

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.027

多层带式干燥机干燥过程优化*

常 剑 尤长静 杨德勇 刘相东

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 针对多层带式干燥机的干燥过程建立了热、质传递的数学模型,并通过 C 语言编程进行干燥过程的模拟,得到热风在干燥机内温度和湿度的空间分布及其随时间的变化规律,以及物料床层内温度和含水率的分布及其随时间的变化规律。利用生产用多层带式干燥机蒜片干燥过程的试验数据对模型进行了验证,证明了模型的有效性。通过对模拟数据分析,对多层带式干燥机的结构参数(传送带长度、干燥机层数、通风道高度)和操作参数(传送带翻转时间、物料床层厚度、热风风速)进行了优化。

关键词: 大蒜 干燥 模拟 热质传递 操作条件

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0148-07

Optimization of Drying Process for Multilayer Belt Dryer

Chang Jian You Changjing Yang Deyong Liu Xiangdong

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The drying process of a multilayer belt dryer was modeled and simulated considering both the heat and mass transfer by C language. The data of the moisture content and temperature distributions in material bed and the air humidity and temperature profiles in air channel above material bed were obtained from the results of the simulation. The drying experiment data of garlic slices in an industrial scale dryer was obtained to verify the validation of the model. Then, based on the drying kinetic data obtained from the further simulations, the proper parameters of dryer structure and operating conditions were discussed, including belt length, number of belt layer, height of air channel, belt flip time, thickness of material bed and air velocity.

Key words Garlic, Drying, Simulation, Heat and mass transfer, Operating condition

引言

带式干燥机在我国生产厂家较多,广泛用于化工、食品、医药等行业,尤其对于蔬菜脱水,带式干燥机一直是应用最广泛的干燥设备^[1]。它主要分为穿流带式干燥机和多层带式干燥机,市场上流行的果蔬干燥设备大多是单级穿流带式干燥机,由若干个独立单元段组成,对干燥堆积密度比较大的物料,如大蒜、枣、洋葱和桂圆肉等,热空气很难穿过物料,干燥效果不好。相对来说,多层带式水平气流干燥

机,占地少、不用人工翻动,比较适合干燥堆积密度比较大的水果和蔬菜,但是该干燥过程主要还是依靠经验进行控制,使得干燥机的结构和操作参数,例如热风风速、传送带前进速度、传送带翻转时间,以及通风道高度等参数之间互相关联,难优化确定^[2-3]。所以对多层带式干燥机的干燥过程参数进行优化,以获得最佳的物料干燥效果,具有十分重要的实用价值。

带式干燥机的最优干燥条件通常是经过正交试验确定的,但是试验量较大,也有通过计算流体动力

收稿日期: 2011-09-01 修回日期: 2011-09-14

* 国家自然科学基金资助项目(51076163)

作者简介: 常剑, 博士生, 主要从事农产品干燥理论研究, E-mail: 0115-cj@163.com

通讯作者: 刘相东, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品干燥理论与技术研究, E-mail: xdliu@cau.edu.cn

学方法模拟风速场对结构进行优化,主要解决干燥箱内风速不均匀问题^[4-6]。模型模拟是一种对机械结构参数设计和操作参数优化较好的方法,建立相应的热、质传递模型,可以预测一定条件下的机械行为。许多针对带式干燥机进行模型模拟用于结构设计和干燥动力学分析的研究已见报道。大部分模型预测研究是针对穿流带式干燥过程的,对多层水平气流带式干燥机的模型优化研究很少^[7-15]。

本文应用模型模拟的方法,分析预测多层带式水平气流干燥机干燥过程中堆积物料各层的湿含量和温度分布,及通风道各水平位置的热空气湿度和温度分布,并根据模拟结果确定其最佳传送带的长度、干燥机层数、通风道高度、传送带翻转时间、物料堆积厚度和热风速度,旨在为多层带式水平气流干燥机干燥过程结构参数和操作参数的选择提供理论依据。

