

# 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究<sup>\*</sup>

李长友 方壮东

(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:** 为了获得高湿稻谷逆流干燥层内的水分分布,实现干燥过程动态跟踪和调控,基于干燥水分扩散模型和深层干燥质量平衡方程,在线解析稻谷逆流干燥水分变化,给出了稻谷多段逆流干燥、缓苏复杂工艺条件下,层内含水率分布及干燥速率解析式,验证了风量谷物比为4,温度50℃的热风流过0.5 m厚的逆流层后,仍具有较强的干燥能力,解析结果与实测的干燥机出粮口水份偏差在±0.5%范围内,证实了解析模型的可靠性。

**关键词:** 稻谷 逆流干燥 含水率 解析模型

**中图分类号:** S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)05-0179-06

## 引言

高湿稻谷干燥爆腰问题十分突出,爆腰稻谷不仅加工时的破碎率高,而且会因表面残存大量的微裂纹,造成裸露淀粉而使籽粒的吸湿性增强,增加了对病虫害和霉菌等侵袭的敏感性,在高温高湿环境中存放极易变质,缩短贮藏期<sup>[1]</sup>。引起爆腰的主要原因是水分偏差应力,抑制爆腰的主要途径是实时掌握水分及其分布,控制干燥速率<sup>[2-4]</sup>。由于稻谷的实际干燥环境条件较差,高温、高湿、高粉尘,加上在非稳态干燥过程中物料组织结构变化、介质及物料流动特征等诸多不确定扰动因素,严重影响在线检测的精度及其可靠性<sup>[5-7]</sup>,完全依赖仪器测量干燥层内的水分分布,仍不现实。为了揭示稻谷干燥层内水分的分布,研究人员立足于表征薄层干燥的指数模型和质量平衡方程并忽略稻谷干燥体积收缩、空隙率变化,在特定的假设条件下,尝试从理论上解析稻谷的深层干燥特性<sup>[8-9]</sup>,基于通风干燥半经验半理论的解析方法<sup>[10]</sup>,求解深层干燥质量平衡方程<sup>[11-14]</sup>,比较好地解析了横流及静置层的干燥过程。

由于逆流干燥热风的初态点和粮食的终态点相遇,而终态点是和粮食的初态点相遇,也就是在干燥层排气端,低温高湿的介质与低温高湿的粮食相遇,排气湿度大,能量利用效果好,而在热风入口位置,高温低湿的介质接触的是低湿温度较高的粮食,传热温差小而去水强度大<sup>[15-16]</sup>,为了缓解粒体内部的

水分偏差应力,防止爆腰,逆流干燥必须包含缓苏段,使得过程解析更为复杂。为补充这一解析空缺,实现干燥过程动态跟踪和调控,本文针对高湿稻谷在多段逆流干燥、缓苏工艺,基于干燥质量平衡方程,讨论逆流干燥层内含水率分布的解析式并说明应用的方法,为指导干燥设计,提高干燥效率和干燥机产能奠定理论基础,为在线预测水分提供解析的方法。

## 1 干燥基础方程

### 1.1 逆流干燥物理模型

逆流干燥如图1所示。在逆流干燥方式下,干燥物靠自重连续向下流动,热风受迫向上穿过干燥层。热风和物料的流向相反。高温热风,在干燥层出口处,首先与温度最高而含水率最低的物料相遇,热风在离开干燥层时与温度最低、湿水率最高的物料相接触。热风从干燥层物料入口处离开干燥室,而物料从干燥层热风入口处离开干燥室。在逆流干燥的过程中,物料干燥特性与后续进料条件无关,但受干燥层内向下游流动(流动前方)物料的影响。

### 1.2 质量平衡基础方程

向图1所示的干燥层内,通入温度为 $T_0$ 、水蒸气含量(质量比)为 $H_0$ 的干燥空气。假设,绝干物料的堆积密度为 $\rho_b$ ,单位时间内通过单位干燥床面积的绝干空气质量流量为 $G_0$ ,深层蒸发传质系数、有效蒸发面积系数、谷物比表面积系数分别为 $\mu$ 、 $\gamma$ 、 $a$ ,那么,床上物料的去水过程可以用质量平衡微分

收稿日期: 2013-12-18 修回日期: 2014-02-04

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(31371871)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114404110021)和国家星火计划资助项目(2012GA780076)

