

稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变研究*

徐凤英 陈震 李长友 黄木水

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 以函数拟合、近红外检测及发芽率测定,研究稻谷热风、微波干燥的去水性能及其蛋白质、直链淀粉含量与出芽品质;结合 TG/DSC 测试,探讨 2 种热源干燥稻谷的玻璃化转变对其干燥后品质的影响。结果表明:以对数函数拟合稻谷热风、微波干燥去水性能的准确度高;经 2 种热源干燥稻谷的蛋白质、淀粉含量过程差异不显著;但热风干燥稻谷初期蛋白质含量差异明显。鲜稻谷发芽率显著低于其经热风、微波干燥后的发芽率,三者分别为 0.65 ± 0.19 、 0.93 ± 0.03 、 0.77 ± 0.02 。随含水率降低,经热风、微波干燥稻谷的热重损失与热流则呈不同趋势变化,二者中点温度均减小,综合影响干谷品质。

关键词: 稻谷 热风干燥 微波干燥 玻璃化转变温度 干燥品质

中图分类号: S375; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0187-06

Effect of Drying Methods on Quality and Glass Transition Temperature of Rice

Xu Fengying Chen Zhen Li Changyou Huang Mushui

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The dynamic of rice moisture content during hot air and microwave drying was measured and analyzed. The dynamic property of protein, amylose content and germination ratio of rice were analyzed by near infrared detection and germination observation. Furthermore, the influence of drying method on rice quality was measured by glass transition temperature which was got from the analysis of TG/DSC. Results showed that the fitting accuracy of logarithmic model was higher than exponential model during the process of rice dehydration by both drying methods, and the difference in protein and starch content of dried rice was not significant. However, there were significant differences in protein content between fresh and dried rice by hot air drying. The germination ratio of rice dried by hot air and microwave was much higher than fresh ones, which was 0.93 ± 0.03 , 0.77 ± 0.02 and 0.65 ± 0.19 , respectively. As the rice moisture content decreased, the mass loss and heat flux of dried rice showed different changing trend and the glass transition temperature decreased as well. All of them had effect on the quality of dried rice. The results could be a reference for improving efficiency and quality during the process of grain drying.

Key words: Rice Hot air drying Microwave drying Glass transition temperature Drying quality

引言

新收稻谷富含水分,存放易霉变损失^[1-3]。以热风、微波为热源干燥稻谷是减少贮存损失的重要

手段,其干燥过程的高效优质对稻谷品质有着重要的现实意义^[4-8]。稻谷受上述不同热源干燥,其干燥过程的成分及其胚体品质形成与玻璃态转变相关^[3-7],但因目前研究尚少,就稻谷热风、微波干燥

收稿日期: 2014-10-10 修回日期: 2014-11-30

* 国家自然科学基金资助项目(31071583,31371871)

作者简介: 徐凤英,副教授,主要从事农产品加工品质及其智能装备技术研究,E-mail: xu_fy@scau.edu.cn

而言,仍存在能量高效利用与品质改善协同难以控制的问题。

近年来,一些研究者基于稻谷理化品质测定,开展了谷物近红外检测研究^[9-10],为稻谷的物态转变与综合品质形成创造了条件。针对稻谷等干燥过程的玻璃态力学转变机理^[11],李栋等基于差示扫描量热技术^[1,12-15]建立了稻谷热风干燥玻璃态转变温度随含水率梯度变化模型^[1,12],刘木华等进一步分析了稻谷成分品质与其食味品质、发芽率的关联性^[3-7,11];为深入揭示辐射干燥热源、工艺条件与物料玻璃态转变间的关联作用,Cnossen 等开展了物料在红外辐射作用下的玻璃态转变特性研究^[7,16]。上述研究为揭示稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变研究提供了较大帮助,但这些研究均未连贯性研究新收稻谷受热风、微波不同热源干燥时的去水性能、干燥后品质与其玻璃化转变间的关联性,故尚难揭示制约稻谷热风、微波干燥高效优质协同的内在机理。本文通过函数拟合、近红外检测及发芽率测定,研究稻谷热风、微波干燥的去水性能及其蛋白质、直链淀粉含量及出芽品质;结合 TG/DSC 测试,探讨经热风、微波干燥稻谷的玻璃化转变对其干燥后品质的影响。

