

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.01.018

山药片阶段降湿促干特性及多物理场耦合模型

Drying efficient improvements with step-down relative humidity and multi-field coupling model construction during hot air drying of yam slices

张卫鹏¹ 韩梦悦¹ 巨浩羽² 肖红伟³ 范晓志¹

ZHANG Wei-peng¹ HAN Meng-yue¹ JU Hao-yu² XIAO Hong-wei³ FAN Xiao-zhi¹

(1. 北京工商大学人工智能学院, 北京 100048; 2. 河北经贸大学生物科学与工程学院,

河北 石家庄 050061; 3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

(1. College of Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

摘要:目的: 探明热风干燥过程中阶段降湿调控策略对农产品物料干燥特性的影响。方法: 研究了 60 °C 干燥条件下, 恒湿干燥(相对湿度 15%, 25%, 35%, 45%) 和阶段降湿干燥(第一阶段相对湿度 45% 保持 10, 20, 30, 60 min, 第二阶段相对湿度 15%) 对山药片的干燥特性的影响, 构建热质传递多物理场耦合模型进行验证, 并测定干燥后产品的复水比和微观结构变化。结果: ① 恒湿干燥时, 干燥速率随相对湿度的增加而降低; 但阶段降湿干燥(50% 相对湿度保持 15 min 而后降为 20%) 的干燥时间比恒湿干燥(相对湿度 20%) 的缩短了 14.3%。② 山药片干燥速率总体呈先升速后降速的趋势, 水分有效扩散系数 D_{eff} 变化范围为 $7.16 \times 10^{-10} \sim 2.34 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; 多物理场耦合模型拟合结果表明, 相对湿度越高, 物料升温速率越快, 内部水分向外扩散迁移速度也越快。③ 复水比随着相对湿度的升高呈先升高后降低趋势; 阶段降湿(相对湿度 50% 保持 15 min 而后降为 20%) 干燥时, 山药片内部呈蜂窝状的多孔结构, 有利于内部水分向外迁移, 此条件下复水比最高为 6.85 ± 0.05 ; 而恒湿干燥(相对湿度为 20%) 时, 山药片内部水分扩散通道发生收缩坍塌、结壳堵塞, 复水率较低。结论: 热风干燥时, 阶段降湿调控策略可显著缩短干燥时间, 并有效改善物料微观结构, 提高产品复水率; 构建的多物理场耦合模型能够准确模拟阶

段降湿干燥过程中山药片内部的热质传递过程。

关键词: 热风干燥; 阶段降湿; 山药片; 多物理场耦合; 微观结构

Abstract: Objective: In order to explore the effect of step-down relative humidity drying strategy on the drying characteristics of agricultural products. **Methods:** Yam slices were selected as the object. The effects of constant humidity drying (relative humidity 15%, 25%, 35%, 45%) and step-down relative humidity drying (relative humidity 45% in the first stage for different times of 10, 20, 30, 60 min and relative humidity 20% in the second stage) on the drying characteristics of yam slices were studied at 60 °C; The multi-field coupling model was constructed for the simulation of heat and mass transfer; The rehydration ratio and microstructure of the dried product were also measured. **Results:** ① During constant humidity drying, the drying rate decreased with the increase of relative humidity; However, the drying time of step-down relative humidity drying (45% relative humidity maintained for 20 min and then decreased to 15%) was 8.3% shorter than that of constant humidity drying (relative humidity 15%). ② The drying rate of yam slices generally increased first and then decreased. The fitting results of drying model showed that it was accurate to describe the changing process of moisture and mass transfer. ③ The rehydration ratio increased first and then decreased with the increase of relative humidity; Under special drying condition of step-down relative humidity drying strategy (relative humidity 45% kept for 20 min and then decreased to 15%), the yam slices showed honeycomb porous structure, which was good for the mass transfer. Under this condition, the maximum rehydration ratio was 6.85 ± 0.05 ; Under the drying condition of constant humidity strategy (relative humidity is 20%), the microstructure of yam slices begin to shrink

基金项目: 国家自然科学基金(编号:32102141); 北京市自然科学基金(编号:6204035); 河北省高等学校科学技术研究项目(编号:QN2021054); 河北省自然科学基金资助项目(编号:C2020207004)

作者简介: 张卫鹏, 男, 北京工商大学副教授, 硕士生导师, 博士。
通信作者: 巨浩羽(1989—), 男, 河北经贸大学讲师, 硕士生导师, 博士。E-mail: ju56238@163.com

收稿日期: 2021-09-08

and collapse, which led to a lower rehydration rate. **Conclusion:** During the process of hot air drying, the multi-field coupling model can significantly shorten the drying time, effectively improve the microstructure of materials and improve the rehydration rate of products; The multi-field coupling model can precisely simulate the heat and mass transfer process in yam slices during hot air drying; The research results can provide theoretical basis and technical support for the application and optimization of step-down relative humidity drying strategy.

