

微波加热土豆泥过程中温度和失水量数值模拟

赵忠健^{1a}, 付志强^{1a,b*}, 姬羽西^{1a}, 刘昊喆^{1a}, 周传浩^{1a}, 郭晋婷^{1a}, 段利英²

(1.天津科技大学 a.轻工科学与工程学院 b.包装创新设计实验室, 天津 300457;

2.唐山学院 机电工程学院, 河北 唐山 063000)

摘要: **目的** 探究微波加热不同体积分数的多孔介质食品的温度和失水量变化。**方法** 本文采用盘装土豆泥为研究对象, 在 COMSOL Multiphysics 6.0 软件中建立耦合电磁场、流场、传热和传质的三维多孔介质有限元模型, 通过实验验证该模型的准确性, 并预测不同体积分数的土豆泥的温度分布、特征点的瞬态温度变化和失水量变化。**结果** 600 s 内土豆泥上表面温度分布的仿真与实验结果一致, 且冷点和热点 RMSE 值分别为 1.23 °C 和 1.92 °C, 平均误差分别为 3.9% 和 3.7%。5 个特征点的瞬态温度变化仿真与实验结果的 RMSE 值最大为 1.146 °C, 温度均匀系数 C_{OVT} 的 RMSE 值为 0.008 1; 仿真失水量变化与实验结果的 RMSE 值为 0.963 1 g, 平均误差为 3.69%, 表明仿真模型具有可靠性。基于此模型, 发现随着土豆泥体积分数增大, 冷热点的温度呈现非线性升高。不同体积分数下的 5 个特征点瞬态温度在 360 s 前均呈现非线性升高, 360 s 后温度逐渐平稳; 失水量在 60 s 后明显增大, 在 360 s 后呈线性增长。**结论** 体积分数和加热时长对土豆泥的微波加热过程有明显影响。为食品包装开发人员从空间和时间上了解食品的微波加热过程提供了理论基础, 为食品包装材料或结构设计提供了帮助。

关键词: 多孔介质; 加热时长; 温度分布; 失水量; 体积分数

中图分类号: TB484; TS206 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)11-0136-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.016

Numerical Simulation of Temperature and Moisture Loss During Microwave Heating of Mashed Potatoes

ZHAO Zhongjian^{1a}, FU Zhiqiang^{1a,b*}, JI Yuxi^{1a}, LIU Haozhe^{1a}, ZHOU Chuanhao^{1a},
GUO Jinting^{1a}, DUAN Liying²

(1. a. College of Light Industry Science and Engineering, b. Laboratory for Innovative Design of Package, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Mechanical & Electronics Engineering College, Tangshan University, Hebei Tangshan 063000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the changes of temperature and moisture loss of porous media food with different water contents by microwave heating. A three-dimensional porous media finite element model of coupled electromagnetic field, flow field, heat and mass transfer was established in COMSOL Multiphysics 6.0. The accuracy of the model was verified through experiments. The temperature distribution of mashed potatoes with different volume fractions, the transient temperature change of characteristic points and the change of moisture loss were predicted. The results showed that the temperature distribution on the surface of mashed potatoes in 600 s was consistent with the experimental results, and the RMSE of the cold point and hot point were 1.23 °C and 1.92 °C, respectively, with an average error of 3.9% and

收稿日期: 2023-01-30

基金项目: 天津市教委科研计划 (自然科学) (2019KJ209)

*通信作者

3.7%。The RMSE maximum value of the simulation and experimental results of the transient temperature changes of the five feature points was 1.146 °C, and the RMSE value of the temperature uniformity coefficient COVT was 0.008 1. The RMSE value of simulated moisture loss changes and experimental results was 0.963 1 g, and the average error was 3.69%, which indicated that the simulation model was reliable. Based on this model, it was found that with the increase of mashed potato volume fraction, the temperature of the cold hot spot presented a nonlinear increase. The transient temperature of 5 characteristic points at different volume fractions increased nonlinearly before 360 s, and became stable after 360 s. The moisture loss increased significantly after 60 s and linearly after 360 s. Volume fraction and heating time have obvious influence on the microwave heating process of mashed potatoes. It provides a theoretical basis for food packaging developers to understand the microwave heating process of food from space and time, and provides help for food packaging materials or structural design.

KEY WORDS: porous media; heating time; temperature distribution; moisture loss; volume fraction

随着人们生活水平的提高, 生活节奏越来越快, 市场上可用加热即食的食品正在迅速发展。由于微波炉具加热速度快、节能减排等优势, 给人们生活带来了方便, 因此其成为加热食品最受欢迎的器具^[1]。但是, 微波加热速度快的同时会出现加热过程中食品内部温度分布不均匀和严重的水分损失现象, 这可能导致食品出现过度成熟和未成熟的情况^[2-4]。

孙鹏等^[5]基于 COMSOL 仿真软件建立了耦合电磁和热传导等物理量的有限元模型, 分析了不同尺寸样品对微波加热效率的影响。模型中仅考虑了热传导, 未考虑食品在加热时, 对流对传热的促进作用。张柯等^[6]基于 COMSOL 建立了电磁和传热耦合的有限元模型, 考虑了食品表面与空气的热对流, 分析了带包装食品的微波加热 60 s 过程, 并进行了实验验证。Pitchai 等^[2]基于 COMSOL 建立了耦合电磁和传热的有限元模型, 研究微波加热 60 s 过程中微波对土豆泥和鸡块温度均匀性的影响。但两者在模型中未考虑到多孔介质食品内部水蒸发相变发生的质量传递。Chen 等^[7]基于 COMSOL 仿真软件建立了微波加热土豆泥的有限元模型, 分析了在微波加热 180 s 过程中蒸发速率常数、水和气体的固有渗透率、水和气体的扩散系数对温度和失水量的影响。梁怡良等^[8]在 Chen 的模型基础上借助 COMSOL 仿真软件, 模拟了有无包装盖膜的食品微波炉加热 240 s 过程, 分析了包装对微波加热均匀性的影响。但两者未考虑多孔介质食品体积分数变化和加热时间对微波加热土豆泥温度均匀性和失水量的影响。

