

粮食热风干燥热能结构与解析法

李长友, 马兴灶, 方壮东, 张 焯

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为了揭示粮食干燥系统客观焗作用效果, 定量评价环境条件、粮食状态对干燥机效能的影响, 分析了粮食热风干燥势场的来源与特征, 建立了干燥特性函数、给出了粮食和介质状态参数解析图, 分析了热量及效率, 定量评价了热能结构, 结果发现利用温度和相对湿度变化范围分别为 26~35℃和 40%~55%的自然空气直接干燥初期湿基含水率 38.6%的高湿稻谷, 平均小时降水率达 1.2%, 在 5HP-3.5 型循环干燥机上的热风干燥试验结果显示, 稻谷的干基含水率由 27.06%降至 16.96%的过程中, 单位气耗量由最初的 113.0kg/kg 增加到了 546.4 kg/kg, 单位热耗量由最初的 2548.9 kJ/kg 增加到了 16352.7kJ/kg, 排气热损失由最初的 6.2% 增加到了 30.6%。解析出了造成干燥效率偏低的主要原因是热能匹配性较差。指出了评价粮食干燥工艺及干燥机能量利用效果不能忽视客观干燥焗的作用。研究结果为指导干燥设计, 形成粮食干燥系统公平的评价标准, 提供了科学的解析方法。

关键词: 粮食; 干燥; 热能; 焗; 解析法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.09.027

中图分类号: S226.6; TS210.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-09-0220-09

李长友, 马兴灶, 方壮东, 等. 粮食热风干燥热能结构与解析法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 220-228.
Li Changyou, Ma Xingzao, Fang Zhuangdong, et al. Thermal energy structure of grain hot air drying and analytical method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 220-228. (in Chinese with English abstract)

0 引言

中国是世界上最大的粮食生产及消费国, 2012年全国粮食总产量达 58957 万 t。随着国家一系列惠农政策的实施, 农村粮食生产方式再度出现集约化倾向, 对烘干机需求迫切, 但我国粮食干燥设备存在的主要问题之一是干燥效率较低, 在不同地区和极端气候条件下的作业效能差异极大。还没有形成对应不同环境条件、物料特征, 有可比性、公平合理地评价干燥设备工艺技术及作业效能的统一标准^[1], 重要的原因之一是对粮食干燥系统的耗能结构及其解析方法研究比较欠缺。发展的盲目性很大。投放市场的很多干燥设备不仅能耗很高、自动化程度低、工作可靠性差, 而且干燥出现严重的焦糊粒还夹杂有大量未达标的湿粒, 给农民造成的损失不可忽视。就粮食干燥传统的操作方式而言, 从特定的试验, 获得了大量不同工艺过程中的干燥特性曲线^[2-7]、基于传统的模型表达式, 给出了相应的

干燥特性参数^[8-12], 开发了一些水分检测与过程控制系统^[13-17]、提出了一些节能干燥工艺措施^[18-21], 进而研究物料内部热质传递解析法^[22-26], 但揭示干燥系统能量消耗本质的内容较少, 难以定量评价粮食干燥中的热能结构及说明转换与传递的机理。

由于干燥受环境因素、粮食物性、流动特征以及处理工艺和设备几何结构等众多因素的影响, 环境条件、物性特征的变动及处理工艺上的差异, 使得系统中的能量在数量和质量上的损失都存在很大差异^[27-30], 而要从本质上说明这些差异, 提高试验分析结果的可比性、形成客观公平的评价标准, 还必须针对粮食干燥势场的来源与特征, 多组分、多相系能量转换与传递定量解析理论进行深入研究, 为此, 本文从粮食干燥系统的状态参数, 焗传递入手, 并把水分迁移的现象看作是一定数量的能量迁移, 基于焗分析法和热力学基础, 解析粮食干燥的热能结构及其转换与传递、给出图解和定量评价的计算方法, 初步试验考证解析理论的可靠性, 探索干燥节能的途径, 为粮食干燥合理的能量匹配和干燥机效能评价提供一些理论依据。

1 干燥势场的来源与特征

不同的能量以及相同数量的能量在不同的环境以及不同组分, 不同相系的系统中, 都会有不同的使用效果, 根源在于能量之中所含的焗不同。就

收稿日期: 2013-12-03 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家自然科学基金 (31371871); 高等学校博士学科点专项科研基金博导类课题 (20114404110021); 广东省产学研项目 (2012B091000135)。

作者简介: 李长友 (1958-), 男, 陕西蒲城人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业装备技术研究。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: lichyx@scau.edu.cn
农业工程学会会员 (B041100045S)

粮食利用空气介质干燥的势场来源和性质而言, 存在 2 类形式的焓及其传递。一类是存在于粒体内部的因生命活动产生的势场和自然界存在的势场引起的焓传递, 主要体现在水分在粮食颗粒内部的运动和粮食中的液态水分汽化时的饱和蒸汽压与干燥介质中的水蒸气分压力之差引起的质焓传递, 此类焓是自然界提供给干燥系统, 可以无偿利用的有用能, 其传递是客观的, 非人之所为, 也就是说, 新收获的高湿粮食, 放在自然空气中, 必然要自发地去水, 最终自发地达到与环境介质条件对应的平衡含水率状态。另一类是人为的干燥操作行为产生的势场引起的焓传递, 主要体现在, 为强化干燥过程, 提高干燥速率, 向干燥介质输入热能, 以提高温度, 增大比容, 降低干燥室内的水蒸气分压力, 提高介质流动速度等行为引起的焓传递, 此类属于主观焓, 其传递具有恒定性、规律性和可控性的特点, 受时间和空间的约束。但由于实际的深床干燥过程中, 存在环境条件、机器的工况, 进粮水分和温度波动等诸多不确定因素, 物料含水率状态参数还随时间和位置变化, 要获得优质高效的节能干燥工艺, 揭示过程动力与过程阻力的关系, 还必须深入研究, 粮食在非稳态干燥过程中的焓传递。

