

微波加热鸡肉和土豆的传热仿真分析研究

卫灵君, 宋春芳, 孟丽媛, 王燕, 桑田, 刘耀武, 李臻峰

(江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要: 为了更好地了解与研究家用微波炉微波加热过程中即食食品的传热特性, 本文建立了电磁与传热耦合的仿真模型, 研究鸡肉和土豆的空间温度和瞬态温度变化规律, 并通过实验研究在-5~95 °C范围内, 鸡肉在频率为2450 MHz时的介电特性和热物理特性。基于温度对鸡肉介电和热物理特性的分析, 将温度可分成两个范围: -5~0 °C和0~95 °C, 各温度范围内的鸡肉特性变化趋势不同。仿真模型包括加热腔、波导以及可旋转的转盘和物料。通过比较不同转速对仿真结果的影响, 综合考虑仿真所用时间以及物料的均匀性, 选用7.5 r/min作为转盘转速。当微波功率为700 W时, 组合样品的仿真结果显示, 经过90 s的微波加热, 空间温度场分布和瞬态温度曲线与实验结果保持一致, 微波仿真组合样品的模型是可行的, 研究结果为优化微波加热冷藏快餐的均匀性研究提供一定依据。

关键词: 微波加热; 仿真模型; 介电特性; 热物理特性; 转盘

文章编号: 1673-9078(2016)12-171-177

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.027

Analysis of a Heat Transfer Model for Microwave Heating of Chicken and Potato

Wei Ling-jun, SONG Chun-fang, MENG Li-yuan, WANG Yan, SANG Tian, LIU Yao-wu, LI Zhen-feng

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In order to understand the heat transfer characteristics of ready-to-eat food during microwave heating, an electromagnetic and heat transfer-coupled simulation model was developed to study the temperature variation in chicken meat and potatoes. Dielectric and thermophysical properties of chicken meat were measured as functions of temperature from -5 °C to 95 °C. The model included cavity geometry, waveguides, and rotation of the turntable and materials. The effect of rotation speed on the simulation result was studied, and the optimum rotation speed was 7.5 r/min. Simulated temperature profiles were compared with experimental temperature profiles during the microwave heating process for 90 s at 700 W. The simulated results were found to be consistent with the corresponding experimental results. This simulation model was found to be feasible, and results of the study could be used to optimize the heating parameters of refrigerated fast food to achieve uniform microwave heating.

Key words: microwave heating; simulation model; dielectric properties; thermophysical properties; turntable

随着人们生活节奏的加快, 人们对即食食品的需求越来越大, 即食食品在食品工业中的发展速度越来越快, 鸡肉和土豆类的即食食品尤其受人们的欢迎。但由于未经高温灭菌, 常因即食食品中食源性病原菌导致的食物中毒导致消费者食物中毒现象的发生^[1]。未完熟的鸡肉和土豆食品对人们的健康造成很大的隐患。微波具有加热时间短、方便操作和产品安全的优点^[2], 而且快速的微波加热可以提高整体的食品质量^[3,4], 所以微波加热在加热即食食品方面得到普遍推

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 江苏省省产学研联合创新资金前瞻性联合研究项目 (BY2016022-10); 国家自然科学基金项目 (51401086)

作者简介: 卫灵君 (1985-), 女, 博士, 讲师, 主要从事食品工艺与机械方面的研究

广, 并成为研究的热点之一。影响微波加热的因素有很多, 包括: 食品的介电特性 (介电常数和损耗因子)、热物理特性 (比热容和热传导系数) 和物理特性 (尺寸和形状等)^[5], 这些因素影响食品组分和微波之间相互作用的程度, 并且对获得更加均匀的微波加热非常重要。在过去的20年间, 高效的数值计算使得计算机仿真成为理解复杂的微波加热的工具, 建立仿真模型可以加快研究周期并减少花费, 运用仿真手段来研究食品的微波加热显得尤为必要。目前国外已经有对微波加热温度场仿真模拟的研究报道, 如1.0%琼脂糖凝胶^[6]和土豆泥^[7]等, 然而在模型中综合考虑微波炉加热腔的详细几何尺寸、物料相变以及转盘旋转的研究还未见报道。

在前期的研究中, 已经有关于土豆的介电与热物

理特性规律的报道^[8,9], 本文在此基础上, 以冷藏鸡肉块和土豆块为对象, 研究在-5~95 °C范围内, 鸡肉的介电与热物理特性随温度的变化规律。在COMSOL5.1中建立电磁与传热耦合下组合样品的微波加热模型, 研究90 s的微波加热过程中, 转盘不同转速对温度场的影响, 将仿真得到的空间温度场以及瞬态温度曲线与实验结果进行对比验证, 为优化微波加热冷藏即食食品的均匀性研究提供一定的理论基础, 并为即食食品的工业化生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 模型开发

