

石墨烯低温远红外辐射干燥稻谷干燥特性与品质研究

陈坤杰¹ 王 硕¹ 颜建春¹ ABDULAZIZ Nuhu Jibril¹ 孙 杰² 於海明¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 盐城市沿海拖拉机制造有限公司, 盐城 224007)

摘要: 为研究稻谷的石墨烯低温远红外干燥特性及其对稻谷干燥品质的影响,以辐射温度、排粮流量和除湿风量为影响因素,以整精米率和应力裂纹指数增值为评价指标,用自制的循环式石墨烯低温远红外干燥机进行稻谷干燥试验,通过BBD(Box-Behnken设计)响应面法,分析了低温远红外干燥对稻谷干燥品质的影响以及工艺参数优化。结果表明:影响稻谷干燥特性和品质的最主要因素是辐射温度,其次是排粮流量和除湿风量。随着辐射温度的升高,稻谷干燥速率和应力裂纹指数增值逐步增大,整精米率则逐步降低。与同温度的热风干燥相比,石墨烯低温远红外干燥平均干燥速率和干燥品质均有显著提高。经优化后,稻谷最佳石墨烯低温远红外干燥工艺条件为:辐射温度43℃、排粮流量4 kg/min、除湿风量193 m³/h,此时应力裂纹指数增值为9,整精米率为79.75%,稻谷干燥品质最佳。这说明利用石墨烯低温远红外干燥稻谷,可以明显提高干燥速率并改善稻谷干燥品质。

关键词: 稻谷; 石墨烯; 远红外辐射干燥; 热传导; 低温干燥

中图分类号: S375

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0346-06

OSID:



Drying Characteristics and Quality of Paddy under Low Temperatures and Far-infrared Drying Conditions of Graphene

CHEN Kunjie¹ WANG Shuo¹ YAN Jianchun¹ ABDULAZIZ Nuhu Jibril¹ SUN Jie² YU Haiming¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

(2. Yancheng Yanhai Tractor Manufacturing Co., Ltd., Yancheng 224007, China)

Abstract: In order to study the graphene low temperature far-infrared drying characteristics of paddy and its influence on the drying quality of rice, the IR temperatures, grain flow and dehumidification air volume were used as influencing factors, and the head rice rate and additional stress crack index were used as evaluation indexes. A self-made circulating graphene low temperature far-infrared drying machine was used to carry out paddy drying tests. The effect of low temperature far-infrared drying on paddy drying quality and the optimization of process parameters were analyzed. The results showed that the most important factors affecting the drying characteristics and quality of paddy were IR temperature, followed by grain flow and dehumidifying air volume. With the increase of IR temperature, the drying rate and additional stress crack index of paddy were increased gradually, while the percentage of head rice was decreased gradually. Compared with hot air drying at the same temperature, the average drying rate and drying quality of graphene low temperature far-infrared drying were significantly improved. After optimization, the optimal low temperature far-infrared drying conditions for paddy were as follows: IR temperature was 43℃, grain flow rate was 4 kg/min, dehumidification air volume was 193 m³/h, stress crack index increment was 9, head rice rate was 79.75%, and paddy drying quality was the best. The results showed that using graphene to dry paddy at low temperature and far-infrared can significantly increase the drying rate and improve the drying quality of paddy.

Key words: paddy; graphene; far-infrared radiation drying; heat transfer; low temperature drying

收稿日期: 2023-10-25 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 江苏省科技计划项目(BE2021305)

作者简介: 陈坤杰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工、无损检测及其智能化装备研究,E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

通信作者: 於海明(1974—),男,高级工程师,主要从事农业工程研究,E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

0 引言

目前,热风干燥是稻谷干燥的最主要方式,具有技术成熟、作业方便的特点,适合大宗农产品的干燥加工。但热风干燥多采用较高温度热风与粮食水分进行对流交换,存在能源利用率低、干燥速率与品质无法兼顾、易产生环境污染等缺点^[1-4]。近年来远红外辐射干燥凭借其干燥速度快、无污染等特点开始受到重视^[5-7]。

远红外线与微波频段相邻,具有强烈的热效应^[8],用于干燥时,可以穿透到待干燥物料内部,引起物料内水分子的强烈共振,导致物料内部温度升高。与热风干燥不同,采用远红外干燥时,物料内部的湿扩散和热扩散方向一致,不仅可加快物料的水分蒸发^[9],提高干燥速度,而且物料内外受热均匀,对物料品质损伤较小^[10-13],可提高干燥品质。但是,常规的远红外线发射装置多采用电加热或燃气加热,通常需要加热至 400℃ 甚至更高温度才能发射出远红外线,会在一定程度上降低热效率、增加能耗,并严重影响热敏性物料的干燥品质^[14-15]。

