

基于动网格的白萝卜热风干燥热质传递研究

吴孟秋¹ 雷登文¹ 朱广飞² 谢永康³ 李星仪³ 刘嫣红¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125;

3. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 郑州 450002)

摘要: 针对果蔬干燥过程模拟时未能考虑收缩对几何模型及热质传递的影响而导致求解精度较差的问题, 采用动网格技术优化果蔬热风干燥过程中热质传递的数学模型。选择结构均匀、干燥过程收缩率较明显的白萝卜作为代表性物料, 试验结果表明: 样品长度对收缩特性具有显著影响, 当样品长径比为 10 时, 干燥收缩的各向同性率最优, 此时 Hatamipour 模型是最适合描述白萝卜热风干燥收缩规律的模型。基于动网格技术将收缩方程与热质传递方程耦合后探究白萝卜热风干燥的热质传递规律, 结果表明: 考虑收缩后由于迁移路径变短, 物料内部水分脱除速率加快且表层水分梯度降低; 与未考虑收缩情况相比, 干燥前中期水分蒸发量较大而后期含水率较小, 使得物料温度先迅速升高至 30℃ 后缓慢提升至 60℃ 的平衡温度, 该趋势更接近试验值; 考虑收缩方程后, 物料内、外部含水率和温度模拟结果的偏差分别从 17% ~ 8%、12 ~ 2℃ 降低至 14% ~ 3%、3 ~ 2℃。结果表明: 基于动网格的数值模拟具有更高的计算精度, 为分析热风干燥过程中的热质传递规律提供了可靠的模型。

关键词: 白萝卜; 热风干燥; 热质传递; 水分梯度; 动网格

中图分类号: TS255 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0293-10

Hot-air Drying Heat and Mass Transfer of White Radish Based on Moving Mesh

WU Mengqiu¹ LEI Dengwen¹ ZHU Guangfei² XIE Yongkang³ LI Xingyi³ LIU Yanhong¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China

3. Research Center for Agricultural and Sideline Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Drying model for grains is still often adopted in most current numerical simulation for fruits and vegetables during drying, leading to low simulation accuracy, for the shrinkage effect was not considered in physical model and heat and mass transfer. In order to calculate the shrinkage model during hot-air drying and simulate the distribution of internal temperature and humidity field with and without shrinkage, white radish with uniform structure and visible shrinkage during drying was chosen as a representative material. The results of the drying experiment demonstrated that the sample length had a significant impact on the characteristics of shrinkage, and the isotropic rate of drying shrinkage was the best at a sample length-to-radius ratio of 10, at which point the Hatamipour model was most appropriate to explain the shrinkage law of white radish by hot-air drying. And then, the heat mass transfer of white radish during hot-air drying was investigated based on the coupled shrinkage equation and heat and mass transfer equations by moving mesh method. The numerical simulation results showed that the migration path of moisture inside the material became shorter after shrinkage, and the faster removal rate led to a significant reduction of both internal and external moisture content at each time point, as well as a reduction in the moisture gradient at the superficial layer of material. Compared with the model not considering shrinkage, the moisture evaporation in the early and middle stages of drying was larger, while the moisture content in the later stage was smaller, so that more heat would be consumed for moisture

收稿日期: 2022-06-08 修回日期: 2022-08-17

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2018B020241003-04)

作者简介: 吴孟秋(1995—),男,硕士生,主要从事农产品加工工程研究,E-mail: 503343436@qq.com

通信作者: 刘嫣红(1976—),女,教授,博士生导师,主要从事农产品加工工程研究,E-mail: liuyan hong@cau.edu.cn

evaporation in the early and middle stages and the latent heat dissipation for evaporation in the later stage was reduced. The above phenomenon led to a rapid rise in material temperature to 30℃ and then slowly raised to an equilibrium temperature of 60℃, which was closer to the experimental value. Specifically, the deviations of simulation results for internal and external moisture and temperature of the material after combining the shrinkage equations were reduced from 17% ~ 8% and 12 ~ 2℃ to 14% ~ 3% and 3 ~ 2℃, respectively. Therefore, the numerical simulations based on moving mesh can effectively interpret the effect of shrinkage on the physical model of materials and the heat and mass transfer law, thus providing a higher computational accuracy and a reliable model for the analysis of the heat mass transfer during hot air drying.

Key words: white radish; hot-air drying; heat and mass transfer; moisture gradient; moving mesh

0 引言

农产品干燥过程中,热量和质量的传递过程十分复杂,通过计算机数值模拟的方法,可以直观地获取干燥各个阶段物料内部的温度 and 水分分布,进而揭示干燥的内在机理^[1-3]。国内外学者已经建立了各种粮食物料的干燥模型,如玉米、小麦、稻谷等,并开发了一系列专用模拟软件,用于指导粮食干燥机的结构设计和性能预测^[4]。而对于果蔬干燥过程数值模拟的结果则不尽人意,主要原因在于模拟过程大多沿用粮食的干燥模型^[5],未考虑果蔬在干燥过程中的收缩问题。粮食物料干燥过程的收缩相对较小,一般忽略不计,而果蔬为高含水物料,水分脱除引起的体积收缩效应非常显著,如香菇在基于温湿度控制的热风干燥过程中由于干燥介质相对湿度的变化,其收缩率达 33% ~ 60%,且在不同的收缩率下香菇的微观结构具有显著性差异^[6],从而影响了干燥过程中的热质传递。忽略收缩将导致模拟结果偏离实际干燥过程,无法实现科学预测的目的。因此,考虑收缩进行果蔬热风干燥过程模拟,意义重大。

部分学者在数值模拟过程中,通过间接手段考虑收缩对于传热传质系数等的影响,对模型进行优化^[7-10],这些在考虑收缩的干燥过程模拟研究中物料的几何模型未发生变化。即,上述研究是在固定边界的基础上通过改变水分有效扩散系数、热特性等与收缩相关的物理量来间接地探究收缩对干燥热质传递的影响,与物料收缩后形状与尺寸发生变化的实际情况仍有一定差异。

为进一步提高农产品干燥数值模拟的准确性,动网格技术开始从流场边界变形问题引申至热质传递研究。该技术是指通过光顺或重构网格的方法实现计算域边界出现刚性运动或变形等问题^[11]。文献[12]运用该手段模拟了升华过程界面的移动,模拟结果能够准确地描述干燥区与冻结区之间的变化规律。文献[13]通过 COMSOL 中的动网格模块,在探究土豆片对流干燥热质传递规律的同时,预测

了土豆片的收缩率和孔隙率的变化规律,并通过试验验证了该模型的准确性。因此,动网格技术可以应用于干燥过程中收缩对热质传递规律影响的拓展分析^[14]。同时,由于白萝卜初始含水率高、质地均匀,干燥过程中变形和收缩现象显著,故该研究将其作为代表性物料,用于探究收缩对干燥过程热质传递规律的影响。

