

# 火龙果热泵干燥数值模拟及试验

## Numerical simulation and experimental study of pitaya during heat pump drying

韩隽丛 金听祥 张振亚

HAN Lu-cong JIN Ting-xiang ZHANG Zhen-ya

(郑州轻工业大学能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of

Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**摘要:**目的:提高火龙果干制品的品质。方法:基于多孔介质理论和菲克定律,建立火龙果传热传质与固体力学多物理场耦合的数学模型,并研究火龙果在热泵干燥过程中的温度与含水率的变化规律。结果:考虑体积收缩的模型计算精度更高,达到干燥标准时,模拟值与试验值的最大相对误差为 9.2%。火龙果片在干燥初期温度分布由表面向中心逐渐降低,后期达到平衡,而水分分布呈相反趋势。火龙果片在热泵干燥过程中的温度、湿度梯度力是导致其收缩变形的主要因素。不同干燥温度和切片厚度下火龙果片的干基含水率的计算值与试验值变化趋势一致,相对误差均 < 10%,证明了模型的准确性。结论:试验建立的多物理场耦合的数学模型能够准确模拟火龙果热泵干燥过程。

**关键词:**火龙果;热泵干燥;传热传质;收缩变形;多物理场耦合

**Abstract: Objective:** To improve the quality of dried pitaya products. **Methods:** Based on the porous medium theory and Fick's law, a mathematical model of the coupling of heat and mass transfer of pitaya fruit with multiple physical fields of solid mechanics was established, and the variation of temperature and moisture content of pitaya fruit during the heat pump drying process was studied. **Results:** The calculation accuracy of the model considering volume shrinkage was higher. The maximum relative error between the calculated value and the test value was 9.2% after reaching the drying standard. The temperature

distribution of pitaya slices decreased gradually from the surface to the center in the early stage of drying, and achieved a balance later, while the water distribution showed an opposite trend. The temperature and humidity gradient forces in the heat pump drying process were the main factors leading to the shrinkage deformation of pitaya slices. The calculated values of dry base moisture content of pitaya slices under different drying temperature and slice thickness were consistent with the experimental values, and the relative errors were all less than 10%, which proved the accuracy of the model. **Conclusion:** The mathematical model established by the experiment can accurately simulate the heat pump drying process of Pitaya.

**Keywords:** pitaya; heat pump drying; heat and mass transfer; shrinkage deformation; multi-physics coupling

干燥是一种常见的水果加工方法,通过降低食品中的水分含量来限制微生物活性,从而延长其保鲜期。热泵干燥温度较低,可以较好地维持干制品品质,是果蔬加工的常用方法<sup>[1]</sup>。但是热泵干燥存在干燥时间长、效率低等问题<sup>[2]</sup>,因此通过优化干燥工艺来缩短干燥时间成为了热泵干燥领域的热点问题。

火龙果是一种多孔介质<sup>[3-4]</sup>。干燥过程中,温度场、流场和湿度场的交互作用复杂,采用多物理场耦合与多孔介质理论结合的方法对火龙果热泵干燥过程中的温度与湿度变化进行数值模拟,可以优化干燥工艺参数,降低能耗<sup>[5-6]</sup>。目前国内外学者已对多孔介质的热质传递过程进行了广泛研究。王康<sup>[7]</sup>研究了玉米微波干燥的热质传递过程,分析了含水率、干燥温度和玉米尺寸对玉米水分浓度及干燥温度的影响,并验证了模型的可靠性。Zhu 等<sup>[8]</sup>建立了食品对流干燥的热-水-机械双向耦合多相多孔介质模型,该模型所计算的含水率与试验结果更吻合,蒸发速率峰值相对偏差为 29.5%。张大鹏等<sup>[9]</sup>模拟

