

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60171

铁棍山药片热风干燥过程中传热传质规律

庞凌云¹ 袁志华² 詹丽娟¹ 李 瑜¹ 潘思轶³

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002;

3. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] 探究热风干燥过程中铁棍山药片的传质情况, 以及干燥空间和山药片的传热情况。[方法] 选用 7 种薄层干燥数学模型对山药片热风干燥曲线进行拟合, 找出最适传质动力学模型; 测定不同温度下山药的导热系数和比热容, 在此基础上利用 ANSYS 软件模拟热风干燥过程中干燥空间温度场变化和山药片温度变化。[结果] Modified Page 模型能准确预测不同热风温度条件下山药片的水分变化情况 (R^2 为 0.998 96~0.999 86)。热风干燥过程中干燥室空间温度总体呈水平面上距进风口近处温度高, 远处温度稍低, 竖直面上呈上高下低的状态, 但温差均不大。热风干燥过程中山药片中心处温度最低, 外表面温度最高, 内外层温差逐渐缩小, 前期温度变化较快而后期缓慢, 实测值与模拟值间的温差最大达 7.75 °C, 最小仅为 0.07 °C, 说明模拟结果准确度较高。[结论] Modified Page 模型和 ANSYS 软件能够准确模拟热风干燥过程中山药片的传热传质。

关键词: 铁棍山药; 热风干燥; 导热系数; 比热容; 传热与传质

Heat and mass transfer of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun slices during hot-air drying process

PANG Lingyun¹ YUAN Zhihua² ZHAN Lijuan¹ LI Yu¹ PAN Siyi³

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

3. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the mass transfer of *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun slices, the heat transfer of the drying space and yam slices during hot-air drying (HAD) process. [Methods] Seven thin-layer drying models were used to fit the drying curves of yam slices during the HAD process, and the optimal mass transfer dynamics model was selected finally. Thermal conductivity and specific heat capacity of yam slices were measured at different temperatures. ANSYS software was used to simulate the temperature field changes in the drying chamber and the temperature changes of yam slices. [Results] The Modified Page model can accurately predict the moisture changes of yam slices during the HAD process at different temperatures ($R^2=0.998\ 96\sim0.999\ 86$). For HAD, the temperature inside the drying chamber was generally high near the air inlet and outlet on the horizontal plane, and was slightly low in the distance. Differently, the temperature decreased mildly from the top to the bottom vertically. During HAD, the temperature of yam slices was the lowest in the center and highest at the outer surface. The temperature difference between the inner and outer layers gradually decreased, and the temperature changed faster in the early stage than in the late stage. The maximum temperature difference between the measured value and the simulated value was 7.75 °C, and the minimum was only 0.07 °C, indicating that the simulation results were reliable. [Conclusion] The Modified Page model and ANSYS software can accurately predict the heat and mass transfer of yam slices during the HAD process.

Keywords: *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun; hot-air drying; thermal conductivity; specific heat capacity; heat and mass transfer

山药具有较高的营养价值和药用价值, 但新鲜山药表皮非常薄, 贮运过程中易破损, 环境湿度过高时易出现的水分含量较高, 采收时常常因机械作用而造成损伤, 且发芽、霉变、腐败等现象, 不耐长期贮藏^[1]。干制是传统的

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (编号: 18B550005)

通信作者: 庞凌云 (1979—), 女, 河南农业大学副教授, 博士。E-mail: panglingyun@163.com

收稿日期: 2023-12-07 收稿日期: 2024-07-02

食品加工保藏方法之一,干燥山药片是最常见的山药干制加工品。而干燥加工是将热量传递给物料并促使物料内部水分向外迁移的过程,在干燥过程中既有热量的向内传递又有水分的向外迁移,两者同时进行,影响产品品质,因此湿热的转移是干燥加工中的核心问题^[2]。国内外学者对干燥过程中传热传质规律方面做了大量研究,姜大龙等^[3]建立了红外联合热风干燥过程中白萝卜片水分和温度分布的数值模型,发现单独热风 and 红外联合热风干燥模拟值和试验值的决定系数分别为 0.893 0, 0.911 1; 罗燕^[4]模拟了真空远红外干燥过程中当归切片内部温度分布和水分分布的变化情况; Yuan 等^[5]建立了苹果片热风干燥过程中的传热—传质耦合应力—应变数学模型,并进行了数值模拟,发现热风干燥过程中苹果片的温度分布和水分分布均匀,模拟值与实测值间的最大相对误差低于 10%; Ju 等^[6]模拟了番木瓜片热风干燥过程中不同相对湿度条件下的热质传递特性。

在山药干燥加工中,目前国内外学者多研究干燥条件对产品品质的影响,而关于传热传质方面的研究较少,张丽丽等^[7]利用 BP 神经网络预测红外干燥过程中山药片内部的温度变化,预测偏差较小,但这种方法只能观测某一点处温度的变化,不能反映山药片内部整体温度的变化; Ojediran 等^[8]利用自适应神经模糊系统(ANFIS)预测了山药片热风干燥过程中水分比的变化,发现模型拟合度较高(R^2 为 0.982 26),但应用时需收集大量的数据来提高模拟的准确性。研究拟选用 7 种薄层干燥数学模型对山药片热风干燥曲线进行拟合,找出最适模型,用以描述干燥过程中的水分变化; 并利用 ANSYS 软件模拟热风干燥过程中干燥空间温度场变化和山药片的温度变化,为可视化研究山药片的干燥过程提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

