

# 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析

陈怡群, 常 春, 胡志超, 王海鸥, 吴 峰

(农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘 要:** 论述了利用薄层干燥方程理论建立的可模拟循环式谷物干燥机的干燥模型。用此模型可以计算出干燥水稻所需的干燥时间、能耗、缓苏程度系数, 以及干燥过程中谷物水分变化和排气温、湿度的变化。经实际验证, 所建模型模拟计算结果与试验结果基本相符, 可用于分析此类干燥机的工作情况, 为研发和改进此类干燥设备提供了有效技术手段。通过模型计算, 选择适当的风温和风量, 可较好地兼顾干燥时间和能量消耗的需求; 模型计算表明干燥初期使用较低的风温, 以后逐步升温的变温干燥可节约能量, 提高稻谷品质; 适当增大干燥段的容量可较大幅度降低干燥时间和能耗。

**关键词:** 谷物干燥, 模型, 模拟, 水稻, 干燥机

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.046

中图分类号: S226.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0255-05

陈怡群, 常 春, 胡志超, 等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟计算和分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 255—259.

Chen Yiqun, Chang Chun, Hu Zhichao, et al. Simulation and analysis of drying process for recirculating grain dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 255—259. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

循环式谷物干燥机是目前中国南方使用较多的中、小型谷物干燥机, 其中大部分是日本金子和台湾三久公司的产品。这两个公司的干燥机产品的工艺流程十分相近, 总体结构也十分相似, 只是在干燥过程自动化控制模式上有所不同。这两家公司都已经在国内建厂批量生产, 但所生产的产品仍是采用进口技术。研究循环式谷物干燥机的干燥工作过程, 将为中国自主开发这类干燥机和解决国产谷物干燥机能耗高的问题奠定一定的技术基础<sup>[1-3]</sup>。影响谷物干燥机干燥过程的因素很多, 而由于谷物干燥机工作的季节性很强, 每次作业的时间也比较长, 所以仅靠试验来确定干燥机的各种参数需要耗费大量的时间和经费。谷物干燥的计算机模拟技术在发达国家, 特别是美国, 已经有较长的研究和应用历史, 不少的计算机干燥模型已应用于生产实际<sup>[4-5]</sup>。但其大多数干燥模型是用于连续型干燥机的, 针对金子和三久这种形式的谷物干燥机整个干燥过程的计算机模拟所做的工作还很少。作者利用传统的谷物干燥理论, 创建了这种循环式谷物干燥机干燥过程的数学模型<sup>[6-7]</sup>。可用计算机模拟干燥机的整个干燥过程, 计算出各种工况下谷物干燥所需的时间、能量消耗和干燥过程中谷物和排气的温、湿度变化, 为这类谷物干燥机的设计和改进提供技术依据。

## 1 谷物干燥模型的建立

循环式干燥机中谷物的干燥是一个干燥和缓苏循环

进行的过程。本文模型中假设谷物的水分蒸发只发生在干燥段, 在缓苏段由于谷物周围的空气湿度高, 无强制通风, 认为没有水分蒸发。模型中谷物干燥过程如图 1 所示, 循环开始时, 谷物进入热风干燥段, 可以用薄层方程计算干燥段中各层谷物的水分蒸发量。进入缓苏段后, 干燥停止。下一个循环开始干燥时, 虽然由于缓苏的时间有限, 谷物内部的水分可能还不能达到完全均衡<sup>[8-9]</sup>, 所以使用这个模型计算会有一些误差。不过按照 Bakker 的理论<sup>[6]</sup>, 如果缓苏程度系数达到 0.9 以上, 就可以认为水分基本均衡, 这个误差也就不会太大。

