

频率波动范围对家用微波炉加热模式的影响

Effect of frequency shifts range on heating pattern of domestic microwave oven

阎若萍^{1,2} 王易芬^{1,3} 栾东磊^{1,2}

YAN Ruo-ping^{1,2} WANG Yi-fen^{1,3} LUAN Dong-lei^{1,2}

(1. 上海海洋大学食品热加工工程技术中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

3. 奥本大学生物系统工程系, 美国阿拉巴马州 AL 36849)

(1. Engineering Research Center of Food Thermal-Processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Department of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Department of Biosystems Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama, AL 36849, USA)

摘要:从频率的波动范围入手,基于数值模拟的手段,研究在多模腔体设计下,实现食品热形可重复的方法。首先测量了某家用微波炉在空腔和负载加热时的频率变化,并根据其物理模型建立了数值模型,利用验证后的数值模型分析频率波动范围对受热食品温度分布的影响。结果表明:家用微波炉加热时,其加热频率随时间不断变化,当频率波动范围较大时,即使加热同一规格的食品,得到的温度分布也不相同;随着频率波动范围的缩小,食品的温度分布越来越稳定,当频率波动范围缩小为中心频率 ± 2 MHz时,受热食品的温度分布不再随频率的波动而变化。因此在多模设计的加热腔体内,可以通过控制家用微波炉的频率波动范围实现食品的稳定可重复加热。

关键词:微波炉;微波频率;温度分布;数值模拟

Abstract: In order to maintain the stability of heating, the effect of frequency shifts range on heating pattern of domestic microwave was investigated based on the numerical simulation method. In this study, the frequency of a microwave oven was measured under no-load and load conditions and a computational simulation model was developed to investigate the effect of frequency shifts on heating pattern of microwave heating. The results showed that the frequency of microwave was constantly changing during microwave heating in the oven; when the frequency shifts was large, the temperature distribution was not stable even heating the same food; the heating pattern is more stable as the frequency shifts reduced; when the range of frequency is limited to the centre frequency ± 2 MHz, the heating pattern of food heated in microwave oven would be almost consistent.

frequency is limited to the centre frequency ± 2 MHz, the heating pattern of food heated in microwave oven would be almost consistent.

Keywords: microwave oven; microwave frequency; heating pattern; computer simulation

目前家用微波炉面临的主要问题是微波加热的不均匀性及加热后食品温度分布不稳定^[1-3]。影响微波炉加热均匀性的因素包括食品的形状^[4-5]、尺寸^[6-7]、位置^[8]及其介电特性^[9]等。这些因素通过影响微波炉加热时的电场分布来影响微波加热的均匀性。微波进入加热腔后经腔体金属壁反射,其反射波和入射波叠加将形成驻波。驻波的波腹位置电场强度最大,处于波腹位置的食品升温最快,该食品位置成为食品加热的热点,热点位置的食品可能由于加热过度,降低品质;而在驻波的波节位置电场强度最小,处于波节位置食品加热速度慢,该位置会成为食品加热后的冷点,其位置处可能无法在短时间内达到所需温度。为了提高家用微波炉的加热均匀性,研究者提出多种改进方法,主要包括旋转^[10-11]、模式搅拌器^[12]及天线^[13-14]等方式。这些方式可以从概率的角度提高微波加热的均匀性,但是无法从根本上解决均匀性的问题。为了提高微波加热的均匀性,需要根据电场变化规律设计微波炉加热腔。当前家用微波炉的加热腔为多模设计。在多模加热腔内,当微波频率随时间不断变化时,加热模式即微波电场分布特征也不断改变,无法确定电场在波腔中的变化规律^[15-16]。因此探究如何使家用微波炉加热时电场稳定即食品的温度分布保持不变,对提高微波炉加热均匀性有着十分重要的意义。并且温度分布可重复的设计可以为设计稳定专业微波炉及2 450 MHz的工业微波炉提供理论基础。

微波炉加热食品温度分布的可重复性可以通过2种方式实现,一种是将微波炉设计成单模系统,另一种是利用单

基金项目:上海市地方能力建设专项(编号:16050502200);上海海洋大学科技专项(编号:A2-0203-17-100206);上海市浦江人才计划(编号:17PJ1403300)

作者简介:阎若萍,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:栾东磊(1984—),男,上海海洋大学副教授,博士。