基于上述分析,本文研究白萝卜的物理特性及热风干燥过程中的收缩特性,并确定拟合度较优的收缩方程;利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件,通过动网格技术将收缩模型与热质传递方程进行耦合计算,实现考虑收缩情况的热质传递模拟,并通过试验验证该模型的准确性;综合分析仿真与试验结果,最终得出考虑收缩的白萝卜热风干燥的热质传递规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装备

白萝卜原料购买于北京市海淀区静淑苑菜市场,选择直径和长度大致相当且无机械损坏的白萝卜用于试验。购回的白萝卜放置于冰箱冷藏室(0 ~ 5℃)暂存。初始湿基含水率为(95.27 ± 0.35)%,在试验前洗净去中间部位切块,通过定制刀具将其加工为直径 12 mm 和特定长度的圆柱体待用。

收缩试验及验证试验干燥设备采用基于温湿度一体化控制的热风干燥设备(中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室自制),其结构如图 1 所示;该设备可实现自动称量及干燥介质湿度调节,内置温度传感器可监测物料内部温度并记录。干燥过程中白萝卜的长度、直径变化采用机器视觉设备(中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室自制)记录。

1.2 物性参数测定方法

1.2.1 孔隙率

采用 AutoPore IV 9500 型压汞仪(Micromeritics

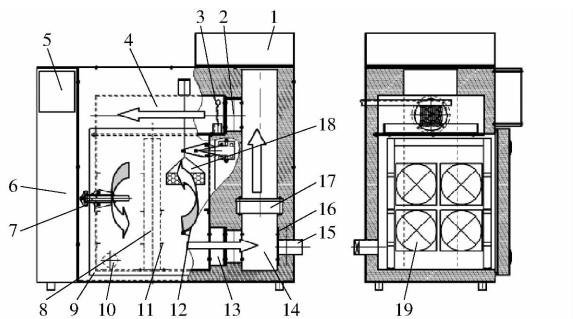


图 1 基于温湿度一体化控制的热风干燥设备
Fig. 1 Hot-air drying equipment based on integrated control of temperature and humidity

1. 加湿器 2. 进风管道 3. 湿帘 4. 风道 5. 触摸屏 6. 配电箱 7. 门把手 8. 风机支架 9. 干燥室门 10. 排湿风机 11. 料篮支架 12. 门合页 13. 回风道 14. 加热管总成 15. 进风口 16. 保温层 17. 内部送风机 18. 自动称量模块 19. 抗流风机

公司,美国)对冷冻干燥后的白萝卜丁进行测量,该压汞仪的压力范围为 0 ~ 60 kPa,压力精度 0.05 %,孔直径为 0.03 ~ 1 000 μm^[15]。

1.2.2 表观密度

采用无水乙醇为介质,通过排水法计算白萝卜丁体积,通过称量计算对应质量,重复 3 次试验得出表观密度。

1.2.3 比热容

采用 DSC - 60 型差示扫描量热仪(岛津公司,日本)测量物料在含水率为 10%、25%、50%、75% 水平下的比热容,设定温度范围为 20 ~ 80℃,升温程序为 5℃/min,保持 15 min。通过后处理软件可以直接得到物料的比热容。

1.2.4 导热系数

采用 KD2 Pro 型手持式热特性分析仪(Decagon Devices 公司,美国),通过瞬态线热源法^[16]进行测量,通过热风干燥(风温 65℃、风速 1.2 m/s)得到湿基含水率为 10%、30%、60%、90% 的白萝卜切块,分别在 20、40、60℃ 下测量导热系数。

1.3 试验方法

1.3.1 收缩方程拟合方法

建立准确的收缩模型是实现基于动网格的干燥过程数值模拟的基础。为得出数值模拟中所需的收缩模型,在基于温湿度一体化控制的热风干燥机中进行白萝卜热风干燥,设定热风温度为 55、65、75℃,设定干燥介质相对湿度为 20%、30%、40%,干燥过程中采用自制的机器视觉系统每 10 min 采集一次白萝卜图像,用于测算其轴向收缩率 S_l 、径向收缩率 S_d 、体积收缩率 S_v 。为研究干燥温度、环境湿度对白萝卜收缩率的影响,绘制上述参数与时间 t 的曲线,计算方法为

$$\begin{cases} S_l = \frac{l_0 - l_t}{l_0} \times 100\% \\ S_d = \frac{d_0 - d_t}{d_0} \times 100\% \\ S_v = \left(1 - \frac{d_t^2 l_t}{d_0^2 l_0}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中 l_0 、 l_t ——初始、干燥至 t 时刻的物料长度,mm
 d_0 、 d_t ——初始、干燥至 t 时刻物料直径,mm

试验结果通过 Origin 2018 软件与现有的物料收缩经验模型进行拟合,经验模型常采用收缩率 S 与水分比 M_R 之间的关系来表述,最终以决定系数 R^2 和残差平方和进行评价。收缩经验模型中各参数计算方法如下:

干燥过程中 t (min) 时刻的干基含水率计算公式为

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \quad (2)$$

式中 M_t ——干基含水率,g/g
 W_t —— t 时刻物料质量,g
 G ——干物质的质量,g
水分比 M_R 公式为

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (3)$$

式中 M_0 ——初始干基含水率,g/g

干燥过程中物料的半径关于时间的变化函数 $r(t)$ 可以定义为

$$r(t) = r_0 S \quad (4)$$

式中 r_0 ——物料初始半径,mm

由此,物料收缩速率 v_{SR} (m/s) 可以用半径的变化来表示,即

$$v_{SR} = \frac{r(t)}{t} \quad (5)$$

1.3.2 验证试验方法

验证试验的相关试验参数与数值模拟中的边界条件一致,即:在基于温湿度一体化控制的热风干燥设备中设定热风温度为 65℃,相对湿度为 20%,试验总时长 200 min,每 10 min 记录一次实时质量并采集图像信息待处理,验证试验重复 3 次以保证数据可靠。

2 模型建立及参数确定

2.1 基本假设

为建立并求解热风干燥过程中白萝卜的热质传递-收缩的多物理场耦合模型,做出如下假设:干燥过程中物料热量全部由热风对流提供;干燥过程空气湿度相对恒定,内部风速均匀且稳定;将物料看作

各向同性的均匀多孔介质,在初始状态下,水分充满内部孔隙;物料内部的热量传递只通过传导的方式从表面传递至内部;物料内部的水分传递只以扩散的方式由内部迁移至表面,随后以蒸发的形式从表面逸散;物料几何边界收缩具有各向同性。