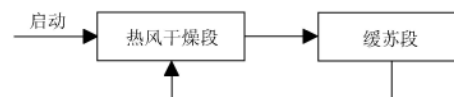


图 1 循环式谷物干燥机的干燥过程  
Fig.1 Drying process of recirculating grain dryer

### 1.1 谷物水分计算

干燥模型中, 被干燥谷物的水分变化可以用薄层方程来描述。许多学者对各种作物的薄层方程进行过研究, 其中用于稻谷的干燥方程有 Page 方程、Paul 方程、Sutherland 方程等<sup>[10]</sup>。国内一些学者的研究和本文中试验研究都表明: Page 方程对薄层稻谷干燥过程的描述更加符合作者的试验结果<sup>[11]</sup>, 所以本模型中选用这种方程(式(1))。此外, 要计算出干燥过程中谷物水分的变化, 除上述的薄层方程外, 还需要计算水分比  $MR$  (式(2)) 和平衡水分  $M_e$ , 本模型中  $M_e$  的计算选用 Pfoest 水稻平衡水分方程(式(3))。

$$MR = \exp(-xt^y) \quad (1)$$

式中:  $x = 0.01579 + 0.0001746T - 0.01413RH$

$$y = 0.6545 + 0.002425T + 0.07867RH$$

收稿日期: 2009-04-13 修订日期: 2009-06-08

基金项目: 江苏省高新技术研究计划(BD2007340)

作者简介: 陈怡群(1951—), 男, 上海人, 高工, 从事农业工程信息化方面的研究。南京中山柳营 100 号 农业部南京农业机械化研究所, 210014。  
Email: chenylq@nriam.com

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (2)$$

$$M_e = \left[ \frac{-\ln(1 - RH)}{1.9187 \times 10^{-5} (T + 51.161)} \right]^{1/2.4451} \quad (3)$$

式中:  $MR$ ——谷物水分比;  $t$ ——干燥时间, min;  $T$ ——干燥热风温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $RH$ ——热风相对湿度;  $M$ ——干燥  $t$  时间后谷物水分(干基), %;  $M_e$ ——谷物的平衡水分(干基), %;  $M_0$ ——谷物的初始水分(干基), %。

利用以上 3 个公式就可以计算出一定的热风温度、湿度条件下, 薄层稻谷被干燥时间  $t$  后所达到的水分  $M$ 。由于在干燥机干燥段通过的谷物层有一定的厚度, 所以要分层计算。通过第 1 层后的空气温度和湿度就是进入第 2 层时的空气温度和湿度。在计算穿过一个薄层后热空气的温、湿度变化时假设: (1) 空气因稻谷中的水分汽化和稻谷被加热造成温度下降(热量平衡); (2) 空气因稻谷中水分蒸发而使湿度增加(质量平衡); (3) 加热干燥过程中产生的各层不同水分的谷物经缓苏过程后达到水分均匀一致。根据上述假设, 可以得到一个循环中穿过各层谷物的空气的温、湿度和干燥后谷物的水分:

$$T_i = T_{i-1} - T_q - T_g \quad (4)$$

式中:  $T_i$ 、 $T_{i-1}$ ——穿过第  $i$ 、或  $(i-1)$  层谷物后空气的温度;  $T_q$ ——因第  $i$  层稻谷中水分汽化导致的空气温度下降, 可以通过稻谷水分汽化热、稻谷汽化水分量和空气的比热、流量等数据计算获得;  $T_g$ ——因第  $i$  层稻谷温度升高导致的空气温度下降, 可以通过稻谷比热、稻谷量和空气的比热、流量等数据计算获得。

$$RH_i = RH_{i-1} + RH_q \quad (5)$$

式中:  $RH_i$ 、 $RH_{i-1}$ ——穿过第  $i$ 、或  $(i-1)$  层谷物后空气的湿度;  $RH_q$ ——因稻谷中水分蒸发而导致的空气湿度增加, 可以通过稻谷汽化水分量和空气水汽密度等数据计算获得。

$$MT = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MT_i \quad (6)$$

式中:  $MT$ ——经干燥并缓苏后谷物的水分;  $MT_i$ ——干燥后各层的谷物水分;  $n$ ——干燥段谷物分层数。

## 1.2 干燥能耗计算

谷物干燥的能量消耗主要包括空气加热和机械设备运行所需能量消耗, 其中机械设备中能量消耗最大的是风机, 其他机械设备运行所用能量较少。谷物干燥中的能量消耗按下述方法计算:

加热空气所需能量=空气比热容×空气密度×(热风温度-环境温度)×风量×工作时间

设备消耗能量=设备功率×转换系数×工作时间

热空气的能量在干燥过程中用于谷物加热、谷物水分蒸发和机壁散失, 最终剩余能量被排出热风带走。下式表示上述 3 种能量的计算方法:

谷物加热能量=谷物比热容×谷物质量×(谷物温度-环境温度)

谷物水分蒸发能量=谷物质量×(初始谷物水分-最终谷物水分)×谷物汽化潜热

机壁散失能量=干燥机表面积×对流系数×干燥机内外温差×工作时间

利用上述 3 个公式可以计算排出热风的温度。

## 1.3 缓苏程度系数计算

由于谷物的缓苏程度很难实际测量, 所以通常用理论计算的方法来获得。对式(7)所示的偏微分方程用差分法求得数值解, 这些数值解可以描述出干燥或缓苏时谷物内部水分分布的变化情况<sup>[12-13]</sup>。限于篇幅, 方程求解过程不在本文叙述。获得缓苏后谷物内部水分分布后, 可由式(8)计算出缓苏程度系数。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (7)$$

$$I_c = \frac{M_t - M_0}{M_{\infty} - M_0} \quad (8)$$

式中:  $M_t$ 、 $M_0$  和  $M_{\infty}$ ——在缓苏时刻  $t$ 、缓苏开始和充分缓苏后谷粒表面的水分;  $D$ ——谷物的扩散系数;  $r$ ——谷物半径;  $I_c$ ——缓苏程度系数。

## 2 干燥模型的试验验证

为了验证上述的谷物干燥模型的计算结果是否与干燥机实际作业时的情况相符, 在多台金子 EL-1000R 干燥机上进行了试验, 试验过程中记录谷物水分、环境空气温湿度和进排气温湿度的变化情况, 将实测数据与模型计算结果进行比较, 可以检验模型计算的准确性。表 1 和图 2、3 反映了两组试验与模型的对照结果。

将试验结果与模拟计算结果进行相关性分析, 谷物水分变化的相关性系数为 I 号机 0.95, II 号机 0.96; 排气温度变化相关性系数 I 号机 0.85, II 号机 0.70。试验结果和分析表明干燥模型的模拟效果很好, 可以比较准确地模拟这种谷物干燥机的干燥过程。因此可以应用这个模型来分析这种干燥机的工作情况, 进而提出改进优化的建议。

表 1 试验工况与干燥结果

Table 1 Conditions and results of the drying experiments

工况项目	I 号机	II 号机
装量/kg	9600	9800
谷物初始含水率(湿基)/%	24	24
谷物终止含水率(湿基)/%	14.7	14.5
环境空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	16.6	16.5
环境空气湿度/%	86.4	86.8
谷物循环速度/ $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$	80.7	80.7
风机风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	150	150
热风温度/ $^{\circ}\text{C}$	55.9	54.5
实际干燥时间/h	18.58	19.17
计算干燥时间/h	18.31	19.25
计算缓苏程度系数	0.93	0.93

注: 表中测定的环境温湿度和热风温度取测定数据的平均值。

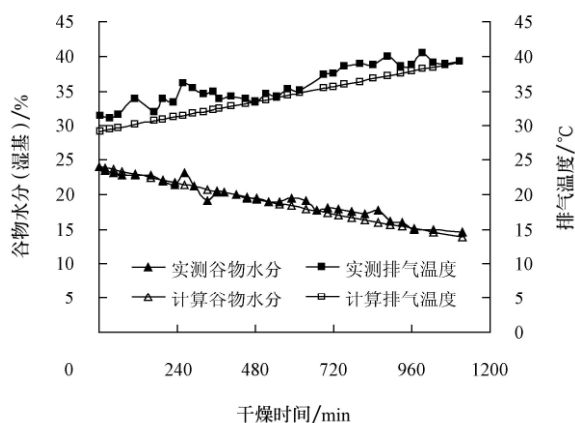


图 2 I 号机谷物水分和排气温度变化曲线对比  
Fig.2 Comparisons of grain moisture and exhaust temperature for No. I dryer

