包装技术与工程

基于 COMSOL 的包装食品微波炉加热模拟

张柯¹,卢立新^{1,2},王军^{1,2}

(1. 江南大学, 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要:目的研究使用 COMSOL Multiphysics 模拟微波炉加热包装食品的可行性。方法 应用有限元 分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了食品介电性能随时间变化的电磁-热传导双向耦合模型,考虑 加热过程中的表面热对流,模拟微波炉加热包装食品的过程,并与实验结果进行比较。结果 食品内 外温度分布的实验结果和模拟结果总体上接近,7个特征点的模拟结果和实验结果接近,特征点最终 温度的实验结果与模拟结果均方根误差为1.75 ℃。结论 使用 COMSOL Multiphysics 来进行微波炉 加热包装食品的模拟是可行的。

关键词: 微波包装; 微波加热; 电磁场; 温度场 中图分类号: TB487; TS206 文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)05-0001-04

Simulation of Microwave Heating of Packaged Food by Software COMSOL

ZHANG Ke¹, LU Li-xin^{1,2}, WANG Jun^{1,2}

(1. Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Province Key Laboratory of

Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: **Objective** To investigate the feasibility of simulating microwave heating of packaged food by COMSOL Multiphysics. **Methods** A time-dependent electromagnetic and heat transfer coupling model was established to simulate the process of microwave heating of food by FEM software COMSOL Multiphysics, and the simulation results were compared with experimental results. **Results** The results showed that the simulation results of food temperature distribution were similar to the experimental results, the simulation results of 7 feature points were close to the experimental results, and the root mean square error of final temperature of feature points between experimental results and simulation results was 1.75 °C. **Conclusion** It was confirmed that the simulation of microwave heating of packaged food by COMSOL Multiphysics is feasible.

KEY WORDS: microwave package; microwave heating; electromagnetic field; temperature field

随着人民生活水平的不断提高,微波炉在家庭中的应用也越来越普遍,已经逐渐成为人们最为喜爱的 烹饪加热方法之一^[1]。微波炉虽然具有很多优点,但 是却不能得到传统烹饪所能得到的加热效果,如加热 不均匀,不理想的加热效果无疑限制了微波炉的发展 和使用^[2-3]。

除了通过改进微波炉的结构来改善加热效果外,

近年来,通过设计微波包装来改善加热质量逐渐成为 另一种重要方法^[4-9]。通过模拟则可以减小设计周 期,节约成本。一些学者采用不同的软件对微波加热 食品的过程进行了模拟。Geedipalli 等人^[10]利用有限 元软件 ANSYS 和 FIDAP 模拟分析了转盘对微波加热 均匀性的影响。Liu 等人^[11]利用 FEMAP 和 PHOTO-Series 软件模拟了微波炉加热食品的过程,并与实验

收稿日期: 2013-11-18

作者简介:张柯(1989—),男,江苏徐州人,江南大学硕士生,主攻食品包装技术与安全。

通讯作者:卢立新(1966--),男,江苏宜兴人,博士,江南大学教授、博士生导师,主要研究方向为食品包装技术与安全、运输包装等。

基金项目:国家科技支撑计划(2011BAD24B01);江苏省高校科研成果产业化推进工程项目(JHB2012-25)

结果进行了对比。Pitchai 等人^[3]利用 FDTD 软件 Quickwave 模拟了微波炉加热食品的过程,得到的温 度分布图与实验近似,误差很小。Zhang and Datta 利 用有限元软件 EMAS 和 NASTRAN 模拟了微波炉加 热的过程,并提出双向耦合是必要的^[12]。另外,Dincov^[13],Wäppling-Raaholt^[14],Tilford^[15],Curcio^[16]等 人也对这一问题进行过模拟探讨。上述研究大都使 用 2 个软件进行耦合分析,模拟过程相对复杂,而且 都是单独对食品进行建模分析,并未考虑包装的影 响。文中以塑料盒装马铃薯为研究对象,应用 COM-SOL Multiphysics 软件模拟微波炉加热包装食品的过 程,建立食品介电性能随时间变化的电磁-热传导双 向耦合模型,考虑加热过程中的表面热对流,并对模 拟结果进行了实验验证。

1 微波炉加热基础理论

微波炉在加热食品时,腔体内部的电磁场分布是 由麦克斯韦方程组决定的(无源区域):

 $\nabla \times E = -j\omega\mu H$ $\nabla \times H = j\omega\varepsilon_0 \varepsilon' E$ $\nabla \cdot (\varepsilon' E) = 0$ $\nabla \cdot H = 0$ (1)