石墨烯这种二维碳材料在低功率密度的电驱动下可以高效地发射远红外线,其电热转换效率高于 99%,且所发射的能量集中在远红外光谱频率范围内,占总发射能量的 90% 以上,具有优异的电热特性^[14-17]。另外,石墨烯可以在较低的温度(30~60℃)下发射远红外线,甚至可以与物料直接接触,产生热辐射和热传导双重功效,提高传热速率,加快干燥进程,特别适合于热敏性物料,如稻谷的加热干燥。

石墨烯远红外干燥是一种新型的干燥技术,目前国内外相关研究较少,该技术对于稻谷干燥品质研究完全处于空白。本文针对石墨烯远红外发射温度低,可与物料直接接触进行热传导的特点,进行稻谷石墨烯低温远红外干燥试验,研究稻谷在低温热辐射和热传导双效作用下的干燥特性,探索石墨烯低温远红外干燥对稻谷干燥品质的影响,以期为研究石墨烯低温远红外干燥机提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 石墨烯低温远红外干燥试验台

试验用石墨烯远红外干燥试验台为自主研制,主要由进料模块、干燥模块、除湿模块、排粮模块和控制系统等组成,如图 1 所示。工作原理是:稻谷从进料口进入,经由提升机运送至试验台顶部,从出料

口通过布料装置均匀落入下方干燥模块的 4 个通道中。每个通道两侧安装涂有石墨烯材料的辐照板。辐照板通电后发出远红外线并升温至设定温度对稻谷进行加热。经过热传导和热辐射加热后的稻谷流入除湿段,通过风机吹入的新风将蒸发出的水分带走。然后排粮轮将稻谷拨入滑料斗底部,由提升机将稻谷再次提升运送至布料装置进行下一轮循环,如此往复直至干燥结束。

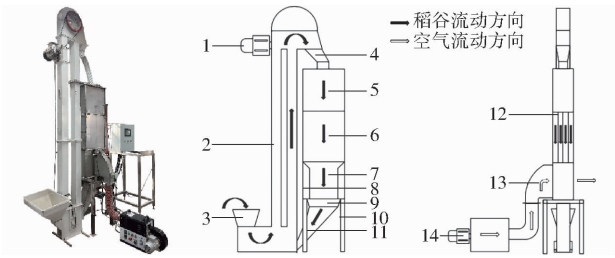


图 1 干燥试验台实物图与工作原理图
Fig. 1 Physical and working principle diagrams of drying test bench

1. 提升机电机 2. 斗式提升机 3. 进料口 4. 出料口 5. 布料装置 6. 干燥模块 7. 除湿段 8. 除湿出口 9. 排粮段 10. 台架 11. 滑料斗 12. 石墨烯辐照板 13. 除湿进风口 14. 风机

1.1.2 试验仪器

DHG-9071A 型电热恒温干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);AS847 型温湿度检测仪(东莞万创电子制品有限公司);AVM-03 型数字式风速仪(台湾泰仪电子股份有限公司);MTQ300D 型电子天平(深圳美孚电子有限公司);TX-200 型稻谷荧光镜(科特电气实验室有限公司,日本);WLJLG-2018 型检验砬谷机(台州沃粮粮用器材有限公司)。

1.2 试验材料

试验稻谷为南粳 46,平均初始含水率为(16±0.5)%。

1.3 试验方法

通过人工加湿法^[18]将试验用稻谷含水率调至 20% 左右,用密封袋密封后,在 2~4℃ 下储存 3 d 以平衡水分。每次试验前,取出 20 kg 稻谷,在试验环境温度下放置 3 h 以平衡稻谷内部温湿度。试验过程中,每隔 15 min 取 3 组稻谷样品,参照 GB 5009.3—2016 测定稻谷初始含水率、计算稻谷干物质质量、观测稻谷初始应力裂纹,直至稻谷含水率降至(14±0.2)% 时停止试验。每组试验重复 3 次,取平均值。

1.4 试验主要指标计算

(1)水分比^[19]计算公式为

$$M_R = \frac{W_t}{W_0} \tag{1}$$

其中
$$W_t = \frac{M_t - M_c}{M_c} \times 100\% \tag{2}$$

式中 M_R ——稻谷水分比
 W_t —— t 时刻稻谷含水率, %
 W_0 ——稻谷初始含水率, %
 M_t —— t 时刻稻谷质量, g
 M_c ——稻谷干物质量, g

(2)干燥速率计算公式为

$$D_R = \frac{W_{t_1} - W_{t_2}}{t_2 - t_1} \tag{3}$$

式中 D_R ——干燥速率, %/min
 W_{t_1}, W_{t_2} —— t_1, t_2 时刻的含水率, %

(3)应力裂纹指数(Stress cracking index, SCI)