铁棍山药: 产自河南省焦作市温县武德镇马冯蔺村,选择粗细均匀、个体完整、无机械性损伤的新鲜铁棍山药作为原材料。

1.2 试验设备

恒温鼓风干燥箱: DH6-907385-Ⅲ型, 上海新苗医疗器械制造有限公司;

三路超低温温度记录仪: i500-E3LT 型, 玉环智拓仪器科技有限公司;

热常数分析仪: Hot Disk TPS 2500 S 型, 瑞典 Hot Disk 公司;

差示扫描量热仪: DSC 200 F3 型, 德国耐驰仪器制造有限公司;

烘干称量法水分测定仪: DHS20-A 型, 上海精密科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅: DK-98-II A 型, 天津市泰斯特仪器

有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 热风干燥处理 将山药清洗、去皮,切片厚度 5 mm, 85℃热烫 5 min, 沥干表面水分, 单层均匀平铺于平板盘上, 热风干燥温度分别为 40, 50, 60, 70℃, 试验过程中以干制品湿基水分含量低于 10% 为干燥终点, 每间隔 30 min 取样测定样品的干基水分含量并根据式(1)计算出相应的水分比(M_R)。

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \tag{1}$$

式中:

M_R ——试样 t 时刻水分比;

M_t —— t 时刻干基水分含量, %;

M_0 ——初始干基水分含量, %;

M_e ——平衡干基水分含量, %。

1.3.2 山药片热风干燥传质动力学数学模型 选用 7 种薄层干燥数学模型, 利用 Origin 9.1 软件对热风干燥过程中所得数据进行拟合, 找出最适模型。7 种干燥数学模型见表 1。

表 1 薄层干燥数学模型[†]
Table 1 Thin layer drying models

序号	模型名称	模型方程
1	Page	$M_R = \exp(-kt^n)$
2	Modified Page	$M_R = \exp(-(kt)^n)$
3	Newton/Lewis	$M_R = \exp(-kt)$
4	Wang and Singh	$M_R = 1 + at + bt^2$
5	Henderson and Pabis	$M_R = a \exp(-kt)$
6	Two-term model	$M_R = a_1 \exp(-k_1t) + a_2 \exp(-k_2t)$
7	Logarithmic	$M_R = a \exp(-kt) + c$

[†] t 为干燥时间(min); a, b, k, n, c 为待定系数。

1.3.3 导热系数测定 参照 ISO22007-2:2022 中的瞬态平板热源法。测定时将两块厚度约为 12 mm 的山药片放在热常数分析仪的加热面上, 使山药片和加热面紧密贴合, 记录相应的温度、时间等参数, 通过数学模型拟合得到山药的导热系数。

1.3.4 比热容测定 采用差示扫描量热仪进行测定^[9]。称取山药样品 15~20 mg 密封于样品盒, 仪器先降温到 208.15 K, 恒温 5 min, 再以 2.0 K/min 升温至 368.15 K。以蓝宝石为标准样品。通过将已知比热容的标准样品与未知比热容的待测样品的测定结果进行比较, 计算出山药的比热容。

1.3.5 山药片热风干燥过程中的温度场模拟 使用 ANSYS Workbench 环境加载 Fluent 等模块进行干燥过程中的温度场模拟研究。

试验中将经预处理的山药片置于电热恒温干燥箱中, 加热至 60℃持续一定时间。试验中使用鼓风循环式

干燥箱,其主要由干燥室、风道系统、控制系统等组成,通过鼓风机将热空气送入干燥室,再将带有水蒸气的气体通过出风道排出干燥室,循环往复过程可将箱体内的物料干燥。由传热学知识可知,山药片在干燥箱内与热空气之间主要通过对流换热,传导热量较少。

利用ANSYS进行模拟分析时,在壁面条件已确定的条件下,可采用式(2)计算壁面的热通量。

$$q = h_{\text{ext}}(T_{\text{ext}} - T_w), \quad (2)$$

式中:

q ——热通量, W/m^2 ;

h_{ext} ——指定的外部对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

T_{ext} ——指定的外部温度, K ;

T_w ——热通量计算壁面上的温度, K [10]。

由式(2)可知,当外部温度和换热系数已知的条件下,即可用ANSYS软件进行对流换热的模拟分析。

为了进行干燥空间内部温度场的模拟分析,需要对

实际干燥空间结构进行合理的简化以建立物理模型,通过合理的假设以满足模拟计算所需初始条件及边界条件,假设如下:① 环境温度、热风温度不随时间而变化;② 鼓风机进风、出风速度稳定;③ 干燥空间气体为不可压缩的理想气体 [11]。

在热风干燥过程中将温度记录仪金属探头分别固定在山药片中心位置和干燥室的不同位置,记录温度的变化。利用ANSYS 19.2软件分析模拟干燥过程中山药片和干燥空间的温度场变化,并与试验收集到的数据进行比较,验证模拟结果的准确性。

2 结果与分析

2.1 山药片热风干燥传质动力学数学模型建立

2.1.1 干燥模型拟合 利用Origin 9.1软件,通过表1中的7种薄层数学干燥模型对试验数据分别进行非线性拟合,通过比较拟合参数最终确定最适的干燥模型。不同热风干燥温度下各干燥模型的拟合结果见表2。