2 特性函数及热量焓

2.1 特性函数

干燥是由湿粮、热风构成的多组分、多相系热力系统, 但系统中的质量迁移可以看作是单一组分的水分迁移并把水分迁移的现象看作是一定数量的能量迁移, 系统到达的终态点是粮食的平衡含水率。在粮食到达平衡含水率后, 系统的一切宏观变化均停止, 系统内部各处的性质均匀一致, 各处的压力、温度、比体积等所有状态参数都保持不变。对应系统的每一个状态, 状态参数都有一定的数值, 在忽略重力场的条件下, 系统的宏观性质则不随时间变化。而当粮食与热风之间存在温度、压力、湿分等任何一种不平衡势时, 则必然引起相互作用而发生能量交换, 温度不平衡势导致热量的交换, 水分蒸发, 而蒸发又必然伴随做功。由于热风干燥系统中独立的能量方式, 只有水分蒸发对外做功(准静功)和温差引起的热量传递 2 种, 所以, 干燥状态函数中独立的自变量个数只有 2 个。对于传热过程, 温度是迁移势, 系统中的熵、焓、焓等都是传热特性函数热量的综合坐标。而干燥中, 物料内水分迁移的质量是水分迁移势的综合坐标, 它可用系统中的自由能、焓、熵、焓等任一个特性函数对水分质量迁移的偏导数来表示^[30]。基于吉布斯-亥姆霍兹自由能和自由焓得到热力学第一和第二

定律表达式:

$$TdS = dH - Vdp - \mu_{gv} dm_v \quad (1)$$

式中: T 是热力学温度, K; S 是熵, kJ/K; H 是焓, kJ; V 是体积, m^3 ; p 是压力, Pa; μ_{gv} 是水蒸气迁移势, Pa; m_v 是水蒸气质量, kg。

温度特征函数:

$$T = \frac{\delta Q}{dS} \quad (2)$$

水蒸气迁移势特征函数:

$$\mu_{gv} = \frac{dE_x}{dm_v} \quad (3)$$

式中: Q 是热量, kJ; E_x 是焓, kJ。

把汽化蒸发 1 kg 水蒸气的焓、比容、熵分别用 h 、 v 、 s 来表示时, 热力学第一和第二定律表达式则被表示成:

$$Tds = dh - vdp + R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} dm_v \quad (4)$$

积分后得到, 从粮食中汽化蒸发 1 kg 水的单位热耗量, 即粮食内部的传热特性函数 q_v 的表达式:

$$\begin{aligned} q_v &= \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} h - R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}} - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} \\ &= \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} \gamma(T_g) - R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}} - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: T_g 为粮食温度, K; p_{sg} 为对应 T_g 的饱和蒸汽压, Pa; p_{gv} 为粮食上表面的水蒸气分压力, Pa; p_v 为空气介质中的水蒸气分压力, Pa; h 是水蒸气的比焓, kJ/kg; $h = \gamma(T)$, γ 是水分汽化潜热系数, kJ/kg。在等温条件下, h 的变化量等于 1 kg 水的汽化潜热,

$\frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v}$ 表示水分迁移的方向, $-R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}}$ 是蒸发

1 kg 水对环境所做的功, $-R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}}$ 是从物料中蒸

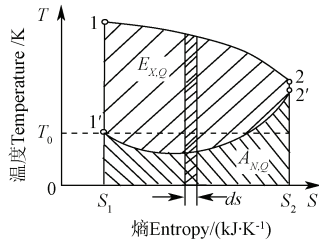
发 1 kg 水分的自由能减少量, 即粮食在不可逆热力过程中, 迁移 1 kg 水蒸气对外做的最大有用功。

2.2 干燥系的热量焓及焓效率

水分蒸发消耗的是系统中的热能, 干燥过程的极限是粮食到达平衡含水率状态点, 即起算干燥焓的基准点^[27], 而粮食在干燥过程中的平衡含水率状态是温度和湿度的函数, 即 $M_e = f(t, \varphi)$, φ 是空气的相对湿度, %, t 为温度, $^{\circ}C$ 。在平衡状态时的粮食温度等于介质温度。平衡含水率可以在特定的温湿度条件下, 通过试验得到并已有大量文献揭示了其变化的规律。依照已有的计算式和干燥过程气流状态的变化特征, 可以得到粮食从初态点到达终态

点的温度变化过程线，即零焓点和干燥过程的焓分析参考基准线。

在实际的干燥过程中，热风释放显热经历降温增湿过程线，而粮食是对应干燥条件，可以是降温、恒温、升温的多种温度变化过程，热风与粮食间的温度差是热量的迁移势，取熵为干燥系热量的综合坐标并假设粮食的初态点温度等于环境温度 T_0 ，表征干燥室的温熵关系如图 1 所示。



注: $E_{X,Q}$ 为焓, kJ; $A_{N,Q}$ 为熵, kJ; 1 为空气的初态点; 1' 为粮食的初态点; 2 为空气的终态点; 2' 为粮食的终态点; T_0 为粮食初始温度, K; S_1 、 S_2 分别为初态点和终态点的熵。
 Note: $E_{X,Q}$ is Exergy, kJ; $A_{N,Q}$ is Anergy, kJ; 1 is initial state of air; 1' is initial state of grain; 2 is final state of air; 2' is final state of grain; T_0 is initial temperature of grain, K; S_1 、 S_2 respectively for initial state and final state points of entropy / (kJ·K⁻¹).