作者简介: 李长友,教授,博士生导师,主要从事农业装备技术研究,E-mail: lichyx@scau.edu.cn

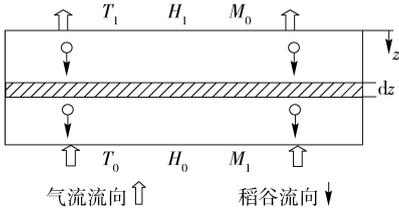


图1 逆流干燥模型

Fig.1 Counter flow drying model

方程表示为

$$\rho_b \left( -\frac{\partial M}{\partial \theta} \right) dz = \mu \gamma a (H_w - H_0) f(\phi) dz = G_0 \frac{\partial H}{\partial z} dz \quad (1)$$

式中  $M$ ——干基含水率, %

$\theta$ ——干燥时间, h

$z$ ——干燥床深度, m

$\mu \gamma a (H_w - H_0)$ ——最大干燥速率, %/h

$H$ ——湿空气的水蒸气质量比, kg/kg

$H_w$ ——湿球温度下空气的饱和含湿量, kg/kg

$f(\phi)$ ——干燥速率特性函数

稻谷单粒及薄层干燥速率服从  $-\frac{dM}{d\theta} = k(M - M_e)$  扩散模型,  $k$  为干燥常数 ( $\text{h}^{-1}$ ),  $M_e$  为动平衡干基含水率 (%); 令  $\chi_{\max} = H_w - H_0$ ,  $\mu \gamma a = \frac{G_0 H_1 - H}{Z_1 H_w - H}$ ,  $\eta = \frac{\mu \gamma a}{G_0} z$ ,  $\tau = \frac{\varepsilon \theta}{\rho_b (M_0 - M_e)}$ ,  $Z_1$ 、 $H_1$ 、 $\varepsilon$  分别表示干燥层厚度、干燥层出风端空气湿含量、深层蒸发速率系数, 将式(1)无量纲化得到的干燥无量纲质量平衡式为

$$\frac{1}{f(\phi)} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} + \phi = C \quad (2)$$

其中

$$\phi = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$$

式中  $C$ ——积分常数  $\phi$ ——自由含水比

$M_0$ ——初期含水率, %

在风速及干燥介质温度、湿度恒定的条件下, 对扩散模型求积分  $\int_{M_0}^M \frac{dM}{M - M_e} = \int_0^\theta -k d\theta$  得到指数模型  $\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-k\theta}$ 。而在薄层干燥过程遵循指数模型时, 即式(2)中的干燥速率特征函数  $f(\phi)$  则等于  $\phi$ , 此时对式(2)可解, 求定积分得到深层干燥物料含水比率分布解析通式

$$\phi = \frac{C \phi_i \exp(C \eta)}{C - \phi_i + \phi_i \exp(C \eta)} \quad (3)$$

式中  $\phi_i$ ——物料在干燥层入口位置时的含水比率

## 2 逆流干燥含水率解析模型

按照逆流干燥条件和以下方法, 确定出式(3)

中的积分常数及相关参数, 即可导出逆流深层干燥含水比率解析式和干燥速率解析式。由逆流无因次干燥速率  $\frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{\partial \chi}{\partial \eta} = \chi f(\phi)$ , 把  $\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = \frac{\partial \phi}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \frac{G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} (\chi f(\phi))$  代入式(2), 得到积分常数计算式

$$\frac{\chi G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} + \phi = C \quad (4)$$

其中

$$\chi = H_w - H$$

式中  $v$ ——各层谷物流动速度, m/h

当  $z=0$  时  $\phi = \phi_i = \phi_0$ , 令  $\chi_r = H_w - H_{L1} \geq 0$ ,  $H_{L1}$  为粮食入口(热风出口)位置的介质水蒸气质量比。代入式(4)得逆流干燥积分常数

$$C = \phi_0 + \frac{\chi_r G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} \quad (5)$$

在排气相对湿度等于 100%, 干燥层中无结露时  $\chi_r = 0$ , 否则  $\chi_r > 0$ , 所以, 在逆流干燥时  $\phi_0 \leq C$ , 稻谷不会出现被吸湿的现象。