表2 热风干燥数学模型拟合结果

Table 2 Fitting results of different drying models for hot-air drying

模型名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	R^2	RSS	模型系数
Page	40	0.999 78	0.000 28	$k=0.002\ 14, n=1.196\ 29$
	50	0.998 96	0.001 10	$k=0.007\ 09, n=1.056\ 08$
	60	0.999 86	0.000 12	$k=0.007\ 58, n=1.083\ 13$
	70	0.999 46	0.000 36	$k=0.029\ 04, n=0.906\ 18$
Modified Page	40	0.999 78	0.000 28	$k=0.005\ 87, n=1.196\ 16$
	50	0.998 96	0.001 09	$k=0.009\ 23, n=1.053\ 55$
	60	0.999 86	0.000 12	$k=0.011\ 03, n=1.082\ 61$
	70	0.999 46	0.000 36	$k=0.020\ 13, n=0.905\ 61$
Newton/Lewis	40	0.990 29	0.013 19	$k=0.005\ 98$
	50	0.998 34	0.001 92	$k=0.009\ 31$
	60	0.998 32	0.001 59	$k=0.011\ 18$
	70	0.998 01	0.001 56	$k=0.019\ 60$
Wang and Singh	40	0.998 33	0.002 10	$a=-0.004\ 62, b=5.708\ 24 \times 10^{-6}$
	50	0.982 97	0.017 98	$a=-0.006\ 74, b=1.175\ 00 \times 10^{-5}$
	60	0.992 20	0.006 56	$a=-0.012\ 76, b=4.042\ 28 \times 10^{-5}$
	70	0.951 65	0.032 57	$a=-0.008\ 33, b=1.823\ 13 \times 10^{-5}$
Henderson and Pabis	40	0.993 37	0.008 36	$k=0.006\ 29, a=1.050\ 36$
	50	0.998 62	0.001 45	$k=0.009\ 47, a=1.017\ 74$
	60	0.998 53	0.001 24	$k=0.011\ 35, a=1.016\ 17$
	70	0.997 83	0.001 46	$k=0.019\ 42, a=0.990\ 29$
Two-term model	40	0.992 16	0.008 36	$k_1=k_2=0.006\ 29, a_1=a_2=0.525\ 15$
	50	0.998 38	0.001 40	$k_1=0.008\ 03, k_2=0.008\ 33, a_1=-3.469\ 99, a_2=4.485\ 48$
	60	0.999 19	0.000 51	$k_1=0.008\ 04, k_2=0.008\ 28, a_1=-10.218\ 90, a_2=11.226\ 76$
	70	0.998 99	0.000 46	$k_1=1.047\ 43 \times 10^{-12}, k_2=0.017\ 79, a_1=0.098\ 59, a_2=0.901\ 41$
Logarithmic	40	0.997 68	0.002 70	$k=0.005\ 13, a=1.120\ 24, c=-0.092\ 98$
	50	0.998 49	0.001 45	$k=0.009\ 44, a=1.018\ 51, c=-0.001\ 20$
	60	0.999 08	0.000 68	$k=0.010\ 65, a=1.034\ 25, c=-0.024\ 63$
	70	0.999 33	0.000 37	$k=0.021\ 00, a=0.972\ 12, c=0.024\ 66$

比较分析各干燥模型的拟合参数可以得出,Modified Page 模型的拟合度(R^2)在各模型中最高,为 0.998 96~0.999 86,同时残差平方和(RSS)最低,为 0.000 12~0.001 09。因此,Modified Page 模型能准确预测不同温度条件下热风干燥过程中山药片的水分变化情况。干燥常数 k 是一个非常重要的参数,可以用来衡量干燥过程中从食品中排除水分能力的大小和水分扩散速度的快慢^[12]。由表 2 可以看出,所选模型的 k 值均随干燥温度的升高而增大,表明干燥温度越高,从食品中排出水分的能力越大,水分扩散速度越快,从而干燥速度也越快。

2.1.2 模型准确性的验证 为了验证 Modified Page 模型拟合的准确性,绘制不同热风干燥温度下山药片水分比的实测值和预测值对比曲线,结果见图 1。

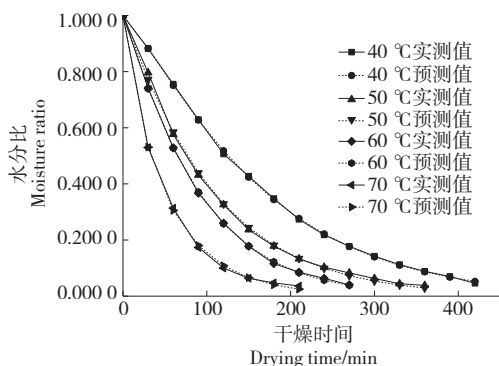


图 1 不同热风干燥温度下山药片的预测值和实测值
Figure 1 Predicted value and experimental data of yam slices by hot-air drying at different temperatures

由图 1 可以看出,Modified Page 模型的预测值和实测值比较接近,再次验证了 Modified Page 模型能很好地描述山药片在不同温度下的热风干燥过程。而陈艳珍等^[13]、樊迎^[14]、陈雪涛^[15]、Srikanth 等^[16]研究发现,Page 模型适用于描述山药热风干燥过程;Fang 等^[17]发现可用 Wang and Singh 模型描述山药热风干燥过程;Zhu 等^[18]则认为描述山药热风干燥过程的最适模型为 Logarithmic 模型。分析原因可能是山药不同品种间的物理特性及干燥条件存在一定的差异所致。

2.2 导热系数

山药的导热系数随温度变化的趋势如图 2 所示。在 -30~60 °C 范围内,山药的导热系数在 0.465 9~0.507 1 W/(m·K) 范围内,且随着温度的升高,导热系数逐渐变大,两者之间存在着良好的线性关系($y = 4.489 39 \times 10^{-4}x + 0.479 57, R^2 = 0.998 7$)。这可能与分子热运动有关,当温度升高时,物料内部固体分子和孔隙中气体分子的热运动加快,温度越高,分子热运动越剧烈,气体分子的导热作用越显著,孔壁间的辐射作用也随之增强^[19]。

