

秋季稻谷热泵变风速干燥及干燥箱焓分析

Analysis on drying box exergy and variable air velocity drying of autumn rice

赵锡和^{1,2} 龙成树^{1,2} 张进疆^{1,2} 刘清化^{1,2} 龚 丽^{1,2}

ZHAO Xi-he^{1,2} LONG Cheng-shu^{1,2} ZHANG Jin-jiang^{1,2} LIU Qing-hua^{1,2} GONG Li^{1,2}
(1. 广东省现代农业装备研究所, 广东 广州 510630; 2. 广东省农产品干燥加工工程重点实验室, 广东 广州 510630)

(1. Guangdong Agricultural Machinery Research Institute, Guangzhou, Guangdong 510630, China;

2. Food Science College of South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510630, China)

摘要:为解决秋季稻谷热泵干燥中温升难的问题,设计两个低温恒风速与变风速干燥试验方案,并对干燥箱稻谷脱水过程进行了总能耗比较和焓分析。结果表明:恒风速干燥过程中干燥速率随风速和温度的增大而增大,焓效率随风速的增大而减少。相同温度条件下变风速分程干燥,比恒风速干燥总能耗低,比大风速干燥焓效率值大,比小风速干燥消耗时间短。试验得到最优参数为前 7 h 风速为 0.7 m/s、后程风速为 0.4 m/s,当温度为 45 ℃ 和 55 ℃ 时干燥的焓效率分别为 44.05% 和 57.49%,对南方秋季稻谷干燥具有一定指导意义。

关键词:热泵;稻谷;梯度干燥;焓分析

Abstract: In order to solve the problem of temperature rise in heat pump drying rice in autumn. Two drying test scheme were been set, for the low temperature constant rate drying and variable wind speed drying. Both the total energy consumption and exergy analysis were been taken comparison of the drying process of rice. Experimental results show that the drying rate increases with wind speed and temperature go up in constant speed drying process. However, both the exergy efficiency and total energy consumption decrease with the increase of the wind speed. The total energy consumption of the variable wind speed drying is lower than that of the big constant wind speed experience groups. And the drying time is shorter than the small constant wind speed groups under the same temperature condition. The optimal parameters are obtained by experiment is that the first 7 hours the wind speed is 0.7 m/s, then 0.4 m/s. When the temperature is 45 ℃, the exergy efficiency is 44.05% and the temperature in 55 ℃ is 57.49%. It has a certain guiding significance for

rice drying in southern china.

Keywords: heat pump; paddy; stage drying; exergy efficiency

稻谷是一种热敏性作物,适宜于低温环境循环干燥,而热泵干燥机是一种高效节能的稻谷干燥设备^[1-2]。胡连营^[3]研究了可再生能源与热泵的关系,指出热泵是利用可再生能源低温热最有效的方式。徐建国等^[4-6]用搅拌式-热泵穿流干燥仓干燥了新鲜稻谷,与自然晒干相比,热泵干燥能大量缩短干燥时间,较热风干燥相比,热泵干燥是一种温和的干燥方式,能获得较低的爆腰增值率且能耗低。近年来,回热热泵技术的应用将现有热泵干燥机节能效果提高了 16.6%,且干燥效率高达 95%^[7]。

21 世纪热泵技术发展迅猛,而有关热泵干燥技术能耗的研究大多数局限于能量利用中的“量”,而忽略了能量中的“质”的差别,即热泵干燥中焓分析的研究相对较少,仅陈志峰等^[8]研究了热泵干燥系统中各装置的焓损失和减少的途径。事实上,稻谷热泵烘干是一种温和的干燥方式,烘干稻谷的爆腰率低,而秋季稻谷收获季节的环境温度低,热泵性能系数 COP 降低^{[9]661-662},且全程采用大风速干燥,后期尾气余热逐渐增大造成能源的浪费。本试验拟采用分段变风速干燥方式,前阶段以提高风速的方式增大干燥速率,而干燥后期降低风速,以节约能耗和提高干燥效率,旨在研究秋季稻谷热泵干燥特性以及温度、风速对干燥箱稻谷脱水能耗的影响,并从焓效率的角度阐述干燥箱中能量的利用情况。