Keywords: drying; step-down relative humidity; yam slice; multi-field coupling model; microstructure; rehydration ratio

山药 (*Dioscorea oppositifolia* L.) 是一种薯蓣科植物,块茎富含淀粉,可供蔬食。但新鲜的山药含水量高达 70% 以上,皮薄易损伤,长时间贮存会腐烂变质^[1-2]。切片后干燥是山药的主要加工方式之一,对于延长货架期、提高产品附加值具有重要意义。

目前常见干燥方法有自然晾晒、热泵干燥、微波真空冷冻干燥、远红外干燥方式等。热风干燥技术因其操作简便、适用范围广,应用最为普遍^[3-6]。相对湿度会影响物料干燥特性和品质。由湿空气的湿焓图可知,低温高相对湿度与高温低相对湿度的湿空气可具有相同的焓值,低温高湿的热风不仅可实现对物料相同的预热效果,而且可以避免物料表面因干燥温度过高而发生结壳硬化现象。研究^[7-8]表明,干燥前期使用较高相对湿度的热风对物料进行预热,而后降低相对湿度,有助于提高物料干燥效率,并减少结壳现象。阶段降湿干燥调控策略已经应用到胡萝卜^[9]、杏子^[10]等物料的加工中。

山药片的干燥过程涉及传热传质、能耗和产品品质等指标,干燥模型对调控干燥工艺参数具有重要现实意义^[11-13]。干燥模型主要包括理论模型、半理论模型和经验模型。半理论模型和经验模型通常借助最小二乘法构建,模型参数缺乏明确的物理意义。理论模型将传热和传质过程分别用傅里叶导热定律和费克第二定律来描述,而后借助 Comsol Multiphysics、CFD 或 Matlab 等软件,采用有限元法获得干燥过程物料内部水分和温度的三维分布,直观地反映传热、传质过程。Ju 等^[14]基于 Comsol Multiphysics 模拟了干燥温度 60 °C,相对湿度 30% 条件下,5 mm 厚山药片的水分空间分布;Pham 等^[15]基于 Comsol Multiphysic 模拟仿真了苹果块微波热风干燥过程中,水分和温度三维分布状态。因此,研究阶段降湿调控策略下,物料内部的热质传递过程,有助于阐明干燥技术的促干机理。

试验拟以山药为研究对象,研究恒湿干燥和阶段降湿干燥调控策略对物料干燥特性的影响;构建多物理场耦合模型,研究物料内部热质传递过程;并测定不同干燥

条件下山药片的复水性和微观结构,以期为相对湿度的优化调控提供理论依据和技术支持。

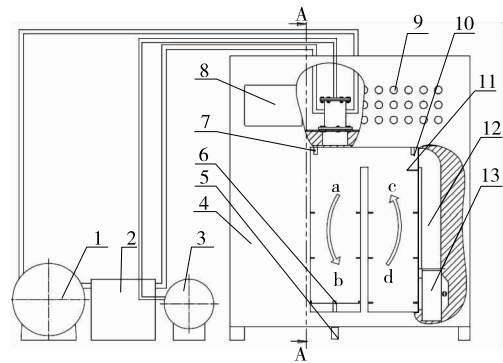
1 材料与方法

1.1 试验材料

挑选新鲜无虫害、无机械损伤的山药作为试验材料。物料长度(55.0±2.0) cm,平均直径(6.0±0.30) cm,单根质量(380±15) g,初始湿基含水率为(82.1±1.15)%。试验前真空密封置于(5±1) °C 条件下冷藏保存。

1.2 试验装置

基于温湿度控制的箱式热风干燥试验装置(中国农业大学工学院自制)如图 1 所示。其主要由电加热管、干燥室、加湿系统、自动称重系统及控制系统组成。可通过加热管开闭、加湿系统开闭,分别调控热风干燥温度(精度±0.5 °C)和相对湿度(精度±2% RH)。自动称重系统可监测物料质量变化,数据采样间隔 2 min,精度±0.2 g。箱体内部安装有 PT100 针形传感器,可插入物料内部监测温度变化,精度±0.03 °C。



1. 冷却水泵 2. 冷却水箱 3. 冷却风机 4. 干燥机外壳 5. 称重传感器 6. 称重支架 7. 温度传感器 8. 触摸屏 9. 指示灯 10. 加湿器 11. 托盘支架 12. 进气加热通道 13. 离心风机

图 1 温湿度热风干燥箱结构简图

Figure 1 Structure diagram of temperature and humidity controlled hot air drying equipment

1.3 试验方法

将山药洗净、去皮、切片,厚度(12.0±0.5) mm。单层平铺于不锈钢料盘上,装载密度(2 000±5) g/m²。试验参数如表 1 所示,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。连续两次采样间隔质量变化小于 2 g 时,干燥完成。干燥后样品真空密封聚乙烯袋中,冷藏保存。

1.4 指标测定

山药片的干燥曲线采用水分比随干燥时间变化的曲线描述。不同干燥时间水分比按式(1)计算^[16]。

$$M_R = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

式中:

表 1 试验设计参数

Table 1 Experimental design parameters

工艺	编号	干燥温度/℃	相对湿度/%	分段时间
恒定湿度	1	60	15	至结束
	2	60	25	至结束
	3	60	35	至结束
	4	60	45	至结束
	5	60	45	10 min
阶段降温	6	60	15	至结束
	6	60	45	20 min
	6	60	15	至结束
	7	60	45	30 min
阶段降温	7	60	25	至结束
	8	60	45	60 min
	8	60	15	至结束

M_R ——水分比;