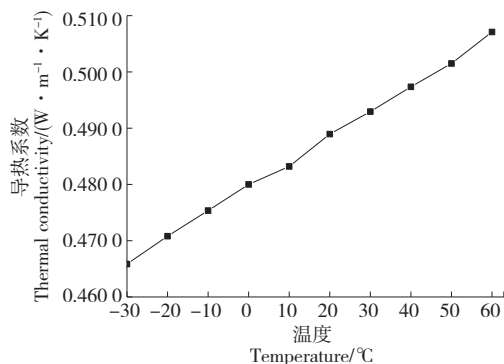


图 2 不同温度下山药的导热系数
Figure 2 Thermal conductivity of yam at different temperatures

2.3 比热容

山药的比热容随温度的变化情况如图 3 所示。在冻结区,随温度的升高山药的比热容缓慢变大;在 0 °C 左右山药的冰晶吸热融化后相变为液态水,相变过程中释放出大量潜热,比热容急剧增大;相变后比热容又急剧下降,与莲藕^[20]、蚕豆^[21]的比热容变化趋势相似。而在 10~80 °C 非相变区,随温度的升高山药的比热容逐渐增大。

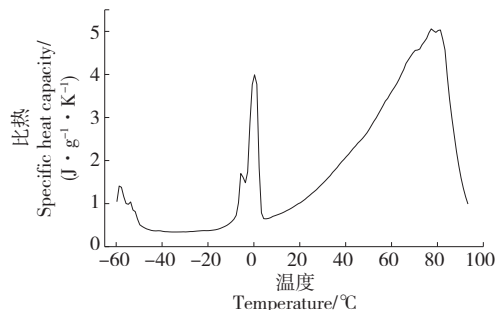


图 3 不同温度下山药的比热容
Figure 3 Specific heat capacity of yam at different temperatures

2.4 热风干燥过程中干燥空间的温度场分布模拟

2.4.1 建立三维几何模型 试验中恒温鼓风干燥箱的干燥室是由不锈钢制作而成的长方体,尺寸为 400 mm×400 mm×450 mm;干燥室左右两边进风(3 m/s),中间出风,其风道结构复杂,在建立三维模型时简化为左右两侧长方形进风;内部挡板为不锈钢柱组成的疏网状结构,对温度影响不大,故在建模时省略;三维模型图如图 4 所示。SolidWorks 与 ANSYS 有良好的软件接口,首先在 SolidWorks 中创建 3D 模型,然后通过接口导入 ANSYS Workbench 中,后续均如此操作。

2.4.2 网格划分 划分网格时,要充分考虑网格的生成时间、计算耗时及成本等相关因素^[22]。将三维模型导入

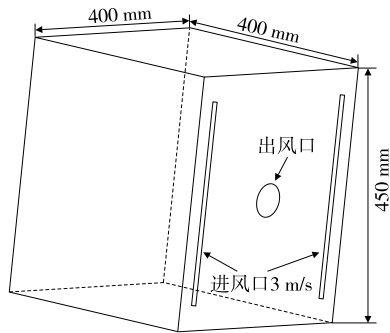


图4 热风干燥室三维图

Figure 4 3D diagram of hot-air drying chamber

Workbench 环境下的 mesh 模块, 设置划分方法为 Automatic Method, 以 Edge Sizing 方法控制模型边上网格大小, 对进风口和出风口采用分块网格划分, 以提高计算精度, 共有网格 28 009 个; 有限元模型如图 5 所示。经检验, 网格质量良好。

2.4.3 参数设置 流体域设置为常温状态下的空气。求

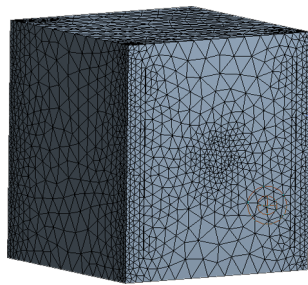


图5 干燥空间有限元模型

Figure 5 Finite element model of drying chamber

解器类型、速度类型、时间类型默认选择 Pressure-based、Steady、Absolute。层流模型: Laminar, 激活 Energy 能量方程, 不计重力。设置边界条件, 设定速度入口 (velocity-inlet) 为进风口边界条件, $V=3 \text{ m/s}$, 温度为 333.15 K , 出风口边界条件为自由出流边界 outflow; 设定最外边界 wall (默认粗糙度为 0, 即壁面无滑移条件), 温度为 298.15 K ; 压力修正算法选用 Coupled, 残差标准设置为 1×10^{-4} 。

2.4.4 计算求解与分析 为了研究干燥室内温度场分布, 以流速 3 m/s 、温度 333.15 K 的热空气进入初始温度为 298.15 K 箱体内部, 在 Workbench 中将 Fluent 计算结果导入 CFD-POST 模块, 设置高度为 90, 180, 225, 270, 360 mm 处水平面及平行于出风口 100, 200, 300 mm 处的竖直平面为观测面。干燥室整体温度场分布如图 6 所示。

