

腔体内壁脊形凹槽对微波反应器加热效率及均匀性的影响

Influence of Ridge Groove Structure of the inner walls on Heating Efficiency and Uniformity of Microwave Reactor

钟汝能¹ 姚斌² 向泰¹ 郑勤红^{1,2}

ZHONG Ru-neng¹ YAO Bin² XIANG Tai¹ ZHENG Qin-hong^{1,2}

(1. 云南师范大学能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500)

(1. School of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China)

摘要:提出在微波反应器腔体内壁设置脊形凹槽的优化策略,研究在保证加热效率的前提下提升微波加热的均匀性。利用有限元法仿真研究不同凹槽结构参数对微波反应器加热效率和均匀性的影响。研究表明:脊型凹槽结构能有效提升微波反应器的加热效率和加热均匀性。优化后微波反应器的加热效率达到 98.75%,与微波腔壁光滑时相比,均匀性最大提升幅度达到 58.54%。

关键词:微波反应器;腔体结构;脊形凹槽;效率;均匀性

Abstract: A strategy that setting ridge groove surface in the inner wall of the microwave reactor is proposed for improving the heating uniformity without losing heating efficiency. The influence of the different ridge groove structure parameters on the heating efficiency and uniformity of the microwave reactor is simulated by using the finite element method. The result shows that the ridge groove structure can effectively improve heating efficiency and uniformity of microwave reactor. Heating efficiency of microwave reactor reaches 98.75% after being simulated. When compared with the smooth cavity wall of the microwave reactor, the heating uniformity is enhanced up to 58.54%.

Keywords: Microwave reactor; Cavity structure; Ridge groove structure; Efficiency; Uniformity

微波加热具有速度快、效率高、清洁生产、易自动化控制、杀菌和食品营养成分损失少等优点^[1],基于此,微波加热

技术及设备在食品杀菌^[2]、烹饪^[3]、干燥^[4]、漂白^[5]、解冻等^[6]方面均获得了广泛应用。加热不均匀和微波能利用效率偏低,是目前制约微波技术在食品生产过程中规模化应用的两个技术瓶颈^[7]。根据微波加热理论可知,反应器的磁控装置、腔体结构、承载体及加热物料等设计参数都会影响微波加热的均匀性和效率,腔壁结构改变引起的腔内微波反射方式变化能促进微波与加载物的相互作用和避免高电场强度点的聚集。国内外学者针对微波加热均匀性的改善和加热效率的提升开展了大量的研究。研究成果表明,通过改善微波反应器中的局部装置可以提升加热效果,选取合适的微波频率^[8]、馈源位置和分布^[9]、微波功率^[10]等参数和设置模式搅拌器^[11]、导电粒子^[12]、旋转装置^[13]可优化腔内的电场分布;通过改变内部加载介质的形态^[14-15]、位置和长度^[16]、介电常数^[17-18]、尖角^[19]、几何形状^[20]等参数和在矩形微波加热器四壁设置流化状态的金属球体^[21]可有效提升微波加热效率或均匀性;有限元法^[22-23]、遗传算法^[24]、最大熵和谱聚类算法^[25]等可以用于微波加热效果的数值计算。综观现有国内外研究成果,表现出以下几个特征:① 主要偏重于对效率或均匀性单一方面的研究;② 研究焦点集中于微波反应器中的局部装置改善或某一特定加载物特性;③ 主要基于有限元算法开展模拟仿真研究。截止目前,通过改变微波反应器外形形状来提升加热效果的规律性探讨研究成果不多。为优化微波吸收效率和加热均匀性,本试验提出在微波反应器腔体壁上设置脊形凹槽的优化策略。利用有限元法,建立微波反应器模型,计算凹槽结构参数对微波吸收效率和加热均匀性的影响,旨在通过综合分析获得可同时优化微波反应器加热效率和均匀性的基本规律,为微波反应器优化设计提供理论支持。

基金项目:云南省科技计划面上项目(编号:2014FB141)

