

不同形状包装食品在微波加热过程中的 三维温度分布

戴辉明, 郭雯, 程裕东*, 金银哲*
(上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要:为了考察矩形、六边柱形、圆柱形三种几何形状样品在微波加热过程中的温度分布情况,以含水量为99%的凝胶琼脂为研究对象,依据Maxwell方程和传热方程,用有限元方法建立了三维温度分布模型。并通过考察各几何形状包装食品的表面、切面和内部三维等温面等情况,确定了各部位温度差异情况。结果表明:相同体积、不同几何形状的样品,由于各表面的形状不一样,进入样品的微波能量在内部形成不同的复杂聚焦区,温度分布有明显区别。微波加热60s后,矩形、六边柱形和圆柱形样品内部各出现4个、7个和1个热点区域,高低温差分别为23.87、21.92、25.10℃。实验值和计算值呈现良好的一致性。温度分布特性与样品的介电特性有关,对于含水量为99%的凝胶琼脂,在10~45℃范围内,频率为2450MHz的微波穿透深度在10~25mm之间。三维模型可较为清晰地描述不同几何形状包装食品的内、外部温度分度,为改善微波食品加热过程中的温度不均匀和优化包装食品质量提供基础数据和理论基础。
关键词:包装食品,不同形状,三维模型,温度分布,微波加热

Three-dimensional temperature distribution of the packaged foods with different shapes during microwave heating

DAI Hui-ming, GUO Wen, CHENG Yu-dong*, JIN Yin-zhe*

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Temperature distribution characteristics of samples (gelatin-agar with a moisture content of 99%) were studied with different shapes, such as rectangular, six-side cylindrical and the cylindrical, during microwave heating by experiments and simulations. Based on Maxwell's equations and heat transfer equations, models of three-dimensional temperature distribution were established using finite element method (FEM). The isothermal surface of the exterior surface, the intersecting surface and the interior surface of packaged foods with different shapes were investigated, and the correlated temperature differences among three surfaces were observed. Samples with the same volume, but varied in shapes, had distinct differences in the distribution of temperature, because the penetrated microwave energy samples formed various complex focusing areas. Upon microwave heating for 60s, 4, 7 and 1 hot spots appeared in the rectangular, the six-side cylindrical and the cylindrical sample respectively, and the relevant temperature difference between the maximum and the minimum were 23.87, 21.92 and 25.10℃. The temperature distribution was concerned with the dielectric characteristics of certain samples. As to the sample, penetration depths of the microwave at 2450MHz ranged from 10 to 25mm, when the correlated temperature varied from 10 to 45℃. Based on three-dimensional models, the temperature distribution inside and outside of the packaged foods with different shapes could be described distinctly.

Key words: packaging food; different shapes; three-dimensional model; temperature distribution; microwave heating

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2015)13-0082-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.13.008

微波加热技术因其快速、方便、节能等原因被广泛应用于食品加工领域^[1]。但食品在微波加热处理

过程中,常常会出现内部热点(Hot-Spot)或热带(Hot-Line)等温度分布不均匀现象,这已成为食品

收稿日期: 2014-09-09

作者简介: 戴辉明(1974-),男,硕士研究生,研究方向:食品热加工。

*通讯作者: 程裕东(1961-),男,博士,教授,研究方向:食品热加工。

金银哲(1977-),男,博士,副教授,研究方向:食品工程。

基金项目: 上海市科委部分院校能力建设项(12290502200);上海高校知识服务平台-上海海洋大学水产动物遗传育种中心(ZF1206)。

微波加热应用中的难点问题^[2-4]。当食品的表面为曲面情况下,微波照射到弯曲面及尖角部分时,电磁波会在这些部分集中,造成部分区域的加热集中,导致不均匀加热^[2]。在微波加热时,食品外表面及内部所受到的电场强度因几何形状的不同而不同,内部热量分布非常复杂^[2]。

