

文章编号:0253-4339(2018)05-0077-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.05.077

热泵干燥条件下刺参有效扩散系数的研究

赵海波¹ 杨昭² 戴家傲³ 乔玲敏³ 张玲玲³

(1 烟台大学海洋学院 烟台 264005; 2 天津大学机械工程学院 天津 300072; 3 烟台大学土木学院 烟台 264005)

摘 要 有效扩散系数 D_{eff} 是干燥传质研究的重要基础数据之一, 现有 D_{eff} 研究大多侧重于考虑干燥温度 t 而忽视干基含水率 X 、收缩变形的影响。本文建立了刺参干燥有限元模型和 D_{eff} 计算模型, 以 X 数据的模拟值与实验值之差最小为优化目标, 计算得到 D_{eff} , 对比分析了收缩变形、 t 和 X 对刺参 D_{eff} 的影响。研究表明: 收缩变形、 t 及 X 均对 D_{eff} 影响较大, 同时考虑上述 3 个影响因素得到的 D_{eff} 比仅考虑 t 及 X 影响时小 3.9% ~ 14.6%, 而考虑收缩变形和 t 影响得到的 D_{eff} 比仅考虑 t 影响时小 8.7% ~ 14.5%, 且刺参 D_{eff} 均随 t 和 X 的升高而增加。考虑收缩变形、 t 和 X 等对 D_{eff} 的影响后, 刺参干燥模型模拟得到的 X 与实验值吻合最好, 相关系数高于 0.994。模拟得到的刺参内部 D_{eff} 按由内向外逐渐降低的规律分布, 干燥从 1 h 进行至 15 h, 内外 D_{eff} 差值由 $6.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $0.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 中心处 D_{eff} 则由 $14.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $8.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

关键词 热泵; 传质; 有效扩散系数; 干燥; 刺参

中图分类号: TB61⁺1; TQ051.5; TK173

文献标识码: A

Study on Effective Diffusivity of Sea Cucumber with Heat Pump Drying

Zhao Haibo¹ Yang Zhao² Dai Jia'ao³ Qiao Lingmin³ Zhang Lingling³

(1. School of Ocean, Yantai University, Yantai, 264005, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072, China; 3. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai, 264005, China)

Abstract The effective diffusivity (D_{eff}) is an important parameter for mass transfer research on the drying of sea cucumber. The dependence of the D_{eff} on drying temperature (t) has been adopted in current studies, while the effects of dry-based moisture content (X) and drying shrinkage have often been ignored. Therefore, in this paper, a finite element dry model is built and the D_{eff} determination method based on the model is applied to study the D_{eff} in sea cucumber heat pump drying. The influences of shrinkage during heat pump drying, t and X on D_{eff} have been studied and analyzed. The results show that the drying shrinkage, t , and X affect the D_{eff} greatly. The effective diffusivities, as determined by considering the effects of drying shrinkage, t and X , are 3.9% ~ 14.6% lower than those considering the effects of t and X . The D_{eff} determined by considering the effects of drying shrinkage and t are 8.7% ~ 14.5% lower than those only considering the effect of t . The D_{eff} increases with both t and X . Models considering drying shrinkage and influence of t and X on D_{eff} can preferably predict X variation in line with the experimental values, with a coefficient of correlation higher than 0.994. The D_{eff} decreases along the radial direction in the sea cucumber. As drying proceeds from 1 h to 15 h, the difference in D_{eff} between the center and the surface of sea cucumber reduces from $6.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $0.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, and the D_{eff} in the center decreases from $14.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ to $8.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Keywords heat pump; mass transfer; effective diffusivity; drying; sea cucumber

固体物料干燥时, 其含水率 X 的动态变化规律通常用菲克第二定律^[1]来描述, 即 $\frac{\partial X}{\partial \tau} = D_{\text{eff}} \nabla^2 X$, 式中 D_{eff} 为有效扩散系数, 它反映了分子扩散、毛细流动、表面扩散等因素对物料干燥的综合影响^[2], 这些因素又受干燥温度和物料干基含水率的影响。 D_{eff} 通常由实验^[2]获得: 假定 D_{eff} 为常数的前提下, 先得到菲克第二定律的近似解析解, 并结合实验测得的干基含水率数据求出 D_{eff} , 再由不同温度下的 D_{eff} 拟合出