本文以不同体积分数 (0.3~0.6) 土豆泥食品为研究对象, 借助 COMSOL Multiphysics 6.0 软件, 耦合电磁场、流场、传热和传质多种物理模型, 建立微波加热多孔介质食品三维有限元仿真模型, 并进行实验验证。在此基础上, 探究了以玻璃盘为包装的不同体积分数土豆泥在微波加热 600 s 过程中上表面温度分布, 特征点温度变化以及失水量变化规律。研究结果可为同类型的食品包装微波加热过程提供理论基础。

1 实验

1.1 实验材料

主要材料: 食品级 120 目马铃薯粉, 甘肃正阳现代农业服务有限公司; 去离子水; 玻璃盘 (200 mm×200 mm×15 mm); 玻璃板, 厚度为 5 mm。

1.2 样品制备

使用电子分析天平称量马铃薯全粉与去离子水, 按 1:1 质量混合均匀, 制备成 379 g 土豆泥 (长×宽×高=190 mm×190 mm×10 mm)。将土豆泥装入玻璃盘内与玻璃盘高度齐平, 放入 23 °C 恒温恒湿箱内处理, 并用塑料膜密封以防止水分散失。

1.3 实验设备

主要仪器和设备: AR2130 电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司; ETH-080-ST 恒温恒湿箱, 巨贸仪器 (北京) 有限公司; TEMPOS 热性能分析仪, METER (美国) 公司; LY310 微波综合设备 (额定功率为 800 W, 频率为 2.45 GHz), 天津乐为智联科技有限公司; M1-L213C 微波炉, 广东美的厨房电器制造有限公司; 光纤温度传感器, 加拿大 FISO 公司; TESTO 红外热成像仪, 德国德图公司。

1.4 实验方法

1.4.1 热物理性能测量

使用 METER 热性能分析仪测量土豆泥的比热容、导热系数和扩散系数。将恒温处理好的土豆泥样品从恒温箱取出, 用热性能分析仪的 KS-3 型号探头垂直插入土豆泥的中心位置并储存数据, 每个样品测量 3 次取平均值。

1.4.2 温度测量

将 10 组土豆泥样品从恒温恒湿箱中取出放入保温箱中, 揭下保鲜膜放入微波炉中心位置分别加热

60、120、180、240、300、360、420、480、540 和 600 s 后,用红外热成像仪拍摄温度分布云图并储存数据。

仿真计算得出的温度分布云图不能得出随土豆泥体积分数变化对微波加热温度均匀性的影响,因此通过仿真得出 5 个特征点瞬态温度变化曲线来计算微波加热温度均匀性,在特征点位置插入光纤温度传感器探头,深度为 5 mm,到土豆泥样品中心位置,微波炉中加热 600 s,如图 1 所示。提取 5 个特征点的温度瞬时温度变化曲线,重复 3 次取平均值,采用温度均匀系数 C_{OVT} 评价土豆泥温度分布均匀程度^[9]。

$$C_{OVT} = \frac{1}{\bar{T}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (1)$$

式中: T_i 为特征点温度, °C; $\bar{T}$ 为总特征点的平均值, °C; N 为数据总量, $N=5$ 。

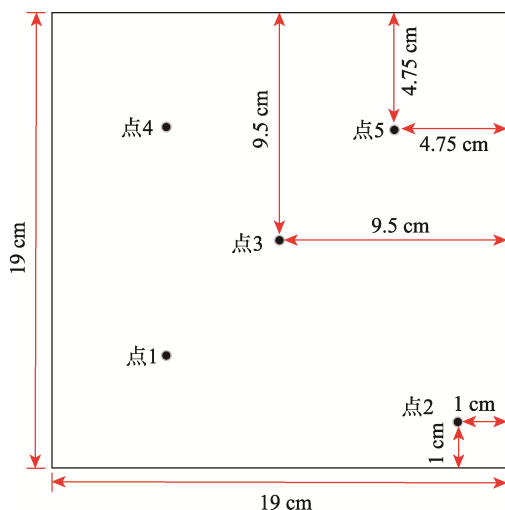


图 1 光纤测温位置

Fig.1 Position diagram of optical fiber temperature measurement

1.4.3 失水量测量

微波炉加热 600 s, 每加热 60 s 后称量, 储存数据并计算失水量, 重复 3 次取平均值。失水量计算见式 (2)^[4]。

$$M = m_1 - m_2 \quad (2)$$

式中: M 为失水量, g; m_1 为加热前土豆泥质量, g; m_2 为加热后土豆泥质量。

1.4.4 体积分数测量

体积分数计算见式 (3)。

$$V_a = \frac{m_a}{m_a + m_b} \quad (3)$$

式中: V_a 为土豆泥的体积分数; m_a 为土豆粉质量, g; m_b 为土豆粉质量, g。

1.5 微波加热土豆泥数值模型构建

借助 COMSOL Multiphysics 软件进行微波加热食品仿真计算过程, 主要包含以下几种数学模型: 模拟微波谐振腔内部场强分布的电磁数学模型、模拟温度变化过程的传热模型、模拟水分变化过程的传质模型和模拟流体变化的流场模型。本文通过电磁场、流场、传热和传质多种物理模型的耦合来预测微波加热多孔介质食品温度变化和水分变化。