应力裂纹指数也称作爆腰指数^[20],表示一组样品的裂纹量度。干燥前后的应力裂纹指数增值 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = 5M + 3D + S \tag{4}$$

式中 M ——干燥前、干燥后具有 2 条以上裂纹的谷粒数量差值
 D ——干燥前、干燥后具有 2 条裂纹的谷粒数量差值
 S ——干燥前、干燥后具有 1 条裂纹的谷粒数量差值

(4)整精米率

参照 GB/T 21719—2008, 整精米率 Y_2 计算公式为

$$Y_2 = \frac{m}{m_0} \times 100\% \tag{5}$$

式中 m_0 ——稻谷试样总质量, g
 m ——整精米质量, g

1.5 基于 BBD (Box – Behnken 设计) 响应面法的多响应试验

选择应力裂纹指数增值和整精米率作为响应值, 根据预试验及单因素试验选取辐射温度、排粮流量和除湿风量作为因素变量, 采用响应面法分析工艺变量对响应值的影响, 根据 Box – Behnken 设计原

理进行 15 组试验, 探究不同因素或因素组合对稻谷干燥后物理品质的影响。试验因素编码如表 1 所示。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Process variables and codes of Box – Behnken design

编码	因素		
	辐射温度/ ℃	排粮流量/ (kg·min ⁻¹)	除湿风量/ (m ³ ·h ⁻¹)
-1	40	4	185
0	45	5	210
1	50	6	235

1.6 数据处理方法

试验数据利用 Excel 2021 进行统计处理; 利用 Origin 2022 绘制干燥曲线; 利用 Design-Expert 12 进行响应面试验设计及方差分析。

2 试验结果与分析

2.1 稻谷石墨烯远红外干燥特性

图 2 为在排粮流量为 5 kg/min、除湿风量为 210 m³/h 时, 不同辐射温度下的稻谷干燥特性曲线。由图 2a 可知, 随着辐射温度的增加, 稻谷水分比快速下降, 干燥时间显著减少。与文献[21]中的热风恒温干燥相比, 在相同干燥温度及目标含水率情况下, 石墨烯远红外辐射干燥用时比热风干燥用时减少 4 h 左右。由图 2b 可知, 辐射温度越高, 干燥速率越大。随着含水率的下降, 干燥速率逐步降低。与常规热风干燥的速度随热风温度的提高而增大的变化类似。不同的是, 在整个干燥过程中, 稻谷石墨烯远红外干燥速率呈现出一种加速下降的趋势, 既没有恒速过程, 也没有降速过程。这可能是因为干燥前期, 稻谷内部自由水较多, 大量水分子吸收辐射能量使内部迅速升温, 热扩散和湿扩散速度快; 干燥中后期, 稻谷内部水分逐渐减少, 辐射能量引起的内部分子共振现象减少, 升温较慢, 水分向表面扩散速度减缓, 致使干燥速度下降较快。另外, 对于常规的稻谷热风干燥, 在干燥温度 50、55、60℃

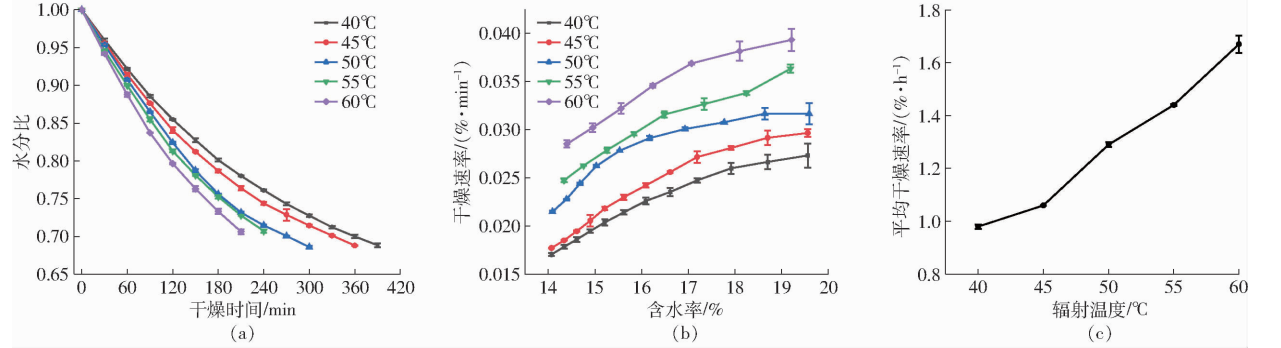


图 2 辐射温度对干燥特性的影响
Fig.2 Effects of radiation temperature on drying characteristics