E-mail: dlluan@shou.edu.cn

收稿日期:2017-12-20

一频率的微波源加热食品。单模微波系统设计是指在加热频率范围内,微波炉的加热模式是固定的,在单模系统中加热同一规格食品的温度分布是唯一的。单模系统的设计原则为当微波加热腔的尺寸小于某一尺寸时,食品加热时的温度分布不受频率波动的影响^[17]。2 450 MHz 微波对应的波长仅为 12.2 cm,若设计成单模系统,会导致加热腔尺寸过小,无法加热常规食品。另一种方法是利用单一微波源进行加热,目前由于技术限制,无法保证微波加热时频率的单一性,使该方式受到限制。为了实现微波加热的稳定可重复,本研究将探究频率波动范围对家用微波炉加热模式的影响。

传统研究微波加热的方法,主要是通过试验对结果进行分析,缺点是成本高、耗时长、效率低。随着计算机运算能力的提高,数值计算方法的改进,越来越多的国内外学者利用数值模拟预测微波加热时电场变化,并对食品中的温度分布进行预测和分析^[18-20],缩短了研究时间,降低了研究成本。本研究将检测微波炉空载和负载加热时,其微波的频率变化,然后利用数值模拟来探究频率波动范围对微波炉加热食品后温度分布的影响。

1 材料与方法

1.1 频率检测

为了分析家用微波炉加热时频率分布情况,本研究利用 TM-2650 频率检测仪和 M-404 天线检测家用微波炉空载和负载加热时的频率变化。频率检测仪的中心频率设置为 2 450 MHz,检测的频率范围设置为 2 400~2 500 MHz,该仪器每隔 0.1 MHz 进行一次采样,因此每次检测包含 1 001 个点。由于微波炉加热时,频率是不断变化的,单次检测无法得到所有的频率,因此本研究通过记录多次瞬时频率数据,分析微波加热时的频率变化。检测时将天线置于离微波炉炉门 5 cm 的位置,每组检测加热时间为 100 s,瞬时记录用时 2~3 s,每组试验记录 25 次瞬时频数据,通过分析整理所有数据,形成频谱图。

1.2 物理模型

微波炉的物理模型基于型号为 25UG26 的威力微波炉建立,如图 1 所示,腔内尺寸(长×宽×高)为 348 mm×222 mm×336.5 mm,主要包括波源、波腔、玻璃转盘。模拟食品置于玻璃转盘中进行旋转加热。用于加热的圆形模拟食品的尺寸(半径×高)为 65 mm×20 mm。

1.3 控制方程

微波加热的数值模拟包含电磁加热和热传导两部分。

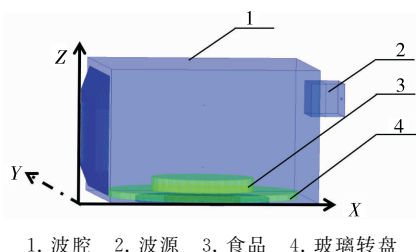


图 1 微波炉物理模型图示

Figure 1 Physical model of microwave oven

电磁加热具体表现为食品内部极性分子的偶极子旋转和离子传导。微波的电磁加热可用 Maxwell 方程表示^[21]

$$\oint_c \vec{E} \times d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_s \vec{B} \times d\vec{s}, \quad (1)$$

$$\oint_c \vec{H} \times d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \oint_s \vec{D} \times d\vec{s} + \oint_s (\vec{j}_i + \vec{j}_c) d\vec{s}, \quad (2)$$

$$\oint_s \vec{D} \times d\vec{s} = Q_e, \quad (3)$$

$$\oint_s \vec{B} \times d\vec{s} = 0, \quad (4)$$

式中:

$\vec{E}$ —— 电场强度, V/m;

$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ —— 电位移, A/m²;

$\vec{H}$ —— 磁场强度, A/m;

$\vec{B} = \mu \vec{H}$ —— 磁流密度, Wb/m²;

$\vec{j}_i$ —— 瞬时输入电流密度, A/m²;

$\vec{j}_c$ —— 瞬时传导电流密度, A/m²;

Q_e —— 表面积为 S 时单位体积的电荷量, C/m³;

ϵ —— 介质在电磁场中的介电常数, F/m;