1.5.1 控制方程与边界条件

微波加热多孔介质食品时, 腔体内部为无源区域。一般情况下, 通过求解麦克斯韦波动方程组, 可以得到微波谐振腔内的电场分布, 由式 (4) 所示^[8]。

$$\begin{cases} \nabla \times E = -j\omega\mu H \\ \nabla \times H = j\omega\epsilon_0\epsilon' E \\ \nabla \cdot (\epsilon' E) = 0 \\ \nabla \cdot H = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 为电场强度, V/m; j 为电流密度, A/m²; ω 为角频率, rad/s; μ 为磁导率, H/m; H 为磁场强度, A/m; ϵ_0 为真空介电常数, F/m; ϵ' 为相对介电常数。这些特性都取决于辐射频率和温度^[10]。

微波炉内腔和波导内壁均为金属材料, 使用阻抗边界条件^[11], 食品和包装材料中部分电磁能会转化成热能。电磁能转化成热能的量与介电损耗因子及电场强度的平方成正比, 见式 (5)^[12]。

$$P_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (5)$$

式中: P_v 为微波耗散能量, J; f 为微波频率, Hz; ϵ'' 为相对介电损耗因子。

金属波导和微波炉空腔壁假设是理想的电导体, 应用边界条件见式 (6)^[11]。

$$E_{\text{切向}} = 0 \quad (6)$$

建立微波加热多孔介质模型时, 土豆泥样品由土豆泥、水和空气组成, 考虑土豆泥中各相始终保持局部热平衡, 多孔介质传热方程见式 (7)^[13]。

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,a} n_i \nabla \cdot (C_{pi} T) = k_{\text{eff}} \nabla^2 T + P_v \frac{\partial^2 \Omega}{\partial u \partial v} \quad (7)$$

式中: ρ 为密度, kg/m³; C_p 为固体恒压热容, kJ/(kg·°C); C_{pi} 为流体恒压热容, kJ/(kg·°C); T 为时间 t 时刻的温度, °C; k_{eff} 为有效导热系数; n 为流体流量, kg/(m²·s)。

在微波加热之前, 土豆泥的初始温度保持在 23 °C。食品的表面通过对流与周围空气交换热量, 边界条件如式 (8) 所示^[14]。

$$-k \nabla T = h(T - T_a) \quad (8)$$

式中: h 为对流换热系数, W/(m²·°C); T_a 为环境温度, °C。

计算微波加热多孔介质蒸发出的水分及蒸发消耗的能量, 如式 (9) 所示^[7]。

$$\left[\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla(-D_i \nabla c_i) \right] + u_i \cdot \nabla c_i = \pm \frac{I}{M_w} \quad (9)$$

式中: C_i 为浓度, mol/m^3 ; D_i 为物质的扩散系数, m^2/s ; μ_i 为达西速度, m/s ; I 为水的蒸发速率, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^3)$; M_w 为水分子摩尔质量, kg/mol 。

水的汽化相变利用非平衡蒸发法计算, 如式(10)所示^[15]。

$$I = \frac{K \cdot M_w (p_{v,\text{eq}} - p_v)}{RT} \quad (10)$$

式中: K 为水蒸发速率常数, s^{-1} ; $p_{v,\text{eq}}$ 为平衡水蒸气压, Pa ; p_v 为理想水蒸气压, Pa ; R 为理想气体常数。

在微波加热多孔介质模型中, 流体的动量平衡遵循达西定律, 如式(11)所示^[16]。

$$u_i = \frac{-k_{i,p}}{\mu_i} \nabla P \quad (11)$$

式中: $k_{i,p}$ 为渗透率, m^2 ; μ_i 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P 为水蒸气和空气的分压和, Pa 。

1.5.2 几何模型

参照实验室专用微波炉构建精细几何模型, 几何模型包括矩形波导、磁控管、微波炉腔体、玻璃盘以及土豆泥。端口输入功率和频率设置与实验用微波炉参数一致, 环境温度、腔内温度、土豆泥和玻璃盘初始温度均设置为 23°C 。土豆泥与玻璃盘置于微波炉腔体底部中心位置, 采用同轴波导建模在微波炉腔体右侧, 如图 2 所示。

1.5.3 网格划分

有限元软件中网格尺寸会因求解区域不同而有所差距。为了提高仿真计算精确度的同时减少计算时间, 微波炉内空气域选择 25 mm 网格尺寸, 土豆泥和玻璃盘选用 3 mm 网格尺寸进行仿真计算, 网格划分方法采用自由四面体单元。具体网格参数如下: 网

格单元数量为 $104\ 035$ 个域单元, 最小单元质量为 $0.077\ 36$ 。网格划分结果如图 2 所示。最大网格单元尺寸由 Nyquist 准则来校核^[1], 如式(12)所示。

$$S_{\max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon'}\mu_r} \quad (12)$$

式中: $S_{\max}$ 为最大网格尺寸, m ; f 为电磁波频率; λ 为电磁波波长, m ; ϵ' 为相对介电常数, F/m ; c 为光速; μ_r 为相对磁导率, H/m 。

1.5.4 模型假设

在本研究中, 为了简化微波加热模型, 进行了以下假设:

- 1) 假设磁控管在 2.45 GHz 的固定频率下工作;
- 2) 假设土豆泥在加热过程中不会发生收缩或者膨胀变化;
- 3) 土豆泥和包装材料的初始温度为 23°C , 且内部均匀且各向同性;
- 4) 土豆泥导热系数和比热容等效替代成定值进行仿真计算。

介电特性对微波传热过程中的温度分布和传热效率具有重要影响。不同介电常数和介电损耗因子的材料在微波场中的温度分布会有所差异。

初始条件和仿真模型中输入参数见表 1。

1.6 结果验证方法

为了验证仿真模型准确性, 将仿真得出的瞬态特征点温度分布和失水量曲线与实验结果进行比较, 并用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 进行计算, 如式(13)所示^[7]。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_s - T_E)^2} \quad (13)$$