1.1.1 控制方程与边界条件

微波炉腔体内部的电磁能量分布由麦克斯韦方程(Maxwell's Equation) 决定^[10]:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega_0} \right) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

式中, μ_r 为相对渗透率; \vec{E} 为电场强度, V/m; $j = \sqrt{-1}$;

k_0^2 为波数; ϵ_r 为相对介电特性; σ 为电导率, S/m; ω 为角频率, rad/s。

当电磁波穿过诸如食品类的介电损耗介质时, 其强度会减弱, 部分电磁能被转换成食品内部的热能, 电磁能转换成热能的耗散功率与损耗因子和电场强度的平方成正比^[11]:

$$P_v = \pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2)$$

式中, P_v 为耗散功率, W/m²; f 为频率, Hz; ϵ_0 为真空介电特性, 8.854×10⁻¹² F/m; ϵ'' 为损耗因子。

耗散功率由傅里叶方程(Fourier Equation) 决定:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P_v \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, kg/m³; C_p 为恒压比热容, kJ/(kg·°C); T 为仿真时间 t 时刻的温度, °C; k 为热传导系数, W/(m·°C)。

在微波加热之前, 冷藏鸡肉与土豆的初始温度分别为-5 °C和 20 °C, 组合物料的表面与周围的空气热交换可表示为:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \quad (4)$$

式中, n 为转向; h 为表面对流热传递系数, W/(m²·°C); T_a 为室温, °C。

金属波导和微波炉腔壁视为完美的电导体, 适用于边界条件:

$$E_{\text{切向}} = 0 \quad (5)$$

1.1.2 几何模型

仿真几何模型的建模参照实验采用的家用微波炉, 完整的几何模型包括加热腔体、波导、玻璃转盘以及平整摆放的组合样品(4个鸡肉块和1个土豆块), 见图1。微波馈能口位于腔体的右壁侧, 波导以 TE_{10} 模式进行传输, 微波频率为 2450 MHz。组合样品放置在物料盘中, 物料盘放置在转盘的中心位置。为了更加实际地反映微波炉加热时样品的各种行为, 实现玻璃转盘的旋转尤为必要, 在 COMSOL5.1 中, 通过设置转盘和样品在 x 轴与 y 轴的平移运动位移来实现旋转运动。

1.1.3 模型假设

在模拟物料微波加热过程中, 需要对模型进行下列假设:

(1) 鸡肉块和土豆块的初始温度在内部均匀且各向同性;

(2) 模型内的传热介质只有空气, 且空气的温度假定为恒温 20 °C;

(3) 在模拟加热过程中, 除了组合样品以外的所有区域均无传热。

初始条件和计算域中材料的参数见表1。

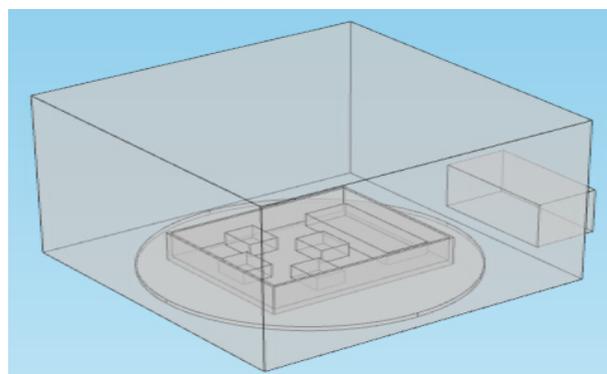


图1 微波加热组合物料的几何模型

Fig.1 Geometric model of microwave heating combination material

表1 仿真模型中的初始条件及材料参数

Table 1 Initial conditions and material properties applied in the model		
参数	域	值
初始温度/°C	空气	20
	转盘	20
	鸡肉块	-5
	土豆块	20
介电常数	空气	1
	转盘	0
	鸡肉块	53.92

转下页

接上页		
损耗因子	土豆块	参见[8]
	空气	0
	转盘	0
	鸡肉块	12.83
	土豆块	参见[8]
比热容	鸡肉块	7.84
	土豆块	参见[9]
热传导系数	鸡肉块	0.96
	土豆块	参见[9]
	转盘	2050
密度	鸡肉块	1100
	土豆块	1050
微波炉功率/W	\	700