作者简介:钟汝能,男,云南师范大学副教授,在读博士。

通信作者:郑勤红(1962—),男,云南师范大学教授,博士生导师。

E-mail: zheng_qh62@aliyun.com

收稿日期:2017-01-02

1 模型和理论

1.1 模型

研究模型以项目组正在使用的箱式炉为基础,在内腔壁四周设置外脊形凹槽,见图 1。腔体内部尺寸为 400 mm×380 mm×240 mm,圆柱体负载的半径为 R 、高度为 H ,负载底面距离箱底的高度为 h ,馈口尺寸为 84 mm×58.6 mm×60 mm,馈口中心离腔体顶面中心的水平距离为 99.3 mm,馈口激励源中心频率为 2.45 GHz,腔内所加负载材料为混合粉末物料,其等效介质参数为 $\epsilon' = 5, \tan\delta = 0.0025$ 。定义脊形凹槽的脊高为 b ,脊深为 d ,模型见图 2。根据文献[17]的微波反应器优化参数,选取负载的最优尺寸及位置参数为 $R = 150\text{ mm}, H = 140\text{ mm}, h = 40\text{ mm}$,在此基础上设置脊形凹槽于腔体壁上,计算得出脊形凹槽结构参数对微波吸收效率和加热均匀性的影响。

1.2 理论

1.2.1 微波吸收功率 由微波与介质的相互作用理论可知,在微波加热腔内,被加热介质单位体积所吸收微波的功率 P 为[26]:

$$P = \frac{1}{2} \omega \epsilon'' |E|^2 \tag{1}$$

式中:
 ω ——角频率,rad/s ;
 E ——电场强度,V/m;
 ϵ'' ——介电常数虚部。

由式(1)可知,在其它条件不变的情况下,介质材料吸收功率 P 与电场强度 E 成正比,即介质负载吸收的微波功率取决于加热腔体内的电场强度 E 。微波的吸收效率 η 可表示为 $\eta = 1 - (Power11 + Power22) / 2 - Power21$,其中, $Power11$ 、 $Power22$ 分别为馈口 1 和馈口 2 本身的反射功率, $Power21$ 为馈口 1 和 2 之间的透射功率。

1.2.2 均匀性评价方法 微波场分布的均匀性可采用观察电场分布图和计算电场分布的标准偏差两种方法进行评价。由于观察场分布图的方法具有较强的主观因素,故本试验采用计算场分布的标准偏差进行评价。标准偏差的定义为[27]:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 / (n - 1)} \tag{2}$$

式中:
 σ ——电场强度分布标准偏差;
 E_i ——第 i 个取样点的电场在一个震荡周期内的平均值,V/m;
 n ——取样点数量;
 $\bar{E}$ ——所有采样点 E_i 的平均值,V/m。