式中: T_s 为仿真模拟温度, $^\circ\text{C}$; T_E 为实验测量温度, $^\circ\text{C}$; n 为加热过程中记录的时间步长总数。

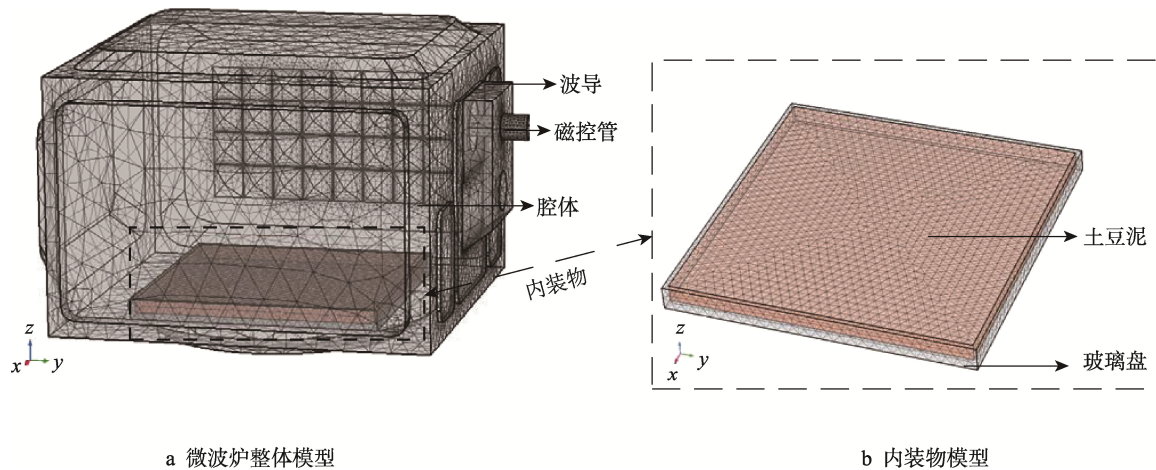


图 2 微波加热土豆泥几何模型

Fig.2 Geometric model of microwave heated mashed potatoes

表 1 初始条件和仿真模型参数输入值
Tab.1 Initial conditions and input values of simulation model parameters

输入参数	材料	数值（表达式）	单位	来源
初始温度	土豆泥	23	℃	实验
	玻璃盘	23		实验
导热系数	土豆泥	0.4	W/(m·℃)	实验
	玻璃盘	1.4		实验
比热容	土豆泥	3.9	kJ/(kg·℃)	实验
	玻璃盘	730		实验
相对介电常数	土豆泥	$56.8-6.4\times10^{-4}T^2-0.05T$		参见文献[1, 6]拟合, $R^2=0.995\ 1$
	玻璃盘	4.2		参见文献[1]
相对介电损耗	土豆泥	$16.1-1.0\times10^{-4}T^2-0.108T$		参见文献[1, 6]拟合, $R^2=0.991\ 2$
	玻璃盘	0		参见文献[1]
密度	土豆泥	1 050	kg/m ³	实验
	玻璃盘	2 210		实验
扩散系数	水	2.45×10^{-7}	m ² /s	参见文献[15]
动力黏度	水	9.88×10^{-4}	Pa·s	参见文献[15]
渗透率	土豆泥	1.935×10^{-15}	s ⁻¹	参见文献[15]
蒸发速率常数	空气	100	m/s	参见文献[15]

2 结果与讨论

2.1 仿真模型实验验证

通过对比微波加热 600 s 过程中土豆泥样品上表面温度分布云图、5 个特征点温度变化曲线和失水量变化曲线来验证仿真模型准确性。

2.1.1 温度分布验证

微波加热土豆泥 60、240、420 和 600 s 后上表面实验温度变化云图,如图 3a~d 所示;微波加热土豆泥 60、240、420 和 600 s 后上表面仿真温度变化云图,如图 3e~h 所示。由图 3 可知,加热 60 s 时土豆泥上表面温度出现四周温度高,中间温度低的特征,高温区域主要集中在边角区域,达到 70~80 ℃,中间部分区域温度达到 30~50 ℃。加热到 240 s 时,实验和仿真中高温区域均明显增多,由边角区域向内部区域扩散。加热到 420 s 时,土豆泥样品上表面温度基本达到 100 ℃。加热到 600 s 时,温度基本达到 110 ℃,只有中间偏右部分温度区域温度为 70~100 ℃。

通过微波加热土豆泥上表面仿真和实验结果温

度变化云图对比可知,随着加热时长的增加,仿真和实验上表面温度云图分布一致,都呈现边缘温度高,中心温度低分布的特点。冷点和热点温度如表 2 所示,RMSE 值分别为 1.23 ℃和 1.92 ℃,平均误差分别为 3.9%和 3.7%,说明仿真模型具有一定的可靠性。误差产生的原因可能是忽略了热性能参数随温度的变化。

2.1.2 特征点瞬态温度变化曲线验证

5 个特征点瞬态温度的仿真计算结果与实验结果比较,如图 4a 所示。由图 4a 可知,微波加热 600 s 过程仿真结果与实验结果中都呈现前期升温比较快,后期升温比较慢的特征,测量温度变化趋势基本一致。升温速率的仿真与实验结果从大到小排序为点 1、点 2、点 4、点 3、点 5。在加热 360 s 后点 1、点 2、点 3 和点 4 温度基本都上升到 98 ℃以上,且趋于稳定,点 5 位置温度上升最慢且温度最低。5 个位置温度变化的 RMSE 值最大为 1.146 ℃,表明仿真结果与实验结果具有良好的一致性。误差主要是由模型中的固频、几何模型和参数设置的简化导致电磁场分布和功率密度分布不精确,从而影响了温度预测精度。

