

# 颗粒农产品深床干燥过程的解析解法<sup>\*</sup>

## II. 量纲转换与应用

李长友<sup>1</sup> 邵耀坚<sup>1</sup> 上出顺一<sup>2</sup>

(1 华南农业大学工程技术学院, 广州, 510642; 2 日本国山形大学)

摘要 讨论干燥参数及物性参数, 建立其关系式; 给出表示颗粒农产品深床干燥特性的诸解析式; 采用计算方法, 示出解析结果以及这一方法的应用.

关键词 颗粒物料; 深床干燥; 解析法

中图分类号 O175.1

深床干燥是极其复杂的热、质交换过程. 对其过程的解析(van Meel, 1958; 村田敏, 1983; 本桥国司等, 1980; 李长友等, 1993)都曾给出了一些理论或半理论半经验的解析式. 但由于解析过程复杂且部分物性参数及干燥特性参数不易确定而影响这些解析式的应用. 为此, 本文在讨论干燥参数及物性参数并建立其关系式的基础上, 给出解析颗粒农产品深床干燥过程时的诸计算式; 利用作者开发出的应用软件, 示出对小麦籽实在深床下干燥过程的解析结果.

### 1 无量纲式的有量纲化

#### 1.1 无量纲与有量纲参数间的关系

设单颗粒的外表面积为  $A$ , 绝干物质质量为  $W_b$ . 按照其最大降水速率, 由指数模型得:

$$K_d(M_c - M_d) = A \cdot \mu \cdot x_0 / W_b, \quad (32)$$

由(32)式, 可得无量纲(李长友等, 1998)与有量纲干燥参数间的关系式:

$$\tau = (K_d \theta \mu \alpha \gamma / \rho_b) \cdot (W_b / A \mu x_0) = (K_b \theta \gamma) / x_0, \quad (33)$$

$$\phi_0 = (M_0 - M_d) / (M_c - M_d) = [K_d W_b (M_0 - M_d)] / (A \cdot \mu \cdot x_0), \quad (34)$$

$$\phi_0 \eta = [K_d \gamma \rho_b (M_0 - M_d) \cdot Z] / (G_0 \cdot x_0), \quad (35)$$

$M_c$ —临界含水率, 即最大降速干燥速率时材料的干基含水率(%);  $M_d$ —动平衡含水率(%);  $\phi$ —含水比率(是时间和位置的函数);  $\theta$ —干燥时间(h);  $K_d$ —干燥常数;  $\eta$ —无量纲层厚度;  $\gamma$ —有效蒸发面积系数;  $G_0$ —送风量[ $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ];  $Z$ —干燥床深度(m);  $\mu$ —单位时间内通过单位蒸发面积的干气量[ $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ];  $\alpha$ —比表面积( $\text{m}^2/\text{m}^3$ );  $\tau$ —无量纲时间;  $x$ —含湿量差;  $\rho_b$ —物料容积密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $x_0$ —热风在入口处的含湿量差.

#### 1.2 诸有量纲解析式

全层物料在第一降速干燥段, 干燥介质入口处材料的含水率:

$$M_i = (M - M_{d1}) \cdot \exp(K_{d1} \gamma \theta) + M_{d1}. \quad (36)$$

全层物料在第一降速干燥段,干燥层内物料含水率分布:

$$M(\theta, Z) = [(M_0 - M_{d1}) \cdot \exp(\beta_1)] / [\exp(K_{d1} \gamma \theta) + \exp(\beta_1) - 1] + M_{d1}. \quad (37)$$

全层物料在第一降速干燥段,任意层厚度内的物料平均含水率:

$$\bar{M} = [(G_0 x_0) / (K_{d1} \gamma \rho_b Z)] \cdot \ln\{ [1 + \exp(-K_{d1} \gamma \theta)] \cdot [\exp(\beta_1) - 1] \} + M_{d1}. \quad (38)$$

全层物料在第一降速干燥段,任意层厚度内的平均干燥速率:

$$-\frac{d\bar{M}}{d\theta} = \frac{G_0 x_0 \cdot \exp(K_{d1} \gamma \theta) \cdot [\exp(\beta_1) - 1]}{\rho_b Z \{ [1 + \exp(-K_{d1} \gamma \theta)] \cdot [\exp(\beta_1) - 1] \}}. \quad (39)$$