**基金项目:**河南省研究生教育创新培养基地项目(编号:YJS2021JD05);河南省科技攻关项目(编号:222102320075);郑州轻工业大学博士科研基金(编号:2020BSJJ082)

**作者简介:**韩隽丛,男,郑州轻工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**金听祥(1976—),男,郑州轻工业大学教授,博士。

E-mail: txjin@126.com

**收稿日期:**2022-08-31 **改回日期:**2022-12-07

研究了苹果的热风干燥过程,发现送风温度越高,干燥时间越短,温度不均匀度和含水率不均匀度随送风温度的增加而增加,且两者呈一次函数关系,最佳送风温度为 50 ℃。Azhdari 等<sup>[10]</sup>研究了番茄干燥过程中的热量和水分迁移规律,提出了隐式-显式(IMEX)方法,并对其收敛性进行了数值模拟研究,发现具有收缩效应的模型干燥时间更短。秦基伟等<sup>[11]</sup>研究了烟叶在复烤过程中的收缩机制,复烤过程中热应力远小于水分应力,且干燥 3 min 左右应力最大,水分含量对烟叶干燥收缩变形影响最明显。

目前,有关火龙果热泵干燥过程中热质传递规律的研究较少。研究拟以火龙果为研究对象,以多孔介质传热传质理论为基础,建立火龙果热质传递的三维多物理场耦合的数学模型,并对模型进行实验验证。运用 COMSOL Multiphysics 对其干燥过程中的水分含量和温度梯度进行模拟计算,结合固体力学模块得出相应的体积变化规律并体现在温度、湿度分布图中,以期掌握火龙果在热泵干燥过程中的温度、湿分和体积变化规律,为提高火龙果干制品的品质提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

白心火龙果:市售;

空气能热泵箱式一体节能烘干机:CG-05HA 型,广东创陆制冷科技有限公司;

快速水分仪:FBS-750A 型,厦门弗布斯检测设备有限公司;

水果切片机:139 型,广州恒纳餐饮有限公司;

精密电子天平:ES500 型,天津市德安特传感技术有限公司;

数显游标卡尺:91514 型;上海世达工具有限公司。

### 1.2 试验方法

将火龙果于 4~8 ℃ 冷藏。试验前取出并恢复到室温。将火龙果清洗后去皮,切成边长为 50 mm,厚度分别为 8,9,10 mm 的薄片。取 4 片为一组,擦去表面水分后称重并测量火龙果鲜果水分含量。将参数设置为干燥温度 60 ℃,切片厚度分别为 8,9,10 mm;切片厚度为 9 mm 时,干燥温度分别为 50,60,70 ℃;风速 2 m/s,相对湿度 20%,每隔 1 h 取样测量,并干燥至恒重。

## 2 干燥模型

### 2.1 物理模型

由于火龙果籽与火龙果果肉内部结构差异大,影响火龙果热质传递过程的计算精度,因此合理简化火龙果的物理模型,该模型不考虑火龙果籽对干燥过程的影响。根据火龙果片的实际大小,物理模型设为长 50 mm,宽 50 mm,厚 9 mm 的长方体(见图 1)。

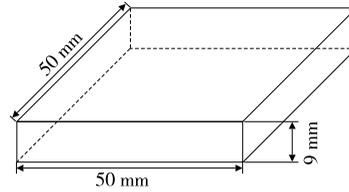


图 1 火龙果几何模型

Figure 1 Geometric model of pitaya

### 2.2 控制方程

火龙果(多孔介质)的热泵干燥过程是一个多物理场问题。干燥过程中,热风吹过火龙果表面,对流传热使其温度升高,湿分通过内部孔隙蒸发变为水蒸气,水蒸气由于对流和扩散被周围的热空气带走,使得火龙果含水率逐渐降低。同时,火龙果在干燥过程中受到水分应力和热应力的影响收缩明显,导致孔隙结构发生变化。因此,将热质传递和收缩相结合,建立火龙果热泵干燥的多物理场耦合数学模型,并做以下假设。