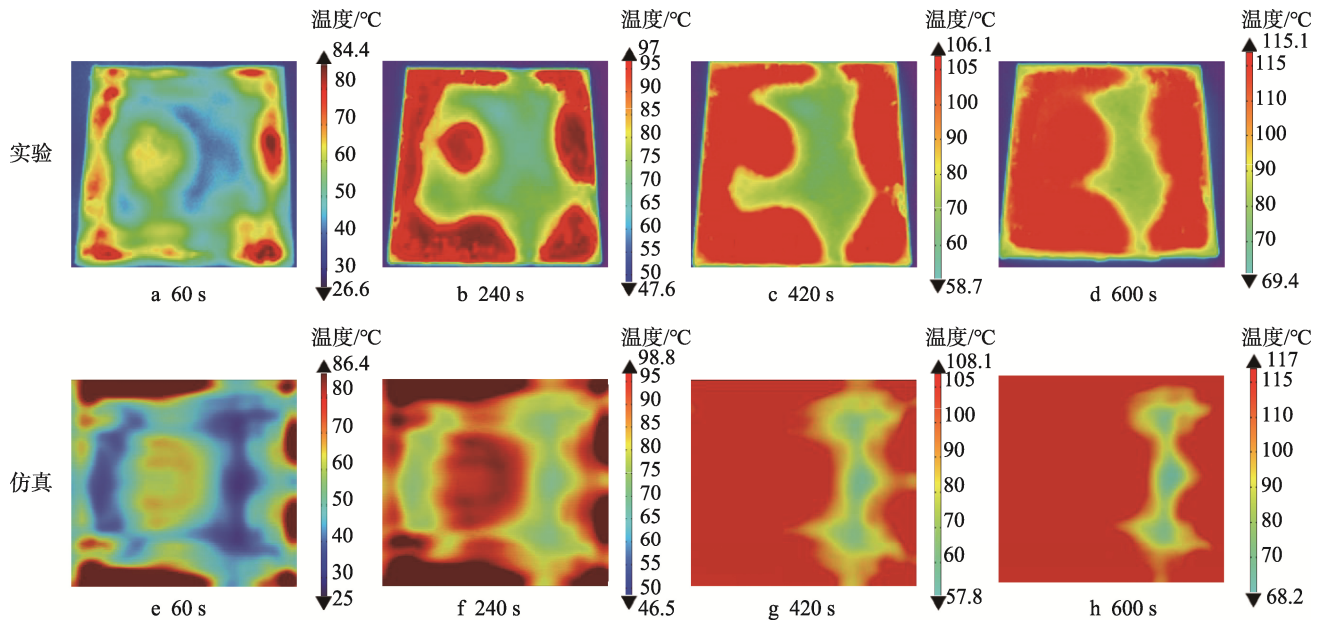


图 3 微波加土豆泥表面温度云图
Fig.3 Surface temperature pattern of mashed potatoes under microwave heating

表 2 实验和仿真冷热点温度变化
Tab.2 Temperature changes of experimental and simulated cold and hot spots

时间/s	冷点位置				热点位置			
	实验温度/℃	仿真温度/℃	RMSE 值/℃	平均误差/%	实验温度/℃	仿真温度/℃	RMSE 值/℃	平均误差/%
60	26.6	25			84.4	86.4		
240	47.6	46.5	1.23	3.9	97	98.8	1.92	3.7
420	58.7	57.8			106.1	108.1		
600	69.4	68.2			115.1	117		

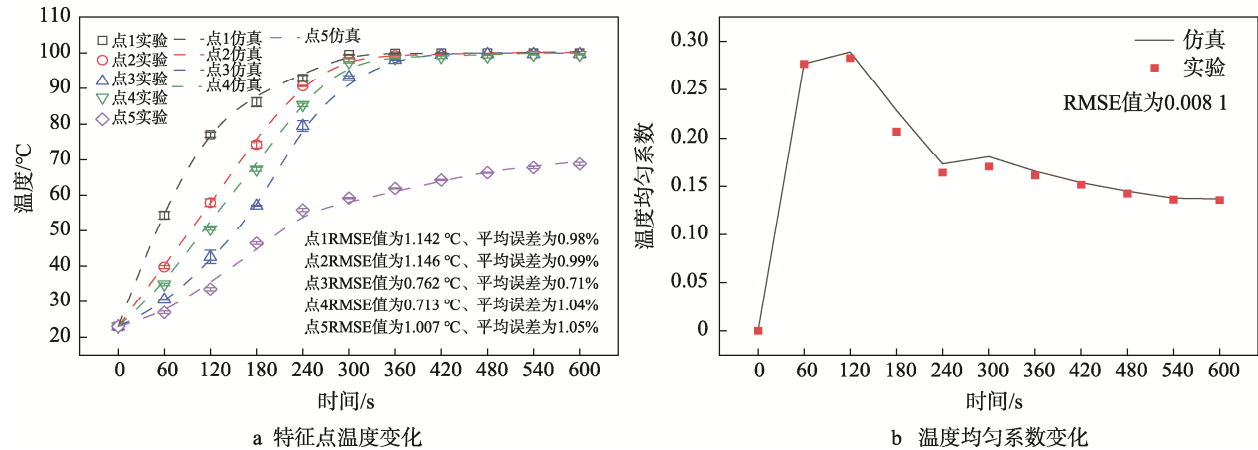


图 4 仿真与实验温度变化
Fig.4 Simulation and experimental temperature changes

利用 5 个特征点的瞬态温度变化曲线计算温度均匀系数变化, 如图 4b 所示。由图 4b 可知, 微波加热 600 s 内仿真与实验温度均匀系数变化规律基本一致。0~60 s 内 C_{OVT} 急剧增大; 120~240 s 内 C_{OVT} 急