2.2 物理模型

模拟所使用的白萝卜模型初始干基含水率为 20.14 g/g,根据试验结果选定物料数值模拟的模型为:直径 12 mm、长度 60 mm,并将其视为标准圆柱体,在此情况下模型可简化为二维轴对称模型。网格划分采用 COMSOL 自带的自由四面体(三角形)网格,如图 2 所示。

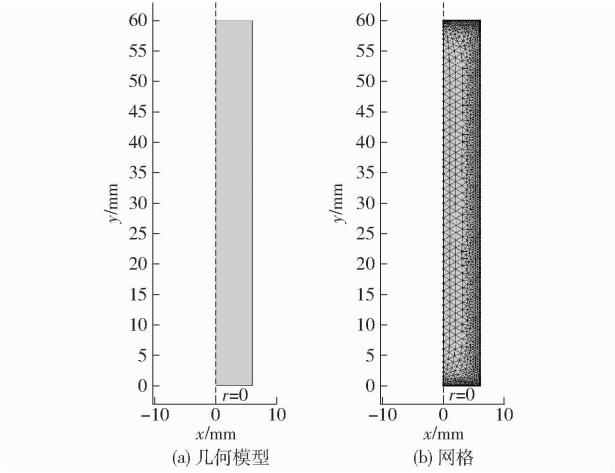


图 2 几何模型及网格划分
Fig.2 Geometric model and mesh

综合计算机处理速度和精度,设定时间步长:0.1 min,总体时间步:200 min。在结果分析中只计算其沿长度方向的横截面,并在模型的中心、外表面中心、底面中心以及边缘添加 4 个探针,用来计算该点处含水率以及温度变化情况,如图 3 所示。

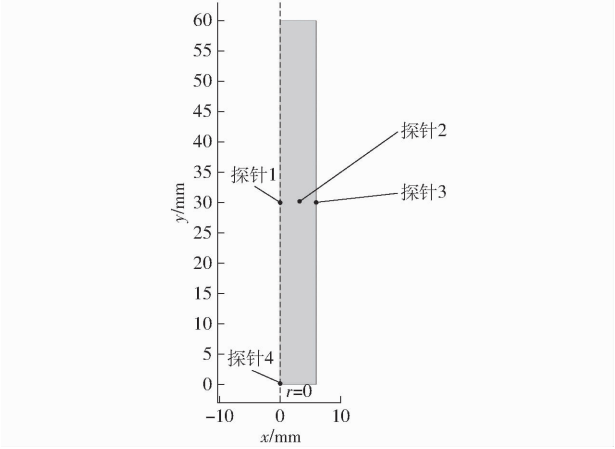


图 3 探针位置示意图
Fig.3 Schematic of probe position

2.3 数学模型

2.3.1 传热控制方程

对于二维模型,傅里叶导热定律规定:取任意时

刻内部的任意微元体,该微元内得到的热量加上产生的热量,等于其热量的增减^[17-18]。本模拟研究中,水蒸气汽化发生在物料的表面,忽略物料内部自身产生的热量,因此物料内部的二维传热控制方程包含:方程左侧为瞬态项,表示物料中温度随时间的变化;右侧前两项为 x,y 两个方向上在传导作用下的温度传递;最后一项则表征水分蒸发所需的热量,即源项。传热控制方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - h_{fg} \rho_l \frac{\partial M}{\partial t} \quad (6)$$

式中 ρ ——物料密度,kg/m³
 C_p ——物料比热容,kJ/(kg·K)
 k ——物料导热系数,W/(m·K)
 M ——物料干基含水率,g/g
 T ——物料内部的温度,K
 h_{fg} ——水分汽化潜热,J/kg
 ρ_l ——水密度,kg/m³

由于物料可以看作各向同性的多孔介质^[19],所以式(6)又可以写为

$$\nabla (k_{eq} \nabla T) = (\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} - Q_v \quad (7)$$

式中 Q_v ——水分蒸发潜热,W/m²

考虑到多孔介质由固相骨架和孔隙中的水分组成,因此可将多孔物料的热特性参数表述为与孔隙率相关的函数^[13]

$$k_{eq} = (1 - \theta_p) k_p + \theta_p k_l \quad (8)$$

$$(\rho C_p)_{eq} = (1 - \theta_p) C_{pp} \rho_p + \theta_p C_{pl} \rho_l \quad (9)$$

$$Q_v = \rho_l h_{fg} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (10)$$

式中 θ_p ——物料孔隙率,取 100%
 k_p ——多孔介质框架结构基体导热系数,W/(m·K)
 k_l ——水导热系数,W/(m·K)
 C_{pp} ——多孔介质框架结构基体比热容,kJ/(kg·K)
 C_{pl} ——水的比热容,kJ/(kg·K)
 ρ_p ——多孔介质框架结构基体密度,kg/m³

2.3.2 传质控制方程

传质是指混合物中因组分浓度差而引起相内或相际间的质量传递。在本研究中,物料内一微元体中的水分减少,即与相邻的微元体之间形成了浓度差,引起质量传递现象。物料内部水分扩散方程与传热方程类似,忽略物料内部的其他影响质量传递的因素,可利用 Fick 第二定律^[20]确定物料中任意一点处的组分扩散速率,方程左侧表述了物料水分随时间的变化,方程右侧表征了 x,y 两个方向上水

分以扩散速率 $D(\text{m}^2/\text{s})$ 迁移的状态,即

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial M}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial M}{\partial y} \right) \tag{11}$$

本研究中,引入试验得出的有效水分扩散系数 $D_{eff}(\text{m}^2/\text{s})$ 后可写为

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{eff} \nabla M) = 0 \tag{12}$$