Arrhenius 关系式的系数。Chen Dengyu 等^[3-5] 利用此方法计算了锯末、食品、苹果和甜椒的 D_{eff} 。Arrhenius 关系式只描述了 D_{eff} 与干燥温度的关系, 不能表示 D_{eff} 与干基含水率的关系, 这种关系也无法用上述实验方法确定。实际上, 上述基于解析解确定 D_{eff} 的方法只适用于形状规则的物料, 用于形状不规则或有限大小的物料时会有较大误差。因此, 有必要寻找一种适用对象更广的确定 D_{eff} 的方法。文献^[6]提出了一种基于物料干燥模型优化计算 D_{eff} 的方法。该方法通

过物料有限元模型,将模拟数据与实验数据对比得到 D_{eff} 。该方法由于采用有限元建模描述具有复杂形状的物料对象,对不规则物料的 D_{eff} 计算具有很好的适用性。

刺参是目前我国海水养殖中最活跃、发展最快的水产品,为了满足干制品质量和节能的要求,新型热泵干燥方式已开始应用于刺参干制加工中^[7-9]。确定刺参在热泵干燥过程中的 D_{eff} 对于研究刺参的干燥动力学特性、优化干燥工艺、深入研究刺参内部的干燥传质特性都具有重要意义。但刺参本身为圆筒状,两端稍细,体背有疣足,形状不规则,从尺寸上也不能看作是无限长圆柱体,故不能用解析方法确定刺参的 D_{eff} 。本文将基于有限元模型的 D_{eff} 确定方法引入刺参热泵干燥研究,深入探讨热泵干燥条件下刺参 D_{eff} 的影响因素和变化规律。

1 干燥数学模型

以刺参为对象建立干燥数学模型。建模中,假设刺参为均匀对称的不等边椭球形,取其 1/4 进行建模,如图 1 所示,上方锥形突起为疣足。

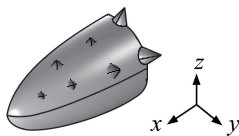


图 1 刺参建模对象

Fig. 1 The modeling object of sea cucumber

刺参干燥模型是描述其内部水分扩散的非稳态传质模型,该模型由 3 部分组成:控制微分方程、边界条件和初始条件。基于菲克第二定律^[10-11]得到控制微分方程:

$$\frac{\partial X(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\text{eff}} \frac{\partial X(x,y,z,\tau)}{\partial x} \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\text{eff}} \frac{\partial X(x,y,z,\tau)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\text{eff}} \frac{\partial X(x,y,z,\tau)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

边界条件:

$$-D_{\text{eff}} \frac{\partial X(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = k_c [X(x,y,z,\tau) - X_e] \quad (2)$$

初始条件:

$$X(x,y,z,0) = X_0 \quad (3)$$

式中: X 为局部干基含水率(层内水分质量/层内干基质量),%; X_0 为刺参初始干基含水率,%; τ 为干燥时间,s; k_c 为对流传质系数^[11],m/s; X_e 为刺参达到平衡状态时的干基含水率,%。

刺参在热泵干燥过程中,随着体内水分不断脱离,整体逐渐收缩。收缩率随干基含水率的变化如

下^[12]:

$$\varepsilon = a + bX \quad (4)$$

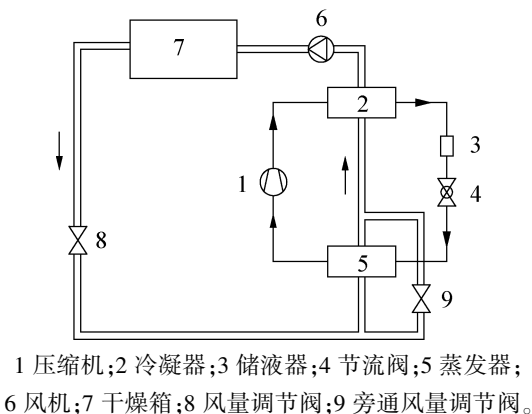
式中: ε 为收缩率; a, b 为方程系数,根据实验数据拟合获得。

方程(1)~(4)组成了考虑刺参干燥收缩的数学模型。为了分析刺参干燥收缩对 D_{eff} 的影响,本文还建立了不考虑刺参干燥收缩的数学模型进行对比分析,该模型由方程(1)~(3)组成。

2 刺参热泵干燥实验

2.1 实验装置

干燥用热泵装置为自制,工作原理如图 2 所示。该实验系统包括热泵回路和干燥空气回路两部分。热泵回路由直流变频压缩机 1、冷凝器 2、储液器 3、节流阀 4、蒸发器 5 及相应连接管道组成,干燥空气回路由风机 6、干燥箱 7、风量调节阀 8、旁通风量调节阀 9 和相应连接风道组成。热泵回路的工作原理同文献[13-15]。在干燥空气回路中,干燥空气进入冷凝器吸热后温度升高,在风机驱动下进入干燥箱加热刺参,吸收水分后流出干燥箱,经风量调节阀后,一路经蒸发器除湿,另一路经旁通风量调节阀流出,两路空气混合后再进入冷凝器加热,完成空气回路循环。调节旁通风量调节阀开度可以实现干燥空气温度和湿度的变化。通过实验测试,本热泵实验台的性能系数(加热量/输入电量)可达 3.2~3.6。