剧减小; 240~300 s 内 C_{OVT} 值缓慢增大; 300 s 后 C_{OVT} 值缓慢降低, 并逐渐平稳; 在加热 600 s 时, 仿真结果的 C_{OVT} 值比实验结果稍高。仿真结果与实验结果的 RMSE 值为 0.008 1, 更能体现仿真模型的准确性。

2.1.3 失水量变化验证

微波加热土豆泥 600 s 期间, 仿真与实验的失水量变化结果如图 5 所示。由图 5 可知, 在较长的加热时间下, 水分损失是显著的。在 60 s 内, 由于土豆泥温度较低, 失水量增加缓慢; 在 60~240 s 内, 失水量增加速率不断升高; 在 360~600 s 内, 失水量呈现线性增加。仿真结果与实验测量结果趋势一致。RMSE 值为 0.963 1 g, 平均误差为 3.69%, 表明仿真模型具有可靠性。

2.2 体积分数变化对微波加热过程的影响

2.2.1 温度分布分析

以玻璃盘为包装材料, 微波加热 600 s 后, 体积分数分别为 0.3、0.4、0.5 和 0.6 的土豆泥上表面温度云图分布, 如图 6a~d 所示。由图 6a 可知, 体积分数为 0.3 的土豆泥加热 600 s 时温度分布边缘温度高、内部温度较低, 温度分布不均匀现象明显。由图 6b 可知, 内部开始出现高温区域, 但是中间仍然存在部分区域温度为 60~90 °C; 由图 6c 可知, 内部区域基本都达到高温, 只有中间偏右侧位置有局部区域温度为 70~100 °C; 由图 6d 可知, 土豆泥最高温度和最低温度继续升高, 温度分布不均匀现象依然存在。

2.2.2 特征点瞬态温度变化分析

微波加热 600 s 时, 不同体积分数土豆泥特征点 1~5 的瞬态温度变化曲线, 如图 7a~e 所示。由图 7a~e 可知, 在 0~360 s 内, 特征点 1~4 的瞬态温度随加热时间均呈非线性升高, 但升温速率不一致; 在 360~600 s 内, 温度逐渐趋于平稳。在 0~240 s 内, 特征点 5 瞬态温度随加热时间均呈非线性升高, 在 240~600 s 内,

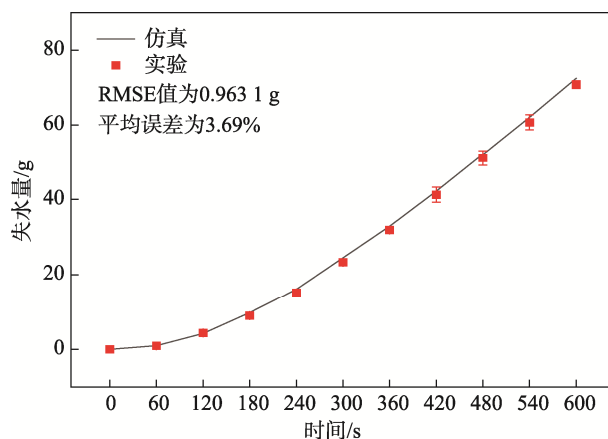


图 5 加热土豆泥失水量变化
Fig.5 Moisture loss change of mashed potatoes under microwave heating

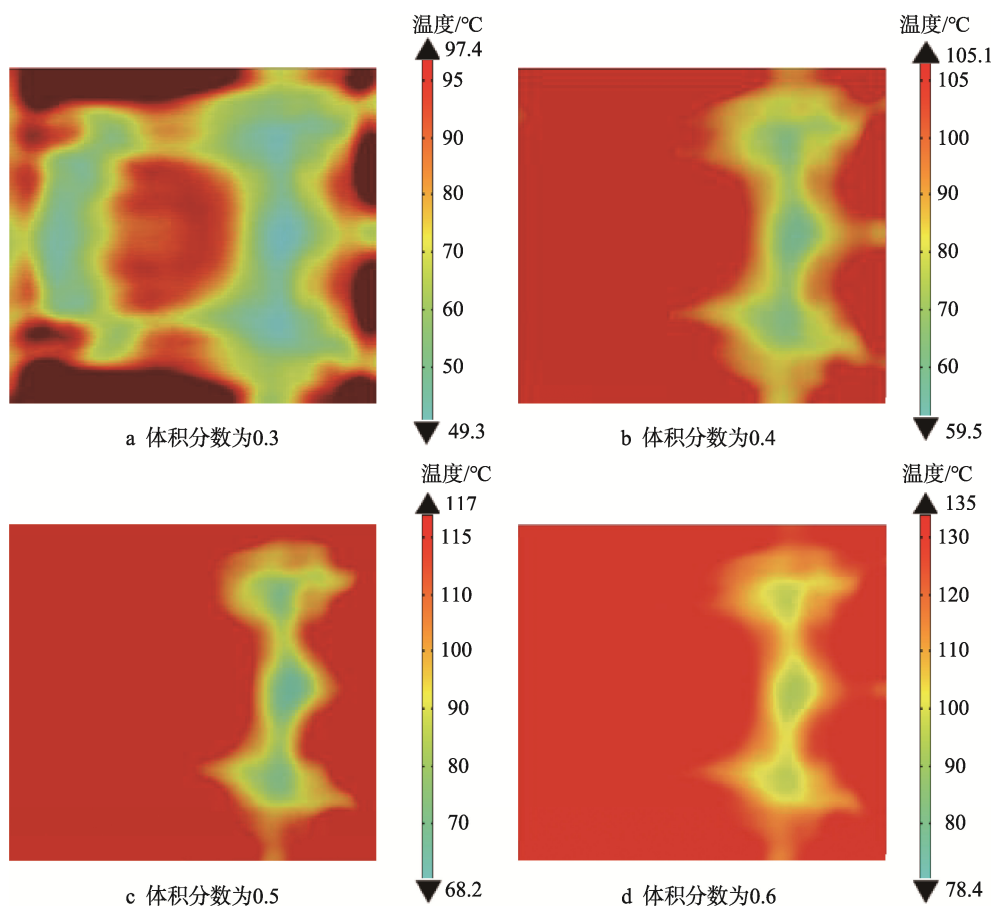


图 6 微波加热 600 s 不同体积分数土豆泥温度云图
Fig.6 Temperature pattern of mashed potatoes with different volume fractions under microwave heating for 600 s