全层物料在第一降速干燥段,介质入口处材料处于第一降速干燥段所能持续的时间:

$$\theta_1 = [1 / (K_{d1} \gamma)] \ln [(M_0 - M_{d1}) / (M_k - M_{d1})]. \quad (40)$$

$\beta = [K_d \gamma \rho_b (M_0 - M_d) Z] / (G_0 x_0)$ ;  $M$ —干基含水率(%);  $M_{d1}$ —对应第一降速段,物料的动力平衡含水率(%);  $\beta_1$ 为  $K_d$  和  $M_d$  分别取  $K_{d1}$  和  $M_{d1}$  值时的  $\beta$  值.

2种干燥速率并存的降速干燥段:在进入2种干燥速率并存的降速干燥段以后,层内材料的干燥则由入口起沿床深方向逐步由第一降速干燥段转入第二降速干燥段.

在  $0 \leq Z \leq Z_k$  内的水分分布、层内物料的平均含水率及平均干燥速率:

$$M_2(\theta, Z) = \frac{(M_{02} - M_{d2}) \cdot (M_k - M_{d2}) \cdot \exp(\beta_2)}{(M_{02} - M_{d2}) \cdot \exp[K_{d2} \gamma (\theta - \theta_1)] + (M_k - M_{d2}) \cdot [\exp(\beta_2) - 1]} + M_{d2}, \quad (41)$$

$$\bar{M}_2 = M_{d2} + \frac{G_0 x_0}{K_{d2} \gamma \rho_b Z_k} \ln \left\{ 1 + \frac{M_k - M_{d2}}{M_{02} - M_{d2}} [\exp(\beta_{k2}) - 1] \cdot \exp[\gamma K_{d2} (\theta - \theta_1)] \right\}, \quad (42)$$

$$-\frac{d\bar{M}_2}{d\theta} = \frac{M_{d2} + \frac{G_0 x_0 (M_k - M_{d2})}{\rho_b Z_k (M_{02} - M_{d2})} [\exp(\beta_{k2}) - 1] \cdot \exp[-\gamma K_{d2} (\theta - \theta_1)]}{1 + \frac{M_k - M_{d2}}{M_{02} - M_{d2}} [\exp(\beta_{k2}) - 1] \cdot \exp[-\gamma K_{d2} (\theta - \theta_1)]}, \quad (43)$$

在  $Z_k \leq Z \leq Z_L$  内的水分分布、层内物料的平均含水率及平均干燥速率:

$$M_1(\theta, Z) = \frac{(M_0 - M_{d1}) \cdot (M_k - M_{d1}) \cdot \exp(\beta_1 - \beta_{k1})}{M_0 - M_{d1} + (M_k - M_{d1}) \cdot \exp(\beta_1 - \beta_{k1})} + M_{d1}, \quad (44)$$

$$\bar{M}_1 = M_{d1} + \frac{G_0 x_0}{K_{d1} \gamma \rho_b (Z - Z_k)} \ln \left\{ 1 + \frac{M_k - M_{d1}}{M_0 - M_{d1}} [\exp(\beta_L - \beta_k) - 1] \right\}, \quad (45)$$

$$-\frac{d\bar{M}_1}{d\theta} = \frac{G_0 x_0 \{ 1 - \frac{M_k - M_{d1}}{M_0 - M_{d1}} [\exp(-\beta_{k1}) - 1] \} \cdot [\exp(\beta - \beta_1) - 1]}{\rho_b (Z - Z_k) \{ 1 + \frac{M_{02} - M_{d2}}{M_k - M_{d2}} [\exp(\beta - \beta_{k1}) - 1] \}}. \quad (46)$$

干燥过程中到达界限水分的物料所处的床深位置:

$$Z_k = [G_0 / (\mu \gamma \alpha \phi_0)] \ln \{ \phi_k - \phi_0 \cdot \exp[\gamma \cdot K_{d2} (\theta - \theta_1)] / (\phi_k - \phi_0) \}. \quad (47)$$

