

文章编号 1000-5013(2003)02-0184-05

薄层介质干燥过程内部水分扩散

肖美添 朱 艳 刘华信

(华侨大学材料科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

摘要 以海带作为薄层介质的试样, 进行对流干燥实验. 根据单项指数模型, 计算干燥过程中介质内部水分的有效扩散系数. 建立物料内水分扩散微分方程及边界条件, 用有限差分法进行数值求解, 模拟计算结果与实验结果相吻合. 研究结果有利于深入分析和理解物料的干燥特性, 以及其在一定条件下的脱水能力.

关键词 薄层介质, 干燥, 水分扩散系数, 扩散模型

中图分类号 TQ 028.6 TQ 019 S 946.1

文献标识码 A

干燥是一个很重要的加工过程, 其热传质复杂又与干燥外部条件如干燥介质温度、湿度及干燥方式有关, 且与物料结构、理化性质等因素有关. 对于其规律的研究一直受到人们的极大重视^[1~7]. 目前, 常用半经验、经验模型(指数模型)和 Page 模型, 来描述干燥过程物料中平均含水率的变化情况. 要进一步分析和再现物料内部水分的扩散过程, 需确定物料内部水分的有效扩散系数. 它反映物料在一定干燥条件下的脱水能力, 也是干燥机优化设计的重要参数之一. 新鲜农产品如蔬菜、种子和海带等含水量多、易腐烂, 为便于保存和运输, 除了自然干燥外, 普遍采用洞道干燥法. 本文以海带为薄层物料的试样, 由实验干燥特性曲线确定物料内部水分的有效扩散系数, 并用于数值法求解扩散微分方程, 模拟实验条件下的物料脱水过程.

1 有效扩散系数的确定

1.1 干燥实验

本试验所采用的装置, 是天津大学化工实验中心生产的洞道式热风干燥实验装置, 流程示意图如图1所示. 试验所用试样为福建省湄洲湾出产的新鲜湿海带. 试样用纯净水浸泡0.5 h, 去除所沾杂质、沙土等. 切成宽度为8~10 mm, 长度为100~120 mm的薄片(厚度 δ 为1~2 mm), 并凉去表面的水分. 实验时, 待干燥介质即热风的温度和风速稳定后, 把湿海带试样平铺在水平铁丝网托盘上, 让热风平行掠过海带使其干燥.

1.2 有效扩散系数的计算

本实验以新鲜湿海带为薄层物料的试样, 干燥空气流速 v (指干燥室)恒定为 $2.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 在干燥温度(K)分别为348, 353, 358和366时, 物料的含水率(M_r)随时间(t)变化的

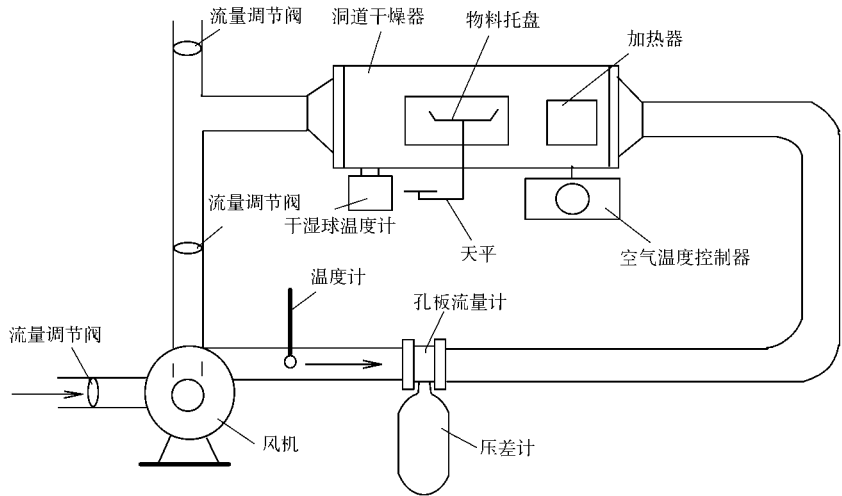


图 1 试验装置示意图

曲线, 如图 2 所示; 平均含水率 (\bar{M}) 曲线, 如图 3 所示. 海带试样象许多农产品一样, 其干燥过程水分的有效扩散系数值无法从文献中直接查到. 到目前为止, 对于物料有效扩散系数的求