由标准偏差的定义得, σ 值越小,电场分布越均匀,即加热的均匀性越好。

2 数值计算

2.1 凹槽结构参数 b 和 d 对加热效率的影响

经过仿真计算,可得加热效率随凹槽结构参数 b 和 d 的变化情况,见图 3。

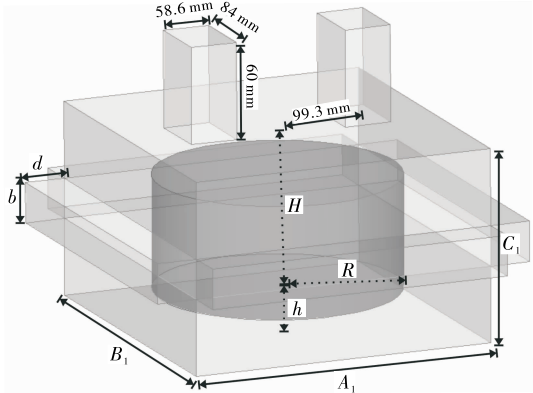


图 1 具有外脊形凹槽的箱式炉模型

Figure 1 Box-type model with outer ridge groove structure

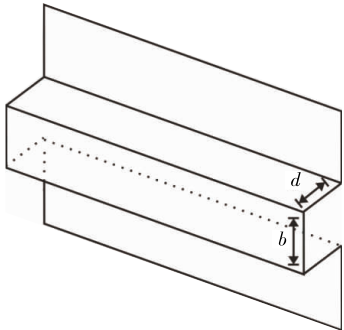
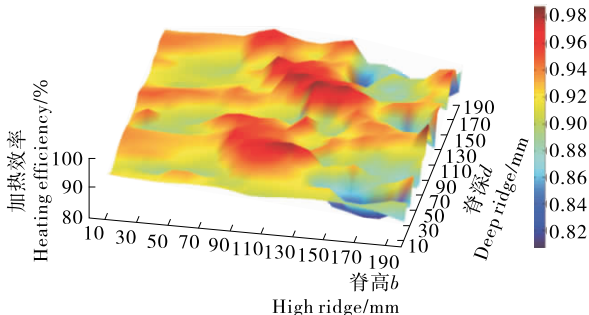
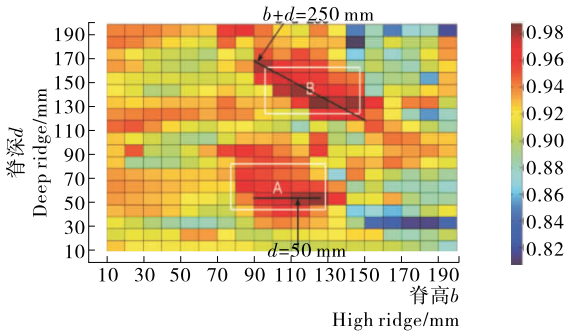


图 2 外脊形凹槽模型

Figure 2 Outer ridge groove structure model



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图 3 凹槽结构参数 b 和 d 对加热效率的影响

Figure 3 Influence of ridge groove Structure parameters (b and d) on heating efficiency

计算结果显示,凹槽结构参数的变化对加热效率的影响:

(1) 当 $b \in (10, 200 \text{ mm})$ 、 $d \in (10, 200 \text{ mm})$ 时,平均加热效率和最高加热效率分别为 91.87%、98.75%,与腔壁光滑时相比,加热效率变化幅度分别为 -1.8%、5.54%。最优加热效率集中出现在图 3(b)中的 A 区域和 B 区域。

(2) 当 $b \in (80, 120 \text{ mm})$ 、 $d \in (40, 90 \text{ mm})$ 时,见图 3(b)中的 A 区域。平均加热效率和最高加热效率分别为 95.17%、98.25%,与腔壁光滑时相比,加热效率变化幅度分别为 1.71%、5.01%,加热效率最优值出现在直线 $d=50 \text{ mm}$ 附近。此计算区间内腔体体积增加量(Δv)与腔壁光滑时腔体体积(v)的比例为 20%~40%。

(3) 当 $b \in (90, 150 \text{ mm})$ 、 $d \in (110, 160 \text{ mm})$ 时,见图 3(b)中的 B 区域。平均加热效率和最高加热效率分别为 94.52%、98.75%,与腔壁光滑时相比,加热效率变化幅度分别为 1.02%、5.54%。加热效率最优值出现在直线 $b+d=250$ 附近。此计算区间内腔体体积增加量(Δv)与腔壁光滑时腔体体积(v)的比例为 60%~80%。

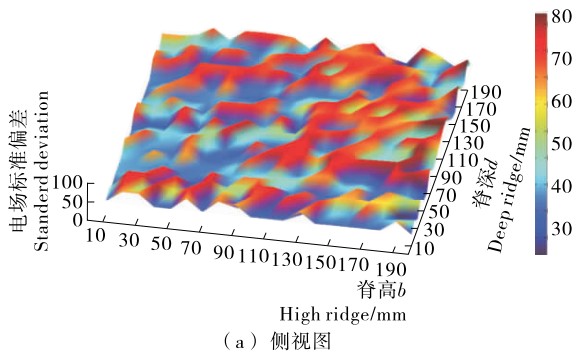
(4) 综合分析可知,当脊型凹槽的脊高(b)和脊深(d)与反应器腔体结构参数 A_1 、 B_1 、 C_1 呈如下关系时能获得较优的加热效率。即当 $b=2d$ 、 $b \in (A_1 \times 0.2, A_1 \times 0.3)$ 、 $b=C_1 \times 0.4$ (区域 A)和 $b=d$ 、 $b \in (A_1 \times 0.3, A_1 \times 0.4)$ 、 $b=C_1 \times 0.5$ (区域 B)时,能获得较好的加热效率。在设计高加热效率的微波反应器腔体时,可选取此范围内的相应参数。