1 材料和方法

1.1 材料及设备

稻谷:秋季稻谷华航 31,含水率约为 28.5%,试验用量 10 kg/次,广东省清远市穗源农业有限公司。

1.2 设备与仪器

水分测定仪:MA150 型,德国赛多利斯集团;
风速测定仪:KA32L 型,沈阳加野科学仪器公司;
上皿电子天平:FA/JA 系列,上海天平仪器厂;

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划项目(编号:2012AA10A502);2012 年度省级现代农业科技提升专项资金(编号:2130106)

作者简介:赵锡和,男,广东省现代农业装备研究所教授级高工。
通讯作者:龙成树(1988—),男,广东省现代农业装备研究所工程师,硕士。E-mail: drylong261@163.com

收稿日期:2015—12—21

干湿温度计:272-A型,河间市重光温湿度仪表厂;

稻谷热泵干燥试验装置(见图1):温度30~65℃,相对湿度(RH)为40%~90%,风速为0~5 m/s,广东省现代农业装备研究所自制。试验装置主要由三部分组成:除湿干燥机、开式稻谷干燥箱、连接装置。干燥介质(空气)依次经过了除湿干燥机、连接装置、开式稻谷干燥箱再回到环境中。热泵除湿系统对干燥介质除湿加热,其变频器控制介质总流量,连接部件主要为PVC管(直径为105 mm)和接头,风量控制阀来改变各支路的风量,风速的检测应用KA32L型KANOMAX风速测定仪。管路及干燥箱外用(15 mm)保温材料,防止干燥介质传输过程中与外界环境传热。

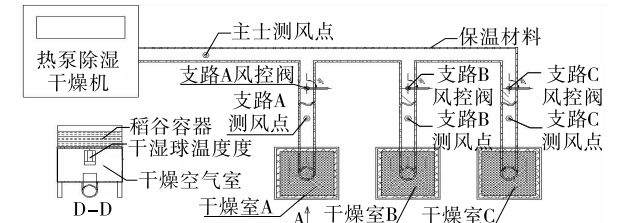


图1 稻谷热泵干燥试验装置

Figure 1 Experiment device of rice heat pump drying

1.3 试验方法

1.3.1 恒风速稻谷热泵干燥试验 选取温度为45,55℃,小风速组风速分别为0.3,0.4,0.5 m/s,大风风速组风速分别为0.6,0.7,0.8 m/s。用干湿球温度计测定环境相对湿度,做恒风速秋季稻谷热泵干燥试验,每1 h采集一次数据,至稻谷含水量降至14%,试验结束。

1.3.2 变风速分程稻谷热泵干燥试验 选取温度为45,55℃,前阶段风速为0.6,0.7,0.8 m/s,当稻谷含水降至18%以下时,将风速依次调节为0.3,0.4,0.5 m/s,至稻谷含水量降至14%,试验结束。

1.3.3 爆腰率的检测 有关研究^[10]表明机械化稻谷干燥,在干燥后24 h的缓苏过程中,由于稻谷重新吸湿爆腰率增长。取经过24 h缓苏的稻谷样品300颗,手工除去稻壳,在爆腰灯下观察稻谷颗粒是否有裂纹,记录有裂纹的以及非人为因素造成断粒数量,与稻谷样品数量相除,所得数据即为爆腰率。

1.4 干燥箱焓分析

由图2可知,干燥箱主要由储气室、干燥盘和锥体罩3部分组成。干燥介质由PVC管从储气室底部导入,充满整个腔体,然后穿过稻谷层进入环境中,形成一个开式干燥回路。干燥介质溢出稻谷层的过程中与稻谷颗粒传热传质,湿稻谷逐渐被干燥,用于稻谷除水所消耗的能量是稻谷干燥过程中的有用功。此外,为保证稻谷干燥均匀性,在每1 h称量稻谷失水重量后,将稻谷人工翻动搅匀。干湿球温度计3用来测量储气室的相对湿度,出口干湿计5用于测量尾气相对湿度。锥罩体6用于隔离环境,使稻谷上层与环境隔开,所测尾气焓值数据更准确。

稻谷热泵干燥除湿能耗按式(1)计算^{[9]62-64}:

