥温度、热风风速和滚筒转速,确保装置正常运行;干燥过程中,每隔20 min取出滚筒中部分稻谷,记录稻谷含水率、干燥温度以及干燥时间,直至稻谷含水率降至14%(安全含水率)时停止干燥试验,取出滚筒内的稻谷并装入密封袋保存,取出另一组试样进行下一组试验,直至干燥试验全部完成。

1.3 试验设备与仪器

试验采用自主研制的稻谷滚筒热风干燥装置,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。其工作原理为:将高含水率稻谷装入滚筒后,在触摸屏上设置干燥温度、滚筒转速和热风风速。电机驱动链轮,链轮通过链条传递动力至传动轴,实现传动轴对滚筒的有效驱动。滚筒转动时,其内部的螺旋抄板带动稻谷做螺旋切向运动和抛落运动,可提高稻谷与热风的接触面积。升降装置用来调节滚筒与水平面的角度,使稻谷受热更加均匀。滚筒表面设有网孔,热风可通过网孔对稻谷进行加热并带走表面水蒸气,同时还可以进一步去除稻谷中的杂质。采集模块温度传感器可读取干燥过程中的温度,控制干燥过程中加热管温度、风机转速和电机转速,将收集的信息发送给PLC,PLC将数据转换

反馈给人机交互界面,试验完成后,关闭电源结束干燥作业^[7-8]。

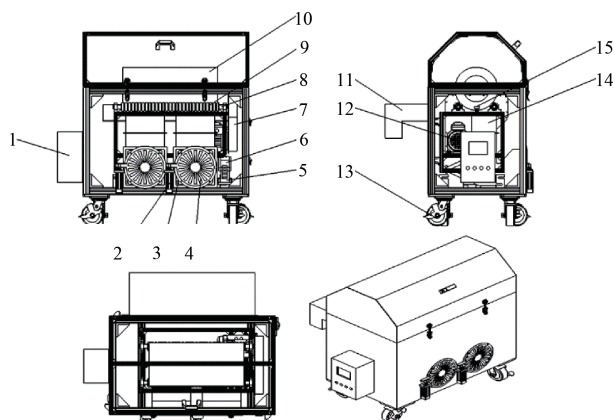


图1 干燥装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of drying device

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

试验所需设备包括:稻谷热风干燥试验台(图1)、DHG-9920A型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)、JLGJ-45型电动砬谷机(台州市路桥京奥粮用器材厂)、JC-LS-01S系列卤素水分测定仪(青岛聚创环保设备有限公司)、LDS-1G型计算机水分测定仪(台州市路桥京奥粮用器材厂)、FZ102型粉碎机(北京市永光明医疗仪器有限公司)、ICS439-BB30型台秤(METTLER TOLEDO)、AB204-L型精密电子天平(METTLER TOLEDO)、JSWL型大米食味计(广州沪瑞明仪器有限公司)、自制爆腰灯。

1.4 试验指标测定

(1) 稻谷含水率

使用JC-LS-01S系列卤素水分测定仪进行测定。

(2) 干燥速率

计算公式为

$$D_R = \frac{W_0 - W_t}{\Delta t} \quad (1)$$

式中 D_R ——干燥速率, %/min

W_0 ——干燥前稻谷初始含水率, %

W_t ——干燥 t 时刻稻谷含水率, %

Δt ——含水率变化时间, min

(3) 水分比

计算公式为

$$M_R = \frac{W_t}{W_0} \quad (2)$$

其中

$$W_t = \frac{M_t - M_c}{M_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中 M_R ——稻谷水分比

M_t —— t 时刻稻谷质量, g

M_c ——稻谷干物质量, g

(4)爆腰率

参照 GB/T 5496—1985 的方法进行。于干燥结束 24 h 后进行测定。

(5)蛋白质含量

参照 GB/T 5009.5—2016 的方法进行。于干燥结束 24 h 后进行测定。

(6)脂肪酸值^[9]

参照 GB/T 20596—2006《稻谷储存品质判定规则》氢氧化钾标准滴定法执行。于干燥结束 24 h 后进行测定。

(7)食味值

采用 JSWL 型大米食味计进行测定,开机后预热 40 min,使用前用精米标准样品基准米对食味计进行校准,用标准量杯装米倒进入料口,进行测定^[10-11]。

(8)数学模型

运用 6 种干燥数学模型对稻谷干燥数据进行拟合分析,采用决定系数 R^2 和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) R_{MSE} 来评价模型精度^[12-13]。

(9)稻谷水分有效扩散系数

计算公式为

$$\ln M_R = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{d^2} t \quad (4)$$

式中 D_{eff} ——水分有效扩散系数

t ——干燥时间, s

d ——稻谷厚度, m

(10)干燥活化能

计算公式为

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

式中 D_0 ——在 273.15 K 下物料扩散系数, m^2/s

E_a ——物料干燥活化能, kJ/mol

R ——气体摩尔常数,取 $8.134 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

T ——稻谷干燥物料的绝对温度, K

1.5 试验设计

试验选取干燥温度 (30、40、50、60 °C)、滚筒转速 (10、20、30 r/min)、稻谷初始含水率 (18%、20%、22%) 为试验因素,固定热风风速为 1.5 m/s,进行单因素试验,测定并分析单因素试验因子对稻谷干燥特性、外观品质 (爆腰率)、理化品质 (蛋白质含量 (质量比)、脂肪酸值) 和食味值的影响。在单因素试验基础上,采用正交试验 $L_9(3^4)$ ^[14],研究不同因素水平对稻谷干燥品质的影响,试验因素水平设计见表 1 (由单因素结果可知,干燥温度对稻谷品质影响较大;干燥温度为 30 °C 时,干燥时间较长,干燥效率低,能量损耗高,因此,应对干燥温度予以严格控制,根据文献 [15-16],选取热风温度为 40、50、60 °C 共 3 个水平)。将稻谷干燥至安全含水率后装袋密封保存,24 h 后测定其干燥品质。