国内外学者对食品微波加热时的温度分布已有较多研究,如 Mao 等对扁平状半圆形鱼糜在微波加热过程中的温度分布情况进行了研究^[5], Knoerzer 等通过核磁共振技术描绘了圆柱形液态食品在微波加热过程中内部温度的分布情况^[6], Cuccurullo 等利用红外线测试方法研究了圆柱形杯状容器中水在微波加热过程中的内部温度分布情况^[7]。另外,也有部分学者以球形和圆柱形食品为对象^[8-13],从一维和二维角度,考察了几何形状、尺寸大小、介电特性对微波加热时温度分布的影响。大部分研究结果显示,其实验值和计算值呈现出良好的一致性。上述研究中发现,一定频率下,食品微波加热的温度分布受食品材料的几何形状、尺寸大小、介电特性以及热特性等因素的影响。

已有的微波加热研究中,国内外对球形或圆柱形食品的研究较多,对矩形或六边形等形状食品的研究相对较少。而矩形或六边形食品也常在实际中出现。本研究以不同几何形状的包装食品为研究对象,利用 Maxwell 方程和热传导方程,用有限元分析法^[14-16]对食品在微波加热过程中的加热特性进行模拟,探讨其表面和内部温度分布情况。根据模拟结果,对三种几何形状样品的内部温度三维分布情况进行分析,研究几何形状对包装食品微波加热特性的影响,为微波加热食品的外包装设计提供重要参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

食品级营养琼脂粉 购自国药集团;“密保诺”牌保鲜膜 上海庄臣有限公司;亚克力管材(壁厚 2mm,内径 46.8mm),亚克力板材(壁厚 2mm) 上海惠全实业有限公司。

AL204 型电子天平 梅特勒-托利多仪器上海有限公司;DHG-9245A 型数显电热鼓风干燥箱 上海慧泰仪器制造有限公司;N5230C PNA-L 网络分析仪 美国 Agilent 公司;松下 NN-GD568M 型变频微波炉 深圳市新世联科技有限公司;微波工作站^{TE} 加拿大 FISO 技术公司;TH7700 红外热像仪 日本 NEC San-ei 仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 将营养琼脂粉和去离子水以质量比 1:99 混合,边搅拌边加热至沸腾,倒入不同容器中冷却至 2h 至常温。

1.2.2 容器制备 将亚克力板材用管材割刀切成相应规格的块状,边缘用砂纸磨平,粘合成 41.5mm × 41.5mm × 30mm 的矩形容器边长分别为 25.7mm,高度为 30mm 的六边柱形容器;以及 30mm 长、底端壁厚为 2mm 的圆柱形容器。

1.2.3 微波输出功率的测定 实验所用微波炉的额定输出功率 1000W,炉内体积(宽、深、高)359mm × 352mm × 217mm,炉腔容积 27L,转盘直径 340mm,微波频率为 2450MHz。本实验选取 250W 做为微波加热实验功率,并采用标准测试法(Stanford),对其进行实际输出功率的检验。输出功率(P,单位为 W)的计算公式^[17]如下:

$$P = Q/t = (C \cdot m \cdot \Delta T)/t \quad \text{式(1)}$$

其中,Q 为热量(J),t 为时间(此研究用 120s),C 为比热(水的比热为 4.19J/(g·°C)),m 为质量(1000g 水),ΔT 为温差(°C),水的初温(20 ± 0.1)°C,记录 ΔT°C。平行三次取平均值,每次偏差应在平均值 ± 5% 之内。经上述所得,实际输出功率为 194W。因此,本实验选取 194W 作为微波加热的实验功率。

1.2.4 微波加热及测温 用聚苯乙烯泡沫塑料对初始温度为 4°C 的样品进行隔热,使用微波加热。为使样品加热均匀,对每种样品微波加热时转盘转动 5 圈(60s),且加热后样品最高温度不超过样品的熔点。样品加热后迅速从空腔中取出,用小薄片刀从样品直径(对角线)截面切成两个截面,切下的截面快速用红外测温仪测定截面的表面温度,整个过程在 30s 内完成。然后用 TH51-701 热处理软件(日本 NEC 三荣株式会社)进行处理,并采用 Origin8.0 软件(美国 OriginLab 公司)对温度成像进行数值化处理,得到样品截面温度分布的定量值。