1 试验

该试验在生产用的多层水平带式干燥机上进行,目的是将实际干燥过程收集的数据与模拟计算数据对比以验证模型的有效性。

1.1 试验设备

试验在青岛华杰食品有限责任公司自行设计的多层水平带式干燥机上进行,主要由干燥箱和传送带组成。干燥箱体长 810 cm、宽 225 cm、高 300 cm,不锈钢密封表面。箱内有 6 层传送带,传送带为 6 目钢丝网,每层传送带长 800 cm、宽 215 cm。干燥介质为空气,空气用风机过滤抽入,并由热风炉加热后,水平吹过干燥机的传送带。

1.2 测试内容与方法

试验物料为大蒜,产自山东省。大蒜经去皮、分瓣、切片、浸泡、去膜、漂洗和滤干后进入干燥机进行干燥。蒜片厚度 3 mm,蒜片床层 10 cm,初始干基含水率为 1.18 kg/kg。

多层带式干燥机的干燥过程如图 1 所示。物料由进料口输送到第 1 层的传送带上,由隔板均匀地平铺在传送带上,并随之向前输送。同时热空气由进风口(进风口在干燥机的一侧)进入,与带前进同方向,水平流过物料层,与表层物料进行热、质传递后,再从干燥机的出风口(出风口在干燥机的另一侧)排出。热空气的温度、湿度和风速分别为 80℃、0.015 kg/kg 和 2.5 m/s。物料到了传送带末端,由转动装置翻转到第 2 层的传送带上,并随之向前输送,同时热风与带前进反方向水平流过物料层,与表层物料进行热、质传递后,从干燥机的出风口排出。物料循环干燥,直至出料口。物料在干燥机奇数层

(1,3,5)的干燥为顺流干燥,在干燥机偶数层(2,4,6)的干燥为逆流干燥。

干燥过程中分别对干燥机每层传送带上的堆积料层的最顶层、中间层和最底层进行采样,并由重量法测出其湿含量,由 Raynger 便携式红外测温仪测定其温度。热空气的进、出口温度也由 Raynger 便携式红外测温仪测定,并测出各通风道同一水平位置上任意 3 点的热空气干球温度和湿球温度。

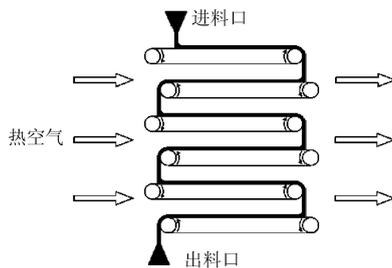


图 1 多层带式干燥机的干燥过程

Fig. 1 Drying process of multilayer belt dryer

2 干燥模型的建立

2.1 数学模型

根据多层水平带式干燥机的生产过程,以大蒜为试验物料,建立多层水平带式干燥机干燥过程的床层与空气的一维热质传递模型。

取任意物料床层二维空间的控制体(hdy)及其上面对应通风道空间空气的控制体(Hdy)为研究对象,建立图 2 所示坐标, x 代表料层厚度方向, y 代表料层沿带长方向, H 是床层上方通风道的高度, h 是料层厚度。为了简化模型,作如下假设:①忽略料层、空气在 y 方向的热、质传递。②单个散体物料内的温度梯度忽略不计,视为均匀分布。③箱壁为绝热体,忽略通过箱壁的热损失。④穿流进入物料的热空气忽略不计,底层物料没有与热空气进行对流传热和对流传质。⑤在干燥过程中,忽略收缩引起的料层厚度的变化。

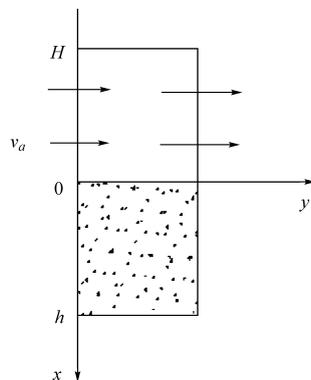


图 2 床层及对应通风道的控制体

Fig. 2 Control volume of material bed and air duct

料层内部水分传递以扩散为主。只考虑料层在

x 方向的水分传递,忽略 y 方向的传递,得

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中 X ——物料的干基含水率

D_{eff} ——有效扩散系数 t ——时间

料层与湿空气在 x 方向的传质过程存在两种情况:顺流干燥($y = vt$)和逆流干燥($y = -vt$),得

$$\frac{dY}{dt} = \frac{v\rho_m(1-\varepsilon)}{\rho_a v_a H} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_0^h X(x,y) dx \right) \quad (2)$$