由  $z=Z$  时的进风口、出粮口条件得到

$$C = \phi_0 + \frac{\chi_0 G_0}{v \rho_b (M_Z - M_e)} \quad (6)$$

由式(5)和(6)联立得到物料在干燥层出口位置的含水率  $M_Z = \frac{\chi_0 (M_0 - M_e)}{\chi_r} + M_e$ 。

$z=Z$  时的进风口条件 ( $\chi = H_w - H_0 = \chi_0$ ) 代入式(1)求得逆流干燥时  $\varepsilon = \frac{\rho_b k (M_Z - M_e)}{\chi_0}$ , 由于逆流干燥时, 物料的流向与顺流相反, 所以,  $\eta = -\frac{\varepsilon}{G_0} z$ 。

将  $M_Z$  代入  $\varepsilon$  算式后得  $\varepsilon = \rho_b k \left( \frac{M_0 - M_e}{\chi_r} \right)$ 。将  $\varepsilon$  代入  $\eta$  算式得:  $\eta = -\rho_b k \left( \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} \right) z$ , 于是得到逆流干燥的指数幂

$$C \eta = \left( \phi_0 \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} + \frac{1}{v \rho_b} \right) \rho_b k z \quad (7)$$

第一段逆流层入口位置上的含水率  $\phi_i$  始终等于  $\phi_0$ ,  $\chi_r$  和  $\varepsilon$  都是与送风条件、热风状态及稻谷含水状态相对应的干燥系统特征量。

将式(5)、式(7)和  $\phi_i = \phi_0$  代入式(3)得逆流干燥含水比率解析式

$$\phi = \frac{\left[ \phi_0 + \frac{\chi_r G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} \right] \exp \left( \left( \phi_0 \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} + \frac{1}{v \rho_b} \right) \rho_b k z \right)}{\frac{\chi_r G_0}{\phi_0 v \rho_b (M_0 - M_e)} + \exp \left( \left( \phi_0 \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} + \frac{1}{v \rho_b} \right) \rho_b k z \right)} \quad (8)$$

由  $d\eta = -\frac{\varepsilon}{G_0}vd\theta$  得  $\frac{d\theta}{d\eta} = -\frac{G_0}{\varepsilon v}$ ；将  $\frac{\partial\phi}{\partial\eta} = \frac{\partial\phi}{\partial\theta} \frac{\partial\theta}{\partial\eta}$  代入式(2)后,得逆流干燥速率沿床深方向的分布式  $-\frac{\partial\phi}{\partial\theta} = -\frac{\varepsilon v(\phi - C)}{G_0}f(\phi)$ ,代入式中的干燥参数得到

$$\frac{\partial\phi}{\partial\theta} = \frac{v\rho_b k \left( \frac{M_0 - M_e}{\chi_r} \right) \left\{ \phi - \left[ \phi_0 + \frac{\chi_r G_0}{v\rho_b(M_0 - M_e)} \right] \right\}}{G_0} \phi \quad (9)$$

### 3 解析结果与分析

应用以上公式解析稻谷干燥含水率时,干燥常数  $k$  和动平衡干基含水率  $M_e$  是取决于送风温度和湿度的函数<sup>[17]</sup>,在送风条件不变时  $k$  和  $M_e$  则为常数。以稻谷为例,  $k = 0.01t - 0.132$ ;  $M_e = \left[ \frac{-\ln(1-\varphi)}{1.9187 \times 10^{-5}(t_a + 51.161)} \right]^{\frac{1}{2.4451}}$ ,  $\varphi$  为干燥空气的相对湿度(小数),  $t_a$  为干燥层进风温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$  为排气温度( $^{\circ}\text{C}$ )。用温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度  $75\%$  的自然空气,加热到  $50^{\circ}\text{C}$  后,通入逆流干燥层,假设稻谷的初期干基含水率为  $32\%$ ,流动状态时的堆积密度  $\rho_b = 550 \text{ kg/m}^3$  并认为稻谷的流动速度  $v$  为定值 ( $1 \text{ m/h}$ ),干燥层厚度为  $1 \text{ m}$ ,在保持单项试验设定的风量谷物比不变的条件下,获得的逆流干燥层内含水比率分布和干燥速率分布解析曲线如图2和图3所示。