2.2 凹槽结构参数 b 和 d 对加热均匀性的影响

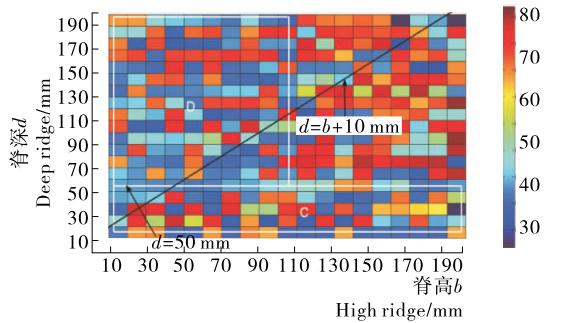
为了分析凹槽参数对加热均匀性的影响,在加热介质内部选取了 5×10^5 个均匀分布的电场采样点。经仿真计算获得所有采样点一个震荡周期内的平均场强后,利用式(2)求得加热介质内部电场分布的标准偏差 σ ,标准偏差越小,则电场分布的均匀性越好,进而知加热的均匀性越好。通过变化脊型凹槽参数 b 和 d ,进行近 400 次的仿真计算,获得了电场分布的标准偏差随凹槽参数的变化情况,见图 4。计算结果表明:

(1) 当 $b \in (10, 200 \text{ mm})$ 、 $d \in (10, 200 \text{ mm})$ 时,电场分布标准偏差的平均值、最小值分别为 52.5、23.8,与腔壁光滑时的标准偏差(57.11)相比,变化幅度分别为 -8.08%、-58.33%。根据式(2),表明在计算区间内,微波反应器的平均均匀性提升幅度为 8.08%、均匀性最大提升幅度为 58.33%。电场分布标准偏差的较小值集中出现在图 4(b)中的 $d=50 \text{ mm}$ 、 $d=b+10 \text{ mm}$ 直线附近和 C 区域、D 区域。

(2) 当 $d \in (10, 60 \text{ mm})$ 时,即在图 4(b)中的 C 区域内,电场分布标准偏差的平均值、最小值分别为 48.5、24.25,与腔壁光滑时的标准偏差(57.11)相比,变化幅度分别为 -15.07%、-57.54%,表明在此区间内微波反应器的平均加热均匀性提升幅度为 15.07%、均匀性最大提升幅度为 57.54%。当 $d=50 \text{ mm}$ 时,无论 b 取何值,电场分布标准偏差都小于腔壁光滑时的标准偏差(57.11),平均加热均匀性提升 25.94%。此时,区间内腔体体积增加量(Δv)与腔壁光



(a) 侧视图



(b) 俯视图

图 4 凹槽结构参数 b 和 d 对加热均匀性的影响

Figure 4 Influence of ridge groove Structure parameters (b and d) on heating uniformity

滑时腔体体积(v)的比例小于 15%。

(3) 当 $b \in (10, 110 \text{ mm})$ 时,即在图 4(b)中的 D 区域内,电场分布标准偏差的平均值、最小值分别为 50.14、29.52,与腔壁光滑时的标准偏差(57.11)相比,变化幅度分别为 -12.20%、-48.31%,表明在此区间内微波反应器的平均加热均匀性提升幅度为 12.20%、均匀性最大提升幅度为 48.31%。此时,区间内腔体体积增加量(Δv)与腔壁光滑时腔体体积(v)的比例小于 30%。

(4) 综合分析可知,当脊型凹槽的脊高(b)和脊深(d)满足下列条件时,能获得较好的加热均匀性:① $d < 60 \text{ mm}$ (区域 C),即 $d < A_1(B_1) \times 0.15$;② $b < 110 \text{ mm}$ (区域 D),即 $b < A_1(B_1) \times 0.25$;③ $\Delta v/v < 15\%$ 。

2.3 脊型凹槽结构参数 b 和 d 对加热效率和均匀性的综合影响

为综合评价凹槽结构参数 b 和 d 对加热效率和均匀性的影响,以便为不同需求的微波反应器设计提供依据,引入如下归一化权重公式。

$$effuni = a \frac{\Delta \eta}{\Delta \eta_{\max}} + (a-1) \frac{\Delta \sigma_{\max} - \Delta \sigma}{\Delta \sigma_{\max} - \Delta \sigma_{\min}}, \quad (3)$$

式中:

a —— 权重因子;

$effuni$ —— 结构参数对加热效率和均匀性的综合影响;

$\Delta \eta$ —— 加热效率平均值变化幅度;