1.2.5 介电特性的测定 样品的介电常数(ε')和介电损失率(ε'')采用同轴探针法进行测定。本研究中选择的频率范围为 500MHz ~ 3GHz,频率间隔是 5MHz;温度范围是 10~80°C,温度间隔 5°C。测定之前用蒸馏水对介电测定探针进行校正。整个测定过程中,采用铜-镍热电偶测温仪对样品的温度进行监测,其精度为 ± 0.1°C^[18-19]。

1.2.6 穿透深度的计算 穿透深度时指微波照射食品后,其能量衰减至表面能量的 1/e 时的位置距表面的距离,是衡量微波在食品内部渗透时电磁能衰减的指标,是食品内部温度分布形成的重要因素。食品的穿透深度越小表示表面加热性越强,表面升温显著。反之,则食品的表面加热性较弱^[20]。其公式如下:

$$d_p = \frac{c_0}{2\pi f \sqrt{2\epsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}} \quad \text{式(2)}$$

其中,C₀ 为自由空间光速(C₀ = 3 × 10⁸m/s),f 为频率(Hz),λ₀ 表示自由空间微波波长(λ₀ = C₀/f),2450MHz 下波长是 12.24cm。含水量为 99% 的凝胶琼脂,在 10~45°C 范围内,频率为 2450MHz 的微波穿透深度在 10~25mm 之间,且随着样品温度的增加,穿透深度也相应增加。

1.3 模型的建立

为了建立温度分布模型,有如下几个假设:a、样品与环境没有热交换;b、样品在微波加热过程中没有水份的蒸发;c、样品的密度、常压热容、热扩散系数不随温度的变化而变化。

本研究的电场强度通过求解 Maxwell 方程组求得。在无源空间中,电磁场 Maxwell 方程组^[3,4]的微分形式为:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad \text{式(3)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -j\omega\epsilon_0\epsilon\mathbf{E} \quad \text{式(4)}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad \text{式(5)}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad \text{式(6)}$$

其中, \mathbf{E} 为电场强度 (V/m), \mathbf{H} 为磁场强度 (A/m), ϵ 表示复介电常数, ϵ_0 为自由空间(真空)中的介电常数, 为 8.854×10^{-12} F/m。 ω 为角频率 (Hz), μ 为磁导率 (H/m)。

电场强度和磁场强度都定义为时间的函数。

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}_0(x, y, z) e^{j\omega t} \quad \text{式(7)}$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}_0(x, y, z) e^{j\omega t} \quad \text{式(8)}$$

$$\text{初始条件: } E_x = 0, E_y = 0, E_z = 0 \quad \text{式(9)}$$

$$\text{边界条件: } E_x = 0, E_y = 0, E_z = E_0 \quad \text{式(10)}$$

在微波炉中,微波从不同角度和方向照射样品,在样品内部产生不均匀的电场分布,导致样品内吸收的能量分布不均匀,影响到样品内部的温度分布情况,因此,建立微波加热的数学模型基础是求解有内热源情况的传热微分方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{abs}} \quad \text{式(11)}$$

Q_{abs} 表示单位体积产热量 (W/m^3), ρ 是样品密度 (kg/m^3), C_p 为比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$), T 为温度 ($^\circ\text{C}$), k 为热传导系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$)。

$$\text{初始条件: } t = 0, T = T_i \quad \text{式(12)}$$

$$\text{边界条件: } (-k \nabla T) = 0 \quad \text{式(13)}$$

将食品的各种物性和初始及边界条件输入到有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 3.5a (COMSOL 公司),得到电磁场和温度场分布情况。对于电磁和传热模型的求解主要是运用 SPOLES 直接求解器求解。

网格划分是通过电磁场中一个波长至少有两个网格的原理,可进行计算并确定,且网格的大小直接影响到计算结果。采用合理的网格划分,可使模拟值与实验值更接近。在微波炉腔和波导中,网格划分的最大网格尺寸为 $\lambda/2 = 0.0612$,样品的最大网格尺寸为 $0.0612/(\epsilon')^{0.5}$ 。

