

深床干燥工艺参数对稻谷干燥比能耗的影响

王丹阳¹, 李成华^{2*}, 佟玲¹, 杨玉芬¹, 张本华¹

(1.沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110161; 2.沈阳理工大学, 沈阳 110168)

摘要:利用深床干燥试验台优化稻谷深床干燥工艺参数,定义耗能新指标干燥比能耗,采用二次回归正交旋转组合设计试验,建立热风温度、表现风速和谷层厚度与干燥比能耗之间的数学模型,分析各因素的单效应与交互效应,确定干燥比能耗最优条件下工艺参数的优化组合为:热风温度 40℃,表现风速 0.45m·s⁻¹,谷层厚度 50cm;利用频数分析法进行优化,得到具有高概率保证的干燥比能耗低于 1000kJ·(kg·h)⁻¹ 的参数范围,即干燥热风温度为 43~50℃,表现风速为 0.49~0.57m·s⁻¹,谷层厚度为 35~44cm,为干燥节能和干燥设备的参数设计提供参考。

关键词:稻谷;深床干燥;比能耗;干燥参数;试验研究

中图分类号:S511;S226.6

文献标识码:A

文章编号:1000-1700(2008)05-0593-05

Influence of Drying Parameters on Efficiency Rate of Rice in a Deep Fixed-bed

WANG Dan-yang¹, LI Cheng-hua^{2*}, TONG Ling¹, YANG Yu-fen¹, ZHANG Ben-hua¹

(1.College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2.Shenyang University of Science and Technology, Shenyang 110168, China)

Abstract:Rice drying experiments were conducted in order to optimize the efficiency rate. A deep drying test bed was used in the experiments. In the study the effects of drying air temperature, drying air velocity and paddy thickness on the efficiency rate were investigated. The results were analyzed with orthogonal rotary regression method to establish the relationship between performance function and each parameter. Single factors and correlative effects on performance were also discussed based on the regression model, the optimum process parameters for efficiency rate were obtained as air temperature 40℃, drying air velocity 0.45 ms⁻¹ and paddy thickness 50cm. An optimum range under 95% probability of efficiency rate less than 1000kJ·(kg·h)⁻¹ could be summarized for drying air temperature 43~50℃, drying air velocity 0.49~0.57m·s⁻¹ and paddy thickness 35~44cm, respectively by frequency analytical method. The study provided useful formation for saving energy, the operation and adjustment of existing drying equipment.

Key words:paddy rice; deep fixed-bed drying; efficiency rate; drying parameters; experiment

干燥是稻谷加工中消耗能量较大的工序,在保证稻谷干燥后品质和提高干燥效率的同时,低能耗是保证稻谷加工具有经济竞争力的重要因素。能耗指标在整个干燥性能评价指标体系中所占权重最高^[1]。因此,研究稻谷干燥生产中的节能降耗具有重要的实际意义。

在以往谷物干燥研究中,评价能耗的指标并不统一,相关指标有十几种之多,如单位能耗、干燥机产量、小时水分蒸发量、干燥强度、干燥能力、小时标准煤消耗量、电耗、热耗、单位耗热量、单位耗能量等^[1-4,10,11]。这些指标均有不同侧重,而且有些指标的运用还存在歧义^[2]。鉴于此,在兼顾相关指标研究侧重点的基础上,本研究提出新的干燥能耗指标干燥比能耗,即为单位时间内干燥蒸发单位水分量的能耗,并针对稻谷深床干燥的比能耗进行试验和工艺参数优化,旨在寻求合理的评价指标来表达深床干燥生产与能耗间的内在联系和规律,为稻谷干燥机的节能设计与操作提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用稻谷品种为辽宁主产稻辽梗 294。由烘箱法测得稻谷的原始含水率为 12%~14%(wb)。试验前

收稿日期:2007-12-11

基金项目:辽宁省自然科学基金项目(20052121)

作者简介:王丹阳(1977-),女,沈阳农业大学讲师,博士研究生,从事农产品加工工程研究。*通讯作者 Corresponding author:李成华(1958-),男,沈阳理工大学教授,博士,从事机械设计及理论研究。

48h,将稻谷按各试验要求调制到要求水分后,用双层塑料袋密封,每隔3~4h翻动1次,以保证谷温与环境温度一致及其水分的平衡。试验时取样,用烘箱法测定稻谷含水率为23.6%(wb)