1 压缩机;2 冷凝器;3 储液器;4 节流阀;5 蒸发器;
6 风机;7 干燥箱;8 风量调节阀;9 旁通风量调节阀。

图 2 热泵干燥实验原理

Fig. 2 The principle of heat pump drying experiment

2.2 实验材料

实验所用刺参来自烟台某市场,经去除内脏、煮沸、沥干表面水分处理后,质量为 (18 ± 4.5) g,长、短半径分别为 (90 ± 5) mm、 (29 ± 4) mm,赤道半径为 (29 ± 4) mm,初始干基含水率为 $643\% \pm 76.7\%$ 。

2.3 实验方法

每组实验选择 10 个大小相近的刺参样品,用电

子天平称取质量。实验前先预热热泵,调节压缩机频率和旁通风量调节阀达到设定干燥温度后,将刺参单层均匀平铺在托盘中放入干燥箱,每隔 20 min 取出用电子天平称取质量,用游标卡尺测量并记录长、短半径和赤道半径,当干燥至含水量基本稳定时停止实验。

实验中,测得干燥空气流速为 0.8 m/s,干燥温度为 35 ℃ ± 1 ℃、40 ℃ ± 1 ℃、45 ℃ ± 1 ℃,相对湿度为 17% ± 1%、14% ± 2%、25% ± 1%。

2.4 指标参数测量

2.4.1 干基含水率

干燥结束后,将刺参置于红外干燥箱内,设定温度为 103 ℃,根据食品水分测定国家标准^[16]将刺参完全干燥,作为全干质量,再由实验过程中测得的瞬时质量计算得到每个测量时刻的平均干基含水率:

$$\bar{X}(\tau_i) = \frac{m_i - m_g}{m_g} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\bar{X}(\tau_i)$ 为平均干基含水率,%; m_g 为全干质量,kg; m_i 为瞬时质量,kg。

2.4.2 收缩率

根据测得的刺参长、短半径和赤道半径计算刺参体积,代入式(6)计算收缩率:

$$\varepsilon = \frac{V_i}{V_0} \quad (6)$$

式中: V_i 为 τ_i 测量时刻的刺参体积, $V_i = \frac{4}{3}\pi r_{x,i}r_{y,i}r_{z,i}$; $r_{x,i}$ 、 $r_{y,i}$ 、 $r_{z,i}$ 分别为刺参在 τ_i 时刻的长半径、短半径、赤道半径,m; V_0 为刺参初始体积,m³。

3 D_{eff} 计算模型

根据是否考虑 D_{eff} 随干燥温度和干基含水率的变化,分别提出了两种 D_{eff} 计算模型,用于干燥数学模型中 D_{eff} 的计算。

M1 模型:不考虑 D_{eff} 随干基含水率的变化,即在给定干燥条件下,

$$D_{\text{eff}} = \text{const} \quad (7)$$

运用该模型得到不同干燥温度的 D_{eff} 后,拟合获得其随干燥温度的变化,即 Arrhenius 公式:

$$D_{\text{eff}} = f(t) = D_0 e^{-\frac{E_a}{R(t+273.15)}} \quad (8)$$

式中: D_0 、 E_a 为待定系数; R 为摩尔气体常数, J/(mol·K); t 为干燥温度,℃。

M2 模型:考虑 D_{eff} 随干基含水率的变化,即在给定干燥条件下,

$$D_{\text{eff}} = a_0 X + b_0 \quad (9)$$

式中: a_0 、 b_0 为待定系数。

有学者研究得到了稻谷、糙米、玉米、小麦、蔬菜

等物料的 D_{eff} 随干基含水率的变化^[2],但对刺参的研究很少。将 M2 模型代入干燥数学模型,得到不同干燥温度的 D_{eff} 后,再拟合得出刺参的 D_{eff} 随干燥温度与干基含水率的变化,表示为修正的 Arrhenius 公式:

$$D_{\text{eff}} = f(t, X) = e^{a_1 + a_2 X + a_3 t + a_4} e^{-\frac{b_1 + b_2 X}{R(t+273.15)}} \quad (10)$$

