

粮食水分结合能与热风干燥动力解析法

李长友, 麦智炜, 方壮东

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 为揭示粮食中水分蒸发耗能特征, 基于不可逆热力学分析方法, 把水分迁移的现象看作是一定数量的能量迁移, 建立水分结合能解析模型, 给出了水分结合能随温度、含水率变化规律, 清晰地呈现了粮食在高水分段水分蒸发受物料的限制作用很小, 而在低水分段水分结合能随温度升高显著降低的特征, 研究结果为解析粮食二段降速干燥过程、合理匹配干燥温度提供了依据和分析方法, 为揭示干燥质烟驱动机理, 制订科学的能效评价标准, 合理的干燥装备系统设计补充了技术基础理论。

关键词: 粮食; 干燥; 水分; 干燥动力; 烟; 解析法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.028

中图分类号: TS210.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0236-07

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)

0 引言

粮食干燥是为了去除其中多余的水分, 提高其加工适性和耐储藏性, 而水分在粮食中的结合形式直接关系干燥能耗、品质和效率, 正确揭示水分与干物质的结合能是实现合理干燥工艺设计的关键。围绕粮食干燥动力学特性^[1-4]、品质形成机理^[5-8]、不同工艺条件下的干燥特性^[9-13]进行了大量的研究, 但涉及水分与物料的结合能及其迁移势解析理论的内容十分稀缺。基于传统的工艺及操作方法, 提出了很多改进能量利用措施和方法并付诸实施^[14-16], 由于缺乏粮食内部能质转换与传递的解析, 缺少过程能量消耗本质评价理论支撑, 基于经验提出的一些改进技术和方法在节能及干燥效率方面很难说明有实质性的进展, 也很难对其技术手段的有效性做出科学地评价。近年, 基于烟分析法展开的粮食干燥系统能效评价理论研究, 明确了粮食的干基含水率是干燥系统的状态函数, 确立了粮食干燥系统起算烟的基准点, 提出了烟基准函数^[17], 为评价干燥系统的用能情况提供了参考。由于粮食干燥的不可逆热力过程伴随质量的迁移, 定量评价干

燥烟的转换与传递, 还必须从理论深入研究表征质量迁移特征的解析法, 为此, 本文在现有研究的基础上, 把水分迁移的现象看作是一定数量的能量迁移, 基于不可逆热力学分析方法, 考察粮食中的水分迁移势及其特征函数, 说明粮食干燥动力, 给出解析模型和定量评价的解析方法, 为深一步研究粮食干燥烟传递, 烟质驱动机理, 过程动力与过程阻力之间的关系和高效节能干燥工艺及装备设计补充一些理论基础。

1 粮食干燥系统理论抽象与特征

1.1 粮食干燥系统理论抽象

干燥是一个输入能量、介质和湿粮, 排出废气、得到干粮的开口系统, 如图1所示。系统的外界是由粮食和空气构成的无穷大的物质源和能量源。基于粮食的物理成分, 可以把其表述为由绝干物质、液态水、气态水蒸气构成的多组分物系, 热风可以被认为是由绝干空气和水蒸气构成的理想气体。那么, 粮食在干燥室内与介质接触自发交换水分, 必然经历的是多组分多相系转换与传递的不可逆热力过程, 系统中必然存在表征粮食干燥过程的态函数。基于态函数考察粮食干燥中各种能够使水分状态发生变化的势场与其干燥行为的关系, 就可把干燥归结为烟及烟传递的过程。过程发生的主流特征就是以势场为载体的质烟转换与传递, 其中, 热烟以系统中的温差为载体随能流发生转换与传递, 流动烟以气流压差为载体随干燥介质发生转换与传递, 湿烟则以干燥介质中的水蒸气分压力与物料上

收稿日期: 2013-11-26 修订日期: 2014-02-08

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
农业工程学会会员登记号: B041100045S

的水蒸气分压力差为载体,在物料内部及气流和物料之间发生转换与传递^[17]。系统到达的终态点是粮食到达的平衡含水率状态,此状态点相当于热力学中定义焓时的环境态,即确定干燥焓的起算点。