(1) 火龙果为多孔介质,其孔隙中均匀分布着固相、液相和气相(液态水、空气和水蒸气)。

(2) 火龙果的初始温度和湿分呈均匀分布,其内部不存在温度和湿度梯度。

(3) 水分子仅以蒸发扩散一种形式离开火龙果切片。

(4) 火龙果在干燥过程中物性参数保持不变。

(5) 忽略火龙果籽对传热传质过程的影响。

此模型中,基于能量守恒定律和傅里叶导热定律,得到火龙果的传热方程<sup>[12]</sup>:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = 0, \quad (1)$$

$$q = -\lambda \nabla T - h_{fg} k_c (c_b - c), \quad (2)$$

式中:

$\rho$ ——火龙果的等效密度, kg/m<sup>3</sup>;

$c_p$ ——火龙果的恒压比热容, J/(kg · K);

$T$ ——火龙果切片的内部温度, K;

$t$ ——时间, s;

$u$ ——速度, m/s;

$\lambda$ ——火龙果的导热系数, W/(m · K);

$h_{fg}$ ——水的蒸发潜热, J/mol;

$k_c$ ——火龙果的传质系数, m/s;

$c_b$ ——空气的水分浓度, mol/m<sup>3</sup>;

$c$ ——火龙果任意时刻的水分浓度, mol/m<sup>3</sup>。

基于 Fick 定律,得到火龙果的传质方程<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_{eff} \nabla c) = 0, \quad (3)$$

式中:

$c_0$ ——火龙果初始水分浓度, mol/m<sup>3</sup>。

火龙果作为一种弹性材料,因此可以用平衡微分、几何和本构方程描述收缩过程,平衡微分方程为<sup>[8]</sup>:

$$\rho \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \nabla \cdot S + Fv. \quad (4)$$

几何方程描述了弹性体中任意点的应变和位移之间的关系,压力为<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u]. \quad (5)$$

本构方程说明了弹性体中任意点的总应力和总应变之间的关系,表达式为<sup>[14]</sup>:

$$C = C(E, \nu). \quad (6)$$

其中,本构张量  $C$  是弹性模量和泊松比的函数。

传热、传质与应力—应变耦合方程为<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_{th} = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

$$\epsilon_{hs} = \beta(c_w - c_{w,0}), \quad (8)$$

$$\epsilon = \epsilon_{hs} + \epsilon_{th}, \quad (9)$$

式中:

$\alpha, \beta$ ——热膨胀系数和吸湿膨胀系数;

$\epsilon_{hs}, \epsilon_{th}$ ——热应变和湿应变。

### 2.3 初始和边界条件

初始含水率  $c_0$  为 82%, 初始温度  $T_0$  为 20 °C, 风速为 2 m/s, 温度为试验设置温度。热边界和质量边界条件为<sup>[15]</sup>:

$$-(k \nabla T) = h_T(T_{air} - T_\infty) + h_m \rho (M - M_e) h_{fg}, \quad (10)$$

$$(-D_i \nabla c) = h_m (c_b - c), \quad (11)$$

式中:

$h_T$ ——传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$M$ ——干基含水率,  $g/g$ ;

$M_e$ ——平衡含水率,  $g/g$ ;

$T_{air}$ ——干燥空气温度, °C;

$h_m$ ——传质系数,  $m/s$ 。

底部边界处的传热和传质边界条件分别为:

$$-(k \nabla T) = 0, \quad (12)$$

$$(-D_i \nabla c) = 0. \quad (13)$$

### 2.4 模型中参数的确定

对流传热系数和传质系数为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{hl}{\lambda_a} = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} = 0.664 \left( \frac{\rho_a u_a l}{\mu_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\nu_a}{\alpha} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (14)$$

式中:

$h$ ——对流传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$\lambda_a$ ——干燥空气的导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;

$l$ ——特征长度,  $m$ ;

$Re$ ——雷诺数;

$Pr$ ——Prandtl 数;