式中: a_j ($j = 1, 2, 3, 4$), b_k ($k = 1, 2$) 为待定系数。

4 基于有限元模型的 D_{eff} 确定方法

图 3 所示为基于有限元模型的 D_{eff} 确定方法流程图。1)在现有热泵干燥实验台上测得刺参平均干基含水率的测试数据 $\bar{X}(\tau_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$; 2)假设 D_{eff} 值,将其计算模型代入干燥数学模型,计算获得刺参内部各有限元的干基含水率; 3)求出平均干基含水率:

$$\bar{X}_c(\tau_i) = \frac{1}{V} \int_V X(x, y, z, \tau_i) dV \quad (11)$$

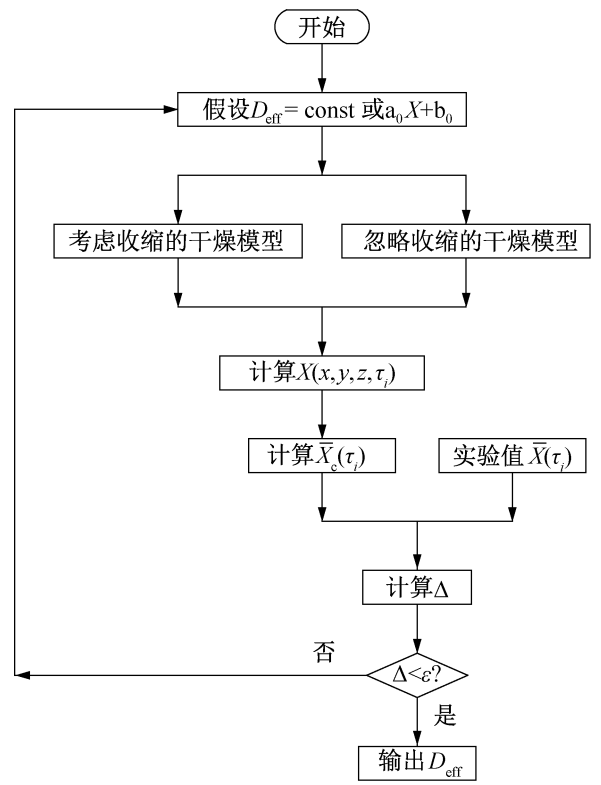


图 3 所示为基于有限元模型的 D_{eff} 确定方法流程图
Fig. 3 The flow chart of determination of D_{eff} based on FME model

将该值与实验值对比,迭代计算,使 $\Delta = \sum_{i=1}^n [\bar{X}_c(\tau_i) - \bar{X}(\tau_i)]$ 最小 ($< \varepsilon$) 时的 D_{eff} 即为有效扩散系数。

按照上述 D_{eff} 计算方法,在流程图中,分别采用 M1 和 M2 模型后,通过迭代可得 D_{eff} 为常数和随干基

含水率变化的两种结果。

为了研究干燥数学模型对 D_{eff} 的影响,将考虑与忽略收缩的干燥数学模型分别代入计算,得到对应的 D_{eff} ,分别称为考虑收缩与忽略收缩的 D_{eff} (以下称为模型输出值)。利用上述方法,计算得到各干燥条件下的 D_{eff} ,再通过 MATLAB 软件的最小二乘法^[17],辨识出式(8)与式(10)中 D_0 、 E_a 、 a_j 、 b_k 等系数值,得到计算 D_{eff} 的公式,获得 D_{eff} 随干燥温度 t 和干基含水率 X 的变化。

5 结果与分析

上述模型中,按照是否考虑刺参收缩以及选用哪个刺参 D_{eff} 模型(M1 或 M2),可分别计算得到考虑收缩且 D_{eff} 随 t 变化、忽略收缩且 D_{eff} 随 t 变化、考虑收缩且 D_{eff} 随 t 和 X 变化、忽略收缩且 D_{eff} 随 t 和 X 变化 4 种情况下的刺参 D_{eff} ,并进行对比分析。

根据 M1 模型,同一温度下刺参内部的 D_{eff} 为常数。图 4 所示采用 M1 模型得到的刺参 D_{eff} 随 t 的变化。可以看出,在考虑收缩情况下,随着 t 由 35℃ 升至 45℃, D_{eff} 从 $7.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $16.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,增加了一倍多。说明刺参的 D_{eff} 随 t 的增加而增加。由图 4 还可以看出,在 3 种温度下,考虑刺参收缩的 D_{eff} 均低于忽略收缩情况,分别降低了 11%、14.5%、8.7%。原因是刺参干燥过程中有较大收缩,导致不考虑收缩建模中的刺参尺寸大于实际情况,需要更大的 D_{eff} 才能与 X 动态实验数据相符。由此可知,采用基于有限元模型确定 D_{eff} 时,建模必须考虑收缩引起的几何尺寸变化,否则会产生较大偏差。