2.4 初始条件与边界条件

2.4.1 传热模型初始与边界条件

干燥初始物料温度为 20°C 。在对流换热边界上选用洛平边界条件:即在单位时间内,从单位面积上流入流体的热量可用牛顿冷却定律表述为

$$q_+ = h_t (T_{out} - T_0) \tag{13}$$

式中 h_t ——对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

T_{out} ——干燥热空气温度, $^\circ\text{C}$

T_0 ——物料初始温度

在物料与热空气的接触界面上,热量从表面流入内部,即

$$q_- = -k_{eq} \frac{\partial T}{\partial n} \tag{14}$$

将在物料表面水分蒸发产生的汽化潜热考虑在内,在达到稳定状态时 $q_+ = q_-$,最终得到热风传递给固体表面的热流密度

$$k_{eq} \nabla T = h_t (T_{out} - T_0) + h_m \rho_l h_{fg} (M - M_e) \tag{15}$$

式中 M_e ——湿空气平衡含湿量, g/g

h_m ——对流传质系数, m/s

本研究中,物料边界的传热系数采用努塞尔数 Nu 估算。

将置于均匀热风流体中的圆柱面^[21]设为边界 2,两圆面设为边界 1 和 3,如图 4 所示。

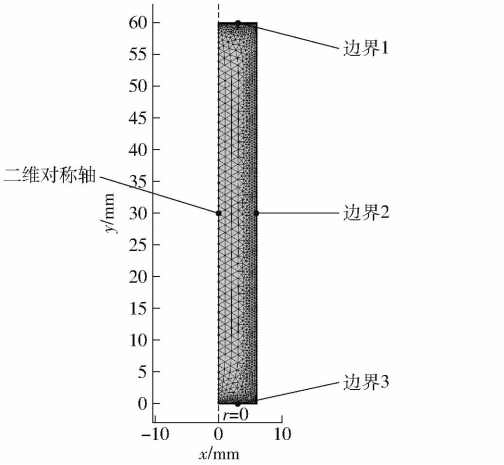


图 4 二维轴对称模型及边界名称

Fig.4 Two-dimensional axisymmetric model and boundary number

具体的边界设定如表 1 所示。

表 1 各边界对流换热类型及相关参数

Tab.1 Types and parameters of convection heat transfer at each boundary

边界序号	对流换热类型	风速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	对流传热系数 $h_t/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
1,3	平行板对流换热	0.3	4.94
2	平行流中圆柱体换热	0.4	10.63

2.4.2 传质模型初始与边界条件

模拟研究中设定物料初始干基含水率 M_{int} 为 $20.14 \text{ g}/\text{g}$ 。传质过程中,水分以液态扩散的形式从物料内部传递至表面,然后在边界处蒸发^[17]。当热风湿度一定时,蒸发水分不断地被干燥空气带走,该过程可描述为

$$D_{eff} \nabla M = h_m (M_e - M) \tag{16}$$

本研究中,物料边界的对流传质系数采用舍伍德数 Sh 估算。

2.5 数值模型中各物理量

物料的物性参数在干燥过程中会时刻发生变化,物料内部水分和热量的分布均为不均匀状态。根据 1.2 节及 2.3 节中的研究,物料本身的物性参数、干燥介质相应参数或表达式经测算后如表 2 所示。

表 2 COMSOL 模拟中所使用各物理量

Tab.2 Physical parameters used in COMSOL numerical simulation

参数	值或表达式	来源
孔隙率 $\theta/\%$	76.74	本研究
密度 $\rho_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	580.3	本研究
导热系数 k_p	$k_p = 0.0025 + 0.0017T + 0.4619M$	本研究
比热容 C_{pp}	$C_{pp} = 0.7119 + 0.0137T + 3.7910M - 1.56M^2$	本研究
液态水密度 ρ_l	$\rho_l = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2$	文献[21]
液态水导热系数 k_l	$k_l = 0.57109 + 0.0017625T$	文献[21]
液态水比热容 C_{pl}	$C_{pl} = 4.1762 + 9.0864 \times 10^{-5}T$	文献[21]
弯曲系数 τ	$\tau = \theta^{1/3}$	文献[15]
有效水分扩散系数 D_{eff}	$D_{eff} = D_0 \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right)$	文献[10]
水分汽化潜热 h_{fg}	$h_{fg} = 2503000 - 2386T$	文献[21]
水蒸气空气扩散速率 $D_a/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.5×10^{-5}	文献[21]
空气导热系数 $\alpha_a/(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	2.88×10^{-2}	文献[21]

3 结果与分析

3.1 干燥过程中白萝卜的收缩特性

3.1.1 白萝卜长度对收缩率的影响

在本研究中,白萝卜被视为二维轴对称的矩形,

为获得各向同性的收缩率,需首先探究样品长度对于轴向、径向两个方向上收缩率的影响。如图 5 所示:当干燥条件相同时,轴向收缩率随物料长度的增加而降低,径向收缩率则在 60 mm 最小,这一现象的主要原因是干燥时物料中水分在孔隙内部的迁移受到了长径比(长度/半径)的影响。在本研究中,当长径比大于 10 时,物料内部孔隙的长度增加,而较长的孔隙不利于蒸汽在孔道内移动,气体分子与孔道内壁撞击的频率增大,引起较显著的壁面效应^[7],使水分脱除更加困难,从而导致了水分由直径方向上脱除,导致径向收缩率增加。当长径比小于 10 时,物料干燥速度较快,水分脱除速度较快,物料内部压力减小,热应力导致物料整体变形较大。

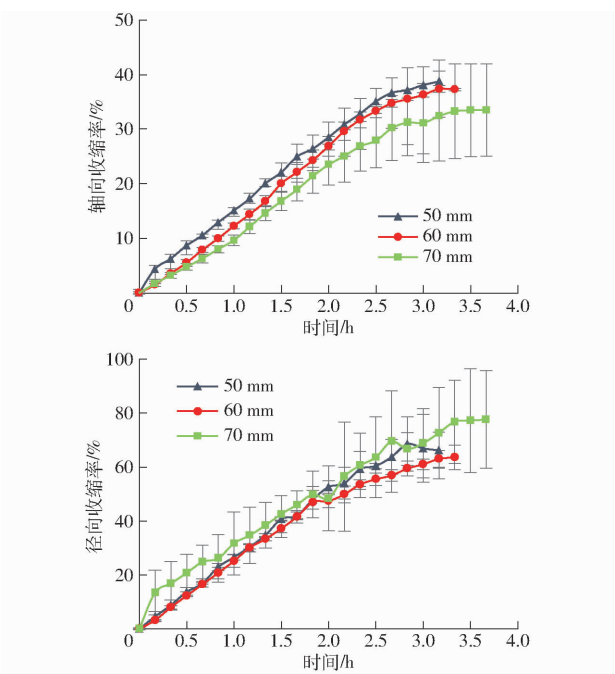


图 5 白萝卜长度对轴向和径向收缩率的影响
Fig.5 Effect of white radish length on axial and radial shrinkage

各向同性率是干燥过程中轴向收缩率与径向收缩率的比值,各向同性率越趋近于 100%,表示物料在干燥时收缩在轴向、径向上越平均。各向同性率在干燥过程初期不断增大,而后逐渐趋于稳定,表示干燥初期的收缩最不均匀,主要是直径方向上的收缩。如图 6 所示,长度为 50 mm 样品的各向同性率保持最好,从干燥初期后很快进入稳定阶段。长度为 70 mm 的物料,在干燥初期,干燥过程中各向同性率不稳定。

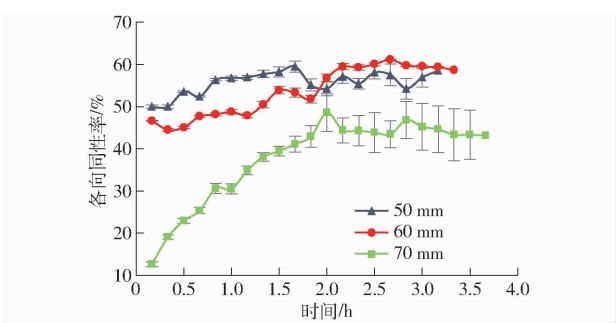


图 6 白萝卜长度对收缩各向同性率的影响
Fig.6 Effect of white radish length on shrinkage with isotropy