干燥层热风出口处材料的含水比率降至界限含水比率所需的干燥时间:

$$\theta_2 = \theta_1 + [1 / (K_{d1} \gamma)] \cdot \ln [(M_0 - M_{d1}) / (M_k - M_{d1}) + [1 + (M_0 - M_{d1}) / (M_k - M_{d1}) \cdot \exp(\beta_1)] \}. \quad (48)$$

在  $[0, Z_L]$  区间内的平均含水率及平均干燥速率:

$$\bar{M} = (1/Z) [(Z - Z_k) \cdot \bar{M} + Z_k \cdot \bar{M}_2], \quad (Z \geq Z_k) \quad (49)$$

$$-d\bar{M}/d\theta = (1/Z)[-(d\bar{M}_1/d\theta) \cdot (Z-Z_k) - (d\bar{M}_2/d\theta) \cdot Z_k], \quad (Z \geq Z_k). \quad (50)$$

$Z_L$ —干燥层总厚度(m);  $Z_k$ —处于界限水分状态的物料所在的床深位置(m);  $M_1$ 、 $M_2$  分别为物料处在第一、第二降速干燥段内的干基含水率;  $M_{d2}$ —对应第二降速干燥段的动平衡含水率(%);  $M_k$ —界限含水率, 即第一降速干燥段与第二降速干燥段交界点上, 材料的含水率(%);  $M_{c2}$ —在最大降速干燥速率下, 假定沿第二降速段干燥时的材料最大含水率(%);  $\beta_2$  为  $K_d$  和  $M_d$  分别取  $K_{d2}$  和  $M_{d2}$  值时的  $\beta$  值;  $\beta_{k1}$  为  $K_d$  取  $K_{d1}$ ,  $M_d$  取  $M_{d1}$ ,  $Z$  取  $Z_k$  值时的  $\beta$  值;  $\beta_{k2}$  为  $K_d$  取  $K_{d2}$ ,  $M_d$  取  $M_{d2}$ ,  $Z$  取  $Z_k$  时的  $\beta$  值.

## 2 计算方法应用

在实际应用中, 任意床深位置上物料干燥速率的解析式可由给出的含水率解析式直接求微分得到. 沿床深方向积分, 即得相应层厚度内的平均值. 全层物料均进入第二降速干燥段以后的解析式, 与  $0 \leq Z \leq Z_k$  段内的诸解析式相同.

### 2.1 计算步骤

(1) 确定干燥物料容积密度及单粒几何学外表面积. (2) 计算每小时通过单位干燥床面积及单位蒸发面积的风量. (3) 根据送风条件计算单颗粒干燥时的恒速干燥速率. (4) 由气流状态的变化确定干燥层内空气的干、湿球温度, 并把进、排气温度的算术平均值作为层内空气温度的平均值来确定干燥层中空气的物性值. (5) 将各物性参数、干燥参数以及相应的计算参数代入各解析式或导出式.

### 2.2 深床下的物料特性参数

有效外表面积: 在堆积状态下, 每  $1 \text{ m}^3$  物料, 几何学外表面积可按式求出:

$$\alpha = (\rho_b / W_b) \cdot A, \quad (51)$$

颗粒的恒速蒸发速率: 恒速蒸发速率与材料本身的性状无关, 取决于送风条件. 考察单一颗粒与气流间的热交换与指数模型可得:

$$K_d(M_c - M_d) = hA(t_a - t_w) / (\gamma_w \cdot W_b). \quad (52)$$

$h$ —换热系数 [ $\text{J}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ];  $\gamma_w$ —湿球温度下的蒸发潜热 ( $\text{J}/\text{kg}$ );  $t_a$ 、 $t_w$ —介质的干、湿球温度 ( $^\circ\text{C}$ ).

物料的平衡含水率及界限含水率: 单一粒体的干燥速率按指数模型计算, 平衡含水率取物料的动平衡含水率, 干燥常数取与动平衡含水率相对应的回归值.