1.4 数据处理与统计分析

运用 SPSS16.0 软件 (SPSS 公司) 对所测数据进行非线性回归分析。平行测量 3 次,取平均值。

2 结果与讨论

2.1 介电特性和穿透深度

2450MHz 频率下,含水量为 99% 的凝胶琼脂介电特性和温度的关系如图 1 所示。

在实验温度范围内,含水量 99% 的凝胶琼脂介电常数和介电损失率都呈现随温度的上升而减小的变化趋势;穿透深度则随着温度的上升而呈现先增加后减少的趋势。样品在 2450 MHz 下的介电常数和介电损失率与温度之间的相关公式(回归系数均在 0.98 以上)如下:

$$\epsilon' = 78.84 - 0.00238T^2 - 0.0645T$$

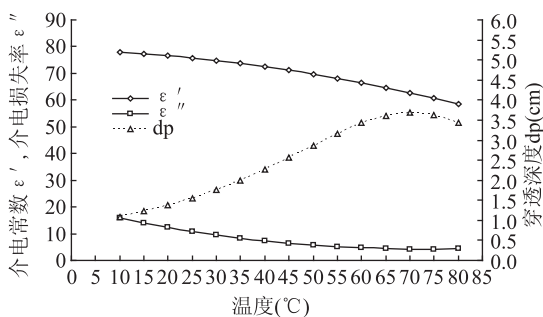


图1 温度对样品介电特性和穿透深度的影响

Fig.1 Effect of temperature on dielectric property and the depth of penetration of sample

$$\epsilon'' = 19.96 + 0.00301T^2 - 0.436T$$

2.2 三维模型的建立

将表 1 中的样品特性和初始条件代入 COMSOL3.5a 中进行模拟。

表1 建模中设定的样品特性和初始条件

Table 1 Material properties and initial conditions used in the model

参数	数值
样品初始温度 ($T, ^\circ\text{C}$)	4.00
微波频率 (f, MHz)	2450
微波输出功率 (P_M, W)	194
加热时间 (t, s)	60
密度 ($\rho, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000 ^[21]
比热 ($C_p, \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	4206 ^[21]
导热系数 ($k, \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.56 ^[21]

图 2 为网格划分和样品吸收功率密度的关系。当网格的数量少于 62000, 样品吸收功率和功率密度的变化较大; 大于 62000 时, 相对稳定。考虑到计算机内存, 通过细化网格, 样品的各模型网格数在 85000 以上, 自由度在 120000 以上。网格划分的结果如图 3 所示。微波炉空腔中电磁分布(距微波炉腔底 40mm 的截面)显示微波在炉腔内传播遇到炉壁(金属壁面, PEC 边界)发生全反射, 形成驻波。由于频率为 2450MHz 的微波在空气中的传播波长为 122.4mm, 驻波为波长的一半, 为 61.2mm。微波的传播方向为 X 方向, 炉腔在 X 方向的距离为 359mm, 除以驻波约为 5, 所以形成 5 个电场强峰。放入样品

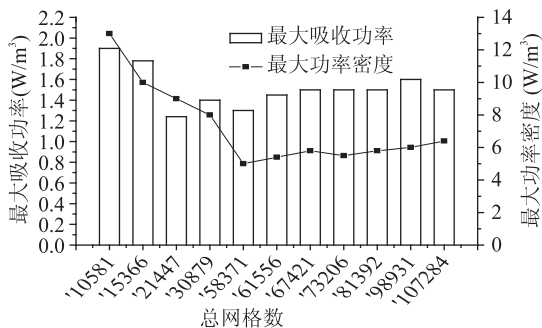


图2 网格划分和样品吸收功率密度的关系

Fig.2 The relationship of mesh divided and density of sample absorbing power

后,改变了微波炉中的电场分布。为了计算样品内吸收功率,需要计算样品表面电场的强度值 E 。通过实验所得二维切面温度积分,可计算出功率吸收密度、单位体积产热量、截面平均温度 T_t 。结果显示,相同体积、不同几何形状的样品微波功率吸收密度实验值与模拟计算值呈现出良好的一致性。