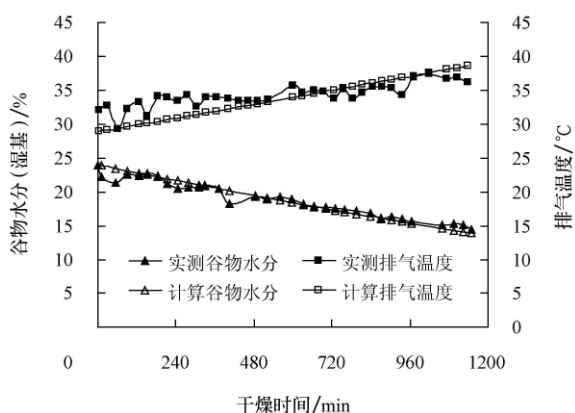


图 3 II 号机谷物水分和排气温度变化曲线对比  
Fig.3 Comparisons of grain moisture and exhaust temperature for No. II dryer

### 3 模拟结果的分析

利用前述数学模型,用 VB 编制程序,可以模拟干燥过程中的谷物水分变化情况,以寻求高效、低能耗干燥的途经。以下通过一些模拟实例来分析干燥过程中工况参数与干燥时间和能耗的关系。以下实例中的工况除了特别标明以外,取参数:装机谷物量=9600 kg;环境温度=17℃;环境空气湿度=87%;热风温度=55.9℃;热风风量=150 m<sup>3</sup>/min;循环速度=80.7 kg/min;初始含水率=24%;干燥后含水率=14.5%。

对干燥机进行优化的目标是干燥时间和能量消耗。运行参数中对这两个优化目标影响较大的包括:热风温度、热风风量和干燥段容积,其中热风温度一般还可以在运行过程中随时调整。通过图 4 和图 5 可以看出热风温度和风量对干燥时间和能量消耗的影响。一般来说,随着风温、风量的增加,干燥时间缩短,而能量消耗增加。在风温和风量达到一定数值后,能耗随风温和风量的增加基本是呈线性的关系;但干燥时间的减少并不与风温和风量呈线性关系,而是在风温和风量较小时,随风温、风量增加而减少较快,在风温、风量达到一定量(40℃, 120 m<sup>3</sup>/min)之后,干燥时间的减少速率就开始减缓。出现这个现象的原因是:干燥机运行时的能量主

要是用于加热空气,所以能耗是随风温和风量的增加而线性增加的;而随着风温和风量的增加,排出空气的湿度减少,这表明热风用于干燥的效率降低,所以干燥时间减少速率就减缓。因此,在干燥时间可以达到需求的情况下,可以考虑尽量减小风温和风量,以便节约能量消耗。

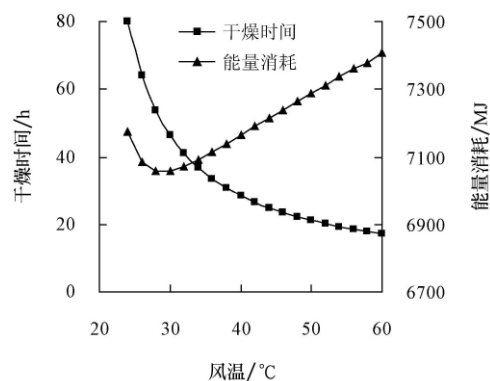


图 4 干燥时间和能耗随风温的变化  
Fig.4 Changes of drying time and energy consumption with air temperature