综上所述,样品长度在 60 mm 时,最终得到的直径方向上收缩率最小,各向同性率及长度收缩率均较优,故选择 60 mm 作为后续模拟和试验的样品长度。

3.1.2 收缩模型拟合

文献[22]总结分析了多种果蔬干燥过程的收缩模型,发现干燥过程中物料水分比的变化是产生收缩的主要因素;此外,干燥介质的相对湿度也会对收缩特性产生直接影响^[23]。将温度、介质相对湿度对物料收缩和含水率相关关系的影响分别与 4 种经验模型进行拟合^[24-26],各系数结果如表 3、4 所示。

表 3 不同温度下收缩模型参数及拟合程度

模型名称		温度 $T/^{\circ}\text{C}$	模型参数	决定系数 R^2	残差平方和
Hatamipour $S = k_1 + k_2 M_R$		55	$k_1 = -5.409 \quad k_2 = 5.495$	0.927 9	0.021 6
		65	$k_1 = 6.861 \quad k_2 = -6.811$	0.957 8	0.008 9
		75	$k_1 = 7.025 \quad k_2 = -6.977$	0.948 3	0.010 0
Quadratic $S = k_1 + k_2 M_R + k_3 M_R^2$		55	$k_1 = -24.37 \quad k_2 = 57.44 \quad k_3 = -33.03$	0.988 2	0.005 7
		65	$k_1 = -6.440 \quad k_2 = 18.85 \quad k_3 = -12.32$	0.961 2	0.031 8
		75	$k_1 = -21.57 \quad k_2 = 52.02 \quad k_3 = -30.41$	0.989 4	0.005 4
Vazquez $S = k_1 + k_2 M_R + k_3 M_R^{2/3} + k_4 \exp(k_5 M_R)$		55	$k_1 = -1.787 \quad k_2 = -7.747 \quad k_3 = 10.06$ $k_4 = -0.387 3 \quad k_5 = 20.98$	0.996 9	0.002 4
		65	$k_1 = -1.196 \quad k_2 = -6.582 \quad k_3 = 8.340$ $k_4 = -1.627 \times 10^{-8} \quad k_5 = 17.30$	0.995 6	0.004 7
		75	$k_1 = -3.273 \quad k_2 = -8.483 \quad k_3 = 12.47$ $k_4 = -3.242 \times 10^{-8} \quad k_5 = 16.90$	0.997 9	0.001 1
Exponential $S = k_1 \exp(k_2 M_R)$		55	$k_1 = 2.2 \times 10^6 \quad k_2 = -14.17$	0.794 4	0.061 7
		65	$k_1 = 1.8 \times 10^4 \quad k_2 = -11.56$	0.775 0	0.084 7
		75	$k_1 = 373.0 \quad k_2 = -7.458$	0.707 6	0.149 6

表 4 不同相对湿度下收缩模型参数及拟合程度

模型名称	相对湿度/%	模型参数	决定系数 R^2	残差平方和
Hatamipour $S = k_1 + k_2 M_R$	20	$k_1 = 6.861 \quad k_2 = -6.811$	0.957 8	0.008 9
	30	$k_1 = 6.869 \quad k_2 = -6.813$	0.954 3	0.011 1
	40	$k_1 = 6.848 \quad k_2 = -6.828$	0.978 2	0.005 0
Quadratic $S = k_1 + k_2 M_R + k_3 M_R^2$	20	$k_1 = -6.440 \quad k_2 = 18.85 \quad k_3 = -12.32$	0.961 2	0.031 8
	30	$k_1 = -2.053 \quad k_2 = 8.747 \quad k_3 = -6.560$	0.938 4	0.005 0
	40	$k_1 = -3.318 \quad k_2 = 11.60 \quad k_3 = -8.196$	0.940 3	0.075 3
Vazquez $S = k_1 + k_2 M_R + k_3 M_R^{2/3} + k_4 \exp(k_5 M_R)$	20	$k_1 = -1.196 \quad k_2 = -6.582 \quad k_3 = 8.340$ $k_4 = -1.627 \times 10^{-8} \quad k_5 = 17.30$	0.995 6	0.004 7
	30	$k_1 = -1.342 \quad k_2 = -6.814 \quad k_3 = 8.756$ $k_4 = -6.005 \times 10^{-8} \quad k_5 = 16.06$	0.997 0	0.004 2
	40	$k_1 = 0.694 6 \quad k_2 = -1.201 \quad k_3 = 1.107$ $k_4 = -1.942 \times 10^{-8} \quad k_5 = 17.26$	0.996 5	0.006 5
Exponential $S = k_1 \exp(k_2 M_R)$	20	$k_1 = 18\,000 \quad k_2 = -11.56$	0.775 0	0.084 7
	30	$k_1 = 1.926 \times 10^8 \quad k_2 = -21.17$	0.825 7	0.042 2
	40	$k_1 = 1.893 \times 10^{10} \quad k_2 = -26.09$	0.868 2	0.030 0

综合考虑表达式的决定系数和残差平方和，由于 Exponential 模型的拟合效果最差，Vazquez 模型拟合效果最优但模型最为复杂，Hatamipour 和 Quadratic 模型分别在不同温度和不同相对湿度条件下的拟合度较优，考虑到在数值模拟中的快速性和现实的实用性，最终选择 Hatamipour 模型来描述干燥过程中收缩率与含水率之间的线性关系。

3.2 干燥过程白萝卜内部传质分析

3.2.1 收缩对干燥过程中水分比变化的影响

为探究收缩对干燥过程中白萝卜水分比变化的作用关系，对几何整体进行体积积分后即可得到水分比-时间变化曲线，将其与试验值对比如图 7 所示。可以看出：模拟值与试验值规律相同，随着干燥过程的持续，水分比不断下降，但下降速率逐渐减缓，符合降速干燥过程的一般规律。与试验值相比，模拟结果的初始偏差在 14% 左右，随着干燥的进行结果偏差逐渐减至 3%，远小于未考虑收缩的 17%~8%。

对比水分比模拟值和实际值的偏差，可以发现：在前 100 min 内，无论考虑收缩与否，模拟结果的水分比均低于试验值，表明模拟过程中水分迁移较为容易，这可能是由于在试验的前中期，物料外部形成了浓度边界层，驱动水分扩散的浓度梯度较小，而模拟时未将此情况考虑在内。随着干燥进行，在干燥中后期未考虑收缩的模拟结果与试验值相比，其干燥速率比实际要小，相同干燥时间后，最终物料的干基含水率较试验值高。分析考虑收缩的模拟结果可知：干燥过程的水分比变化趋势与试验值存在偏差，这与建模时未考虑收缩后可能产生的运动通道及其迂曲度发生变化等现象有关；但由于考虑收缩后的