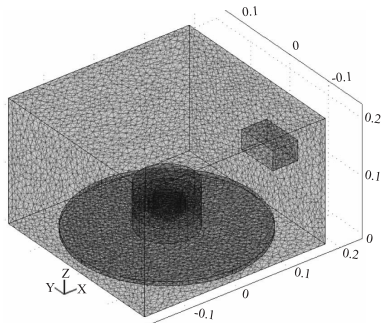


图3 网格划分的结果

Fig.3 Result of mesh divided

2.3 不同形状样品的温度分布

矩形样品的实验结果和计算结果呈现良好的一致性(图4)。矩形样品的横切面,在四周边相交处存在4个热点,中心存在冷点。各切面高低温差较大,最高温度和最低温度相差 19°C ,样品加热后切面的温度分布不均匀。中心温度由中心向上下两端依次降低,4个热点温度中心向上下两端依次降低。从温度分布的均匀性看,中心切面高低温相差较大,最大温差为 23.87°C ,温度分布不均匀,上下两端高低温相差较小,温度分布较均匀。图5列出了不同温度下,矩形样品等温面的三维效果图。矩形样品微波加热60s后,在高温区有4个高温等温面,各等温面呈独立封闭状态,分布在距垂直面15mm附近。这是由于矩形样品温度分布与样品的介电特性有关,主要表现在样品的微波穿透深度在10~25mm之间,且从三个垂直面穿透进来的能量在此区域聚焦成高能区,产生热点。随着温度的降低,4个等温面逐步连接成一起成为一个中空的轮胎状封闭曲面,外围形状接近于圆滑的矩形。低温区($27\sim 32^{\circ}\text{C}$)等温面为断开状态。矩形样品经微波加热后,各表面都有热点,且热点的分布都靠近两个边相交的角落处,中心温度低。最高温度与最低温度相差较小,表面受热比较均匀。矩形样品的中心横切面还是中心纵切面,都不存在热点。矩形样品纵切面存在2个热点,以轴对称分布于中心轴两侧,中心存在冷点。

六边形样品经微波加热60s,上、下表面都有6个热点出现,热点的分布都靠近两边边相交的角落处。从侧面观察,在四个角落上存在4个热点。各表面的温度分布规律为中心温度低,四周角落温度高。最高温度与最低温度相差 10.5°C ,表面受热比较均匀。六边形样品微波加热后,无论是中心横切面还是中心纵切面,在中心都存在热点。从纵切面来看,温度分布由中心向四周逐步降低;对于横切面而言,在靠近六个相交边处存在6个热点,但温度比中心热点低。各切面高低温差较大,最高温差为 21.92°C ,样品加热后切面的温度分布不均匀。图6

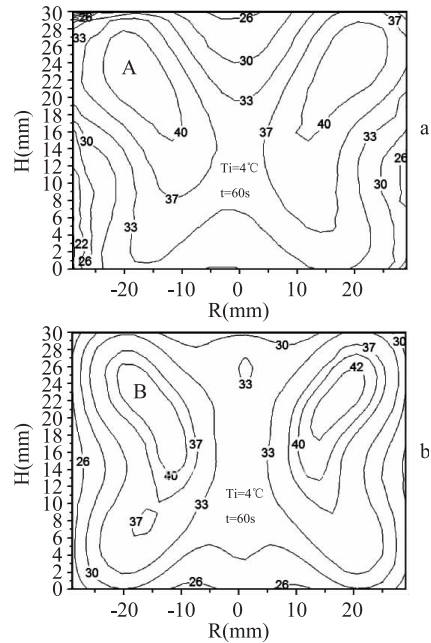


图4 矩形样品微波加热后温度分布实验值(a)和计算值(b)比较

Fig.4 Comparison the experimental values (a) and calculation values (b) of rectangular sample in the cross section after microwave heating