式中 Y ——空气绝对湿度

v ——传送带前进速度

v_a ——热空气流动速度

ρ_m ——大蒜绝干密度

ρ_a ——干空气密度

ε ——大蒜床层孔隙率

料层内部热量传递以导热为主。只考虑热量沿 x 方向的传递,忽略 y 方向的传递,得

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{k}{\rho_m c_m + \rho_m c_w X} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{h_{fg} + c_v(T_a - T_m)}{c_m + c_w X} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (3)$$

式中 T_a ——热空气温度 T_m ——物料温度

c_m ——干物质比热容

c_v ——水蒸气比热容

c_w ——水比热容 h_{fg} ——水汽化热

k ——物料导热系数

料层与湿空气在 x 方向上的传热过程与传质过程相似,也存在两种情况:顺流干燥($y = vt$)和逆流干燥($y = -vt$),得

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{h_H v}{(\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a Y c_v) H} (T_m(0,t) - T_a) \quad (4)$$

式中 c_a ——绝干空气比热容

h_H ——物料与热空气对流传热系数

2.2 初始条件与边界条件

上述 4 个方程组构成了多层水平气流带式干燥机的干燥数学模型,但是每层的边界条件和初始条件不尽相同。物料在干燥机中第 1 层(顺流干燥)上干燥的边界条件和初始条件为

$$h_H(T_a - T_m(0,t)) = k \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

$$h_M \frac{\rho_a}{\rho_m} (Y_{\text{max}} - Y) = D_{\text{eff}} \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

$$\frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} \Big|_{x=h} = 0$$

$$T_m(0 \leq x \leq h, t=0) = T_{m0}$$

$$X(0 \leq x \leq h, t=0) = X_0$$

$$T_a(-H \leq x \leq 0, t=0) = T_{a0}$$

$$Y(-H \leq x \leq 0, t=0) = Y_0$$

式中 h_M ——物料与热空气对流传质系数

Y_{max} ——湿空气最大绝对湿度

物料从第 1 层翻转到干燥机第 2 层,假设物料的温度和含水率重新均匀分布,所以第 2 层的初始条件和边界条件要以第 1 层的数学模型解出的数据为依据。依次类推,就可以求出每层的 T_m 、 X 、 Y 和 T_a 。

2.3 干燥模型参数的确定

2.3.1 有效扩散系数

物料的有效扩散系数与温度的关系通常可由 Arrhenius 方程描述^[16]

$$D_{\text{eff}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

根据薄层干燥特性,水分扩散的活化能 E_a 为 989 kJ/kg, D_0 为无限高温下的扩散常数, R 为理想气体常数,温度对大蒜有效扩散系数的影响可以表示为^[16]

$$D_{\text{eff}} = 1.52 \times 10^{-7} \exp\left(-\frac{2140.3}{T}\right)$$

2.3.2 导热系数

大蒜的含水率显著影响其导热系数,计算式为^[17]

$$k = 0.49 + 0.37 \exp\left(\frac{0.04X}{X+1}\right)$$

2.3.3 对流传热系数与对流传质系数

湿空气与大蒜的对流传热系数由 Nusselt 数表达式计算

$$h_H = \frac{Nuk_a}{L}$$

式中 k_a ——湿空气导热系数

L ——蒜片长度

在强制对流中, Nusselt 数是 Re 和 Pr 的方程, Re 是代表流动状态的准数, Pr 是表示物性影响的准数,计算公式为

$$h_H = \frac{k_a}{L} A (RePr)^m$$

式中 A 、 m ——由试验确定的常数

Akpinar 对各种农产品对流传热系数进行了试验,得到 A 和 m 的值分别是 0.982 和 0.036^[18]。

在湿空气条件下,传热和传质类似律通常用 Lewis 关系式表示^[19],对流传质系数计算式为

$$h_H/h_M = c_H$$

式中 c_H ——湿空气的比热容

2.3.4 蒜片床层孔隙率

孔隙率是蒜片床层中孔隙体积占总体积的比

值,即^[20]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_m}$$

式中 ρ_b ——蒜片床层密度

3 模拟过程

用有限差分法对上述方程离散化,用 C 语言对多层水平气流带式干燥机的干燥过程进行编程模拟,模拟参数如表 1 和表 2 所示,模拟步骤如下:

①把物料床层分为若干层 i ,每层的厚度为 Δx 。②把干燥时间分为若干时间段 n ,时间增量为 Δt 。③热空气进口的湿度和温度、进口物料的温度和含水率都是已知的,经过 Δt 以后,根据离散的方程组,可以迭代计算出各层物料的温度、含水率及空气的温、湿度。④不断增加 Δt ,就可以计算出不同阶段物料各层温度、含水率及空气的温、湿度。

表 1 蒜片和热空气的特性参数

Tab. 1 Characteristic parameters of garlic slice and air

| 参数 | 数值 |
|--|---------------------|
| 对流传热系数 $h_H/W \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ | 0.644 |
| 对流质系数 $h_M/\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ | 0.662 |
| 水汽化热 $h_{fg}/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 2358.4 |
| 干空气比热容 $c_a/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 1.005 |
| 水蒸气比热容 $c_v/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 1.916 |
| 液态水比热容 $c_w/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 4.179 |
| 干物料比热容 $c_m/\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | 3.310 |
| 干空气密度 $\rho_a/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 1.060 |
| 绝干蒜片密度 $\rho_m/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 1.387×10^3 |
| 蒜片床层密度 $\rho_b/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 1.026×10^3 |
| 床层孔隙率 ε | 0.457 |

表 2 干燥条件参数

Tab. 2 Drying condition parameters

| 参数 | 数值 |
|--|-------|
| 热风的初始温度 $T_{a0}/^\circ\text{C}$ | 80 |
| 热风的绝对湿度 $Y_0/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 0.012 |
| 蒜片的初始温度 $T_{m0}/^\circ\text{C}$ | 20 |
| 蒜片的初始含水率 $X_0/\%$ | 1.18 |
| 热风速度 $v_a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 2.5 |
| 传送带前进速度 $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 0.004 |
| 料层厚度 h/m | 0.1 |

4 结果及分析

4.1 模型验证

将模拟结果中的物料干基含水率和温度、热风

湿度和温度与试验结果进行对比分析,如图 3~4 所示。每层床层的堆积物料为高度 1 cm 的 10 个子层,第 1 子层为床层顶层,与热空气接触,第 10 子层底层,与传送带接触。