1.1.4 网格划分

为了获得合理的数值模拟,模型的网格化非常重要,在 COMSOL5.1 中对不同区域的网格划分方案可以独立进行。模型中所有区域定义为任意四面体单元,其中微波炉腔、转盘和物料盘的网格尺寸选择默认的标准大小。Liu 等^[12]提出在保证运算时间最快以及良好的温度仿真结果情况下,物料最合适的网格尺寸在 2450 MHz 频率时与自由空间波长 ($\lambda=12.22$ cm) 和介电常数存在如下关系:

$$h = \frac{\lambda}{6\sqrt{\epsilon'}} \quad (6)$$

根据上式可知,鸡肉块与土豆块最合适的网格尺寸分别为 2.53 mm 和 2.77 mm。在保证运算时间不长的情况下,为了精确计算,物料选用较细化处理,网格划分结果见图 2。

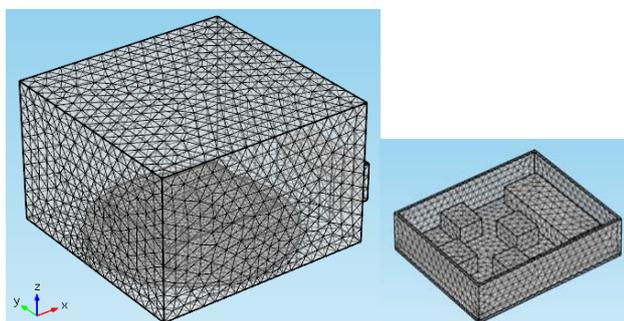


图 2 微波炉腔体和组合物料的网格划分

Fig.2 Meshing scheme for the microwave cavity and materials

1.2 实验方法

1.2.1 实验材料与制备

鸡胸脯肉和土豆购买于无锡当地的超市,鸡胸脯肉要求新鲜、形状均匀,土豆要求无损伤、霉斑、形状均匀及大小基本一致。鸡胸脯肉切成若干个大小为

38 mm×25 mm×16 mm 的鸡肉块,土豆去皮洗净,用纸巾吸干表面的水分,切成若干个尺寸为 38 mm×100 mm×16 mm 的土豆块。切好的土豆块和鸡肉块用 4% 的盐卤水煮制 30 min^[13],实验测得处理后土豆含水率为 73.28±0.54%(w.b.),用保鲜袋密封,放入冰箱中-5℃冷藏备用,实验时将土豆放在空气中达到室温 20℃。

1.2.2 仪器设备

PJ21B-BF 微波炉,中国广东;E5061B 网络分析仪,美国安捷伦公司;HH-1 数显恒温油浴锅,江苏正基仪器有限公司;CENTER 309 热电偶温度测量仪,苏州特安斯电子有限公司;TPT-32 光纤温度传感器,加拿大 FISO 公司;KD2 Pro 热特性分析仪,美国 Pullman 公司;T400320240 精度 2℃ 红外热成像仪,美国 FLIR 公司。

1.2.3 介电特性的测量

介电特性的测量参数包括介电常数与损耗因子,测定系统主要由计算机、安捷伦 E5061B 网络分析仪、末端开路式同轴探头 85070E 和温度控制单元组成。测试前先开机预热 30 min,将制备好的鸡肉放置在温度控制单元中,与此同时将测试探头底面紧贴鸡肉表面,确保不与外部空气接触且保持压力不变,通过网络分析仪采集数据。实验过程中的环境温度控制在 20℃,鸡肉的测量温度范围为-5~95℃,温度由聚苯乙烯泡沫板制成的保温箱和恒温油浴锅控制,尽量避免热量损失,测量温度依次为-5、0、5、20、35、50、65、80 和 95℃。每份样品重复测量 5 次,测量的平均值作为实验最终结果。

1.2.4 热物理特性测量

鸡肉的热物理特性测量参数包括比热容和热传导系数,使用 KD2 Pro 热特性分析仪进行测量。在微波加热过程中,将样品用盖子盖住后从微波腔中取出,并快速放入由聚苯乙烯泡沫板制成的保温箱中隔离保温,样品的温度测量范围为-5~95℃。传感器(SH-1 型 30 mm 双针传感器)通过盖子固定,垂直插入测量样品的中心位置,手提控制器用以传送、处理、存储和下载数据。每个样品测量 5 次取平均值。

1.2.5 温度测量

将土豆和冷冻的鸡肉组成的组合样品从冰箱中取出,放入微波炉中加热 90 s。在加热过程中,土豆和鸡肉中心部位的瞬时温度用光纤传感器快速测量并记录温度曲线,测温时光纤传感器探头在样品中的位置见图 3,在整个测量过程中光纤传感器测量样品的位置与深度保持不变。实验前先进行预实验,确定 90 s 加热过程结束后样品的温度,确保预热保温箱的温度与加热后取出的样品温度基本相等,避免由温差引起