式中:E为电场强度,V/m;H为磁场强度,A/m;j为电流密度, A/m^2 ; ω 为角频率,rad/s; μ 为磁导率,H/m; ε_0 为真空介电常数,F/m; ε' 为相对介电常数。

微波炉腔和波导内壁均为金属材料,使用阻抗边 界条件,食品、包装材料是有耗介质,微波传播过程中 部分电磁能转换成食品、包装材料中的热能,其微波 耗散能量为^[17]:

$$P_{\rm v} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \tag{2}$$

式中: P_v 为微波耗散能量, J_{f} 为微波频率, Hz_{f} 。

由于包装材料的相对介电损耗很小,产生的热量 也很小,因此只考虑食品的热传导^[3]:

$$\rho C_{\rm P} \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 \theta + P_{\rm v}(x, y, z, t)$$
(3)

式中: ρ 为食品密度, kg/m³; C_p 为食品比热容, J/(kg・ \mathbb{C}); θ 为食品温度, \mathbb{C} ; t 为加热时间, s; k 为 食品导热系数, W/(m・ \mathbb{C})。

另外还需考虑食品表面与空气的表面热对流^[10]:

$$-k \nabla \theta = h_c(\theta - \theta_a) \tag{4}$$

式中: h_c 为对流换热系数,W·m²/℃; θ_a 为环境 温度,℃。

2 模拟方法与实验验证

2.1 几何模型

基于微波炉结构,微波炉加热包装食品的模型见 图1,包装食品放在微波炉中间。





2.2 模拟方法

2.2.1 模拟参数

样品的初始温度和环境温度均为 24 ℃,加热时 间为 30 s,微波炉功率为 780 W,波端口微波频率为 2450 MHz,波导端口使用 TE10 模,食品表面热对流 系数为 2 W/(m² · K)。

2.2.2 网格的划分

单元尺寸由 Nyquist 准则来校核^[18]:

$$S_{\max} < \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_r}} \tag{5}$$

式中: λ 为波长, mm;c 为真空光速, mm/s_o

设置最大单元尺寸为6 mm,对于食品的网格使 用更小的单元尺寸。

2.3 验证实验

2.3.1 主要仪器和材料

样品为块状马铃薯,包装为 PP 塑料盒,材料性能 见表 1^[10,17]。

表1 材料性能

Tab. 1 Material property

参数	样品	包装
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.4	0.19
密度/(kg •m ⁻³)	1000	1200
比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	3900	1460
相对介电常数	$-6.4 \times 10^{-4} \theta^2 - 0.05\theta + 56.8$	2
相对介电损耗	$-1.0 \times 10^{-4} \theta^2 - 0.108 \theta + 16.1$	1.2×10^{-3}

注:空气和金属材料性能从 COMSOL Multiphysics 软件中直接 导出, *θ* 为样品温度。

2.3.2 仪器和设备

主要仪器与设备:NJL07-3 型实验专用微波炉, 南京杰全微波设备有限公司;分布式光纤测温系统, 加拿大 FISO 公司; FLIR T400 红外热像仪,前视 (FLIR)红外热像系统贸易(上海)有限公司。

2.3.3 方法

将马铃薯去皮洗净,切成块状,尺寸为100 mm×50 mm×35 mm,使用一根细棒(比光纤测温系统探头尺寸 稍大)从样品表面插入样品内部足够深度,从而确定7 个特征点(P₁—P₇),特征点的位置见图2。其中位置 1,7 的深度为25 mm,即坐标 *z*=20 mm;位置2,5 的深 度为30 mm,即*z*=15 mm;位置3,4,6 的深度为15 mm, 即*z*=30 mm。将样品连同包装放入微波炉中间,光纤 测温系统的7个探头分别插入7个孔中。加热30 s 后,立即将样品拿出微波炉,并使用红外热像仪拍下样 品上表面、中间截面以及下表面的温度分布图,然后使 用相同的温度标尺将模拟结果与实验结果进行比较。



图 2 特征点位置 Fig. 2 Location of feature points

3 结果与讨论

3.1 食品内外温度分布

样品加热 30 s 后,实验测定的温度分布与模拟得 到的温度分布见图 3。结果表明,食品内外温度分布 的实验结果和模拟结果总体上接近。



3.2 食品内部特征点温度比较

使用光纤测温仪测量了7个特征点的瞬时温度 变化,结果见图4。结果表明,大部分特征点的实验



Fig. 4 Temperature-time curve at 7 locations

结果和模拟结果接近,模拟温度比实验温度稍高。

3.3 最终温度比较

将加热 30 s 后 7 个特征点的实验结果与模拟得 到的温度进行对比,见表 2,并使用公式(6)计算均方 根误差 S:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\theta_{\rm S} - \theta_{\rm E}\right)^2} \tag{6}$$