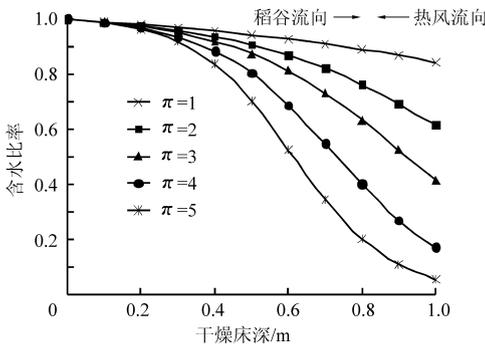


图2 逆流干燥含水比率变化曲线

Fig.2 Variation of grain moisture ratio in counter flow drying process

#### 3.1 逆流干燥分析

逆流干燥,稻谷在干燥层入口处接触到的风温最低。而在干燥层出口处接触到的风温最高,可以归属为连续升温干燥过程。在稻谷和热风持续流动的干燥条件下,风量谷物比(用  $\pi$  表示)分别取 1、2、3、4、5 时,基于式(8)、(9)解析,计算出的图1所示的单级逆流干燥层内的含水比率分布如图2所示,干燥速率分布如图3所示。

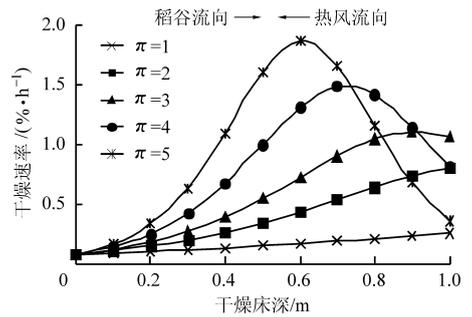


图3 逆流干燥速率变化曲线

Fig.3 Drying rate variation in counter flow drying process

从图3可以看出,在逆流干燥的前段,干燥介质连续进入干燥层,物料经历的是升速干燥的过程,并且风量越大,升速的速率越大。在给定的层厚度、风量谷物比及热风和稻谷初态含水率的条件下,在逆流干燥床深度坐标上,对应床深位置,存在去水速率极值点,该极值点不仅不在最大层厚度位置,同时,随着风量谷物比的增大而增大而且沿热风流动方向前移。从图2和图3中得知,稻谷在逆流干燥层内,明显受通风条件和层厚度的影响。如果把稻谷的流动方向,设为沿进入干燥层到离开干燥层并以图3中的去水速率最大点为界,把稻谷在逆流层内的干燥过程区分为前段和后段,那么,可以推断,影响逆流干燥前段干燥速率的主要因素是干燥介质接纳水分的能力。而影响逆流干燥后段干燥速率的主要因素是物料的含水比率以及水分与材料的结合能。

#### 3.2 多段逆流、缓苏工艺过程解析

多段逆流、缓苏干燥工艺原理如图4所示。

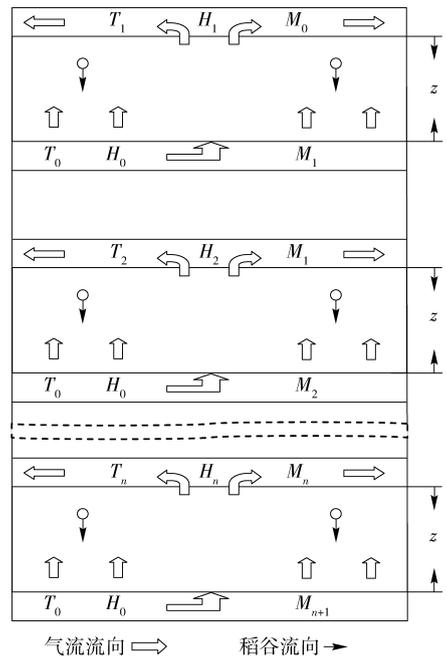


图4 逆流干燥缓苏工艺原理图

Fig.4 Principle of counter flow drying and tempering process

稻谷在干燥塔内,靠自重缓慢向下流动,干燥介质通过机内通风角盒向上穿透谷层,实现物料与热风之间水分和热量交换。稻谷自上而下,依次经过多级干燥、缓苏工艺过程后到达终干水分,干燥机内始终充满稻谷并和热风一直处于不间断地连续流动状态。

稻谷经过第一级干燥段后水分降至  $M_1$ , 经过缓苏后,由  $M_1$  的含水率状态进入第二级干燥段。依次经过多段干燥、缓苏到达终干水分。

由于稻谷在各级干燥段的送风条件相同,最初的含水比率  $\phi = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$ , 假设经过一段逆流干燥后