测量误差。90 s 加热时间结束后，快速取出样品并放入提前预热的保温箱中保温，使用红外热成像仪记录组合样品表面的空间温度场分布图。每组实验重复测量 3 次，作为实验最后结果。

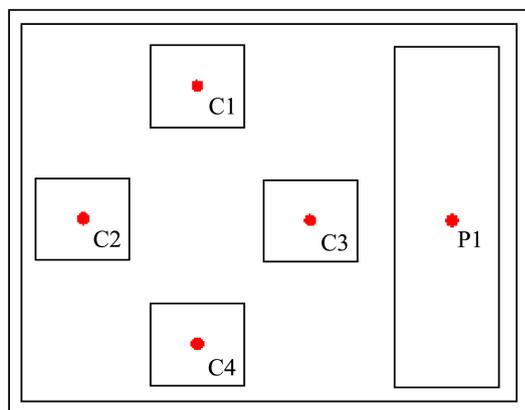


图 3 测温时热电偶在样品中的位置

Fig.3 Location of the thermocouples in the samples

1.2.6 数据统计分析

实验数据采用 SAS 9.01 统计分析软件，对各组数据进行方差分析，运用 OriginPro 8.0 绘制误差线。

2 结果与讨论

2.1 鸡肉的介电与热物理特性

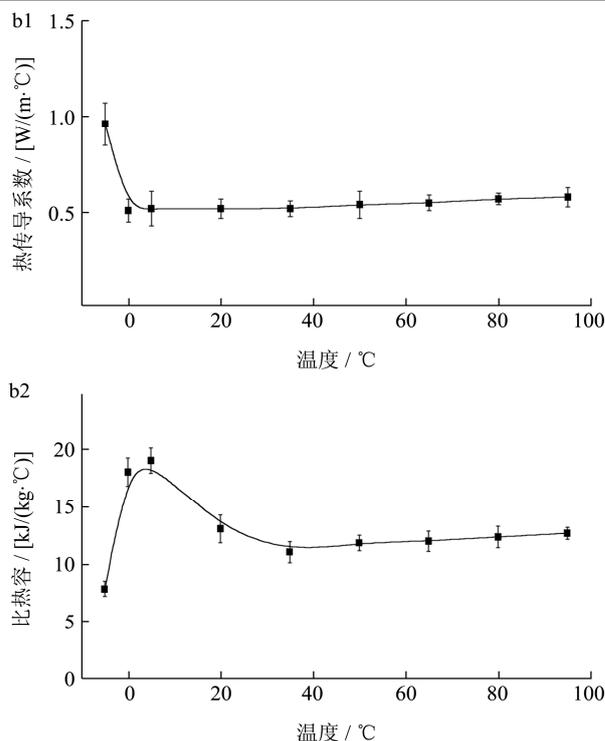
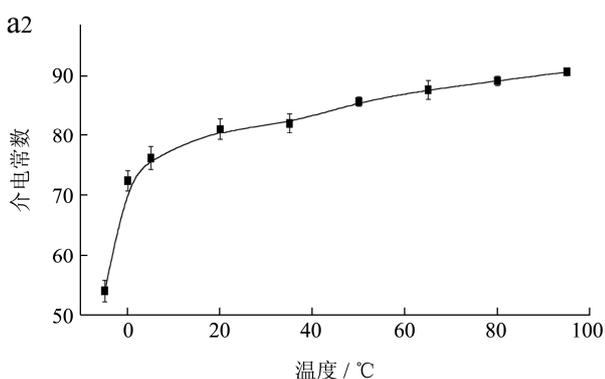
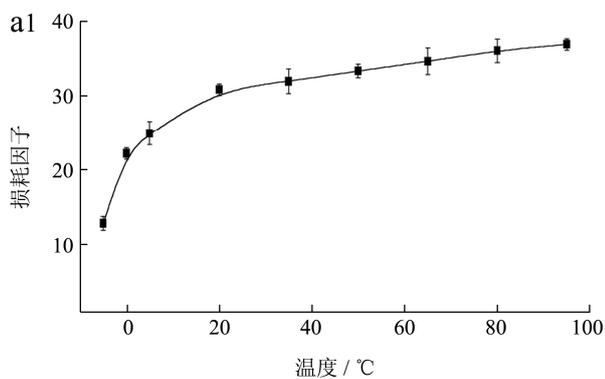