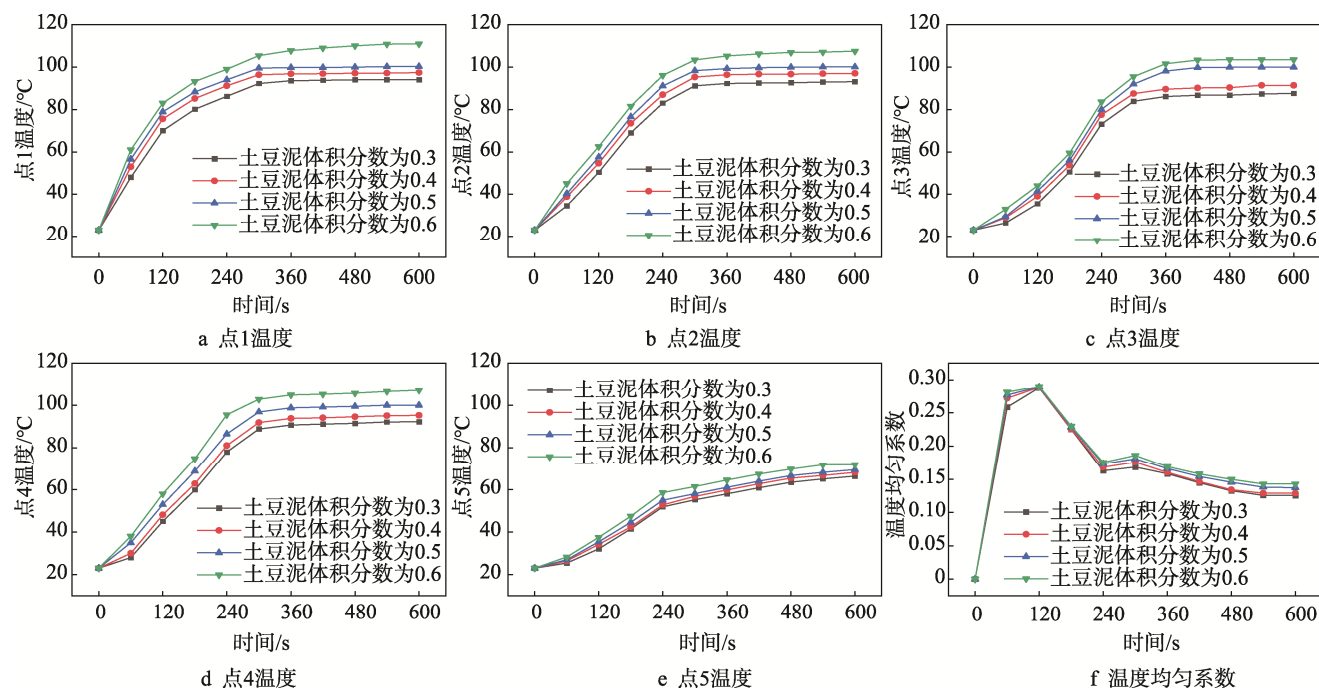


图 7 不同体积分数土豆泥特征点 1~5 的瞬态温度变化

Fig.7 Transient temperature change of characteristic points 1-5 of mashed potatoes with different volume fractions

温度缓慢升高, 特征点 5 与其他 4 个特征点温度变化有明显的差异性。这是由于特征点 5 在加热过程中处于低温区域内, 吸收到的微波能较少, 靠局部热传导进行升温, 所以升温比较缓慢。结果表明, 不同体积分数土豆泥微波加热 360 s 后升温速率缓慢, 趋于平稳。土豆泥体积分数越大, 加热 600 s 后温度越高。

仿真模拟微波加热 600 s 不同体积分数土豆泥温度均匀系数变化曲线如图 7f 所示。由图 7f 可知, 土豆泥体积分数越大加热时温度均匀系数越大, 加热均匀性越差。

2.2.3 总失水量变化分析

微波加热不同体积分数土豆泥 600 s 过程中, 失水量变化曲线对比如图 8 所示。

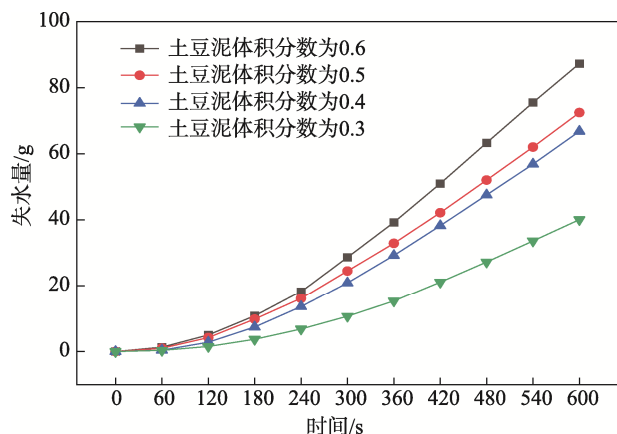


图 8 微波加热时不同体积分数土豆泥失水量的变化

Fig.8 Moisture loss change of mashed potatoes with different volume fractions under microwave heating

3 结语

本文耦合电磁场、流场、传热和传质多种物理模型, 建立了微波加热多孔介质土豆泥的三维有限元仿真模型, 并对模型进行了实验验证, 在此基础上分析了土豆泥体积分数变化对微波加热过程中温度分布和失水量的影响。