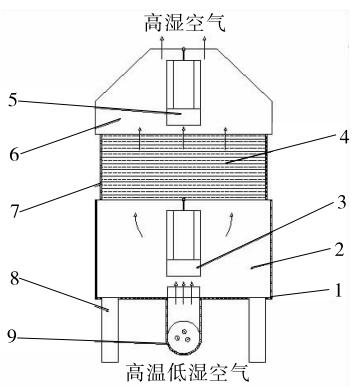
$$Q = m \times (h_1 - h_2) \times t, \tag{1}$$


图2 干燥箱结构图

Figure 2 Structure diagram drying box

式中:

Q ——稻谷热泵干燥除湿能耗,kJ;

h_1 ——进口高温低湿空气的焓值,kg/kJ;

h_2 ——出口尾气的焓值,kg/kJ;

t ——干燥耗时,h;

m ——单位时间进入储气室或者溢出谷层的空气质量,kg。

m 由空气密度(ρ ,kg/m³)和风量(μ ,m³·kg/h)决定,风量和风速成恒定正线性关系。每0.5 h记录一次干燥箱、尾气出口、环境中干湿温度计的干湿球温度,将该时刻的干球温度、湿球温度作为前0.5 h对应的平均干球温度和平均湿球温度,并通过查表法得到进口、出口的空气物理状态,最后采用累积法计算出总能耗。

干燥箱焓效率 η 按式(2)计算^[11-12]:

$$\eta = \frac{Q_{\text{输入}} - Q_{\text{输出}}}{Q_{\text{输入}}} \times 100\%, \tag{2}$$

式中:

η ——干燥箱焓效率,%。

输入和出口热量差越大,则转换为稻谷除湿热能越多,即稻谷干燥过程中焓效率越高。联立式(1),考虑到空气的密度 ρ 约为1.13 kg/m³,在温度为45~55℃变化较小且空气动能较小,均可忽略。

2 结果和分析

2.1 秋季稻谷热泵干燥结果及分析

2.1.1 恒风速稻谷干燥试验结果和分析 由图3可知,稻谷含水率随干燥时间的延长逐渐减少。温度为45℃,干燥稻谷质量为10 kg,小风速组0.3,0.4,0.5 m/s干燥耗时分别为18,23,>32 h。由图4可知,大风风速组0.6,0.7,0.8 m/s,3条干燥曲线间距较小,最终干燥总耗时为14,12,10 h,即随着风速的增大,干燥速率逐渐增大,但结合图4中最终水分含量值可知,当风速增加到0.7 m/s以后,风速对干燥速率的影响逐渐减少。

由图5、6可知,在55℃时,风速增大,干燥耗时逐渐减少,且随着风速的增加0.7 m/s之后,风速对干燥速率的

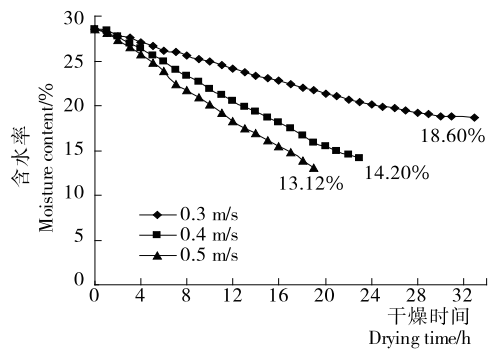


图 3 45 °C 小风速组稻谷热泵干燥曲线
Figure 3 Constant air drying rate curves of heat pump at 45 °C