图 4 鸡肉的介电 (a) 与热物理特性 (b) 在 2450 MHz 时随温度的值

Fig.4 Temperature-dependent dielectric (a) and thermal (b) properties of chicken meat measured at a frequency of 2450 MHz

在-5~95 °C 范围内，新鲜鸡肉在频率 2450 MHz 下的介电特性随温度的变化如图 4a 所示。鸡肉的介电常数与损耗因子随温度的升高而增大，基于温度对介电特性的分析，可将温度分成两个范围：-5~0 °C 和 0~95 °C，不同温度范围内，介电常数与损耗因子呈现急剧-缓慢增大的趋势，例如在-5、0 和 95 °C 时介电常数分别为 53.92 ± 1.78 、 72.33 ± 1.65 和 90.57 ± 0.65 ，各温度范围内的增幅分别为 34.14% 和 25.22%。冷冻肉类介电特性相对较低，在很大程度上取决于肉类中自由水离子导电性和未冻结状态水的量，在解冻过程中，介电特性随水分极性分子的增多急剧增加。温度对鸡肉的介电特性有显著影响 ($p < 0.05$)，温度升高导致布朗运动加剧，增加静态介电常数，因此介电常数随温度的升高而增加^[14]。离子损失和偶极子旋转是工业微波加热的主要两种损耗机理，损耗因子随温度的变化规律取决于物料中的自由水和溶解离子含量，随着温度升高离子的黏度降低且流动性增强，所以损耗因子随温度的升高而增加^[8]。

在-5~95 °C 范围内，新鲜鸡肉在频率 2450 MHz 下的热物理特性随温度的变化如图 4b 所示。比热容是单位质量的物质温度升高 1 °C 所需要的热量，是反应

物料吸收一定热量后的温度变化的物理量, 鸡肉的比热容在 -5~95 °C 范围内从 7.84±0.66 急剧增加至 19.03±1.12, 随后下降至 11.04±0.91 (35 °C), 再缓慢增加至 12.67±0.54 (95 °C)。对于鸡肉这种含水率的食物来说, 冷冻状态下加热在单位温度内所需的热能要多于解冻后所需的热量, 在完全解冻后的比热容趋于平稳。热传导系数是物料传递能量的能力, -5~95 °C 范围内, 鸡肉块的热传导系数由 0.96±0.11 下降至 0.52±0.09, 下降了 45.83%; 再缓慢上升至 0.58±0.05, 增幅为 11.54%。温度升高时, 物料固体分子的热运动在冷冻到完全解冻的过程中先减弱后增强, 同时物料孔隙中空气的导热和孔壁间的辐射作用也随着变化, 故导热系数呈现先下降后升高的趋势^[15]。

2.2 仿真结果分析

2.2.1 食品转速对模拟温度的影响

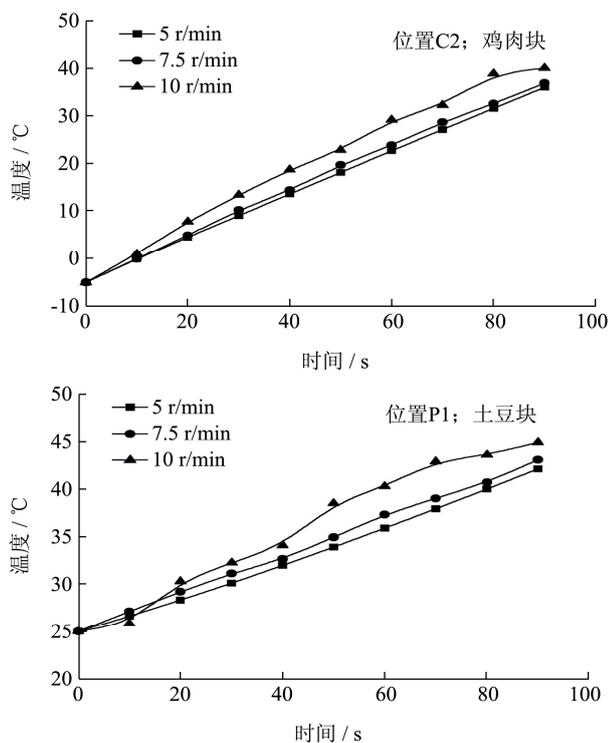


图5 食品转速分别在位置 C2 和 P1 对模拟温度的影响

Fig.5 Effect of rotational speed on simulated temperature in positions C2 and P1

转盘上食物的转动是一个连续的过程。数值模拟中, 在一个完整的旋转里, 食物在托盘上的每一个旋转步骤都有不同的方位。因此寻找合适的旋转速度是模型优化的关键因素, 同时也需考虑仿真计算时间以及得到精确的温度分布。旋转速度越慢, 仿真时间就越长。由于微波的影响, 腔内存在一个驻波。过快的旋转速度可能会过一些热点或冷点, 仿真过程中耗散功率的计算可能会不准确。因此, 需要选择合适旋转

