

# 小麦流态化干燥实验关联式及在热泵流化床谷物干燥中的应用

向飞 杨晶 王立 童莉葛

北京科技大学机械工程学院热能工程系, 北京 100083

**摘要** 基于流化床干燥理论, 采用热风循环充分的电热烘箱作为干燥器, 对小麦进行了一系列的薄层干燥实验研究, 模拟小麦流态化干燥过程, 总结出适用于流化床小麦干燥时间预测的经验回归公式, 开发了热泵流化床谷物干燥实验系统, 并将小麦干燥的经验回归公式应用于此实验台的干燥实验过程. 结果表明, 小麦干燥经验回归式可用于预测小麦在流态化条件下的干燥时间, 所开发的热泵流化床谷物干燥装置经济性合理, 有市场应用前景.

**关键词** 小麦; 流态化; 回归; 热泵; 干燥

**分类号** S 226.6

提高粮食干燥质量和机械化干燥能力是我国粮食生产急需解决的问题, 开发一种高效、节能、符合环保要求、安装移动灵活的谷物干燥设备以配合机械化专业收割已成为社会和农业发展的迫切需要. 流化床具有温度均匀、高传热传质率的特点, 适用于干燥领域<sup>[1,2]</sup>; 热泵具有高效节能、环保的优点, 制热量一般为其电能消耗的2~5倍. 所以将热泵与流化床相结合, 开发灵活、方便、经济性合理的谷物干燥设备是发展趋势.

就干燥设备而言, 干燥时间是很重要的参数. 干燥时间的确定依赖于谷物颗粒干燥过程的预测, 目前国内外有关颗粒干燥过程研究多基于传质和传热微分方程, 建立单颗粒传热传质模型, 结合相应的初始和边界条件进行离散求解<sup>[3,4]</sup>.

本文基于流化床干燥的物理过程, 对小麦在各种条件下的干燥过程进行了实验模拟研究, 并以大量的实验数据为基础, 回归了可用于预测小麦干燥时间的经验关联式. 设计安装了热泵流化床谷物干燥实验系统, 实验确定了适用于热泵流化床谷物干燥的最佳空气循环方案, 验证了小麦干燥过程预测经验关联式, 并对热泵流化床谷物干燥设备的经济性进行了分析.

## 1 小麦流态化干燥模拟实验研究

在使用流化床对小麦进行干燥时, 小麦颗粒与干燥空气充分接触, 实质上是单颗粒小麦与其周围干燥介质——空气间的传热与传质. 小麦在实际干燥过程中主要处于降速干燥阶段. 在此阶段里, 对干燥速度起决定作用的是内因, 即小麦内部水分向小麦颗粒表面的扩散. 因此, 影响干燥过程的因素主要为颗粒的传热传质特性、颗粒的初始含水量、空气的温度和湿度等. 在流化床中, 形成流态化所需的风速大大高于将小麦表面水分及时带走所需的风速, 所以在实验过程中不考虑干燥介质流速对干燥的影响<sup>[5,7]</sup>.

基于以上原因, 可以采用小麦在筛网容器中, 薄层条件下, 微风烘干箱内的干燥实验数据来指导小麦流态化干燥实验.

### 1.1 小麦薄层干燥实验

本实验采用方形不锈钢丝网容器, 其上放置单层小麦(实验所采用的小麦为“中优9507”, 是我国北部冬小麦中最有推广价值的小麦新品种)后, 将容器放入具有均匀温度场(温度波动 $\pm 1^\circ\text{C}$ )的微风烘干箱. 实验条件如表1所示. 在实验中, 共选取了三种干燥温度(60 $^\circ\text{C}$ , 70 $^\circ\text{C}$ 和80 $^\circ\text{C}$ , 处于热泵干燥的理想温度范围); 小麦实验样品的初始含水量分为: 18%, 20%, 22%, 24%和26%共五

收稿日期: 2003-09-24 修回日期: 2004-11-10

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(No.00020)

作者简介: 向飞(1977—), 男, 博士研究生

组. 为了获得不同含湿量的小麦, 首先将样品小麦在 120℃ 烘箱中连续加热 24h 到质量几乎不变, 求出样品小麦的初始含湿量; 然后根据实验需要, 对小麦样品分别加水复湿得到各种含湿量的小麦样品.

实验过程为: 首先设定烘箱温度, 将一定含湿量的小麦放入方形不锈钢丝网容器中, 平铺为单颗粒薄层, 称重后放入烘箱, 并在不同干燥时刻取出小麦样品进行称量 (采用 JA3031 电子天平, 读数精度 1mg), 得出小麦含湿量随干燥时间变化的关系.