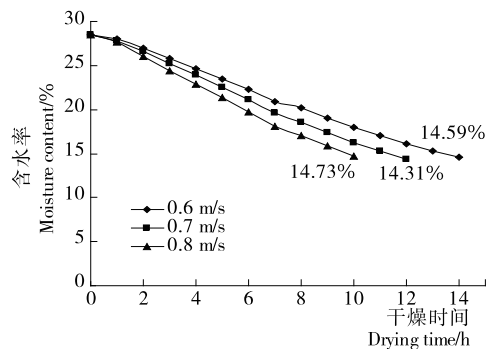


图 4 45 °C 大风速组稻谷热泵干燥曲线
Figure 4 Variable drying curves air of heat pump at 45 °C

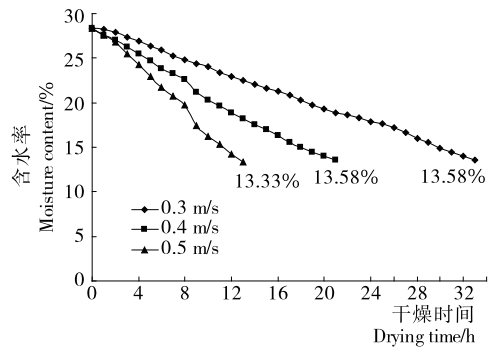


图 5 55 °C 小风速组稻谷热泵干燥曲线
Figure 5 Constant air drying rate curves of heat pump at 55 °C

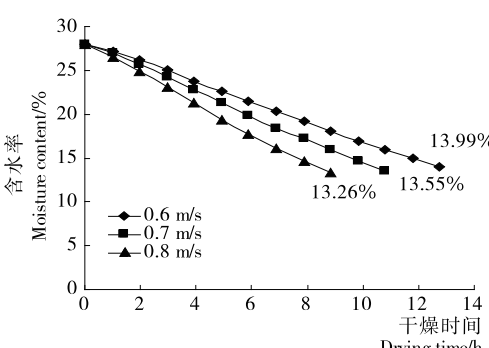


图 6 55 °C 大风速组稻谷热泵干燥曲线
Figure 6 Variable drying curves air of heat pump at 55 °C

影响变弱。与图 3、4 比较,温度升高干燥耗时减少,干燥速率增大。

由表 1 可知,随着温度和风速的增大干燥速率逐渐增大。由表 2 可知,由于风速因素对应 F 值(13.962) $>F$ 临界值(6.608),温度因素对应的 F 值(41.760) $>F$ 临界值(5.050),所以在置信水平因子 $\alpha=0.05$ 时,风速和温度对干燥速率影响显著。

表 1 恒温恒风速稻谷热泵干燥速率

Table 1 The heat pump drying rate of rice at constant wind speed and temperature (%/h)						
温度/ °C	小风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			大风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
45	0.31	0.62	0.81	0.99	1.18	1.38
55	0.45	0.74	1.19	1.12	1.25	1.69

表 2 恒温恒风速稻谷热泵干燥速率方差分析

Table 2 Analysis of constant wind speed and temperature of rice heat pump drying rate variance						
差异源	方差	自由度	均方差	F 值	P 值	F 临界值
温度	1.10E-05	1	1.09E-05	13.962	0.013 5	6.608
风速	1.638 8E-04	5	3.27E-05	41.760	0.000 4	5.050
误差	3.924E-06	5	7.84E-07			
总计	1.787 7E-04	11				

综上可知,干燥速率受温度和风速的双重影响,随温度的升高干燥速率增大,随着风速的增加干燥总耗时先大幅度缩短,随之缩减幅度逐渐减少,当风速为 0.7 m/s 左右时干燥速率随风速的增长较少。因为温度升高直接提高了空气介质的进口焓值,用于湿稻谷升温和水蒸发分的热量增加,干燥速率增大,但是温度太高将导致稻谷的爆腰率增加;风速的增大,单位时间内用于稻谷干燥除湿即空气介质的量增加,但是由于用于试验的稻谷用量有限,因此当空气介质的量达到一定值时,干燥速率并不继续增大,且风速增加将引起烟效率的降低。

2.1.2 变风速稻谷干燥试验结果和分析 图 7、8 采用热泵变风速分程干燥稻谷,前阶段由于稻谷水分含量高,采用大风量干燥,经过 7 h 干燥后,稻谷水分含量从 28.5% 降至 18% 左右时,改用小风速干燥至稻谷水分含量达 14% 以下。由图 7、8 可知,温度越高干燥耗时越短,变风速干燥比恒风速干燥中的小风速干燥方式耗时减少,与恒风速干燥中的大风速干燥方式耗时相差较小。稻谷作为热敏性作物干燥速率不宜过快,一般要求降水速率不超过 1.5 %/h^[5]。干燥前期稻谷水分含量高,韧性较好,抗爆腰能力强,而变风速干燥的后期采用小风速缓和干燥方式,所以变风速干燥方式的稻谷爆腰率较低。此外,变风速干燥方式能提高热量的利用效率。