表 1 正交因素水平

Tab. 1 Orthogonal factors and levels

水平	因素		
	干燥温度/°C	稻谷初始含水率/%	滚筒转速/(r·min ⁻¹)
1	40	18	10
2	50	20	20
3	60	22	30

1.6 数据处理及统计分析

每组试验重复进行 3 次,最终结果取 3 次试验数据平均值。利用 Excel 对试验数据进行统计分析;使用 Origin 软件对数学模型进行拟合并对试验数据进行绘图分析,运用 Design-Expert 软件进行试验设计与分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 干燥温度对干燥特性与品质的影响

在初始湿基含水率 23%、滚筒转速 10 r/min、热风风速 1.5 m/s 条件下,以不同干燥温度作业时,稻谷含水率随时间的变化趋势和在不同干燥温度下稻谷干燥速率的变化趋势如图 2、3 所示。

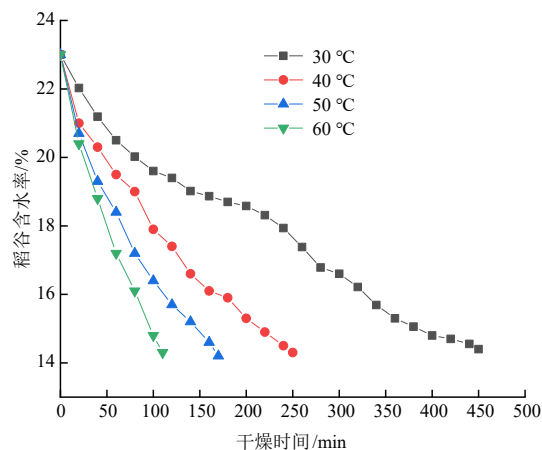


图 2 干燥温度对稻谷含水率的影响

Fig. 2 Effect of drying temperature on the moisture content of paddy

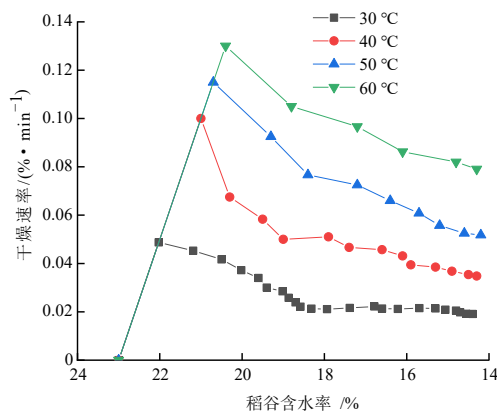


图 3 干燥温度对稻谷干燥速率的影响

Fig. 3 Effect of drying temperature on paddy drying rate

由图2可知,在不同干燥温度下,其干燥的整体趋势是含水率先快速降低然后逐渐趋于平缓,干燥温度越高,稻谷含水率变化就越显著,当温度为30℃时,其干燥所需时间最长,达到450 min;当温度为60℃时,所需干燥时间显著下降。其原因主要是由于稻谷内部热量积累增加,内部温度迅速提高,加快了稻谷表面自由水的蒸发,导致稻谷干燥速率加快,干燥时间降低^[17]。

由图3可知,在不同干燥温度下,稻谷干燥速率处于不断变化的过程中^[18-19],干燥速率随着干燥温度的升高而增大。当温度为60℃时,干燥速率最大,当温度为30℃时,干燥速率最小;干燥初始阶段时干燥速率最大,但随着稻谷含水率的降低,干燥速率迅速下降,最终趋于平缓,其中水分的蒸发主要发生在干燥初期,是因为在干燥初始阶段,由于温度的迅速提升,稻谷内部热量聚集,干燥速率升高,此时蒸发水分主要为外部自由水;当稻谷含水率下降后,其蒸发水分主要为内部结合水,水分蒸发阻力和所需能量变大,干燥速率下降,最终趋于平缓。

由图4可知,干燥温度对稻谷品质影响较大,随着干燥温度的升高,稻谷爆腰率随之升高,蛋白质含量和脂肪酸值升高,稻谷食味值降低。这说明,随着干燥温度的升高,导致稻谷谷粒内部受热不均匀,内外湿度梯度过大产生应力,导致稻谷爆腰数量增加^[20-21];随着干燥温度的升高,蛋白酶活性增高,稻谷蛋白质含量增加;同时,稻谷自身脂解酶活性增高,从而导致稻谷中游离脂肪酸含量增加。脂肪酸在高温条件下会发生酸败,因此导致营养价值和食味品质下降^[22]。