1) 微波加热 600 s 过程中, 土豆泥样品上表面仿真温度云图和实验结果一致, 且冷点和热点 RMSE 值分别为 1.23 °C 和 1.92 °C, 平均误差分别为 3.9% 和 3.7%; 5 个特征点的瞬态温度变化与仿真结果吻合, RMSE 值最大为 1.146 °C, 温度均匀系数 C_{OVT} 的 RMSE 值为 0.008 1; 仿真的总失水量变化与实验结果一致, RMSE 值为 0.963 1 g, 平均误差为 3.69%, 表明仿真模型具有可靠性。

2) 不同体积分数的土豆泥上表面温度云图分布均呈现边缘温度高和内部温度低的现象。随土豆泥体积分数增大, 冷点温度和热点温度随加热时间呈现非线性升高。表明体积分数的变化对温度分布有明显的影响。

3) 微波加热 360 s 内, 随土豆泥体积分数的增大, 5 个特征点的加热温度升高, 温度均匀系数增大, 加热均匀性变差, 失水量增多; 在 360~600 s 温度变化不明显, 失水量呈线性增多。表明体积分数和加热时长对土豆泥的微波加热过程均匀性和失水量均有明显影响, 360 s 可以被考虑作为土豆泥微波加热研究的时长依据。

4) 通过微波加热土豆泥仿真模型计算, 可以清楚地了解微波加热过程中土豆泥温度分布和特征点温度变化, 为包装材料的选择提供帮助, 以提高微波加热均匀性; 也可以了解微波加热过程中土豆泥失水量变化, 为包装结构的优化设计提供方向, 以减少失水量。

参考文献:

- [1] 周传浩. 微孔包装土豆微波加热数值模拟与实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2020: 9-25.
ZHOU C H. Numerical Simulation and Experimental Study on Microwave Heating of Microporous Packaged Potatoes[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020: 9-25.
- [2] PITCHAI K, CHEN J, BIRLA S, et al. A Microwave Heat Transfer Model for a Rotating Multi-Component Meal in a Domestic Oven: Development and Validation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 60-71.
- [3] 王绍林. 微波加热原理及其应用[J]. 物理, 1997, 26(4): 232-237.
WANG S L. Principle and Application of Microwave Heating[J]. Physics, 1997, 26(4): 232-237.
- [4] 郭晋婷. 包装南瓜发糕微波加热数值模拟与实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022: 10-20.
GUO J T. Numerical Simulation and Experimental Study on Microwave Heating of Packged Pumpkin pie[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022: 10-20.
- [5] 孙鹏, 赵蕾, 孙兴华. 三维微波加热腔的建模与仿真[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2013, 29(2): 22-25.
SUN P, ZHAO L, SUN X H. Modeling and Simulation of 3-Dimension Microwave Heating Cavity[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2013, 29(2): 22-25.
- [6] 张柯, 卢立新, 王军. 基于 COMSOL 的包装食品微波炉加热模拟[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 1-4.
ZHANG K, LU L X, WANG J. Simulation of Microwave Heating of Packaged Food by Software COMSOL[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 1-4.
- [7] CHEN J J, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Heat and Mass Transport during Microwave Heating of Mashed Potato in Domestic Oven—Model Development, Validation, and Sensitivity Analysis[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(10): 1991-2004.
- [8] 梁怡良, 王利强, 张新昌. 基于 COMSOL 的中央厨房餐品微波加热包装仿真研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 262-268.
LIANG Y L, WANG L Q, ZHANG X C. Simulation on Microwave Heating Packaging for Central Kitchen Meals Based on COMSOL[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 262-268.
- [9] 张伟杰, 田文艳, 殷得举, 等. 基于多物理场计算的微波加热均匀性改善研究[J]. 真空电子技术, 2023(4): 75-82.
ZHANG W J, TIAN W Y, YIN D J. Research on Improving Microwave Heating Uniformity Based on Multi-physical Field Calculation[J]. Vacuum Electronics, 2023(4): 75-82.
- [10] TEPNATIM W, DAUD W, KAMONPATANA P. Simulation of Thermal and Electric Field Distribution in Packaged Sausages Heated in a Stationary Versus a Rotating Microwave Oven[J]. Foods, 2021, 10(7): 1622.
- [11] 朱文娴, 聂子恒, 王浩东, 等. 基于包装材料冷链速冻食品微波复热温度场仿真研究[J]. 包装工程, 2022, 43(11): 198-204.
ZHU W X, NIE Z H, WANG H D, et al. Simulation on Temperature Field of Microwave Reheating of Cold-Chain Quick-Frozen Food with Different Packaging Materials[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(11): 198-204.
- [12] 赵甜甜, 王军. 基于 COMSOL 的纸浆模塑干燥模拟及验证[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 223-228.
ZHAO T T, WANG J. Simulation and Verification of Molded Pulp Drying by Software COMSOL[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 223-228.
- [13] LI H, SHI S, LIN B, et al. A Fully Coupled Electromagnetic, Heat Transfer and Multiphase Porous Media Model for Microwave Sheeting of Coal[J]. Fuel Processing Technology, 2019, 189: 49-61.
- [14] YI Q, LAN J, YE J, et al. A Simulation Method of Coupled Model for a Microwave Heating Process with Multiple Moving Elements[J]. Chemical Engineering Science, 2021, 231: 116-339.
- [15] CHEN J, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Modeling Heat and Mass Transport During Microwave Heating of Frozen Food Rotating on a Turntable[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 99: 116-127.
- [16] HALDER A, DATTA A K. Surface Heat and Mass Transfer Coefficients for Multiphase Porous Media Transport Models with Rapid Evaporation[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(3): 475-490.