M_t ——干燥 t 时刻的干基含水率, g/g;

M_0 ——初始干基含水率, g/g。

干燥速率按式(2)计算。

$$D_R = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

式中:

D_R ——干燥速率, g/(g·h);

M_{t_1} ——干燥时间为 t_1 时的干基含水率, g/g;

M_{t_2} ——干燥时间为 t_2 时的干基含水率, g/g。

干基含水率按式(3)计算。

$$M_t = \frac{W_t - G}{G}, \quad (3)$$

式中:

M_t ——干基含水率, g/g;

W_t ——在干燥 t 时刻的物料总质量, g;

G ——物料干物质质量, g。

1.5 多场耦合模型构建

1.5.1 几何模型 将山药片视为直径 60 mm, 高 12 mm 的圆柱体。为简化计算过程, 将图 2(a) 的三维圆柱体模型作二维轴对称处理, 得到 1 个 30 mm×12 mm 的简单矩形, 即阴影部分。如图 2(b) 所示, 利用 Comsol Multiphysics 软件, 采用自由三角形划分网格, 共计 1 544 个区域和 140 个边单元。

1.5.2 传热传质控制方程 山药片热风干燥过程中的传热和传质方程分别由傅里叶导热定律和费克第二定律来描述, 见式(4)和式(5)^[17]。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(-D_{\text{eff}} C) = 0; \quad (5)$$

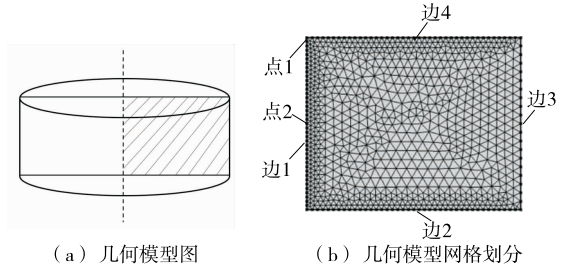


图 2 山药片几何模型与网格划分

Figure 2 Geometric model and mesh division of yam slice geometric model

其中传热方程式(4)的边界条件:

$$\text{边界 1: } n(-k \nabla T) = 0, \quad (6)$$

$$\text{边界 2、3、4: } n(-k \nabla T) = h_1(T_\infty - T) + \lambda n(D_{\text{eff}} \nabla C); \quad (7)$$

初始条件为:

$$\text{全区域: } t = t_0, T = T_0; \quad (8)$$

传质方程式(7)的边界条件:

$$\text{边界 1: } n(-D_{\text{eff}} \nabla C) = 0, \quad (9)$$

$$\text{边界 2、3、4: } n(D_{\text{eff}} \nabla C) = h_m(C_b - C); \quad (10)$$

初始条件为:

$$\text{全区域: } t = t_0, C = C_i, \quad (11)$$

式中:

k ——物料的导热系数, W/(m·℃);

ρ ——物料的密度, kg/m³;

C_p ——物料的比热容, J/(kg·℃);

T ——物料温度, ℃;

T_0 ——物料的初始温度, ℃;

t ——干燥时间, s;

C ——物料中的水分浓度, mol/m³;

C_b ——干燥室内的水分浓度, mol/m³;

C_i ——物料初始水分浓度, mol/m³;

D_{eff} ——水分有效扩散系数, m²/s;

λ ——水分蒸发潜热, J/mol;

h_1 ——对流传热系数, W/(m²·℃);

h_m ——对流传质系数, m/s。

1.5.3 多物理场耦合模型参数确定 假设山药片在干燥过程中体积收缩可忽略, 基于集总热容法求解对流传热系数, 如式(12)所示。

$$\frac{T - T_{\text{air}}}{T_0 - T_{\text{air}}} = \exp\left[-\left(\frac{h_1 A_s}{\rho C_p V}\right)t\right], \quad (12)$$

式中:

T_{air} ——干燥介质的温度, ℃;

A_s ——物料的表面积, m²;

V ——物料体积, m³。

对式(12)两边取对数, 得到式(13)和干燥时间 t 的线性关系。

$$\ln\left(\frac{T - T_{air}}{T_0 - T_{air}}\right) = -\frac{h_t A_s}{\rho C_p V} t \quad (13)$$

进而得到线性斜率 K 和 h_t 的相关关系式, 如式(14)所示, 并通过该式求解得到 h_t 。

$$K = \frac{h_t A_s}{\rho C_p V} \quad (14)$$

对流传质系数 h_m , 通过式(15)进行求解^[18]。

$$h_m = \frac{h_t}{\rho_a C_{pa} (Le)^{2/3}} \quad (15)$$

式中:

ρ_a ——空气的密度, kg/m^3 ;

C_{pa} ——空气的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

Le ——路易斯常数。

Le 由式(16)确定。

$$Le = \frac{\alpha_a}{D_a} \quad (16)$$

式中:

α_a ——空气的热扩散系数, m^2/s ;

D_a ——空气中蒸气的质量扩散率, m^2/s 。

干燥模型中其余参数如表 2 所示。

1.6 多场耦合模型构建

1.6.1 微观结构观测 取干燥后山药片的表皮中心部分, 切割分成 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的样品。采用 SC7640 型磁控溅射仪(英国 Quorum 科技有限公司)进行 5 min 喷金处理以固定组织结构, 并采用 S3400 型扫描电镜(日本东京日立集团)在 10 kV 加速电压下观察其微观结构并分析。