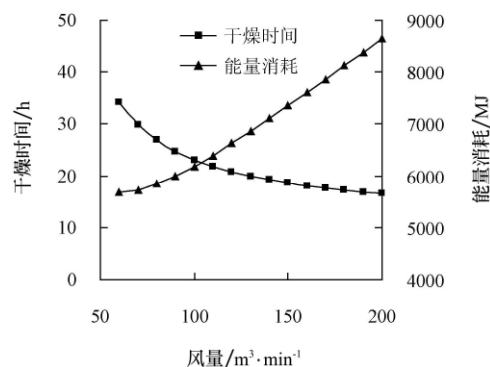


图 5 干燥时间和能耗随风量的变化  
Fig.5 Changes of drying time and energy consumption with mass flow rate

利用模型还可以分析干燥过程中不同的谷物含水率阶段风温对干燥速率的影响。图 6 和图 7 显示谷物高含水率和低含水率阶段去除 1% 水分(干基)所需的能量和时间随风温的变化。从图 6 中可以看出,在谷物含水率较高时,单位水分耗能随风温的增加而增加,单位水分耗时则随风温增加而减少。此时,只要干燥时间允许,可以适当降低风温以减少能耗。在谷物含水率较低时(图 7),单位水分耗能和耗时都是随风温的增加而减少的。此时,只要谷物品质不受影响,应该尽量提高风温,以减少能耗和干燥时间。根据以上分析,可以确定变温干燥过程中选择风温的原则:在干燥作业的初期,谷物含水率较高,可以选择较低的风温以减少能耗;随着谷物含水率的降低,应增加风温以缩短干燥时间;到谷物含水率快达到目标水分时,应尽量提高风温以加快干燥速度和减少能耗。这样变温干燥的另一个好处是使干燥过程中谷物的脱水速率更均匀一些,有助于提高干燥后谷物的品质<sup>[14-16]</sup>。

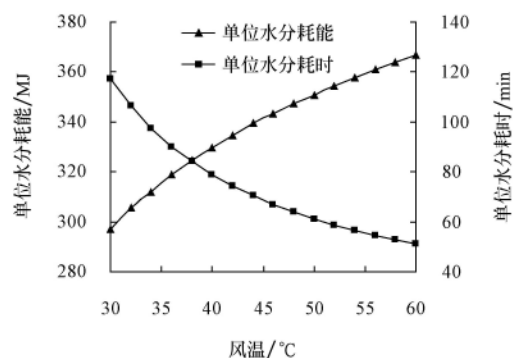


图 6 谷物含水率为 26% (湿基) 时的时耗和能耗  
Fig.6 Time-consuming and energy consumption with 26% (wet basis) grain moisture

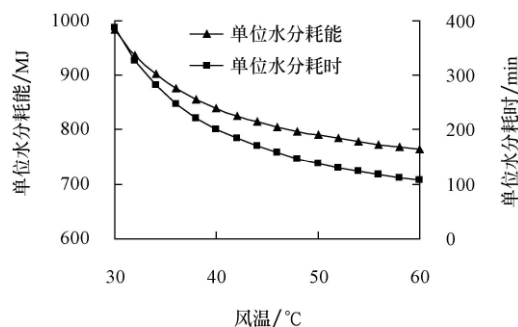


图 7 谷物含水率为 14% (湿基) 时的时耗和能耗  
Fig.7 Time-consuming and energy consumption with 14% (wet basis) grain moisture

根据模型分析, 干燥机中干燥段的容积对干燥时间和能耗会产生较大的影响。金子 EL 系列的干燥机的干燥段为 8 槽结构, 容积约为  $0.98 \text{ m}^3$ 。如果增大干燥段的容积, 就可以同时减少干燥时间和能耗 (图 8)。造成这个现象的原因是因为干燥段的容积增大会使排出空气的湿度增加, 这表明热风干燥的效率提高, 所以干燥时间和能量消耗都可以减少。计算结果表明如果干燥段容积增加 1 倍, 干燥时间和能耗都可以减少 22% 以上。不过, 过分地增大干燥段容量也是不可取的, 除了结构配置、制造成本方面的原因外, 干燥段容量增大将导致缓苏不足, 计算表明, 容积增大 1 倍, 缓苏程度系数将从 0.93 降至不足 0.90。