图 1 干燥室温熵图
 Fig.1 Tephigram of drying chamber

在图 1 中干燥室内的热量焓是干燥介质温度与粮食温度变化过程线包围的面积。包含加热器向干燥介质提供的热量和环境介质携带的干燥焓，假设热风温度为 T_a , K。根据卡诺定理得到

$$E_{X,Q} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_a}\right) \delta Q - \int_{1'}^{2'} \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \delta Q = Q_{12} - Q_{1'2'} \quad (6)$$

由式 6 和图 1 知，干燥室的热量焓与粮食的温度变化和干燥介质放热过程的特征有关。

干燥介质从状态 1 变化到状态 2、对应的粮食从 1' 变化到 2' 的过程中，温度函数对熵的积分等价于平均值与变化前后的熵差之积，即介质的平均放热温度和粮食的平均温度是评价干燥室热量传递的定性温度，于是式 (6) 可表示为：

$$E_{X,Q} = (T_m - T'_m)(S_2 - S_1) \quad (7)$$

式中: T_m 是介质平均放热温度, K; T'_m 是粮食平均温度, K。 S_1 、 S_2 分别是初态和终态熵, kJ/K。

热量焓包含了人为提供给介质的干燥焓和环境介质拥有的部分干燥焓，而由式 (5) 所表示的蒸发水分消耗的能量中，消耗在粮食内部的单位热量

为 $\frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} \gamma(T_g) - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}}$, kJ/kg; 蒸发 1kg 水

蒸气对环境所做的功为 $-R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}}$, 记作 w_0 , kJ/kg;

p_{gv} 和 p_{gs} 分别为对应粮食温度的水蒸气分压力和饱和蒸气分压力, Pa。而从物料中蒸发出的水分，进入介质后，状态发生变化，1 kg 水分在对介质做功的同时，从环境中获得与 w_0 相同数量的焓，在不可逆过程中为 w_0 再加上过程中的焓损。就粮食干燥而言，做出 w_0 功的焓转换与传递仅仅发生在介质中，最终消耗在环境中，与粮食自身的干燥能量消耗无关。所以，粮食干燥过程的最大热焓效率为：

$$\eta_{eq} = \frac{\frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} \gamma(T_g) - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}}}{(T_m - T'_m)(S_2 - S_1)} \quad (8)$$

3 干燥状态图解及热量结构分析

3.1 干燥状态图解

为便于计算和确定热风干燥系统粮食和介质的状态参数，分析其状态变化过程和能量消耗结构，以湿空气的湿含量 d (g/kg)、焓 h (kJ/kg)和湿粮的干基平衡含水率 M_e (%)为基础，在环境压力为 101.325 kPa 的条件下，取湿空气的焓为纵坐标、湿含量为横坐标，为了使图线清晰，纵坐标与横坐标的夹角选取 135°，基于式 (9)、(10)、(11) 绘制出干燥系统状态参数变化如图 2 所示。

空气湿含量：

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - \varphi \cdot p_s} \quad (9)$$

湿空气的焓：

$$h = 1.005t + d(2501 + 1.86t) \quad (10)$$

粮食干基平衡含水率：

$$M_e = \left[\frac{-\ln(1 - \varphi)}{A(t_a + B)} \right]^n \quad (11)$$

式中: d 为空气湿含量, g/kg; h 为焓, kJ/kg; t_a 为干燥温度, °C; $\varphi = \frac{p_v}{p_s}$ 为空气的相对湿度, %; p_s 是饱和水蒸气分压力, kPa; A , B , n 为系数^[8], 其值见表 1。

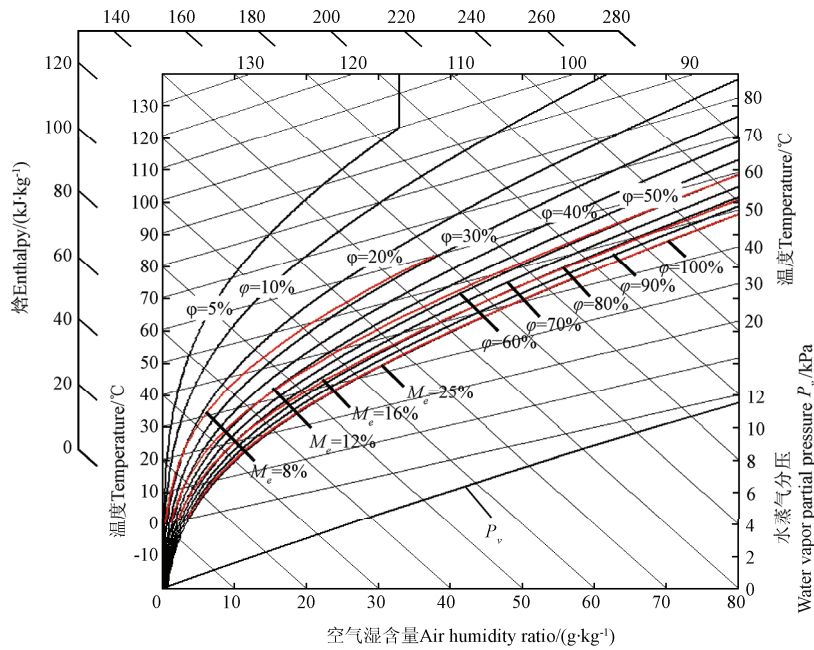
表 1 不同粮食的 A 、 B 、 n 系数值
 Table 1 Coefficient value of A , B , n in different grain

