

白菜种子热泵干燥过程动态模型研究^{*}

赵海波^{1,2} 杨 昭¹

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

【摘要】 在现有 12 种常用的种子干燥经验与半经验模型基础上, 结合白菜种子热泵干燥数据, 按模型中是否考虑干燥空气温度与相对湿度影响进行了 4 种不同情况的模型研究, 以 R^2 、 E_{RMS} 、 χ^2 、 E_{MD} 4 种统计指标为标准进行了不同模型的比较与分析。结果表明, 同时考虑干燥空气温度和相对湿度影响的模型具有更高的精度, 尤其是改进 Henderson and Pabis 模型、Midilli et al 模型和 Two-term exponential 模型。

关键词: 种子 热泵干燥 动态模型

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0118-06

Dynamic Model of Heat Pump Drying for Cabbage Seeds

Zhao Haibo^{1,2} Yang Zhao¹

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

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

Abstract

Twelve kinds of semi-empirical and empirical mathematical drying models were analyzed. Using experimental data of the heat pump cabbage seeds drying from the finding references, the twelve kinds of drying models have been studied according to the considerations or no considerations of dry air's temperature and relative humidity. Four statistical indexes including coefficient of determination R^2 , root mean square error E_{RMS} , reduced mean square of the deviation χ^2 , mean relative percent deviation E_{MD} , have been used as the criterion for selection and analysis of different models. Results showed that after considering influences of both temperature and humidity of dry air, most of the twelve models have higher R^2 , lower χ^2 , E_{RMS} and E_{MD} . The models of modified Henderson and Pabis, Midilli et al and Two-term exponential are more accurate than others.

Key words Seeds, Heat pump drying, Dynamic model

引言

在种子干燥过程模拟研究中, 国内外学者提出了一系列的经验、半经验模型^[1~6]。对不同的研究对象、干燥方式和条件只需根据实验数据拟合出模型中的系数即可, 计算和使用都很简便。采用热泵干燥, 可方便地实现干燥空气的温度和相对湿度调节, 这两个参数对种子的动态干燥特性起决定作用, 选择干燥模型时应充分考虑二者的影响, 但现有研究对此关注不够^[2~8]。本文在概括总结现有模型基

础上, 以白菜种子热泵干燥为例, 建立能同时反映干燥空气温度和相对湿度影响的干燥模型, 并与不考虑或只考虑其中一种参数影响的干燥模型进行比较分析, 探讨种子热泵干燥过程动态模型建立方法, 为进一步深入开展种子热泵干燥传热传质研究奠定理论基础。

1 干燥原理

目前, 热泵种子干燥技术的研究主要建立在实验基础上, 根据实验数据获得相应的干燥模型。本

收稿日期: 2011-01-20 修回日期: 2011-03-19

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51076112)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800560041)

作者简介: 赵海波, 博士后, 烟台大学讲师, 主要从事热泵干燥研究, E-mail: zhb01@yeah.net

通讯作者: 杨昭, 教授, 博士生导师, 主要从事热泵干燥、热泵应用研究, E-mail: zhaoyang@tju.edu.cn

文的热泵种子干燥实验数据来自文献[6,9],研究对象为白菜种子,热泵实验台原理如图 1 所示。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。天津大学利用该实验装置进行了白菜种子干燥实验,实验中干燥层厚度为 5 mm,种子初始含水率为 30%,通过热泵干燥装置自带控制系统实现干燥空气的温度和湿度调节,分别进行了定干燥温度变相对湿度、定相对湿度变干燥温度条件下的 10 组实验,其中干燥空气温度为 30、35、40、45℃,相对湿度为 25%、30%、40%。实验时间为 200 min,测量间隔时间为 10 min。详细实验参数与数据参见文献[6,9]。

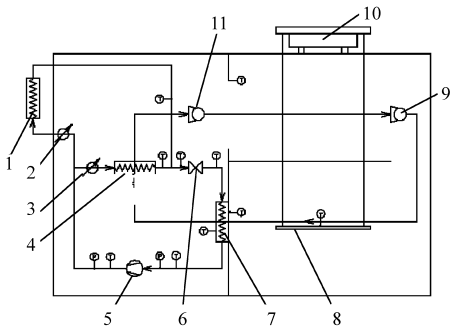


图 1 热泵实验台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the heat pump drying test rig
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