下,最高干燥速率一般都低于 1.2%/h,而同温度下石墨烯远红外辐射干燥,最低干燥速率都高于 1.2%/h。甚至在较低辐射温度 40、45℃下,干燥速率都高于较高热风温度干燥速率。与文献[22]中的稻谷恒温热风干燥相比,55℃时石墨烯远红外辐射平均干燥速率约是热风干燥速率的 1.6 倍。同温度下石墨烯干燥速率显著高于热风干燥的可能原因:①干燥过程中,由于辐照板直接接触稻谷,热量可以通过辐射和热传导方式两种方式传递给稻谷,热量传递效率更高,因此干燥速更高。②由于红外辐射具有一定的穿透效果,辐射引起稻谷内部水分子共振生热,造成热量由内向外传递,与水分扩散方向一致,可促进稻谷内部水分加速向稻谷表面扩散并蒸发,从而干燥速率提高。

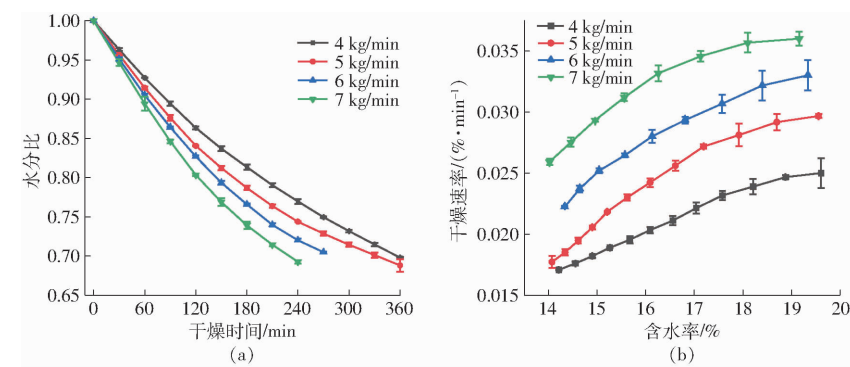


图 3 排粮流量对干燥特性的影响

Fig. 3 Effects of grain flow on drying characteristics

图 4 为在辐射温度 45℃、排粮流量 5 kg/min 时,不同除湿风量下的稻谷干燥特性曲线。由图 4 可知,除湿风量的增加对稻谷水分比及干燥速率影响较小,平均干燥速率随着除湿风量的增加呈现先扬后抑的变化。这可能是因为稻谷表面水蒸气较

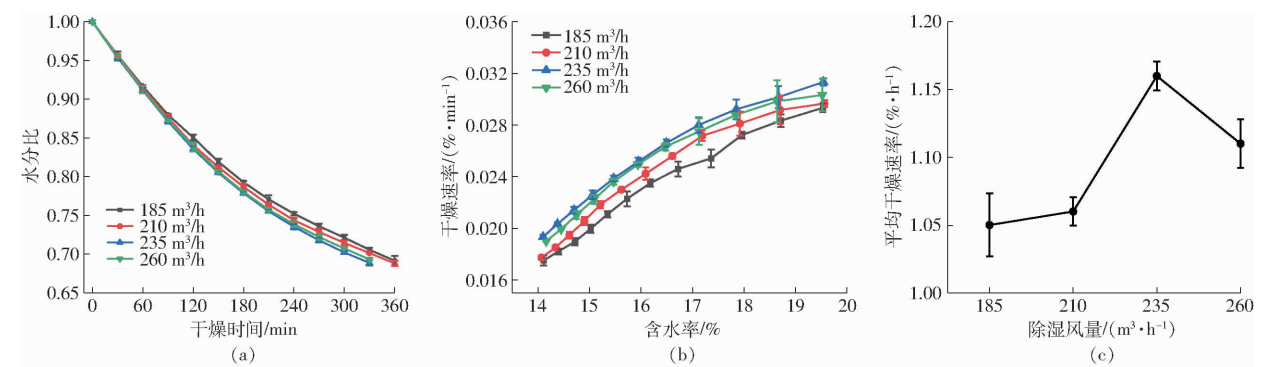


图 4 除湿风量对干燥特性的影响

Fig. 4 Effects of dehumidification air volume on drying characteristics

2.2 基于 BBD 响应面法的多响应试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对试验因素和评价指标间的关系进行回归拟合分析,建立应力裂纹指数增值 Y_1 、整精米率 Y_2 关于辐射温度、排粮流量、除湿风量的二次回归模型,并对其进行方差分析和显著性检验,结果如表 2、3 所示,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 为辐