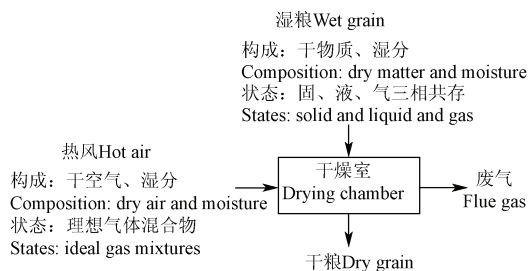
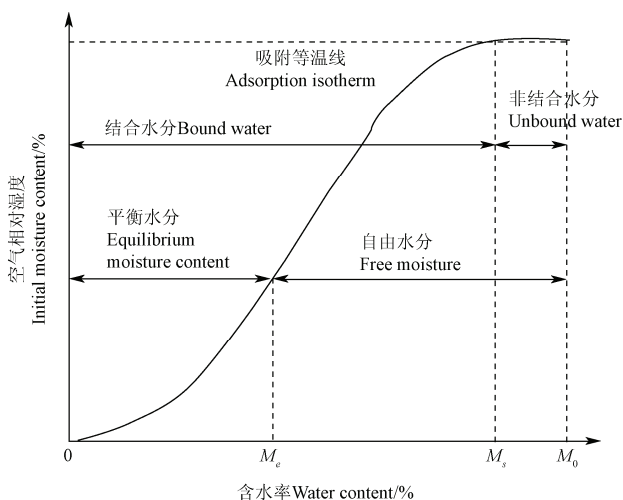


图 1 粮食干燥系统
Fig.1 Grain drying system

1.2 湿粮的物质结构特征

水分在物料中的结合形式,在干燥技术领域被普遍接受的说法是化学结合水、物理化学结合水、物理机械结合水 3 种形式。化学结合水具有严格的数量关系,而没有严格数量关系的物理化学结合水又被区分为①吸附结合水,它是“胶囊”外表和内表面上的力场所束缚的液体。②渗透压保持水(膨胀水和结构水),被封闭在细胞内,它既是复合胶囊通过渗透吸附的水,又是固定的结构水,由于其结合能很小,可以归属为游离水。物理机械结合水是保持不定量的水,存在与物料的大毛细管和微毛细管中。无论水分以何种形式存在于物料中,就干燥工程而言,所关心的是能从湿物料中去除多少水分,消耗多少能量。基于平衡特征,按照空气相对湿度及物料湿含量的大小,可将水分与物料的结合形式分别定义为结合水分和非结合水分或者平衡水分和自由水分,如图 2 所示。



注: M_0 是初始含水率, %; M_e 是平衡含水率, %; M_s 是最大吸湿含水率, %。
Note: M_0 Initial moisture content, %; M_e Equilibrium moisture content, %; M_s Maximum moisture content, %.

图 2 粮食中水分的结合形式

Fig.2 Combining form of moisture in grain

对应吸附等温线上任意点的粮食含水率即为平衡水分 M_e , %, 超过此湿含量的水分, 称为自由水分, 即在干燥过程中可从物料中去除的水分。

结合水分是空气相对湿度为 100% 时物料的平衡含水率, 称为最大吸含水率 M_s , %, 超过此湿含量的水分称为非结合水分, 此部分水分相当于完全的自由液体。

2 干燥动力学解析法

2.1 过程动力

介质在干燥室内与粮食接触, 释放显热, 同时接纳水分, 实现的干燥过程是客观的自发行为, 可以在任何温度条件进行^[18], 而粮食中的水分能否蒸发, 介质中的水蒸气能否发生集态的变化, 都取决于各自的温度和水蒸气分压力。在热风介质中, 水蒸气所占的份额较小, 分压力很低且在正常情况下是处于过热状态, 比较接近理想气体, 可以把干燥介质当作理想混合气体来处理。于是, 水分从粮食中汽化迁入介质的驱动力 Δp , Pa, 就可由式 (1) 计算, 水分迁出时所受到的阻力 p_{gz} , 等于水汽化时的饱和蒸汽压力与粮粒表面的水蒸气分压力之差, 可由式 (2) 计算。

$$\Delta p = p_{sg} - p_{gz} - p_v \quad (1)$$

$$p_{gz} = p_{sg} - p_{gv} \quad (2)$$

$$p_{sg} = 133.3224 \times \exp\left(18.7509 - \frac{4075.16}{236.516 + t_g}\right) \quad (3)$$

$$p_v = 133.3224 \times \exp\left(18.7509 - \frac{4075.16}{236.516 + t_w}\right) - 66.66(t - t_w) \quad (4)$$