$\Delta \eta_{\max}$ —— 加热效率最大值变化幅度;

$\Delta \sigma$ —— 电场分布标准偏差平均值的变化幅度, V/m;

$\Delta \sigma_{\max}$ —— 电场分布标准偏差最大值的变化幅度, V/m;

$\Delta\sigma_{\min}$ —— 电场分布标准偏差最小值的变化幅度, V/m。

当权重因子 a 取 0.7 时, 表明在考虑加热效果时, 加热效率占 70%, 加热均匀性占 30%, 此时, 综合影响的结果见图 5。结果显示, 在区域 E 内 [$b \in (10, 130 \text{ mm})$], 加热效率和加热均匀性的综合变化幅度呈现为正值 (大于 0), 说明能获得比光滑腔更为理想的综合加热效果, 最优加热效果所对应的参数 b 和 d 出现在图 5 中标注的 A 区域 [$b \in (80, 120 \text{ mm})$ 、 $d \in (40, 90 \text{ mm})$] 和 B 区域 [$b \in (90, 150 \text{ mm})$ 、 $d \in (110, 160 \text{ mm})$] 处。

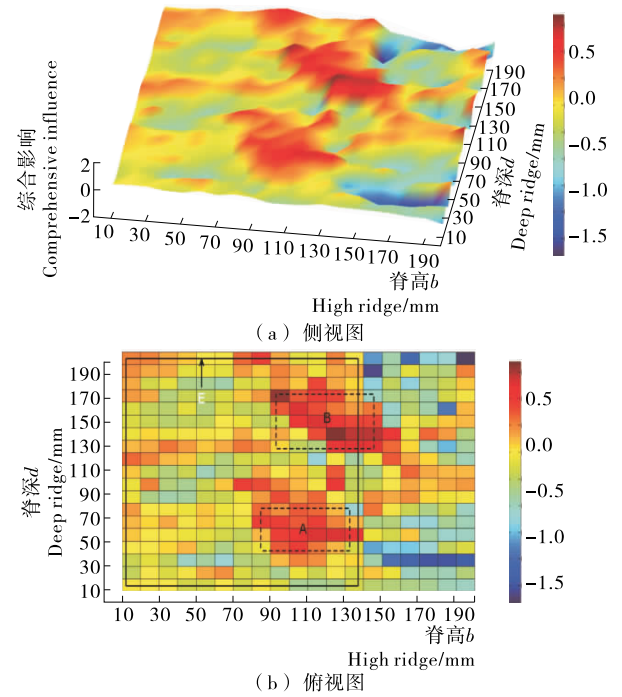


图 5 凹槽参数对加热效率和均匀性的综合影响($a=0.7$)

Figure 5 The comprehensive influence of ridge groove structure parameters (b and d) on the heating efficiency and uniformity ($a=0.7$)

2.4 仿真值与试验值的比较

为了验证以上仿真结果的有效性, 仿真了文献[27]中报道的试验结果, 仿真条件如下: 箱体结构为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$, 馈口中心坐标为 $(600 \text{ mm}, 300 \text{ mm}, 300 \text{ mm})$, 馈口结构为 $86.36 \text{ mm} \times 43.18 \text{ mm}$, 加载介质结构为 $40 \text{ mm} \times 52 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、中心坐标为 $(x, 300 \text{ mm}, 300 \text{ mm})$ 、介电常数 $\delta = 1.99$, 计算时样品沿 x 轴移动。仿真结果与试验结果的比较见图 6, 结果显示仿真结果与试验结果的变化趋势基本吻合。

3 结论

不同的微波反应器腔体结构能影响其加热效率和均匀性。仿真计算结果表明:

- (1) 在反应器腔体壁上设置脊型凹槽后, 加热效率最大值可达到 98.75%, 加热均匀性最大提升幅度为 57.54%。
- (2) 不同的凹槽结构参数能影响微波加热效率, 加热效率较大值集中出现在两个区域内: ① 满足 $b = 2d$ 、 $b \approx$