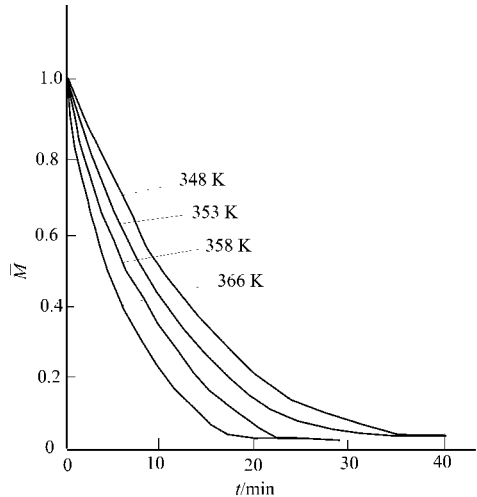


图 2 物料的含水率随时间的变化曲线

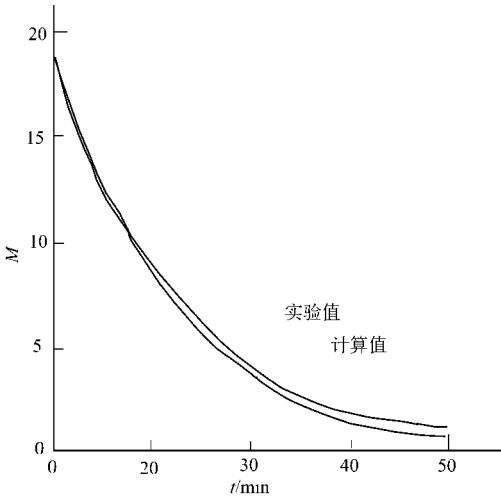


图 3 海带干燥模型计算值与实验值的对比

取, 没有统一和有效的方法. 它与水分同物料的结合形式有关, 一般采用实验的方法来确定. 本文根据物料含水率随干燥时间的推移而呈逐渐下降的变化趋势, 采用单项指数模型来描述实验干燥特性曲线. 即

$$M_r = a \exp(-kt). \tag{1}$$

一般情况下, 取 $a = 1$, 而且干燥速率常数 k 与有效扩散系数 D_{ef} 有如下关系^[7]. 即

$$k = D_{ef}^{1/2} / 4L^2. \tag{2}$$

这样就可以结合实验数据, 采用最小二乘法回归求出不同干燥温度下的干燥常数 k , 并由式 (2) 计算出有效扩散系数 D_{ef} , 如表 1 所示. 表中, s 为标准差, r 为相关系数. 由表 1 可以看出, 随着干燥介质温度

表 1 不同干燥温度(K)下物料的干燥常数 k 和有效扩散系数 D_{ef}

参 数	348	353	358	366
k	0.032 111	0.034 408 2	0.039 788 2	0.042 864
$D_{\text{ef}}/\times 10^9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	3.244	3.442	4.018	4.329
s	0.035 386	0.048 434	0.051 274	0.036 068
r	0.995 141	0.990 879	0.989 772	0.994 952

的提高,干燥常数 k 也随之增大,相应的有效扩散系数 D_{ef} 的值也随之增大.在通常情况下,薄层物料干燥的有效扩散系数 D_{ef} 与绝对温度 T 的关系,可用经验方程^[2]来描述.即

$$D_{\text{ef}} = D_0 \times \exp(-\frac{E_a}{RT}). \quad (3)$$

由式(3)可知, $\ln D_{\text{ef}}$ 与温度的倒数 $1/T$ 的关系为线性曲线,如图 4 所示.可回归出指前因子 $D_0=1.626 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $E_a=17.983 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