1.2 方法

试验在沈阳农业大学工程学院干燥实验室进行。环境温度9~11℃,相对湿度43%~52%。试验在以稻谷原始含水率、谷层厚度、热风温度、表现风速、缓苏时间为试验因素进行单因素试验后,选取主要影响因素热风温度、表现风速及谷层厚度,利用深床干燥试验台进行二次回归正交旋转试验^[5],以干燥比能耗为试验指标。试验过程中,每隔一定时间,用专用取样器和热电偶测量各层稻谷谷温及含水率,直至干燥筒顶层稻谷含水率低于14%(wb)停止试验。试验因素水平编码如表1。

表1 因素水平编码表

Table 1 Coding of factor level

x_j	X_1	X_2	X_3
试验因素	热风温度/℃	表现风速/m·s ⁻¹	谷层厚度/cm
Factor	Air temperature	Air velocity	Paddy thickness
+1.682	80	0.8	50
+1	72	0.73	40
0	60	0.63	30
-1	48	0.53	20
-1.682	40	0.45	15

1.3 能耗指标

试验总能耗由空气压缩机动力能耗和空气加热器能耗两部分构成。为便于分析工艺参数对稻谷干燥能耗的影响,只以稻谷干燥段研究干燥过程能耗。根据干燥工艺可知干燥段热力系为开口热力系统^[6,7]。按试验因素谷层厚度在编码空间的取值,将每次试验的干燥段分为3~5个稻谷层,根据试验过程中对每层热风温度及稻谷含水率的测定,确定各稻谷层在时间段上的耗能,试验总能耗即为各谷层能耗在干燥过程的累积和。根据热力学第一定律:

$$Q = \Delta E + \int_{(t)} (e_2 \delta m_2 - e_1 \delta m_1) + W$$

得:
$$\delta q = \delta h + \frac{\delta v^2}{2} + g \cdot \delta z + l_v (i=1, 2 \dots 4, 5) \tag{1}$$

式中: δq 为各谷层进出口热量之差(kJ·kg⁻¹); δh 为各谷层进出口空气焓之差(kJ·kg⁻¹); $\frac{\delta v^2}{2}$ 为各谷层进出口动能之差(kJ·kg⁻¹); $g \cdot \delta z$ 为各谷层进出口势能之差(kJ·kg⁻¹); l_v 为系统与外界的功量交换(kJ·kg⁻¹)。

由于热力系分割的谷层厚度造成的各段风压压降较小,故动能之差忽略不计。此外,热力系定于干燥段,且隔界介质传热系数较小,故相对整个热力系统,功量交换可忽略不计。干燥段过程总能耗 Q 为:

$$Q = 3600 V_i r_{(t)} \sum_{j=1}^i \int_{(t)} (\delta q) \tag{2}$$

式中: V_i 为各谷层体积; $r_{(t)}$ 为流经各谷层干燥热风在测量状态下的空气密度(kg·m⁻³)。

由此,干燥比能耗 E 定义为:

$$E = Q / \sum_{j=1}^i \int_{(t)} \delta w \cdot \frac{1}{t} \tag{3}$$

式中: $\int_{(t)} \delta w$ 为各谷层在干燥过程中干燥蒸发的水量(kg); t 为干燥时间(h)。

2 结果与分析

2.1 比能耗回归方程的建立

根据二次回归正交旋转设计的23次组合试验所得稻谷干燥比能耗的测量结果,得干燥比能耗与影响因素间关系在编码空间的回归方程,对方程进行方差分析,结果表明方程拟合较好且显著($\alpha=0.01$)。对回归系数进行显著性检验后剔除不显著的因素,得编码空间内的回归方程为:

$$E = 2361.9583 + 544.6940x_1 + 346.9450x_2 - 507.1468x_3 - 166.1235x_1x_3 - 99.8170x_2x_3 - 88.4082x_1^2 - 171.7970x_2^2 \tag{4}$$