由单颗粒干燥特性曲线(李长友, 1998)知:  $M_d$ 、 $M_{c2}$  都可直接由送风条件求出. 当  $M_{d1}$ 、 $M_c$ 、 $M_k$  3 个参量中有 1 个确定时, 则根据实验值由指数模型和(53)式, 可求出其它 2 个.

$$M_k = (K_{d1} M_{d1} - K_{d2} M_{d2}) / (K_{d1} - K_{d2}). \quad (53)$$

## 3 计算结果

以小麦籽实为例, 近似地取其有效外表面积系数为 0.85, 换热系数为  $226.8 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ , 初期含水率为 50%. 取空气温度为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 湿度 40%, 风量  $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ , 干燥床面积  $0.254 \text{ m}^2$ , 单位床面积风量  $463.368 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ , 小麦的诸干燥参数、气流物性参数按照李长友等(1996)方法计算.

根据上述各解析式, 笔者开发了分析颗粒物料干燥参数, 深床干燥过程的解析软件. 利用该软件, 计算出了小麦籽实在深床下干燥过程的解析结果(图 1~6).

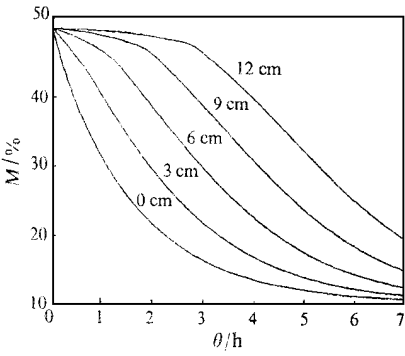


图1 不同床深处物料含水率变化

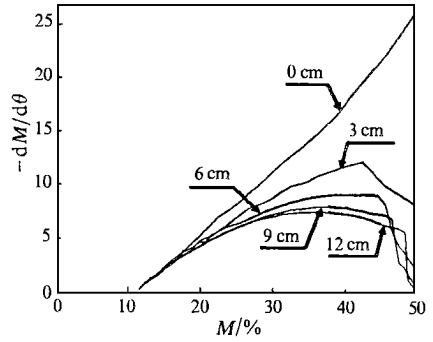


图2 不同床深位置物料干燥速率

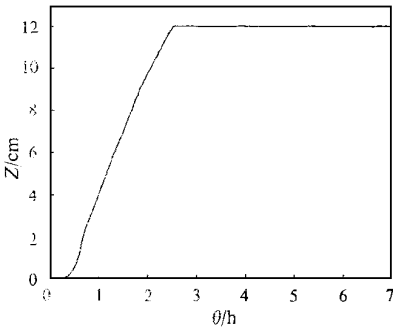


图3 界限含水率的移行过程

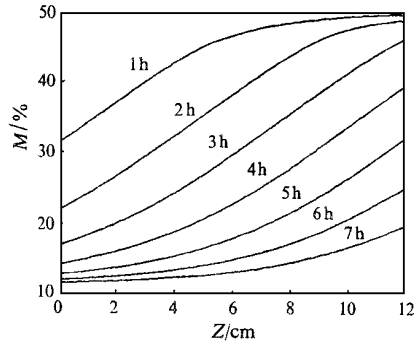


图4 含水率沿床深方向的分布

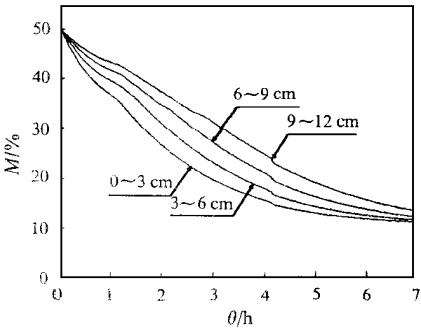


图5 各层内物料的平均含水率

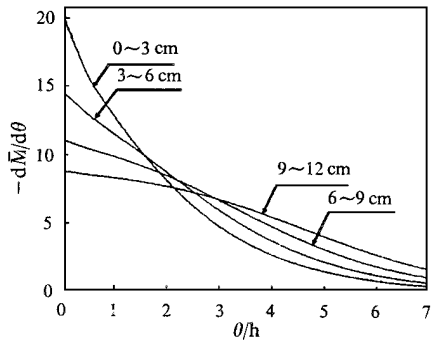


图6 各层内物料的平均干燥速率

### 4 分析与讨论

上述的理论曲线,示出了现阶段还很难由实验测取的任意床深位置处,物料含水率随时间连续变化(图1)、任意床深位置上物料的干燥速率随含水率连续变化(图2)、物料水分状态沿床深方向的移行过程(图3)及任意干燥时刻含水率沿床深方向的分布曲线(图4).图5、图6中示出的平均值,比较好地拟合出了从气流状态考察到的小麦籽实在深床下的干燥过程(李长友等,1996,)。解析结果,对研究物料深床干燥机理、物性参数及干燥参数,干燥设计等具有指