1.6.2 复水比计算 将一定质量的样品放入 40°C 恒温蒸馏水中, 30 min 后, 取出沥干 20 min, 并用吸水纸拭干

表面水分, 称取复水后的质量, 按式(17)计算复水比^[20]。

$$R_R = \frac{m_2}{m_1} \quad (17)$$

式中:

R_R ——物料复水比;

m_1 ——复水前质量, g ;

m_2 ——复水后质量, g 。

2 结果与分析

2.1 相对湿度对山药片干燥特性的影响

2.1.1 恒湿干燥方式对山药片干燥特性的影响 由图 3(a) 可知, 干燥温度为 60°C , 相对湿度为 15%, 25%, 35%, 45% 时, 山药片干燥时间分别约为 6.5, 7.0, 8.0, 9.0 h, 表明降低相对湿度有助于提高干燥效率。这是因为相对湿度降低后, 物料表面和干燥介质之间的水蒸气分压增大, 有助于内部水分向外迁移, 从而缩短干燥时间。该结论与 Ogawa 等^[21]、Agnihotri 等^[22] 的研究结论相一致。而且, 相对湿度越高, 干燥结束时水分比也越高, 不利于山药片的长期贮藏, 因此, 山药片干制过程以较低相对湿度为宜。由图 3(b) 可知, 相对湿度越低, 干燥速率越高, 总体呈先升速后降速的趋势。这是因为干燥初期, 干燥过程由表面水分蒸发所控制; 随着干燥进行, 干燥过程逐渐由内部水分迁移扩散所控制, 处于降速干燥阶段, 因此干燥速率逐渐降低。但 Barati 等^[23] 研究发现, 芒果片在热风干燥温度 60°C 、风速 0.3 m/s 、相对湿度 15%~45% 时, 相对湿度变化对干燥时间无显著影响, 可能是因为相对湿度变化范围较小所致。

2.1.2 阶段降湿干燥方式对山药片干燥特性的影响 由图 4(a) 可知, 干燥温度 60°C , 相对湿度 45% 保持 10, 20,

表 2 模型参数^{*}

Table 2 Model parameters

参数名称	单位	值	参考文献
山药片密度 ρ	kg/m^3	1 125.4	[14]
山药片导热系数 k	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	$k = 0.164 + 0.001T + 7.676T^3$	[19]
山药片比容 C_p	$\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$C_p = 2 750.89 + 2.693T - 2.925T^2 + 0.069T^3$	[19]
干燥温度 T_{air}	$^\circ\text{C}$	60	
相对湿度 RH	%	依据干燥试验设计设定	
风速 v	m/s	3.0	
水分有效扩散系数 D_{eff}	m^2/s	由于干燥试验条件和式(5)确定	
山药片初始湿基含水率	g/g	0.821	
山药片厚度 L	mm	12	
山药片半径 R	mm	30	
水分蒸发潜热 λ	J/kg	$\lambda = 2 503 000 - 2 386T$,	[17]
空气密度 ρ_a	kg/m^3	1.073	[17]
空气比热容 C_{pa}	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	1 005.04	[17]
空气热扩散系数 α_a	m^2/s	2.18×10^{-5}	[17]
空气中蒸气的质量扩散率 D_a	m^2/s	2.5×10^{-5}	[17]

30, 60 min 而后降为 15% 时,干燥时间分别约为 7.5, 6.0, 7.5, 8.5 h。相对湿度 45% 保持 20 min 后降为 15%, 比相对湿度 15% 的恒湿干燥,干燥时间缩短了 8.3%。干燥时间随高湿保持时间的延长呈先缩短后延长的变化趋势,相对湿度 45% 保持 10 min 和 30 min 时,干燥时间无显著性差异;保持 60 min 时,总干燥时间显著增加。这是因为干燥前期,保持高相对湿度并持续适宜的时间,有助于物料温度迅速上升,使得物料温度分布趋于一致;而后降低相对湿度,可使表面水分快速蒸发;较高的物料内部温度可促使内部水分及时迁移扩散至表面,同时也避免了因表面干燥过快而导致的结壳现象^[24]。因此,高相对湿度保持一定的时间有助于缩短干燥时间,并提高干燥效率。与图 3(b)类似,图 4(b)的干燥速率曲线同样呈先升高后降低的趋势。其中相对湿度 45% 保持 20 min 后降为 15%,其干燥速率显著大于其余三者,可能是因为在高湿保持阶段,物料充分预热,降低相对湿度后,物料具有较快干燥速率。

综上所述,山药片的干燥过程可分为升速干燥阶段和降速干燥阶段。在干燥前期,保持较高相对湿度并持续一定时间,有助于物料升温,从而缩短干燥时间。在干

燥中后期,物料已经充分预热,且呈降速干燥趋势;此时应当及时降低相对湿度,促使内部水分向外迁移。因此,阶段降温调控策略可提高山药片等物料的干燥效率。

2.2 多物理场耦合模型构建

2.2.1 模型验证

为了验证多物理场耦合模型的准确性,将恒湿干燥方式下(干燥温度 60 °C、恒定相对湿度 25%),山药片温度和水分比变化的实测值、模型预测值进行对比,结果如图 5 所示。由图 5 可知,温度和水分比的实测值、模型预测值之间的相关系数分别为 0.993 3 和 0.999 3,最大偏差分别约为 3.7% 和 6.3%。由此可见,该多物理场耦合模型能够准确描述不同干燥条件下山药片的脱水过程。