$u_a$ ——热风速度,  $m/s$ ;

$\rho_a$ ——热空气密度,  $kg/m^3$ ;

$\nu_a$ ——动力黏度,  $m^2/s$ ;

$\mu_a$ ——热空气的动态黏度,  $Pa \cdot s$ ;

$\alpha$ ——热空气的热扩散率,  $m^2/s$ 。

$$\frac{h_m l}{D_{AB}} = 0.0664 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} = 0.0664 \left( \frac{\rho_a u_a l}{\mu_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\nu_a}{D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (15)$$

式中:

$D_{AB}$ ——空气中的蒸汽扩散系数,  $m^2/s$ ;

$Sc$ ——施密特数。

当含水饱和度降低且气相占据更多孔隙空间时,分子扩散(在气相中)变得更加重要,毛细扩散率  $D_w$  为<sup>[17]</sup>:

$$D_w = 10^{-8} \exp(-2.8 + 2M). \quad (16)$$

模型中常用参数见表 1。

表 1 模型中的常用参数

Table 1 Common parameters in the model

名称	符号	单位	数值
热空气温度	$T_{air}$	°C	根据干燥环境设置
初始温度	$T_0$	°C	20
火龙果密度	$\rho$	$kg/m^3$	1 176
水分子量	$M_{H_2O}$	$kg/mol$	0.018
初始水分浓度	$c_0$	$mol/m^3$	0.82
空气水分浓度	$c_b$	$mol/m^3$	0.83
比容水度	$c_m$		0.85
传热系数	$h_T$	$W/(m^2 \cdot K)$	25
弹性模量	$E$	Pa	2.236E-05
对流扩散系数	$D_{eff}$	$m^2/s$	根据不同干燥条件拟合得出
空气扩散系数	$D_a$	$J/kg$	3.02E-05
导热系数	$\lambda$	$W/(m \cdot K)$	根据不同干燥条件使用导热系数仪测得
比热	$c_p$	$J/(kg \cdot K)$	根据不同干燥条件使用差示扫描量热仪测得

### 2.5 模拟计算

采用 COMSOL Multiphysics 求解数学模型。采用固体传热、稀物质传递和固体力学模块求解传热传质方程。以干燥温度 60 °C, 切片厚度 9 mm, 相对湿度 20% 为例, 将总模拟时间设置为该工况下达到干燥标准所需时间 1 500 min, 时间步长 5 s。三角形网格用于离散计算域, 最小单元质量为 0.273 3, 共 5 672 个单元体(见图 2)。

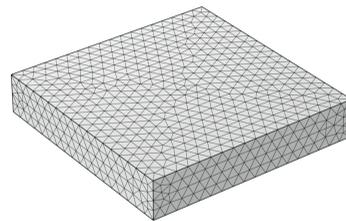


图 2 火龙果模型网格图

Figure 2 Grid diagram of pitaya model

### 3 结果与讨论

#### 3.1 火龙果热泵干燥过程中的收缩变形

由图 3(a)可知,不考虑收缩变形时火龙果干基含水率下降缓慢,干燥 1 500 min 后该模型计算的干基含水率仍下降,表示干燥未结束,计算值相比于试验值的误差超过 100%。火龙果在干燥初期出现明显收缩,主要是因为火

龙果的水分含量在干燥初期迅速变化,从而在其内部形成较大的水分梯度,产生较大的水分应力<sup>[16]</sup>。该应力导致火龙果片表面发生收缩变形,影响水分迁移速率。由图 3(b)可知,火龙果收缩变形的干基含水率计算值与试验值变化趋势一致,误差为 9.2%。故使用考虑了火龙果收缩变形的数学模型进行干燥过程中的干燥特性分析。