图 3 为在辐射温度 45℃、除湿风量 210 m³/h 时,不同排粮流量下的稻谷干燥特性曲线。由图 3a 可知,随着排粮流量增加,稻谷水分比下降幅度增加,稻谷干燥至目标水分比用时减少。当排粮流量最大(7 kg/min)时,干燥时间最短,仅有 240 min,此时干燥速率达到最高。由图 3c 可知,平均干燥速率随着排粮流量增加而增大,特别是当排粮流量由 5 kg/min 增加到 6、7 kg/min 时,平均干燥速率将由缓慢增加转为迅速增大。排粮流量影响稻谷干燥速率主要原因,可能是排粮流量的增加会导致稻谷在整个干燥过程中的循环次数增加,不仅增加了稻谷在干燥室内的受热时间,而且减少了稻谷循环输送和缓苏等待时间,减少了稻谷的热损失,从而加快了干燥速率。

多,较小的风量没能将水蒸气彻底带走,影响了干燥速率。而当除湿风量过大时,由于除湿冷风温度较低,在带走水蒸气的同时,也带走了过多的稻谷热量,导致稻谷温度下降,在下一轮干燥时,需要一个升温的过程,从而影响了干燥速率。

射温度、排粮流量、除湿风量编码值。应力裂纹指数增值和整精米率的回归模型表现均为极显著 ($P < 0.001$)、二者的失拟项检验结果均为不显著 ($P > 0.05$),表明回归模型在试验范围内的拟合程度较好。剔除不显著因素后得到的编码空间回归方程分别为

表 2 试验设计与结果

Tab.2 BBD response surface test design and results					
试验序号	因素			Y_1	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	1	0	17	75.31
2	-1	-1	0	11	74.10
3	-1	0	1	21	82.76
4	-1	0	-1	13	72.60
5	0	1	1	20	75.90
6	0	-1	1	18	78.19
7	0	1	-1	18	73.56
8	0	0	0	26	80.73
9	0	0	0	23	87.00
10	0	-1	-1	9	79.83
11	0	0	0	26	80.73
12	1	0	1	37	60.42
13	1	1	0	42	58.08
14	1	0	-1	40	61.74
15	1	-1	0	35	65.55

$$Y_1 = 25 + 11.5X_1 + 3.0X_2 + 2.0X_3 - 2.75X_1X_3 + 6.38X_1^2 - 5.13X_2^2 - 3.63X_3^3$$

$$Y_2 = 87.82 - 7.37X_1 - 1.85X_2 + 1.19X_3 - 11.03X_1^2$$

(6)

(7)

由表 3 可知,在影响应力裂纹指数增值和整精米率的 3 个因素中,只有辐射温度的影响极显著,排粮流量和除湿风量的影响不显著。说明辐射温度是影响稻谷干燥品质的最主要因素。各因素间交互作用对响应指标影响的等值线图 and 曲面图,如图 5、6 所示。

图 5 显示,应力裂纹指数增值随辐射温度的增加而显著增加,随排粮流量和除湿风量的增加只有少量增加。原因是:石墨烯的辐射温度升高,导致稻谷温度升高,加快了水分扩散,稻谷内外层热湿梯度相应增大,在稻谷内部产生较大应力,从而导致稻谷裂纹增多。而排粮流量的增大,加快了稻谷在试验台内的流动速度,在一定程度上增加了稻谷碰撞次数和力度,从而加剧了裂纹产生。

由图 6 可知,整精米率随辐射温度、排粮流量和

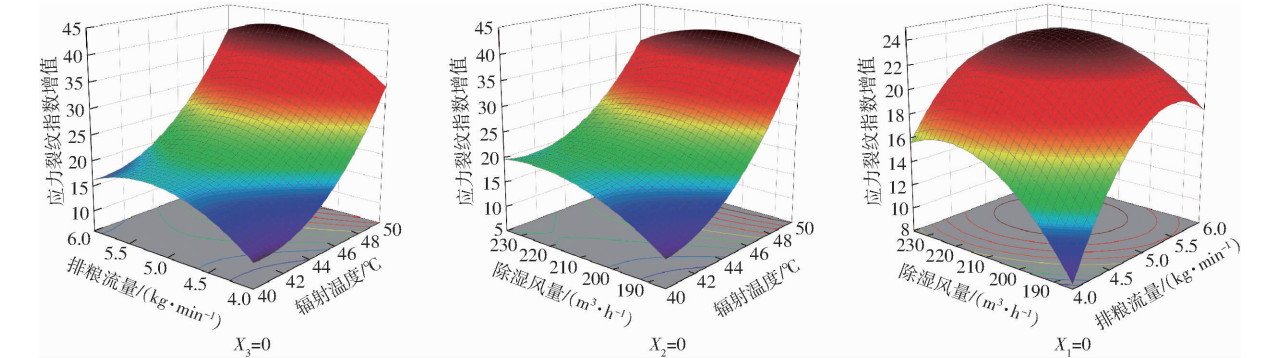


图 5 各因素间交互作用对应力裂纹指数增值的影响
Fig. 5 Influence of interaction among various factors on SCI