2.2.2 恒湿干燥方式对传热特性的影响

基于多物理场耦合模型,计算了干燥温度为 60 °C、相对湿度分别为 15% 和 45% 时,山药片内部温度分布演变过程。图 6 为图 2(b)中心点 2 的温度变化曲线。由图 6 可知,在干燥前期,中心点温度迅速上升,对应于山药片的升速干燥阶段;在干燥中后期,山药片温度缓慢上升而后逐渐趋于干燥介质的温度,对应于山药片的降速干燥阶段。干燥过程相对湿度越高,中心点温度上升速率越快,这是因为干

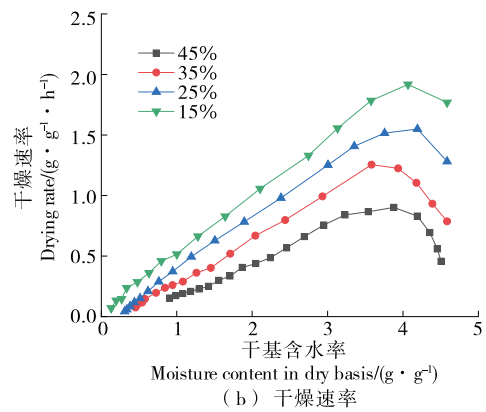
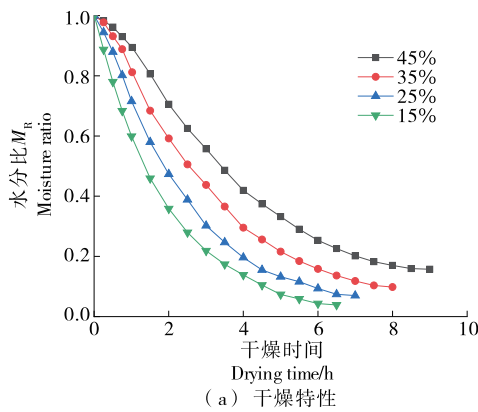


图 3 恒湿干燥方式下山药片的干燥特性和干燥速率曲线

Figure 3 Drying characteristic and rate curves of yam slices at constant relative humidity

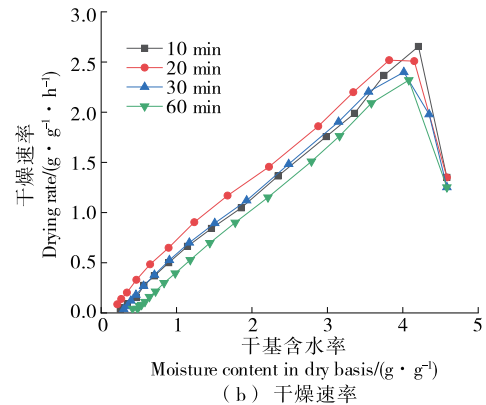
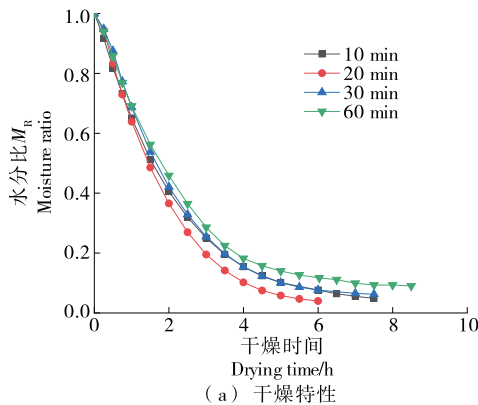


图 4 阶段降温下山药片的干燥特性和干燥速率曲线

Figure 4 Drying characteristic and rate curves of yam slices at step-down relative humidity

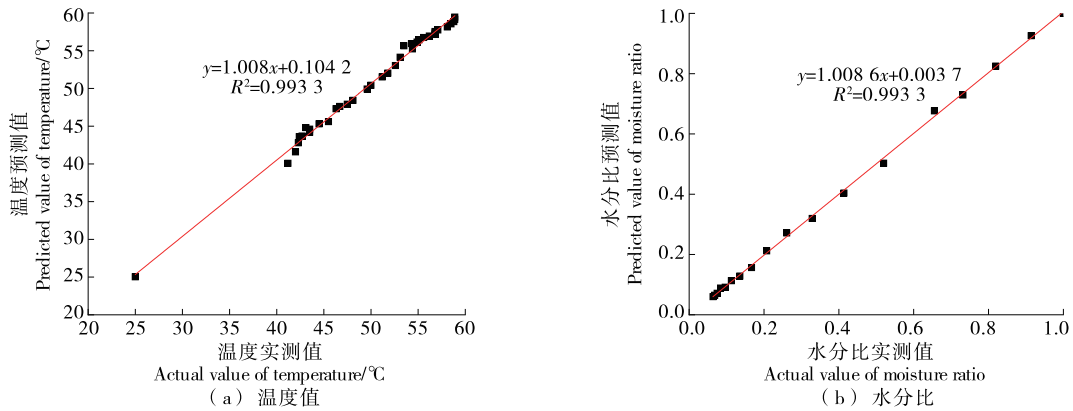


图 5 温度和水分的实测值和预测值对比

Figure 5 Comparison between actual and predicted values of temperature and moisture ratio