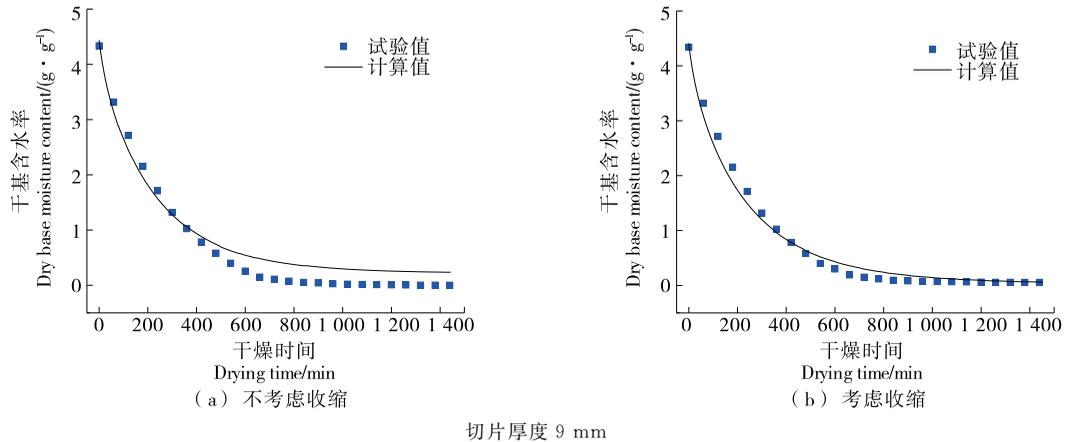


图 3 60 °C 火龙果片的干基含水率

Figure 3 Dry basis moisture content of pitaya slices at 60 °C

#### 3.2 实验验证

由图 4 可知,当干燥温度为 50,70 °C 时,达到干燥标准的时间分别为 1 680,1 200 min,干燥速率随干燥温度的升高而加快。计算所得干基含水率的变化趋势与试验结果一致,达到干燥标准后模拟值相对于试验值的绝对误差分别为 8.0%,9.8%。因此,此模型可以准确描述火龙果的热泵干燥过程。

试验值的绝对误差分别为 8.5%,10.0%,故该数学模型可以准确预测火龙果含水量的变化趋势。

#### 3.3 火龙果热泵干燥过程中温、湿度场分析

由图 6 可知,干燥初期,热空气中的热量通过对流热传递给火龙果,火龙果切片表面温度逐渐升高,且其表面升温速率大于中心升温速率<sup>[18]</sup>。干燥中期,热空气传递的热量通过热传导进入火龙果切片内部,中心区域温度逐渐升高。此外,随着干燥的进行,火龙果内部水分含量逐渐降低,火龙果整体蒸发速率逐渐下降。干燥后期,火龙果片整体温度趋于稳定,1 500 min 后温度变化范围为 333.08~332.94 K。

由图 5 可知,当切片厚度为 8,10 mm 时,火龙果片的干基含水率达到恒定时所需时间分别为 1 320,1 500 min,干燥时间随切片厚度的增大而增大。计算值与试验值变化趋势一致,达到干燥标准后模拟值相对于