湿基含湿量  $M_w$  计算公式和干基含湿量  $M_d$  计算公式为:

$$M_w = \frac{m_i - m_0}{m_i} \times 100\%; M_d = \frac{m_i - m_0}{m_i} \times 100\%.$$

其中,  $m_i$  为干燥到第  $i$  时刻小麦样品的质量,  $m_0$  为小麦样品绝对干燥后的质量, 即小麦样品在 120℃ 烘箱中干燥 24h 以上的质量.

### 1.2 实验结果及其关联式

图 1 给出烘箱温度为 80℃, 各种不同初始湿基含湿量条件下, 小麦干基含湿量随干燥时间的变化关系. 在生产实践和样品制作的过程中通常采用湿基含湿量较直观, 而在模型构建时采用干基含湿量更为简便. 因此本文中的原始实验数据都采用湿基含湿量表达, 而在进行回归分析时, 利用上述的含湿量计算公式将含湿量转换为干基含湿量表达.

为了使回归公式形式简单, 采用含湿量比率 MR 作为公式因变量<sup>[8,9]</sup>. MR 的定义式为:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e}$$

其中,  $M_i$  为初始含湿量,  $M$  为任意时刻颗粒含湿量;  $M_e$  为平衡含湿量, 计算方法如下<sup>[9]</sup>:

$$M_e = \left\{ \frac{-1}{C_1} \ln \left[ \frac{(t+C_2) \ln(RH)}{-C_3} \right] \right\}$$

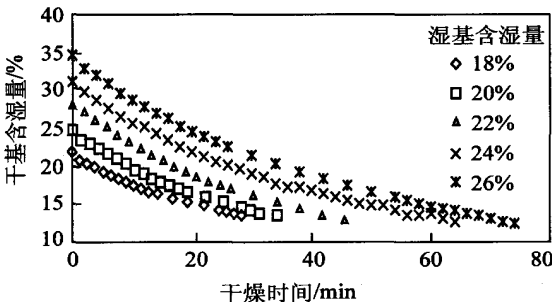


图 1 烘箱 80℃ 时各初始湿基含湿量的小麦干燥曲线  
Fig.1 Moisture evolution of wheat under different initial moistures (wet basis) at a drying temperature of 80℃

其中,  $t$  为干燥温度 (℃), RH 为空气相对湿度.  $C_1 = 17.7, C_2 = 99.0, C_3 = 799.2$ .

图 2 给出烘箱温度为 80℃, 各种不同初始湿基含湿量条件下, 小麦含湿量比率 MR 随干燥时间  $\tau$  的变化关系. 图中对应的回归公式通式为:

$$MR = \exp(-A\tau).$$

其中, 系数  $A = A(t, RH, M_i)$ . 研究表明<sup>[9]</sup>,  $RH < 0.15$  时, 对干燥速度的影响很小, 可以忽略. 在烘箱中干燥时,  $RH < 0.15$ , 故参数  $A = A(t, M_i)$ .

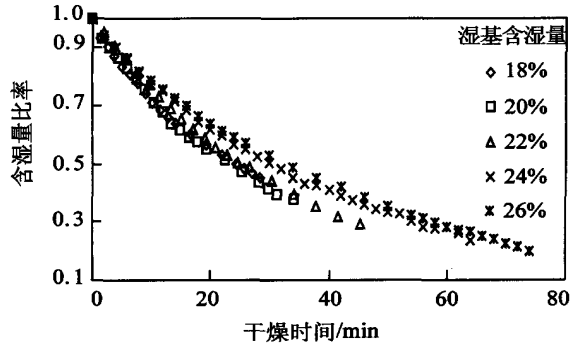


图 2 80℃ 时小麦含湿量比率与随干燥时间的关系  
Fig.2 RM evolution of wheat at a drying temperature of 80℃

### 1.3 小麦薄层干燥实验数据的回归处理

通过大量的实验测量, 绘制出各干燥温度, 各初始含湿量下的小麦含湿量比率与干燥时间的关系曲线 (MR- $\tau$  曲线). 对实验数据进行回归处理, 得到小麦薄层干燥的数据回归经验公式:

$$\begin{cases} MR = \exp(-A\tau) \\ A = y_0 + b_1 t + b_2 DM \end{cases} \quad (1)$$

式中,

$y_0 = -7.6316 \times 10^{-3}, b_1 = 5.8817 \times 10^{-4}, b_2 = -6.5137 \times 10^{-4}, t$  为干燥室温度 (℃),  $DM = (M_i - M_e) \times 100$ . 适用范围  $60^\circ\text{C} < t < 80^\circ\text{C}$ , 干燥过程中  $RH < 0.15$ .