μ —— 介质在电磁场中的磁导率, H/m。

在真空中介电常数和磁导率的值分别为: $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。

由于食品内温度分布不均匀,因此食品内部存在热传导,热传导的传导公式见式(5)^[22]。

$$\nabla[K(T) \times \nabla T] + P = \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

式中:

$K(T)$ —— 食品的导热系数(随食品的温度变化而变化), W/(m·°C);

$C_p(T)$ —— 食品的比热(随食品的温度变化而变化), J/(kg·°C);

ρ —— 食品的密度, kg/m³。

在式(5)中 P 表示在食品中单位体积内食品输出的能量:

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon''_r |\vec{E}|^2, \quad (6)$$

式中:

f —— 微波频率, MHz;

ϵ''_r —— 指介质材料中食品的相对介电损耗;

$\vec{E}$ —— 电场的瞬时电场强度(矢量), $\vec{E} = \vec{E}(x, y, z; t)$ 。

1.4 数值模型

本研究中微波炉的数值模型是基于商业软件 Quickwave version 7.5 建立,计算时采取有限时域差分法(Time Domain Finite Difference Method)求解电磁场和热传导的耦合方程。首先对模型进行网格划分,在食品中的网格尺寸为 1 mm×1 mm×1 mm,在空气中的网格尺寸为 1 mm×1 mm×4 mm。微波炉波腔边界为理想导体(perfect electric conductor, PEC)。在模拟过程中,波源的模式为 TE₁₀,功率分别设置为 700 W,加热时间 30 s。食品的初始温度设置为 20 °C。食品的旋转速度设置为 6 r/min,由于在模拟中无法实现托盘的连续性转动,因此需要将模拟食品的旋转进行离

散化,将其旋转设置为每步转动角度为 36° ,每圈转 10 次。食品的介电特性和热物性随温度不断变化,为使模拟结果更准确,在模拟过程中,在转动每步时,食品的介电特性根据上一步的温度进行更新。

1.5 试验验证

本研究通过红外热像仪检测其加热后的温度分布,并且利用化学标记法同计算机视觉系统相结合的方法来得到微波加热时食品的冷热区域分布,即热形^[23-24]。温度分布较热形更加准确地显示食品加热后的冷热分布。化学标记法的原理是在高温下糖和氨基酸反应生成棕色物质的美拉德反应,温度越高,加热时间越长反应生成物越多,则其加热的颜色越深,化学标记法可以记录微波热处理的过程。由于模拟食品均匀性好,可作为化学指示剂的载体。本研究的模拟食品是通过混合胶粉、蔗糖、无水氯化钙和 D-核糖后,将混合溶液倒入尺寸半径高为 65 mm×20 mm 圆形模具制作而成^[25]。将模拟食品置于 25UG26 型威力微波炉中间及边缘分别加热 3 次,每次加热 30 s,功率设置为 700 W。首先利用红外热像仪(FLIR,E60)检测其上表面、中部切面、下表面的温度分布。然后在摄影棚内利用数码相机[EOS 7D Mark II (G)]拍摄加热后形成的图片,每次拍摄的光线及焦距都是固定的,最后将食品温度分布图用 MATLAB 处理获得试验食品温度分布伪彩图。

2 结果与分析

2.1 频率分布检测

由图 2 可知,微波炉空载运行时微波频率是不断变化的,且检测到的波动范围为 2.445~2.465 GHz。由图 3 可

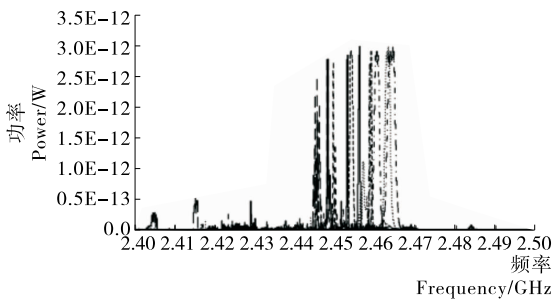


图 2 微波炉空腔加热时的频率分布图

Figure 2 Operating frequency distribution of an empty domestic microwave oven

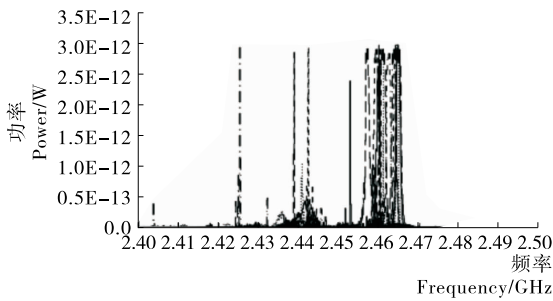


图 3 微波炉负载加热时的频率分布图

Figure 3 Operating frequency distribution of a domestic microwave oven within a mode food