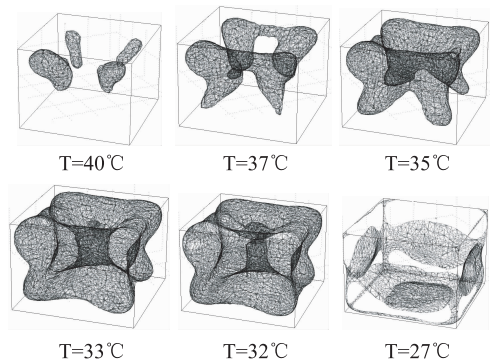


图5 矩形样品微波加热60s后等温面分布

Fig.5 The isothermal surface of rectangular sample during microwave heating 60s

列出了不同温度下六边形样品等温面的三维效果图。内部温度等温面分布与圆柱形有很大的差别,与矩形相接近。在中高温区($37\sim 40^{\circ}\text{C}$)有7个高温等温面,各等温面独立封闭状态。随着温度的降低,7个等温面逐步连接成一起成为起伏不平的皇冠状封闭曲面,随着温度的降低,形状逐步接近于圆滑的六边柱形。低温区($28\sim 32^{\circ}\text{C}$)等温面为断开状态。

圆柱形样品经微波加热60s,上、下表面有热带出现。热带以同心圆的形式存在,温度从外围向中心依次降低。圆柱形样品的侧面也存在热带,上下有高温带,中间存在低温带。最高温度与最低温度相差 2.7°C 。圆柱形样品微波加热后,无论是中心横切面还是中心纵切面都在中心存在热点,温度由中心向四周依次降低。对于横切面而言,不同温度等温线以同心圆的形式存在;对于纵切面而言,等温线以相对规则的近似四边形的形式存在,温度由中心

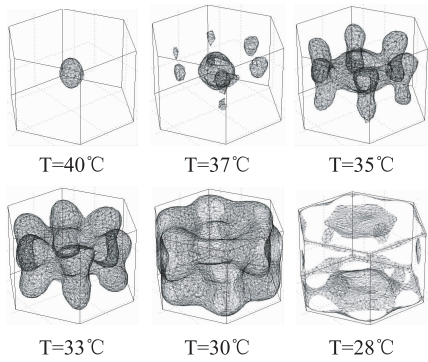


图6 六边柱形样品微波加热60s后等温面分布
Fig.6 The isothermal surface of hexagon columnar sample during microwave heating 60s

向四周依次降低。各切面高低温差较大,最高温度和最低温度相差 25.10°C ,样品加热后切面的温度分布不均匀。圆柱形样品内部温度等温面分布有一定的规律性,表现为中高温区($27\sim 40^{\circ}\text{C}$)等温面呈封闭状(图7)。高温区($33\sim 40^{\circ}\text{C}$)等温面为椭圆形存在,中温区($27\sim 30^{\circ}\text{C}$)等温面表现形式接近于圆柱形,低温区($25\sim 27^{\circ}\text{C}$)等温面为断开状态。

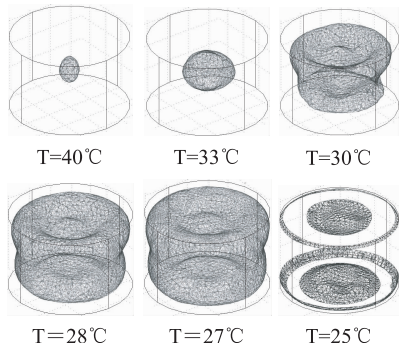


图7 圆柱形样品微波加热60s后等温面分布
Fig.7 The isothermal surface of cylindrical sample during microwave heating 60s

通过理论计算值与实验值进行对比,证明了数学模型能很好的预测食品的微波加热过程,更加直观的分析样品微波加热后内部温度分布,更直观地了解影响样温度分布的各种因素,能够从理论上揭示食品在微波加热后的内部温度分布。

3 结论

本研究依据 Maxwell 方程和传热方程,用有限元方法建立了不同几何形状样品在微波加热过程中的三维温度分布模型。三维温度分布模型可直观地描述样品在微波加热之后的温度分布特性,如食品的表面、切面和内部三维等温面和各部位温度差异情况等。微波加热条件下,不同形状的样品所呈现的温度分布也不同。样品的温度分布取决于样品的介电特性、形状等因素。样品的介电常数和介电损失率对微波的穿透深度起着重要的作用。微波能量在不同形状的样品内部形成不同的复杂聚焦区,导致温度分布有明显差异。通过模型可掌握样品的表面及内部的温度变化特性,且理论值和实验值呈现良好的一致性。通过计算结果建立模型,可减少和节