2 干燥模型拟合

通过对现有干燥模型相关研究的分析总结,得到了 12 种常用的干燥模型,见表 1。这些经验、半经验模型是在扩散理论基础上建立的^[10],描述了干燥过程中种子相对含水率的变化特性。其中 Lewis 模型认为干燥过程中水分扩散阻力主要在种子外层,种子干燥速率与含水率和平衡含水率之差成正比,比例系数为 k ,Henderson and Pabis 模型、Page 模

型、改进 Page 模型、Logarithmic 模型都是在 Lewis 模型的基础上引入特定系数如 n 、 a 、 b 、 c 等进行修正得到的;Two-term 模型、Two-term exponential 模型、Diffusion approach 模型、Vera et al 模型、改进 Henderson and Pabis 模型、Midilli et al 模型是在扩散理论的基础上,认为不同物料干燥速率在不同范围内与含水率和平 衡含水率之差成正比,在不同单位内比例系数不同,并引入特定修正系数进行修正,如 Two-term 模型中比例系数为 k_0 、 k_1 ,修正系数为 a 、 b ;Wang and Singh 模型则认为干燥速率与干燥时间成比例。 本文将从这些模型中选择能更好地反映白菜种子含水率动态变化特性的模型。在模型拟合过程中,首先由实验数据计算得到各个时刻种子的相对含水率,计算公式为

$$M_R = \frac{M_\tau - M_e}{M_0 - M_e} \tag{1}$$

式中 M_τ 、 M_e 、 M_0 —— τ 时刻含水率、平衡含水率和初始含水率

平衡含水率是物料在一定的环境状态下水分蒸发达到平衡时的含水率,计算公式为

$$M_e = a - b \ln(1 - \phi) - c \ln T \tag{2}$$

分析实验数据可知,种子含水率变化是一个典型的非稳态过程,除了随时间变化外,还与干燥空气的温度和相对湿度有关。在不同的干燥空气温度和相对湿度条件下,种子的干燥速率不同。与时间参数一样,这两个参数理应出现在干燥模型中。为此, 本文将模型中的系数拟合为干燥空气温度 t 和相对湿度 ϕ 的一次函数,即公式中系数 C_o (k 、 k_0 、 k_1 、 n 、 a 、 b 、 c) 应满足

$$C_o = f(\phi, t) = c_1 + c_2 \phi + c_3 t \tag{3}$$

相应地,只考虑干燥空气相对湿度影响时,模型中的系数 C_o 应满足

$$C_o = f(\phi) = c_1 + c_2 \phi \tag{4}$$

只考虑干燥空气温度影响时,模型中的系数 C_o 应满足

$$C_o = f(t) = c_1 + c_3 t \tag{5}$$

既不考虑干燥空气温度,也不考虑相对湿度影响时,模型中的系数 C_o 应满足

$$C_o = c_1 \tag{6}$$

式中, c_i 为待定系数。分别针对上述 4 种情况,结合现有实验数据,利用 Matlab 软件提供的非线性拟合方法拟合得到 12 种模型中各系数表达式中的待定系数 c_i ,结果如表 1 所示。

3 干燥模型比较分析

为了比较不同模型的优劣并选择合适的白菜种

表 1 4 种情况下不同模型中系数的拟合结果

Tab. 1 Fitting results of coefficients in different drying models under 4 conditions

