

热泵间歇干燥白菜种子内部含水率变化规律

赵海波^{1,2}, 杨 昭^{1*}

(1. 天津大学机械学院, 天津 300072; 2. 烟台大学海洋学院, 烟台 264005)

摘 要: 为了研究热泵干燥条件下种子内部传质机理, 以热泵干燥的白菜种子为研究对象, 建立了其非均质动态传质模型, 并利用该模型分析热泵恒温连续干燥与间歇干燥条件下种子内部含水率变化规律。研究表明, 所建模型能较好的模拟种子含水率的动态变化, 模拟值与试验值相关系数为 0.9974, 相对偏差在±10%以内, 模拟精度满足要求; 间歇干燥时种子内部含水率更均匀, 更有利于种子品质的保证; 间歇干燥过程比例系数取 1/3、间歇运行周期中运行时间取 400 s 时热泵机组节能近 50%。该研究可为热泵干燥技术的应用推广提供参考。

关键词: 种子, 干燥, 模型, 热泵, 传质, 含水率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.042

中图分类号: S375

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0261-07

赵海波, 杨 昭. 热泵间歇干燥白菜种子内部含水率变化规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 261-267.

Zhao Haibo, Yang Zhao. Variation of moisture content in cabbage seeds with heat pump intermittent drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 261-267. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

近年来, 热泵干燥越来越多地应用到农作物种子以及海产品干燥中^[1-5]。由于热泵装置能够实现出风温度和相对湿度的调节, 使其特别适合于一些对温湿度敏感的种子的干燥工艺中。研究热泵干燥过程中种子内部传质机理, 分析种子内部水分分布规律, 是种子干燥优化传质的基础, 也是干燥研究中迫切需要解决的问题。国内外许多研究人员采用不同的传质模型来分析种子干燥过程中的水分扩散问题, 如 John S. Roberts 等^[6]采用 Lewis 经验模型研究葡萄种子含水率随干燥过程的变化, D. Velic 等^[7]采用指数经验模型研究苹果在干燥过程中含水率的变化, 袁月明等^[8]用 Page 模型研究玉米丸粒化种子干燥特性, 这些模型描述的是物料内部平均含水率的变化情况, 不能揭示种子内部各点含水率的变化; 杨俊红等^[9-10]建立了由干燥过程扩散微分方程组描述的种子干燥非均质传质模型, 并采用离散数值求解方法分析了菜豆种子在固定床干燥过程中内部节点含水率变化情况; 张嘉辉^[11]建立了白菜和茄子种子的二维非均质水分扩散模型, 并采用有限元法进行求解, 分析了种子干燥过程的传质特性, 指出种皮是干燥的主要阻力所在; 李思远^[12]采用一维水分扩散模型研究了白菜种子在连续干燥过程中内部含水率的变化情况。上述研究建立的传质模型能

够较好地预测种子内部水分扩散情况, 但针对的是恒温连续干燥方式。近年来, 间歇干燥开始引起了研究人员的注意, K. J. Chua 等^[13]在对包括热泵干燥、振动床干燥等方式下的间歇干燥研究进行总结分析后, 认为间歇干燥能改进种子质量、减少干燥能耗。杨昭等^[14]则研究了白菜种子在变温干燥条件下内部平均含水率分布, 并与恒温连续干燥条件进行了对比。本文将在上述研究的基础上, 以白菜种子为研究对象, 建立非稳态非均质传质模型, 研究分析种子在热泵恒温连续干燥与间歇变温干燥条件下的传质规律, 为热泵干燥技术的应用推广提供参考。

1 理论模型

理论上, 种子内部的湿度场是与温度场、压力场相耦合的, 但在热泵干燥中, 由于温度一般不太高, 所以压力和温度梯度的影响可忽略不计, 并且通过合理简化将湿度场即内部传质研究问题进一步简化。针对热泵干燥下的白菜种子, 作如下假设:

- 1) 种子为理想的球形, 内部水分沿半径扩散;
- 2) 种子由种皮层和种胚层组成, 质扩散系数分别为 D_1 、 D_2 且为常数, 忽略温度对质扩散系数的影响;
- 3) 种皮层和种胚层分界面上无含湿量的跳跃;
- 4) 种子干燥过程受内部条件控制, 属于降速干燥阶段。