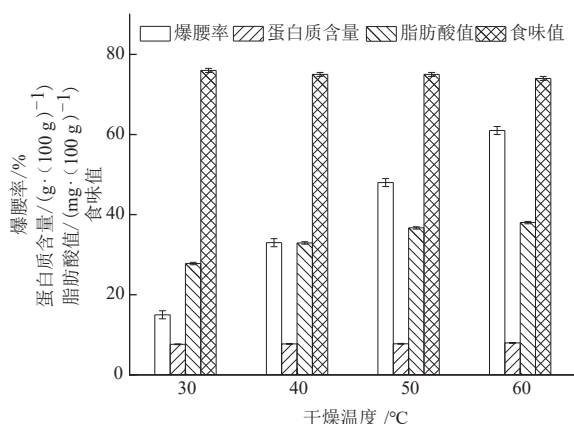


图4 干燥温度对稻谷干燥品质的影响

Fig. 4 Effect of drying temperature on drying quality of paddy

2.1.2 稻谷初始含水率对干燥特性与品质的影响

在干燥温度50℃、滚筒转速10 r/min、热风风速1.5 m/s的条件下,以不同的初始含水率作业时,其含水率随时间变化曲线和干燥速率随时间变化曲线如图5、6所示。

由图5可知,在不同初始含水率的条件下,稻谷含水率均随着干燥时间增加而快速降低,最终趋于平缓。干燥速率随着稻谷初始含水率的减小而降低,当稻谷初始

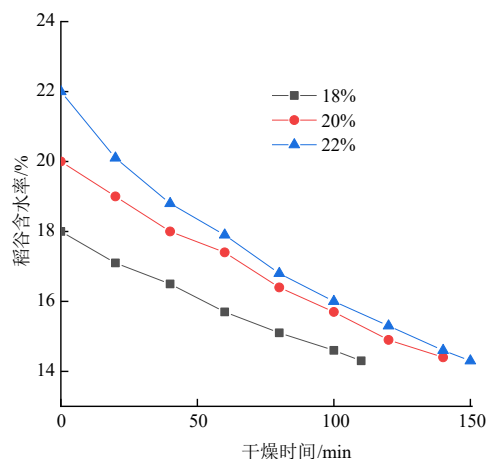


图5 稻谷初始含水率对稻谷含水率的影响

Fig. 5 Effect of initial moisture content of paddy on moisture content of paddy

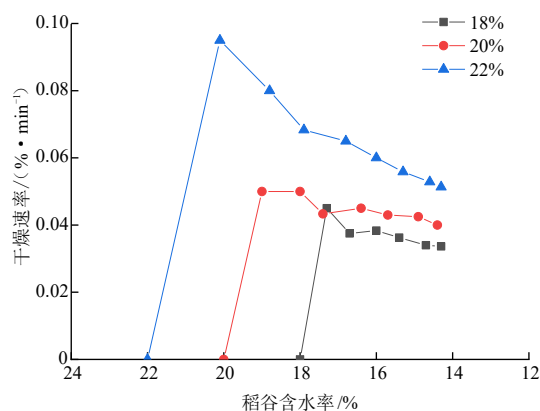


图6 稻谷初始含水率对稻谷干燥速率的影响

Fig. 6 Effect of initial moisture content of paddy on drying rate of paddy

含水率由20%变为18%时,所需干燥时间差值为30 min;当稻谷初始含水率由22%变为20%时,所需干燥时间差值为10 min,干燥时间变化明显,这主要是因为当稻谷初始水分状态处于较高水平且继续增高时,其内部增加的水分主要以非结合水形式存在,干燥时水分蒸发速率快,致使时间变化不显著^[23]。

由图6可知,在不同初始含水率水平下,稻谷干燥速率随着时间变化而迅速升高,最终趋于平缓。当稻谷初始含水率为22%时,其干燥速率最高;当含水率为18%时,干燥速率最低,主要是因为在一定温度和含水率范围内,随着含水率的增加,水分蒸发变快,致使干燥速率增加;随着干燥的进行,稻谷含水率下降,水分蒸发变慢,干燥速率变化不显著。

由图7可知,随着稻谷初始含水率的增加,稻谷爆腰率、蛋白质含量和脂肪酸值也随之增加,稻谷食味值减小。这主要是因为随着稻谷初始含水率的增加,稻谷干燥时间加长,热量积累,稻谷自身脂解酶活性增高,从而导致稻谷爆腰率加大,蛋白质含量和脂肪酸值增加,稻谷酸败,食味值降低。