模型名称	表达式	系数 c_i	$f(\phi)$	$f(t)$	$f(t,\phi)$
Lewis	$M_R = \exp(-kt)$	$k = 0.02$	$0.019 + 0.0033\phi$	$-0.0068 - 0.0007t$	$-0.0058 - 0.0037\phi + 0.0007t$
Henderson and Pabis	$M_R = a\exp(-kt)$	$a = 0.9483$	$0.8975 + 0.1646\phi$	$0.2236 + 0.0191t$	$0.8687 + 0.2365\phi + 0.0003t$
		$k = 0.0189$	$0.0169 + 0.0063\phi$	$-0.0199 + 0.001t$	$-0.0078 + 0.0025\phi + 0.0007t$
Page	$M_R = \exp(-kt^n)$	$k = 0.0369$	$0.0497 - 0.0411\phi$	$0.0817 - 0.0012t$	$0.0402 - 0.0676\phi + 0.0004t$
		$n = 0.8516$	$0.7534 + 0.3174\phi$	$0.2742 + 0.0151t$	$0.5267 + 0.434\phi + 0.0052t$
改进 Page	$M_R = \exp(-(kt)^n)$	$k = 0.0208$	$0.0206 + 0.0005\phi$	$-0.0048 - 0.0007t$	$-0.0053 - 0.0083\phi + 0.0008t$
		$n = 0.8517$	$0.6995 + 0.4936\phi$	$0.2266 + 0.0166t$	$0.5782 + 0.5813\phi + 0.0027t$
Logarithmic	$M_R = a\exp(-kt) + c$	$a = 0.9355$	$0.8539 + 0.2649\phi$	$0.7807 + 0.0041t$	$0.7091 + 0.3737\phi + 0.0038t$
		$k = 0.0209$	$0.0194 + 0.0048\phi$	$-0.0064 + 0.0007t$	$0.0017 + 0.0082\phi + 0.0004t$
		$c = 0.0896$	$0.0455 - 0.0553\phi$	$0.0896 - 0.0018t$	$0.2288 + 0.0505\phi - 0.0057t$
Two-term	$M_R = a\exp(-k_0t) + b\exp(-k_1t)$	$a = 0.8909$	$0.4464 - 0.797\phi$	$0.7083 - 0.012t$	$0.8637 + 0.2008\phi - 0.0031t$
		$k_0 = 0.022$	$0.1057 - 0.0816\phi$	$-0.0509 + 0.0029t$	$-0.0065 + 0.0054\phi + 0.0006t$
		$b = 0.0761$	$0.5579 + 0.7872\phi$	$0.3153 + 0.0113t$	$0.1416 - 0.1757\phi + 0.0028t$
		$k_1 = 0.0047$	$0.0105 + 0.0188\phi$	$-0.0119 + 0.0007t$	$0.1034 - 0.2795\phi + 0.0017t$
Two-term exponential	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kat)$	$a = 0.2037$	$0.2022 + 0.0071\phi$	$0.1275 - 0.0009t$	$0.1683 - 0.3894\phi + 0.0033t$
		$k = 0.0797$	$0.0766 + 0.0091\phi$	$-0.1398 + 0.0088t$	$-0.0461 + 0.2617\phi + 0.0016t$
Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$	$a = -0.0136$	$-0.0106 - 0.0094\phi$	$-0.0031 - 0.0003t$	$-0.007 + 0.0045\phi - 0.0002t$
		$b = 0.000047$	$2.9 \times 10^{-5} + 5.6 \times 10^{-5}\phi$	$-5.4 \times 10^{-6} + 1.4 \times 10^{-6}b_0t$	$1.97 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-5}\phi + 9.6 \times 10^{-7}t$
Diffusion approach	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$	$a = 0.7997$	$0.6129 + 0.6118\phi$	$2.0536 - 0.0463t$	$0.1669 - 0.4666\phi + 0.0022t$
		$k = 0.0163$	$0.0115 + 0.0156\phi$	$0.0199 - 0.0003t$	$0.0007 + 6.0164\phi + 0.0006t$
		$b = 4.983$	$7.8984 - 9.4065\phi$	$0.8086 + 0.0643t$	$0.0037 - 0.0209\phi + 0.0003t$
Verma et al	$M_R = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-gt)$	$a = 0.2001$	$0.6166 + 0.6031\phi$	$0.0545 + 0.0036t$	$0.1641 - 0.5517\phi + 0.0031t$
		$k = 0.0807$	$0.0115 + 0.0158\phi$	$0.0238 + 0.0015t$	$-0.0181 + 11.952\phi - 0.0705t$
		$g = 0.0163$	$0.1185 - 0.1196\phi$	$-0.0045 + 0.0006t$	$-0.0073 - 0.0089\phi + 0.0006t$
改进 Handerson and Pabis	$M_R = a\exp(-kt/100) + b\exp(-gt/100) + c\exp(-ht/100)$	$a = 0.4558$	$0.6311 + 0.4612\phi$	$-0.3123 - 0.1815t$	$0.4026 - 0.5013\phi + 0.00743t$
		$k = 0.0276$	$-0.2084 + 0.8337\phi$	$-1.095 + 0.1146t$	$0.0375 + 0.7318\phi - 0.00938t$
		$b = 0.0702$	$0.5707 - 1.2683\phi$	$2.4226 + 0.0665t$	$0.4513 - 0.1247\phi + 0.00376t$
		$g = 3$	$0.0127 + 0.0121\phi$	$0.58 + 0.0697t$	$0.6147 + 2.2606\phi - 0.01297t$
		$c = 0.474$	$0.1447 + 0.5262\phi$	$0.7543 + 0.0802t$	$1.7181 - 1.1124\phi - 0.03429t$
		$h = 0.0134$	$0.1344 - 0.1697\phi$	$0.6397 + 0.0817t$	$-2.7527 - 3.5517\phi + 0.19882t$
		$a = 1.0402$	$0.9356 + 0.2114\phi$	$0.9744 + 0.00075t$	$0.9789 + 0.0014\phi + 0.0006t$
Midilli et al	$M_R = a\exp(-k(t/100)^n) + bt/100$	$k = 0.0898$	$0.0131 + 0.0952\phi$	$0.4159 + 0.03553t$	$0.034 + 1.5539\phi + 0.033t$
		$n = 0.6097$	$0.9865 - 0.5735\phi$	$1.1592 - 0.00899t$	$0.8894 + 0.9916\phi - 0.0099t$
		$b = -0.0006$	$0.0005 - 0.002\phi$	$0.114 - 0.00332t$	$0.0775 + 0.1493\phi - 0.0036t$