知,微波炉加热食品时,频率也是不断变化的,且检测到的范围为 2.424~2.425,2.430~2.445,2.453~2.465 GHz。

2.2 模型验证

本试验主要研究微波炉加热模式,即热形受频率变化的影响,因此利用热形定性验证模型是否精确。将红外热像仪检测的温度分布图、食品热形伪彩图与数值模拟温度分布图对比,见图 4。试验热形图和模拟温度分布图的热形都是由边缘向食品中心位置温度逐渐降低,食品中间有较小的区域为食品加热的热区域,边缘加热严重。食品中部切面比食品上表面平均温度低,而比下表面温度高,主要是微波是从侧上部传播的。试验得到的温度分布图与计算机模拟得到的热形图相吻合,但是通过表 1 可以看出,试验温度比模拟温度低,主要是在实际加热过程中,食品中水蒸发,形成的蒸汽带走了一部分热量,但对食品的温度分布并无影响,因此该模型可以用于预测不同条件下食品加热后的温度分布。

表 1 试验与模拟温度对比表

Table 1 The comparison table of experiment and simulating temperature $^{\circ}\text{C}$

层	最大值		最小值		平均值	
	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
食品上表面	65.9	66.5	32.5	23.7	49.1	50.3
食品中部切面	53.2	61.3	29.5	22.7	41.6	37.8
食品下表面	38.6	45.8	21.9	23.6	29.9	31.4

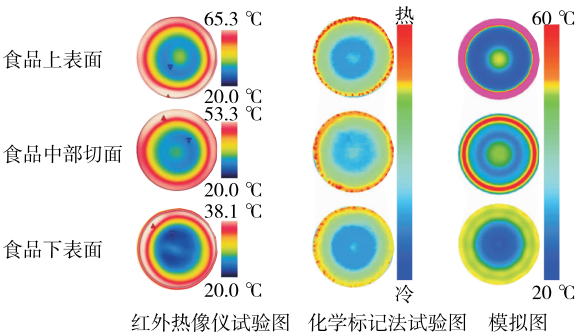
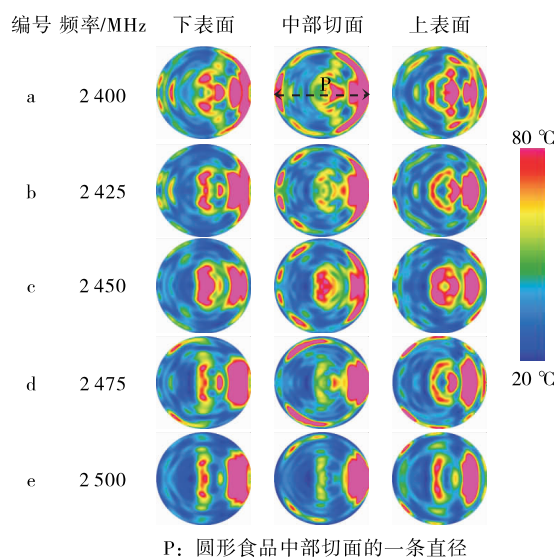


图 4 试验与计算机模拟温度分布对比图

Figure 4 Experimental and simulated temperature distribution

2.3 频率变化对家用微波炉中食品温度分布的影响

在上述数值模型验证时,微波炉加热的频率设置为 2 450 MHz,而家用微波炉的频率波段为 $(2\ 450 \pm 50)$ MHz。图 5 为微波炉在 2 400,2 425,2 450,2 475,2 500 MHz 频率条件下,圆形食品下表面、中部切面和上表面形成的温度分布图,温度为 20~60 $^{\circ}\text{C}$ 。由图 5 可以看出,不同频率下不同层面食品的冷热分布大致为食品的右边较热,左边较冷,这是由波源位于波腔的右侧导致。靠近波源的地方温度较高,但冷热点的位置不完全一致。为了更加清晰辨别不同频率条件下冷热点的位置是否一致,将不同频率下圆形食品中部



P: 圆形食品中部切面的一条直径

图5 不同频率条件下圆形食品的温度分布图

Figure 5 Temperature distribution of circular food under different frequency condition