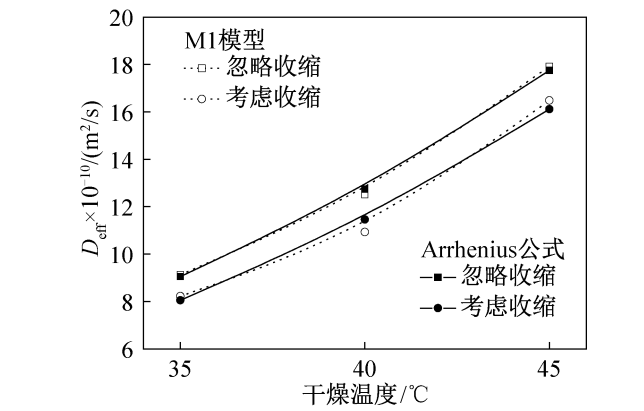


图 4 热泵干燥条件下, D_{eff} 随干燥温度的变化

Fig. 4 Variation of effective diffusivity with drying temperature under heat pump drying

为了便于计算 D_{eff} ,将上述模型输出值拟合为 Arrhenius 公式:

忽略收缩:

$$D_{\text{eff}} = 1.809 \text{ e}^{-\frac{54.84}{R(t+273.15)}} \quad (12)$$

考虑收缩:

$$D_{\text{eff}} = 3.102 \text{ e}^{-\frac{56.52}{R(t+273.15)}} \quad (13)$$

由图 4 可以看出,用式(12)~(13)计算得到的拟合值与模型输出值吻合较好,忽略与考虑收缩时的相关系数^[17]分别为 0.999 和 0.994。

图 5 所示为不同热泵干燥条件下,采用 M2 模型得到的刺参内部 D_{eff} 随 t 和 X 的变化。可以看出,在 3 种热泵干燥温度下, X 从 500% 降至 50% 时, D_{eff} 分别由 12.2×10^{-10} 、 15.4×10^{-10} 、 $22.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 6.9×10^{-10} 、 8.7×10^{-10} 、 $13.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,均降低了约 40%。说明 X 越高,刺参内部水分扩散更快,反之越慢。在 t 影响方面,当 t 从 35℃ 升至 45℃ 后, D_{eff} 增加了 80%~93%,且 X 越低增加值越大。

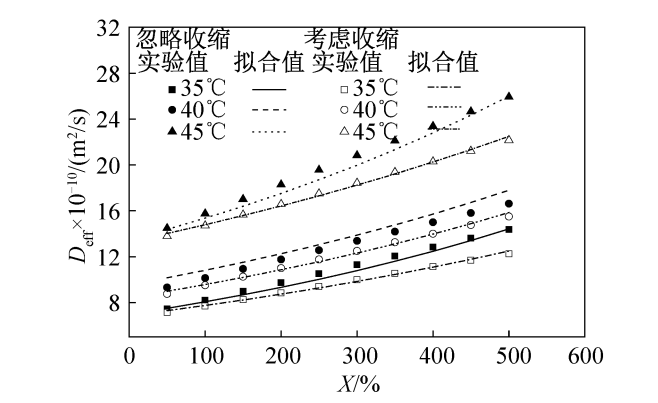


图 5 热泵干燥条件下, D_{eff} 随干燥温度和干基含水率的变化

Fig. 5 Variation of effective diffusivity with drying temperature and dry-based moisture content under heat pump drying

为了便于计算 D_{eff} ,将上述模型输出值拟合为修正 Arrhenius 公式:

忽略收缩:

$$D_{\text{eff}} = \text{e}^{-40.8081X+0.1145Xt+1.4052t-495.8396} \text{ e}^{\frac{94.5622X+1089.3}{R(t+273.15)}} \quad (14)$$

考虑收缩:

$$D_{\text{eff}} = \text{e}^{61.968X-0.1765Xt+1.6466t-581.3288} \text{ e}^{\frac{142.4857X+1286.4}{R(t+273.15)}} \quad (15)$$

由图 5 可以看出,用修正 Arrhenius 公式(14)~(15)计算的 D_{eff} 拟合值与 M2 模型输出值之间吻合也较好,忽略与考虑收缩时的相关系数分别为 0.993 和 0.999。

与图 4 类似,由图 5 也可以看出考虑收缩比忽略收缩得到的 D_{eff} 要小,相对偏差范围为 3.9%~14.6%。再次证明了模型中干燥收缩对 D_{eff} 计算具有重要影响。