子热泵干燥模型,本文选择并确定了以下 4 个检验标准:

决定系数

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{m - j - 1}}{\sum_{i=1}^m \frac{(y_i - \bar{y})^2}{m - 1}}$$

(7)

平均相对偏差百分比

$$E_{MD} = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \right) \times 100\%$$

(8)

卡方误差

$$\chi^2 = \frac{1}{m-j} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2$$

(9)

均方根误差

$$E_{RMS} = \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{1/2}$$

(10)

式中 y 为拟合值, $\hat{y}$ 为对应的实验值, m 为数据个数, j 为常数的个数。

本文以现有的实验数据进行拟合得到各模型中所有系数函数关系式后,再用所有实验数据进行上述 4 个检验标准的计算,结果如表 2。4 个统计指标中, R^2 越接近于 1, E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} 越接近于 0 的模型拟合精度越高。

由表 2 可看出,对大多数模型而言,同时考虑干燥空气温度和相对湿度影响所得到的模型具有更大的 R^2 ,更小的 E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} ,模拟精度更好。其中改进 Henderson and Pabis 模型精度最高,有最大的 R^2 ,为 0.996 8,最小的 E_{MD} 、 E_{RMS} 和 χ^2 ,分别为 8.77%、0.015 2 和 0.000 3,其次是 Midilli et al 模型和 Two-term exponential 模型,对应的 R^2 分别为 0.995 4、

0.993 9, E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 分别为 10.88%、0.018 1、0.000 4 和 6.94%、0.020 9、0.000 5。12 种模型中精度最差的是 Wang and Singh 模型,其 R^2 最小,仅为 0.921 7,而 E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 最大,分别为 43.33%、0.074 6、0.005 9,这与文献[3]结论相吻合。在模型中不考虑干燥空气温度和相对湿度影响,即将其中的系数视为常数时 R^2 相对较小, E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} 更大,如常系数 Lewis 模型的 R^2 为 0.958 5,低于考虑温度或相对湿度的模型,更低于同时考虑温度和相对湿度影响的模型,后者的 R^2 为 0.985 8,常系数模型的 E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 分别为 22.74%、0.054 3、0.003 0,也高于后者的 13.56%、0.031 8、0.001 0,因此,为获取高精度的模型必须考虑干燥空气温度和相对湿度的影响。