由回归方程得到的预测值与测定值的关系表明(图1),回归分析所建立的回归方程具有较高的拟合精度。

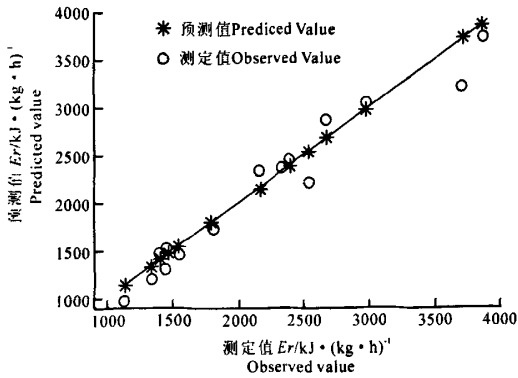


图1 预测值与测定值的关系

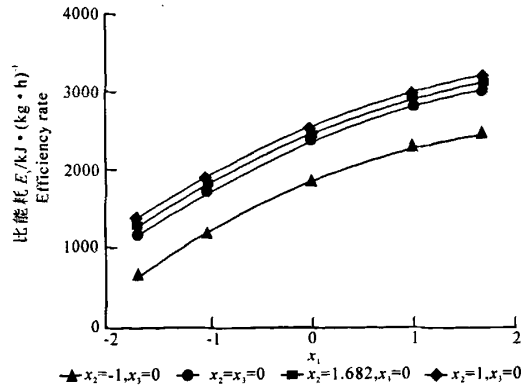


图2 热风温度对于干燥比能耗的影响

Figure 1 Relationship between predicted and observed value Figure 2 Impact of air temperature on efficiency rate

2.2 试验因素对干燥比能耗的影响

2.2.1 单因素分析 热风温度与干燥比能耗的关系表明(图2),干燥比能耗与热风温度呈正相关,但随着风温的增加,相应比能耗增长速度减小。相同条件下,在风速处于1水平(0.7m·s⁻¹)以下时,风速越大,比能耗越高,且风速在0水平(0.63m·s⁻¹)以下时,这一趋势显著;风速高于1水平时,比能耗均比该水平指标值小。因高风速可有效提高介质热传递速度,所以允许条件下,可考虑选用高风速。表现风速对干燥比能耗的影响表明(图3),干燥比能耗随风速增大而缓慢增大,当风速增大到一定值时,干燥比能耗随之缓慢减小。一定条件下,谷层越厚,干燥比能耗越小。谷层厚度对干燥比能耗的影响表明(图4),干燥比能耗与谷层厚度呈负相关。相同条件下,风温越高,干燥比能耗越大。

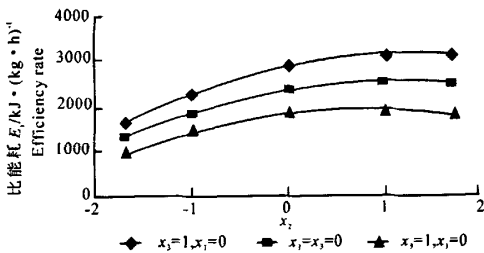


图3 风速对干燥比能耗的影响

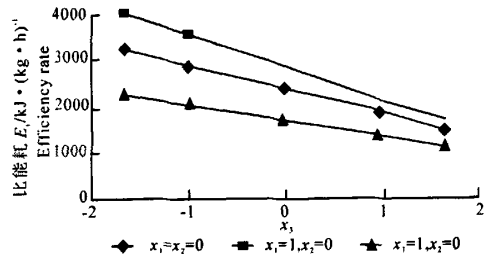


图4 谷层厚度对干燥比能耗的影响

Figure 3 Impact of air velocity on efficiency rate

Figure 4 Impact of paddy thickness on efficiency rate

2.2.2 双因素分析 试验所用3个因素中不同两因素组合对比能耗的影响如图5~图7,其中固定因素的编码水平为 $X_j=0$ 。

图5表明,风速越大,谷层越薄,干燥比能耗越大;风速越小,谷层越厚,干燥比能耗越小,且厚谷层高风速条件下,干燥比能耗也很小。谷层厚度对干燥比能耗的影响随风速加大而加大。图6表明,风速及风温值越大,干燥比能耗越大;风速及风温值越小,干燥比能耗越小。图7表明,风温越高,谷层越薄,干燥比能耗越大;风温越低,谷层越厚,干燥比能耗越小。且谷层厚度对干燥比能耗的影响随风温的升高加大。