拟合得到描述 D_{eff} 对 t 和 X 变化的公式 (12) ~ (15) 后, 将其代入干燥数学模型, 可得到不同情况下刺参 X 的动态变化, 如图 6 ~ 图 8 所示。可以看出, 不同 D_{eff} 模型计算得到的刺参 X 均随干燥进行而逐渐下降, 与实验测试数据变化趋势一致。但 4 种模型中, 忽略收缩的 D_{eff} 模拟得到的 X 与实验测试数据偏差较大。如在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 干燥条件下, 干燥初期模拟值明显小于实验值而后期则高于实验值, 而在 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 和 $(45 \pm 1)^\circ\text{C}$ 干燥条件时, 刺参含水率拟合值均在干燥后半段明显高于实验值, 且在 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 干燥条件时, 高出实验值情况最严重。在上述 3 种干燥条件下, 考虑收缩的 D_{eff} 模型模拟得到的 X 与实验值吻合最好, 尤其考虑 D_{eff} 随 t 和 X 变化时的模拟值与实验值一致性更好, 相关系数分别为 0.995、0.994、0.996。而只考虑 D_{eff} 随 t 变化时的模拟值与实验值的相关系数分别为 0.993、0.991、0.994。由此可知, 考虑收缩且 D_{eff} 随 t 和 X 变化时, 模拟精度更高, 与实验数据更吻合, 在干燥研究中应优先推荐使用。

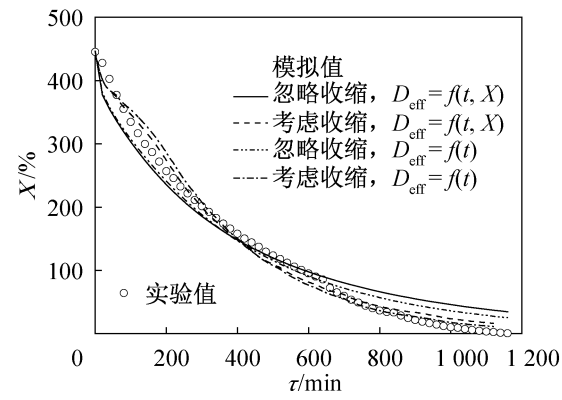


图 6 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 热泵干燥下干基含水率的变化
Fig. 6 Variation of dry-based moisture content with drying time under heat pump drying ($t = (35 \pm 1)^\circ\text{C}$)

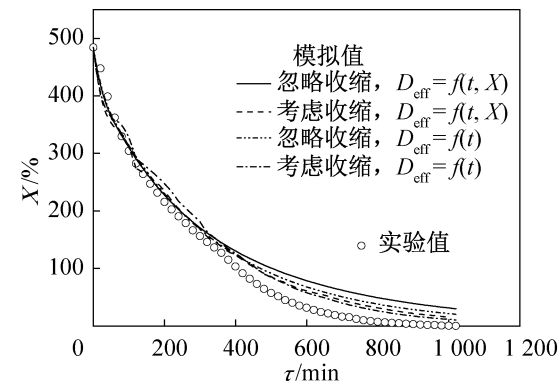


图 7 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 热泵干燥下干基含水率的变化
Fig. 7 Variation of dry-based moisture content with drying time under heat pump drying ($t = (40 \pm 1)^\circ\text{C}$)

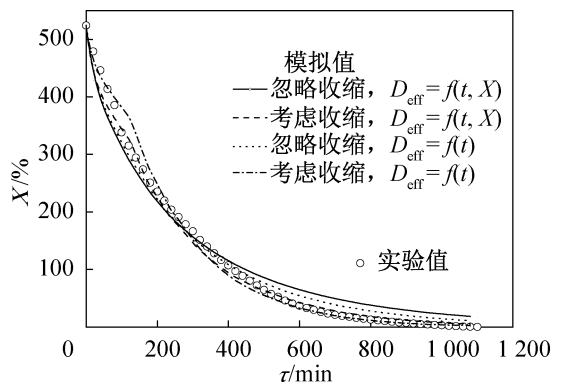


图 8 $(45 \pm 1)^\circ\text{C}$ 热泵干燥下干基含水率的变化
Fig. 8 Variation of dry-based moisture content with drying time under heat pump drying ($t = (45 \pm 1)^\circ\text{C}$)