在上述假设基础上, 建立描述种子干燥过程中内部质扩散的非均质非稳态传质模型, 该模型由三部分组成: 控制微分方程、边界条件和初始条件。控制微分方程是基于菲克定律和质量守恒定律推导得到的^[15-16]

$$\begin{cases} \frac{\partial x_1(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial x_1(r, \tau)}{\partial r} \right] & 0 < r \leq R_1 \quad \tau > 0 \\ \frac{\partial x_2(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{D_2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial x_2(r, \tau)}{\partial r} \right] & R_1 \leq r < R \quad \tau > 0 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-10-20 修订日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51076112), 教育部博士点基金(200800560041), 山东省高等学校科技计划(J12LB55)。

作者简介: 赵海波(1979—), 男, 山东日照人, 讲师, 博士后, 研究方向: 热泵干燥。天津 天津大学机械学院, 300072; 烟台 烟台大学海洋学院, 264005。

*通信作者: 杨 昭(1960—), 女, 河北人, 教授, 博导, 研究方向: 热泵干燥、燃气热泵。天津 天津大学机械学院, 300072。

Email: zhaoyang@tju.edu.cn.

边界条件方程为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial x_1(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 & r = 0, \tau > 0 \\ -D_2 \left. \frac{\partial x_2(r, \tau)}{\partial \tau} \right|_{r=R} = \alpha_D [x_2(r, \tau) - x_c]_{r=R} & r = R, \tau > 0 \\ -D_1 \left. \frac{\partial x_1(r, \tau)}{\partial \tau} \right|_{r=R_1} = -D_2 \left. \frac{\partial x_2(r, \tau)}{\partial \tau} \right|_{r=R_1} & r = R_1, \tau > 0 \\ x_1(r, \tau)_{r=R_1} = x_2(r, \tau)_{r=R_1} & r = R_1, \tau > 0 \end{cases} \quad (2)$$

初始条件方程为

$$\begin{cases} x_1(r, 0) = x_0 & 0 \leq r \leq R_1, \tau = 0 \\ x_2(r, 0) = x_0 & R_1 < r \leq R, \tau = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, x_1 、 x_2 分别为种胚层和种皮层的干基含水率 (层内水分质量/层内干基质量), %; x_0 为种子初始干基含水率, %; τ 为干燥时间, s; R 为种子外半径, mm; R_1 为种胚层半径, mm; r 为距离种子中心的距离, mm; D_1 、 D_2 分别为种皮层和种胚层质扩散系数, m^2/s ; α_D 是对流传质系数, m/s, x_c 为种子达到平衡状态时的含水率, %, 具体计算公式见文献[11]。

在间歇干燥方式中, 干燥空气的温度和相对湿度保持不变, 但空气流速在零和恒定值之间交替变化。设一个间歇干燥周期内空气流速为恒定值和零的时间分别为 $\tau_{on}(s)$ 和 $\tau_{off}(s)$, 则间歇干燥的比例系数为

$$\alpha = \frac{\tau_{on}}{\tau_{on} + \tau_{off}} \quad (4)$$

间歇干燥过程中种子平均含水率 \bar{x} (%) 按下式计算:

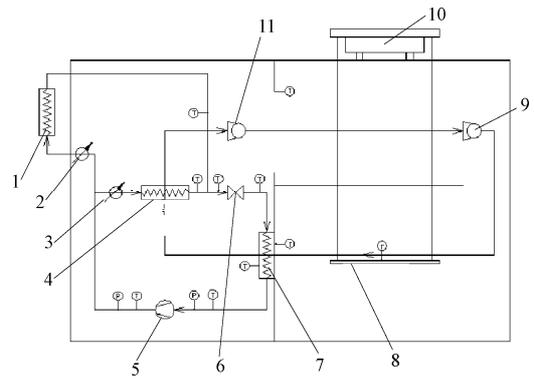
$$\bar{x} = \left(\int_0^{R_1} x_1(r, \tau) dm + \int_{R_1}^R x_2(r, \tau) dm \right) / M \quad (5)$$

式中, M 为种子干基质量, kg; dm 为划分的种子微元干基质量, kg。

2 模型验证

为了验证上述模型的正确性, 将模拟计算结果与热泵恒温连续干燥的试验结果进行了对比。试验用白菜种子来自天津某蔬菜研究所, 种子初始含水率为 30%, 试验样品量为 50 g, 种子单层均匀平铺在物料托盘中, 考虑获得较好的热泵运行性能及种子适应干燥条件, 试验中取干燥空气温度为 40℃, 相对湿度 30%, 用上海精密仪器厂生产的精度为 0.1g 的电子天平每 10 min 间隔称量后的质量值与干样品质量经计算得到平均含水率。试验用热泵干燥机包括压缩机、冷凝器、蒸发器、辅助冷凝器等部件, 由广东省农业机械研究所干燥设备生产厂制造, 试验装置原理见图 1。