省实验所带来的繁琐和时间。三维温度分布模型的建立为改善微波加热过程中食品的温度分布均匀性,优化产品品质提供基础数据和理论依据。

参考文献

- [1]程裕东.微波食品的开发及其技术应用[J].中国食品学报,2003,3(3):93-99.
- [2]程裕东.微波加热过程中圆柱型包装食品的温度分布研究[J].中国食品学报,2002(12):6-11.
- [3] Liu S, Fukuoka M, Sakai N. A finite element model for simulating temperature distributions in rotating food during microwave heating [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 115 (1):49-62.
- [4] Liu S, Ogiwara Y, Fukuoka M, et al. Investigation and Modeling of Temperature Changes in Food Heated in a Flatbed Microwave Oven [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 131: 142-153.
- [5] Mao W, Watanabe M, Sakai N. Analysis of temperature distributions in Kamaboko during microwave heating [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71:187-192.
- [6] Knoerzer K, Regier M, Hardy EH, et al. Simultaneous microwave heating and three - dimensional MRI temperature mapping [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10:537-544.
- [7] Cuccurullo G, Berardi PG, Carfagna R, et al. IR temperature measurements in microwave heating [J]. Infrared Physics and Technology, 2002, 43:145-150.
- [8] Ohlsson T, Rriman PO. Temperature distribution of microwave heating - spheres and cylinders [J]. Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1978, 13:303-310.
- [9] Cheng YD., Sakai N, Hanzawa T. Effects of dielectric properties on temperature distributions in food model during microwave heating [J]. Food Science and Technology International, 1997, 3:324-328.
- [10] Knoerzer K, Regier M, Schubert H. A computational model for calculating temperature distributions in microwave food applications [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2008, 9:374-384.
- [11] 吕联通, 景莹芳, 周棋凯. 微波加热下食品球形物料升温状态的研究 [J]. 成都科技大学学报, 1994 (3):11-17.
- [12] 汪秀清, 杜佩, 汪晓银. 微波炉加热圆柱形食物的温度分布 [J]. 科学技术与工程, 2014, 4:51-56.
- [13] Yang HW, Gunasekaran S. Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 64:445-453.
- [14] Lin YE, Anantheswaran RC, Puri VM. Finite element analysis of microwave heating of solid foods [J]. Journal of Food Engineering, 1996, 25:85-112.
- [15] Pandit RB, Prasad S. Finite element analysis of microwave heating of potato - transient temperature profiles [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60:193-202.

(下转第102页)

品添加剂,2004(5):25-27.

[10]王敦,白耀宇.家蚕蛹营养成分及其开发利用研究进展[J].昆虫知识,2004,41(5):418-420.

[11] KERSCHER R, GROSCH W. Comparative evaluation of potent odorants of boiled beef by aroma extract dilution and concentration analysis[J]. Zeitschrift Fur Lebensmitt, 1997, 2004: 3-6.

[12]张宇昊,王强. Alcalase 酶水解花生蛋白制备花生短肽的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 258-262.

[13] Adamson N J, Reynolds E C. Characterization of casein phosphopeptides prepared using alcalase; determination of enzyme

specificity[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1996(19): 202-209.

[14]陈新峰,王君虹,洪狄俊,等.复合酶解法制备乳清蛋白肽工艺条件的研究[J].浙江农业科学,2008(4):497-500.

[15]崔春,赵谋明,曾晓房,等.酸法和酶法水解海蛰蛋白的呈味作用研究[J].中国调味品,2007(10):34-36.

[16]鲁珍,穆利霞,秦小明,等.蚕蛹蛋白酶法水解及美拉德反应改良其产物风味的研究[J].食品工业科技,2012(24):242-245,252.

[17]潘丽红,周光宏,徐幸莲,等.美拉德反应在肉味香精生产中的应用[J].肉类工业,2007(8):29-31.

(上接第86页)

[16] Oliveira, MEC, Franca, AS. Finite element analysis of microwave heating of solid products[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 27: 527-536.