### 1.4 RH 的影响及公式修正

为了验证式(1)的合理性, 使用热泵流化床干燥样机进行了一系列的相关实验. 实验数据与统计结果表明: 式(1)的计算结果与实验测定的数据有偏差, 因为在流化床的干燥过程里, 床层中空气相对湿度 RH 接近 0.4-0.5; 当热风相对湿度 RH 增大时, 偏差增大, 因此必须考虑 RH 的影响进行修正.

对实验数据进行整理计算, 绘制出 60℃, 70℃ 和 80℃ 干燥时, 热风相对湿度 RH 对干燥过程的影响曲线, 见图 3. 对曲线进行处理, 引入修正系数  $B$ , 这样式(1)修正为:

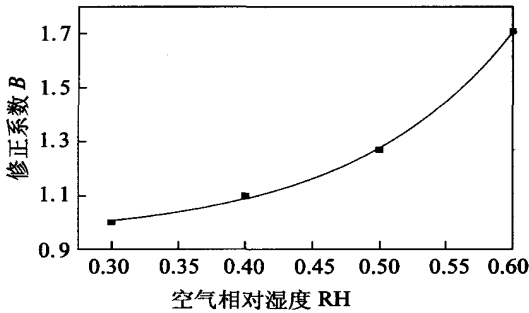


图3 修正系数B随RH的变化趋势及拟合曲线  
Fig.3 Change of B with RH and fitting curve

$$\begin{cases} MR = \exp\left(-\frac{A}{B}\tau\right) \\ A = y_0 + b_1t + b_2DM \\ DM = (M_i - M_e) \times 100 \\ B = y_1 + A_2 \exp\left(\frac{RH}{t_1}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $y_0 = -7.6316 \times 10^{-3}$ ,  $b_1 = 5.8817 \times 10^{-4}$ ,  $b_2 = -6.5137 \times 10^{-4}$ ,  $y_1 = 0.94288$ ,  $A_2 = 5.24 \times 10^{-3}$ ,  $t_1 = 0.12038$ . 适用范围  $60^\circ\text{C} < t < 80^\circ\text{C}$ , 初始含湿量(湿基)18%~26%.

在小麦薄层干燥过程中, 已知干燥温度  $t(^\circ\text{C})$ , 热风相对湿度RH和小麦的初始含湿量  $M_i$ , 利用式(2)就可求出干燥进行过程中任意时刻的小麦含湿量. 注意干燥时间的单位选用min, 在计算过程中的小麦含湿量  $M$  为干基含湿量.

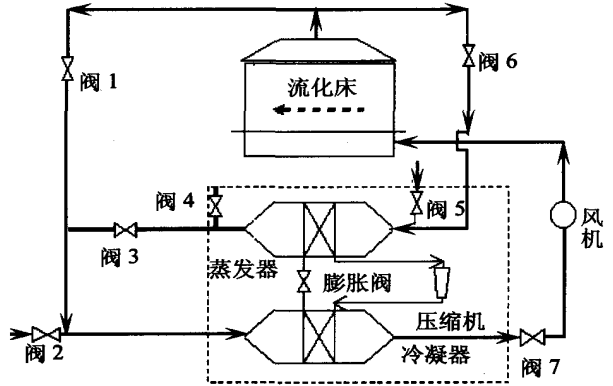
## 2 热泵流化床谷物干燥系统

### 2.1 热泵流化床谷物干燥装置

自行设计制造了热泵流化床谷物干燥样机, 如图4. 流化床干燥室尺寸为  $1.2\text{m} \times 0.28\text{m}$ , 静态床层高度  $0.5\text{m}$ , 布风板为直流型开孔率为11.6%, 在布风板上铺一层金属网以防漏料, 床层内空气流速  $1.0\sim 1.2\text{m/s}$ .

为了解干燥介质(空气)循环方式对热泵性能乃至整个系统干燥性能的影响, 基于图4所示的干燥系统, 制定了实验方案1~4<sup>[10]</sup>, 各方案通过阀门1~7的开闭实现. 通过一系列实验, 确定了设备空气循环的最佳方案如图5, 图中省略了风机、压缩机和阀门等部件.

图5中, 热泵蒸发器从环境空气中获得热量传给热泵工质, 干燥床中排出的部分废气(温度高于室温, 相对湿度接近饱和)通过加入部分新风(10%~20%)降低相对湿度, 在冷凝器中加热进入流化床循环使用.