切面内一条直径(如图5中P所在的直线位置,以下以P来表示这个位置)上的温度变化曲线绘制出来进行比较。

图6代表频率变化范围为 $(2\,450 \pm 50)$ MHz时,不同频率下P位置上的温度变化曲线。通过温度变化曲线可以看出,不同频率条件下温度曲线有差异。例如,当位置位于120 mm时,不同频率下其为冷点或热点无法确定。由以上分析可知,当微波炉加热的频率范围为 $(2\,450 \pm 50)$ MHz时,不同频率条件下,温度分布不同。

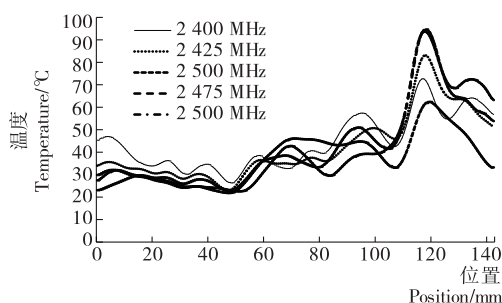
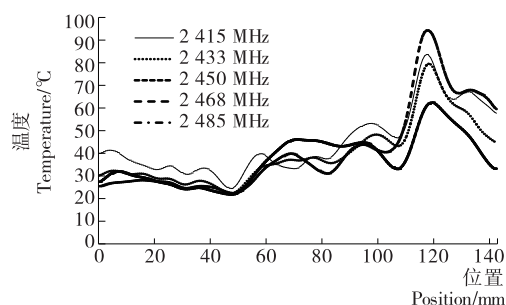


图6 不同频率下圆形食品P位置的温度变化曲线

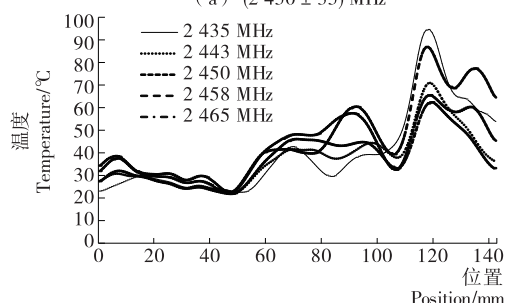
Figure 6 Temperature curve of circular food at P position of different frequency

2.4 频率波动范围对家用微波炉加热食品时热形的影响

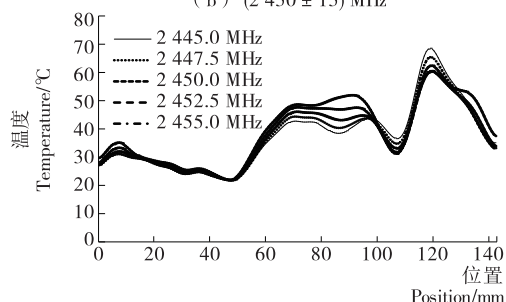
在频率波动范围为 $(2\,450 \pm 50)$ MHz时,不同频率下微波炉加热食品的温度分布不同,为了提高微波炉加热食品时温度分布的稳定性,本研究通过数值模拟方法探究频率波动范围对微波炉加热食品时热形的影响。图7为频率范围在 $(2\,450 \pm 35)$, $(2\,450 \pm 15)$, $(2\,450 \pm 5)$, $(2\,450 \pm 2)$ MHz时,不同频率下P位置温度变化曲线。通过温度变化曲线可以看出,随着频率波动范围的缩小,不同频率值下的温度曲线逐渐趋于一致,当频率波动范围缩减到 $(2\,450 \pm 2)$ MHz时,不同频率下温度变化趋势一致,并且冷热点的位置接近重合,并且在该频率范围内,其温度分布图见图8。



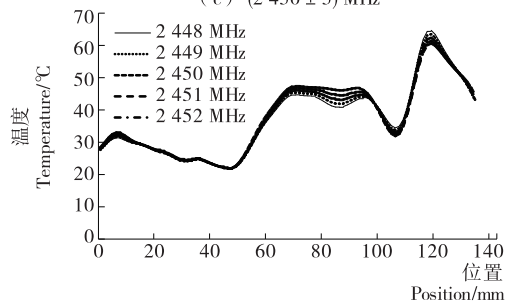
(a) $(2\,450 \pm 35)$ MHz



(b) $(2\,450 \pm 15)$ MHz



(c) $(2\,450 \pm 5)$ MHz



(d) $(2\,450 \pm 2)$ MHz

图7 不同频率值下圆形食品P位置的温度变化曲线

Figure 7 Temperature curve of circular food at P position in different frequency value under different frequency range