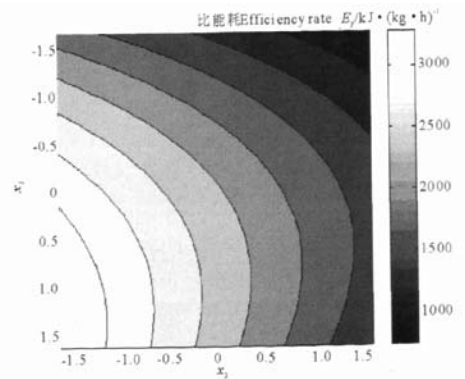


图5 风速和谷层厚度与干燥比能耗的关系

Figure 5 Efficiency rate with air velocity and paddy thickness

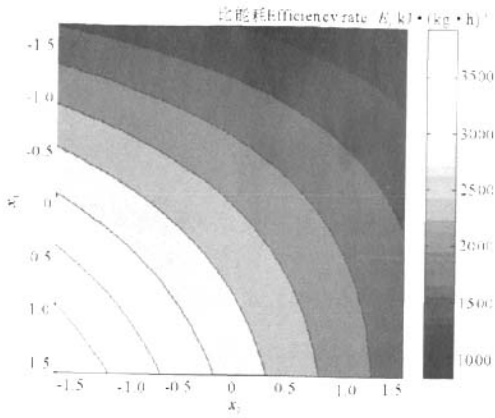


图6 热风温度和风速与干燥比能耗的关系

Figure 6 Efficiency rate with air temperature and velocity

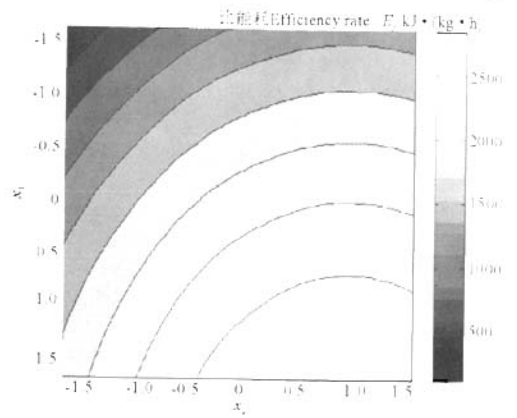


图7 热风温度和谷层厚度与干燥比能耗的关系

Figure 7 Efficiency rate with air temperature and paddy thickness

3 干燥工艺参数的优化

3.1 数学模型优化

由非线性优化分析法,对所得的回归模型(4)进行优化求解。采用 Matlab 编程计算各因素最优水平在编码空间的组合为: $X_1=-1.682, X_2=-1.682, X_3=1.682$,此时, $\min E_y=25.4265\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 。将各因素的编码水平换算为自然变量数值时,热风温度、热风风速和谷层厚度分别为 40°C 、 $0.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 50cm 。

3.2 频数分布优化

根据建立的回归方程,通过计算机模拟寻优。每个因素取 5 个水平: $\pm 1.682, \pm 1$ 和 0,对相应 125 个方案寻优,得出稻谷深床干燥比能耗小于 $1000\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 的 27 个方案中各变量取值与频率分布。由表 2

可知,在试验条件下,当热风温度、表现风速及谷层厚度分别在 $43\sim 50^\circ\text{C}$ 、 $0.49\sim 0.57\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $35\sim 44\text{cm}$ 范围内,其干燥比能耗小于 $1000\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 的概率为 95%。

4 结论与讨论

采用二次回归正交旋转组合设计,进行了稻谷深床干燥比能耗的试验研究,建立了影响因素(热风温度、表现风速、谷层厚度)与干燥比能耗之间关系的回归数学模型,为研究稻谷干燥生产耗能提供了基础数据。通过频数分析得出,稻谷的原始水分约 24%时,干燥热风温度为 $43\sim 50^\circ\text{C}$,表现风速为 $0.49\sim 0.57\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,谷层厚度为 $35\sim 44\text{cm}$,其深床干燥比能耗低于 $1000\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 的概率为 95%。采用非线性优化分析法得出各因素编码空间的最优组合。优值均为因子变化区间的边际值,即低风温、低风速、高谷层厚度。分析此组合优选原因为其能量强度的供应顺应稻谷干燥二段特性,没有过多强势能量造成稻粒“结壳”^[9],使降速干燥阶段延长而增加能耗,对上层稻谷也具有适度缓苏作用。