可以看出, 该系统由热泵工质回路和干燥空气回路两部分组成。在热泵工质回路中, 工质经过压缩机压缩后变为高温高压的气体, 并分成两路分别进入辅助冷凝器和冷凝器。工质在辅助冷凝器中与外界空气换热, 调



1.辅助冷凝器 2.阀门1 3.阀门2 4.冷凝器 5.压缩机 6.节流阀 7.蒸发器 8.物料托盘 9.辅助风机 10.电子天平 11.主风机

图 1 热泵试验台原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat pump drying test rig

节阀门 1 可改变经过辅助冷凝器的工质流量, 实现冷凝器换热量调节, 控制干燥空气的温度和相对湿度变化。工质在冷凝器中与干燥空气换热后温度降低, 再经过节流阀节流后进入蒸发器吸收空气的热量全部气化, 再进入压缩机继续下一个循环。在干燥空气回路中, 空气在风机驱动下在冷凝器中吸收工质凝结散热后温度升高, 进入干燥室干燥物料, 并携带物料中蒸发的水分进入蒸发器, 在其中放热并析出水分后, 再进入冷凝器继续吸热完成新的循环。

考虑到种子结构及边界条件的对称性, 种子内部传质是一个典型的球对称问题, 仅取由经过球心的 2 个相互垂直的平面剖切得到的四分之一球体进行研究即可。结合前述假设条件可推知, 剖切面上的含水率分布即为白菜种子径向平面上的含水率分布。采用有限元四面体单元将选取研究对象划分得到种子的网格划分结果, 如图 2 所示。图中白菜种子半径为 0.7 mm, 其中种胚层和种皮层厚度分别为 0.6 和 0.1 mm。初始含水率 30%。采用雅克比共轭梯度法^[17-18]求解模型并得到给定边界条件和初始条件下每个节点处的含水率随时间的变化情况。

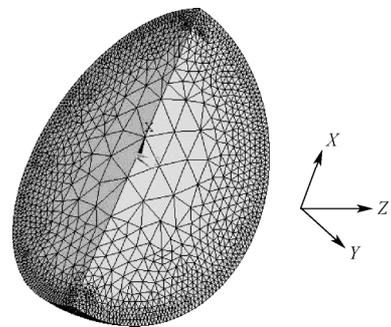


图 2 白菜种子内部网格划分示意图
Fig.2 Element meshing of cabbage seed

模拟中采用的数据见表 1。其中的数据来自文献[9、11]。

表 1 模拟参数取值表
Table 1 Parameter values for simulation

种皮层质扩散系数 $D_1/(m^2 \cdot s^{-1})$	种胚层质扩散系数 $D_2/(m^2 \cdot s^{-1})$	种胚层半径 R_1/mm	种子半径 R/mm	对流传质系数 $\alpha_D/(m \cdot s^{-1})$	平衡含水率 $x_c/\%$
1.2×10^{-10}	0.667×10^{-10}	0.6	0.7	150	4

3 结果与分析

3.1 模型验证

图 3 为种子平均含水率的模拟值与试验值比较。种子平均含水率的模拟值取模型计算得到的各微元含水率

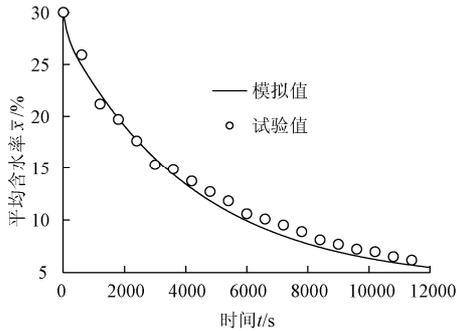


图 3 种子平均含水率模拟值与试验值对比
(干燥空气温度 40℃, 相对湿度 30%)

Fig.3 Experimental and simulated average moisture contents of seeds vs. drying time (dry air temperature 40℃, relative humidity 30%)

值积分平均后值，试验值为试验样品的平均含水率值。可以看出，模拟值很好地反映了试验值的变化趋势，与试验值之间的相关系数为 0.9974，相对偏差在±10%以内，吻合良好，所建仿真模型可以满足系统的模拟精度要求。