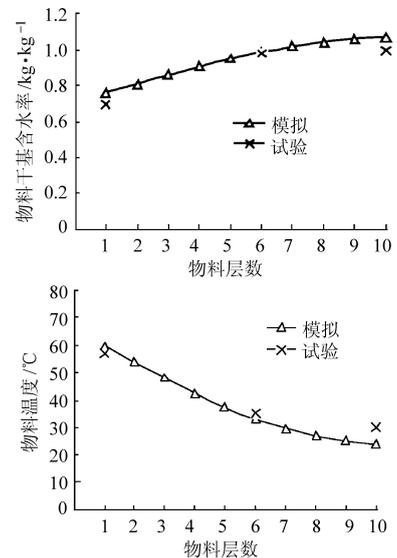


图 3 物料干基含水率和温度与堆积物料层数的关系

Fig. 3 Moisture content and temperature of garlic slice vs sub-layer number

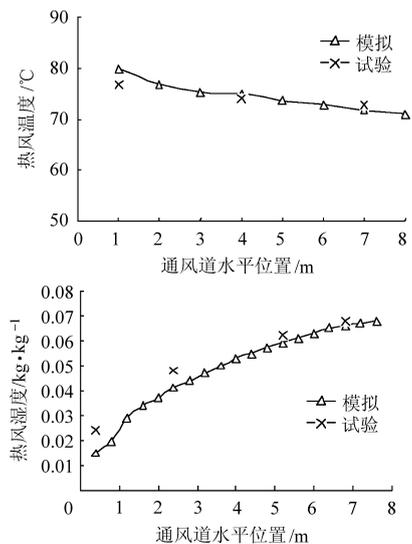


图 4 热风温度和湿度与通风道水平位置的关系

Fig. 4 Air temperature and humidity vs horizontal position of air duct

从图中可以看出,蒜片干基含水率的模拟数据与试验数据的最大偏差为 3.6%,蒜片温度的模拟数据与试验数据的最大偏差为 1.8%,热风湿度的模拟数据与试验数据的最大偏差为 1.5%,热风温度模拟数据与试验数据的最大偏差为 2.2%。由此可见,模型能够较合理地模拟蒜片在多层水平带式干燥机中的干燥过程。

4.2 干燥机结构和干燥过程优化

根据模拟得到的数据绘制成干燥曲线图,对多

层水平带式干燥机提出干燥机结构和干燥过程的优化方案。

4.2.1 传送带最佳翻转时间

经过一段时间的干燥后,如果某一层传送带上的堆积物料各子层含水率的变化已经很小以至于不变时,就可以认为该时间是传送带最佳翻转时间,继续干燥物料的含水率也不会有显著变化,还会增加能耗,降低干燥效率。在热风温度为 80°C 、热风风速为 2.5 m/s 、蒜片初始干基含水率 1.1 kg/kg 、物料初始温度 20°C 、物料堆积厚度为 10 cm 、蒜片厚度为 3 mm 的条件下,经过模拟和补充试验得到蒜片含水率、干燥时间和堆积蒜片层数(将 10 cm 厚的物料分为10层)三者的关系,如图5与图6所示。用模拟结果与试验结果共同找出物料干基含水率从显著变化到变化缓慢的时间点,以确定传送带最佳翻转时间。

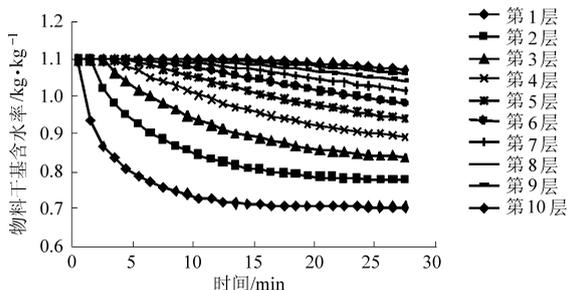


图5 不同子层蒜片含水率与干燥时间的关系

Fig.5 Moisture content vs drying time in different sub-layers of garlic bed

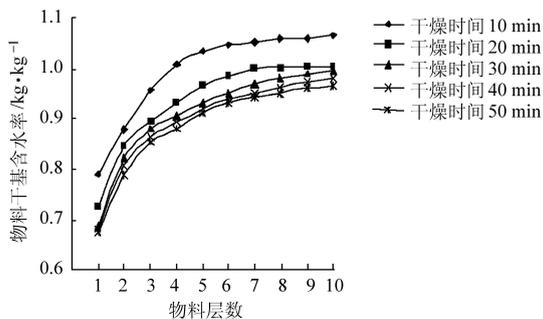


图6 不同干燥时间蒜片含水率与堆积物料层数的关系

Fig.6 Moisture content vs sub-layer number at different drying time

从图5和图6都可以看出,堆积的蒜片料层越靠近表面水分含量下降越快,越靠近底层水分含量下降越缓慢。蒜片干燥时间接近 30 min 时,蒜片各层的含水率下降缓慢,其表层含水率下降到了 0.7127 kg/kg ,最底层大蒜的含水率为 1.083 kg/kg (图5)。图6中,干燥时间为 10 min 和 20 min 时,各层蒜片含水率下降接近 0.1 kg/kg ;干燥时间为 30 min 时,各层含水率下降约为 0.03 kg/kg ;而干燥时间为 40 min 和 50 min 时,各层含水率下降约小于