热泵工质流向——→空气流向——→谷物流向---→  
图4 热泵流化床谷物干燥设备样机系统流程示意图  
Fig.4 Schematic diagram of a model fluidized bed dryer with heat pump

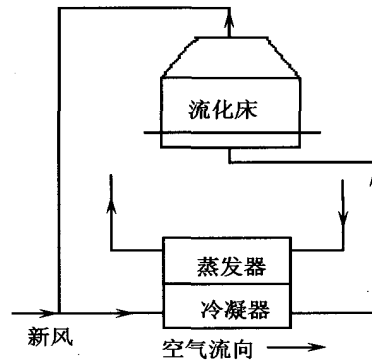


图5 流化床出口空气不经过蒸发器的闭路式循环  
Fig.5 Closed cycle. Air from the fluidized bed does not pass through the evaporator

### 2.2 装置性能及经验关联式的验证

对修正的回归式(2)进行了实验验证. 实验条件为: 环境温度  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ , 环境空气的相对湿度  $RH_0 = 0.68$ ; 在实验过程中, 流化床入口平均温度  $t_i \approx 68^\circ\text{C}$ , 床层(出口)平均温度(即干燥温度)  $t_e = 47^\circ\text{C}$ , 干燥室内空气相对湿度  $RH = 0.3$ ; 小麦质量  $100\text{kg}$ , 小麦湿基含湿量  $M_w$  从  $21.3\%$  下降至  $13\%$  用时约  $60\text{min}$ . 换算为小麦干基含湿量  $M_d = 27.06\%$ ,  $M_{d0} = 14.94\%$ . 通过计算求出:

小麦在环境中的平衡含湿量  $M_{e0} = 15\%$ .

小麦在床层中的平衡含湿量  $M_e = 8.7\%$ .

根据以上实验条件带入小麦干燥回归公式中进行计算, 计算结果如图6.

由于流化床为卧式, 布风板长宽比大于4, 在干燥过程中, 沿流化床的长度方向存在温度和空气湿度的不均匀, 表现为干燥前期和后期的实验

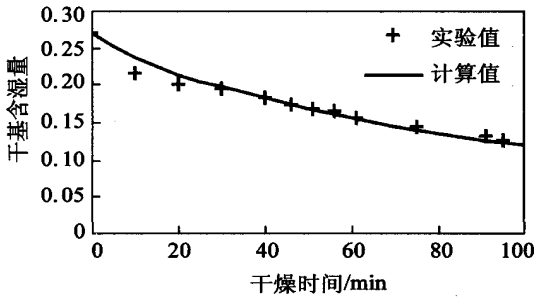


图 6 样机实验测量值与公式计算值的比较曲线  
Fig.6 Comparison between experimental and calculated results

值与计算值误差较大,但实验值与计算值的最大相对误差小于3%,可以满足生产要求,这证明前期的设想是可行的。

2.3 热泵流化床谷物干燥系统的经济性分析

采用图 5 所示的空气循环流程,进行了一系列干燥实验,对热泵流化床干燥样机的性能进行了全面的测定。图 7 为蒸发器回路风量是 2500 m<sup>3</sup>/h 时,热泵的制热量及功耗曲线。从图中可见,热泵实际制热量达 10kW 以上,而理论制热量为 12~14kW,即实际制热量略小于理论制热量。显然,热泵的制热能力基本充分发挥出来。此时,热泵的实际制热系数在 2.6 左右,略小于理论制热系数 2.8~3.1。

经过实验测量和数据整理,在连续运行工况下,热泵流化床干燥样机相关技术指标如表 1 所示。表中单位能耗除湿量表示每消耗 1kW 时能量可以除去的水分。传统干燥器的单位能耗除湿量为 0.5~1 kg/(kW·h)。由此可见,使用热泵作为热源可大大降低能耗,采用流化床作为干燥器可以提高干燥速度。

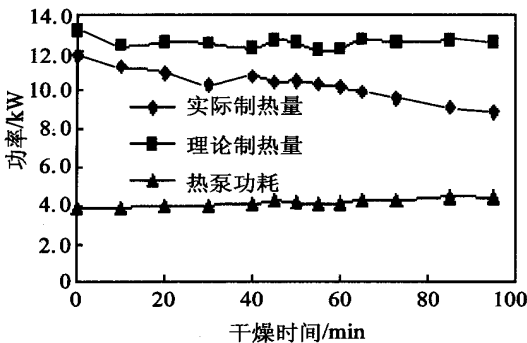


图 7 热泵蒸发器回路风量为 2500 m<sup>3</sup>/h 时,热泵制热量与功耗的变化曲线  
Fig.7 Profile of heating output and power consumption at an air flow of 2500 m<sup>3</sup>/h in the evaporator circuit