名称 Name	A	B	n
稻谷 Paddy	1.9187×10^{-5}	51.161	2.4451
小麦 Wheat	1.2300×10^{-5}	64.346	2.5558
玉米 Corn	8.6540×10^{-5}	49.810	1.8634
高粱 Sorghum	0.8532×10^{-5}	113.725	2.4757
大豆 Soybean	50.8600×10^{-5}	43.016	1.3628
大麦 Barley	2.2900×10^{-5}	195.267	2.0123

粮食干燥水分迁移的方向，取决于粮食和介质双方的温度与湿含量。图 2 中的等平衡含水率线是

粮食中水分出入的界限线，当干燥介质的状态处于等平衡含水率线的左侧时，粮食被介质干燥，反之被吸湿。从图 2 知，干基含水率在 20% 以上时，相对湿度 90% 的空气对其仍具有干燥能力，当干基含

水率在 25% 以上时，等平衡含水率线非常接近空气的饱和湿度线，表明在一般情况下，自然空气对高湿粮食具有较强的干燥能力，有效地利用自然介质携带的客观焓，是实现高效节能干燥的重要途径。



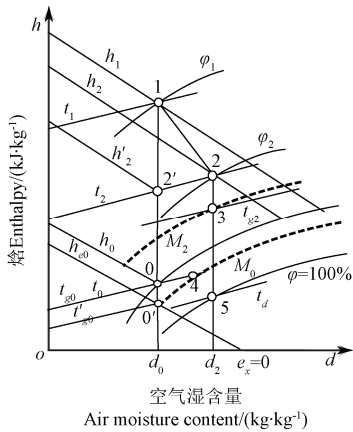
注：φ 表示空气等相对湿度，%； M_e 表示粮食干基等平衡含水率，%； P_v 表示水蒸气分压力交换线。
Note: φ is air relative humidity, %; M_e is dry basis equilibrium moisture content of grain, %; P_v is exchange line of steam vapor partial pressure.

图 2 热风干燥系统粮食和介质状态参数图

Fig.2 Relations between hot air drying system of grain and drying medium state parameter

3.2 能量结构分析

干燥系统的状态变化及焓结构如图 3 所示。



注：h、t、d、φ 分别为空气的焓、温度、湿含量、相对湿度；下标 0 表示初态和环境态；下标 1、2 表示进气和排气状态点；2' 空气升温热损失状态点；1 和 2 是干燥器进、出的状态； t_g 、 M 表示谷物温度、平衡含水率； h_{e0} 和 $e_x=0$ 为零焓基准线；3 表示干粮状态；4 表示湿粮状态；5 表示露点。

Note: h、t、d、φ, respectively for enthalpy, temperature, moisture content and relative humidity of air; Subscript 0 is initial state and the environment state; Subscripts 1 and 2 are state point of air inlet and outlet; 2' is state points of air temperature rise heat loss; 1 and 2 is inlet and outlet status of dryer; t_g and M is grain temperature and equilibrium moisture content; h_{e0} and $e_x=0$ is zero exergy baseline; 3 is state of dry grain; 4 is state of wet grain; 5 is dewpoint.

图 3 干燥过程状态参数变化与能量结构

Fig.3 Relations between state parameter and energy structure during drying process

环境介质从状态点 0 等湿加热到状态点 1 后，进入干燥器，自发地与粮食进行热质交换，假设在状态点 2 排出干燥室。在此过程中，介质增湿降温，粮食沿保持焓平衡的去湿过程，从初态点 4 到达状态点 3，消耗的不仅有主观焓还包含客观干燥焓。

3.2.1 主观热量焓及热效率

在定压状态下，干燥介质从加热器中获取的热量体现在介质自身焓的变化量^[25]，所以，图 3 中的焓焓就是干燥系的热量焓。自然空气在加热器中获得的热量 $q=h_1-h_0$ ，此部分能量主要消耗在：
① 介质经过干燥器时的热损失 $q_s=h_1-h_2$ ，包括粮食升温、机壁散热、水分蒸发带入显热、机内介质惯性流动热损失等；
② 水分汽化蒸发耗热 $q_v=h_2-h'_2$ ；
③ 排气热损失 $q_p=h'_2-h_0$ 。在把干燥完全归结为人为供热而产生的结果时，则干燥系统热效率被表示为：

$$\eta_q = \frac{h_2 - h'_2}{h_1 - h_0} \quad (12)$$

实际的干燥并非单纯人为供热作用的结果，原因在于蒸发水分还有自然空气携带的客观干燥焓在起作用，所以，传统的以主观热效率作为干燥效率评价指标，没有公平地反映干燥系统的能效。