燥前期,相对湿度越高,空气介质焓值越高;干燥介质和物料表面的水蒸气分压差较小,物料所吸收的热量大部分用于物料升温,少部分用于水分蒸发,故物料升温速率较快。当相对湿度较低时,蒸发水分及时排出箱体,物料吸收的热量大部分用于水分蒸发,少部分用于物料升温,故升温速率较慢。

图 7 为图 2(b)阴影部分的等温线分布曲线。由图 7 可知,45%,15%恒湿干燥时,山药片表面升温速率均快于内部升温速率,热量由外向内部传导,促使内部温度升高;而且相对湿度越高,山药片在相同位置所能达到的温度也越高。相对湿度 45%干燥 20 min 时,物料表面温度约为 47.5 °C,内部温度约为 43.0 °C,此时物料已具有较高温度,且内部和表面温差较小。因此,高相对湿度保持 20 min 后应降低相对湿度,以便提高干燥效率。

2.2.3 阶段降湿干燥方式对传质特性的影响 基于多物理场耦合模型,模拟了干燥温度 60 °C,阶段降湿干燥(相对湿度 45%保持 20 min 后降为 15%)和恒湿干燥(相对湿度恒定为 15%)方式下,山药片的湿基含水率空间分布的演化过程见图 8。由图 8 可知,山药片热风干燥过程

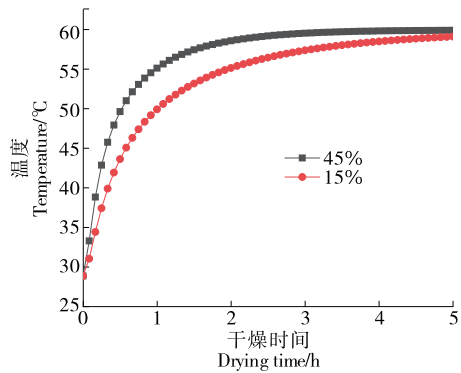


图 6 温度变化曲线

Figure 6 Temperature variation curves

中,表面水分先蒸发,而后内部水分不断向表面扩散迁移。干燥时间 20 min 时,图 8(a)中物料内部湿基含水率略高于图 8(b)物料,这是因为图 8(b)对应的相对湿度较低,表面水分蒸发较快。但随着干燥时间的延长,图 8(a)内部物料湿基含水率逐渐低于图 8(b)。这是由于 45%相对湿度保持一定时间后,山药片内部温度较高,在降湿