表 3 方差分析

Tab.3 Results of ANOVA for Box – Behnken design						
评价指标	来源	平方和	自由度	均方	F	P
应力裂纹指数增值	模型	1 523.43	9	169.27	54.60	0.000 2 **
	X_1	1 058.00	1	1 058.00	341.29	<0.000 1 **
	X_2	72.00	1	72.00	23.23	0.004 8 **
	X_3	32.00	1	32.00	10.32	0.023 7 *
	X_1X_2	0.250 0	1	0.250 0	0.080 6	0.787 8
	X_1X_3	30.25	1	30.25	9.76	0.026 1 *
	X_2X_3	12.25	1	12.25	3.95	0.103 5
	X_1^2	150.06	1	150.06	48.41	0.000 9 **
	X_2^2	96.98	1	96.98	31.28	0.002 5 **
	X_3^2	48.52	1	48.52	15.65	0.010 8 *
整精米率	残差	15.50	5	3.10		
	失拟	9.50	3	3.17	1.06	0.520 2
	纯误差	6.00	2	3.00		
	合计	1 538.93	14			
	模型	1 012.08	9	112.45	13.38	0.005 3 **
	X_1	434.83	1	434.83	51.72	0.000 8 **
整精米率	X_2	27.45	1	27.45	3.27	0.130 6
	X_3	11.38	1	11.38	1.35	0.297 2
	X_1X_2	18.84	1	18.84	2.24	0.194 7
	X_1X_3	32.95	1	32.95	3.92	0.104 6
	X_2X_3	3.96	1	3.96	0.471 1	0.523 0
	X_1^2	448.80	1	448.80	53.39	0.000 8 **
	X_2^2	46.14	1	46.14	5.49	0.066 2
	X_3^2	21.53	1	21.53	2.56	0.170 4
	残差	42.03	5	8.41		
	失拟	15.83	3	5.28	0.402 6	0.769 0
整精米率	纯误差	26.21	2	13.10		
	合计	1 054.11	14			

注: * 表示显著 ($0.01 \leq P < 0.05$), ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

除湿风量的增加而减少。其中受辐射温度影响显著。出现上述现象的原因是整精米率与稻谷裂纹程度密切相关,裂纹使稻谷在加工时易产生破碎,从而降低了整精米率。

文献[23]显示,稻谷经过 45 $^{\circ}\text{C}$ 热风干燥后,应力裂纹指数增值最小值为 22、最大值为 88.4;整精米率最高为 71.36%、最低仅有 52.30%。与之相比,稻谷经过辐射温度 45 $^{\circ}\text{C}$ 的干燥后,爆腰指数增

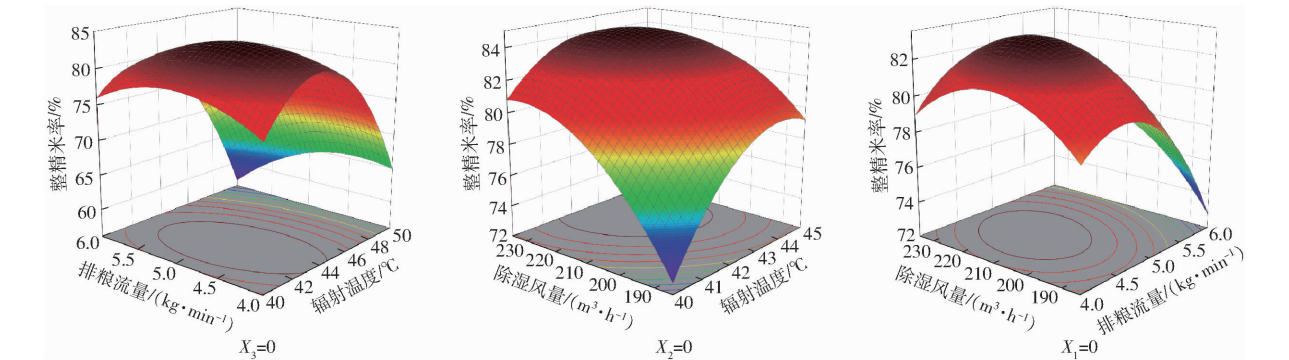


图 6 各因素交互作用对整精米率的影响

Fig. 6 Influence of interaction among various factors on head rice rate

值最小值为 9，最大值为 26；整精米率最高为 82.76%、最低也有 58.08%。经过相同温度干燥后，低温辐射干燥的稻谷品质明显优于热风干燥。

2.3 工艺参数优化

为获得高品质的稻谷，以应力裂纹指数增值最小、整精米率最大为目标对石墨烯远红外干燥工艺参数进行优化。得到的最优工艺参数组合为：辐射温度 43℃、排粮流量 4 kg/min、除湿风量 193 m³/h，此时应力裂纹指数增值为 9，整精米率为 79.75%。根据优化结果进行 3 组重复试验，试验结果如表 4 所示，试验结果与优化结果基本一致。