以水平面高度 (H 分别为 90, 180, 225, 270, 360 mm) 为研究对象, 温度场分布如图 7 所示。

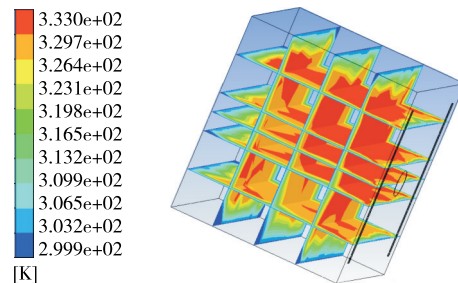


图6 干燥室内温度场分布

Figure 6 Temperature field distribution of drying chamber

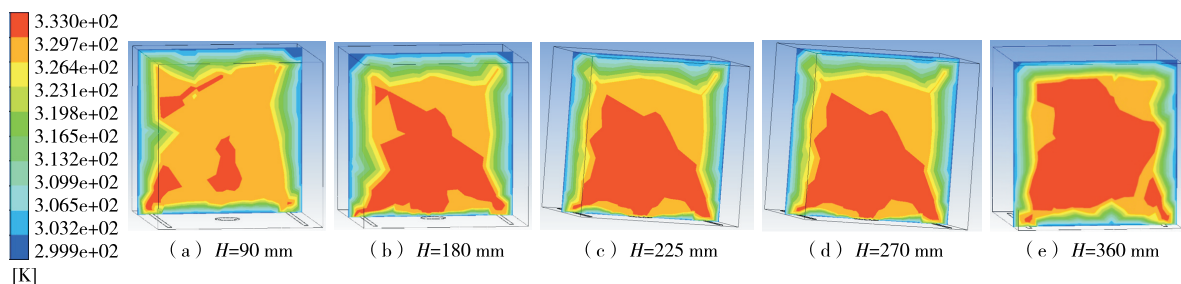


图7 5个不同高度平面温度场分布

Figure 7 Temperature field distributions with different heights

由图 7 可以看出, 最高温度 333 K , 最低温度 299 K , 这是由于边界条件 wall 温度设置为 298.15 K 所致, 可以认为达到了一种动态的平衡。图 7 中 $H=225 \text{ mm}$ 的图显示了干燥室正中间水平面温度分布情况, 除出风口一侧外, 其余三面越靠近中心位置温度越高, 并且离出风口位置越近温度越高, 造成这种现象的原因是热空气进入干燥室后, 一部分与温度低的空气产生对流; 另一部分空气

则在压力作用下流出干燥室, 未充分发生热交换。出风口处左右两侧温度低于出风口处, 分析可能是产生类似漩涡的气体流动, 使此处温度比出口处低 3°C 左右。而其他水平面高度的温度分布图均具有相同的规律。比较不同水平高度的温度分布图的温度最高处面积, 发现从下到上温度最高处面积依次增大, 可能是由于干燥室内温度升高的同时热空气上升所导致。

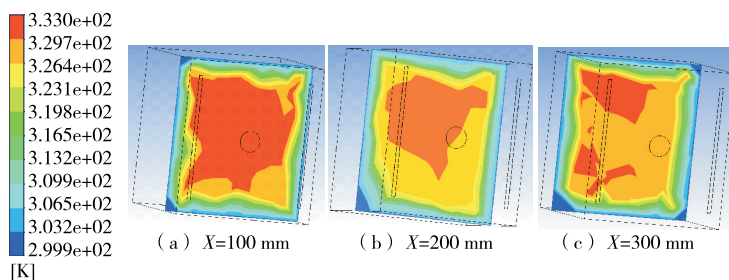


图 8 3个竖直平面温度场分布

Figure 8 Temperature field distributions at three vertical planes

以平行于出风口(X 分别为100,200,300 mm)处竖直平面为研究对象,温度场分布如图8所示。分析发现,干燥室内中心区域温度最高,其边缘区域特别是顶点处温度最低。顶点温度最低是由于此处热空气流速较小,更偏向于自然对流;而中心区域因为热空气流速较高,属于强制对流现象。结合3个平面与出风口的距离来看,温度最高分布区域随距离增大而明显减小,由于出风口与进风口在同一平面上,分析认为热空气进入干燥室后并未在室内完全流动就经出风口流出,热交换过程不完全,是导致室内温度分布不均的主要原因。

2.4.5 模拟准确性验证 试验中,以干燥室内的一个通道测定其温度变化值,与模拟值进行比较,验证模拟的准确性。图9为实测温度与模拟温度间的比较。

分析图9可知,实测值与模拟值具有共同的变化趋势,最大误差不超过 5°C ,模拟结果准确度较高。二者在前4 min内变化程度超70%,4~10 min时变化程度较缓,10~16 min时几乎无变化。分析产生这种现象的原因是:前4 min内冷热空气间温差大,对流换热速度快,热量交换多;而4 min后温差小,冷热空气间更趋向自然对流,速度慢、交换热量少,故前期温度变化快于后期。实测值与模拟值之间产生误差是由于干燥箱的箱壁造成部分热量散失,而模拟时为理想状态,再加上简化模型及边界条件等的设置也与实际情况存在偏差。

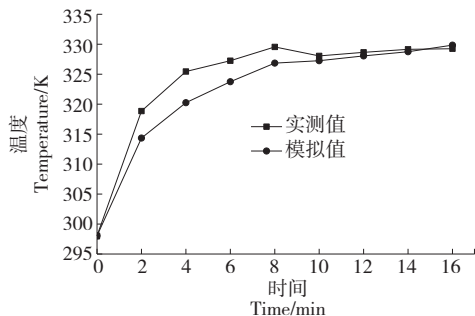


图 9 干燥室实测温度与模拟温度的比较

Figure 9 Comparison of measured temperatures and simulated temperatures of drying chamber

2.5 热风干燥过程中山药片内部温度场分布模拟

2.5.1 建立山药片几何模型 山药切片为圆柱体,半径约为20 mm,高度为5 mm。在SolidWorks中创建的山药模型如图10所示,有限元模型如图11所示。经检验,网格质量良好。