3.2 恒温连续干燥过程含水率分布

图 4 为连续干燥过程中，种子内部含水率在不同时刻的分布情况。可以看出，在种子脱水干燥过程中，内部各点含水率逐渐降低。并且，在干燥过程的不同时刻，沿半径方向种胚层和种皮层的含水率分布是不均匀的，如 3 000 s 时，种子中心到种胚层外层的含水率分布为 19.1%到 17%，而种皮层则从与种胚交界处的 17%到外表面的 4%，可见，虽然种皮层厚度小于种胚层，但其含水率分布差别却更大，证明了种皮层水分扩散的阻力大于种胚层，是种子干燥传质的主要阻力所在。分析图 4 还发现，随着干燥的进行，种胚层和种皮层内外层之间的含水率分布范围逐渐减小，如 6 000 s 时种胚层含水率分布为 10.4%~11.5%，种皮层为 4%~10.4%，而到了 12 000 s 时，2 个范围分别减小到 5.6%~5.8%和 5.4~5.6%，说明随着干燥进行，水分逐渐被干燥空气带走，种子含水率逐渐趋于均匀一致。

图 5 为恒温连续干燥过程中，沿半径方向种子内部不同点含水率随时间的变化情况。

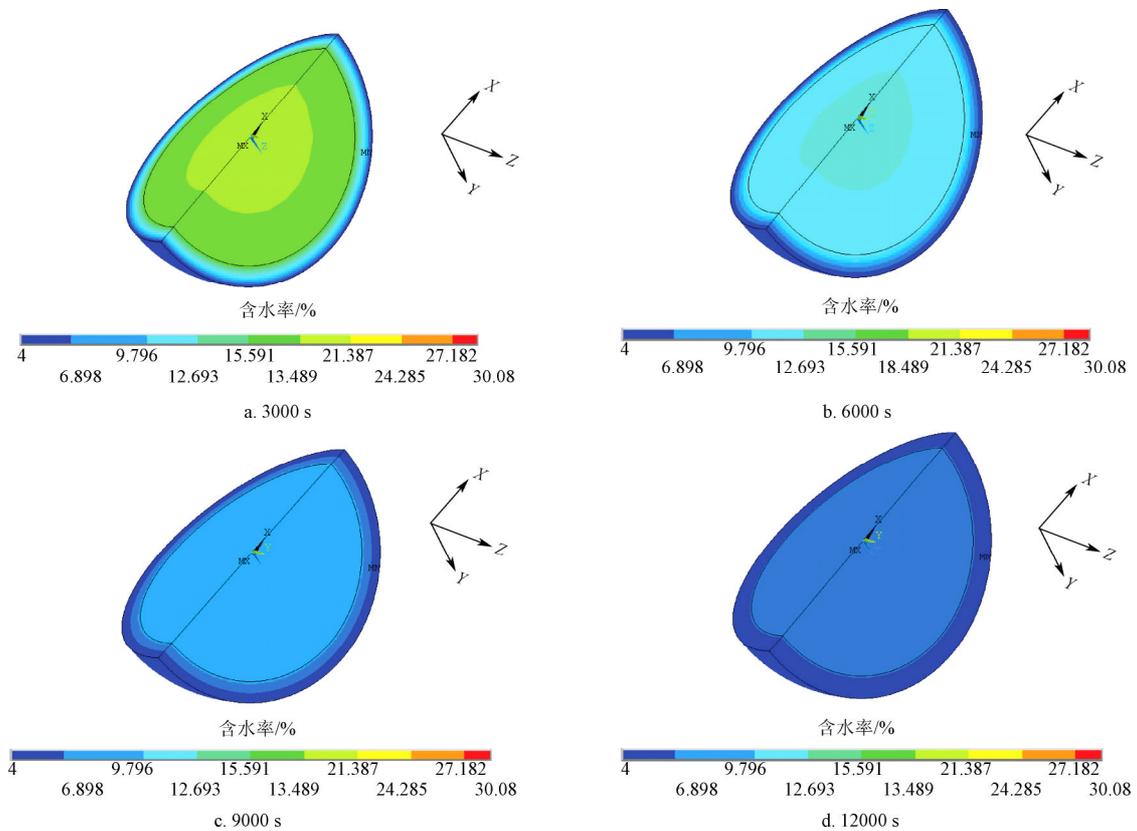
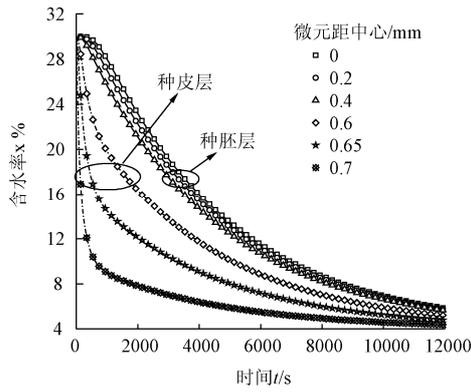