3.2.2 客观热量焓及焓效率

由图 3 知,最初的自然空气携带有 $h_0 - h_{e0}$ 的干燥焓, h_{e0} 是对应零焓基准线 e_{x0} 的焓,粮食携带有对应 $t'_{g0} - t'_{g0}$ 温差势的热量焓,在高湿粮食表面存在较多的自由水时,利用自然空气不仅可以去除其大量的水分,同时,也可以使粮食的温度降至 t'_{g0} 。干燥介质实际携带的干燥焓为 $h_1 - h_{e0}$,其中包含主观热量焓 $h_1 - h_0$ 和客观热量焓 $h_0 - h_{e0}$ 2 部分。实际输入干燥室的热量焓为 $h_1 - h_{e0}$,干燥室的实际焓效率为:

$$\eta_{ex} = \frac{h_2 - h'_2}{h_1 - h_{e0}} \quad (13)$$

焓是干燥过程进行的条件,可以用来预测湿分传递的方向和深度。粮食的初期含水率越高,相对携带的客观干燥焓越多。粮食携带的热量焓减少了介质焓焓的消耗,在强制通风的条件下,由于流动焓的存在会使物料与静态介质对应的平衡含水率进一步降低,客观焓的干燥能力和降温效果都必然会得到进一步强化,所以,评价粮食干燥系统能量利用效果,不能仅仅停留在主观热效率上,干燥工艺设计不能忽视干燥系统的客观焓的作用。

4 焓作用效果及干燥系统能量结构试验考证

为了考证干燥系统的热能结构和焓作用效果,利用温度、湿度变化范围分别为 26~35℃ 和 40%~55% 的自然空气干燥初期温度 36℃、干基含水率 38.6% 的高湿稻谷,利用常温自然空气,在不加热空气的条件下,考察客观焓的作用效果。

对常温干燥至 27.06% 的稻谷,在 5HP-3.5 型循环干燥机上进行热风干燥试验和能效评价。

4.1 试验测试样机

试验装置为 5HP-3.5 型循环干燥机,样机结构如图 4 所示。



注: 1. 水分检测仪; 2. 提升机; 3. 干燥机; 4. 引风机; 5. 控制器
Note: 1. Online detector of grain moisture; 2. Conveyor; 3. Dryer; 4. Induced draft fan; 5 Controller

图 4 5HP-3.5 干燥试验样机
Fig.4 5HP-3.5 Drying test dryer

试验地点: 江西省宜春市温汤镇(隆平高科生态农业有限公司), 时间 2012 年 9 月~10 月。

主要测试仪器如表 2 所示。

表 2 主要试验仪器

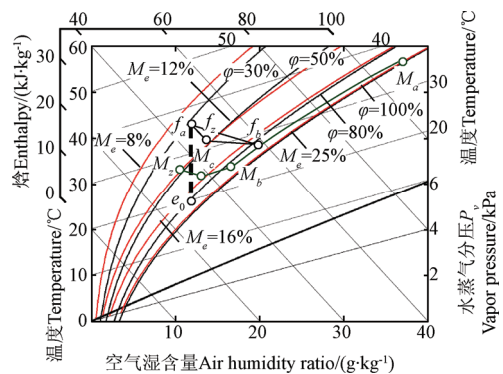
Table 2 Main test instrument		
仪器名称、型号 Name and Type	量程 Measurement range	精度 Precision
风速仪 Anemometer	0.4~30.0 m·s ⁻¹	0.1 m·s ⁻¹
温湿度表 Temperature and humidity instrument	-20~60℃、 0~100%	0.1℃、0.1%
8925 型声级计 Type 8925 sound level meter	40~130 dB(A)	±0.2 dB
QY-200 型轻便式倾斜微压计 Portable-type QY-200 tilting micro-manometer	0~2 000 Pa	1 级
BSA124S 型电子天平 Type BSA124S electronic balance	120 g	0.1mg
CXR-ZX- I 10-40 型粮食水份在线检测仪 Type CXR-ZX- I 10-40 online detector of grain moisture	10%~40%	±0.5%

5HP-3.5 型干燥机内的干燥缓苏比 1 : 3.2, 干燥室容积 7 m³, 配置引风机型号 4-72-No4.5A, 引风量 5 790~10 485 m³/h, 全压 2 657~1 833 Pa。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 客观焓作用效果

采用引风方式,利用不加热的自然空气直接干燥高湿稻谷,在通风 2 h 后,稻谷温度由初期的 36℃ 降至了 25℃,此后,稻谷的温度维持基本不变,稻谷在干燥机内的平均每小时降水 1.2%。在稻谷的含水率降至 20.5% 时,稻谷温度回升到了 29℃,其状态变化过程如图 5 所示。



注: $M_a \sim M_b$ 是稻谷降温去湿过程线; $M_b \sim M_c$ 是稻谷等温去湿过程线; $M_c \sim M_e$ 是稻谷升温去湿过程线; $f_a \sim f_b$ 是气流增湿增焓过程线; $f_a \sim f_e$ 是气流等焓增湿过程线; $f_b \sim f_e$ 是排气状态变化过程线; e_0 是零焓点。
Note: $M_a \sim M_b$ is process curve of paddy cooling and dehumidifying; $M_b \sim M_c$ is process curve of paddy isothermy and dehumidifying; $M_c \sim M_e$ is process curve of paddy warming and dehumidifying; $f_a \sim f_b$ is process curve of airflow humidifying and increasing enthalpy; $f_a \sim f_e$ is process curve of airflow humidifying and isenthalpic; $f_b \sim f_e$ is change process curve of exhaust condition; e_0 is zero point of exergy.