表 4 参数优化试验结果

Tab. 4 Test results of optimized parameters

响应值	均值	最大值	最小值	标准差
应力裂纹指数增值	10.67	12	9	1.53
整精米率/%	80.33	82.32	78.45	1.58

3 结论

(1)通过与其他干燥技术对比，可得稻谷石墨烯远红外干燥速率主要随着辐射温度的升高而增大，随着稻谷含水率的减少而降低。与同温度的热风干燥相比，石墨烯远红外平均干燥速率具有显著优势。

(2)影响干燥后稻谷干燥品质的主要因素是辐射温度，随着辐射温度的升高，应力裂纹指数显著增加，整精米率下降；当排粮流量和除湿风速减小时，应力裂纹指数有少量降低、整精米率呈现一定的升高趋势。石墨烯远红外干燥稻谷品质，显著高于同温度的热风干燥品质。

(3)石墨烯远红外干燥稻谷最佳工艺参数为：辐射温度 43℃、排粮流量 4 kg/min、除湿风量 193 m³/h，此时应力裂纹指数增值为 9，整精米率为 79.75%。验证试验表明优化结果可靠，可为稻谷石墨烯低温远红外辐射干燥工艺提供参考。

参 考 文 献

[1] ZHOU X,LIU L,FU P, et al. Effects of infrared radiation drying and heat pump drying combined with tempering on the quality of long-grain paddy rice[J]. International Journal of Food Science & Technology,2018,53(11):2448-2456.

[2] 姚渠,尹君,李瑞敏.我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J].粮食加工,2022,47(3):77-79.

YAO Qu,YIN Jun,LI Ruimin. Development status and trend of grain drying technology in China[J]. Grain Processing,2022,47(3):77-79. (in Chinese)

[3] 徐小东,崔政伟.农产品和食品干燥技术及设备的现状和发展[J].农业机械学报,2005,36(12):171-174.

XU Xiaodong,CUI Zhengwei. Present situation and development of drying technology and equipment for agricultural products and food[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(12):171-174. (in Chinese)

[4] JIN Y,WONG W K,WU Z, et al. Relationship between accumulated temperature and quality of paddy[J]. International Journal of Food Properties,2019,22(1):19-33.

[5] EL-MESERY H S,QENAWY M,HU Z C, et al. Evaluation of infrared drying for okra: mathematical modelling, moisture diffusivity, energy activity and quality attributes[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2023,50:103451.

[6] HACHEM H,BOUMNIJEL I,MIHOUBI D. Effect of convective and infrared drying on kinetics, activation energy, and quality of eggshells reinforced kaolin composites: comparative study[J]. Materials Today Communications,2023,36:106809.

[7] SHAD Z M,VENKITASAMY C,KUELBS E, et al. Effect of infrared drying on chemical and microbial properties of Cold-Hardy grape pomace (Edelweiss and Marquette)[J]. Food Science & Nutrition,2023,11(4):1826-1835.

[8] 游香杨,李文智,曾秀权,等.基于红外线的泡沫监测装置的设计[J].信息通信,2017(10):74-75.

YOU Xiangyang,LI Wenzhi,ZENG Xiuequan, et al. Design of foam monitoring device based on infrared ray[J]. Information & Communications,2017(10):74-75. (in Chinese)

[9] 罗剑毅.稻谷的远红外干燥特性和工艺的实验研究[D].杭州:浙江大学,2006.

LUO Jianyi. Study on drying characteristic and technology of paddy dried by far-infrared[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

28(1):51-62.

[20] YE J Y, LIU X Y, XU L F, et al. Experimental study on the heating and humidifying performance of fan coil units with humidification modules in severe cold regions[J]. *Energy & Buildings*,2022,276:112500.

[21] YUSUF K, ALI Y, İSMAIL S. Investigation of type 1 and type 2 fuzzy logic controllers performance: application of speed control of BLDC motor[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*,2022,43(5):6357-6370.