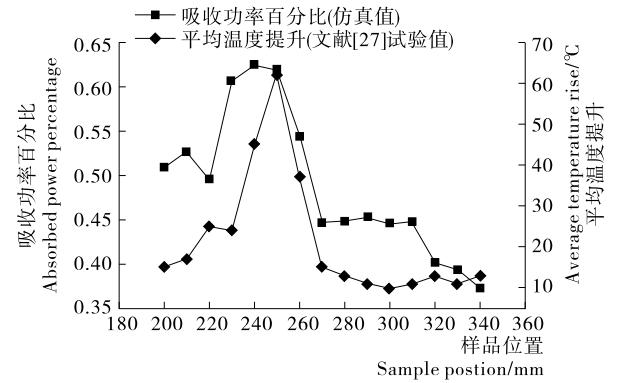


图 6 试验结果与仿真结果的比较

Figure 6 The comparison between experimental and simulation

- $A_1(B_1) \times 0.25$ 、 $b = C_1 \times 0.4$ 和 $\Delta v/v \approx 0.3$ 的区域内, 在 $d = 50 \text{ mm}$ 附近出现加热效率最大值; ② 满足 $b = d$ 、 $b \approx A_1(B_1) \times 0.35$ 、 $b = C_1 \times 0.5$ 和 $\Delta v/v \approx 0.7$ 的区域内, 在 $b + d = 250 \text{ mm}$ 附近出现加热效率最大值。
- (3) 不同的凹槽结构参数能影响微波加热均匀性, 当 $d < A_1(B_1) \times 0.15$ ($\Delta v/v < 0.15$) 和 $b < A_1(B_1) \times 0.25$ ($\Delta v/v < 0.3$) 时, 均能获得相对较小的电场分布标准偏差值, 即加热均匀性得到提升。
- (4) 在微波反应器腔体设计时, 选取对应的凹槽结构参数能同时提升加热效率和加热均匀性, 取得预期的加热效果。

参考文献

[1] 王顺民, 胡志超, 韩永斌, 等. 微波干燥均匀性研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 297-300.

[2] JERMANN C, KOUTCHMA T, MARGAS E, et al. Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 31: 14-27.

[3] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing: A review[J]. Food Research International, 2013, 52(1): 243-261.

[4] MOSES J A, NORTON T, ALAGUSUNDARAM K, et al. Novel drying techniques for the food industry[J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6: 43-55.

[5] ZHONG Xue-ying, DOLAN K D, ALMENAR E. Effect of steamable bag microwaving versus traditional cooking methods on nutritional preservation and physical properties of frozen vegetables: A case study on broccoli (Brassica oleracea)[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 31: 116-122.

[6] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A review of novel and innovative food freezing technologies[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(8): 1 616-1 634.

[7] HOSSAN M R, BYUN D, DUTTA P. Analysis of microwave heating for cylindrical shaped objects[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(23/24): 5 129-5 138.

[8] 李涛, 张伟, 陈海龙, 等. 频率和功率对轮胎微波加热的影响[J]. 橡胶工业, 2016, 63(6): 365-368.

[9] DOMINGUEZ T E, PLAZA G P, DIAZMORCILLO A, et al. Optimizations of electric field uniformity in microwave heating systems by means of multi-feeding and genetic algorithms[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2007, 29(1): 149-162.

[10] ROMANO V R, MARRA F, TAMMARO U. Modelling of microwave heating of foodstuff: study on the influence of sample dimensions with a FEM approach[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3): 233-241.

[11] PITCHAI K, CHEN J J, BIRLA S, et al. Multiphysics modeling of microwave heating of a frozen heterogeneous meal rotating on a turntable[J]. Journal of Food Science, 2015(80): 2 803-2 814.

[12] 宋文瀚, 王瑞芳, 李占勇, 等. 导电粒子对改善微波加热食品中局部过热现象的研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 15-20.

[13] 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.

[14] SCHUBERT H, REGIER M. The microwave processing of foods [M]. Cambridge: Woodhead Publishing in Food Science, 2005: 112.

[15] PU Yuan-yuan, SUN Da-wen. Prediction of moisture content uniformity of microwave-vacuum dried mangoes as affected by different shapes using NIR hyperspectral imaging[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 348-356.

[16] 姚斌, 郑勤红, 钟汝能, 等. 馈口位置及负载对微波加热效率的影响及其优化[J]. 材料导报, 2012, 26(8): 161-163.

[17] LIU Shi-xiong, FUKUOKA M. Modeling of fish boiling under microwave irradiation[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 140: 9-18.