从图8的模拟食品下表面、中部切面、上表面温度分布图可以看出,频率波动范围较小时不同频率下不同切面的热形趋于一致。

2.5 不同频率段内频率波动范围对食品热形的影响

图9为频率范围为 $(2\,410 \pm 2)$, $(2\,490 \pm 2)$ MHz时,不同频率下P位置的温度变化曲线。通过温度变化曲线可以看出,在中心频率为 $(2\,410 \pm 2)$, $(2\,490 \pm 2)$ MHz的频率波动范围下,不同频率值下的温度曲线趋于一致。

3 结论

在空载和负载条件下运行时,25UG26型威力微波炉的频率随时间不断发生变化。本研究检测到的空载时频率波

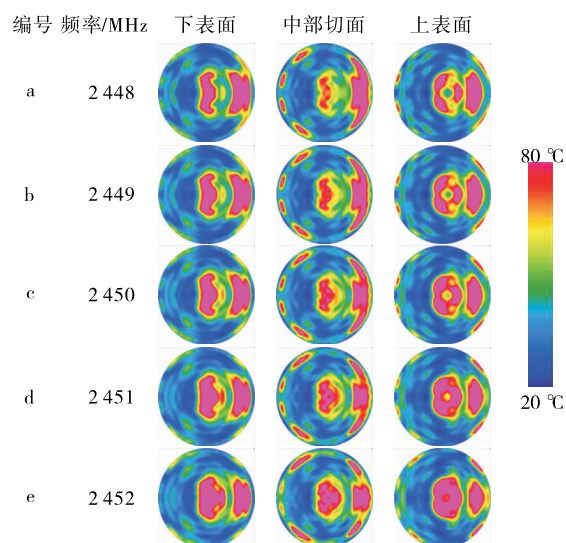


图 8 不同频率值下圆形食品的温度分布图

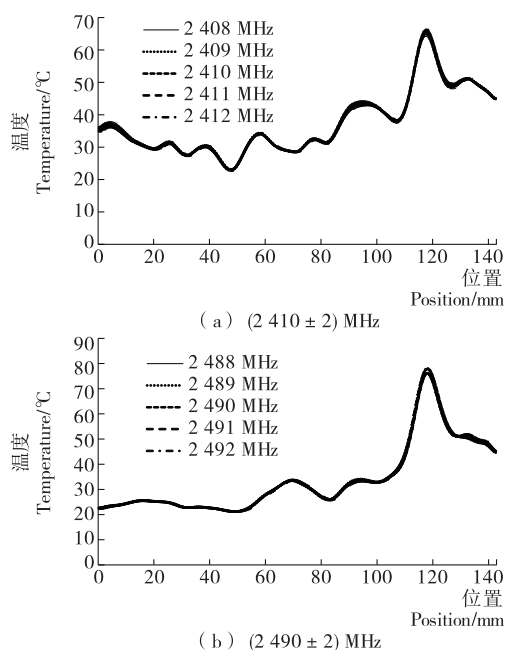
Figure 8 Temperature distribution of circular food at different frequency value under the range of $(2\,450 \pm 2)$ MHz

图 9 不同频率下圆形食品中 P 位置的温度变化曲线

Figure 9 Temperature curve of circular food at P position under different frequency range

动范围集中在 $2.445 \sim 2.465$ GHz, 负载的频率波动范围集中在 $2.424 \sim 2.425$, $2.43 \sim 2.445$, $2.453 \sim 2.465$ GHz。通过数值模拟发现, 频率波动范围较大时, 不同频率下微波炉加热食品后形成的热形相差较大; 随着频率波动范围的缩小, 微波加热的温度分布越稳定; 当频率范围减少到中心频率 ± 2 MHz 时, 微波炉加热食品后的温度分布趋于一致。本研究对 $(2\,450 \pm 50)$ MHz 波段的微波加热系统的模式设计提供了理论依据。

参考文献

[1] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Non-uniform temperature dis-

tribution during microwave heating of food materials; a review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2010, 3(2): 161-171.