1 试验材料与测试方法

1.1 供试材料

供试稻谷产于广州市华南农业大学的校农场实验田,为新采收的培杂泰丰籼稻含茎秆谷,经实验室手工脱粒并扬风除杂后,得其鲜稻谷并置于 4℃ 环境存放,供后期试验测定。

1.2 干燥试验装置与试验过程

采用 DHG 070B 型电热鼓风干燥箱(上海安亭科学仪器有限公司)进行稻谷热风干燥及绝干水分测试,稻谷热风干燥温度及风速分别为 50℃ 及 3.1 m/s。绝干水分测试温度为 105℃,干燥时间为 24 h。微波干燥稻谷在自行改制的 P70F23P-G5(SO)型(格兰仕公司)微波装置中完成,该装置的加热/缓苏时间为 1 min/1 min,干燥功率为 166 W,装置结构如图 1 所示。

稻谷在微波干燥时可随干燥装置内的托盘转动。鲜稻谷及其热风、微波干燥过程样品的品质成分检测由 Foss Infratec 1241 Analyzer 近红外快速谷物分析仪(丹麦 FOSS 公司)测定,其热重损失、热流随温度的变化均由 TG/DSC 综合热分析仪 STA449C(德国耐驰 NETZSCH 仪器公司)测取。鲜稻谷及其热风、微波干燥样品的发芽率测定则在 RXZ-280B 型智能人工气候箱(宁波江南仪器厂)中发芽计数

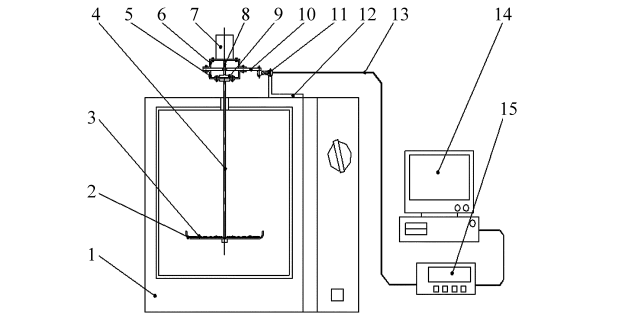


图 1 微波干燥装置示意图

Fig. 1 Schematic of microwave drying equipment

1. 微波炉 2. 托盘 3. 稻谷 4. 转轴 5. 下托架 6. 上托架
7. 电动机 8. 联轴套 9. 轴承 10. 支撑板 11. 称量传感器
12. 支架 13. 传感器电缆 14. 计算机 15. 质量变送器

后获得,智能人工气候箱的发芽温度为恒温 30℃、相对湿度 80%。热风、微波干燥过程的稻谷质量由 JJ1000 型电子天平(美国双杰兄弟公司)称量完成。

稻谷热风、微波干燥的去水性能测定,均分别按等时长 120 min 及检测时间 2 min,分别获得干燥中间段、结束段样品组。鲜稻谷及热风、微波干燥各实验组除 TG/DSC 试验不重复测定外,其余各试验测定均重复 3 次。试验样品的谷粒数由自动数粒仪 PME-1 型(上海珊科仪器厂)按 1 000 粒计数。鲜稻谷及其热风、微波干燥中间段和结束段样品组名后缀加 m、d 分别表示其热重损失及热流变化,干燥过程试验样品名如表 1 所示。