速度, 以最大限度地减少模拟时间并预测更好的温度分布。本研究选定转速分别为 5、7.5 和 10 r/min 的旋转加热模式。仿真过程中, 转盘带动组合样品同时转动, 不同转速对模拟温度的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 鸡肉块 (位置 C2) 和土豆块 (位置 P1) 在转盘转速为 5 r/min 和 7.5 r/min 时的仿真瞬态温度曲线均较为接近, 而转速为 10 r/min 时, 温度曲线的差异显著 ($p < 0.05$)。在微波加热 90 s 的过程中, 鸡肉块和土豆块在转速为 5 r/min 和 7.5 r/min 时的温度差分别不超过 2 °C 和 1.5 °C, 而在转速为 7.5 r/min 和 10 r/min 时的温度差分别大于 6 °C 和 4 °C。转盘转速越快, 单位时间内的转盘转角越大, 获取实际的电磁场变化的能力越弱, 因此单位耗散功率计算越不准确。在仿真过程中, 仿真的时间随着转盘转速的增大而减少。综合考虑转速 5 r/min 与 7.5 r/min 之间的温度差和仿真时间, 后文仿真温度分析时的转速选用 7.5 r/min。

2.2.2 空间温度分布

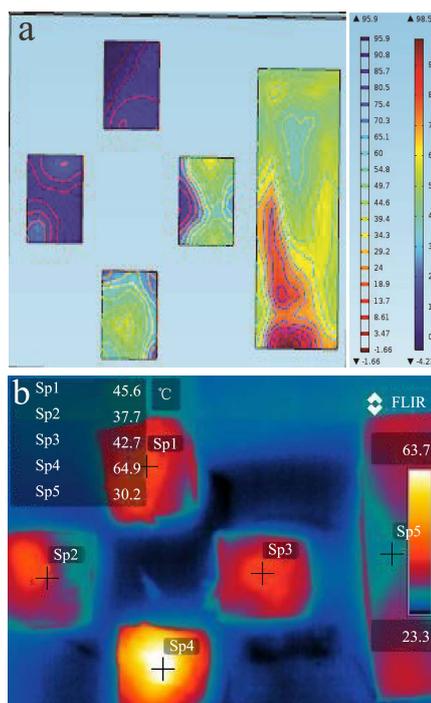


图6 微波加热 90s 后的组合样品仿真 (a) 与实验 (b) 空间温度分布

Fig.6 Simulation (a) and experimental (b) spatial temperature profiles after microwave heating for 90 s

微波功率为 700 W 时, 微波加热 90 s 后鸡肉块和土豆块仿真与实验的空间温度场分布如图 6 所示。从图 6a 可以看出, 由于鸡肉块的初始温度比土豆块低, 所以仿真结果显示大部分鸡肉块的表面温度低于土豆块的表面温度, 即使在加热 90 s 后仍保持在 30 °C 左右, 而位于下面的鸡肉块的中心部位温度高于 60 °C, 这一结果与实验结果保持一致, 且仿真与实验均显示

土豆块的中心部位温度低于边缘部位的温度。由于在模型中不考虑水分的质量和动量转移,因此模拟结果显示组合样品的最高温度高于 90 °C 是合理的,而实验结果中的最高温度保持在 60 °C 左右。总体而言,仿真的空间温度场分布与实验结果保持一致。