事实上,秋季稻谷热泵干燥,由于环境温度的降低,热泵吸收环境热量减少,温度上升比较困难。提高压缩机的功

率,增大制冷量能够提升温度,但是压缩机的功率够大导致其使用寿命缩短,同时还会造成蒸发器处结霜。大风速干燥,变频风机的功率增加,且干燥后期物料水分含量逐渐减少,总体干燥效率较低。采用变风速分程干燥,能较好保证干燥品质,提高干燥速率和烟效率。

2.1.3 稻谷爆腰率结果和分析 由表 3 可知,恒风速干燥,温度为 45 ℃ 和 55 ℃ 时,爆腰率随风速的增大增减变化规律

不明显,但是整体爆腰率均未超过 3%;相同风速下,55 ℃ 的爆腰率比 45 ℃ 的大;恒温变风速干燥试验中,55 ℃ 的爆腰率比 45 ℃ 的高(0.7+0.4) m/s 组的爆腰率较低。

综上所述,爆腰率随着温度升高而增大;风速为 0.3~0.8 m/s 时,爆腰率未呈现单调变化趋势,但是温度为 45 ℃ 和 55 ℃ 时,干燥后稻谷的爆腰率均未超过 3%,因此爆腰增值率小于 3%,符合 GB 8876—88 标准要求。

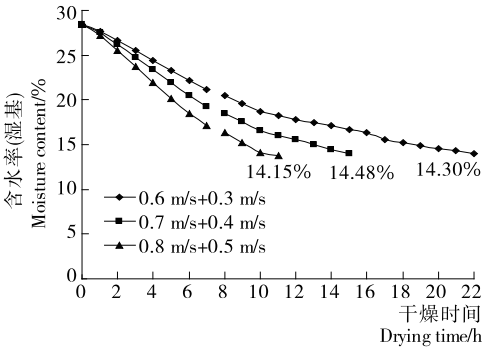


图 7 45 ℃ 变风速稻谷热泵干燥曲线

Figure 7 Variable speed drying rice curves of heat pump at 45 ℃

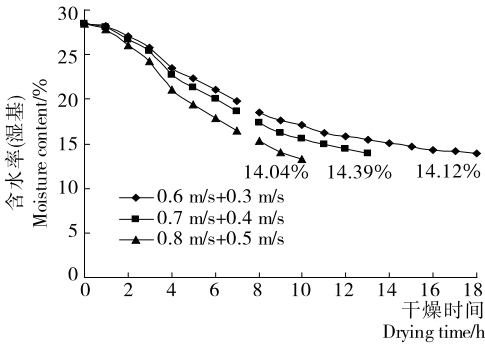


图 8 55 ℃ 变风速稻谷热泵干燥曲线

Figure 8 Variable speed drying rice curves of heat pump at 55 ℃

表 3 稻谷热泵干燥爆腰率检测

Table 3 Detection of rice burst waist of heat pump drying

%

温度/ ℃	恒风速干燥/(m·s ⁻¹)						变风速干燥/(m·s ⁻¹)		
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.6+0.3	0.7+0.4	0.8+0.5
45	0.67	1.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.67	0.00	1.33
55	1.33	2.00	3.00	2.33	0.67	2.67	1.33	1.00	3.00

2.2 干燥箱烟分析

烟在不同的领域有着不同的含义,干燥过程中的烟即进风口焓值和出口焓值之差 ΔH 与通过干燥介质的流量乘积即为稻谷干燥的烟Q。出口焓值与环境焓值之差为焓损,与干燥介质流量乘积即为烟损 Q₁,烟效率按式(2)计算。图 9、10 表明,当温度为 45 ℃ 时,随风速增大,干燥过程中进口风量的总能耗波动很小,烟损随着风速的增大而逐渐增大,干燥箱烟效率先小幅度较低而后减小;温度升高至 55 ℃ 时,干燥过程总能耗和烟损呈现类似余弦波变化,在风速为