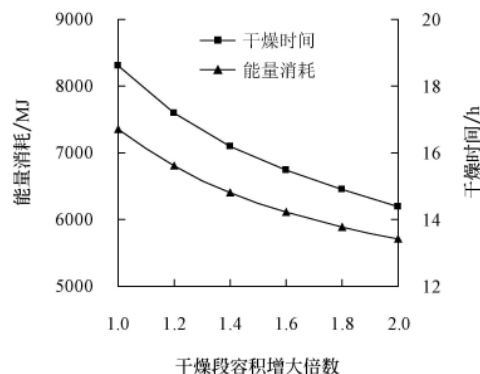


图 8 干燥段容积与干燥时间和能耗的关系  
Fig.8 Relationships of the volume of drying section and drying time, and the volume of drying section and energy consumption

## 4 结 论

1) 利用 Page 水稻薄层干燥方程和 Pfast 水稻平衡水分方程可以建立循环式谷物干燥机的干燥过程模拟模型, 利用模型程序可以计算出各种工况下水稻干燥所需时间, 并可得到整个干燥过程中谷物含水率、排气温湿度的变化情况。

2) 通过与试验数据对比, 证明这个模型可以较好地模拟此类干燥机的干燥过程, 模型程序计算出的数据是基本可信的。

3) 根据模型计算的结果, 干燥机进风风温、风量的增加, 会使干燥时间缩短, 而能量消耗会增加。能量消耗是随风温和风量的增加呈线性增加的; 而干燥时间随风温、风量的增加速度是先快后慢, 在风温和风量达到一定值后, 干燥时间的减少速度会比较慢。因此, 如果干燥时间允许, 将风温和风量选择在这个转折点上比较合理, 能够较好地兼顾干燥时间和能量消耗的需求。

4) 变温干燥可以更好地节约能量, 提高被干燥稻谷的品质。干燥过程风温变化的原则是: 在初期使用较低的风温, 以便节约能量; 干燥过程中逐步升温, 以保证干燥的时间; 在最后阶段, 应该尽量提高风温, 以加快干燥速度和节约能耗。

5) 适当增大干燥机干燥段的容量可以使干燥时间和能耗都有较大的降低。

以上根据模型计算得到的结果还需进一步试验验证。

## 【参 考 文 献】

- [1] 陈坤杰, 陈青春, 张银. 中国谷物干燥加工中的能源消耗状况[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 173—177.  
Chen Kunjie, Chen Qingchun, Zhang Yin. Energy consumption for grain drying in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(5): 173—177. (in English with Chinese abstract)
- [2] 董铁有, 朱文学, 张仲欣, 等. 我国水稻干燥机械化存在的问题及对策研究[J]. 食品科学, 2005, (S1): 92—98.  
Dong Tieyou, Zhu Wenxue, Zhang Zhongxin, et al. Study on issue and solution for mechanization of rice drying in China [J]. Food Science, 2005, (S1): 92—98. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蒋平, 朱传祥, 吕德志, 等. 循环式粮食干燥机的智能控制系统[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 126—130.  
Jiang Ping, Zhu Chuanxiang, Lu Dezhi, et al. Intelligent control system for circulating grain dryer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(11): 126—130. (in Chinese with English abstract)
- [4] 曹崇文. 谷物干燥模拟软件[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(4): 189—192.  
Cao Chongwen. Grain drying simulation program[J]. Drying Technology and Equipment, 2006, 4(4): 189—192. (in Chinese with English abstract)
- [5] 曹崇文. 粮食干燥过程模拟的现状与发展趋势[J]. 干燥技术与设备, 2003, 1(2): 6—10.  
Cao Chongwen. Current situation and development trend of