0.03 kg/kg (图6)。因此,当传送带速度为 0.004 m/s 时,该干燥机的传送带翻转时间选择 $25\sim 30\text{ min}$ 较合理。

4.2.2 传送带长度

根据对传送带最佳翻转时间的模拟分析,当传送带速度为 0.004 m/s 时,蒜片的传送带翻转时间范围为 $25\sim 30\text{ min}$,所以最佳传送带长度为 $6\sim 7\text{ m}$ 。

4.2.3 干燥机层数

干燥机层数对整个干燥机的成本有很大影响,增加层数将会直接带来材料的增加,而且随着层数的增加,整个干燥机的高度也将增高,这样会间接消耗更多的能源(物料必须从地面输送到最顶层)。只要能够使堆积物料底层达到预期干基含水率的干燥机层数才是合理的数量。将 0.06 kg/kg 作为蒜片干燥的最终干基含水率进行模拟试验^[21]。图7为传送带翻转时间为 30 min 时,蒜片在多层带式干燥机各层中的干燥情况。

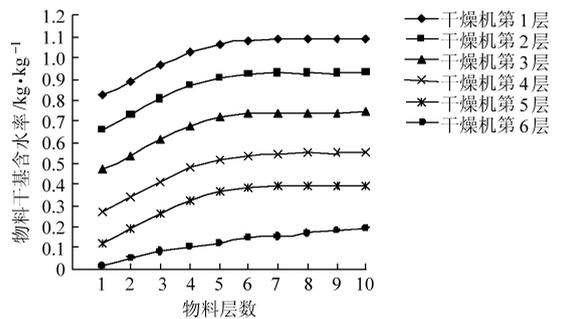


图7 干燥机各层蒜片含水率与堆积层数的关系

Fig.7 Moisture content vs sub-layer number in different layers of dryer

从图7可以看出,在给定条件下,为了确保蒜片干基含水率小于 0.06 kg/kg ,干燥机的层数应设计为6层。

4.2.4 通风道高度

通风道的高低对物料的干燥效果影响很大,如果通风道中空气达到饱和,那么就会抑制料层中的水分向空气迁移,从而影响干燥效果和干燥质量。干燥机层间距由物料的堆积高度和通风道的高度来确定,而通风道的高度由热风风速、物料的堆积高度及其所产生的水蒸气量决定。热风风速越大、物料堆积高度越高,则要求通风道高度越高;热风风速越小、物料堆积高度越低,则要求通风道高度越低。通常第1层的通风道高度最高,因为物料在第1层上产生的水蒸气最多。为了保证干燥效果,最好其他几层的高度也按第1层的高度设计。通风道的高度至少要满足热空气不达到饱和。

在热风风速为 2.5 m/s 、蒜片初始干基含水率 1.1 kg/kg 、物料堆积厚度为 10 cm 、传送带翻转时间

为 30 min 的条件下, 改变通风道的高度, 模拟得到通风道中热风湿度与干燥时间的关系如图 8 所示。

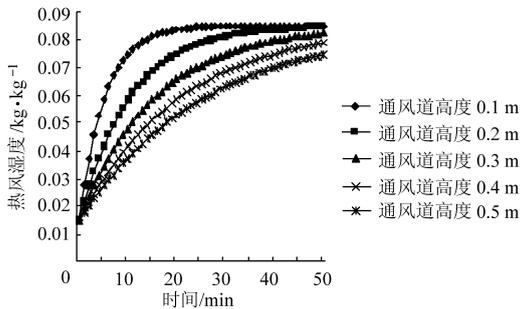


图 8 不同通风高度下热风湿度与干燥时间的关系

Fig. 8 Air humidity vs drying time at different duct heights

从图 8 可以看出, 当干燥时间为 30 min 左右时, 通风道高度小于 0.2 m, 通风道中的热风已经达到饱和, 而通风道高度大于 0.3 m, 通风道中的热风远未达到饱和, 所以合理的通风道高度应大于 0.2 m。