式中: $\theta_{\rm s}$ 为模拟温度, \mathbb{C} ; $\theta_{\rm E}$ 为实验温度, \mathbb{C} 。

计算得到均方根误差为 1.75 ℃, 在可接受范围内。

表 2 加热 30 s 后特征点温度比较

Tab. 2 Temperature comparison of feature points after 30 s microwave heating

特征点	模拟温度/℃	实验温度/℃	相对误差/%
1	29.74	27.29	8.98
2	33.61	31.58	6.43
3	32.16	31.11	3.38
4	33.1	32.89	0.64
5	39.95	37.04	7.86
6	46.67	46.02	1.41
7	33.86	32.72	3.48

4 结语

应用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 模拟 了微波炉加热包装食品的过程,建立了食品介电性能 随时间变化的电磁-温度双向耦合模型,并考虑了食 品表面的热对流现象。模拟结果与实验结果近似,均 方根误差为1.75 ℃,在可接受的范围内。证明使用 COMSOL Multiphysics 来进行微波炉加热包装食品的 模拟是可行的,为食品或食品微波包装设计提供了一 种简单实用的方法。

参考文献:

[1] 郝发义. 浅谈微波食品包装的发展[J]. 包装装潢印刷, 2007(1):52—53.

HAO Fa-yi. Shallow Talk on the Development of Microwave Food Packaging[J]. Printing Technology, 2007(1):52-53.

[2] 王坤,卢立新. 微波食品在改善其加热缺陷方面的研究 进展[J]. 包装工程,2012,33(9):139—142.

WANG Kun, LU Li-xin. Reesarch Progress of Microwave Food Packaging in Improving Their Heating Defects [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9):139-142.

- [3] PITCHAI K, BIRLA S L, SUBBIAH J, et al. Coupled Electromagnetic and Heat Transfer Model for Microwave Heating in Domestic Ovens[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 112(1/2):100-111.
- [4] NEILSON Z, LAURENCE L, ANTHONY R. Abuse-tolerant Metallic Packaging Materials for Microwave Cooking: US, 6204492[P]. 2001-05-20.
- [5] LAURENCE L, NEILSON Z. Microwave Oven Heating Element Having Broken Loops: US, 6114679 [P]. 2000-09-05.
- [6] NEILSON Z, IGOR K. Patterned Microwave Oven Susceptor: US,6133560 [P]. 2000-10-17.
- [7] ROBERT L, WESTON R, KELLY R, et al. Microwave Heating Package for Frozen Food Items; US,0220640 [P]. 2011 -09-15.
- [8] LENNART M, BERTIL G. Food Package: US, 179635 [P]. 1980-08-20.
- [9] LAURENCE M C. Abuse-tolerant Metallic Pattern Arrays for Microwave Packaging Materials: US,0111463 [P]. 2003 -06-19.
- [10] GEEDIPALLI S, RAKESH V, DATTA A K. Modeling the Heating Uniformity Contributed by a Rotating Turntable in Microwave Ovens [J]. Journal of Food Enginnering, 2007, 82(3):359-368.
- [11] FUKUOKA M, NOBORU S. A Finite Element Model for Simulating Temperature Distributions in Rotating Food during Microwave Heating [J]. Journal of Food Engineering, 2013,115(1):49-52.
- [12] ZHANG H, DATTA A K. Coupled Electromagnetic and Termal Modeling of Microwave Oven Heating of Foods [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2000,35(2):71-85.
- [13] DINCOV D, PARROTT K A, PERICLEOUS K A. A New Computational Approach to Microwave Heating of Two – phase Porous Materials[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2004, 14 (5/6): 783-802.
- [14] WÄPPLING-RAAHOLT B, SCHEERLINC N, GAIT S, et al. A Combined Electromagnetic and Heat Transfer Model for Heating Foods in Microwave Combination Ovens [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2002,37(2):97—111.
- [15] TILFORD T, BAGINSKI E, KELDER J, et al. Microwave Modeling and Validation in Food Thawing Applications [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2007, 41(4):30-45.