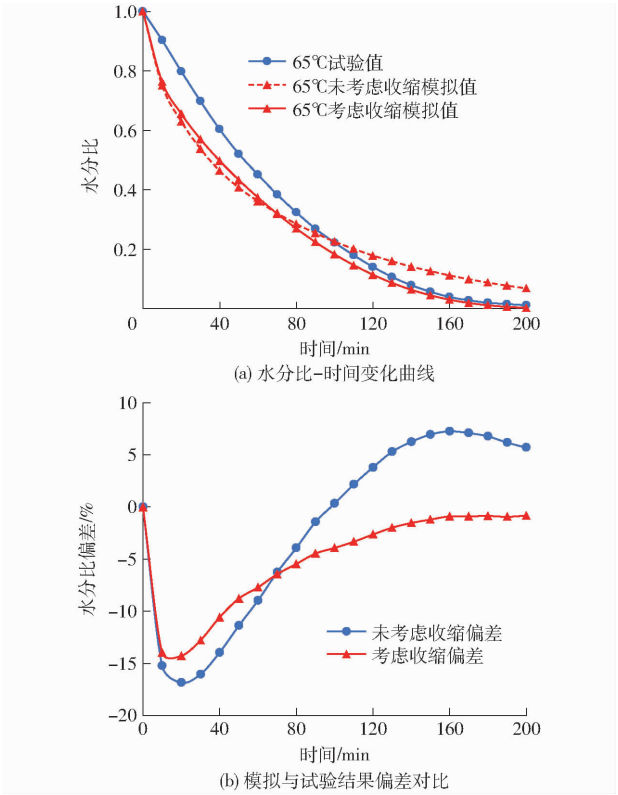


图 7 热风干燥水分比模拟值与试验值对比

Fig. 7 Comparison of simulated and experimental results of moisture content in hot-air drying

模型在模拟过程中计算了物料形态的变化，即收缩会促使物料固相骨架空间缩小并缩短水分扩散迁移的路径，因此中后期干燥速率大于未考虑收缩的模拟值，从而印证了收缩对物料在干燥过程中的水分扩散迁移具有促进作用^[7]。因此在干燥模拟过程中考虑收缩后计算结果更加贴近试验值，说明考虑收缩的模型可以更为准确地分析干燥过程中的质量传递。

3.2.2 收缩对物料截面水分分布的影响

监测干燥过程中不同时间点物料内部水分分布的规律,可以更加直观地分析物料收缩对干燥过程中质量传递规律的影响。图 8 是在未考虑收缩和考虑收缩两种情况下进行数值模拟得出的,在干燥 20、60、120、200 min 时的物料内部的水分分布图,其中白色箭头的方向表征水分梯度方向,箭头大小表征水分梯度大小。结果表明:未考虑收缩时,在干燥开始的 20 min,物料内部干基含水率为 19.3 g/g,远大于表面处干基含水率 6.45 g/g;随着干燥时间的进行物料内部的水分不断向外迁移,由于物料表层水分在外部对流作用下快速蒸发,因此表层处水分梯度相对较大;在干燥至 200 min 时,物料内部干基含水率最高为 2.29 g/g,显著高于表面的 0.31 g/g,说明物料内部的水分依然存在很大的梯度。

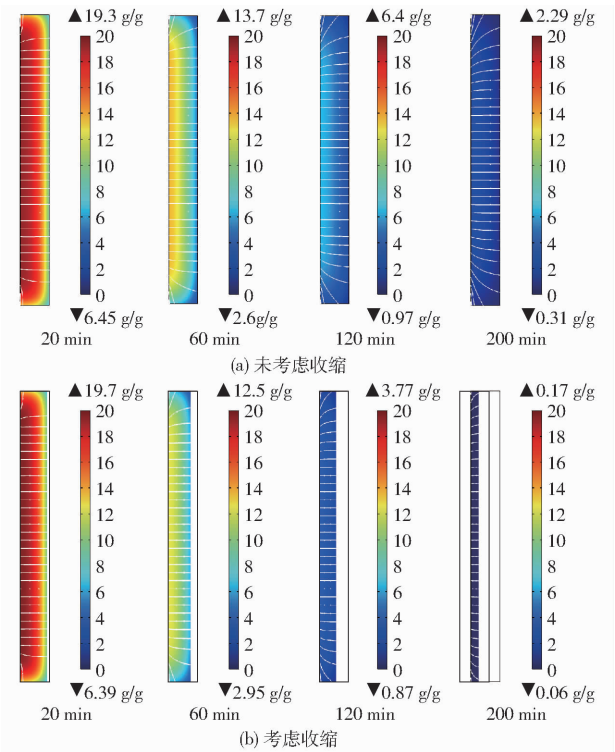


图 8 不考虑收缩和考虑收缩条件下不同时间点白萝卜水分分布图

Fig.8 Moisture distribution of white radish at different time points without considering shrinkage or considering shrinkage

考虑收缩时,物料内部横截面含水率分布如图 8b 所示,黑色边框为物料的原始边界,干燥初期与终了时物料内外部干基含水率分别为 19.7 g/g 与 6.39 g/g、0.17 g/g 与 0.06 g/g。将两种情况对比可知,内部截面的水分变化规律与未考虑收缩情况下类似,干燥过程中和终了都有一定的水分梯度,但考虑收缩的情况下物料表层水分梯度降低;同时在任意相同时刻,考虑物料收缩情况下物料的整体含

水率更低,表明物料内部的水分迁移更为容易。出现上述两种现象一方面是因为物料的形态收缩导致水分的传递路径缩短所致,另一方面是由于物料收缩后孔隙减小产生的压力对于水分传递有促进作用^[27]。综上所述,物料在热风干燥过程中的收缩效应不可忽略,考虑收缩的数值模拟模型将可以更为准确地阐述质量传递过程。

3.3 干燥过程白萝卜内部传热分析

3.3.1 收缩对干燥过程中温度变化的影响

利用体积积分法计算数值模拟过程中物料的温度,并与试验结果对比后得出温度-时间曲线,如图 9 所示。在未考虑收缩的情况下,物料内部温度在 20 min 内迅速升高至 42℃,随后以稳定的升温速率上升至 60℃左右的平衡温度;而在考虑收缩的数值模拟中,物料温度在干燥的前 20 min 仅上升至 30℃左右,较未考虑收缩时低,随后物料温度缓慢上升,在干燥中后期,温度升高的速度先增大后减慢,考虑收缩与否对物料在干燥过程中温度的变化具有较为明显的影响。图 9b 中对比了考虑收缩前后的模拟值和试验值的偏差,偏差曲线表明考虑收缩时的温度曲线与传感器所得曲线误差较小,说明考虑收缩的模型可以更为准确地分析干燥过程中的热量传递。