2.2.3 瞬态温度曲线

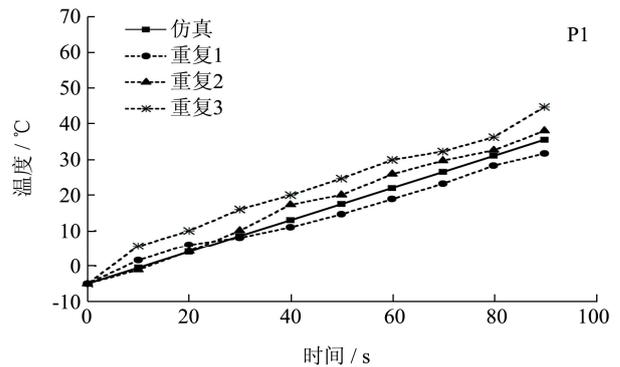
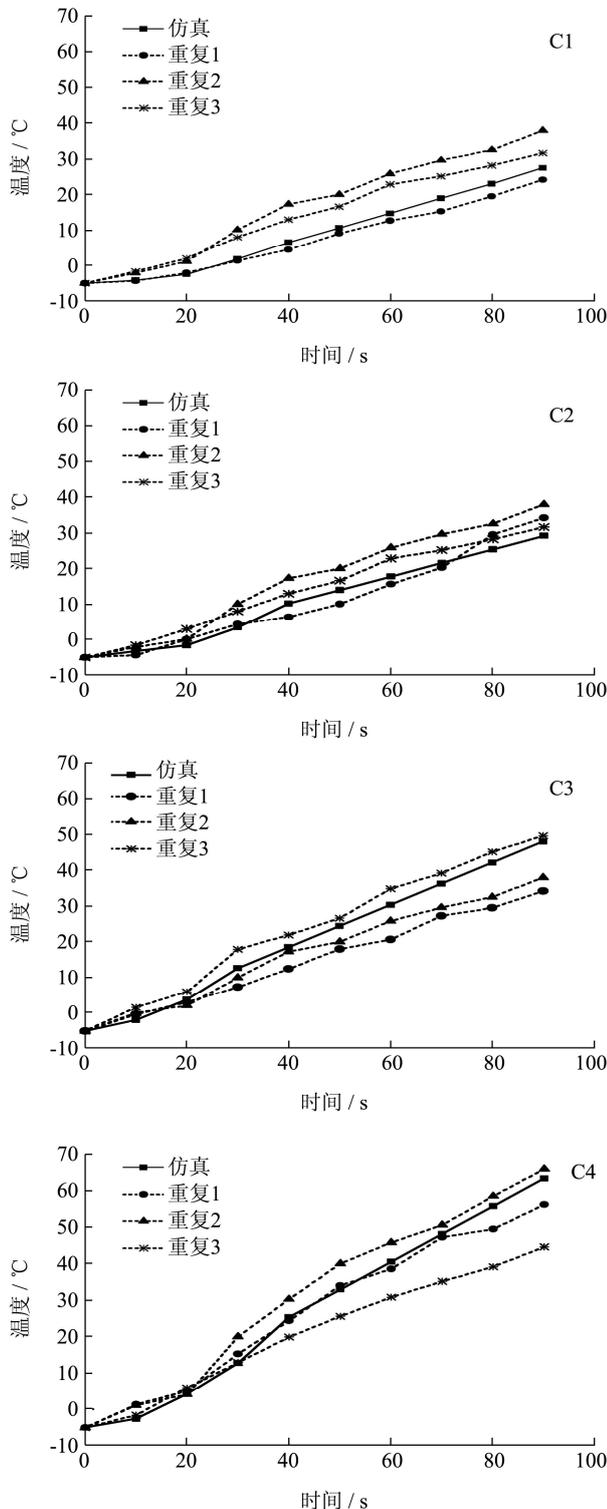


图 7 不同位置的温度在仿真与 3 次重复实验中随时间的变化

Fig.7 Time-dependent temperature variations at different locations in the simulation and triplicate experiment

仿真与 3 次重复实验所得的瞬态温度随时间的变化如图 7 所示。微波功率为 700 W 时,相较于微波加热后期,在前 20 s 的微波加热时间内,鸡肉块在各位置上的温度变化较慢,整体趋势呈现缓慢-线性升高。鸡肉块的初始温度为-5 °C,在加热初期随着温度的升高,鸡肉块开始解冻,这时温度升高速率较缓慢。样品在 4 个鸡肉块位置上的仿真结果显示,由于该模型为理想化模型,所以瞬态温度在加热后期随时间呈线性升高的趋势。土豆块的初始温度为 20 °C,没有相变现象,故在仿真结果显示土豆块的瞬态温度在 90 s 微波加热过程中随时间的增长而线性升高。实验过程中,由于测量误差和测温所用热电偶引起的热滞后,故 3 次重复实验有所偏差,但总体的变化趋势一致 ($p \geq 0.05$)。运用 SAS 9.01 对仿真和实验数据分析得到,各位置上的仿真瞬态温度数据在 3 次重复实验数据的标准偏差范围内,反映仿真结果的准确性。

3 结论

3.1 基于温度对鸡肉介电和热物理特性的分析,将温度可分成两个范围: -5~0 °C 和 0~95 °C,各温度范围内的鸡肉特性变化趋势不同,用于模型中物料属性参数的输入。