[17]杨振超.微波对应型调味淡水鱼片的加热特性研究[D].上海:上海海洋大学,2013.

[18]张保艳,于海洋,程裕东,等.温度、频率和水分含量对罗非鱼介电特性影响的研究[J].水产学报,2012,36:1785-1792.

[19]杨振超,程裕东,金银哲.915MHz和2450MHz频率下温度和盐溶液浸渍对青鱼介电特性的影响[J].食品工业科技,2013(10):138-141.

[20]Liu Y, Tang J, Mao Z. Analysis of bread dielectric properties using mixture equations[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93: 72-79.

[21] Rao MA, Rizvi SSH, Datta, AK. Engineering Properties of Foods[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 501-565.

(上接第89页)

[9] García M A, Ferrero C, Bértola N, et al. Edible coating from cellulose derivatives to reduce oil uptake in fried products[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2002(3): 391-397.

[10]中华人民共和国国家标准委员会. GB/T 5009.6-2003 食品中脂肪的测定[S].北京:中国标准出版社,2003.

[11] Morgan M T, Klaus J R, Berg E P. Objective color standards for pork[J]. Reciprocal Meat Conf Proc, 1997(50): 138-141.

[12]李磊,牛坤,马庆一.可食性膜阻水特性的研究[J].食品

科学,2008,29(2):145-150.

[13]赵勇.降低油炸食品含油量的研究[D].重庆:西南大学,2008.

[14]Ray M, Ciolfi V, Mave B, et al. Development and application of soy-protein films to reduce fat intake in deep-fried foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000(80): 777-782.

[15]王秀霞,胡坤,方少琪,等.多聚磷酸盐对猪肉肉质特性的影响研究[J].肉类工业,2006(3):17-20.

(上接第93页)

autoxidation and antioxidants of soybean, sunflower, and olive oil[J]. Eur Food Res Technol, 2007, 226: 239-246.

[14] Malheiro R, Oliveira I, Vilas - Boas M, et al. Effect of microwave heating with different exposure times on physical and chemical parameters of olive oil[J]. Food Chem Toxicol, 2009, 47: 92-97.

[15] Naz H, Sheikh R, Siddiqi S. Oxidative stability of olive, corn and soybean oil under different conditions[J]. Food Chemistry, 2004, 88: 253-259.

[16]李杨,张雅娜,王欢,等.水酶法提取大豆油与其他不同种大豆油品质差异研究[J].中国粮油学报,2014,29(6):46-52.

[17] Yettella R R, Henbest B, Proctor A. Effect of antioxidant soybean oil conjugated linoleic acid production and its oxidative stability[J]. J Agric Food Chem, 2011, 59: 7377-7384.

[18] Berasategi I, Barriuso B, Ansorena D. Stability of avocado oil during heating: comparative study to olive oil[J]. Food Chemistry, 2012, 132(1): 439-446.

(上接第98页)

[9]胡坤,方少英,王秀霞,等.蛋白质凝胶机理的研究进展[J].食品工业科技,2006,27(6):202-205.

[10]刘香英,康立宁,田志刚,等.东北大豆品种贮藏蛋白7S和11S组分及亚基相对含量分析[J].大豆科学,2009,28(6):985-987.

[11] Bordford M M. A rapid and sensitive method of the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein - dye binding[J]. Anal. Biochem, 1979, 72: 254-284.

[12]卢义伯,潘超,祝义亮.豆腐生产中不同制浆工艺的研究

[J].食品工业科技,2007,28(8):182-185.

[13]宋莲军,张莹,赵秋燕,等.大豆品种与北豆腐得率及品质指标的关系[J].江苏农业科学,2011,39(4):321-323.

[14] Pupp MC, Anon MC. Structural properties of heated induced soy protein gels as affected by ionic strength and pH[J]. J Agric Food Chem, 1998, 46: 3583-3589.

[15]朱晓烨,迟玉杰,刘红玉.大豆蛋白7S和11S组分分离方法的优化[J].食品工业科技,2011,32(7):268-273.

[16]宋鹏,周瑞宝.大豆蛋白亚基功能性的研究[J].粮油食品科技,2010,18(5):18-22.