[2] VADIVAMBAL R, JAYAS D S. Changes in quality of microwave-treated agricultural products; a review[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 1-16.

[3] SINGH S, DUPTA D, JAIN V, et al. Microwave Processing of Materials and Applications in Manufacturing Industries: A Review[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2015, 30(1): 1-29.

[4] CHAMCHONG M, DATTA A K. Thawing of foods in a microwave oven II: Effect of load geometry and dielectric properties[J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy A Publication of the International Microwave Power Institute, 1999, 34(1): 22-32.

[5] RYYNÄNEN S, OHLSSON T. Microwave heating uniformity of ready meals as affected by placement, composition, and geometry[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(3): 620-624.

[6] SOTO-REYES N, TEMIS-PÉREZ A L, LÓPEZ-MALO A, et al. Effects of Shape and Size of Agar Gels on Heating Uniformity During Pulsed Microwave Treatment [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(5): E1 021-E1 025.

[7] 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.

[8] FUNAWATASHI Y, SUZUKI T. Numerical analysis of microwave heating of a dielectric[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2003, 32(3): 227-236.

[9] 杨松, 刘世雄, 程裕东. 915 MHz 和 2 450 MHz 频率下温度和大豆分离蛋白对鲢鱼糜复合素材介电特性的影响[J]. 水产学报, 2011, 35(1): 131-138.

[10] CHEN Jia-jia, PITCHAI K, BIRLA S, et al. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable[J]. Food & Bioprocesses Processing, 2016, 99: 116-127.

[11] KOSKINIEMI C B, TRUONG V D, SIMUNOVIC J, et al. Improvement of heating uniformity in packaged acidified vegetables pasteurized with a 915 MHz continuous microwave system[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(1): 149-160.

[12] SEBERA V, NASSWETTROVÁ A, NIKL K. Finite element analysis of mode stirrer impact on electric field uniformity in a microwave applicator[J]. Drying Technology, 2012, 30(13): 1 388-1 396.

[13] 王翔, 曾葆青, 唐相伟. K23L 平板微波炉天线研究[J]. 真空电子技术, 2014(6): 55-57.

[14] 张小峰, 蒙林, 唐相伟, 等. 平板微波炉新型 3D 天线研究[J]. 真空电子技术, 2013(2): 48-51, 62.

[15] LUAN Dong-lei, TANG Ju-ming, PEDROW P D, et al. Analysis of electric field distribution within a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system by computer simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 188: 87-97.

[16] LUAN Dong-lei, WANG Yi-fen, TANG Ju-ming, et al. Frequency distribution in domestic microwave ovens and its influence on heating pattern[J]. Journal of Food Science, 2016, 82(2): 429.

(下转第 215 页)

- ogy, 2012, 50(3/4): 545-551.
- [16] XIE Fu-wei, YU Jing-jing, WANG Sheng, et al. Rapid and simultaneous analysis of ten aromatic amines in mainstream cigarette smoke by liquid chromatography/electrospray ionization tandem mass spectrometry under ISO and "Health Canada intensive" machine smoking regimens[J]. *Talanta*, 2013, 115: 435-441.
- [17] BAKER R R. The kinetics of tobacco pyrolysis[J]. *Thermo-chimica Acta*, 1976, 17(1): 29-63.
- [18] DAVIS B R, HOUSEMAN T H, RODERICK H R. Studies of cigarette smoke transfer using radioisotopically labelled tobacco constituents Part III: The use of dotriacontane-16,17-14C as a marker for the deposition of cigarette smoke in the respiratory system of experimental animals[J]. *Beiträge Zur Tabakforschung*, 1973, 7(3): 148-153.
- [19] 郑赛品, 顾文博, 张建平, 等. 抽吸参数对卷烟燃烧温度及主流烟气中某些化学成分的影响[J]. *中国烟草学报*, 2007, 13(2): 6-11.
- [20] SEEMAN J I, FOURNIER J A, WAYMACK B E, et al. Thermal transfer of nicotine and nicotine acid salts to nicotine in the gas phase[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(12): 5 133-5 145.
- [21] BAKER R R. Contribution to the draw resistance of aburning cigarette[J]. *Beiträge Zur Tabakforschung*, 1975, 8(3): 124-131.
- [22] 朱怀远, 张媛, 庄亚东, 等. 卷烟抽吸期间区带压降与温度的关系及对烟气常规成分的影响[J]. *烟草科技*, 2016, 49(2): 47-54.
- [23] 闫克玉. 卷烟烟气化学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2002: 122-123.
- [24] OZBAY N, PÜTÜN A E, PÜTÜN E. Bio-oil production from rapid pyrolysis of cottonseed cake: product yields and compositions[J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 30(7): 501-510.
- [25] 刘景英. 吸烟者焦油代偿现象的配对双盲研究[J]. *华南预防医学*, 2003, 29(4): 41-42.
- [26] 王建民, 李晓, 闫克玉, 等. 烟碱/焦油比与卷烟吸味品质之间的关系[J]. *烟草科技*, 2002(5): 8-11.