式中: t_g 为谷物温度, °C; p_{sg} 为对应 t_g 时的饱和蒸汽压, Pa; p_v 为干燥介质中的水蒸气分压力, Pa; p_{gv} 为粮食表面水蒸气分压力, Pa; p_{gz} 为水分由汽化点到达粮食表面时的压降, Pa; t 、 t_w 为分别是介质干球温度和湿球温度, °C。

2.2 粮食水分结合能解析模型

水分汽化、蒸发、迁移是热功转换与传递的做功过程, 消耗的是系统的热能, 基于能量守恒和焓平衡, 则存在干燥热焓与对外界输出的有用功之间的定量关系。由于蒸汽在物料中向外扩散的流动速度很低, 动能和势能的变化都可以忽略不计。影响干燥的主流因素是水同物料结合, 降低了水表面上方的水蒸气压, 相应地减少了水分的自由能。基于热力学关系, 在粮食温度恒定的条件下, 从粮食中每脱去 1 kg 水所消耗的结合能, 在数值上应等于

气体所能完成的技术功 w_{gz} , kJ/kg。

$$w_{gz} = -\int_{p_{sg}}^{p_{gv}} v dp = R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} \quad (5)$$

式中: w_{gz} 为技术功, kJ/kg; v 为比容, m^3/kg ; p 为压力, Pa; T_v 为水蒸气的热力学温度, K; R_v 为水蒸气气体常数, 其值为 $0.4619 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

水分与物料的结合形式和所处的位置,对其迁出物料时消耗的动力有很大影响,随着物料含水率的降低,水分的迁出深度加大和被去除的吸附结合水所占比率增加,迁出过程所消耗的功必然增大。而当干燥系统处于热力学平衡态时,系统中的干燥焓为 0。基于吉布斯-亥姆赫兹自由能,即把物质的热量与质量迁移的现象看作是一定数量的能量迁移,把具有普遍意义的迁移势 Π 用一个特性函数 ψ 对综合坐标的偏导数表示^[19]。

$$\Pi = \left(\frac{\partial \psi}{\partial K} \right)_{i,j} \quad (6)$$

式中: 下标 i 和 j 表示物料与周围介质各部位之间的相关条件,在干燥系,这个特性函数就是状态函数。基于态函数可以清晰地表示体系完整的热力学特性,即任何物质的质量迁移势都等于任一特性函数对该物质的量的偏导数。对于传热过程,温度是迁移势,熵、内能、焓、热量焓 q_e 等状态函数分别是综合坐标,即都可以作为表示传热势的特性函数,而在干燥过程中,水蒸气分压力差是水分质量迁移的直接动力,还必须进一步考查其质量迁移的特性函数。

基于吉布斯-亥姆赫兹自由能及自由焓,得到热力学第一和第二定律的数学表达式(7)和式(8)、质量迁移势表达式(9)和质量迁移特性函数的表达式(10)。

$$TdS = dU + pdV - \sum_{i=1}^n \mu_i dm_i \quad (7)$$

$$TdS = dH - VdP - \sum_{i=1}^n \mu_i dm_i \quad (8)$$

$$\mu_i = \left(\frac{\partial F}{\partial m_i} \right)_{v,T,m_j} \quad (9)$$

$$d\psi = \sum_{i=1}^n \mu_i dm_i \quad (10)$$

式中: μ_i 为 i 组分的质量迁移势, dm_i 为体系内 i 组分的质量微元。 U 为系统的内能, kJ; T 为热力学温度, K; S 为熵, kJ/K; V 为体积, m^3 ; H 为焓, kJ; F 为系统的自由能, kJ; m_i 为体系内 i 组分的质量, kg。

在体积 V = 常数和温度 T = 常数时: $dF = dU - TdS$, 在压力 p = 常数和温度 T = 常数时:

$dF = dH - TdS$ 。可见,在干燥系统处于平衡状态时,体系的干燥焓等于 0,即 $d\Pi_i = 0$ 和 $dK_i = 0$, 此时的 $d\psi = 0$, ψ = 常数,引起系统自由能改变的质量迁移势 μ_i (化学势) 就是体系中物质的量增加一个单位时,该物质内能 U 或者焓 H 的增量。

水分在粮食内部迁移,沿特性函数减小的方向进行,也就是说,迁移过程中 $d\psi < 0$, $\sum_{i=1}^n \mu_i dm_i < 0$ 。

水蒸气在湿空气中的迁移势 μ_v 取决于它的热力学温度和水蒸气分压力: $\mu_v = f(p_v, T)$, 同样,在含有自由水分的粮食内部,以蒸气形式移动的迁移势 μ_{gv} 则可以假设为是粮粒表面的水蒸气分压力 p_{gv} 和粮食的热力学温度 T_g 的函数,即 $\mu_{gv} = f(p_{gv}, T_g)$ 。蒸发单位数量的水分所消耗的能量在数量上等于式(5)表示的功,于是,蒸发每千克水分消耗的内能功可由式(11)算出。在 V 和 T 均等于常数时,式(11)表述的 μ_{gv} 在数值上等同于水同结合能。

$$\mu_{gv} = -w_{gz} = \int_{p_{sg}}^{p_{gv}} v dp = -R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} \quad (11)$$

同理:每千克物质的量从粮食的外表面迁移到空气中去的水分迁移势:

$$\mu_v = f(p_v, T) = \int_{p_{gv}}^{p_v} v dp = -R_v T_v \ln \frac{p_v}{p_{gv}} \quad (12)$$

水分蒸发迁移至干燥介质中的总迁移势:

$$\mu = f(p, T) = \int_{p_{gs}}^{p_v} v dp = -R_v T_v \ln \frac{p_v}{p_{gs}} \quad (13)$$

粮食干燥的质量迁移可以看作是单一组分的水分迁移,那么,把式(11)代入式(8),得到可逆干燥过程中的热力学第二定律表达式(14)。

$$TdS = dh - vdp + R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} dm_i \quad (14)$$

积分式(14),得到从物料中汽化、蒸发每千克水分所消耗热能 q , kJ/kg 的计算式

$$q = \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} h - R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}} - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}} \quad (15)$$

$$= \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} \gamma(T_g) - R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}} - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{sg}}$$

式中: h 是水蒸气的比焓, kJ/kg, γ 是水蒸气的汽化潜热, kJ/kg。在等温条件下, h 的变化量等于 1 kg 水在其热力学温度 T 时的汽化潜热, $\frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v}$ 表

示水分迁移的方向, $-R_v T \ln \frac{p_v}{p_{gv}}$ 是 1 kg 水分蒸发

对环境所做的功， T 是干燥空气的热力学温度， $-R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{vg}}$ 是从物料中蒸发 1 kg 水分的自由能减少量。

上述诸式是在等容等温相关条件下得出的，在平衡状态时， μ_{gv} 等同于 1 kg 水同物料的结合能。在平衡状态时粮食内部的水分迁移势与空气中的水蒸气分压力相等，驱动水分迁移的焓等于 0，那么，对应粮食的湿含量，一定存在一个使其处于平衡状态而且是确定的外界湿空气条件。在粮食的最大含水率和平衡含水率范围内，利用 $M_e = f(t_g, \varphi)$ 状态函数，就可以计算出粮食在不同含水率状态时的内部水蒸气迁移势。

由于水从液态汽化时的蒸汽压等于其汽化温度下的饱和蒸汽压，所以，对应粮食内部水分蒸发温度的饱和蒸汽压与粮食在平衡状态时的自由能势（化学势）之差，就是水分在粮食内部迁移的动力势。这个势差乘以蒸发面到粮食内表面的体积就是蒸发过程在粮食内部消耗的功。这个功在数量上等于粮食水分蒸发的自由能减小的量 w_{gv} ，即系统减少的内能中可以转化为对外做功的部分，也就是粮食在可逆热力学过程中，系统能够对外输出的最大的“有用能量”——干燥焓。