图 4 连续干燥时不同时刻种子内部含水率分布情况 (干燥空气温度 40℃, 相对湿度 30%)
Fig.4 Moisture content distribution inside seed at different moment by continuous heat pump drying (dry air temperature 40℃, relative humidity 30%)



注：干燥空气温度 40℃，相对湿度 30%

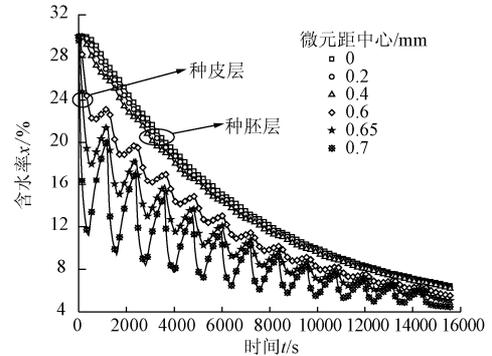
图 5 连续干燥过程中白菜种子内各点含水率随时间变化情况
Fig.5 Moisture content changes of different parts of cabbage seed with drying time during continuous drying.

由图 5 可看出，由于种胚层质扩散系数相对较大，在各个时刻，种胚层不同半径处含水率差别不大，而种皮层则有较大的差别，根据概率统计^[19-20]计算可得种胚层内 $r=0\text{ mm}$ 与 $r=0.4\text{ mm}$ 处含水率的显著性 P 值为 $0.105 > 0.05$ ，而种皮层显著性 P 值为 $0 < 0.05$ ，也证明了种胚层内不同半径处含水率差异无显著性，而种皮层差异有显著性。种子内部各点含水率的降低速率在干燥初期较大，且越靠近外表面，含水率下降速率越大，随着干燥过程的进行，干燥速率逐渐降低。这是因为种子外表面的含水率变化是由外表面与干燥空气之间的水蒸气分压力势差决定的。在干燥开始时，压力势差较大，种皮外表面含水率快速下降，随着种子干燥的进行，压力势差逐渐降低并趋于零，外表面含水率下降速度随之逐渐趋缓。外表面以内的各个节点之间在含水率差驱动下进行水分扩散，间接地受到外表面含水率变化的影响，离外表面越远，影响程度就越弱。

3.3 间歇干燥过程含水率分布

参考其他作物（土豆）间歇干燥特性^[21]并考虑避免热泵机组间歇运行过程中过于频繁的开停机及利于种子内部水分的扩散，取间歇干燥比例系数 $\alpha=1/3$ ，间歇运行周期中运行时间 $\tau_{on}=400\text{s}$ ，停机时间 $\tau_{off}=800\text{s}$ ，干燥空气温度 40℃，相对湿度为 30%。图 6 为该取值下的间歇干燥过程中，沿种子半径方向不同点处含水率随时间的变化情况。图中种胚层和种皮层曲线由上向下依次对应由中心到外表面的不同径向节点。由图 6 可看出，与连续干燥不同，间歇干燥中各点的含水率呈波浪形变化，离中心越远波动越大。这是因为在间歇干燥开机 τ_{on} 时段内，种子表面的水分在水蒸气分压力差作用下蒸发脱水，而在停机 τ_{off} 期间，循环空气流速为零，种子外表面与空气之间的对流传质停止，内层水分在内外层湿度梯度驱动下向外层自动扩散，外层含水率上升、内层含水率下降，内部含水率重新进行了分布，在下一个干燥周期内，种子外表面与干燥空气之间的传质势差增加，水分蒸发得到加速，含水率快速下降，内外节点之间的水分扩散也随之快速进行。根据文献[9]的研究结论，间歇干燥中，