水分降至  $M_1$  后,在缓苏段,使稻谷充分完成粒内的温度和湿度调节,达到粒体内部水分均匀一致,那么,稻谷则在  $M_1$  含水率状态进入下一级干燥段、缓苏段。此时,相对于稻谷最初的含水率  $M_0$ , 各级干燥层出口处的稻谷含水率即可表示为  $M_1 = (M_0 - M_e) + M_e$ ,  $M_2 = (M_1 - M_e) + M_e$ ,  $M_n = (M_{n-1} - M_e) + M_e$ , 这样,对应初期含水率得到的最大降水幅度  $M_0 - M_e$ , 在各级干燥层出口处的含水比率  $\phi_n$  就可表示为

$$\phi_n = \prod_{i=1}^n \frac{M - M_e}{M_n - M_e} \phi_{n-1} \quad (10)$$

基于上述的方法,限定逆流干燥层厚度 0.5 m, 干燥缓苏比设计为 1:4, 谷物的流动速度设定为 1 m/h, 风量谷物比为 4 的条件下,得到的高湿稻谷在干燥、缓苏工艺条件下,含水比率变化及干燥速率变化的解析结果如图 5 和图 6 所示。

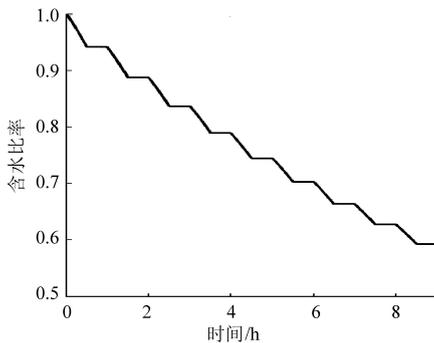


图5 逆流干燥缓苏含水比率变化曲线

Fig. 5 Variation of grain moisture ratio in counter flow drying and tempering process

从图 5、图 6 的曲线变化看到,逆流、缓苏干燥工艺,稻谷在各干燥层内均为持续升速干燥过程,含水率越高,流经同一干燥层时的干燥速率和升速的幅度都越大。这表明:经过缓苏后的稻谷,干燥过程同样具有二段性,可以把经过缓苏后的稻谷进入各级逆流干燥层(入口位置)时的含水率,作为解析计算该级逆流干燥层内水分分布时初期含水率;稻谷在低含水率状态时的能量利用效果不如高湿段,即

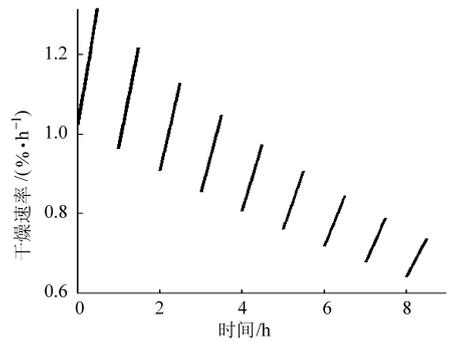


图6 逆流缓苏干燥速率变化曲线

Fig. 6 Drying rate variation in counter flow drying and tempering process

干燥介质流经低湿稻谷层后仍具备相当的干燥能力。基于式(8),分析逆流干燥层热风出口位置上的  $\chi$ , 发现在风量谷物比为 4 的情况下,50℃的热风流过 0.5 m 厚的逆流层后,仍具有较强的接纳水分能力,所以,加大逆流干燥通风面积、大幅度降低风速及风量谷物比,延长热风在层内的流经时间,能够有效地提高逆流干燥的热能利用效果。

## 4 解析结果的试验验证

### 4.1 试验样机

试验样机为本研究室设计的 5HN-15 型连续式干燥机,外形结构如图 7 所示。干燥机内置分粮段、8 级逆流干燥、缓苏段、冷却段、排粮段。采用高低温供热系统、电控装置,进出粮水分在线实时检测。干燥层厚度 0.5 m,干燥机静容积(除去角盒) 145.8 m<sup>3</sup>;湿稻谷的容积密度 620 kg/m<sup>3</sup>,标准机内容量 90 t 高湿稻谷。配置高温风机型号:Y4-73, 10D 型离心风机,流量 52 161 m<sup>3</sup>/h,全压 1 741 Pa,低温风机:Y4-73,9D 型离心风机,流量 38 026 m<sup>3</sup>/h,