表 1 热风微波干燥试验样品名

Tab. 1 Sample name of two drying methods

类型	鲜稻谷	干燥方式			
		热风		微波	
		中间段	结束段	中间段	结束段
加热时间/min	0	240	600	240	600
样品组	XG	HX1	HX2	WB1	WB2
子样品	XG11	HX11	HX21	WB11	WB21
	XG12	HX12	HX22	WB12	WB22
	XG13	HX13	HX23	WB13	WB23
热重样品	XGm	HX1m	HX2m	WB1m	WB2m
热流样品	XGd	HX1d	HX2d	WB1d	WB2d

对鲜稻谷及其不同热源干燥的中间段、结束段样品组进行近红外谷物成分重复检测后,分别称取上述各样品组稻谷 1 g,低温旋风粉碎过 60 目筛网,制成粉样装瓶密封,加入经蓝宝石基线测定的综合热分析仪中,由 25℃ 以 1℃/min 速率升温至 120℃,获得各稻谷样品组的热重损失及热流变化。同时,另取经红外检测的鲜稻谷及其热风、微波干燥结束段样品组各 500 粒重复样,经除青、浸泡 24 h 后,分别装于可局部换气的塑料杯皿并放至恒温恒湿装置中,经 5 d 存放出芽,分别计数统计各样品组的发芽率。

2 结果与分析

2.1 干燥过程分析

基于稻谷热风、微波干燥结束段样品组各重复的过程失水质量测定及其数据处理,可得到稻谷热风、微波干燥含水率分时过程变化,如图 2 所示。

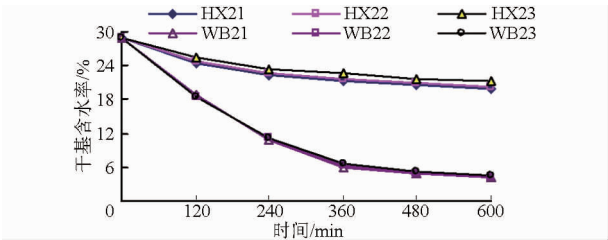


图 2 稻谷热风、微波干燥含水率分时过程变化
Fig.2 Curve of rice moisture content changes in rice during hot air and microwave drying

由图 2 可知,稻谷进行热风、微波干燥,其各重复样的去水速率相近,且干燥初期含水率下降速度快于后期,随干燥时间的增加去水动力减弱且以热风干燥尤为明显。热风干燥稻谷各重复样品的分时过程去水速率均显著低于其微波干燥去水速率,这可能是由于稻谷内部水分、蛋白质、直链淀粉等受热风、微波不同热源作用,其传质传递与其颗粒体多层结构耦合效果不同,引起其颗粒体干燥过程中的热质传递阻力不同所致。以热风干燥稻谷,其颗粒体主要以对流、热传导等方式进行传热,各颗粒体因与干燥介质存在温差而逐步升温,并向内部传导,促使其内部水分蒸发。干燥初期,各颗粒体从外向内的温差动力大,整体去水速率较大;但随着干燥进行,各颗粒体受其多层结构热质传递阻力增大及蒸发截面积减小影响,去水速率缓速下降。但稻谷微波干燥,其颗粒体受到强高频介电作用,不仅增快了内部水分升温、蒸发速度,而且减轻了外载热能输入对其外层谷壳孔隙结构的缩变影响。

稻谷微波干燥的去水性能也与其颗粒体内部的水分、蛋白质、直链淀粉等的介电系数相关,水的介电系数较其蛋白质、直链淀粉相应系数大。稻谷微波干燥时,其各颗粒内部水分可较好地选择性吸收微波能^[3,6],推动水分较快速蒸发,因而稻谷微波干燥可较其热风干燥具有更好的干燥过程热力强化作用^[4,6,8],微波干燥去水速率较热风干燥快。随着干燥过程进行,稻谷微波干燥过程颗粒体的蒸发截面积减少,这类似于热风干燥,该干燥过程也有前急后缓趋势。