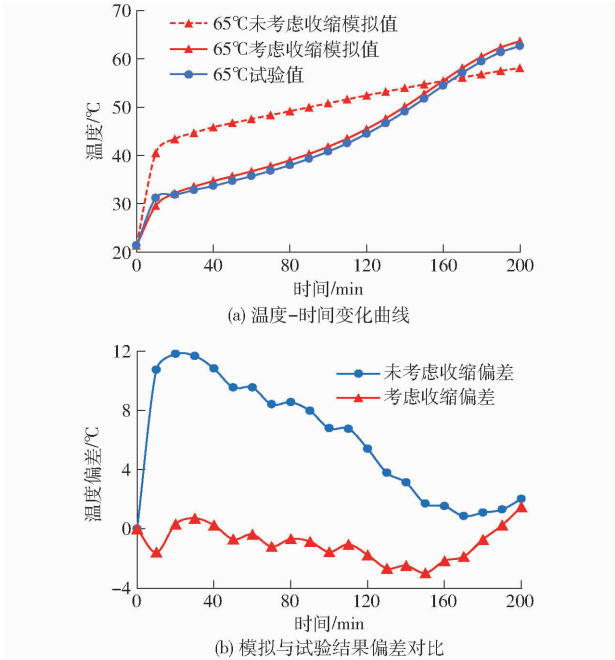


图 9 热风干燥温度模拟值与试验值对比

Fig.9 Comparison of simulated and experimental values of temperature in hot-air drying

结合内部传质模拟结果分析,持续的水分迁移蒸发使得物料中含水率在干燥中期快速下降,温度上升速率有所增加,这一现象的出现除了由于单位时间内蒸发潜热随含水率和干燥速率的降低而降低

外,另一重要因素在于物料体积缩小后缩短了热量的传递路径,使得物料导热性能提升。当达到与外部热风温度相近的温度时,物料温度与外部温度梯度减小,此时物料的温升速度随之放缓后达到平衡。对比数值模型时考虑收缩与否对热量传递规律的影响可知:考虑收缩时,在干燥前中期物料内部更多的水分迁移蒸发带走了更多的热量,导致内部温度较未考虑收缩时显著降低;到干燥后期,物料内部相对较低的含水率不仅使得蒸发潜热降低,还进一步减小热量传导阻力,因此相比于未考虑收缩时的模拟结果,物料具有较高的升温速率,最终温度较高,说明考虑收缩时会在干燥过程中对物料温度产生双重作用。比较模拟温度与试验值之间的偏差,如图 9 所示,可以发现未考虑收缩温度偏差最大可达 12℃ 左右后期降至 2℃,而考虑收缩温度偏差为 2~3℃,证实考虑收缩后的数值模型具有更高的精度。

3.3.2 收缩对物料截面温度分布的影响

为进一步分析收缩对白萝卜热风干燥过程中热量传递规律的影响,图 10 在相同的时间点对比了未考虑收缩和考虑收缩时白萝卜的温度分布情况。当

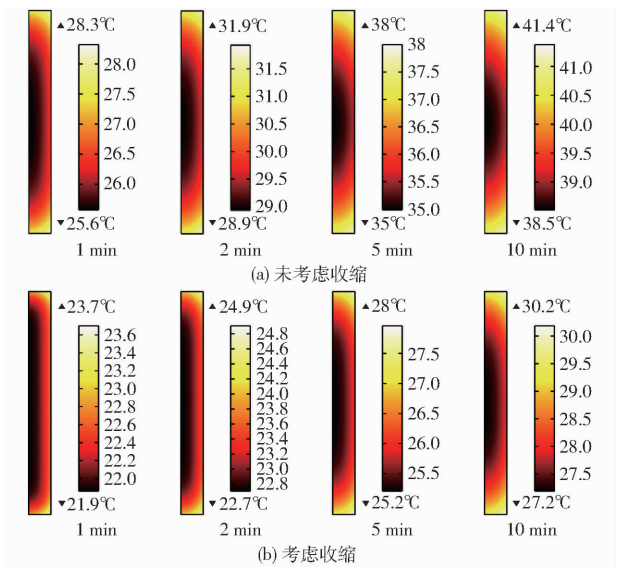


图 10 未考虑收缩和考虑收缩条件下不同时间点白萝卜温度分布图

Fig. 10 Temperature distribution of white radish at different time points without considering shrinkage or considering shrinkage

物料与热风充分换热后其内部温度进入热平衡阶段,因此选取温度梯度较为明显的前 10 min 进行分析。在开始的 5 min 内,物料的边缘处温度最高,中心处温度最低;但由于物料边界 2 位置与热风对流热质传递通量较大,水分蒸发速率最快,因此温度低于边界 1 和 3。在干燥进行至 10 min 时,物料内部的温度已基本无差异,仅在边角处温度较高。由于干燥前期收缩现象不明显,因此 10 min 内两种数值模型所得出的温度变化趋势类似,但考虑收缩后,白萝卜整体温度较低,这一结果与前述规律相符。

4 结论

(1)以热风干燥容易收缩的白萝卜为研究对象,通过试验得出当物料长径比为 10 时收缩具有最优的各向同性率,同时 Hatamipour 经验方程可准确描述收缩与水分比之间的关系。将长 60 mm、半径为 6 mm 的白萝卜作为进一步研究的基础,根据该尺寸建立几何模型,基于傅里叶导热定律及 Fick 第二定律建立热质传递方程,与收缩方程耦合后利用 COMSOL 的动网格技术即可进行多物理场数值模拟计算。

(2)对比分析可知,在干燥前中期模拟结果的干燥速率均大于试验值,且不考虑收缩时更大;但中后期不考虑收缩的模拟干燥速率明显低于试验值和考虑收缩的模拟结果,原因在于干燥前中期物料收缩不明显,干燥过程主要受温度影响,干燥中后期物料在收缩后孔隙减小产生的压力及水分迁移路径缩短的双重作用引起了水分迁移速率的改变。与之对应的,考虑收缩时干燥前中期含水率更低、水分迁移速度更快、蒸发潜热更大,因此干燥前中期物料温度较低;但中后期受较低含水率和物料体积收缩的影响,升温速率有所提高,因此终了温度更高。

(3)将物料的收缩过程考虑进物料干燥过程的模拟中,模拟结果与试验数据对比温度偏差为 2~3℃,干燥初期含水率偏差 14%,中后期降至 2%~3%,与不考虑收缩的数值模拟结果相比具有更高的计算精度,表明基于动网格的数值模拟技术可以更好地预测农产品干燥过程中内部热质分布和变化规律。