0.5 m/s 取得最小总能耗和最小烟损,烟效率先略降低而后随着风速的增大减小。

事实上,在干燥过程中一定质量的湿稻谷某一干燥温度下每一个时刻都对应一个最佳风量,恰好满足其表面水分的蒸发需求,当风量小于这个值时,表现为烟损值的几乎不变,当风量大于最佳风量时,表现为烟损值逐渐增大,烟效率增大。当风量一定时,温度升高,单位风量的热能增加,比低温烟损增大,但烟效率不一定减小,且稻谷为热敏性作物,温度升高将导致干燥稻谷的品质降低^[4,6]。

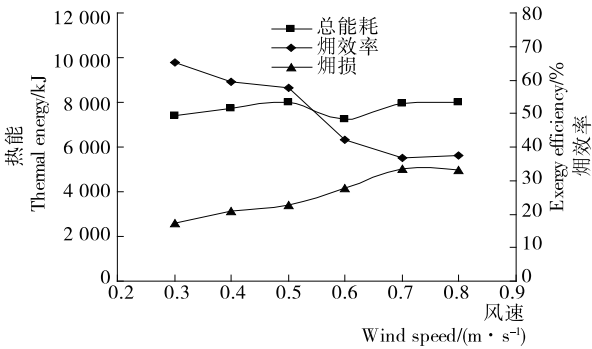


图 9 45 ℃ 恒风速稻谷热泵干燥能耗曲线

Figure 9 Energy consumption curves of heat pump drying rice at 45 ℃

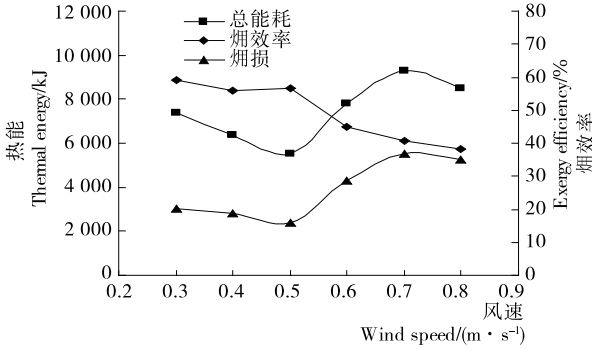


图 10 55 ℃ 恒风速稻谷热泵干燥能耗曲线

Figure 10 Energy consumption curves of heat pump drying rice at 55 ℃

因此,恒风速稻谷热泵干燥时,干燥的烟效率受温度和风速的双重影响,风速增大,烟效率逐渐降低;温度升高减缓了烟效率随风速增大而减少的幅度。低风速,干燥介质与湿稻谷接触传热的时间长,烟效率高。进口风量总能耗受温度、风量以及干燥耗时的影响,温度升高,稻谷升温时间缩短传热效率提高,适当增大风速,烟损保持不变,烟效率提高;风速增大干燥速率增大,干燥耗时减少,总能耗减少。综上,采用合适的风速能获得较高的烟效率且总能耗较少。

图 11、12 中,变风速热泵稻谷干燥试验,干燥前期采用大风速干燥,7 h 后稻谷含水率约降至 18%,调小风机频率,小风速干燥稻谷含水率至 14% 以下。结合图 9、10 分析知,变风速干燥比恒大风速干燥方式总能耗减少,烟效率提高;相对于小风速干燥方式干燥耗时缩短,干燥总能耗减少。温度从 45℃ 升高至 55℃ 烟效率提高,温度为 45℃ 和 55℃ 时,(0.7+0.4) m/s 组取得最佳烟效率,分别为 44.05% 和 57.49%,且平均干燥速率为 1.2%/h 左右,能保障稻谷的干燥品质^[9] 949—950。

综上所述,大风速干燥稻谷消耗总能耗和烟损大,小风速干燥稻谷虽然烟效率高,但是干燥速率太慢、耗时太长,干燥效率差。因此,秋季稻谷采用变风速热泵干燥,能提高干燥过程整体的烟效率和干燥速率,也能缓解稻谷热泵干燥机秋季稻谷干燥时温度难升高的困难。

3 结论

应用稻谷热泵干燥机,进行了恒风速秋季稻谷热泵与变

风速干燥试验,得到:恒风速稻谷热泵干燥,相同温度下,干燥速率随风速的增大而增大,但风速为 0.7 m/s 以上时,风速对干燥速率的影响较小;变风速干燥时干燥箱总能耗低于恒风速干燥,烟效率高,干燥总耗时小于小风速干燥方式。变风速干燥试验中烟效率最优的为 (0.7+0.4) m/s 组,且爆腰增值率符合 GB 8876—88 标准要求。