[18] PITCHAI K, CHEN Ji-jian, BIRLA S, et al. Modeling microwave heating of frozen mashed potato in a domestic oven incorporating electromagnetic Journal of Food Engineering[J]. Frequency Spectrum, 2016, 173(7): 124-131.

[19] MADHUCHHANDA B, TANMAY B. A comprehensive analysis on the effect of shape on the microwave heating dynamics of food materials [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 39: 247-266.

[20] ITYAY Y, UCHIYAMA S, HATANO S, et al. Effect of Scattering by Fluidization of Electrically Conductive Beads on Electrical Field Intensity Profile in Microwave Dryers [J]. Drying Technology, 2005, 23(1/2): 273-287.

[21] 戴辉明, 郭雯, 程裕东, 等. 不同形状包装食品在微波加热过程中的三维温度分布[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 82-86.

[22] ZHOU Rong, YANG Xiao-qing, SUN Di, et al. Multiple tube structure for heating uniformity and efficiency optimization of microwave ovens[J]. European Physical Journal Applied Physics, 2015, 69(2): 20-21.

[23] HONG Yi-du, LIN Bai-quan, LI He, et al. Three-dimensional simulation of microwave heating coal sample with varying parameters [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 93: 1 145-1 154.

[24] PENG Zhi-wei, HWANG J Y, PARK C L, et al. Numerical analysis of heat transfer characteristics in microwave heating of magnetic dielectrics [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(3): 1 070-1 078.

[25] GEEDIPALLI S SR, 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.

[26] 张成怀, 魏光辉. 混响室测试区域均匀性分布规律仿真分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1 537-1 541.

[27] PEDREÑO-MOLINA J L, MONZÓ-CABRERA J, PINZO-LAS. A new procedure for power efficiency optimization in microwave ovens based on thermographic measurements and load location search[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 15(5): 564-569.

(上接第 65 页)

[15] 白绘宇, 王娟勤, 陈耀, 等. 大豆分离蛋白/透明质酸/羧甲基纤维素钠复合膜及其制备方法: 中国, CN102807681A[P]. 2012-12-05.

[16] 李向红, 华欲飞, 刘展, 等. 大豆蛋白/葡聚糖混合体系相行为及流变性质的研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(2): 40-44.

[17] 朱建华, 杨晓泉, 龚倩, 等. 葡聚糖对大豆 7S 蛋白凝胶流变性质及微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(8): 21-27.

[18] 金郁葱. 大豆蛋白凝胶结构和质构的控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 38-39.

[19] CHAISAWANG M, SUPHANTHARIKA M. Effects of guar gum and xanthan gum additions on physical and rheological properties of cationic tapioca starch [J]. Carbohydrate polymers, 2005, 1(3): 288-295.

[20] 姚玉静, 杨晓泉, 唐传核, 等. 酰化对大豆分离蛋白凝胶性质的影响[J]. 食品与机械, 2008, 24(5): 9-11.

[21] 钟芳, 王璋, 许时婴. 葡萄糖酸内酯为凝固剂时大豆蛋白的凝胶特性[J]. 食品与生物技术学报, 2003, 22(5): 1-4.

[22] 于国萍, 安静, 韩宗元. 热处理及葡萄糖酸- δ -内酯对大豆分离蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 21-25.

[23] LAKEMONDC M M, JONGH H H J D, PAQUES M, et al. Gelation of soy glycinin; influence of pH and ionic strength on network structure in relation to protein conformation[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(3): 365-377.

[24] 张逸婧, 陈海娟, 吕奕, 等. 羧甲基纤维素钠对大豆分离蛋白骨粘合性能的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8): 1 550-1 558.

[25] 黄汉昌, 姜招峰, 朱宏吉. 紫外圆二色光谱预测蛋白质结构的研究方法[J]. 化学通报, 2007, 70(7): 501-506.

[26] 张海瑞. 提高大豆蛋白凝胶性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 7-8.

[27] KOHYAMA K, SANO Y, DOI E. Rheological Characteristics and Gelation Mechanism of Tofu (Soybean Curd)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1995, 43(7): 1 808-1 812.

[28] 熊拯. 阴离子多糖对大豆分离蛋白功能特性的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2007: 43-45.

[29] 谭慧. 高压处理对大豆分离蛋白-多糖体系功能特性及结构影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 32-34.