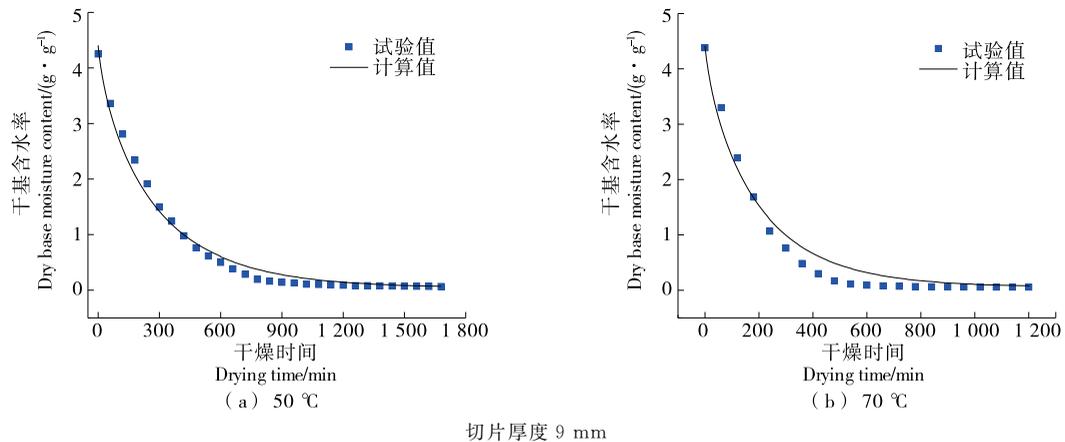
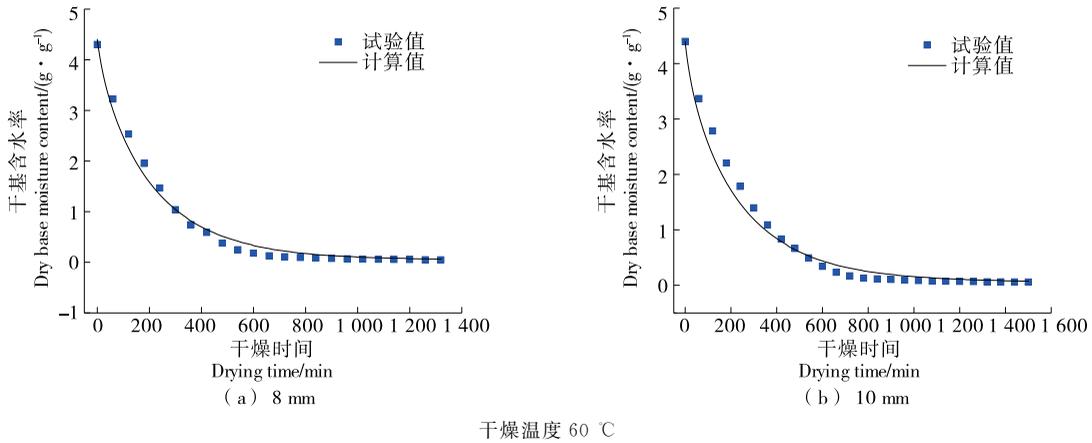


图 4 不同干燥温度下火龙果干基含水率曲线

Figure 4 Drying characteristics of pitaya at different drying temperatures



干燥温度 60 °C  
图 5 不同切片厚度下火龙果干基含水率曲线  
Figure 5 Drying characteristics of pitaya at different slice thickness

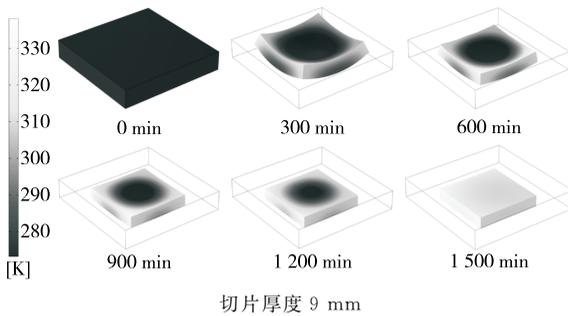


图 6 60 °C 时对流干燥过程中火龙果温度分布图  
Figure 6 Temperature distribution of pitaya in the process of convection drying at 60 °C

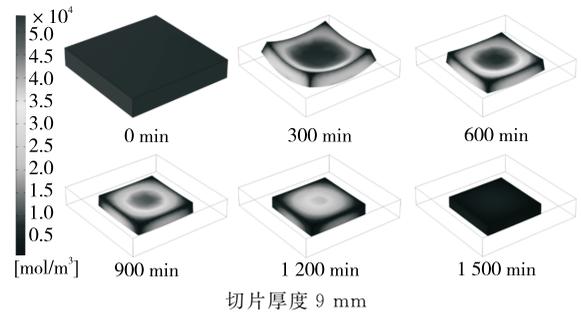


图 7 60 °C 时对流干燥过程中火龙果湿度分布图  
Figure 7 Humidity distribution of pitaya during convection drying at 60 °C