图7 稻谷逆流干燥样机

Fig. 7 Prototype of counter flow grain dryer

全压 1 409 Pa。配套电动机型号:Y200L-4,功率 30 kW。设计每个干燥段降水幅度 0.85%,冷却段降水幅度 0.5%,运行时间 6 h,每 1 h 处理 15 t,每次总降水幅度 7.3%。

试验过程,经清选后的谷物由提升机喂入干燥机。谷物靠自重干燥塔内缓慢向下移动,依次经过压粮段、8 级干燥、缓苏段和冷却段,最终达到目标水分,并冷却到可以安全储存的温度。干燥介质通过机内角盒穿透谷层,实现稻谷与热风之间水分和热量的交换。干燥机内始终充满物料,进料和排料以及进气和排气连续进行。

#### 4.2 验证结果

在 2013 年 8 月 2 日~9 月 9 日期间,在湖南省宁乡县历经铺开发区(湖南卫红米业有限公司),进行了解析结果与生产测试对比试验。试验期间环境温度平均温度和湿度变化范围分别为 25~38℃和 55%~45%,自然空气的平均容积密度为 1 kg/m<sup>3</sup>,对应的自然空气的平均含湿质量比为 10~15 g/kg。试验稻谷初期含水率 24%~38.6%。

在 1 个多月的生产试验过程中,实际测试的出机粮水分与理论解析的水分偏差在 ±0.5% 范围内,证实了解析手段和方法的可靠性。

#### 4.3 讨论

在同样的送风条件下,逆流干燥热风初态和终态对应稻谷的终态和初态,其热能匹配,与稻谷水分结合能随含水率降低而增大的热能需求相一致,迎合了稻谷干燥热能匹配要求。

在实际干燥过程中,存在着机壁吸热及散热、物料升温热损、流动功损(熵产)及蒸发出的水分带入干燥介质的显热,不可避免地要引起介质的焓变。应用本解析理论时,可以把引起干燥介质焓降低的因素,作为一个整体,独立于物料深层干燥过程之外,首先从送风的热焓中减去该部分热损,得到相当于热风经历理论过程的焓值,并以此作为干燥操作的送风条件。

由于物料的干燥常数  $k$  和平衡干基含水率  $M$ 。

都是取决于温度和湿度的函数,通风量和床层厚度都是已知量,所以,对应粮食流经在相应干燥段的时间,即可得到不同位置上的物料含水率。在确定的干燥机上,只要准确地测量出环境湿度、送风温度、风量和进机粮最初水分变动情况,试验考证逆流层稻谷在干燥层出口的实际含水率,按照本文给出的解析式,即可计算出稻谷穿越干燥层后以及在不同床深位置上的含水率,进而分析其耗能结构。

解析结果对进一步研究稻谷深层干燥机理、物性参数及干燥参数,指导干燥设计等具有重要指导意义。为实现干燥过程动态跟踪和调控,大幅度降低能量消耗、提高干燥效率和干燥机产能提供了含水率在线解析方法。

## 5 结论

(1)高湿稻谷逆流干燥、缓苏过程,可以用干燥质量平衡方程的解析式表征出干燥层内的水分分布,解析结果与实际测试的出机粮水分偏差在 ±0.5% 的范围内,证实了解析结果的可靠性。

(2)加大逆流干燥通风面积、大幅度降低风速及风量谷物比,延长热风在层内的流经时间,能够有效地提高逆流干燥的热能利用效果。

(3)假设稻谷的流动方向是沿进入干燥层到离开干燥层并以在各逆流层中的最大去水速率位置为界,把逆流干燥过程区分为前段和后段,可以推断出,影响逆流干燥前段干燥速率的主要因素是干燥介质接纳水分的能力。而影响逆流干燥后段干燥速率的主要因素是物料的含水比率以及水分与物料的结合能。

(4)在干燥层厚度 0.5 m 的条件下,稻谷在逆流缓苏工艺条件下,经历各干燥段时的去水速率均经历的是升速干燥过程。

(5)经过缓苏后的稻谷,干燥过程同样具有二段性,可以把经过缓苏后的稻谷进入各级逆流干燥层(入口位置)时的含水率,作为解析计算该级逆流干燥层内水分分布的初期含水率。