为进一步量化比较稻谷热风、微波干燥的去水速率差异,本文应用 Excel 软件,分别对图 2 所示 2 种热源干燥稻谷的结束段组成样品重复进行基于含

水率与时间的对数函数、指数函数的最小二乘拟合^[3-5,17]。稻谷热风、微波干燥含水率与时间的对数函数、指数函数拟合方程分别为

$$\ln Y_M = C_M - k_M t \tag{1}$$

$$Y_M = C_M e^{-k_M t} \tag{2}$$

式中 $Y_M、C_M$ ——干基含水率的当前值、系数值,%
 k_M ——时间影响系数, s^{-1}
 t ——时间,s

应用式(1)~(2)对图 2 分别进行数据处理,可获得稻谷热风、微波干燥过程含水率与时间的最小二乘拟合系数 $C_M、k_M$ 及其拟合决定系数 R^2 ,如表 2 所示。

表 2 热风、微波干燥稻谷的对数、指数函数拟合系数及决定系数

Tab.2 Fitting coefficients and determination coefficients of logarithmic function and exponential function by hot air and microwave drying for rice						
干燥方式	对数函数			指数函数		
	C_M	k_M	R^2	C_M	k_M	R^2
HX21	22.35	-2.84	0.99	22.70	-0.05	0.91
HX22	22.27	-3.18	0.99	22.64	-0.05	0.90
HX23	22.21	-3.32	0.98	22.58	-0.06	0.88
WB21	22.54	-11.03	0.98	30.48	-0.36	0.96
WB22	22.52	-10.94	0.99	30.64	-0.36	0.97
WB23	22.41	-10.77	0.99	29.96	-0.35	0.97

由表 2 可知,稻谷热风、微波干燥对数、指数函数拟合方程的含水率与时间最小二乘拟合系数 $C_M、k_M$ 及拟合决定系数 R^2 不同。以对数函数拟合 2 种热源干燥稻谷的准确度高,二者拟合方程的 C_M 较为接近,且 R^2 均大于 0.95,但 k_M 相差较大;采用指数模型拟合稻谷热风、微波干燥的 $C_M、k_M$ 均有差异, R^2 也较低,且稻谷热风干燥的 R^2 均小于 0.95。该结果表明以对数拟合稻谷去水过程准确度高,能与稻谷实际去水过程较好匹配,该结果与物料受其他辐射热源干燥的拟合效果也可较好对应^[17]。因稻谷在受不同热源干燥时,其颗粒体表面及内部受到不同热力作用,这不仅推动了其内部去水过程,也使颗粒体内部组织成分及品质发生改变,这对稻谷种胚发芽品质及玻璃化转变性能会产生影响,需进一步分析。

2.2 稻谷热风、微波干燥近红外品质成分比较

对鲜稻谷及其热风、微波干燥过程的中间段、结束段组成样品重复进行蛋白质、直链淀粉成分含量及含水率的 SPSS 单因素方差分析,经 Duncan 法的两两比较^[17],可获得稻谷热风、微波干燥过程品质成分的最小二乘均值与方差值,结果如表 3 所示。

表 3 稻谷热风、微波干燥过程主成分均值与方差

Tab.3 Mean values and variance values of principal component during hot air and microwave drying of rice %

时间/ min	热风干燥			微波干燥		
	干基含水率	蛋白质质量分数	直链淀粉质量分数	干基含水率	蛋白质质量分数	直链淀粉质量分数
0	29.09 ± 0.19 ^c	12.33 ± 0.08 ^a	9.90 ± 0.36	29.09 ± 0.19 ^c	12.33 ± 0.08	9.90 ± 0.36
240	22.78 ± 0.19 ^b	12.68 ± 0.13 ^b	9.78 ± 0.30	10.86 ± 1.88 ^b	12.12 ± 0.18	9.02 ± 0.31
600	20.42 ± 0.63 ^a	12.60 ± 0.09 ^b	9.92 ± 0.55	4.31 ± 0.11 ^a	12.35 ± 0.10	9.93 ± 0.60