参 考 文 献

[1] 李昌宝,孙健,辛明,等. 番木瓜热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 轻工科技, 2018, 34(2): 1-4.
LI Changbao, SUN Jian, XIN Ming, et al. Study of heat pump drying characteristics and mathematical model of papaya[J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(2): 1-4. (in Chinese)
[2] 高蔓,刘欣悦,刘静静,等. 青萝卜护绿与热泵干燥动力学研究[J]. 农产品加工, 2019(3): 25-29.
GAO Man, LIU Xinyue, LIU Jingjing, et al. Study on green-protecting and the dynamics of green radish drying by heat pump[J]. Farm Products Processing, 2019(3): 25-29. (in Chinese)
[3] 余洋洋,唐道邦,温靖,等. 热泵温度对白萝卜干燥速率及品质的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 211-214.
YU Yangyang, TANG Daobang, WEN Jin, et al. Effect of different heat pump temperatures on drying rate and quality of white

- radish[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 211–214. (in Chinese)
- [4] 张中涛,王远成,亓伟,等. 粮仓内水分和温度变化的数值模拟分析[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(6): 106–109. ZHANG Zhongtao, WANG Yuancheng, QI Wei, et al. Numerical simulation analysis of moisture and temperature in grain silo[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(6): 106–109. (in Chinese)
- [5] 王俊,张京平,许乃章. 干燥中果蔬内部质热传递的数值模拟[J]. 生物数学学报, 1998(3): 3–5. WANG Jun, ZHANG Jingping, XU Naizhang. Numerical study on the heat and mass transfer in fruit and vegetable during drying[J]. Journal of Biomathematics, 1998(3): 3–5. (in Chinese)
- [6] 李星仪,张悦,谢永康,等. 热风干燥过程相对湿度对香菇品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 281–291. LI Xingyi, ZHANG Yue, XIE Yongkang, et al. Effects of relative humidity on the exterior quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) during hot air drying[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(24): 281–291. (in Chinese)
- [7] LOPEZ I I R, ALVARADO M A G. Analytical solution for food-drying kinetics considering shrinkage and variable diffusivity[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 208–216.
- [8] BAIK O D, MITTAL G S. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying[J]. Food Research International, 2005, 38(2): 183–191.
- [9] ESMAILI M, REZAZADEH G, GHAREBAGH R S, et al. Modeling of the seedless grape drying process using the generalized differential quadrature method[J]. Chemical Engineering and Technology, 2007, 30(2): 168–175.
- [10] 姜大龙,王文杰,王善钰,等. 红外联合热风干燥白萝卜片的耦合建模与热质传递分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 314–323. JIANG Dalong, WANG Wenjie, WANG Shanyu, et al. Coupled modeling and heat and mass transfer analysis of white radish slices dried by infrared radiation combined hot air drying[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 314–323. (in Chinese)
- [11] ZHENG Z M, YANG W M, YU P, et al. Simulating growth of ash deposit in boiler heat exchanger tube based on CFD dynamic mesh technique[J]. Fuel, 2020, 259: 116083.
- [12] 马青. 冻干保存中相变传热过程的数值仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018. MA Qing. Simulation of the phase change heat transfer during freeze drying[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [13] APRAJEETA J, GOPIRAJAH R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 119–128.
- [14] BOUKOUVALAS C J, KROKIADA M K, MAROULIS Z B, et al. Effect of material moisture content and temperature on the true density of foods[J]. International Journal of Food Properties, 2006, 9(1): 109–125.
- [15] 徐英英,刘欣,袁越锦,等. 果蔬多孔介质干燥传热传质过程的孔道网络模拟及试验[J]. 陕西科技大学学报, 2017, 35(6): 135–139. XU Yingying, LIU Xin, YUAN Yuejin, et al. Pore network study of heat and mass transfer process for drying of fruit and vegetable porous media[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2017, 35(6): 135–139. (in Chinese)
- [16] 兰维娟. 果蔬导热系数的测定及山药内部温度场研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2006. LAN Weijuan. Determination of the thermal conductivity of fruits and vegetables and study of the internal temperature field of yam[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2006. (in Chinese)
- [17] AGRAWAL S G, METHEKAR R N. Mathematical model for heat and mass transfer during convective drying of pumpkin[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 101: 68–73.
- [18] WEI S, WANG Z, XIE W, et al. A heat and mass transfer model based on multi-component heterogeneity for corn kernel tempering drying: development and application[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2020, 171: 105335.
- [19] 任广跃,张伟,张乐道,等. 多孔介质常压冷冻干燥质热耦合传递数值模拟[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 214–220. REN Guangyue, ZHANG Wei, ZHANG Ledao, et al. Numerical simulation of mass and heat transfer of porous media during atmospheric freeze drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 214–220. (in Chinese)
- [20] WANG C, WANG S, XU J, et al. Analytical solution for the heat and mass transfer of spherical grains during drying[J]. Biosystems Engineering, 2021, 212: 399–412.
- [21] 申洁,叶峰,李永杰,等. 传热与传质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 29–45.
- [22] MAYOR L, SERENO A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 373–386.
- [23] 巨浩羽,肖红伟,郑霞,等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296–304. JU Haoyu, XIAO Hongwei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 296–304. (in Chinese)
- [24] 许冰洋,朱文魁,潘广乐,等. 基于收缩特性分析的叶丝快速对流干燥动力学模型[J]. 烟草科技, 2015, 48(9): 69–74. XU Bingyang, ZHU Wenkui, PAN Guangle, et al. Kinetic model for rapid convective drying of cut strips based on shrinkage property analysis[J]. Tobacco Science & Technology, 2015, 48(9): 69–74. (in Chinese)
- [25] 陈良元,韩李锋,李旭,等. 茄子片热风干燥收缩特性及其修正的湿分扩散动力学模型[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 275–281. CHEN Liangyuan, HAN Lifeng, LI Xu, et al. Structural shrinkage characteristics and modified moisture diffusion kinetics model of sliced eggplant dried by hot air[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 275–281. (in Chinese)
- [26] 韦玉龙,于宁,陈恺,等. 热风干制对红枣收缩特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22): 114–118. WEI Yulong, YU Ning, CHEN Kai, et al. Effect of hot air dried on shrinkage characteristics of jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(22): 114–118. (in Chinese)
- [27] 谢静,高振江. 基于温湿度控制的热风干燥技术对果蔬物料干燥适应性研究[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2019, 31(1): 37–48. XIE Jing, GAO Zhenjiang. Study on the adaptability of hot air drying technology based on temperature and humidity control for drying fruit and vegetable materials[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2019, 31(1): 37–48. (in Chinese)