粮食干燥的过程动力是温度和粮食湿含量（干基含水率 M ）的函数，处于吸湿状态范围内的粮粒内部，以蒸汽形式移动的水分迁移势也可以被认为是粮食湿含量 M 和粮食的热力学温度 T_g 的函数，即水分的迁移势又可表述为 $\mu_{gv} = f(M, T_g)$ 。

在平衡状态时 $p_v = p_{gv}$ ， $p_s = p_{gs}$ ， $t_g = t$ ，干燥传质的推动力是蒸汽压差： $\Delta p = p_{gs} - p_v$ 。对于各种粮食，通过试验，相应地都得到了其平衡水分的表达式，基于图 2 所示的吸附等温线，就可以确定出干燥的过程动力及质量迁移势的具体值，进而得到粮食干燥过程最低能量消耗的理论值。

基于 1991 年美国农业工程师协会确定的预测谷物平衡水分 M_e 的标准方程式 (16) [10]，得到与粮食温度及干基含水率相对应的干燥介质中的水蒸气分压力 p_v 的计算式 (17) 和介质的相对湿度 φ 的计算式 (18)，基于式 (11) 得到粮食干燥时粮粒表面的水蒸气分压力 p_{gv} 表达式 (19)：

$$M_e = \left(\frac{-\ln(1-\varphi)}{A(t_a + B)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

$$p_v = p_s (1 - \exp(-M_e^n A(t_a + B))) \quad (17)$$

$$\varphi = 1 - \exp(-M_e^n (A(t_a + B))) \quad (18)$$

$$p_{gv} = p_{gs} (1 - \exp(-M_e^n A(t_a + B))) \quad (19)$$

式中： p_s 为温度 t_a 时的饱和水蒸气分压力，Pa； φ 为空气相对湿度，%； M_e 为粮食平衡含水率，%； A 、 B 、 n 为系数。

粮食中的水分蒸发到干燥介质中的总推动力 $\Delta p = p_s - p_v$ ，蒸发 1 kg 水所消耗的总热量 $q = \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} h - R_v T \ln \varphi$ ，其中消耗在粮食内部的单位热量 $q_g = \frac{p_{gv} - p_v}{p_{gv} - p_v} h - R_v T_v \ln \frac{p_{gv}}{p_{vg}}$ ，蒸发 1 kg 水分对环境所做的功 $w_0 = q - q_g$ 。在物料与干燥介质之间存在干燥焓时，水分从物料中蒸发进入环境后，1 kg 水蒸气在对环境所做出 w_0 功的同时，在可逆过程则从环境中获得与 w_0 相同数量的焓，在不可逆过程中为 w_0 再加上该过程中的焓损。就粮食干燥而言，此项焓转换与传递仅仅发生在介质中，与粮食自身干燥能量消耗无关。

3 结果分析与讨论

3.1 粮食上表面的水蒸气分压力

在粮食内部干燥传质的推动力是蒸汽压差，这一压差的变化将直接影响干燥的速率和过程的能量消耗。图 3 是基于式 (19) 绘制的玉米籽粒上表面水蒸气分压力与含水率的关系，玉米平衡含水率模型中的参数 $A=8.654 \times 10^{-5}$ ， $B=49.81$ ， $n=1.8634$ [10]。由图 3 知，粮食的温度和含水率越高，其表面的水蒸气分压力越高，尤其是在 5% 到 15% 的含湿范围内呈现明显的递增，此后呈现降速小幅递增，这一现象与粮食实际干燥过程 [20-21] 相一致。

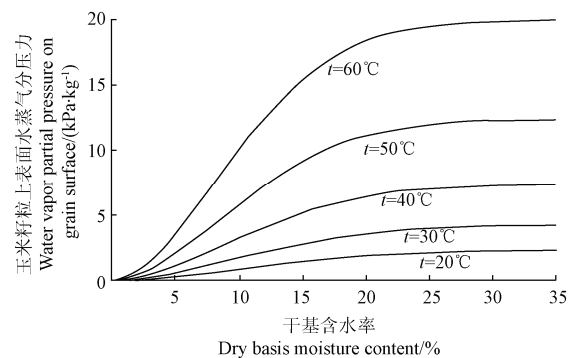


图 3 不同温度下玉米籽粒上表面水蒸气分压力与含水率的关系

Fig.3 Relationship between water vapor partial pressure on surface of corn and its moisture contain of different temperature