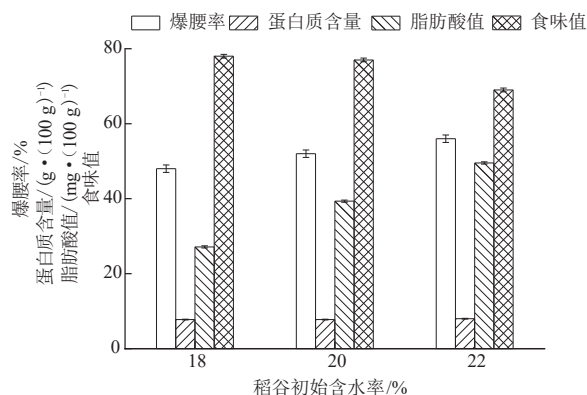


图7 稻谷初始含水率对稻谷干燥品质的影响

Fig. 7 Effect of initial moisture content of paddy on drying quality of paddy

2.1.3 滚筒转速对干燥特性与品质的影响

在干燥温度 50 ℃、稻谷初始含水率 23%、热风风速 1.5 m/s 的条件下,以不同的滚筒转速作业时,其含水率和干燥速率变化曲线如图 8、9 所示。

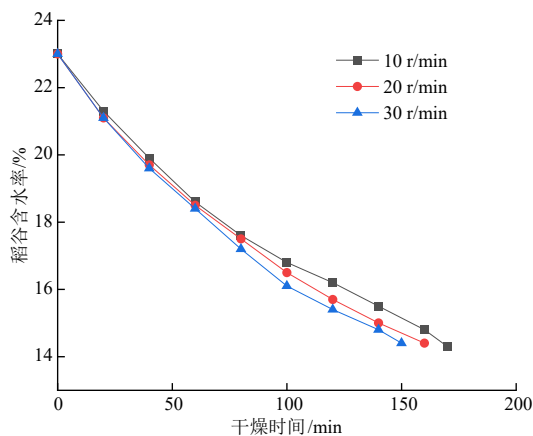


图8 滚筒转速对稻谷含水率的影响

Fig. 8 Effect of drum speed on paddy moisture content

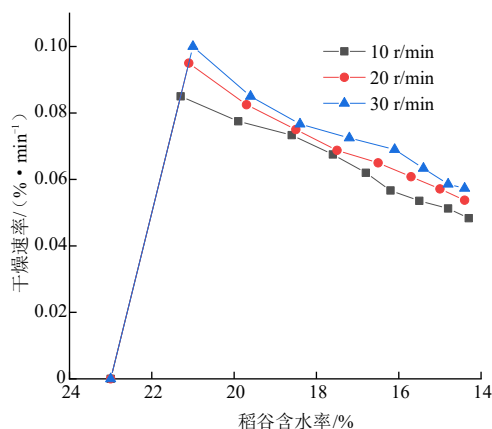


图9 滚筒转速对稻谷干燥速率的影响

Fig. 9 Effect of drum speed on paddy drying rate

由图 8 可知,在不同滚筒转速下稻谷含水率变化趋势相似,均随着干燥时间的增加而下降,最终趋于平缓。随着滚筒转速的加快,干燥所需时间减短,这主要是因为,滚筒转速越快,稻谷在滚筒内翻滚更加均匀,与热风接触面积更大,使得干燥速率加快,干燥时间缩短。

由图 9 可知,在不同滚筒转速条件下,随着时间增加,稻谷干燥速率先迅速升高,而后迅速下降并趋于平缓。随着滚筒转速的加快,干燥速率也随之增加,这主要是因为,滚筒转速加快,稻谷与热风接触面积更加均匀,水分蒸发变快,干燥速率变大;在稻谷干燥后期,稻谷籽粒内部水分扩散速率小于稻谷表面水分蒸发速率,稻谷内部扩散变化不显著,使得干燥速率迅速下降,最终趋于平缓^[24]。

由图 10 可知,随着滚筒转速的加快,稻谷爆腰率、蛋白质含量和脂肪酸值增加,稻谷食味值下降。这主要是由于随着滚筒转速的加快,稻谷在滚筒内翻滚、抛落得更加均匀,增加了与热风接触面积,稻谷内部热量聚集,温度的迅速提升,增加了稻谷内部酶蛋白的活性,稻谷蛋白质含量增加;同时,温度升高使得脂肪酶活性升高,脂肪发生酸败,致使游离脂肪酸增加,稻谷脂肪酸值升高,食味值下降。

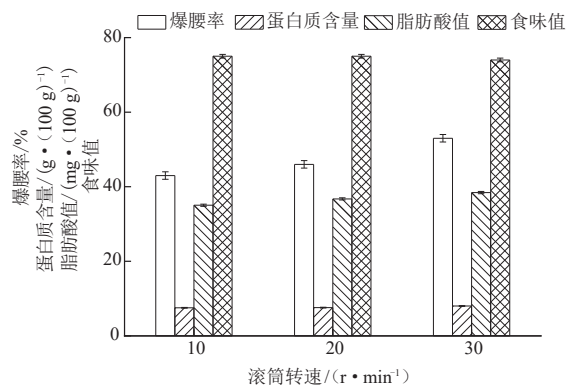


图10 滚筒转速对稻谷干燥品质的影响

Fig. 10 Effect of drum speed on drying quality of paddy

2.2 正交试验设计

在单因素试验基础上,分别以干燥温度、稻谷初始含水率和滚筒转速为试验因素,以稻谷爆腰率、蛋白质含量、脂肪酸值和食味值为试验指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验表,进行热风干燥正交试验,试验设计及结果如表 2 所示,表中 A、B、C 分别表示干燥温度、稻谷初始含水率、滚筒转速编码值。

由表 2 可知:干燥温度是影响稻谷干燥品质关键因素之一,在稻谷初始含水率、滚筒转速和热风风速一定的条件下,应选择较低的干燥温度,以确保较高的干燥品质;稻谷含水率对食味值的影响大于干燥温度和滚筒转速。综合考虑各因素对稻谷干燥后的品质影响的主次顺序依次为:干燥温度、初始含水率、滚筒转速。因此,仅考虑稻谷爆腰率作为评价稻谷品质指标时,使用的最优工艺方式为 $A_1B_1C_1$;仅考虑稻谷蛋白质含量作为评价稻谷品质指标时,使用的最优工艺方式为 $A_1B_1C_1$;仅考虑稻谷脂肪酸值作为评价稻谷品质指标时,使用的最优工艺方式为 $A_3B_2C_3$;仅考虑稻谷食味值作为评价稻谷品质指标时,使用的最优工艺方式为 $A_3B_1C_3$ 。在热风