注:同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同。

由表 3 可知,培杂泰丰鲜稻谷及其热风、微波干燥中间段、结束段样品组的蛋白质质量分数均值介于 12.12% ~ 12.68% 区间,其直链淀粉质量分数均值居于 9.02% ~ 9.93% 区间,该结果与刘建学等检测的粳稻谷含水率与蛋白质、直链淀粉含量的变化相吻合^[3,9-10]。随稻谷干燥过程含水率的显著下降,热风、微波稻谷含水率与蛋白质、直链淀粉含量在干燥过程的均值仅小幅改变,但差异不显著。经热风干燥后的稻谷,蛋白质含量较其鲜稻谷则发生明显变化。

这说明稻谷经热风、微波干燥不仅去除了其各颗粒体内部水分,而且对其内部胚乳、胚芽组织性能产生了较为明显的作用,促使其颗粒体内部组织的结构变化,并致使其胚芽组织蛋白质含量发生结构

改变,对其种胚的发芽品质、稻谷干燥加工后的食味品质产生了影响,对比周继成等得出的稻谷低功率、长时间干燥时的蛋白质变化小的结论,本研究测得结果可与其较好对应^[4]。与蛋白质检测结果相近,本试验测得的培杂泰丰稻谷直链淀粉检测含量处于杂交粳稻低直链淀粉含量、品质区间内,与蔡雪梅等的粳稻品质研究结果可较好对应^[3,9-10]。

2.3 热风、微波干燥稻谷发芽率比较

应用 SPSS 单因素方差分析,本文以 Duncan 法进行鲜稻谷及其热风、微波干燥结束段各组成样品发芽率的两两比较^[17],可得到其干燥结束段样品组的发芽品质与其品质成分间的最小二乘均值及标准差,如表 4 所示。

表 4 热风、微波干燥稻谷发芽率均值与标准差

Tab.4 Mean value and standard deviation of rice germination ratio by hot air and microwave drying

样品名称	干燥时间/min	发芽率	品质成分		
			干基含水率/%	蛋白质质量分数/%	直链淀粉质量分数/%
XG	0	0.65 ± 0.19 ^a	29.09 ± 0.19 ^c	12.33 ± 0.08 ^a	9.90 ± 0.36
HX2	600	0.93 ± 0.03 ^c	20.42 ± 0.63 ^b	12.60 ± 0.09 ^b	9.92 ± 0.55
WB2	600	0.77 ± 0.02 ^b	4.31 ± 0.11 ^a	12.35 ± 0.10 ^b	9.93 ± 0.60

由表 4 可知,鲜稻谷及其热风、微波干燥结束段样品组的发芽率与其品质成分间有较好的关联。热风、微波干燥稻谷的含水率、发芽率与其鲜稻谷相应值的差异均显著。随着上述 2 种热源干燥过程稻谷含水率的降低,其干燥后的发芽率均较鲜稻谷高。采用 50℃ 的长时间低温热风干燥稻谷,其干燥后的发芽率可高达 0.93 ± 0.03,微波干燥后稻谷的发芽率亦达 0.77 ± 0.02,高于鲜谷 0.65 ± 0.19 的发芽率。上述不同热源干燥稻谷的发芽率变化与已有研究的稻谷发芽率相吻合^[18-20],也与傅荣兴等^[21]长时间低功率微波处理提高稻谷种胚活力的研究结果相近。上述研究结果表明以低热流密度干燥稻谷对其发芽率影响小,干燥过程的适度缓苏也可防止其内部品质突变。稻谷以不同热源干燥,其颗粒体的胚乳、胚芽品质变化与其输入热流密度及其玻璃化转变相关,这不同程度地影响其整体品质形成,因此需要进一步研究其干燥过程的玻璃化转变性能。

2.4 稻谷热风、微波干燥玻璃化转变性能

对鲜稻谷及其热风、微波干燥中间段、结束段样品组进行 TG/DSC 热重、差示扫描量热数据处理,可分别得到上述 2 种热源干燥稻谷的热重损失、热流温升变化,如图 3 所示。