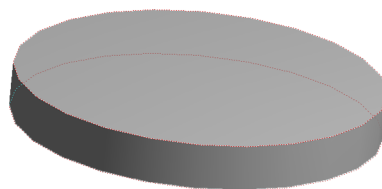


图 10 山药切片三维图

Figure 10 3D diagram of yam slice

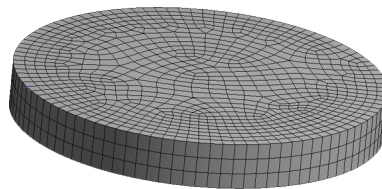


图 11 山药切片有限元模型

Figure 11 Finite element model of yam slice

2.5.2 参数设置 由于需要模拟山药片在各个时间点的内部温度分布,可以使用Workbench中的Transient Thermal模块来计算。经试验测定,山药比热容取 $1250\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,密度为 $1148\text{ kg}/\text{m}^3$,导热系数取 $0.049\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;平均对流换热系数取 $56\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,初始温度 299.15 K ,环境温度 333.15 K ,以Convection求解器计算。

2.5.3 计算求解与分析 为了便于观测,计算完成后以1/2山药片为研究对象。以 t 分别为300,600,1200,2400,3600 s时的计算结果来分析山药片内部温度变化,如图12所示。

由图12可以发现,5个时间点山药片的最高温度、最低温度均分别位于外表面和中心处,且随着时间的变化由外及内逐渐升高,表明干燥过程中热量传递是由外向内的传导过程^[23]。时间为300 s时,最外层温度为

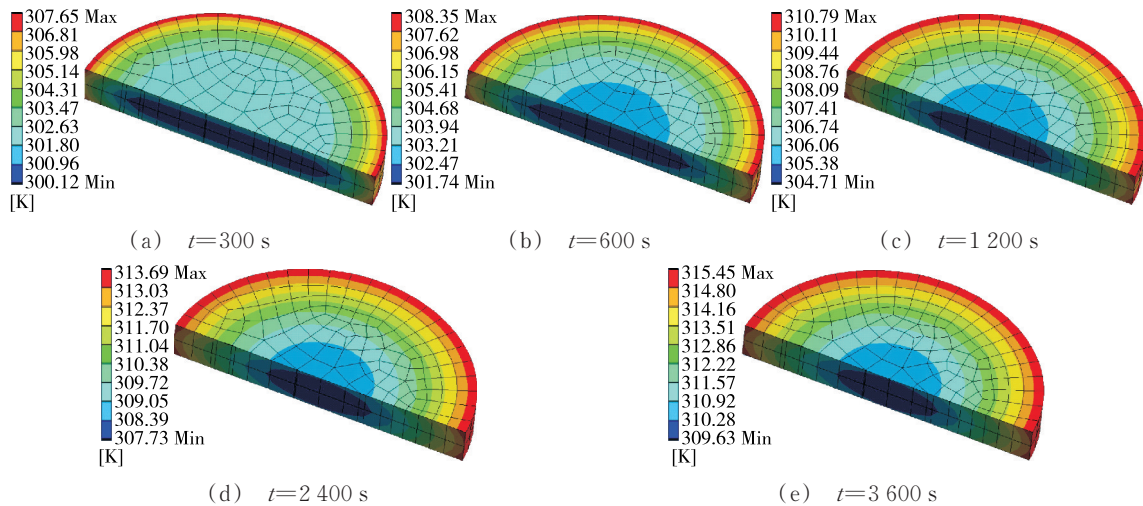


图 12 各时间下山药片内部温度场分布

Figure 12 Temperature field distributions of yam slices at different times

307.65 K, 中心处温度为 300.12 K, 温差为 7.43 K; 其余 4 个时间点温差分别为 6.61, 6.18, 5.96, 5.82 K, 温差逐渐缩小。并且干燥初期山药片中心温度上升较快, 后期上升较慢且逐渐接近于热空气的温度。Ju 等^[24]和张卫鹏等^[25]分别对热风干燥过程中山药片内部温度分布进行了模拟, 也发现了相同的规律。分析原因是由于干燥初期外界热空气提供热量, 热量沿着毛细管逐渐向物料内部扩散, 形成温度梯度^[26]。当物料温度超过水分蒸发需要的温度时, 物料中的水分开始从表面蒸发。由于干燥初期物料内部存在大量的自由水和空气, 温度升高时水蒸气和空气膨胀, 物料内部压力上升, 促使内部的水分逐渐向表面迁移而蒸发, 形成水分梯度^[27]。干燥中后期, 内部水分扩散速度下降, 低于表面汽化速度, 物料温度缓慢升至热空气的温度, 干燥过程结束。

2.5.4 模拟准确性验证 以时间间隔 20 min (最开始段间隔 5, 10 min) 绘制山药片内部温度模拟数据与实测数据对比曲线, 如图 13 所示。

由图 13 可以看出, 实测值与模拟值之间温差最大达 7.75 °C, 最小仅为 0.07 °C, 模拟结果准确度较高。且二者变化趋势具有一致性, 均表现为随时间增加而增加, 但增加速率均随时间增加而减小。大约在 2.5 h 时, 二者具有相同的温度, 2.5 h 之前实测值的增加速率要高于模拟值, 2.5 h 后则完全相反, 分析可能是由于温度记录仪探头中的金属等物质的导热系数高于山药, 热量吸收快, 导致实测温度在干燥前期高于模拟温度, 造成数据偏差较大。干燥后期, 模拟过程一直以理想状态进行对流换热, 无热量损失, 而试验过程中不可避免地受环境温度、干燥室内气流等的影响, 是导致后期模拟值较实测值高的原因。通过观察曲线斜率可知, 温度变化速度随时间增加而减