- grain drying simulation[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2003, 1(2): 6—10. (in Chinese with English abstract)
- [6] 曹崇文, 朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [7] 戴天红, 曹崇文. 谷物干燥研究中的模糊数学方法[J]. *农业工程学报*, 1996, 12(3): 46—51.  
Dai Tianhong, Cao Chongwen. Applications of fuzzy sets to the study on grain drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1996, 12(3): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [8] 奚河滨. 水稻顺流干燥工艺缓苏过程的研究[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(4): 208—212.  
Xi Hebin. Study on tempering process of rice during concurrent flow drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1998, 14(4): 208—212. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈贻伦. 均化对稻谷薄层干燥速率之影响[J]. *农业机械学报(台湾)*, 1995, 4(1): 49—55.  
Chen Yilun. Tempering effect on drying rate of rough rice[J]. *Journal of Agricultural Machinery(Taiwan)*, 1995, 4(1): 49—55. (in Chinese with English abstract)
- [10] 曹崇文, 刘玉峰. 水稻干燥模型与干燥机性能预测[J]. *北京农业工程大学学报*, 1995, 15(2): 58—65.  
Cao Chongwen, Liu Yufeng. Rice drying model and performance prediction of rice dryer[J]. *Journal of Beijing Agricultural Engineering University*, 1995, 15(2): 58—65. (in Chinese with English abstract)
- [11] 计福来, 胡良龙, 胡志超, 等. 一种稻谷横流循环干燥数学模型的组建[J]. *农机化研究*, 2008, (11): 51—53.  
Ji Fulai, Hu Lianglong, Hu Zhichao, et al. A mathematical model of cross-flow recirculating rice drying[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008, (11): 51—53. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李业波, 曹崇文, 杨俊成. 水稻缓苏的理论和实验研究[J]. *农业机械学报*, 1997, 28(S1): 51—54.  
Li Yebo, Cao Chongwen, Yang Juncheng. Numerical and experimental study on the rough rice tempering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1997, 28(S1): 51—54. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李业波, 曹崇文. 稻谷颗粒内部传质及其应用[J]. *农业工程学报*, 1993, 9(1): 74—82.  
Li Yebo, Cao Chongwen. Application of moisture diffusion model within an individual grain kernel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 1993, 9(1): 74—82. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡万里, 李长友, 黄茂柱. 温度变化对爆腰率的影响分析[J]. *现代农业装备*, 2005, (9): 80—83.  
Hu Wanli, Li Changyou, Huang Maozhu. The analysis of temperature-changed to the ratio of rice kernel cracking[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2005, (9): 80—83. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胡万里, 李长友. 稻谷爆腰影响因素的薄层实验研究[J]. *现代农业装备*, 2006, (1): 52—56.  
Hu Wanli, Li Changyou. Experiment study on the drying affecting factors the rice kernel cracking[J]. *Modern Agricultural Equipments*, 2006, (1): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘冬梅, 刘立意, 辜松. 稻谷干燥爆腰的试验研究[J]. *农机化研究*, 2005, (4): 167—168.  
Liu Dongmei, Liu Liyi, Gu Song. The experimental study on the paddy rice crack during drying[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2005, (4): 167—168. (in Chinese with English abstract)

## Simulation and analysis of drying process for recirculating grain dryer

Chen Yiqun, Chang Chun, Hu Zhichao, Wang Haiou, Wu Feng

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** The theory of thin-layer drying equations was used to set up a drying model which could simulate recirculating grain dryer. The model could be used to calculate the data of drying time, energy consumption, tempering coefficient, as well as the changes of grain moisture, temperature and humidity of exhaust air in drying process. By experimental validation, the model simulation conformed to the experimental results, and the model could be used to analyze the same kind of dryer's working condition, and provide effective technical means for research and development as well as the improvement of the dryers. According to the model calculation, selecting appropriate temperature and mass flow rate of air can balance drying time and energy consumption, and the operation that could save energy and improve the grain quality was to keep low drying temperature at the initial stage of drying and gradually increase it. Proper increase in drying section cubage will significantly reduce drying time and energy consumption.

**Key words:** grain drying, models, simulation, rice, dryer