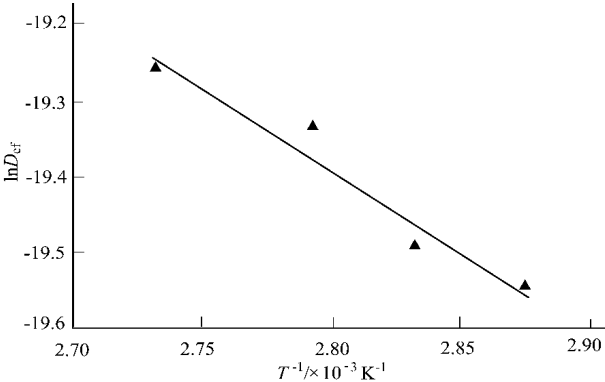


图 4 $\ln D_{\text{ef}}$ 与 $1/T$ 的关系曲线

2 干燥过程扩散微分方程的建立及求解

2.1 扩散微分方程的建立

如图 5 所示,海带薄层物料上下表面面积远大于侧面和端面,水分蒸发主要是物料的上下表面,水分的扩散也主要是沿物料的厚度方向进行.故干燥过程可按一维平板状物料非稳态质扩散过程处理.本文作 5 个假定.(1) 介质内部的水分运动机理,是在水分梯度作用下的液态扩散.(2) 忽略干燥过程介质内部的温度梯度,并认为介质在干燥过程等温.(3) 忽略干燥过程介质的收缩.(4) 介质为各向同性匀质体.(5) 干燥开始介质内部水分和温度均匀分布.根据 Fick 定律及质量守恒原理,建立描述海带干燥过程经简化的扩散微分方程,即

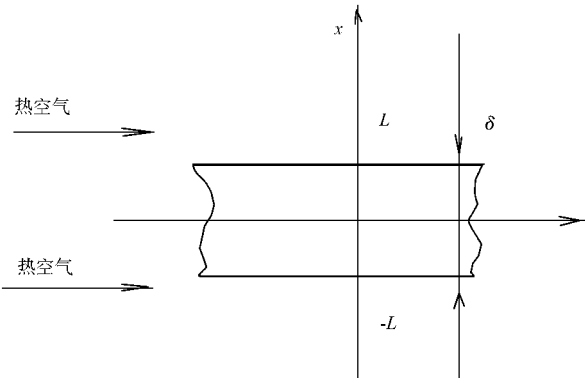


图 5 干燥模型计算示意图

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_{\text{ef}} \frac{\partial M}{\partial x}, \quad -L < x < L, \quad t > 0. \quad (4)$$

其边界条件为

$$\frac{\partial M}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad t > 0,$$

而初始条件为 $M|_{t=0} = M_0(-L \leq x \leq L)$. 其中, M 为物料干基含水率, L 为物料厚度的一半.

2.2 边界条件的表达及简化

当 $x = \pm L$ 时, 即物料表面, 可以认为物料表面由内部扩散出来的湿分 (M_t) 与由周围的空气介质带走的湿量 (M_h) 相等^[1]. 即

$$-D_{\text{ef}} \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=L} \rho_B = \alpha (\rho_W - \rho). \quad (8)$$

这一项正是表明物料在 t 时, 刻时单位时间、单位传质表面积脱出水的质量. 设 $f(t) = \alpha (\rho_W - \rho) / \rho_B$, 由此可得

$$f(t) = - \frac{\partial M}{\partial x} \frac{V_B \rho_B}{S_B \rho_B} = - \frac{\partial M}{\partial x} \frac{1}{F}. \quad (9)$$

在式(8), (9)中, ρ_B , ρ_W , ρ 分别表示物料干质密度、物料表面空气的水分密度和周围环境空气的水分密度, α 为物料表面的对流传质系, V_B , S_B 和 F 分别表示试样体积、表面积和比表面积. 通过实验平均含水率曲线, 采用最小二乘法, 回归出 M 平均含水率随时间 t 变化的多项式表达式 (这里以 $v = 2.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T = 353 \text{ K}$ 为例) 为

$$M = 18.1358 - 1.1397t + 0.0199t^2. \quad (10)$$

2.3 数值计算

由实验数据计算得出的有效扩散系数 D_{ef} 的值, 可直接代入扩散微分方程(4)中, 并把该方程化为差分方程. 结合边界条件和初始条件, 可采用追赶法进行数值计算