因此,秋季稻谷热泵干燥采用变风速干燥既能解决温升困难,而且能够节约干燥箱用于稻谷除湿的总能耗,对南方秋季稻谷热泵干燥工艺具有较大指导意义。

此外,由于干燥过程中变风速组别和温度值有限,后续试验可设计多个变量组,采用响应面等复杂试验设计得到更精确的工艺参数。

参考文献

[1] 吴苏喜,刘瑞兴,杨文凤,等. 低温循环式烘干机对南方高水分稻谷干燥的实践[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 192-194, 240.

[2] 罗乔军,张进疆,何琳,等. 空气源热泵谷物干燥的研究进展[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 228-233.

[3] 胡连营. 热泵技术与可再生能源的开发利用[J]. 可再生能源, 2007, 25(1): 95-97.

[4] 徐建国,徐刚,顾震,等. 低温热泵穿流干燥新鲜稻谷实验研究[J]. 食品工业科技, 2013(4): 228-231.

[5] 张艳来,尹凯丹,龙成树,等. 热泵技术在我国农产品干燥中的应用及展望[J]. 农机化研究, 2014(5): 1-7.

[6] 吴耀森,赵锡和,刘清化,等. 南方夏季稻谷热泵干燥特性研究[J]. 粮油加工: 电子版, 2014(1): 54-57.

[7] 张进疆,刘清化,吴耀森,等. 农产品干燥加工节能减排工艺及装备研发[J]. 干燥技术与设备, 2010, 8(1): 4-8.

[8] 陈志峰,闫泽生. 热泵干燥系统的烟分析[J]. 农机化研究, 2006 (7): 77-79.

[9] 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[10] 吴明亮,汤楚宙. 稻谷爆腰机理及影响因素研究进展[J]. 粮油加工, 2006(2): 60-63.

[11] TEEBOONMA U, TIANSUWAN J, SOPONRONNARIT S. Optimization of heat pump fruit dryers[J]. Journal of Food Engineering, 2003(59): 369-377.

[12] KAVAK Akpinar E. Energy and exergy analyses of drying of eggplant slices in a cyclone type dryer[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2003, 19(2): 692-703.

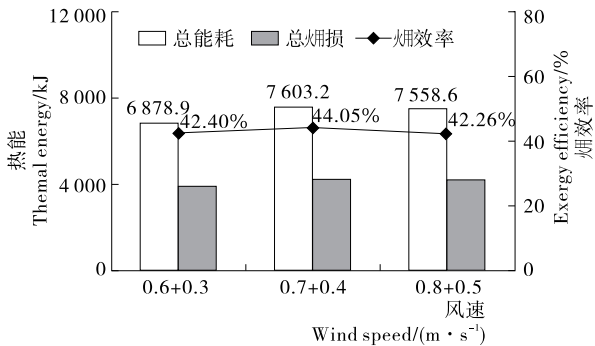


图 11 45℃ 变风速稻谷热泵干燥能耗曲线

Figure 11 The energy consumption curves of variable speed of heat pump drying rice at 45℃

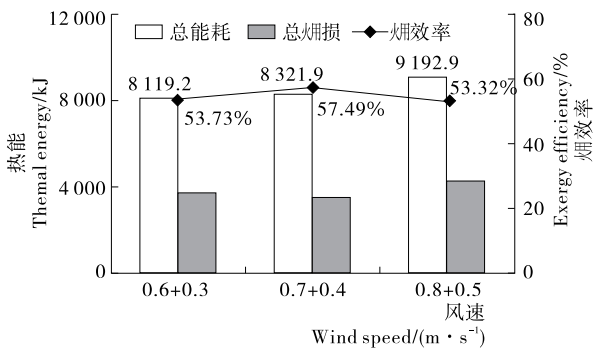


图 12 55℃ 变风速稻谷热泵干燥能耗曲线

Figure 12 The energy consumption curves of variable speed of heat pump drying rice at 55℃