图 5 粮食干燥系统状态参数图
Fig.5 State parameter of grain drying system

在持续通风的过程中，空气状态变化是由最初的状态点 f_a ，对应粮食的初态点 M_a 沿增焓增湿的路径到达 f_b 点排除机外；高湿稻谷的状态是沿去湿降温路径由 M_a 点变化到 M_b 点，在维持粮温基本不变的状态下，由高湿含水率状态持续降低到 M_c 较低的含水率状态，到达 M_c 以后，随着稻谷含水率的持续降低，排气状态由 f_b 逐渐变化到 f_z 终态点；此时稻谷的含水状态是沿升温去湿过程线，由 M_c 状态变化到 M_z 终态点。在稻谷较低的含水率段，对应去水速率的持续降低，干燥机内空气的状态沿

接近等焓的过程线到达终态点 f_z 。稻谷降温并维持 25℃ 低点温度现象，表明稻谷携带有对应温差势 $t_{g0} - t'_{g0}$ 的热量焓；空气携带有 $h_0 - h_{e0}$ 的干燥焓，同时，也印证了稻谷在高含水率段，水分蒸发自由能变化，即 $-R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}}$ 值很小的解析结果。

4.2.2 热风干燥能效评价

5HP-3.5 型稻谷循环干燥机热风干燥试验条件及测试数据如表 3 所示，基于图 3 解析出的干燥机热风干燥耗能结构如表 4 所示。

表 3 5HP-3.5 型稻谷干燥机热风干燥试验测试数据一览表
Table 3 Testing data of hot-air drying for 5HP-3.5 type grain dryer

干燥时间 Drying time/h	稻谷含水率 Grain moisture/%	温度 temperature/℃				干燥速率 Drying rate/(%·h ⁻¹)	排气相对湿度 Relative humidity of exhaust air/%	去水量 Evapotranspiration /kg	单位气耗量 Gas consumption per unit/(kg·kg ⁻¹)
		进风 Inlet air	排气 Exhaust	环境 Environment	稻谷 Grain				
0~0.5	27.06	70.0	28.3	24.9	27.5	3.20	89.6	78.8	113.0
>0.5~1.0	25.47	73.0	30.0	23.9	30.6	3.19	88.4	85.9	103.7
>1.0~1.5	24.07	78.0	31.0	21.7	30.4	2.80	87.3	76.2	116.8
>1.5~2.0	22.85	75.0	33.4	21.4	28.2	2.44	86.9	67.3	132.3
>2.0~2.5	21.65	73.4	33.5	20.7	31.5	2.39	86	66.8	133.3
>2.5~3.0	20.48	71.5	34.0	21.1	32.4	2.35	84.7	66.2	134.6
>3.0~3.5	19.62	76.3	34.2	20.3	31.4	1.73	82.4	49.3	180.7
>3.5~4.0	19.05	71.8	33.8	19.2	31.7	1.14	81.5	32.9	271.0
>4.0~4.5	18.62	77.5	33.7	19.6	30.5	0.85	79.6	24.7	360.9
>4.5~5.0	18.20	76.3	32.5	19.3	31.0	0.84	79.4	24.6	361.3
>5.0~5.5	17.79	71.8	33.0	18.9	32.0	0.84	76.9	24.6	362.6
>5.5~6.0	17.51	76.5	33.5	18.6	32.7	0.55	73.5	16.3	545.1
>6.0~6.5	17.23	78.3	34.6	18.3	34.0	0.55	71.7	16.3	545.1
>6.5~7.0	16.96	71.3	34.3	18.1	33.0	0.55	70.2	16.3	546.4

注：稻谷初期干基含水率 27.06%；干燥机内初期稻谷质量 3 100, kg；实际送风量 9 556.645, kg/h。

Note: Initial dry basis moisture content of grain was 27.06%; Initial weight of grain in dryer was 3 100, kg; Actual air supply volume was 9 556.645, kg/h.

表 4 5HP-3.5 型稻谷干燥机热能结构一览表
Table 4 Caloric value structure of 5HP-3.5 type grain dryer

干燥时间 Drying time/h	供热量 Heat supply/ (kJ·h ⁻¹)	自然介质携带的焓 Exergy carried by natural medium/ (kJ·kg ⁻¹)	单位热耗量 Heat consumption per unit/(kJ·kg ⁻¹)	单位客观焓耗量 Objective exergy consumption per unit/(kJ·kg ⁻¹)	排气热损失 Heat loss from exhaust gas/%	干燥室热损失 Heat loss from drying chamber/%	干燥室热效率 Thermal efficiency of drying chamber /%	干燥室焓效率 Exergy efficiency of drying chamber /%
0~0.5	401 597.8	9.9	2 548.9	343.0	6.2	-3.9	97.73	86.14
>0.5~1.0	437 216.2	8.9	2 546.3	395.0	6.9	-4.8	97.83	84.70
>1.0~1.5	501 329.4	6.7	3 287.6	361.6	10.8	13.4	75.77	68.27
>1.5~2.0	477 287.0	6.4	3 546.1	228.7	17.4	12.4	70.25	65.99
>2.0~2.5	469 272.8	5.7	3 511.6	213.3	22.8	6.3	70.94	66.88
>2.5~3.0	448 792.2	6.1	3 390.6	179.9	25.4	1.1	73.47	69.77
>3.0~3.5	498 658.0	5.3	5 058.5	159.3	23.0	27.7	49.25	47.74
>3.5~4.0	468 382.4	4.8	7 126.1	86.7	26.4	38.6	34.96	34.54
>4.0~4.5	515 576.8	4.4	10 446.5	64.9	25.2	50.9	23.85	23.70
>4.5~5.0	507 562.6	4.7	10 296.4	58.5	24.7	51.1	24.19	24.06
>5.0~5.5	471 053.8	3.9	9 589.5	57.8	25.0	49.1	25.98	25.82
>5.5~6.0	515 576.8	3.6	15 780.6	34.9	24.4	59.9	15.79	15.75
>6.0~6.5	534 276.4	3.3	16 352.7	33.4	24.8	59.9	15.23	15.20
>6.5~7.0	473 725.0	3.1	14 533.4	27.1	30.6	52.2	17.14	17.11
平均 Average	480 021.9	5.5	5 200	160.3	21.0	29.5	49.46	46.12