表 2 考虑不同影响因素时不同模型拟合评价指标

模型	R^2				$E_{MD}/\%$				E_{RMS}				χ^2			
	C_1	$f(\phi)$	$f(t)$	$f(t,\phi)$	C_1	$f(\phi)$	$f(t)$	$f(t,\phi)$	C_1	$f(\phi)$	$f(t)$	$f(t,\phi)$	C_1	$f(\phi)$	$f(t)$	$f(t,\phi)$
Lewis	0.958 5	0.958 6	0.958 8	0.985 8	22.74	22.65	13.63	13.56	0.054 3	0.054 2	0.031 8	0.031 8	0.003 0	0.003 0	0.001 0	0.001 0
Henderson and Pabis	0.916 9	0.962 1	0.977 7	0.988 8	21.39	21.14	12.94	10.84	0.052 0	0.051 9	0.039 8	0.028 1	0.002 8	0.002 8	0.001 7	0.000 8
Page	0.967 0	0.967 1	0.990 5	0.993 6	19.93	19.65	10.33	7.43	0.048 4	0.048 3	0.025 4	0.021 4	0.002 4	0.002 4	0.000 7	0.000 5
改进 Page	0.967 0	0.967 2	0.991 1	0.993 4	19.92	19.51	9.91	7.32	0.048 4	0.048 2	0.025 2	0.021 7	0.002 4	0.002 4	0.000 7	0.000 5
Logarithmic	0.963 5	0.963 7	0.990 1	0.991 2	19.81	19.27	8.28	9.65	0.050 9	0.050 7	0.026 5	0.025	0.002 7	0.002 7	0.000 7	0.000 7
Two-term	0.964 1	0.967 7	0.992 9	0.993 8	19.86	19.23	8.33	7.41	0.050 5	0.047 9	0.022 5	0.021	0.002 6	0.002 5	0.000 5	0.000 5
Two-term exponential	0.967 4	0.967 4	0.992 0	0.993 9	19.85	19.61	9.44	6.94	0.048 1	0.048 1	0.023 8	0.020 9	0.002 4	0.002 4	0.000 6	0.000 5
Wang and Signth	0.897 1	0.895 7	0.921 4	0.921 7	32.36	33.34	44.33	43.33	0.085 5	0.086 1	0.074 7	0.074 6	0.007 4	0.000 7	0.005 8	0.005 9
Diffusion approach	0.967 4	0.967 7	0.991 7	0.990 4	19.84	19.18	9.09	8.07	0.048 1	0.047 9	0.024 2	0.026 2	0.002 4	0.002 0	0.000 6	0.000 7
Verma et al	0.967 4	0.967 7	0.993 5	0.992 8	19.83	19.17	7.56	8.26	0.048 1	0.047 9	0.021 5	0.022 6	0.002 4	0.002 4	0.000 5	0.000 6
改进 Handerson and Pabis	0.966 6	0.968 5	0.994 0	0.996 8	19.78	18.84	7.92	8.77	0.048 7	0.047 3	0.020 7	0.015 2	0.002 5	0.002 5	0.000 5	0.000 3
Midilli et al	0.962 1	0.967 0	0.995 1	0.995 4	29.17	21.11	11.08	10.88	0.051 9	0.048 4	0.018 7	0.018 1	0.002 8	0.002 5	0.000 4	0.000 4

由表 2 还可看出,只考虑相对湿度影响时计算得到的统计指标与常系数情况差别不大,如 Page 模型在两种情况下 R^2 分别为 0.967 0、0.967 1, E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 分别为 19.93%、0.048 4、0.002 4 和 19.65%、0.048 3、0.002 4,这说明在模型中只考虑相对湿度而不考虑温度影响时,精度较低。从表中还可看出,与只考虑相对湿度影响的模型相比,只考虑温度影响的模型具有更高的 R^2 和更低的 E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} ,以 Two-term 模型为例, R^2 从 0.967 7 升高到 0.992 9, E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 分别从 19.23%、0.047 9、0.002 5 降到 8.33%、0.022 5、0.000 5,说明只考虑温度影响时计算精度高于只考虑相对湿度情况,也证明了干燥空气温度对干燥过程影响更大。由表 2 还可看出,除 Lewis、Diffusion approach 和 Verma et al

模型外,其他 9 种模型同时考虑温度和相对湿度影响时比只考虑温度影响时的 R^2 稍有增加, E_{MD} 、 χ^2 、 E_{RMS} 稍有降低,如改进 Henderson and Pabis 模型的 R^2 从 0.994 0 增加到 0.996 8, E_{MD} 、 E_{RMS} 和 χ^2 从 7.92%、0.020 7、0.000 5 降至 8.77%、0.015 2、0.000 3,说明对这些模型来说,同时考虑温度和相对湿度影响能提高模拟精度。因此,在模型中应尽可能考虑干燥空气温度和相对湿度的共同影响。