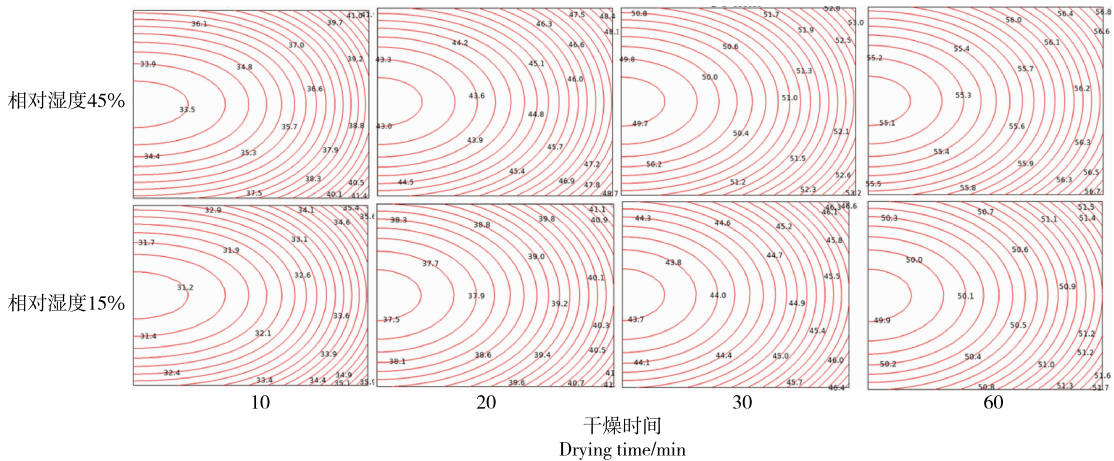


图 7 阴影部分等温线分布

Figure 7 Isotherm distribution of shaded part

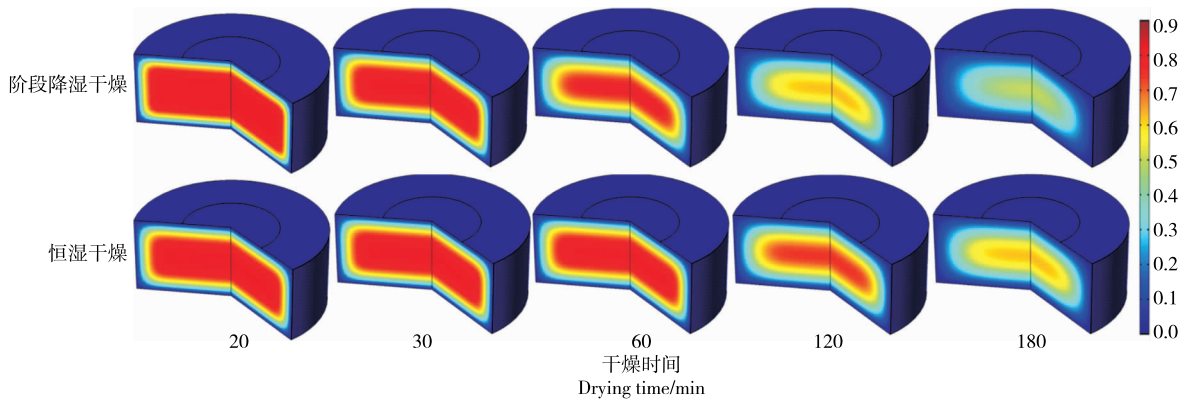


图8 山药片内部水分分布演变规律

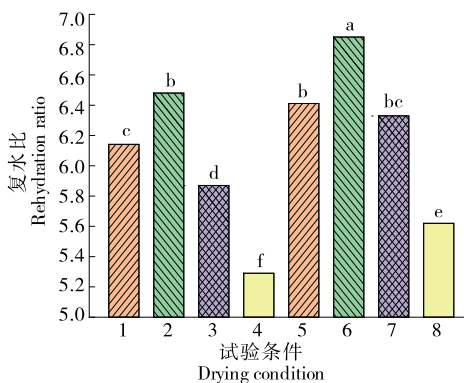
Figure 8 Evolvement regulation of internal moisture content distribution of yam slice

阶段内部水分扩散速率较快。而图 8(b)物料由于相对湿度恒定为 15%，表面水分蒸发较快发生结壳硬化，阻碍了内部水分向外的扩散迁移。图 8 从山药片水分分布演变规律角度，阐明了山药片的阶段降湿干燥特性。

2.3 复水性和微观结构观测

复水性主要受到物料细胞结构的破坏程度和物料初始含水率的影响。由图 9 可知，恒湿干燥方式下，复水比随着相对湿度的升高而先升高后降低。一方面，是因为相对湿度较低时，表面水分蒸发过快而发生结壳硬化，阻碍了水分迁移扩散的孔道，使得复水性减弱。另一方面，当相对湿度较高时，干燥时间较长使得物料细胞受到破坏，同样不利于山药片复水。阶段降湿时，当相对湿度 45% 保持 20 min 而后降为 15% 干燥条件下，复水比最高为 6.85 ± 0.05 ，且显著高于其他干燥条件。表明适宜的阶段降湿策略较好地保留了山药片内部的多孔结构，有助于提高复水比。

选取恒湿干燥(相对湿度 15%，45%)，阶段降湿干燥(相对湿度 45% 保持 20 min，而后降为 15%)条件下的山药片微观结构作为代表性试验结果，观测微观结构。由



小写字母不同表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$)

图9 不同相对湿度干燥条件下山药片复水比

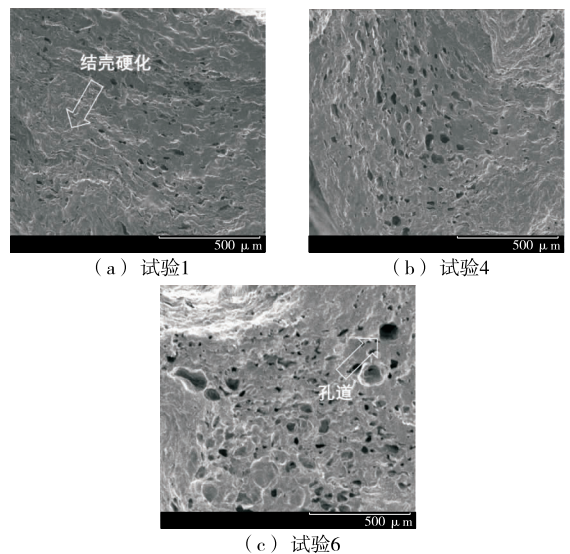
Figure 9 Rehydration ratio of yam slice at different relative humidity drying conditions

图 10(a)可知，相对湿度为 15% 时，物料内部的水分扩散通道发生收缩坍塌、结壳堵塞。由图 10(b)可知，相对湿度 45% 时，可看到部分多孔结构。由图 10(c)可知，阶段降湿干燥的山药片内部呈清晰的蜂窝状多孔结构，故干燥后复水比最大。

3 结论

(1) 恒湿干燥时，试验范围内干燥速率随相对湿度的增加而降低。阶段降湿干燥时，相对湿度 45% 保持 20 min 而后降为 15%，比相对湿度 15% 的恒湿干燥，干燥时间缩短了 8.3%。

(2) 多物理场耦合模型能够很好地描述山药片在不同相对湿度条件下的热质传递过程。恒湿干燥时，相对湿度越高，干燥前期物料升温速率越快；阶段降湿干燥时，相对湿度 45% 维持 20 min，物料表面温度即可达到



图(a)、(b)、(c)分别对应表1中编号为1、4、6的试验

图10 山药片微观结构

Figure 10 Microstructure of yam slice at different relative humidity drying conditions