从表3、表4可以看出：①在引风量、送风温度、湿度基本相同的条件下，对应不同含水率段的粮食，干燥的量消耗差异很大。在小时送风量9 556.645 kg，干燥缓苏比1:3.2，机内湿稻谷容量3 100 kg时，粮食的湿基含水率由27.06%降至16.96%的过程中，单位气耗量由最初的113.0 kg/kg增加到了546.4 kg/kg，增大了3.8倍、单位热耗量由最初的2 548.9 kJ/kg增加到了16 352.7 kJ/kg，干燥室排气热损失由最初的6.2%增加到了30.6%，增大了3.9倍。表3、表4中数据变化，反映出造成干燥系统的平均排气热损失偏高，干燥室的平均热率和烟效率偏低的主要原因在于干燥过程的能量匹配性较差。合理的干燥工艺应是对应粮食的含水率和降水幅度来匹配合理的风量。②从最初干燥室的热损失为-3.9%，而在干燥后期高达59.9%，对应的干燥室的热效率由最初的97.73%降低到了15.23%，干燥室的热烟效率由最初的86.14%降低到了15.20%的干燥能效变化，证实了粮食热风干燥消耗的能量中不仅有主观烟，也包含有客观烟，评价干燥能效不能忽视客观干燥烟的作用。

5 结 论

1) 粮食的热风干燥过程，可以用态函数表达，基于状态参数，建立的粮食干燥热量特征函数，能够清晰、完整地解析干燥系统的热能结构。

2) 通过从理论解析和试验考证，揭示了粮食携带有对应温差势的热量烟；自然空气携带有客观干燥烟。

3) 粮食干燥消耗的能量中不仅有主观烟，还包含客观烟，评价其能量利用效果，不能仅仅停留在主观热效率上，干燥工艺设计及其评价不能忽视客观烟的作用。

4) 给出的热风干燥系统粮食和介质状态参数图，能够清晰地表征出干燥烟效率，为定量、公平地评价干燥机在不同环境条件下的能量利用效果提供了科学地解析方法。

[参 考 文 献]

- [1] 曹崇文. 干燥机单位热耗和干燥能力折算的研究[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(1): 9-12, 23.
Cao Chongwen. Study on conversion between unit heat consumption and drying capacity of a grain dryer[J]. Drying technology & equipment, 2008, 6(1): 9-12, 23. (in Chinese with English abstract).
- [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 with English abstract)
- [3] 郑先哲, 夏吉庆, 杨悦乾. 增湿加热稻谷干燥工艺试验[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 81-83.
Zheng Xianzhe, Xia Jiqing, Yang Yueqian. Experimental study on paddy drying technology by using humidified and heated air[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(3): 81-83. (in Chinese with English abstract).
- [4] 谢奇珍, 刘进, 师建芳, 等. 水稻混流干燥工艺的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 129-132.
Xie Qizhen, Liu Jin, Shi Jianfang, et al. Experimental study on continuous mixed-flow drying technology for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 129-132. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘启觉. 高水分稻谷干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 135-139.
Liu Qijue. Experimental research on drying technology for high moisture content paddy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 135-139. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邢佐群, 孙佩东, 尹思万, 等. 降温缓苏多级顺流粮食干燥工艺的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 243-246.
Xing Zuoqun, Sun Peidong, Yin Siwan, et al. Simulated study on multi-stage concurrent flow grain drying technology with ventilation tempering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 243-246. (in Chinese with English abstract)
- [7] 袁越锦, 徐英英, 刘相东. 仓内谷物通风干燥孔道网络数值模拟与验证[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 119-123.
Yuan Yuejin, Xu Yingying, Liu Xiangdong. Pore network numerical simulation and experiment on drying of corn material in bin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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: 49-205
- [9] 李长友. 颗粒农产品干燥机理及应用技术基础研究[D]. 广州: 华南农业大学, 1994.
Li Changyou. Theoretical and experimental research on the drying mechanism and the basics of technical application of kernel grain[D]. South China Agricultural University, Guangzhou, 1994. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李长友, 上出顺一. 小麦干燥机理的研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(1): 83-91.