## 参 考 文 献

- 1 成军虎,周显青,张玉荣,等.粮食干燥品质变化及评价方法研究进展[J].西部粮油科技,2011,36(2):47-50.
- 2 胡万里,李长友,徐凤英.稻谷薄层快速干燥工艺的试验[J].农业机械学报,2007,38(4):103-106.  
Hu Wanli, Li Changyou, Xu Fengying. Experimental study on fast dry craft of rough rice thin layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 103-106. (in Chinese)
- 3 付志一,华云龙.稻谷吸湿过程中内部应力峰值分析[J].农业机械学报,2000,31(3):59-62.  
Fu Zhiyi, Hua Yunlong. Analysis of peak stress in rice kernel during moisture absorption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3): 59-62. (in Chinese)
- 4 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):30-34.  
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): 30-34. (in Chinese)

- 5 李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 56 – 59.  
Li Changyou. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56 – 59. (in Chinese)
- 6 程卫东, 柏雪源, 王相友, 等. 干燥过程中谷物水分在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2000, 31(2): 53 – 55.  
Cheng Weidong, Bai Xueyuan, Wang Xiangyou, et al. An on-line measurement and monitoring system of grain moisture during drying Process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(2): 53 – 55. (in Chinese)
- 7 崔清亮, 郭玉明, 郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4): 91 – 96.  
Cui Qingliang, Guo Yuming, Zheng Decong. Design and test of on-line measurement system for the moisture content of the freeze-drying materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 91 – 96. (in Chinese)
- 8 Li Changyou. Analytic solution of mass conservation equation for drying process[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(2): 1 – 11.
- 9 Li Changyou, Shao Yaojian. An analytical solution of the granular product in deep-bed falling rate drying process[J]. Drying Technology, 1999, 17(9): 1961 – 1969.
- 10 Van Meel D A. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air[J]. Chemical Engineering Science, 1958(9): 36 – 44.
- 11 本橋国司, 細川明. モミ乾燥への通気乾燥理論の適用(Ⅱ)[J]. 農業機械学会誌, 1980, 41(4): 593 – 601.
- 12 李长友, 邵耀坚, 上出顺一. 颗粒物料深床降速干燥过程的解析[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 194 – 199.  
Li Changyou, Shao Yaojian, Kamide Junichi. Analytical solution of granular product in a deep-bed falling rate drying process[J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(1): 194 – 199. (in Chinese)
- 13 Li Changyou, Ban Hua, Shen Wenhao. Self-adaptive control system of grain drying device[J]. Drying. Technology, 2008, 26(11): 1351 – 1354.
- 14 李长友, 邵耀坚, 上出顺一. 颗粒农产品深床干燥过程的解析解法Ⅱ量纲转换与应用[J]. 华南农业大学学报, 1998, 19(3): 119 – 123.  
Li Changyou, Shao Yaojian, Kamide Junichi. An analytical solution of the granular product in a deep-bed drying process(Ⅱ) — Transformation and application of dimension[J]. Journal of South China Agricultural University, 1998, 19(3): 119 – 123. (in Chinese)
- 15 李长友. 粮食热风干燥系统火用评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 1 – 6.  
Li Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 1 – 6. (in Chinese)
- 16 李长友, 张焯, 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): 194 – 199.  
Li Changyou, Zhang Ye, Mai Zhiwei. Design and experimental study of dryer for high moisture grain storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 194 – 199. (in Chinese)
- 17 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, 2001: 43 – 46.

## Analytical Models of Multistage Counter Flow Drying and Tempering Process of Grain

Li Changyou Fang Zhuangdong

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

**Abstract:** In order to analyze the moisture distribution of rough rice with high moisture content within counter flow drying layer and achieve the dynamic tracking of drying process and its control, based on the moisture diffusion model of drying process and the mass conservation equation of deep bed drying process, grain moisture variation in counter flow drying process was analyzed, and the moisture distribution in grain layer and the analytic expression of drying rate were deduced. Experiments indicate that 50°C hot air still has drying capacity after penetrating a 0.5-meter-thick refluxed zone when the ratio of air flux to grain mass is 4. The deviation of grain moisture from discharge hopper between mathematical explanations and experimental results was within  $\pm 0.5\%$ , and it confirmed the reliability of the analytical model.

**Key words:** Paddy Countercurrent drying Moisture content Analytical model