图 9 所示为在 $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$ 热泵干燥温度下, 不同时刻刺参内部 D_{eff} 的分布。可以看出, 干燥进行至 1、5、15 h 时, 刺参内部 D_{eff} 范围分别为 $8.2 \times 10^{-10} \sim 14.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $8.1 \times 10^{-10} \sim 12.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $8.0 \times 10^{-10} \sim 8.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。刺参内外 D_{eff} 差值由 $6.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $0.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。刺参内部 D_{eff} 由内向外逐渐降低, 靠近中心处由于 X 较高, 对应的 D_{eff} 较大, 而在刺参外表面处, 由于 X 较低, D_{eff} 最小。由图 9 还可以看出, 随着干燥的进行, 刺参外形尺寸逐渐减少, 对应上述 3 个干燥时刻的疣足尖部最大尺寸由 1.8 cm 依次缩小至 1.6 cm 和 1.5 cm, 最大缩小率达到 16.7%, 尺寸变化较大, 说明建模不能忽略收缩效应, 否则计算结果将产生较大偏差, 图 4 ~ 图 8 中两种情况下的数值偏差也证明了上述观点。

6 结论

本文探讨了基于有限元模型确定扩散系数 D_{eff} 在刺参热泵干燥研究中的应用, 实验测试了 3 种不同热泵干燥温度 t 下的刺参干基含水率 X 变化, 建立了考虑收缩的刺参热泵干燥模型和 D_{eff} 模型, 通过 X 模拟值与实验值对比优化获得 D_{eff} , 并对分析收缩变形、 t 和 X 因素对刺参 D_{eff} 的影响。得到如下结论:

1) 刺参的 D_{eff} 随 t 的增加而增加, t 从 35°C 升至 45°C 后, D_{eff} 增加了 1 倍多。

2) X 对 D_{eff} 具有较大影响。在 3 种 t 下, D_{eff} 均随着 X 的降低而降低, X 由 500% 降至 50% 时, D_{eff} 降低 40% 左右。

3) D_{eff} 研究中应考虑收缩变形的影响, 且考虑收缩的 D_{eff} 均低于忽略收缩情况, 对应 M1 模型的 D_{eff} 相对偏差范围为 8.7% ~ 14.5%, 而 M2 模型的 D_{eff} 相对偏差范围为 3.9% ~ 14.6%。采用忽略收缩的干燥

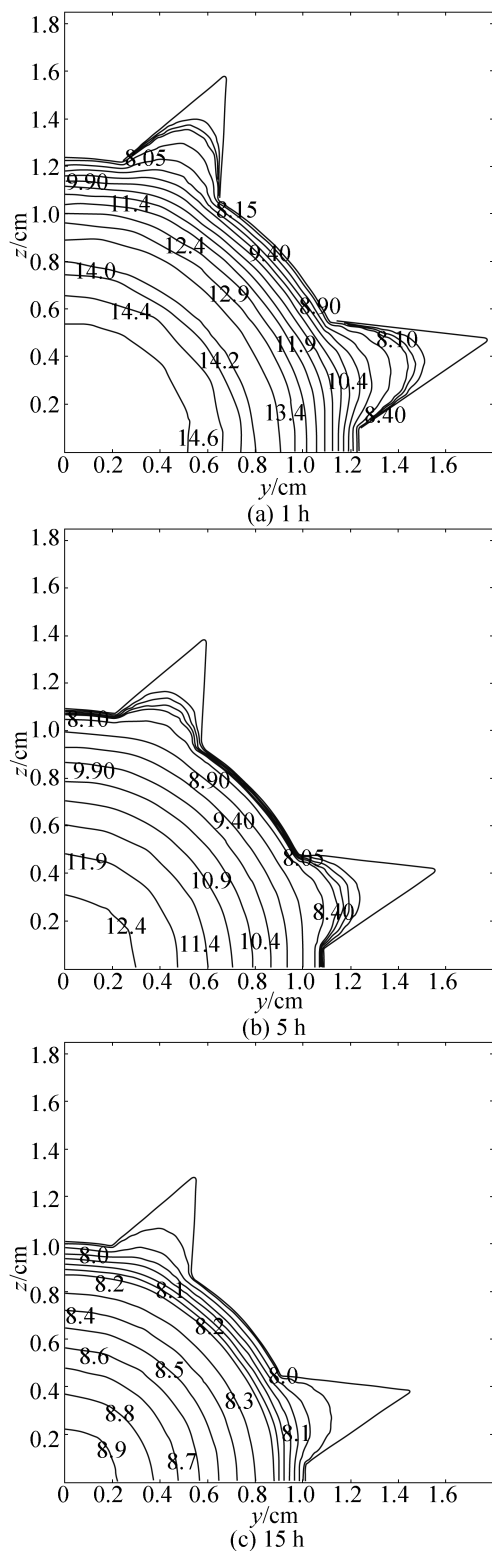


图9 不同时刻刺参内部扩散系数的分布

Fig. 9 Effective diffusivity distribution inside the sea cucumber in different drying times