表2 正交试验设计及结果

Tab. 2 Orthogonal experimental design and results

试验序号	因素			爆腰率/%	蛋白质含量/(g·(100 g) ⁻¹)	脂肪酸值/(mg·(100 g) ⁻¹)	食味值
	A	B	C				
1	1	1	1	11	7.95	65.53	76
2	1	2	2	33	7.85	38.54	74
3	1	3	3	42	7.82	41.04	75
4	2	1	2	41	7.77	64.21	75
5	2	2	3	56	7.62	37.40	76
6	2	3	1	49	7.75	53.62	72
7	3	1	3	63	7.77	30.38	77
8	3	2	1	57	7.75	34.05	76
9	3	3	2	72	7.63	28.79	75
爆腰率	K_1			28.67	38.33	39.00	
	K_2			48.67	48.67	48.67	
	K_3			64.00	54.33	53.67	
	极差 R			35.33	16.00	14.67	
	因素主次			$A>B>C$			
	最优方案			$A_1B_1C_1$			
蛋白质含量	K_1			7.87	7.83	7.82	
	K_2			7.71	7.74	7.75	
	K_3			7.72	7.73	7.74	
	极差 R			0.16	0.10	0.08	
	因素主次			$A>B>C$			
	最优方案			$A_1B_1C_1$			
脂肪酸值	K_1			48.37	53.37	51.07	
	K_2			51.74	36.66	43.85	
	K_3			31.07	41.15	36.27	
	极差 R			20.67	16.71	14.79	
	因素主次			$A>B>C$			
	最优方案			$A_3B_2C_3$			
食味值	K_1			75.00	76.00	74.67	
	K_2			74.33	75.33	74.67	
	K_3			76.00	74.00	76.00	
	极差 R			1.67	2.00	1.33	
	因素主次			$B>A>C$			
	最优方案			$A_3B_1C_3$			

干燥过程中,应尽可能选择较低的干燥温度,减小稻谷爆腰率,获得较高的稻谷干燥品质,同时,在干燥温度和稻谷初始含水率一定的条件下,选择较高的滚筒转速,以提高稻谷干燥的速率,减小干燥成本。综合考虑,选取 $A_1B_1C_3$ 作为稻谷最佳干燥方案,即干燥温度 40 ℃、初始含水率 18% 和滚筒转速 30 r/min 的方案。

对正交试验结果进行方差分析,分析结果如表 3~6 所示。由表 3~6 可知:各因素对稻谷干燥品质的影响从大到小依次为干燥温度、初始含水率、滚筒转速,这与极差分析结果相同。对于稻谷爆腰率,干燥温度在 $P<0.01$ 水平下影响显著,初始含水率和滚筒转速在 $P<0.05$ 水平下显著;对于稻谷蛋白质含量,干燥温度在 $P<0.1$ 水平下影响显著,初始含水率和滚筒转速影响不显著;对于稻

表3 稻谷爆腰率方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of paddy burst rate

来源	平方和	自由度	均方和	F
A	1 883.56	2	435.33	273.42
B	394.89	2	941.78	57.32
C	333.56	2	197.44	48.42
误差	6.89	2	166.78	
总和	2 618.89	8	3.44	

注: $F_{0.1}(2,2)=9, F_{0.05}(2,2)=19, F_{0.01}(2,2)=99.00$,下同。

谷脂肪酸值,干燥温度和初始含水率在 $P<0.1$ 水平下影响显著,滚筒转速影响不显著;对于稻谷食味值各因素影响均不显著。由方差分析结果可知,干燥温度和初始含水率对稻谷品质的影响较大,滚筒转速影响较小,因此,在保证稻谷品质的基础上,应尽可能提高干燥效率,

表 4 稻谷蛋白质含量方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of paddy protein content

来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>
<i>A</i>	0.05	2	0.03	9.14
<i>B</i>	0.02	2	0.01	3.19
<i>C</i>	0.01	2	0.01	2.01
误差	0.01	2	0	
总和	0.08	8		

表 5 稻谷脂肪酸值方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of fatty acid values in paddy

来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>
<i>A</i>	737.68	2	368.84	15.71
<i>B</i>	448.66	2	224.33	9.55
<i>C</i>	328.33	2	164.17	6.99
误差	46.96	2	23.48	
总和	1 561.63	8		

表 6 稻谷食味值方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of paddy taste values

来源	平方和	自由度	均方和	<i>F</i>
<i>A</i>	4.22	2	2.11	1.46
<i>B</i>	6.22	2	3.11	2.15
<i>C</i>	3.56	2	1.78	1.23
误差	2.89	2	1.44	
总和	16.89	8		