导意义. 但在实际应用时, 当物料初期温度较低, 干燥热损失较大时, 干燥速率的解析曲线与实际干燥曲线的拟合性会明显受到热损失的影响, 其误差主要集中在干燥初期因物料升温、机壁散热带来的下层干燥上层吸湿的干燥段. 因此, 在解析干燥初期物料温度较低, 介质与物料间温差较大, 风量较小的深床干燥过程时, 不可忽视物料吸热造成的热损失对干燥过程的影响, 此时, 应从传热传质两方面来同时考察深床干燥的过程.

## 5 结论与建议

(1) 颗粒农产品, 单粒体的降速干燥速率特性可以近似地用直线分段表示, 二段降速干燥过程都可以用指数模型来解析. (2) 任意床深位置上物料干燥速率的解析式可由给出的含水率解析式直接求微分得到. 沿床深方向积分, 即得相应层厚度内的平均值. (3) 各解析式可直接用于求解颗粒农产品在深床下的干燥过程, 指导干燥设计. (4) 对于某一具体的物料而言, 需对应其操作条件, 较准确地确定出材料在深床下的有效蒸发面积及气流的物性参数、材料的干燥常数和相应的动平衡含水率. (5) 为保证计算精度, 在物料升温、机壁散热损失较大的情况下, 必须考虑温度变化对干燥过程的影响, 应从传热传质两方面来同时考察深床干燥的过程. (6) 对于颗粒农产品这种生物体材料, 恒速蒸发的过程, 物料并不一定是等温过程, 因此, 其临界水分不一定是恒定值. 可能受干燥条件和材料干燥历史, 组织结构等自身因素影响. (7) 由于指数模型并不真正反映颗粒物料薄层干燥的机理, 仅在于它可以较精确地分段表示出物料的降速干燥过程. 所以, 要进一步研究深床干燥理论, 尚待对颗粒农产品自身固有的干燥速率特性函数、物性参数、干燥特性表示法等做进一步的理论和实验考察.

### 参 考 文 献

- 李长友, 上出顺一. 1993. 小麦干燥机理的研究. 农业工程学报, 9(1): 83~91  
 李长友, 邵耀坚, 上出顺一. 1996. 从气流状态考察小麦深床干燥特性研究. 华南农业大学学报, 17(1): 102~107  
 李长友, 邵耀坚, 上出顺一. 1998. 颗粒农产品深床干燥过程的解析解法: I. 深床干燥过程的解析法. 华南农业大学学报, 19(2): 86~90  
 本桥国司, 细川明. 1980. モミ乾燥への通气乾燥理論の適用(II). 农业机械学会志, 41(4): 593~601  
 村田敏. 1983. 穀物の特性と乾燥速度の予測. 农业机械学会志, 44(3): 517~523  
 van Meel D A. 1958. Adiabatic convection batch drying with recirculation of air. Chemi Eng Sci 9: 36~44

## AN ANALYTICAL SOLUTION OF GRANULAR AGRICULTURAL PRODUCTS IN A DEEP-BED DRYING PROCESS

### II. TRANSFORMATION AND APPLICATION OF DIMENSION

Li Changyou<sup>1</sup> Shao Yaojian<sup>1</sup> Kamide Junichi<sup>2</sup>

(1 College of Polytechnic, South China Agric. Univ., Guangzhou, 510642; 2 Yamagata University, Japan)

#### Abstract

This paper discusses drying and physical parameters and establishes their relation; gives various analytical solutions of granular product in deep-bed drying processes. By computation method it presents analytical results as well as its application.

**Key words** granular produce; deep-bed drying; analytical solution

【责任编辑 柴 焰】