热泵停机期间种子内部含水率的重新分布也降低了因外层水分降低过快而造成种子生物特性受损害的可能。从图 6 所示各点含水率随时间的总体变化趋势可看出，由于热泵停机期间，种子与干燥空气之间的对流传质作用大大减弱，种子内部的水分由内向外扩散，使得间歇干燥条件下种子内部含水率分布更均匀，干燥过程中种子各节点含水率处于相对较高水平，这都更有利于种子生命物质的保存。

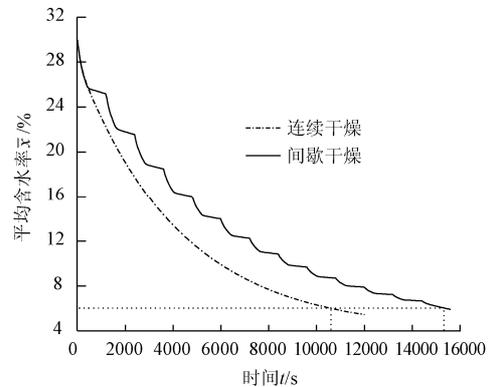


注：间歇干燥条件为间歇干燥比例系数 $\alpha=1/3$ ，间歇运行周期中运行时间 $\tau_{on}=400\text{ s}$ ，停机时间 $\tau_{off}=800\text{ s}$ ，干燥空气温度 40℃，相对湿度为 30%。

图 6 间歇干燥过程中白菜种子各点内部含水率随时间变化情况
Fig.6 Moisture content changes of different parts of cabbage seed with drying time during intermittent drying

3.4 连续与间歇干燥过程比较

图 7 表示连续与间歇干燥过程中，种子平均含水率随时间的变化情况。虽然达到同样的含水率水平，间歇干燥需要的时间更长，但是机组的运行时间却缩短了。如达到 6%含水率时连续干燥需要耗时 10 800 s，热泵运行时间也为 10 800 s，而间歇干燥虽然需 15 200 s，但热泵运行时间只有 5 067 s，比连续干燥节省近一半时间，即使除去热泵机组启停损失产生的额外耗能，热泵间歇干燥能耗也大大低于连续干燥，而且随着压缩机变频启动等技术的发展，热泵启停损失还会进一步降低，热泵间歇干燥节能潜力还有继续提升的空间。由上述模拟数



注：恒温连续干燥条件为干燥空气温度 40℃，相对湿度 30%；间歇干燥条件为间歇干燥比例系数 $\alpha=1/3$ ，间歇运行周期中运行时间 $\tau_{on}=400\text{ s}$ ，停机时间 $\tau_{off}=800\text{ s}$ ，干燥空气温度 40℃，相对湿度为 30%。

图 7 连续与间歇干燥白菜种子平均含水率比较
Fig.7 Comparison of average moisture content changes during continuous and intermittent drying

据可知, 忽略热泵启停能耗时, 本模拟例中热泵间歇干燥能耗可节约近 50%。另外, 由于种子承受较高干燥温度的时间较短, 内部组织细胞受影响小, 有利于种子品质的保证。

热泵干燥在国外已经在木材、谷物、水产、制药等行业中得到了较广泛的应用, 国内也开展了相关的研究^[22-30]。这些研究都显示出热泵干燥具有良好的节能效果, 投资回收期较短。文献[1]指出电驱动热泵干燥装置的投资回收期一般少于半年。由于间歇热泵干燥能进一步缩短有效干燥时间, 从而能进一步降低干燥运行费用, 缩短设备投资回收期, 同时实现电能的高效利用, 减少污染物和二氧化碳排放, 有利于节能减排。随着热泵等相关技术的发展及社会对节能环保工作的日益重视, 热泵间歇干燥在种子干燥等领域中的应用前景将非常广阔。

4 结 论

本文以热泵干燥的白菜种子为研究对象, 考虑种皮层和种胚层的质扩散系数不同, 建立其非均质动态传质模型, 并利用该模型进行了种子内部传质研究, 相关结论如下:

1) 利用所建仿真模型模拟连续干燥过程中含水率的变化规律, 并与试验值比较发现, 二者相关系数为 0.9974, 相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内, 能够满足模拟精度要求。

2) 在恒温连续干燥过程中, 沿半径方向种胚层和种皮层的含水率分布是不均匀的, 通过显著性 P 值计算发现, 种胚层内各点含水率差异无显著性, 而种皮层内外边界节点含水率差异有显著性, 说明种皮层的传质阻力较大。种子内部各点含水率的降低速率在干燥初期较大, 且越靠近外表面, 含水率下降速率越大, 随着干燥的进行, 干燥速率逐渐降低。