以减少干燥成本,因而稻谷最佳干燥工艺参数为干燥温度 40 ℃、初始含水率 18% 和滚筒转速 30 r/min。

采用自然晾晒方式将稻谷含水率降至 18%,在此干燥工艺下进行热风干燥试验,验证正交试验结果。最佳干燥工艺参数下得到的稻谷样品爆腰率为 23%、蛋白质含量为 7.83 g/(100 g)、脂肪酸值为 38.53 mg/(100 g)、食味值为 79,试验结果能较好满足要求。

2.3 稻谷热风干燥数学模型

2.3.1 稻谷热风干燥数学模型的选择

通过单因素试验可知,干燥温度对稻谷干燥特性的影响最大,应用 6 种常见数学模型对不同温度下的稻谷干燥曲线进行非线性拟合,通过平均决定系数 R^2 、均方根误差 R_{MSE} 两个参数来评价数学模型精度,稻谷干燥数学模型及其拟合结果如表 7 所示。

由表 7 可知,Wang and Singh 模型对试验数据的拟合程度最高, $R^2=0.985$, $R_{MSE}=0.128$ 。因此,应选用 Wang and Singh 模型作为稻谷热风干燥的数学模型,将所得到的模型参数代入 Wang and Singh 模型公式,可到不同干燥温度下的稻谷干燥数学模型,当干燥温度为 50 ℃时,Wang and Singh 模型为: $M_R=1-0.011t+2.847\times10^{-5}t^2$ 。

2.3.2 模型验证

选取建模以外的数据进行干燥模型验证,由单因素试验分析可知,干燥温度对稻谷干燥速率的影响最为显著,因此,选择干燥温度作为对热风干燥过程影响的因素进行模型验证,其拟合曲线如图 11 所示。由图 11 可

表 7 稻谷干燥数学模型及其拟合结果

Tab. 7 Mathematical model of paddy drying and its fitting

results					
模型	指标	数值			
		30 ℃	40 ℃	50 ℃	60 ℃
Newton: $M_R=-\exp(-kt)$	<i>k</i>	0.005	0.010	0.014	0.020
	R^2	0.944	0.975	0.984	0.968
	R_{MSE}	0.329	0.175	0.123	0.158
Page: $M_R=-\exp(-kt^n)$	<i>k</i>	0.002	0.005	0.008	0.006
	<i>n</i>	1.133	1.136	1.133	1.310
	R^2	0.947	0.979	0.987	0.982
Wang and Singh: $M_R=1+at+bt^2$	R^2	0.969	0.986	0.990	0.996
	R_{MSE}	0.240	0.127	0.094	0.052
	<i>a</i>	-0.003	-0.007	-0.011	-0.014
Henderson and Pabis: $M_R=a\exp(-kt)$	<i>b</i>	0	0	0	0
	R^2	0.941	0.973	0.982	0.964
	R_{MSE}	0.329	0.175	0.122	0.154
Werma: $M_R=a\exp(-kt)+$ $(1-a)\exp(-gt)$	<i>a</i>	1.003	1.008	1.014	1.032
	<i>k</i>	0.005	0.010	0.015	0.021
	R^2	0.939	0.971	0.981	0.965
Modified Page: $M_R=a\exp(-kt^n)$	<i>g</i>	48.757	27.122	23.171	19.223
	R^2	0.939	0.971	0.981	0.965
	R_{MSE}	0.329	0.175	0.120	0.135
	<i>a</i>	0.899	0.947	0.979	0.983
	<i>k</i>	0	0.003	0.007	0.005
	R^2	0.955	0.980	0.986	0.978
	<i>n</i>	1.400	1.243	1.164	1.343
	R^2	0.955	0.980	0.986	0.978
	R_{MSE}	0.281	0.144	0.103	0.107

知,3 种干燥温度下的干燥试验值与模型预测值几乎一致,表明 Wang and Singh 模型预测效果较好,能够很好地描述稻谷干燥特性。当干燥温度为 40、50、60 ℃时,试验值和模型值平均相对误差分别为 1.573%、1.428%、1.233%,表明干燥试验值与模型值误差较小,干燥模型拟合程度高。

2.4 稻谷干燥过程水分有效扩散系数

在不同干燥温度下进行干燥试验,记录稻谷水分随

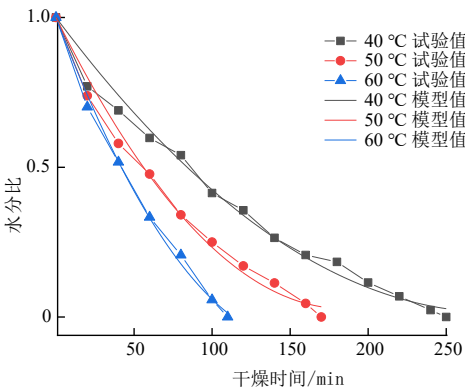


图 11 不同干燥温度下的 Wang and Singh 模型验证

Fig. 11 Wang and Singh model validation at different drying temperatures

时间变化数据,通过对数据进一步处理,可得到稻谷水分比变化曲线,通过绘制 $\ln M_R$ 与时间 t 的变化曲线,利用Origin 2018进行拟合,可得到线性回归拟合公式,利用方程斜率求出不同干燥温度下的稻谷水分有效扩散系数。

由图 12 可知,稻谷干燥水分比自然对数 $\ln M_R$ 与时间 t 呈线性关系,由线性回归拟合分析可得到不同干燥温度下的方程斜率与截距,并通过斜率可计算出 3 种温度下的水分有效扩散系数,如表 8 所示。