(上接第 105 页)

- [17] TANG Ju-ming. Unlocking potentials of microwaves for food safety and quality[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(8): E1 776-E1 793.
- [18] 巨汉基. 微波炉腔体电磁场分布仿真及尺寸结构优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 30-43.
- [19] 宋瑞凯, 张付杰, 杨薇, 等. 矩形微波腔体双馈口位置与加热效率仿真及验证[J]. *昆明理工大学学报: 自然科学版*, 2017, 42(6): 51-57.
- [20] JIANG Hao, ZHANG Min, LIU Yin, et al. The energy consumption and color analysis of freeze/microwave freeze banana chips[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(4): 464-472.
- [21] LIU Shi-xiong, 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(3): 142-153.
- [22] GEEDIPALLI S S R, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(3): 359-368.
- [23] PANDIT R B, TANG Ju-ming, LIU Frank, et al. Development of a novel approach to determine heating pattern using computer vision and chemical marker (M-2) yield[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 522-528.
- [24] PANDIT R B, TANG J, LIU Frank, et al. A computer vision method to locate cold spots in foods in microwave sterilization processes[J]. *Pattern Recognition*, 2007, 40(12): 3 667-3 676.
- [25] ZHANG Wen-jia, LUAN Dong-lei, TANG Ju-ming, et al. Dielectric properties and other physical properties of low-acyl gellan gel as relevant to microwave assisted pasteurization process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 149: 195-203.

(上接第 203 页)

- [11] 杨铭铎, 马雪, 贾庆胜. 复合因素对非油炸方便面品质影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 69-73, 79.
- [12] 王立, 陈敏, 赵俊丰, 等. 复合磷酸盐在面制品中的应用现状及发展趋势[J]. *食品与机械*, 2017, 33(1): 195-200.
- [13] 李小平, 周晓倩, 杨晓霁, 等. 添加蚕蛹蛋白对非油炸方便面生产工艺和品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(12): 377-381.
- [14] 王萍, 易建勇, 毕金峰, 等. 菠萝蜜真空冷冻-变温压差膨化联合干燥工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(11): 129-136.
- [15] ALBERTI A, ZIELINSKI A A, ZARDO D M, et al. Optimisation of the extraction of phenolic compounds from apples using response surface methodology[J]. *Food Chemistry*, 2014, 149(4): 151-158.
- [16] 赵应征, 鲁翠涛, 梅兴国. 常用多指标综合评价法在优选实验中的应用[J]. *医学研究生学报*, 2004, 17(7): 624-626.
- [17] MARCHETTI L, ANDRAS S C, CALIFANO A N. Low-fat meat sausages with fish oil: optimization of milk proteins and carrageenan contents using response surface methodology[J]. *Meat Science*, 2014, 96(3): 1 297-1 303.
- [18] 陈昌勇, 何腊平, 李翠芹, 等. Plackett-Burman 设计和响应面法优化速冻紫苏籽肉丸的配方[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(4): 259-265.
- [19] NIC PHIARAI S B P, SCHEHL B D, OLIVEIRA J C, et al. Use of response surface methodology to investigate the effectiveness of commercial enzymes on buckwheat malt for brewing purposes[J]. *Journal of the Institute of Brewing*, 2015, 112(4): 324-332.
- [20] 马浩然, 温雪瓶, 严俊波, 等. 亲水性胶体对非油炸杂粮方便面原料糊化特性及品质影响[J]. *粮食与油脂*, 2015(12): 45-48.
- [21] 张海芳, 胡美娟, 赵丽芹. 不同增稠剂对非油炸荞麦方便面品质的影响研究[J]. *食品工业*, 2015(12): 43-45.