图 2、3 分别是在不同干燥空气温度和相对湿度条件下,改进 Henderson and Pabis 模型和 Midilli et al 模型模拟得到的种子相对含水率值与实验值的比较。由图可知,种子相对含水率模拟值与实验值吻合良好,所选模型能很好地反映种子含水率的变化情况。从图上还可以看出,在相对湿度不变时,空气

温度越高,相对含水率降低速度越快,干燥时间越短;在温度不变时,空气相对湿度越低,干燥速率越快,干燥时间越短。

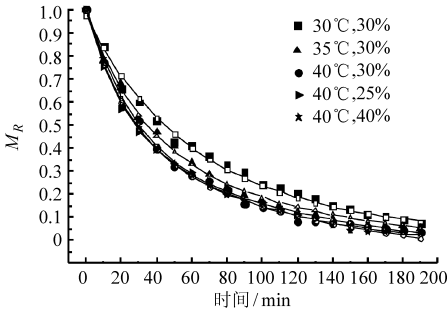


图2 种子相对含水率实验值与改进 Henderson and Pabis 模型模拟值比较

Fig.2 Comparison of the experimental and predicted relative moisture ratio values by the modified Henderson and Pabis models

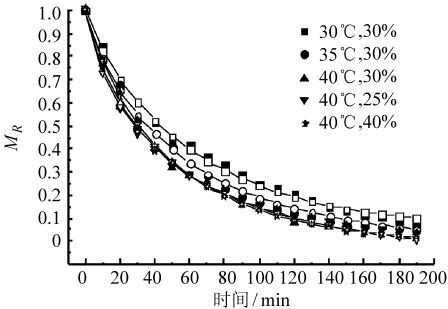


图3 种子相对含水率实验值与 Midilli et al 模型模拟值比较

Fig.3 Comparison of the experimental and predicted relative moisture ratio values by the Midilli et al model

图4为4种不同模型模拟得到的种子相对含水率值与对应实验值的动态变化情况。由图可知,4种模型模拟值都能反映实验值的变化趋势,且偏差很小,尤其是改进 Henderson and Pabis 模型吻合最好。

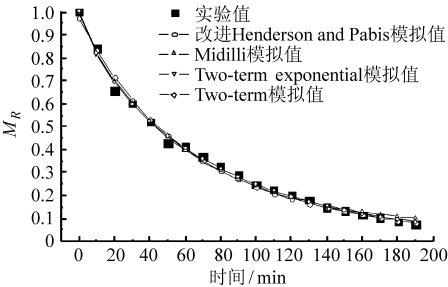


图4 种子相对含水率实验值与不同模型模拟值比较

Fig.4 Comparison of the experimental and predicted relative moisture ratio values by different drying models

图5为4种改进 Henderson and Pabis 模型,即不考虑干燥空气温度和相对湿度影响、只考虑温度影响、只考虑相对湿度影响、同时考虑温度和相对湿度影响,模拟得到的种子相对含水率值与实验值的比较。结合表2可知,同时考虑干燥空气温度和相对湿度影响的模型,得到的模拟值与实验值吻合更好。

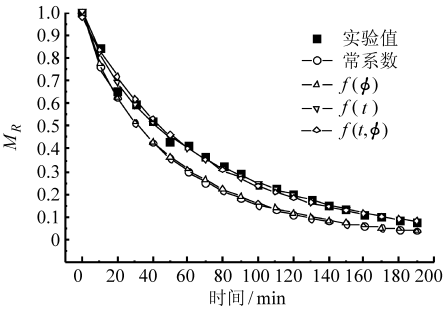


图5 不同模型系数下,种子相对含水率实验值与模拟值比较

Fig.5 Comparison of the experimental and predicted relative moisture ratio values with coefficients fitted in different ways