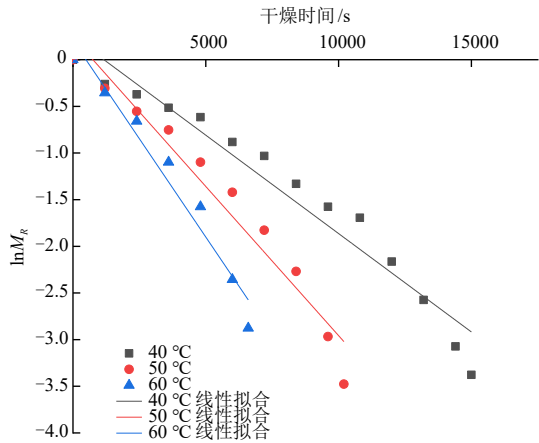


图 12 稻谷对数水分比随时间变化趋势图

Fig. 12 Trend of logarithmic moisture content in paddy grains

表 8 线性回归拟合公式

干燥温度/℃	线性回归拟合公式	R^2	D_{eff}
40	$Y=-2.109\times10^{-4}X+0.246$	0.946	9.433×10^{-11}
50	$Y=-3.197\times10^{-4}X+0.240$	0.951	1.430×10^{-10}
60	$Y=-4.214\times10^{-4}X+0.206$	0.953	1.885×10^{-10}

由表 8 可知,当干燥温度为 40 °C 时,斜率 k 为 -2.109×10^{-4} ,截距 b 为 0.246;当干燥温度为 50 °C 时,斜率 k 为 -3.197×10^{-4} ,截距 b 为 0.240;当干燥温度为 60 °C 时,斜率 k 为 -4.214×10^{-4} ,截距 b 为 0.206。3 种温度下线性回归公式的 R^2 分别为 0.946、0.951 和 0.953,干燥温度为 60 °C 时,其线性回归方程拟合的最好。在干燥温度分别为 40、50、60 °C 的条件下,稻谷水分有效扩散系数分别为 9.433×10^{-11} 、 1.430×10^{-10} 、 1.885×10^{-10} ,稻谷水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而升高,这是由于提升温度可以加快稻谷内液相水和蒸汽质量的传输,提高传输速度,使传热能很好地促进传质,进而提高稻谷的有效水分扩散系数^[25]。

2.5 不同干燥温度下的稻谷干燥活化能

在求得不同干燥温度下的稻谷水分有效扩散系数后,通常采用阿伦尼乌斯公式来描述水分有效扩散系数与温度之间的关系,进而求得稻谷干燥活化能。

由图 13 可知,水分有效扩散系数自然对数 $\ln D_{eff}$ 与 $1/T$ 呈线性关系。经拟合可得线性方程 $Y=-3.627X-11.484$,斜率 k 为 0.957,平均决定系数 R^2 为 0.957,斜率 k 与活化能 E_a 成反比,可求得稻谷活化能为 30.153 kJ/mol,表明干燥过程中从稻谷中除去 1 mol 的水分需要的最低能量为 30.153 kJ。

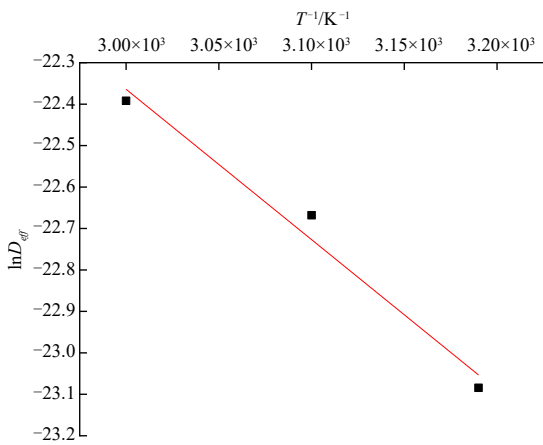


图 13 稻谷对数有效扩散系数与温度之间的关系

Fig. 13 Relationship between logarithmic effective diffusion coefficient of paddy and temperature

3 结论

(1)相同温度下,滚筒热风干燥相比于其他干燥技术具有更高的平均干燥速率,干燥速率随着干燥温度的升高而增大,随着稻谷初始含水率的减小而降低;干燥温度和稻谷初始含水率一定的条件下,提高滚筒转速,可增大干燥速率并保证稻谷干燥品质。

(2)影响干燥后稻谷品质的主要因素是干燥温度,其次是初始含水率和滚筒转速。在初始含水率 18% 的条件下,当干燥温度 40 °C、滚筒转速 30 r/min 时,稻谷爆腰率为 23%、蛋白质含量为 7.83 g/(100 g)、脂肪酸值为 38.53 mg/(100 g)、食味值为 79,稻谷干燥速率快,干燥品质较好。

(3)Wang and Singh 模型对干燥试验数据拟合较好,模型验证误差小;稻谷水分有效扩散系数随着干燥温度的升高而升高,稻谷干燥活化能为 30.153 kJ,与其他干燥技术相比,能量损耗小,该研究结果可以为稻谷干燥装置研制和干燥工艺提供参考。

参 考 文 献

[1] 国家统计局关于 2023 年粮食产量数据的公告[N]. 中国信息报, 2023-12-12(001).