由图 7 可知,火龙果片水分含量由中心到表面逐渐下降,与温度分布相反,可能是干燥初期,火龙果的质量传递过程主要发生在表面,表面水分含量降低;随着干燥的进行,切片中心的水分在扩散作用下向外迁移,中心区域的水分含量缓慢下降。干燥 1 500 min 后,火龙果片含水量稳定在  $1.64 \times 10^3 \sim 1.67 \times 10^3 \text{ mol/m}^3$ ,与 Villa-Corrales 等<sup>[19]</sup>的研究一致。

### 3.4 火龙果热泵干燥过程中的体积收缩

由图 8 可知,火龙果片在横向方向上的变形比厚度方向上的更显著。干燥初期(0~300 min),火龙果片收缩明显,主要是因为干燥初期火龙果切片和外界的温、湿度差均为最大值,在温度、湿度梯度力的作用下水分从火龙果表面快速蒸发,火龙果由表面向中心迅速收缩。干燥中期(300~900 min),火龙果的收缩显著减缓。一方面,火龙果切片与外界的温度、湿度梯度力逐渐下降;另一方面,水分含量的降低增加了火龙果的机械强度,从而阻碍了收缩。干燥后期(900~1 500 min),火龙果切片的体积几乎不变,表明其内部水分梯度和应力几乎为零,火龙果的水分含量已达最低值,其收缩率几乎保持不变。因此

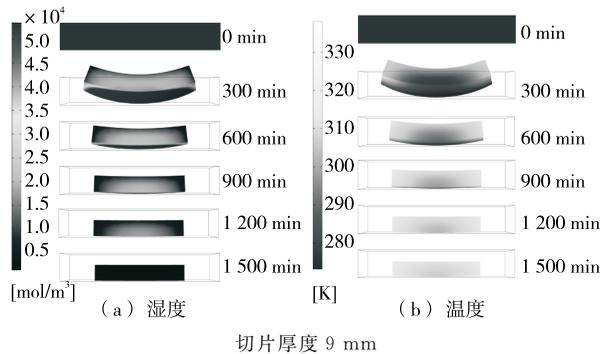


图 8 60 °C 时对流干燥过程中火龙果内部温度、湿度的二维分布图

Figure 8 The shrinkage ratio of pitaya during convection drying at 60 °C

火龙果片在热泵干燥过程中温度、湿度梯度力是导致其干燥收缩变形的主要因素,与 Shi 等<sup>[20]</sup>的结论一致。

## 4 结论

考虑了固体基质运动对食品收缩过程中传热传质的影响,采用固体传热、稀物质传递与固体力学多物理场耦合的方法,建立了火龙果热泵干燥热—质—机械耦合的多相多孔

介质模型,并对火龙果热泵干燥过程的含水率变化和体积收缩进行了模拟分析。结果表明,热泵干燥过程中,火龙果片发生非线性收缩,而收缩过程对果片内部含水量的变化影响较大。干燥初期火龙果片表面温度较高,干燥后期中心与表面温度达到平衡;干燥初期表面水分含量较低,干燥后期果片内的水分分布逐渐稳定。火龙果片在干燥前期收缩剧烈,中期收缩减慢,后期收缩率保持不变,在横向方向的变形比厚度方向上更为显著。综上,火龙果片热泵干燥过程的温度、湿度梯度力是导致其干燥收缩变形的主要因素。后续可以通过研究不同干燥工艺参数对含水率变化的影响规律,确定最合适的干燥工艺参数。

参考文献

[1] HOU H, CHEN Q, BI J F, et al. Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 272(3): 109874.