3) 间歇干燥过程中, 种子内部各点含水率呈波浪形变化, 且越靠近外表面, 波动越大。

4) 间歇干燥与连续干燥相比, 内部含水率分布更均匀, 对种子品质保证更有利。

5) 在同样的含水率干燥水平下, 间歇干燥需要的时间更长, 但是热泵运行时间却缩短了, 对应的能耗也大大降低。未来需进一步开展热泵间歇干燥能耗的试验研究, 验证本文模拟结果, 并推动热泵间歇干燥的实际应用。

[参 考 文 献]

[1] 陈东, 谢继红. 热泵干燥装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

[2] 杨先亮, 谢英柏, 靳光亚. 热泵干燥婆枣的方案对比和试验对比[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 329—332.

Xianliang, Xie Yingbai, Jin Guangya. Improved scheme and test comparison of drying jujube date using heat pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 329—332. (in Chinese with English abstract)

[3] 蒋小强, 关志强, 谢晶. 水产品热泵干燥装置性能参数的理论分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(13): 373—376.

Jiang Xiaoqiang, Guan Zhiqiang, Xie Jing. Analysis on performance parameters of heat pump drying system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(13): 373—376. (in Chinese with English abstract).

[4] 向飞, 王立, 岳献芳. 半封闭热泵干燥系统的热力学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 240—245.

Xiang Fei, Wang Li, Yue Xianfang. Thermodynamic analysis and experimental study of a semi-closed heat pump drying system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 240—245. (in Chinese with English abstract).

[5] 倪超, 李娟玲, 丁为民, 等. 全封闭热泵干燥装置监控系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 134—139.

Ni Chao, Li Juanling, Ding Weimin, et al. Design and experiment of monitoring system for heat pump dryer of enclosed cycles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(10): 134—139. (in Chinese with English abstract).

[6] John S. Roberts, David R. Kidd, Olga Padilla-Zakour. Drying kinetics of grape seeds[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 460—465.

[7] Velic D, Plantinic M, Tomas S, et al. Influence of airflow velocity on kinetics of convection apple drying[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64(1): 97—102.

[8] 袁月明, 陈丽梅, 王鸿斌, 等. 玉米丸粒化种子的薄层干燥试验及其干燥模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 169—173.

Yuan Mingyue, Chen Limei, Wang Hongbin, et al. Experiment on thin layer drying of pelleted corn seed and its drying models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(3): 169—173. (in Chinese with English abstract).

[9] 杨俊红. 植物性含湿多孔介质在干燥过程中优化传热传质机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 1998.

Yang Junhong. Study on the Mechanism of Optimizing Heat and Mass Transfer in Drying Process of Biological wet Porus Materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 1998. (in Chinese with English abstract)

[10] 杨俊红, 褚治德, 吕灿仁, 等. 菜豆种子薄层干燥的潜力分析[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(1): 19—23.

Yang Junhong, Chu Zhide, Lv Canren, et al. Analysis of drying potential for thin layer drying of vegetable seed[J]. Drying technology and equipment, 2008, 6(1): 19—23. (in Chinese with English abstract)

[11] 张嘉辉. 热泵干燥理论和种子干燥性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 1999.

Zhang Jiahui. The Study on Heat Pump Drying Theory and Properties of Seed Drying Process[D]. Tianjin: Tianjin University, 1999. (in Chinese with English abstract)