[22] 王红英,范佳宇,王粮局,等.基于PID的饲料制粒调质温度控制系统设计与试验[J].*农业工程学报*,2023,39(1):1-8.
WANG Hongying, FAN Jiayu, WANG Liangju, et al. Design and test of the temperature control system for the feed pelleting and conditioning based on PID[J]. *Transactions of the CSAE*,2023, 39(1):1-8. (in Chinese)

[23] 龚中良,王鹏凯,李大鹏,等.多温区网带式干燥机热流场分析与结构优化[J].*农业工程学报*,2021,37(18):40-47.
GONG Zhongliang, WANG Pengkai, LI Dapeng,et al. Design and test of the temperature control system for the feed pelleting and conditioning based on PID[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021,37(18):40-47. (in Chinese)

[24] 刘广海,吴俊章,FOSTER A,等.多温蓄冷车设计与车内温度场分析[J].*农业机械学报*,2019,50(4):309-316.
LIU Guanghai, WU Junzhang, FOSTER A, et al. Design of multi-temperature cold storage vehicle and analysis on temperature field in vehicle[J].*Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(4):309-316. (in Chinese)

[25] 卫聿铭. 霍山黄芽闷黄工艺研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
WEI Yuming. Research on yellowing process for huoshan bud yellow tea[D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2021. (in Chinese)

[26] 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法:GB/T 23776—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

(上接第 351 页)

[10] 姜春慧,张倩,杨娜,等.桔梗切片远红外干燥特性及动力学研究[J].*中国农机化学报*,2021,42(2):92-100.
JIANG Chunhui, ZHANG Qian, YANG Na, et al. Study on far infrared drying characteristics and kinetics of *Platycodon grandiflorum* slices[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021,42(2):92-100. (in Chinese)

[11] 尚建伟,张倩,王同勋,等.远红外干燥对甘草切片干燥特性及品质的影响[J].*核农学报*,2023,37(8):1609-1617.
SHANG Jianwei, ZHANG Qian, WANG Tongxun, et al. Effect of far-infrared drying on drying characteristics and quality of glycyrrhiza slices[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2023,37(8):1609-1617. (in Chinese)

[12] ZHANG D Y, HUANG D, ZHANG Y X, et al. Ultrasonic assisted far infrared drying characteristics and energy consumption of ginger slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*,2023,92:106287.

[13] RATSEWO J, WARREN F J, MEESO N, et al. Effects of far-infrared radiation drying on starch digestibility and the content of bioactive compounds in differently pigmented rice varieties[J]. *Foods*,2022,11(24):4079.

[14] SAKARE P, PRASAD N, THOMBARE N, et al. Infrared drying of food materials: recent advances[J]. *Food Engineering Reviews*,2020,12(3):381-398.

[15] 汪喜波,胡琼,肖波,等.稻谷红外辐射与对流联合干燥过程的模型模拟[J].*农业机械学报*,2013,44(9):145-151.
WANG Xiibo, HU Qiong, XIAO Bo, et al. Modeling simulation of combined convective and infrared radiation in rice drying process[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013,44(9):145-151. (in Chinese)

[16] DU Y J, YAN J C, WEI H, et al. Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*,2023, 43:102780.

[17] 王波. 基于石墨烯等离激元的 hBN 和 VO₂ 薄膜结构的近场辐射换热研究[D]. 烟台:烟台大学,2021.
WANG Bo. Research on near-field thermal radiation of hBN and VO₂ thin films structure based on graphene plasmons[D]. Yantai:Yantai University,2021. (in Chinese)

[18] JAIBOON P, PRACHAYAWARAKORN S, DEVA-HASTIN S, et al. Effect of high-temperature fluidized-bed drying on cooking, textural and digestive properties of waxy rice[J]. *Journal of Food Engineering*,2011,105(1):89-97.

[19] UTARI F D, YASINTASIA C, RATRIDEWI M, et al. Evaluation of paddy drying with vertical screw conveyor dryer (VSCD) at different air velocities and temperatures[J]. *Chemical Engineering and Processing*,2022,174:108881.

[20] HUNDAL J, TAKHAR P S. Experimental study on the effect of glass transition on moisture profiles and stress-crack formation during continuous and time-varying drying of maize kernels[J]. *Biosystems Engineering*,2010,106(2):156-165.

[21] MAHMOOD N, LIU Y H, MUNIR Z, et al. Effects of hot air assisted radio frequency drying on heating uniformity, drying characteristics and quality of paddy[J]. *LWT*,2022,158:113131.

[22] 刘启觉. 高水分稻谷干燥工艺试验研究[J]. *农业工程学报*,2005,21(2):135-139.
LIU Qijue. Experimental research on drying technology for high moisture content paddy[J]. *Transactions of the CSAE*,2005, 21(2):135-139. (in Chinese)

[23] 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)