3 计算结果与传质分析

在实验条件下, 由扩散微分方程模拟计算薄层物料的脱水过程. 物料内部不同节点在不同时刻的干基含水率变化曲线, 如图6所示. 海带干燥模型计算值与实验值的对比曲线, 如图3所示. 高初始含湿量多孔介质中, 水分扩散或迁移主要是由于液相毛细管流动和水分扩散运动引起的. 对于薄层物料而言, 在 $t = 0$ 时刻, 可以认为物料内部有均匀的湿度分布. 物料初始状态时表面湿润, 水分充满薄壁细胞内和细胞间, 细胞可以自由伸展, 水分逸出通道宽松. 此时的干燥速率虽然受到物料内部水分的传递阻力, 但主要是受到物料表面蒸发的影响. 由图6可见, 干燥开始阶段, 物料内部湿度梯度较大, 湿度梯度变化剧烈, 干燥速率也较大. 空气从物料表面带走的水分, 也较多随着时间的推移和干燥过程的进行. 外层细胞向内部收缩, 细胞间隙变小, 胞内水分也逐渐向胞外移动, 内部水分传递逐渐成为控制因素, 物料内部湿度梯度变小, 从物料表面蒸发掉的水分逐渐减少. 所以干燥速率逐渐变慢, 这说明物料内部的水分变化是逐渐深入的, 水分扩散过程具有非稳态性. 由图6可知, 物料平均含水率的实验值

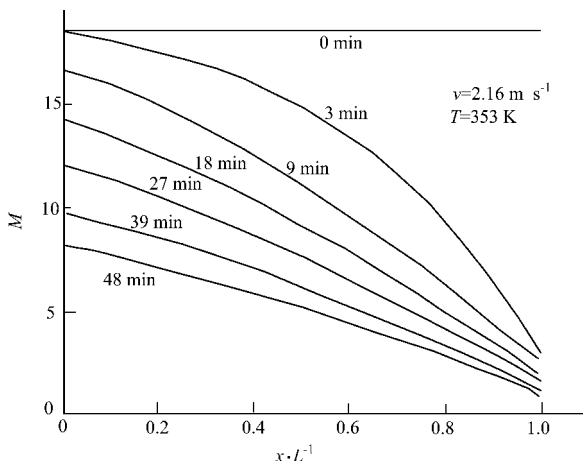


图6 干燥过程物料内部含湿量分布图

与数学模型计算结果, 能较好相吻合. 这就表明, 本文所采用的有效扩散系数的确定方法和干燥数学模型是可行的, 可用于计算高初始含湿量薄层物料的干燥过程. 它为进一步研究工业干燥过程物料内部湿度场和温度场的变化规律奠定基础.

4 结束语

由物料的实验干燥特性曲线, 可以确定的水分有效扩散系数, 用于经简化的传质扩散系数方程. 数值计算的计算结果与实验结果相吻合. 研究结果有助于深入理解物料的干燥特性, 进一步认识薄层物料在一定条件下内部水分扩散机理和脱水能力.

参 考 文 献

- 1 王朝晖, 涂 颀. 干燥过程热质传递的简化模型[J]. 化工学报, 1995, 46(5): 579 ~ 585
- 2 杨俊红, 焦士龙. 菜豆种子薄层干燥物料内部水分扩散系数的确定[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(2): 221 ~ 224
- 3 李有荣, 曾丹苓. 多孔物料干燥时的偶合传热传质效应[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1): 90 ~ 93
- 4 May B K, Sinclair A J. A study of temperature and sample dimension in the drying of potatoes[J]. Drying Technology, 2000, 18(10): 2 291 ~ 2 306
- 5 Shri R W, Robert A H. Analysis of heat and mass transfer during drying of paper[J]. Drying Technology, 1999, 17(1): 49 ~ 71
- 6 王 馨, 王 海. 多孔介质快速干燥过程中热质偶合效应的研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 344 ~ 347
- 7 Lopei A, Iguaz A. Thin layer drying behavior of vegetable wastes from wholesale Market[J]. Drying Technology, 2000, 18(4): 995 ~ 1 006

Moisture Diffusion from Thin Layer Media during Drying Process

Xiao Meitian Zhu Yan Liu Huaxin

(College of Mater. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract Taking laminaria japonica as the sample of thin layer media, experiment of drying by convection is carried out. Effective diffusion coefficient of moisture inside the media during drying process is calculated according to single exponential model. Differential equation and boundary condition of diffusion of moisture of matter are established and solved numerically by the method of finite difference. The results of analog calculation coincide with results of experiment. These results are advantageous to the deepgoing analysis and understanding of the characteristic of drying of matter and water separation capability under certain condition.

Keywords thin layer media, drying, moisture diffusion coefficient, diffusion model