在以往有关于干燥能耗热性的指标研究中,存在一些指标定义的非规范现象,如对于“干燥每公斤水分所消耗的能量($\text{kJ}\cdot\text{kgH}_2\text{O}^{-1}$)”,不同的研究有不同的命名:单位能耗^[1]、单位热耗^[4]、单位耗热量^[12]等。同时,在确定相

表2 比能耗 $<1000\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$ 的变量数值与频率

Table 2 Variable values and frequencies of efficiency rate less than $1000\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{h})^{-1}$

编码 Code	因素频数 Factor frequency		
	X_1	X_2	X_3
-1.682	15	14	3
-1	8	7	3
0	2	2	3
1	1	1	7
1.682	1	3	11
均数	-1.131	-0.907	0.647
Mean			
标准误差	0.164	0.216	0.229
Standard error			
95%的分布区间	(-1.452, -0.81)	(-1.33, -0.484)	(0.198, 1.096)
Interval with 0.95 fiducial probability			
工艺参数范围	(43, 50)	(0.49, 0.57)	(35, 44)
Rang of technological parameter			

应评价指标方面,不同的研究差异很大。如前所述的评价指标有十几种之多,这也给研究交流带来了不便。刘建禹等人分析了小时标准煤消耗量(GB6970-86)、单位耗热量、单位耗能量、供热设备的热效率等指标的不足,并提出了评价连续式干燥设备热性能同时应用的3个改进指标:干燥机热效率(干燥机组每小时水分蒸发吸热量占供热设备输出热量的百分率)、供热设备热效率(供热设备输出热量占燃料总发热量的百分率)和综合热效率(干燥机组每小时水分蒸发吸热量占燃料总发热量的百分率)^[2],这些指标能够综合说明干燥设备对燃料总发热量或总能耗的利用能力,而不能表现干燥机的工作效率。周春光等衡量干燥机能耗性能时也同时应用3项指标:干燥能力、小时水分汽化量和单位耗热量^[12],其中干燥能力结合小时水分汽化量可以说明干燥机的工作效率,但因为单位耗热量与小时水分汽化量优化方向相反,所以在没有相应定量的权重值的情况下,进行干燥机能耗性能评价时只能做3项指标的综合定性分析。此外,小时水分蒸发量、干燥机产量、干燥强度、干燥能力均是在效率单方面对干燥机进行性能衡量,而无关对能量消耗的评价。因此在分析现有干燥指标的基础上,本研究综合效率和耗能计量两个方面提出干燥能耗热性的新指标干燥比能耗,旨在合理、全面、方便地探讨和考核干燥工艺和干燥设备。不同的干燥工艺方法和指标测试过程都会影响对干燥设备和干燥过程的整体评价,而干燥指标的选取是有效进行评价结果交流和指导生产的重要因素,仍需进一步探讨。

参考文献:

- [1] 朱文学,连政国,张玉先,等.谷物干燥性能指标权重的研究[J].农业机械学报,2000,31(1):72-75.
- [2] 刘建禹,周长奎,张明.粮食干燥机组性能测试中有关热工问题的探讨[J].黑龙江粮油科技,1997,(1):10-12.
- [3] 郝立群,白岩,董梅.玉米干燥中的能耗[J].粮食加工,2005,(2):29-31.
- [4] 王继煥.提高塔式稻谷烘干机热效率方法的研究[J].粮食与饲料工业,2003,(9):16-18.
- [5] 王丹阳,李成华.水稻深床干燥工艺参数对爆腰增率影响的试验研究[J].沈阳农业大学学报,2005,36(4):482-484.
- [6] 严家驷.工程热力学[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [7] 吕正洋.谷物低温干燥过程及节能效果[J].农业机械学报,1997,28(增刊):201-204.
- [8] 潘永康.干燥过程特性和干燥技术的研究策略[J].化学工程,1997,25(3):37-41.
- [9] 郑先哲,王成芝.水稻爆腰增率与干燥关系的试验研究[J].农业工程学报,1999,15(2):194-197.
- [10] MOREY R V,GUSTAFSON R J,CLOUD H A.Energy requirements for high-low temperature drying [J].Transactions of the ASAE, 1978,(21):562-567.
- [11] THOMPSON J F,SHONE M L,KRANZLER G A.Modified air flow rate and temperature hot drying [J].Transactions of the ASAE, 1985,28(4):1297-1300.
- [12] 周春光.谷物干燥机能耗分析[J].安徽农机,2007,(2):16-17.

[责任编辑 亓 国]