[2] 黄毅成, 於海明, 缪磊, 等. 热泵干燥技术研究现状及发展趋势[J]. *农业工程*, 2020, 10(6): 61-65.  
HUANG Y C, YU H M, MIU L, et al. Research status and development trend of heat pump drying technology[J]. *Agricultural Engineering*, 2020, 10(6): 61-65.

[3] RAJ G V S B, DASH K K. Heat transfer analysis of convective and microwave drying of dragon fruit [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(9): e13775.

[4] 张彤, 余克志, 张得正. 火龙果真空冷冻干燥的模拟分析和实验研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(2): 142-150.  
ZHANG T, YU K Z, ZHANG D Z. Simulation analysis and experimental research on vacuum freeze-drying of pitaya[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(2): 142-150.

[5] 金旭, 王晨, 毕清跃, 等. 玉米热风干燥特性模拟研究[J]. *热科学与技术*, 2021, 20(2): 128-133.  
JIN X, WANG C, BI Q Y, et al. Simulation of corn drying characteristics with hot air [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2021, 20(2): 128-133.

[6] 扈梦尧. 菌类对流干燥过程的实验及模拟研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021: 41.  
HU M Y. Experimental and simulation study on the drying process of fungus during convection drying process [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021: 41.

[7] 王康. 微波干燥玉米的传热传质及实验装置研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2019: 17.  
WANG K. Study on heat and mass transfer and experimental device of microwave drying corn[D]. Wuhu: Anhui Engineering University, 2019: 17.

[8] ZHU Y, WANG P, SUN D, et al. Multiphase porous media model with thermo-hydro and mechanical bidirectional coupling for food convective drying [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175(1): 121356.

[9] 张大鹏, 贾斌广, 刘芳, 等. 苹果切片热风干燥温度的优化研究

[J]. *山东建筑大学学报*, 2021, 36(1): 67-74.  
ZHANG D P, JIA B G, LIU F, et al. Study on optimization of hot air drying temperature for apple slices[J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2021, 36(1): 67-74.

[10] AZHDARI E, EMAMI A. Analytical and numerical study of drying of tomato in non-shrinkage and shrinkage model [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2019, 166: 253-265.

[11] 秦基伟, 王立华, 蒋维, 等. 基于 COMSOL 的烟叶复烤干燥过程仿真[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 136-141.  
QIN J W, WANG L H, JIANG W, et al. Simulation analysis of tobacco leaf redrying and drying process based on COMSOL[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 136-141.

[12] NAGATA G A, COSTA T V, PERAZZINI M T B, et al. Coupled heat and mass transfer modelling in convective drying of biomass at particle-level: Model validation with experimental data [J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 1 290-1 299.

[13] 焦俊华. 马铃薯热风干燥过程的实验研究及数值模拟[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022: 39.  
JIAO J H. Experimental study and numerical simulation of hot air drying process of potato[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021: 39.

[14] 黄小丽. 稻谷过热蒸汽干燥过程中的力学及干燥动力学特性研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 48.  
HUANG X L. Mechanical characteristics and drying kinetics during superheated steam drying of rice kernel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014: 48.

[15] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Experimental studies and mathematical simulation of intermittent infrared and convective drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2019, 114: 163-174.

[16] YUAN Y, TAN L, XU Y, et al. Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136(1): 539-548.

[17] DATTA A K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. II: Property data and representative results [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 96-110.

[18] ONWUDE D I, HASHIM N, ABDAN K, et al. Modelling of coupled heat and mass transfer for combined infrared and hot-air drying of sweet potato [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 228: 12-24.

[19] VILLA-CORRALES L, FLORES-PRIETO J J, XAMAN-VILLASENOR J P, et al. Numerical and experimental analysis of heat and moisture transfer during drying of Ataulfo mango [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(2): 198-206.

[20] SHI F, LI Y, WANG L, et al. Measurement of moisture transformation and distribution in *Tricholoma matsutake* by low field nuclear magnetic resonancern during the hot-air drying process [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(3): e13565.