47.5 ℃, 内部温度达 43.0 ℃。干燥时, 表面水分首先蒸发, 而后内部水分不断向表面扩散迁移。

(3) 恒湿干燥时, 复水比随着相对湿度的升高而先升高后降低。阶段降湿干燥时, 相对湿度 45% 保持 20 min 而后降为 15% 干燥条件下, 内部呈蜂窝状的多孔结构, 有利于水分迁移, 此条件下复水比最高为 6.85±0.05。而相对湿度为 15% 的恒湿干燥, 物料内部的水分扩散通道发生收缩坍塌、结壳堵塞, 复水率较低。

致谢: 衷心感谢南京腾飞干燥装备有限公司提供相关技术和装备支持。

参考文献

[1] 段柳柳, 段续, 任广跃. 怀山药微波冻干过程的水分扩散特性及干燥模型[J]. 食品科学, 2019, 40(1): 31-38.
DUAN Liu-liu, DUAN Xu, REN Guang-yue. Water diffusion characteristics and microwave vacuum freeze-drying modelling of chinese yam (*Dioscorea opposita*) tubers[J]. Food Science, 2019, 40(1): 23-30.

[2] 李书华, 闫泽华, 张仲欣, 等. 怀山药热泵干燥工艺研究[J]. 粮食加工, 2017(6): 49-53.
LI Shu-hua, RAN Ze-hua, ZHANG Zhong-xin, et al. Technology research of Chinese yam heat pump drying[J]. Grain Processing, 2017(6): 49-53.

[3] 骆航, 孙兴力, 刘金凤. 热风干燥对山药片品质特性的影响[J]. 北方农业学报, 2019, 47(5): 100-104.
LUO Hang, SUN Xing-li, LIU Jin-feng. Effect of hot air drying on quality characteristics of Chinese yam slices[J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(5): 100-104.

[4] 曲文娟, 凡威, 马海乐, 等. 核桃滚筒催化红外—热风干燥试验及能耗分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 163-168, 193.
QU Wen-juan, FAN Wei, MA Hai-le, et al. Experiment and energy consumption analysis of walnut drum catalytic infrared-hot air drying[J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 163-168, 193.

[5] OJEDIRAN J O, OKONKWO C E, ADEYI A J, et al. Drying characteristics of yam slices (*Dioscorea rotundata*) in a convective hot air dryer: Application of ANFIS in the prediction of drying kinetics[J]. Heliyon, 2020, 6: e03555.

[6] SONG X Y, HU H, ZHANG B L. Drying characteristics of Chinese Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) by far-infrared radiation and heat pump[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17: 290-296.

[7] JU H Y, ZHAO S H, MUJUMDAR A S, et al. Energy efficient improvements in hot air drying by controlling relative humidity based on Weibull and Bi-Di models[J]. Food Bioprod Process, 2018, 111: 20-29.

[8] 巨浩羽, 张茜, 郭秀良, 等. 基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 269-276.
JU Hao-yu, ZHANG Qian, GUO Xiu-liang, et al. Control method of relative humidity of carrot hot air drying based on detecting materi-

al's temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4): 269-276.

[9] 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 Hao-yu, XIAO Hong-wei, ZHENG Xia, et al. Effect of hot air relative humidity on drying characteristics of carrot slabs[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 296-304.

[10] DAI J W, RAO J Q, WANG Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. Drying Technology, 2015, 33(12): 365-376.

[11] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 干燥介质相对湿度对西洋参根干燥特性和品质的影响[J]. 中草药, 2020, 51(3): 631-638.
JU Hao-yu, ZHAO Shi-hao, ZHAO Hai-yan, et al. Effect of relative humidity on drying characteristic and quality of Panacis *Quinquefolii* Radix [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(3): 631-638.

[12] 肖扬波, 刘琪, 彭逸斯, 等. 干燥方法对茯苓产品显微性状、营养成分及抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 175-179.
XIAO Yang-bo, LIU Qi, PENG Yi-si, et al. The effect of drying methods on the microscopic properties, ingredients and antioxidant activity of Poria cocos products[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 175-179.

[13] 曲文娟, 凡威, 马海乐, 等. 滚筒催化红外—热风联合干燥核桃的贮藏特性[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 168-173, 240.
QU Wen-juan, FAN Wei, MA Hai-le, et al. Storage properties of walnuts dried by drum catalytic infrared-hot air[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 168-173, 240.

[14] JU H Y, LAW C L, FANG X M, et al. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying[J]. Dry Technol, 2016, 8(11): 9 435-9 441.

[15] PHAM N D, KHAN M I H, KARIM M A. A mathematical model for predicting the transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126932.

[16] 邹三全, 刘显茜, 赵振超, 等. 猕猴桃切片流化床干燥特性与干燥动力学模型研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 150-156.
ZOU San-quan, LIU Xian-xi, ZHAO Zhen-chao, et al. Study on drying characteristics and drying kinetic model of kiwi fruit slices in fluidized bed[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4): 150-156.

[17] 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.

[18] PASBAN A, SADRNIA H, MOHEBBI M, et al. Spectral method for simulating 3D heat and mass transfer during drying of apple slices[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 212: 201-212.

(下转第 240 页)