图 3 中的每条曲线表征了粮食在相应温度条件下干燥时水分出入的界限，当粮食的含水率状态处于曲线的右侧时，表明粮食中含有与介质条件对

应自由水,被介质干燥,反之,粮食则被吸湿,它对指导合理的干燥工艺设计及干燥过程控制具有很高的理论价值和重要的现实意义。

3.2 水分与粮食的结合能

存在于粮食内部的水分,因其存在的形式不同所受到的物料牵制作用并不一样,但不论水分以何种方式存在与物料之中,共同的特征是与物料结合后,都会使水分上表面的水蒸气分压力降低而减少了水分的自由能,自由能的减少量,在数量上相当于从物料中脱去 1 kg 水的结合能,所以,就干燥本身而言,可以把粮食中水分的自由能作为水分与粮食结合的唯一形式,自由能的减少量等同于水同物料的结合能。

基于图 2 所示的等温吸附线,按照式(11)绘制出的玉米水分在不同温度条件下的结合能与其干基含水率的关系如图 4 所示。

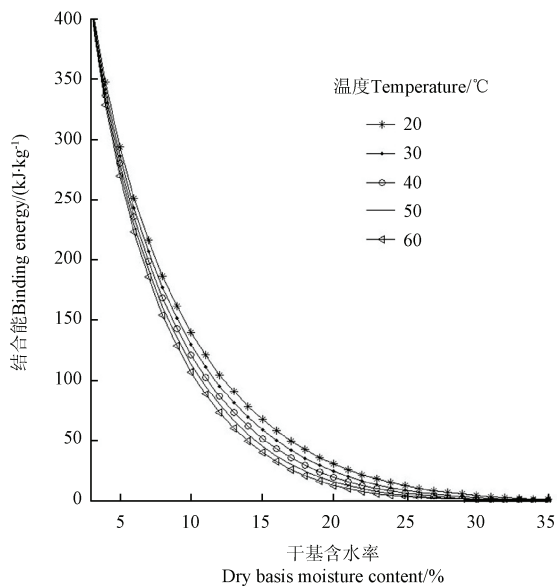


图 4 玉米中水分结合能与含水率的关系

Fig.4 Relationship between moisture binding energy of corn and its moisture contain

从图 4 所示的曲线可以看出,水分与粮食的结合能随含水率和粮食温度的升高而降低。在粮食湿含量超过 30%后,温度对其结合能的影响非常小。在粮食的低水分域,结合能随粮食的含水率的增大而显著下降。表明在同样的降水区间内,粮食在升温干燥过程中消耗于水分蒸发的那部分能量要比同样条件下的降温干燥过程少,这一规律较好地拟合出了粮食的实际干燥过程^[22-24],在理论上定量评价了干燥过程水分蒸发能量消耗。基于此,可以断定,在低水分域采用相对较高的温度干燥比较经济,而在高水分域时提高粮食温度并不能有效地改善粮食蒸发水分的能量消耗。

3.3 讨论

粮食干燥超标耗能问题的根本原因之一在于对干燥系统能质传递规律,过程动力与过程阻力的关系认识不够深入,干燥能量的匹配性差,存在工艺设计缺陷。揭示粮食水分结合能对指导干燥设计,实现优质、高效节能具有重要现实意义。