4.2.5 床层堆积厚度

床层并不是越厚越好, 过高的堆积厚度会影响干燥效果。在热风风速为 2.5 m/s、蒜片初始干基含水率 1.1 kg/kg、通风道厚度为 0.3 m、传送带翻转时间为 30 min 的条件下, 改变物料堆积厚度, 模拟得到干燥机各层中物料含水率和堆积料层的关系如图 9 所示。

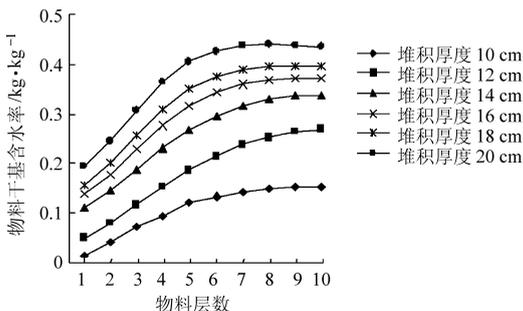


图 9 干燥机第 6 层蒜片含水率和床层堆积厚度的关系

Fig. 9 Moisture content vs sub-layer number in different bed thickness of the sixth dryer layer

从图 9 中可以看出, 物料堆积高度为 10 cm 时, 物料的平均含水率接近预期的干基含水率 (0.06 kg/kg)。物料堆积高度大于 10 cm 的时候, 上层物料的含水率没有达到预期值, 底层物料的含水率与预期值偏离得更多。因此合理的物料堆积高度

应该小于 10 cm。

4.2.6 热风风速

热风的风速也会影响干燥过程。若风速过快, 热风经过物料表面会造成传热和传质不充分, 从而造成能源浪费; 若风速过慢, 干燥介质会很快达到饱和, 影响热风的干燥能力, 进而影响干燥效率。

在热空气的温度为 80℃、蒜片初始干基含水率 1.1 kg/kg、物料初始温度 20℃、物料堆积厚度为 10 cm、蒜片厚度为 3 mm、通风道高度为 0.3 m 和传送带翻转时间为 30 min 的条件下, 改变热风风速, 模拟得到热风湿度与干燥时间的关系, 如图 10 所示。

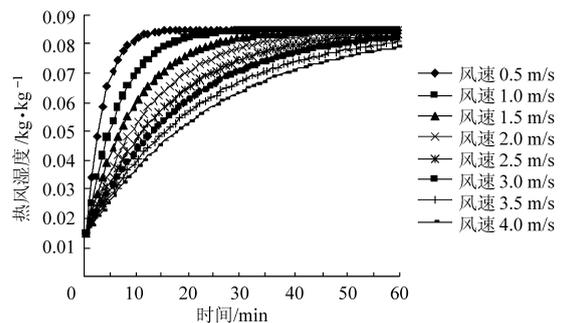


图 10 不同风速下热风湿度和干燥时间的关系

Fig. 10 Air humidity vs drying time at different air velocities

从图 10 可以看出, 干燥时间到了 30 min 左右时, 风速小于 2.5 m/s, 通风道中的热风已经达到或接近饱和; 风速大于 3.0 m/s, 通风道中的热风远未达到饱和。因此, 最佳热风速度应至少为 2.0 m/s。

5 结论

(1) 本文建立的模型可用于预测热风温度、湿度以及物料的温度和含水率在干燥通风道或干燥机传送带床层上不同位置的分布规律及不同时刻的变化规律, 且模拟结果与试验结果相符, 该模型可以反映实际的干燥过程。

(2) 通过对模拟数据分析, 对生产用的多层带式干燥机蒜片干燥过程的结构参数 (传送带长度、干燥机层数、通风道高度) 和操作参数 (传送带翻转时间、物料床层的厚度、热风风速) 进行了优化。

参 考 文 献

- 史勇春, 柴本银. 中国干燥技术现状及发展趋势[J]. 干燥技术与设备, 2006, 4(3): 122 ~ 130.
- 尤长静. 果蔬在多层水平带式干燥机中干燥过程的模型和模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
You Changjing. The model and simulation of drying fruits and vegetables in multi-layer belt dryer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- Kiranoudis C T. Design and operational performance of conveyor-belt drying structures[J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 69(1): 27 ~ 38.