由图 3 可知,在 TG/DSC 过程中,鲜稻谷及其热风、微波干燥不同含水率稻谷的热重损失均随温度升高而增大,并随鲜稻谷干燥时间的增加而降序排列。与二者的热流变化趋势不同,已热风干燥稻谷结束段样品的热流持续增大,与其鲜稻谷及中间段干燥样品热流先增加后减少变化不同,该趋势与微波干燥的热流温升的依序波动降低也不同。

应用 NETZCH Proteus 热分析软件,对图 3 所示热风、微波干燥稻谷中间段、结束段样品组的热流值分别进行一阶微分处理,可得到热风、微波干燥不同含水率稻谷在玻璃化转变时的起点温度、中点温度、拐点温度、终点温度、比热,如表 5 所示。

由表 5 可知,稻谷玻璃化转变时的始点温度、中

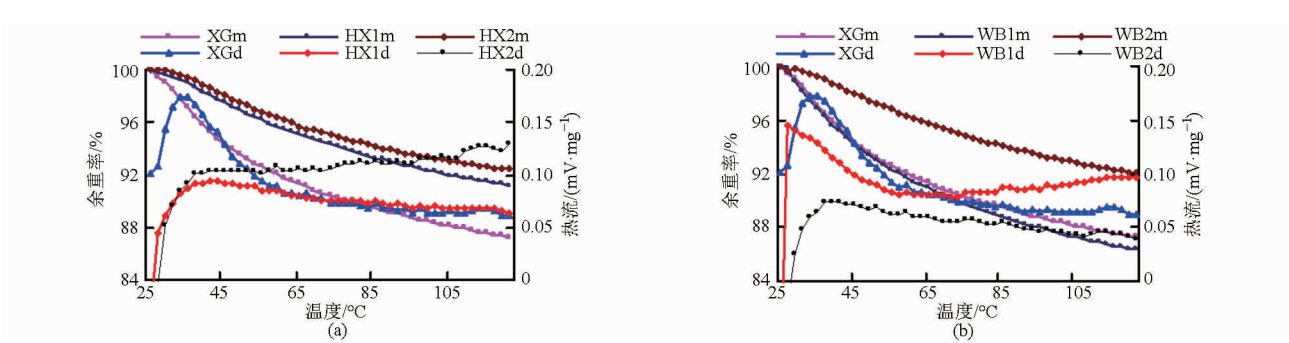


图 3 稻谷热风、微波干燥不同含水率稻谷的热重损失与热流温度变化

Fig. 3 Curve of thermal mass loss and heat flow temperature with different rice moisture contents by hot air and microwave drying
(a) 热风干燥 (b) 微波干燥

表 5 鲜稻谷及其热风、微波干燥谷玻璃化转变参数比较

Tab.5 Comparison of glass transition parameters for fresh rice and dried rice by hot air and microwave drying

参数	XG	HX1	HX2	WB1	WB2
干基含水率/%	29.09	22.78	20.42	29.09	10.86
起点温度/℃	68.70	49.50	41.80	49.60	38.90
中点温度/℃	68.80	50.70	42.50	50.40	44.60
拐点温度/℃	69.00	51.90	45.60	50.90	52.00
终点温度/℃	69.50	52.10	45.90	51.10	52.40
比热/(J·(g·K) ⁻¹)	0.35	0.21	0.10	0.24	0.16

点温度、拐点温度、终点温度、比热均随鲜稻谷及其已干燥稻谷的含水率降低而变化。随着已干燥稻谷含水率的下降,其玻璃化转变的始点温度、中点温度、比热均下降,且热风干燥稻谷的拐点温度及其终点温度也随其含水率下降而降低。但微波干燥不同含水率稻谷的拐点温度、终点温度相反,并随已微波干燥稻谷含水率降低而小幅增大。热风干燥不同含水率稻谷的最大热流变化随已干燥稻谷的含水率降低而下降,与微波干燥相反。本文研究得到的热风、微波干燥稻谷的中点温度随已干燥稻谷含水率的降低而减小,变化趋势相同,该结果与李栋等^[12]得出的热风干燥稻米含水率下降引起的中点温度变化一致,并与物料红外干燥后的玻璃化转变温度随含水率变化趋势相对应^[16]。以上结果说明稻谷热风、微波干燥玻璃化转变的品质成分及种胚发芽性能存在着热力作用品质转变的内在关联。