- Li Changyou, Kamide Junichi. Studies on drying mechanism of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1993, 9(1): 83-91. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li Changyou, Liu Jiangtao, Chen Lina. The moisture distribution of high moisture content rough rice during harvesting storage and drying[J]. Drying Technology, 2003, 21(6): 1115-1125.
- [12] Li Changyou, Shao Yaojian, Kamide Junichi. An analytical solution of the granular product in deep-bed falling rate drying process[J]. Drying Technology, 1999, 17(9): 1961-1969.
- [13] 李长友, 班华. 基于深层干燥解析理论的粮食干燥自适应控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 142-146.
Li Changyou, Ban Hua. Self-adaptive control system of grain drying device based on deep-bed analytical ventilating drying theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 142-146. (in Chinese with English abstract)
- [14] 胡志超, 王海鸥, 谢焕雄, 等. 谷物横流干燥数学模型及模型预测控制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 96-102.
Hu Zhichao, Wang Haiou, Xie Huanxiong, et al. Mathematical models and model predictive control for cross flow grain drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 96-102. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 56-59. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 with English abstract)
- [17] 裘揆, 陈乐生, 赵春宇, 等. 种子含水率在线测量系统[J]. 农业机械学报, 2006, 37(9): 119-122.
Qiu Kui, Chen Yuesheng, Zhao Chunyu, et al. On-line measuring system of seed moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 119-122. (in Chinese with English abstract)
- [18] Chen Kunjie, Chen Qingchun, Zhang Yin. Energy consumption for gram drying in china[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5): 173-177.
- [19] 于吉云, 范训龙, 李林兰. 高热效率节能两级干燥工艺的研究[J]. 农业机械学报, 1992, 23(3): 37-42.
Yu Jiyun, Fan Xunlong, Li Linlan. A study on high efficiency energy saving two-stage drying technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1992, 23(3): 37-42. (in Chinese with English abstract)
- [20] 谢秀英, 白崇仁, 李杰, 等. 热风穿流干燥排气余热直接回收与节能的研究[J]. 农业机械学报, 1993, 24(3): 34-39.
Xie Xiuying, Bai Chongren, Li Jie, et al. Study on the waste heat recovery and energy conservation in heated air drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1993, 24(3): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [21] 牛兴和, 曹崇文. 谷物干燥节能技术[J]. 农业工程学报, 1990, 6(3): 87-94.
Niu Xinghe, Cao Chongwen. Energy saving techniques in grain drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1990, 6(3): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨世铭, 魏琪. 多孔介质对流干燥降速段热质传递规律的研究[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(1): 68-72.
Yang Shiming, Wei Qi. A study of heat and mass transfer to the period of decreasing drying rate on convective drying in porous media[J]. Journal of Engineering Thermo physics, 1994, 15(1): 68-72. (in Chinese with English abstract)
- [23] 蔡睿贤, 张娜. 多孔介质快速干燥过程热质耦合方程的代数显式解析解[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 271-273.
Cai Ruixian, Zhang Na. Algebraically explicit analytical solutions of coupled heat and mass transfer equations for rapid drying process in porous media[J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2003, 24(2): 271-273. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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. An analytical solution of granular product in a deep-bed falling rate drying process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998, 14(1): 194-199. (in Chinese with English abstract)
- [25] 施明恒, 王馨. 快速干燥过程中多孔介质内部湿分迁移机理的研究[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 216-219.
Shi Mingheng, Wang Xin. Investigation on moisture transfer mechanism in porous media during rapid drying process[J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2000, 21(3): 216-219. (in Chinese with English abstract)

- [26] 程新广, 朱宏晔, 过增元. 热质的运动和传递为最低热质能耗散原理和热质运动方程[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 73—75.
Cheng Xinguang, Zhu Hongye, Guo Zengyuan. Motion and transfer of thermal mass[J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2006, 27(1): 73—75. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李长友. 粮食热风干燥系统炯评价理论研究[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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): 231—235.
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): 231—235. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李长友, 方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 210—215.
Li Changyou, Fang Zhuangdong. Analytical model of high moisture content paddy in multistage countercurrent drying and tempering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 210—215. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李长友, 麦智炜, 方壮东. 粮食水分结合能与热风干燥动力解析法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 236—242.
Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong. Analytical study of grain moisture binding energy and hot air drying dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 236—242. (in Chinese with English abstract)

Thermal energy structure of grain hot air drying and analytical method

Li Changyou, Ma Xingzao, Fang Zhuangdong, Zhang Ye

(College of Engineering South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The impact to grain drying involves a number of factors, such as environmental factors, grain physical properties, and flow characteristics, as well as the processing technology and equipment geometry. The change of environmental conditions and physical property characteristics, and differences in processing technology, which makes the system energy loss, was a major difference in the quantity and quality. To essentially illustrate these differences, to improve the comparability of dryer performance test results, and to form objective and fair evaluation standards, the researchers investigated state parameters of grain drying systems and energy transfer by taking moisture migration as a certain amount of energy transfer. Based on the exergy analysis and thermodynamics, the thermal structure of grain drying and its transformation and transfer were analyzed. Using the induced air, the experiment was studied under the conditions of temperature was 26 to 35 °C, relative humidity was 40% to 55% of ambient air, and the initial temperature and dry basis moisture content of paddy was 36 °C and 38.6%, respectively. The results showed that the paddy temperature reduced 11 °C and the average drying rate was 1.2%/h in drying 2 hours. The paddy temperature picked up to 29 °C when the dry basis moisture content of paddy reduced to 17%. Another experiment was investigated on a 3100kg circulating paddy dryer with hot air, which the air volume was 9556.645 kg/h and the ratio of drying and tempering is 1:3.2. The results showed that the unit gas consumption increased 3.8 times from 113.0 kg/kg to 546.4 kg/kg, the unit heat consumption increased 5.4 times from 2548.9 kJ/kg to 16352.7 kJ/kg, and the exhaust gas heat loss of drying chamber increased 3.9 times from 6.2% to 30.6%, when the dry basis moisture content of paddy decreased from 27.06% to 16.96%. The main reason that the average exhaust gas heat loss was higher, the average heat rate and exergy efficiency of drying chamber was lower, was the poor performance of the energy matching in drying process. The change of energy efficiency in dryer chamber was from -3.9% to 59.9%, which indicated that the energy consumption of grain drying not only had subjective exergy, but also contained objective exergy. This paper pointed out that the evaluation of drying process and dryer energy utilization efficiency could not just stay on the subjective thermal efficiency, and must consider the effect of objective energy. The result provided the reference for reasonably evaluating energy matching of drying system and dryer energy utilization efficiency, and forming a fair evaluation standard.

Key words: grain; drying; thermal energy; exergy; analytical method