- [12] 李思远. 种子热泵干燥过程中传热传质以及生命物质变化规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
Li Siyuan. Study on the Mechanism of Heat and Mass Transfer and Vitality Variation During Seed Heat Pump Drying Process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [13] Chua K J, Mujumdar A S, Chou S K. Intermittent drying of bioproducts-an overview[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90(3): 285-295.
- [14] 杨昭, 王娟, 李思远. 白菜种子热泵变温最佳干燥过程[J]. 天津大学学报, 2008, 41(6): 673-677.
Yang Zhao, Wang Juan, Li Siyuan. Temperature-variable optimal drying process of heat pump for cabbage seeds[J]. *Journal of Tianjin University*, 2008, 41(6): 673-677. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [16] Incropera F P, Dewitt D P, Bergman T L, et al. Fundamentals of heat and mass transfer(in Chinese translariion)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [17] 王正中, 芦琴, 郭利霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1-7.
Wang Zhengzhong, Lu Qing, Guo Lixia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temeprature of the whole body[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(7): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孟春玲. 有限元法及 ANSYS 程序应用基础[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [19] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [20] 李雪峰, 李卫军. 灌溉对苜蓿种子产量及其构成因子的影响[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(1): 21-24.
Li Xuefeng, Li Weijun. Effect of irrigation on the yield and components of alfalfa seeds[J]. *Xinjiang Agricultural sciences*, 2006, 43(1): 21-24.
- [21] Chou S K, Chua K J, Hawlader M N A, et al. On the intermittent drying of an agricultural product[J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 2000, 78(4): 193-203.
- [22] 饶宾期, 曹黎. 太阳能热泵污泥干燥技术[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 184-188.
Rao Binqi, Cao Li. Technical research on sludge drying by solar energy and heat pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(5): 184-188. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张国琛, Sigurjón Arason, Sveinn Víkingur árnason. 热泵干燥北极虾的物理和感官特性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5).
Zhang Guochen, Sigurjón Arason, Sveinn Víkingur árnason. Physical and sensory properties of heat pump dried shrimp (*Pandalus borealis*)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(5). (in Chinese with English abstract)
- [24] 张宏飞, 张联英. 热泵干燥技术研究现状及发展趋势[J]. 干燥技术与设备, 2009, 7(3): 120-124.
Zhang Hongfei, Zhang Lianying. Research and development of heat pump drying technology[J]. *Drying Technology and Equipment*, 2009, 7(3): 120-124. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 热泵干燥系统性能试验研究[J]. 农业工程学报, 2006(4): 94-98.
Zhang Xukun, Li Huadong, Xu Gang, et al. Experimental study on the performance of heat pump drying system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006(4): 94-98. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张璧光, 高建民, 伊松林, 等. 我国木材干燥节能减排技术研究现状[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(3): 38-43.
Zhang Biguang, Gao Jianmin, Yi Songlin, et al. The present research situation of solar heat pump and heat pipe technology on lumber drying in China[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2009, 36(3): 38-43. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张绪坤, 李华栋, 徐刚, 等. 脱水蔬菜热泵-热风组合干燥试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 226-229.
Zhang Xukun, Li Huadong, Xu Gang, et al. Combined heat-pump and hot-air drying of dehydrated vegetables[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(12): 226-229. (in Chinese with English abstract)
- [28] 石启龙, 赵亚, 李兆杰, 等. 竹荚鱼热泵干燥数学模型研究[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 110-114.
Shi Qilong, Zhao Ya, Li Zhaojie, et al. Mathematical modelling on heat pump drying of horse mackerel[J]. *Transaction of the Chinese society for agricultural machinery*, 2009, 40(5): 110-114.
- [29] 向飞, 王立, 岳献芳. 半封闭热泵干燥系统的热力学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 240-245.
Xiang Fei, Wang Li, Yue Xianfang. Thermodynamic analysis and experimental study of a semi-closed heat pump drying system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(2): 240-245. (in Chinese with English abstract)
- [30] 史伟勤, 楼唯, 张金妹, 等. 采用新型环保型制冷剂的新型真空冷冻干燥机的研发[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(5): 225-228.

Shi Weiqin, Lou Wei, Zhang Jinmei. R&D of the new vacuum freeze dryer using environment-friendly refrigerant[J].

Drying technology & equipment, 2008, 6(5): 225—228. (in Chinese with English abstract).

Variation of moisture content in cabbage seeds with heat pump intermittent drying

Zhao Haibo^{1,2} Yang Zhao^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Ocean, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Aimed at studying the moisture diffusion mechanism inside the seeds during heat pump drying, a nonhomogeneous dynamic mass transfer model was set up for cabbage seeds analyze the moisture diffusion in the cabbage seed under conditions of continuous drying with constant temperature and intermittent drying with on/off pulsating of air velocity. Results showed that the simulation results coincided well with experimental data with correlation coefficient of 0.9974 and relative deviation being less than $\pm 10\%$. With the heat pump intermittent drying, the moisture distribution inside the cabbage seed was more uniform. With intermittency ratio of 1/3 and on-time in the intermittent drying cycle of 400 s, nearly 50% energy conservation for the heat pump equipment could be achieved during the drying process. This research can provide a reference for application of heat pump drying technique.

Key words: seed, drying, models, heat pump, moisture diffusion, moisture content