根据以上结果,为综合提升稻谷热风、微波干燥效能与品质,建议稻谷综合优化干燥工艺可在干燥初期采用低热值、大风量进行热风干燥^[8],以保障种胚发芽品质;而在其干燥后期,则宜进行低功率加缓苏的微波介电干燥,以增强稻谷降速干燥时段的

去水性能,并维持其干燥后的综合品质。本研究结果可为谷物高效优质干燥提供参考。

3 结论

(1) 热风、微波两种不同热源干燥稻谷的传热差异显著影响稻谷的去水性能,微波干燥去水速率显著快于热风干燥。稻谷热风、微波干燥的去水过程以对数函数拟合较指数函数拟合精度高,其拟合决定系数 R^2 均高于 0.95。

(2) 稻谷热风、微波干燥过程的蛋白质、直链淀粉质量分数分别居于 12.33% ~ 12.68% 和 9.02% ~ 9.33% 之间。2 种热源分别干燥的稻谷含水率、蛋白质、直链淀粉含量存在过程时段变化,但蛋白质、直链淀粉含量过程时段差异不显著,且已热风干燥稻谷的蛋白质较鲜稻谷差异明显。

(3) 稻谷热风、微波干燥,其发芽率受其玻璃化转变及蛋白质、直链淀粉含量影响。已热风干燥稻谷的蛋白质含量变化利于其种胚发芽率提升,达 0.93 ± 0.03 ,发芽率高于稻谷在低功率、长时间微波干燥下获得的 0.77 ± 0.02 发芽率,二者发芽率均高于鲜谷发芽率 0.65 ± 0.19 。

(4) 热风、微波 2 种热源干燥稻谷,其热重损失均随温度升高而增大,与其热流温升变化不同;其玻璃化转变时的中点温度、比热均随含水率下降而降低。

(5) 基于稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变工艺分析,建议综合提升稻谷干燥效能与品质的工艺宜在干燥初期采用低温大风量的热风干燥,以保证稻谷种胚干燥品质;但在其干燥后期,进行低功率加缓苏的微波介电干燥,以增强稻谷降速干燥时段的去水性能,并维持其干燥品质。