- 4 曾艳,刘雪松,陈勇,等.丹参浸膏真空带式干燥工艺的研究[J].中草药,2006,37(2):196~198.
Zeng Yan, Liu Xuesong, Chen Yong, et al. Optimization for vacuum belt drying of radix *Salvia miltiorrhiza* extract[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2006,37(2):196~198. (in Chinese)
- 5 刘雪松,邱志芳,王龙虎,等.三七浸膏真空带式干燥工艺研究[J].中国中药杂志,2008,33(4):385~388.
Liu Xuesong, Qiu Zhifang, Wang Longhu, et al. Optimization for vacuum belt drying process of *Panax notoginseng* extract [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008,33(4):385~388. (in Chinese)
- 6 张娟娟.基于 FLUENT 的带式果蔬干燥机的结构优化[D].兰州:兰州理工大学,2010.
Zhang Juanjuan. Based on the soft fruit belt drying machine structure optimization [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010. (in Chinese)
- 7 牛海霞,刘榴,赵文河,等.脉动燃烧尾气干燥过程质量传递特性[J].农业机械学报,2011,42(1):129~133.
Niu Haixia, Liu Liu, Zhao Wenhe, et al. Mass transfer between materials and unsteady airflow from a helmholtz type combustor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):129~133. (in Chinese)
- 8 刘云宏,朱文学,刘建学.地黄真空红外辐射干燥质热传递分析[J].农业机械学报,2011,42(10):135~140.
Liu Yunhong, Zhu Wenxue, Liu Jianxue. Mass and heat transfer analysis of vacuum infrared radiation drying on rehmanniae [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):135~140. (in Chinese)
- 9 马栋棋.新型自吸离心泵数值模拟及试验研究[J].排灌机械工程学报,2011,29(6):483~486.
Ma Dongqi. Numerical simulation and experiment research on new type self-priming centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(6):483~486. (in Chinese)
- 10 Kiranoudis C T, Maroulis Z B, Marinos-Kouris D. Dynamic simulation and control of conveyor-belt dryers [J]. Drying Technology, 1994,12(7):1575~1603.
- 11 Khankari K K, Patankar S V. Performance analysis of a double-deck conveyor dryer—a computational approach [J]. Drying Technology, 1999,17(10):2055~2067.
- 12 陈龙健,刘德旺,吕黄珍.5HCCX-1.6型多单元带式干燥机干燥过程的计算机模拟[J].农业工程学报,2006,22(2):122~126.
- 13 Vaxelaire J, Puiggali J R. Analysis of the drying of residual sludge: from the experiment to the simulation of a belt dryer [J]. Drying Technology, 2002,20(4):989~1008.
- 14 Schmalko M E, Peralta J M, Alzamora S M. Modeling the drying of a deep bed of *ilex paraguariensis* in an industrial belt conveyor dryer[J]. Drying Technology, 2007,25(12):1967~1975.
- 15 Sebastian P, Nadeau J P, Puiggali J R. Designing dryers using heat and mass exchange networks: an application to conveyor belt dryers[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1996,74(8):934~943.
- 16 Madamba P S, Driscoll R H, Buckle K A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices [J]. Journal of Food Engineering, 1996,29(1):75~97.
- 17 Madamba P S, Driscoll R H, Buckle K A. Models for the specific heat and thermal conductivity of garlic [J]. Drying Technology, 1995,13(1~2):295~317.
- 18 Akpınar E K. Experimental determination of convective heat transfer coefficient of some agricultural product in forced convection drying[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004,31(4):585~595.
- 19 Strumillo C, Kudra T. Drying: principles, applications and design[M]. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- 20 Yan Z, Sousa-Gallagher M J, Oliveira F A R. Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying[J]. Journal of Food Engineering, 2008,84(3):430~440.
- 21 Sharma G P, Prasad S, Chahar V K. Moisture transport in garlic cloves undergoing microwave-convective drying[J]. Food and Bioprocesses Processing, 2009,87(1):11~16.