[2] 李长友, 方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 179-184.

LI Changyou, FANG Zhuangdong. Analytical model study on multi-stage countercurrent drying and slow thawing of high humidity rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 179-184. (in Chinese)

[3] YANG Z Y, YANG Z, YU F, et al. Ultrasound-assisted heat pump intermittent drying of adzuki bean seeds: drying characteristics and

- parameter optimization[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(10): e13501.
- [4] LI X J, WANG X, LI Y, et al. Changes in moisture effective diffusivity and glass transition temperature of paddy during[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 128: 112 - 119.
- [5] PAN Z, K HIR R, GODFREY L D, et al. Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfestations by infrared radiation heating and rice milling quality[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(3): 469 - 479.
- [6] 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. The impact of mechanical drying on the storage quality of rice[J]. Grain Science and Economics, 2022, 47(5): 70 - 74. (in Chinese)
- [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 study of drum type homogeneous drying device for agricultural products[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(6): 120 - 123,131. (in Chinese)
- [8] 刘春山,陈思羽,肖世伟,等.稻谷变温均质干燥装置工艺优化与性能试验[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):366 - 372.
LIU Chunshan, CHEN Siyu, XIAO Shiwei, et al. Process optimization and performance test of rice variable temperature homogeneous drying device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.1): 366 - 372. (in Chinese)
- [9] GB/T 20569-2006 稻谷储存品质判定规则[S]. 2006.
- [10] 季宏波,郭剑桥,张慧,等.粳稻谷品质指标之间相关性分析[J].粮食科技与经济,2020,45(4):77 - 79.
JI Hongbo, GUO Jianqiao, ZHANG Hui, et al. Correlation analysis between quality indicators of japonica rice[J]. Grain Science and Economics, 2020, 45(4): 77 - 79. (in Chinese)
- [11] 季宏波,范艺凡,林子木,等.不同加工精度粳稻谷食味品质变化[J].粮食加工,2020,45(3):37 - 39.
JI Hongbo, FAN Yifan, LIN Zimu, et al. Changes in taste quality of japonica rice with different processing accuracies [J]. Grain Processing, 2020, 45(3): 37 - 39. (in Chinese)
- [12] 战廷尧.稻谷深床缓苏干燥工艺优化试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
ZHAN Yanyao. Rice deep bed the tempering drying process optimization research[D]. Shenyang: Shenyang agricultural university, 2023. (in Chinese)
- [13] 张亚伟.稻谷变温干燥工艺优化与模型探究[D].郑州:河南工业大学,2023.
ZHANG Yawei. Research on process optimization and model of rice drying at variable temperature[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] 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 process for preparation of mushroom powder by orthogonal test [J]. Chinese Seasoning, 2020, 45(4): 85 - 89. (in Chinese)
- [15] 刘木华,曹崇文.稻谷种子安全干燥温度模型研究[J].农业工程学报,2003,19(3):174 - 176.
LIU Muhua, CAO Chongwen. Research on the safe drying temperature model of rice seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 174 - 176. (in Chinese)
- [16] NGAMNIKOM P. SONGSERMPONG S. The effects of freeze, dry, and wet grinding processes on rice flour properties and their energy consumption[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 632 - 638.
- [17] 郑先哲,刘辉,沈杨柳,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. Research on variable-temperature hot-air drying process of rice based on glass transition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 51(1): 331 - 340. (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.
LI Yuanyuan. Optimization of far-infrared combined drying process parameters for alfalfa square bundles[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural and Reclamation University, 2021. (in Chinese)
- [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 for honey pomelo using orthogonal experiments[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 100 - 105. (in Chinese)
- [20] 熊书剑,孙卫红.不同干燥技术对稻谷品质影响的研究综述[J].江苏农业科学,2016,44(2):18 - 22.
XIONG Shujian, SUN Weihong. Research review on the effects of different drying techniques on rice quality [J]. Jiangsu Agricultural Science, 2016, 44(2): 18 - 22. (in Chinese)
- [21] 尹晓峰,杨明金,李光林,等.稻谷薄层热风干燥工艺优化及数学模型拟合[J].食品科学,2017,38(8):198 - 205.
YIN Xiaofeng, YANG Mingjin, LI Guanglin, et al. Optimization of thin layer hot air drying process for rice and mathematical model fitting [J]. Food Science, 2017, 38(8): 198 - 205. (in Chinese)
- [22] 梁礼燕,丁超,杨国峰.稻谷薄层干燥特性及工艺研究[J].粮食储藏,2011, 40(6):39 - 42.
LIANG Liyan, DING Chao, YANG Guofeng. Study on the characteristics and process of thin layer drying of rice [J]. Grain Storage, 2011, 40(6): 39 - 42. (in Chinese)
- [23] CHUA K J, CHOU S K, MUJUMDAR A S, et al. Radiant-convective drying of osmotic treated agriproducts: effect on drying kinetics and product quality[J]. Food Control, 2004, 15(2):145 - 158.
- [24] 郜坤.谷物干燥过程热质交换及能耗研究[D].北京:华北电力大学,2019.
GAO Kun. Research on heat and mass exchange and energy consumption during grain drying process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [25] BINDZUS W, S J, GLORIA-HERNANDEZ H, et al. Glass transition of extruded wheat corn and rice starch[J]. Starch, 2002, 54(9): 393 - 400.