模型模拟得到的 X 与实验测试数据偏差最大,而考虑收缩的干燥模型模拟得到的 X 与实验值吻合最好,尤其考虑 D_{eff} 随 t 和 X 变化时,模拟值精度更高,相关系数超过 0.994。

4) 在刺参内部, D_{eff} 范围随干燥进行逐渐减小,且按由内向外逐渐降低的规律分布,越靠近中心 D_{eff} 越大。从 1 h 至 15 h, 内外 D_{eff} 差值由 $6.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $0.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 中心处 D_{eff} 则由 $14.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $8.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

本文受山东省自然科学基金(ZR2014EL029)和天津市自然科学基金重点(16JCZDJC33900)项目资助。(The project was supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (No. ZR2014EL029) and Tianjin Provincial Key Natural Science Foundation of China (No. 16JCZDJC33900).)

参考文献

- [1] HHI C L, LAW C L, LAW M C. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1): 264–271.
- [2] 朱文学. 食品干燥原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (ZHU Wenxue. Principle and technology of food drying[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [3] CHEN Dengyu, ZHENG Yan, ZHU Xifeng. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition[J]. Bioresource Technology, 2012, 107(3): 451–455.
- [4] ERBAY Z, ICIER F. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(5): 441–464.
- [5] SCHÖSSLER K, JÄGER H, KNORR D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 103–110.
- [6] 赵海波, 杨昭. 热泵干燥条件下种子有效扩散系数的研究[C]//高等教育学会工程热物理专业委员会第二十一届全国学术会议论文集——传热传质学专辑. 2014. (ZHAO Haibo, YANG Zhao. Researches on effective diffusivity of seeds with heat pump drying[C]//Proceedings of the 21st National Academic Conference of Engineering Thermophysical Specialized Committee of Higher Education Society: Heat and Mass Transfer Album. 2014.)
- [7] 母刚, 张国琛, 邵亮. 热泵干燥海参的初步研究[J]. 渔业现代化, 2007, 34(5): 47–52. (MU Gang, ZHANG Guochen, SHAO Liang. Preliminary study of sea cucumber heat pump drying[J]. Fishery Modernization, 2007, 34(5): 47–52.)
- [8] MUJUMDAR A S. Study on a combination drying technique of sea cucumber[J]. Drying Technology, 2007, 25

- (12);2011–2019.
- [9] JANGAM S. Advances in heat pump-assisted drying technology edited by vasile minea [J]. Drying Technology, 2017,35(4):522–523.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006. (YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higer Education Press,2006.)
- [11] INCROPERA F P, DEWITT D P, BERGMAN T L, et al. Fundamentals of heat and mass transfer[M]. 6th ed. New York:John Wiley & Sons,2007.
- [12] MINEA V. Improvements of high temperature drying heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33:180–195.
- [13] 薛雅萌,李保国. 黄粉虫热泵低温干燥特性及干燥数学模型[J]. 制冷学报,2015,36(3):108–113. (XUE Yameng, LI Baoguo. Drying characteristics and mathematical model for heat pump low temperature drying of Tenebrio Molitor[J]. Journal of Refrigeration, 2015,36(3):108–113.)
- [14] 姬长英,蒋思杰,张波,等. 辣椒热泵干燥特性及工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(13):296–302. (JI Changying, JIANG Sijie, ZHANG Bo, et al. Heat pump drying properties of chili and optimization of technical parameters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 296–302.)
- [15] NGUYEN DINH DUC,李保国,薛雅萌. 木鳖果热泵低温干燥工艺研究[J]. 制冷学报,2014,35(6):109–113. (NGUYEN DINH DUC, LI Baoguo, XUE Yameng. Study on heat pump low temperature drying of Momordica fruit [J]. Journal of Refrigeration, 2014,35(6):109–113.)
- [16] 食品安全国家标准-食品中水分的测定: GB/T 5009.3—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2016. (National standard for food safety-determination of moisture content in foods: GB/T 5009.3—2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016.)
- [17] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2008. (SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. Probability theory and mathematical statistics[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press,2008.)

通信作者简介

赵海波,男,博士,副教授,烟台大学海洋学院,(0535) 6706013, E-mail:zhb01@yeah.net。研究方向:热泵干燥技术。

About the corresponding author

Zhao Haibo, male, Ph. D., associate professor, School of Ocean, Yantai University, + 86 535-6706013, E-mail: zhb01@yeah.net. Research fields: heat pump drying.