表 1 热泵流化床谷物干燥样机连续运行技术指标  
Table 1 Technical properties of the model fluidized bed dryer with heat pump in continuous operation

除湿范围(湿基)/%	7*	7*	10**	10**
样机容量/kg	100	100	100	100
空气入口温度/℃	70	80	70	80
干燥时间/min	35	25	45	30
产量/kg·h <sup>-1</sup>	171	140	133	200
能耗/kJ·(kg 水) <sup>-1</sup>	1 659	1 184	1 488	994

注: \* 含湿量由 20 降至 13%; \*\*含湿量由 23 降至 13%

3 结论

(1) 以小麦为干燥对象,通过薄层干燥实验,对其干燥特性曲线进行研究,综合分析各种影响因素,经过合理简化,回归出适用于指导流化床小麦干燥生产的经验公式,并通过样机实验对其可行性进行了验证。结果表明:以实验为基础,以干燥温度、空气相对湿度和谷物的初始含湿量为参数,建立半经验回归公式用以指导流化床谷物干燥生产(干燥温度低于 90℃)是可行的。

(2) 样机实验结果表明,采用热泵为热源,流化床作为干燥器,不但节能环保,而且能有效提高小麦干燥速度,具有继续开发推广的价值。

参考文献

- [1] 张延平,王立. 气固流化床系统非线性机理研究进展. 北京科技大学学报, 2004, 26(6): 645
- [2] Yang J, Wang L, Xiang F. et al. Experiment research on grain drying process in heat pump assisted fluidized beds. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2004, 11(4): 373
- [3] Analia L G, Rita M A, Sergio A G. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *J Food Eng*, 2002, 52: 313
- [4] Giner S A, Mascheroni R H. Diffusive drying kinetics in wheat, Part 1: Potential for a simplified analytical solution. *J Agric Eng Res*, 2001, 80(4): 351
- [5] Irudayaraj J, Wu Y. Finite element analysis of coupled heat, mass and pressure transfer in porous biomaterials. *Numer Heat Transfer Part A*, 1994, 26(3): 337
- [6] Jayas D S, Cenkowski S, Pabis S, et al. Review of thin layer drying and wetting equations. *Drying Technol*, 1991, 9(3): 551
- [7] Bruce D. M. Exposed layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150°C. *J Agric Eng Res*, 1985, 32: 337
- [8] Pfof H B, Maurer S G, Chung D S, et al. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. *Am Soc Agric Eng*, 1976, 76: 3520
- [9] Sinico R. Thin-layer drying and wetting of wheat. *Postharvest Biol Technol*, 1995, 5: 261
- [10] 向飞. 热泵流化床谷物干燥技术的研究: [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2003

## Wheat drying correlation and their applications in a fluidized bed dryer with heat pump

XIANG Fei, YANG Jing, WANG Li, TONG Lige

Department of Thermal Engineering, Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083, China

**ABSTRACT** Based on the fluidized bed theory, a series of thin layer wheat drying experiments were carried out in an electric drying oven with gentle breeze in it to simulate the wheat drying process in fluidized bed. As a result, the wheat drying correlation was developed from those experiment data for predicting the wheat drying time in fluidized bed. An experiment system combining fluidized bed with heat pump was designed and experiments on which indicated that the correlation could predict the drying time reasonably. Further economical analysis proved the efficiency and a promising future of the fluidized bed drying with heat pump.

**KEY WORDS** wheat; fluidization; regression; heat pump; drying

\*\*\*\*\*

(上接第 23 页)

## Research on treatment of landfill leachates by flocculation-adsorption

ZHANG Futao<sup>1,2)</sup>, FANG Shaoming<sup>3)</sup>, SONG Quanyuan<sup>1)</sup>

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) College of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China

3) Department of Chemical Engineering, Zhengzhou Institute of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

**ABSTRACT** Landfill leachate, whose main pollutants are organic matter, heavy metals and ammoniacal nitrogen, is a kind of poisonous, harmful and organic wastewater. The pretreatment of landfill leachate by flocculation-adsorption was investigated. Polyaluminium chloride (PAC) was used as the flocculant and its optimum dosage was 500 mg/L. The adsorbent was self-made modified bentonite. Experimental results showed that approximately 79% of COD<sub>Cr</sub> and 46% of ammoniacal nitrogen were removed. As to heavy metals, the removal ratios were from 53% to 98% according to different kinds of landfill leachate.

**KEY WORDS** leachate; pretreatment; polyaluminium chloride; modified bentonite