参 考 文 献

1 Buggenhout J, Brijs K, Celus I, et al. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 117(3): 304 – 315.

- 2 孟繁华, 吴贵茹, 陈坤杰. 稻谷干燥技术的研究进展[J]. 江西农业学报, 2009, 21(9): 131 – 134.
Meng Fanhua, Wu Guiru, Chen Kunjie. Research progress in drying technology of paddy[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(9): 131 – 134. (in Chinese)
- 3 蔡雪梅. 不同干燥方式对稻谷品质及储藏性能的影响[D]. 南京: 南京财经大学, 2013.
Cai Xuemei. The impact of different drying methods on rice quality and storage performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2013. (in Chinese)
- 4 周继成, 张习军, 王莲, 等. 微波处理对几种粮食品质影响的比较研究[J]. 粮食与饲料工业, 2008(9): 5 – 7.
Zhou Jicheng, Zhang Xijun, Wang Lian, et al. A comparison study on effects of microwave treatment on quality of several species of grain[J]. Cereal & Feed Industry, 2008(9): 5 – 7. (in Chinese)
- 5 郑铁松, 周瑞芳, 龚院生, 等. 微波处理对稻米酶活力及品质的影响[J]. 郑州粮食学院学报, 1996, 17(1): 1 – 5.
Zheng Tiesong, Zhou Ruifang, Gong Yuansheng, et al. Influence of microwave treatment on enzyme activities and quality of rice [J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1996, 17(1): 1 – 5. (in Chinese)
- 6 张习军, 熊善柏, 赵思明. 微波处理对稻谷品质的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 224 – 229.
Zhang Xijun, Xiong Shanbai, Zhao Siming. Effect of microwave on paddy quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 224 – 229. (in Chinese)
- 7 Aquerreta J, Iguaz A, Arroqui C, et al. Effect of high temperature intermittent drying and tempering on rough rice quality[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 611 – 618.
- 8 李长友, 张烨, 麦智炜. 高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 231 – 235.
Li Changyou, Zhang Ye, Mai Zhiwei. Design and experiment of dryer for high moisture grain storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 231 – 235. (in Chinese)
- 9 俞法明, 陆艳婷, 严文潮, 等. 用近红外光谱技术快速测定籼稻品种的蛋白质含量[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(5): 134 – 138.
Yu Faming, Lu Yanting, Yan Wenchao, et al. Rapid determination of protein content in long grain rice by near infrared spectroscopy[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(5): 134 – 138. (in Chinese)
- 10 刘建学, 吴守一, 方如明. 基于近红外光谱的神经网络预测大米直链淀粉含量[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 55 – 57.
Liu Jianxue, Wu Shouyi, Fang Ruming. Determination of apparent amylose content in rice by neural networks based on near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 55 – 57. (in Chinese)
- 11 刘木华, 吴颜红, 曾一凡, 等. 基于玻璃化转变的稻谷爆腰产生机理分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 30 – 33.
Liu Muhua, Wu Yanhong, Zeng Yifan, et al. Fissure formation in rice kernel based on glass transition theory[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 30 – 33. (in Chinese)
- 12 李栋. 稻谷干燥应力裂纹生成扩展及抑制的试验研究和机理分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
Li Dong. Experimental study on the development and control of stress cracks of rough rice in drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- 13 Xu Congcong, Li Yunfei, Yu Huaning. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 136: 42 – 47.
- 14 Liu Y, Bhandari B, Zhou W. Study of glass transition and enthalpy relaxation of mixtures of amorphous sucrose and amorphous tapioca starch syrup solid by differential scanning calorimetry (DSC) [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(3): 599 – 610.
- 15 Ruiz-Cabrera M A, Schmidt S J. Determination of glass transition temperatures during cooling and heating of low-moisture amorphous sugar mixtures[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 36 – 43.
- 16 Cnossen A G, Siebermorgen T J. Glass transition temperature concept in rice drying and tempering effect on milling quality[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1661 – 1667.
- 17 徐凤英, 陈震, 李长友, 等. 荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙分形色变研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 222 – 227, 235.
Xu Fengying, Chen Zhen, Li Changyou, et al. Uniformity of moisture content, shell pore fractal and discoloration of litchi during infrared drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 222 – 227, 235. (in Chinese)
- 18 宋智萍, 韦善富, 王威豪, 等. 微波辐射对水稻种子萌芽的影响[J]. 中国种业, 2007(7): 40 – 42.
Song Zhiping, Wei Shanfu, Wang Weihao, et al. Effects of microwave irradiation on seed germination of rice[J]. China Seed Industry, 2007(7): 40 – 42. (in Chinese)
- 19 段晓明, 刘焕军, 吴红, 等. 微波处理水稻种子对水稻发芽率和产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2012, 37(1): 15 – 16.
Duan Xiaoming, Liu Huanjun, Wu Hong, et al. Effect of energy field particle stream on seed germination and yield of rice[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2012, 37(1): 15 – 16. (in Chinese)
- 20 Veluppillai S, Nithyanantharajah K, Vasantharuba S, et al. Biochemical changes associated with germinating rice grains and germination improvement[J]. Rice Science, 2009, 16(3): 240 – 242.
- 21 傅荣兴, 鲍正发, 方欣. 微波处理对水稻种子生理的影响[J]. 种子, 1994(6): 67 – 68.