迄今已有大量粮食热风干燥特性试验研究,揭示了粮食在特定的干燥条件下的宏观去水特性,几乎测定出了各种主要粮食的平衡含水率并应用证实了平衡含水率及干燥常数是干燥温度和湿度的函数,表征出了干燥过程的态函数,把粮食的热风干燥归结为多组分、多相系自发地进行热质交换的不可逆热力过程。意识到了去水消耗的是系统中的热能,而去水的过程是温差势、湿差势、生物化学势等多种势场协同作用的焓传递。本研究基于态函数、干燥能量守恒和焓平衡,解析粮食水分结合能,不论在理论还是逻辑上都成立。通过本理论抽象和解析方法,给出了粮食中水分的结合能随温度、含水率的变化规律。清晰地表征出了粮食在高水分段,水分与粮食的结合能很小,预示了高含水率段的水分蒸发受物料的限制作用很小,利用常温的自然空气可以去除其中的绝大部分水分,为设计粮食低温高效节能干燥^[24-27]提供了理论依据;而在低水分段,水分结合能随温度的升高明显降低,为合理匹配干燥能量提供了解算方法。研究结果为解析粮食 2 段降速干燥过程^[28-29]提供了理论支撑。

干燥焓传递以势场为载体,其必要条件是必须存在能够反映到干燥系统湿分状态变化的干燥势。针对多场协同中的温度,湿度,压力等状态参数及物性参数的交互作用,以反映能质传递,即驱动干燥过程的质焓为统一特征,建立高湿粮食干燥焓传递模型,揭示各状态点焓值的变化规律,应是未来粮食干燥技术基础领域研究的重点。

4 结论

把粮食干燥水分迁移现象看作一定数量的能量迁移,获得了水分迁移势特征函数。给出了水分结合能随温度、含水率的变化规律。表征出了粮食在高含水率段水分结合能很小,而在低含水率段,水分结合能随温度升高显著降低。解析结果表明:①在相同降水幅度下,粮食的升温干燥效率高于降温干燥过程;②粮食在高含水率段的水分蒸发受物料限制的作用很小,利用常温自然空气可以去除其中绝大部分水分,而在低水分段,温度是主导干燥过程的主要参数。研究结果为解析粮食 2 段降速干燥过程、设计粮食低温高效节能干燥工艺系统提供了参考,为合理匹配干燥能量提供了解算方法,为

制订科学的能效评价标准奠定了基础。建议以驱动干燥过程的质焓为统一特征, 建立高湿粮食干燥焓传递模型, 揭示各状态点焓值的变化规律。

[参 考 文 献]

- [1] 诸治德, 杨俊红, 孟宪玲, 等. 蔬菜种子的干燥动力学及其活性[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(2): 220—223.
Chu Zhide, Yang Junhong, Meng Xianling, et al. Vegetable seed drying dynamics and its viability[J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2000, 21(2): 220—223. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黄凯, 刘华彦, 伍沅. PVC干燥动力学研究[J]. 高校化学工程学报, 2000, 14(3): 235—239.
Huang Kai, Liu Huayan, Wu Yuan. An experimental study on drying kinetics of PVC[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2000, 14(3): 235—239. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨飞, 何正斌, 赵阳, 等. 超声波—真空协同干燥自由水迁移速率[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(12): 103—107.
Yang Fei, He Zhengbin, Zhao Yang, et al. Migration rate of free water during the ultrasound-vacuum combined drying[J]. Journal of northeast forestry university, 2012, 40(12): 103—107 (in Chinese with English abstract)
- [4] 王蕴博, 王宝和. 氢氧化镁粉体的干燥动力学研究[J]. 干燥技术与设备, 2012, 10(2): 11—19.
Wang Yunbo, Wang Baohe. Drying kinetics of magnesium hydroxide powders[J]. Drying Technology and Equipment, 2012, 10(2): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [5] Naret Meeso, Adisak Nathakaranakule, Thanid Madhiyanon, et al. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process[J]. Journal of food engineering, 2007, 78(4): 1248—1258.
- [6] Ragab Khir, Pan Zhongli, Adel salim, et al. Moisture diffusivity of rough rice under infrared radiation drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(1): 1126—1132.
- [7] 郑先哲, 赵学笃, 陈力. 稻谷干燥温度对稻米食味品质影响规律的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 126—128.
Zheng Xianzhe, Zhao Xuedu, Chen Li. Effect of drying conditions of paddy on rice taste and quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 126—128. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郑先哲. 干燥后稻米食味值的预测与分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 193—195.
Zheng Xianzhe. Evaluation and analysis of the rice taste value of the post-drying paddy rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(2): 193—195. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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)
- [10] 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.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] 王桂湘. 水稻顺混流干燥工艺的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(2): 109—112.
Wang Guixiang. Study on process of rice concurrent-mixed flow drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(2): 109—112. (in Chinese with English abstract)
- [14] 潘九君, 路少昆, 闫立衡, 等. 粮食干燥机械节能减排现存问题及完善措施[J]. 粮食流通技术, 2011(1): 13—15.
Pan Jiujun, Lu Shaokun, Yan Liheng, et al. Existing energy saving and pollution reduction problems with grain drying machinery and Improvement measures[J]. Grain Distribution Technology, 2011(1): 13—15. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李杰. 我国粮食干燥节能减排技术发展现状与展望[J]. 粮食储藏技术, 2011, 40(4): 13—16.
Li Jie. Present situation and development of energy saving and emission reduction technology in grain drying[J]. Grain Distribution Technology, 2011, 40(4): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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)
- [17] 李长友. 粮食热风干燥系统焓评价理论研究[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)
- [18] 李长友. 热工基础[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 74—80.
- [19] A.C.金兹布尔格. 食品干燥原理与技术基础[M]. 北京: 轻工业出版社, 1986.
- [20] 张丽丽, 李长友, 张焯. 玉米深床常温通风干燥特性试验[J]. 广东农业科学, 2012, 39(2): 130—132.
Zang Lili, Li Changyou, Zhang Ye. Experimental study on deep bed air drying of corn at room temperature[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(2): 130—132. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李长友, 邵耀坚, 上出顺一. 从气流状态考察小麦深床干燥特性研究[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(1): 102—107.
Li Changyou, Shao Yaojian, Kamide Junichi. Measuring the drying characteristics of wheat in a deep-bed form continuous drying air dynamics[J]. Journal of South