图6为种子质扩散系数的对数值随绝对温度倒数的变化情况。可以看出,线性拟合曲线与实验值吻合较好。由种子质扩散系数满足的 Arrhennius 公式^[2],即

$$D_{eff} = D_0 \exp \left(- \frac{E_a}{R_g (t + 273.15)} \right) \quad (11)$$

式中 D_0 ——Arrhennius 常数
 E_a ——活化能 R_g ——气体常数
拟合得到 $D_0 = 6.526 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, E_a 为 35.884 kJ/mol。

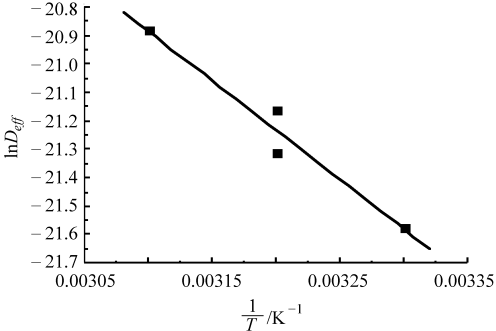


图6 种子质扩散系数随温度的变化情况

Fig.6 Variation of mass diffusivity with temperatures

4 结论

- (1)对大多数模型而言,同时考虑干燥空气温度和相对湿度影响能获得更好的拟合效果, R^2 在0.99以上, E_{MD} 、 E_{RMS} 、 χ^2 分别在10%、0.025、0.0006以下。精度较高的模型依次是改进 Henderson and Pabis, Midilli et al 和 Two-term exponential 模型。
- (2)对所有模型,不考虑干燥空气温度与相对湿度影响或者只考虑相对湿度影响时模拟精度相对

较低,尤其是不考虑温度和相对湿度情况,模型的 R^2 更小, E_{RMS} 、 χ^2 、 E_{MD} 更大。

(3)通过非线性拟合得到了白菜种子的质扩散系数公式。

参 考 文 献

- 1 Neslihan Colak, Arif Hepbasli. A review of heat pump drying: part I—systems, models and studies [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2 180 ~2 186.
- 2 Kamil Sacilik. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 23 ~30.
- 3 Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A K. Mathematical modeling of convection drying of green table olives [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 47 ~53.
- 4 Hi C L, Law C L, Cloke M. Modeling using a new thin drying model and product quality of cocoa [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 191 ~198.
- 5 John S Roberts, David R Kidd, Olga Padilla-Zakour. Drying kinetics of grape seeds [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 460 ~465.
- 6 王娟. 种子热泵变温干燥过程的实验及仿真研究[D]. 天津:天津大学,2007.
Wang Juan. Simulation and experimental study on the temperature-variable drying process with heat pump for seeds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- 7 Ilhan Ceylan, Mustafa Aktas, Hikmet Dogan. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11 ~12): 1 931 ~1 936.
- 8 李雷. CO₂ 热泵干燥生物材料性能的研究[D]. 天津:天津大学,2008.
Li Lei. The study on CO₂ heat pump drying biomaterial performance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 9 李思远. 种子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)
- 10 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 porous materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 1998. (in Chinese)

(上接第 98 页)

- 34 Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy [J]. Ecological Modelling, 1994, 73(3 ~4): 215 ~268.
- 35 Brandt-Williams S L. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. folio No. 4 – emergy of Florida agriculture. center for environmental policy, environmental engineering sciences, University of Florida, Gainesville, USA[EB/OL]. http://www.cep.ees.ufl.edu/pubs/Folio_4.
- 36 Yang Z F, Jiang M M, Chen B, et al. Solar emergy evaluation for Chinese economy [J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 875 ~886.
- 37 Wang Lingmei, Ni Weidong, Li Zheng. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP) [J]. Resources Conservation and Recycling, 2006, 48(1): 56 ~70.
- 38 王伟. 生物质气化发电系统的生命周期综合评价及方法学研究[D]. 广州:中国科学院广州能源研究所, 2005.
Wang Wei. Composite life cycle assessment of biomass gasification power generation & methodological studies of LCA [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy Concersion, CAS, 2005. (in Chinese)
- 39 贾友见. 生物质能源系统可持续发展评价[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2004.
Jia Youjian. A methodology and application for sustainability assessment of bioenergy systems [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)
- 40 林琳. 生物质直燃发电系统的生命周期环境评价和能效分析[D]. 广州:中国科学院广州能源研究所, 2007.