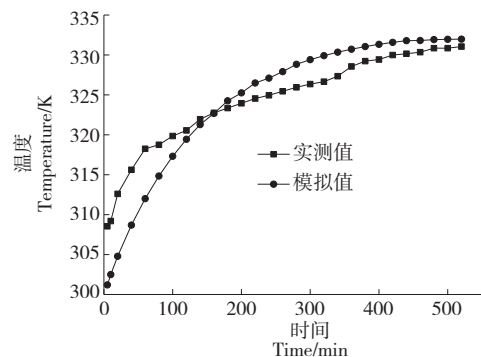


图 13 干燥过程中山药片实测温度与模拟温度对比曲线

Figure 13 Comparison of measured temperatures and simulated temperatures of yam slices

缓, 最后趋近于 0。通过分析山药片干燥过程可知, 干燥前期属于强制对流, 热交换速率快, 随着山药片温度逐渐趋于热空气, 二者之间逐渐达成热平衡状态, 即曲线末端近水平状。若以山药片与干燥室温度 (333.15 K) 达到一致为完全干燥时间, 需要 400 min 左右。这与试验中将山药片水分含量降至 10% 以下需干燥 390 min 的结果一致, 再次验证了模拟结果的准确性。

3 结论

(1) Modified Page 模型能准确地预测不同温度条件下热风干燥过程中山药片的水分变化情况。在 -30~60 °C 范围内, 随着温度的升高, 山药的导热系数逐渐变大。在冻结区, 随温度的升高山药的比热容缓慢变大; 在 0 °C 左右比热容急剧增大, 而后又急剧下降; 在 10~80 °C 非相变区, 随温度的升高山药的比热容逐渐增大。

(2) 热风干燥过程中干燥室空间内部温度总体呈水

平面上距进出风口近处温度高,远处温度稍低,竖直面呈上高下低的状态,但温差均不大。热风干燥过程中山药片中心处温度最低,外表面温度最高,内外层温差逐渐缩小,前期温度变化较快而后期缓慢,结合实测值与模拟值曲线图,可以看出同样的趋势,且两者之间温差最大达 7.75℃,最小仅为 0.07℃,说明模拟结果准确度较高。由于模拟时未考虑到山药片在加工过程中的收缩变形,因此较适用于干燥前期,而干燥中后期模拟时要考虑山药的结构形变。

参考文献

- [1] 任炜,段续.冻干怀山药贮藏条件研究[J].食品研究与开发,2016,37(2):187-190.
REN W, DUAN X. Study on the critical preservation conditions for freeze dried Chinese yam[J]. Food Research and Development, 2016, 37(2): 187-190.
- [2] 朱文学.食品干燥原理与技术[M].北京:科学出版社,2009:3-4.
ZHU W X. Principles and techniques of food drying[M]. Beijing: Science Press, 2009: 3-4.
- [3] 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 D L, WANG W J, WANG S Y, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(1): 314-323.
- [4] 罗燕.当归切片真空远红外干燥特性及传热传质机理研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021:40-49.
LUO Y. Study on dry characteristics and heat and mass transfer mechanism of *Angelica sinensis* slices in vacuum far infrared drying[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021: 40-49.
- [5] YUAN Y J, TAN L B, XU Y D, 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.
- [6] JU H Y, VIDYARTHI S K, KARIM M A, et al. Drying quality and energy consumption efficient improvements in hot air drying of papaya slices by step-down relative humidity based on heat and mass transfer characteristics and 3D simulation[J]. Drying Technology, 2023, 41(3): 460-476.
- [7] 张丽丽,王相友,张海鹏.山药切片红外干燥温度神经网络预测[J].农业机械学报,2014,45(11):246-249,336.
ZHANG L L, WANG X Y, ZHANG H P. Temperature prediction of yam under infrared drying based on neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 246-249, 336.
- [8] 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.
- [9] 张敏,钟志友,杨乐,等.果蔬比热容的影响因素[J].食品科学,2011,32(11):9-13.
ZHANG M, ZHONG Z Y, YANG L, et al. Affecting factors of heat capacity of fruits and vegetables[J]. Food Science, 2011, 32(11): 9-13.
- [10] 胡坤,胡婷婷,马海峰,等.ANSYS CFD 入门指南 计算流体力学基础及应用[M].北京:机械工业出版社,2018:113.
HU K, HU T T, MA H F, et al. ANSYS CFD computational fluid dynamics with applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 113.
- [11] 李赫,张志,任源,等.基于 FLUENT 的菊花热风干燥流场特性仿真分析[J].食品与机械,2018,34(10):133-138.
LI H, ZHANG Z, REN Y, et al. Simulation analysis of flow field characteristics of chrysanthemum drying based on FLUENT[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 133-138.
- [12] KARASU S, KILICLI M, BASLAR M, et al. Dehydration kinetics and changes of bioactive compounds of tulip and poppy petals as a natural colorant under vacuum and oven conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2 096-2 106.
- [13] 陈艳珍,任广跃,张仲欣,等.怀山药干燥处理模型的建立与评价[J].河南科技大学学报(自然科学版),2010,31(1):77-80,119.
CHEN Y Z, REN G Y, ZHANG Z X, et al. Establishment and evaluation on experimental model of drying for Chinese yam [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 31(1): 77-80, 119.
- [14] 樊迎.山药切片热风干燥动力学试验[J].山西农业科学,2016,44(4):528-531.
FAN Y. Study on the dynamics test of sirocco drying of sliced yam[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 528-531.
- [15] 陈雪涛.富含淀粉中药材山药和浙贝母的干燥研究[D].天津:天津大学,2017:67-77.
CHEN X T. Study on the drying technology for two TCM materials that are rich in starch in *Dioscorea opposita* Thunb. and *Fritillaria thunbergii* Miq.[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017: 67-77.
- [16] SRIKANTH K S, SHARANAGAT V S, KUMAR Y, et al. Convective drying and quality attributes of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 8-16.
- [17] FANG S, WANG L P, WU T. Mathematical modeling and effect of blanching pretreatment on the drying kinetics of Chinese yam (*Dioscorea opposita*) [J]. Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 2015, 21(4): 511-518.
- [18] ZHU A S, ZHAO J Z, WU Y F. Modeling and mass transfer performance of *Dioscorea alata* L. slices drying in convection