- China Agricultural University, 1996, 17(1): 102—107. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
- [23] Li Changyou. Analytic solution of mass conservation equation for drying process[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2010, 6(1): 1—11.
- [24] 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 with English abstract)
- [25] 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/OL]. *农业机械学报*, 2014(05). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20140217.1139.004.html>. Li Changyou, Fang Zhuangdong. The analytical model of high moisture content paddy in multistage countercurrent drying and tempering [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014(05). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20140217.1139.004.html>.
- [26] 李长友, 麦智炜, 方壮东, 等. 种子循环干燥系统设计及试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2014 (06). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20140228.1556.039.html>. Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong, et al. Design and test of seed circulation drying system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014(06). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20140228.1556.039.html>.
- [27] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 1998, 14(1): 194—199. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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]. Guangzhou: South China Agricultural University, 1994. (in Chinese with English abstract)
- [29] 本橋 窓司, 細川 明. モミ乾燥への通気乾燥理論の適用-2-[J]. *農業機械学会誌*, 1980, 41(4): 593—601. Motohashi Kuniji, Hosokawa Akira. An application of forced air drying theory to the deep bed drying of rough rice-2-[J]. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 1980, 41(4): 593—601. (in Japanese with English abstract)

Analytical study of grain moisture binding energy and hot air drying dynamics

Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong

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

Abstract: In order to explore the characteristics of energy consumption for drying grain, the moisture migration potential and its characteristic function in grain were determined by the method of irreversible thermodynamics. Analytical models of moisture binding energy were established by considering the moisture migration as a certain amount of energy transfer. Analytical methods of drying force and quantitative evaluation of energy consumption in grain drying were applied to analyze changes of moisture binding energy with temperature and moisture. The result showed that evaporation from grains with high moisture content was little affected by grain features, and moisture could be mostly dried in normal air. Moisture binding energy of grains with low moisture content was significantly decreased with increasing temperature. It indicated that low moisture grain dried at high temperature was inexpensive, on the contrary, increasing the temperature of grain did not improve energy consumption for moisture evaporation in high moisture grain. This study provided valuable information for analyzing the two-stage drying process and drying temperature in grain drying, revealed the driving mechanism of drying mass and the exergy, established exergy transfer model of high moisture grain, analyzed the change laws of exergy value, and proposed a scientific evaluation standard for energy efficiency and the reasonable design of drying system.

Key words: grain; drying; moisture; the force of drying; exergy; analytical method

(责任编辑: 郭海枫)