3.2 综合考虑转盘转速引起的温度差,以及仿真时间,选用转速 7.5 r/min 作为最理想转盘转速。

3.3 从组合样品的仿真结果可看出,空间温度场分布与瞬态温度曲线与实验结果保持一致,微波仿真组合样品的模型是可行的。

3.4 微波加热即食食品过程中,该模型可用于识别食品的冷点位置,同时在食品开发过程中,可用于进一步优化食品组分和包装设计从而达到更均匀的微波加热。

参考文献

- [1] 董庆利,郑丽敏,党维鑫,等.即食食品中单增李斯特菌的半定量风险评估[J].食品工业科技,2012,33(11):321-323,366
DONG Qing-li, ZHENG Li-min, DANG Wei-xin, et al. Semi-quantitative risk assessment of *Listeria Monocytogenes* in RTE food [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 321-323, 366
- [2] 范大明,陈卫,李春香,等.方便米饭微波复热过程温度分布的尺寸效应[J].农业工程学报,2012,S1:273-280,382
FAN Da-ming, CHEN Wei, LI Chun-xiang, et al. Size effect on temperature distribution of instant rice during microwave reheating process [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, S1: 273-280, 382
- [3] Guan D, Plotka V C, Clark S, et al, 2002. Sensory evaluation of microwave treated macaroni and cheese [J]. Journal Food Processing and Preservation, 2002, 26(5): 307-322
- [4] Knoerzer K, Regier M, Schubert H. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications [J]. Innovative Food Science Emerging Technology, 2008, 9(3): 374-384
- [5] Suhubert H. 食品微波加工技术[M].北京:中国轻工业出版社,2008
Suhubert H. The microwave processing of foods [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008
- [6] Pitchai K, Birla S, Subbiah J, et al. Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens [J]. Journal Food Engineering, 2012, 112(1-2): 100-111
- [7] Liu S, Ogiwara Y, Fukuoka M, et al. Investigation and modeling of temperature changes in food heated in a flatbed microwave oven [J]. Journal Food Engineering, 2014, 131(3): 142-153
- [8] Guan D, Cheng M, Wang Y, et al. Dielectric properties of mashed potatoes relevant to microwave and radio-frequency pasteurization and sterilization processes [J]. Journal of Food Science, 2003, 69(1): E30-E37
- [9] Regier M, Housova J, Hoke K. Dielectric properties of mashed potatoes [J]. International Journal of Food Properties, 2001, 4(3): 431-439
- [10] COMSOL. COMSOL Multiphysics 5.1 manual, 2015
- [11] Datta A K, Anantheswaran R C. Handbook of microwave technology for food applications [J]. Crc. Press, 2001
- [12] Liu S, Fukuoka M, Sakai N, A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating [J]. Journal Food Engineering, 2013, 115(1): 49-62
- [13] 黄彬,徐玉娟,唐道邦,等.反复冻融对不同卤制条件盐水鸡肉品质的影响[J].食品科技,2014,1:141-146
HUANG Bin, XU Yu-juan, TANG Dao-bang, et al. Effect of freeze-thaw cycle on meat quality of different marinating salted chicken [J]. Food Science and Technology, 2014, 1: 141-146
- [14] Tang J, Feng H, Lau M. Microwave heating in food processing [J]. Advances in Bioprocessing Engineering, 2002: 1-44
- [15] Sweat V E. Thermal properties of foods [J]. Engineering Properties of Foods, 1986, 49
-
- (上接第 240 页)
- [6] Schramm G. 实用流变测量学[M].北京:石油工业出版社, 2009
Schramm G. A Practical approach to rheology and rheometry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009
- [7] Mewis J, Wagner N J. Thixotropic [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 147-148: 214-227
- [8] Sozer N. Rheological properties of rice pasta dough supplemented with proteins and gums [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 849-855
- [9] Zhao Q, Kuang W, Fang M, Effect of sorbitan monostearate on the physical characteristics and whipping properties of whipped cream [J]. Food Chemistry, 2013, 141: 1834-1840
- [10] Zhao Q, Kuang W, Fang M, et al. Frozen, chilled and spray dried emulsions for whipped cream: Influence of emulsion preservation approaches on product functionality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 287-293
- [11] 赵强忠.搅打稀奶油的搅打性能和品质的变化规律及其机理研究[D].广州:华南理工大学,2006
ZHAO Qiang-zhong. Change and mechanism of whipping properties and qualities of whipped cream. [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2006
- [12] Zhao Long, Qiang-zhong Zhao, Tong-xun Liu. Influence of xanthan gum on physical characteristics of sodium caseinate solutions and emulsions [J]. LWT-Food Hydrocolloids, 2013, 32(1): 123-129