- air dryer[J]. Journal of Food Process Engineering 2020, 43: e13427.
- [19] 顾园华, 宋春芳, 崔政伟. 基于温度和水分紫薯热物理特性与介电特性的分析[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(1): 97-103.
- GU Y H, SONG C F, CUI Z W. Analysis of thermal and dielectric properties based on temperature and moisture of purple sweet potato[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(1): 97-103.
- [20] 刘春菊, 钱旻, 宋江峰, 等. 水分含量对冷冻莲藕片表观比热容的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2 206-2 212.
- LIU C J, QIAN M, SONG J F, et al. Effect of different moisture content on the apparent specific heat of frozen lotus root slices[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(11): 2 206-2 212.
- [21] 刘圣春, 张子涵, 王雅博, 等. 冷冻速率对蚕豆热物性变化规律影响的实验研究[J]. 低温与超导, 2019, 47(3): 39-43, 83.
- LIU S C, ZHANG Z H, WANG Y B, et al. Experimental study on the effect of freezing rate on thermal properties of vicia faba [J]. Cryo & Supercond, 2019, 47(3): 39-43, 83.
- [22] 戴志远, 潘锋, 于梦阁, 等. 计算区域尺寸对列车绕流数值模拟的影响[J]. 现代交通技术, 2019, 16(5): 88-92.
- DAI Z Y, PAN F, YU M G, et al. Influence of computational domain size on numerical simulation of flow around trains[J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16(5): 88-92.
- [23] 刘鹤, 焦俊华, 田友, 等. 杏鲍菇热风干燥中热质传递的实验及模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(4): 1 074-1 081.
- LIU H, JIAO J H, TIAN Y, et al. Experimental and simulation study on heat and mass transfer in *Pleurotus eryngii* during hot air drying[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44 (4): 1 074-1 081.
- [24] 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]. Drying Technology, 2016, 34(11): 1 297-1 306.
- [25] 张卫鹏, 韩梦悦, 巨浩羽, 等. 山药片阶段降湿烘干特性及多物理场耦合模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 115-122, 240.
- ZHANG W P, HAN M Y, JU H Y, et al. Drying efficient improvements with step-down relative humidity and multi-field coupling model construction during hot air drying of yam slices[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 115-122, 240.
- [26] 卫志娇. 花生荚果干燥过程传热传质机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022: 39-44.
- WEI Z J. Study on heat and mass transfer mechanism of peanut pod drying process[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022: 39-44.
- [27] 张大鹏. 苹果切片热风干燥过程中的热湿传递研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020: 28-33.
- ZHANG D P. Study on heat and moisture transfer in apple slices during hot air drying[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020: 28-33.
- (上接第 112 页)
- [23] 乔琛, 韩梦瑶, 高苇, 等. 基于 Faster-NAM-YOLO 的黄瓜霜霉病菌孢子检测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 288-299.
- QIAO C, HAN M Y, GAO W, et al. Quantitative detection of cucumber downy mildew spores at multi-scale based on Faster-NAM-YOLO[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 288-299.
- [24] MA X, GUO F M, NIU W, et al. Pconv: the missing but desirable sparsity in DNN weight pruning for real-time execution on mobile devices[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(4): 5 117-5 124.
- [25] ZHENG Z H, WANG P, LIU W, et al. Distance-iou loss: faster and better learning for bounding box regression[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(7): 12 993-13 000.
- [26] 程雪, 范翠蝶, 宁中华. 雀斑蛋品质及其影响因素研究[J]. 中国家禽, 2019, 41(19): 6-9.
- CHENG X, FAN C D, NING Z H, et al. Quality of freckle eggs and its influencing factors[J]. China Poultry, 2019, 41 (19): 6-9.
- [27] 常利民, 张洋, 汪春明, 等. 鸡蛋、鸡肉及奶粉中 22 种有机氯农药残留的测定[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 98-105.
- CHANG L M, ZHANG Y, WANG C M, et al. Determination of 22 organochlorine pesticides in egg, chicken and milk powder[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(5): 98-105.
- [28] FANG M T, CHENZ J, PRZYSTUPA K, et al. Examination of abnormal behavior detection based on improved YOLOv3[J]. Electronics(Basel), 2021, 10(2): 197.
- [29] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver: IEEE, 2023: 7 464-7 475.
- [30] HUSSAIN M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the rise of YOLO and its complementary nature toward digital manufacturing and industrial defect detection[J]. Machines, 2023, 11(7): 677.
- [31] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-cam: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. Int J Comput Vis, 2020, 128(2): 336-359.
- [32] 王猛, 高树静, 张俊虎, 等. 基于改进 YOLOv5 的安全绳目标检测[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 42-50.
- WANG M, GAO S J, ZHANG J H, et al. Safe rope target detection based on improved YOLOv5[J]. Computer Measurement & Control, 2024, 32(6): 42-50.