响镜面倾斜程度,增加特定防伪色 s 后,同时可以从 空间中多角度观察,丰富了光变效果,而且可进行隐 蔽性编码加密,从而满足防伪光变图像的要求。

3 结语

文中以 RGB 三原色加防伪色 S 为基础,建立了 一种适用于商标印刷型 RGBS 显色微镜模型。与参 考文献[8]中 RGB 显色微镜模型相比,文中提出的模 型增加了特定防伪色,并采用余弦函数积的方式构成 带有防伪信息的光变微镜像素,可在印刷同色异谱显 色规律范围内,通过选择合适的 s 和 rgb 值进行色度 和像素镜结构双重加密。

参考文献:

- [1] 龚晔,张逸新,王凯. 微结构加网防伪应用[J]. 包装工程,2008,29(3):62—68.
 GONG Ye, ZHANG Yi-xin, WANG Kai. Anti-counterfeiting of Microstructure Screens[J]. Packaging Engineering, 2008,29(3):62—68.
- [2] LEE R A. OVD Microstructures for Direct Printing Applications [C]//INTERGRAF – XVIIIth International Security Printers Conference, Italy:Sorrento, 2001:90–95.
- [3] LEE R A. Colourtone Lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2002, 61:105-111.
- [4] LEECH P W, ZEIDLER P H. Microrelief Structures for Anti -counterfeiting Applications [J]. Microelectronic Engineering, 2003, 65:439-446.
- [5] LEE R A. Micro Mirror Array Nanostructures for Anticounterfeiting Applications[J]. Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques V,2004,5310;350—368.
- [6] LEECH P W, LEE R A, DAVIS T J. Printing Via Hot Embossing of Optical Variable Images in Thermoplastic Acrylic Lacquer[J]. Microelectronic Engineering, 2006, 83:1961— 1965.
- [7] 薛磊,张逸新,刘春林.数字水印技术在印刷品防伪中的

应用[J]. 包装工程,2008,29(2):96—97.

XUE Lei, ZHANG Yi-xin. Application of Digital Watermark Technology in Forgery Detection of Printed Material [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2):96—97.

- [8] LEE R A. Optical Device and Methods of Manufacture:US, 7281810B2[P].2007-10-16.
- [9] 唐铖,张逸新,吴光远. CMYK 防伪印刷微镜阵列[J]. 光 学技术,2012,38(5):619—623.
 TANG Cheng, ZHANG Yi-xin, WU Guang-yuan. Anticounterfeiting of CMYK Printing Micro-mirror Array[J].
 Optical Technique,2012,38(5):619—623.
- [10] TANG M, MIAO Q, WU Z, et al. Angle Coder of Anti-counterfeiting Color in Optical Micro-mirror arrays [J]. Optik, 2013,124:6146—6148.
- [11] MIAO Q, ZHANG Y, TANG C, et al. Multi-channel Optical Anti-counterfeiting of Micro-mirror Arrays [J]. Optik, 2014,125:583-586.
- [12] 臧冬娟,张逸新. 雕刻防伪技术[J]. 包装工程,2007,28
 (1):53—55.
 ZANG Dong-juan,ZHANG Yi-xin. Application of Engraving Technology in Anti-counterfeiting Printing[J]. Packaging Engineering,2007,28(1):53—55.
- [13] 王凯,张逸新,龚晔,等. 同色异谱在防伪油墨中的应用
 [J]. 包装工程, 2008,29(3):59—61.
 WANG Kai, ZHANG Yi-xin, GONG Ye, et al. Application of Metamerism Phenomenon in Security Ink[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(3): 62—68.
- [14] 徐遵燕,张逸新,陈杰,等.光学变色防伪油墨的颜色预测模型[J].包装工程,2011,32(5):94—96.
 XU Zun-yan,ZHANG Yi-xin,CHEN Jie, et al. Color Prediction Model of Optically Variable Anti-forgery Ink[J].
 Packaging Engineering,2011,32(5):94—96.
- [15] 王麒,张逸新. 商标印刷色彩预测 Clapper-Yule 模型
 [J].包装工程,2013,34(15):131—134.
 WANG Qi,ZHANG Yi-xin. Clapper-Yule Model for Color Prediction in Logo Printing [J]. Packaging Engineering, 2013,34(15):131—134.

(上接第4页)

- [16] CURCIO S, AVERSA M, GALABRN V, et al. Simulation of Food Drying: FEM Analysis and Experimental Validation
 [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(4):541-553.
- [17] MATTHEW W, PETER S. Development of Packaging and Products for Use in Microwave Ovens [M]. UK: Woodhead

Publishing, 2009.

[18] MAIRABITO C, NAREYANAN A, PEREZ D, et al. FEM-LAB Model of a Coupled Electromagnetic-thermal Boundary Value: Problem [R]. MA: Worcester Polytechnic Institute,2005.