

食品微波加热过程中的传热模型

范大明¹, 陈卫^{*1}, 李春香¹, 毛丙永¹, 张清苗², 赵建新¹, 张灏¹

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 福建安井食品股份有限公司, 福建 厦门 361022)

摘要: 微波加热是一种快速简便的食品复热手段, 但此种方法通常会导致受热不均匀。为了更好的将微波加热技术应用于食品的复热过程, 解决受热过程“冷点”的出现, 作者综述了食品微波加热过程传热模型的研究进展, 并针对数值计算方法、模型理论和功率吸收进行了详细阐述, 探讨了微波能在食品中转化成热能的机制, 并分析了研究过程中存在的问题和发展方向。

关键词: 微波加热; 传热模型; 介电性; 微波吸收功率

中图分类号: TS 201.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1689(2012)04-0373-06

Investigations on the Heat Transfer Model in Food during Microwave Heating

FAN Da-ming¹, CHEN Wei^{*1}, LI Chun-xiang¹, MAO Bing-yong¹,
ZHANG Qing-miao², ZHAO Jian-xin¹, ZHANG Hao¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Fujian Anjoyfood Share Co. Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: Microwave heating is a rapid and convenient strategy for food-reheating. However, the phenomenon of uneven heating often occurs during microwave heating. To solve the "cold spot" problem during microwave reheating, a heat transfer model to predict the distribution of heat could help control the quality of food during microwave heating. Therefore, this manuscript summarized the recent advances in microwave heat transfer model, discussed the numerical calculation, theory and microwave absorption frequency of microwave heat transfer model, and analyzed the current issues and future development in this field.

Key words: microwave heating, heat transfer model, dielectric property, microwave absorption frequency

微波加热运用介电损耗原理, 采取整体加热的方式, 通过分子极化和离子导电两个效应对物料进行直接加热, 实现了加热迅速、热效率高、加工品质好等特点, 在食品工业中的应用越来越广泛, 尤其在微波加热、解冻、回温、干燥和杀菌等方面表现出

明显的优势。

食品微波加热过程的数学模型主要分为模拟食品中温度变化的传热模型、模拟水分变化的传质模型、谐振腔中描述电磁场分布的数学模型和描述谐振腔中加载样品的微波场模型。作者主要对引

收稿日期: 2011-04-18

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAD91B03); 国家科技部农业科技成果转化资金项目(2008GB2B200083)。

作者简介: 范大明(1983-), 男, 蒙古族, 黑龙江齐齐哈尔人, 食品生物技术博士研究生。E-mail: fandm@jiangnan.edu.cn

*通信作者: 陈卫(1966-), 男, 江苏江都人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品生物技术方面的研究。

E-mail: weichen@jiangnan.edu.cn.

起食品中温度变化的传热模型进行阐述。通过食品微波加工传热模型的分析,可以预测食品微波加热的温度分布分布,控制加热过程;同时对食品包装容器和微波设备的设计,以及带包装食品的加热条件和传热过程的研究也起着重要作用。综述了食品微波加热过程中传热模型的研究背景和进展,并提出了目前存在问题以及今后的研究方向。

1 食品微波加热过程中传热模型的研究进展

从微波技术应用于食品加工开始,产品开发设计和加工工艺的发展基本上都处于简单的反复试验的过程。由于微波加热后产生的温度分布不均、微生物残留和加工过热现象导致了许多食品质量与安全事故,限制了微波加热技术在食品加工中的应用。近年来,由于计算机应用范围的扩大和技术集成软件包的发展,人们可以通过描述微波炉电磁场的麦克斯韦方程以及加热过程中的传热模型来预测食品微波加热中的电场和温度分布。传热模型作为一种工具,不仅可以在食品工业应用中达到在线控制微波加热过程,而且为食品和微波炉的优化设计提供了很好的理论指导。在国内,目前只对简单食品模拟物的微波传热建模,如高介电损耗琼脂凝胶^[1]、甲基纤维素模拟牛肉^[2]等的传热研究。而国外的研究起始于 Ohlsson 和 Bengtsson^[3],他们用有限差分法模拟无限平板状的腌制火腿和牛肉微波加热过程,显示数值模型预测的温度分布与实验结果很好的契合。Swami^[4]也用有限差分法模拟圆柱体和矩形高水分食品如含盐浓度不同的凝胶样品的微波加热过程,预测结果与实验测定数据一致。Tong^[5]和 Wei^[6]等用一维有限差分法对面包、松饼和饼干分别进行微波加热过程中的传质传热深入分析。Lin^[7]和 Zhou^[8]等用有限元法预测微波加热时矩形和圆柱形食品中的温度分布。Chen^[9]和 Lin^[10]用有限元法结合产热量模拟圆柱形土豆的温度分布,发现温度升高率呈中心轴对称。Pangrle^[11]等用有限元法模拟圆柱状纯水和 0.1 mol/L NaCl 水溶液的微波解冻,不均匀温度分布被发现。Datta^[12]认为这种不均匀可通过炉内安装转盘和搅拌器解决,但同时使数值建模更加困难。Vilayannur^[13]等拓展了有限元法应用范围,用其预测微波加热多边形棱柱体样品的温度分布。

近年来,由于微波技术的优势和计算机能力的提高,关于食品微波加热传热建模的研究迅速发展。Feng^[14]模拟微波帮助的流化床干燥苹果丁传质传热过程。Lee^[15]采用三维有限差建模预测食品微波加热中样品的温度分布,并优化加热/控制周期来提高微波复热无菌包装常温保存的蒸煮米饭的温度均匀性,同时指出其它的一些控制温度分布不均的方法,如微波炉的设计,加热循环操作,产品配方设计,包装设计和以上几种措施的结合使用。Campanone^[16]对圆柱状土豆泥和搅碎的牛肉样品进行微波加热建模,并用有限差分法数值求解,发现数学模型预测结果能很好的模拟样品微波加热中的温度变化。Romano^[17]等人对不同尺寸的圆柱状土豆微波加热进行建模,并采用有限元法数值求解。Curet^[18]用二维有限元法对高介电损耗的甲基纤维素模拟物在微波解冻和加热阶段传热建模,并比较了麦克斯韦方程和朗伯定律在预测微波吸收功率方面的应用。Seyhun^[19]等人运用有限差分法模拟了微波回温和微波结合红外回温冷冻土豆泥的传热过程。

2 微波加热传热模型理论

2.1 模型假设

根据实际对象的特点和建模的目的,对问题进行必要的简化,并且用精确的语言做出假设。食品微波加热过程中的传热模型通常建立在加热的食品为无磁性的均匀、各向同性的连续介质。

2.2 传热模型

基于连续方程、热能方程和菲克定律基础上的传热方程可描述为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = -\nabla \cdot q_R - \sum_i h_i I_i + Q$$

式中: ρ 为密度(kg/m^3), C_p 为比热($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$), κ 为导热率($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), q_R 为辐射传热流密度(W/m^2), ∇^2 为拉普拉斯算子;等式左边来源于热传导方程,右边依次代表辐射产热、质量源和微波内热源。

若物料为潮湿的固体物料时, q_R 项可考虑到边界条件中,由于大多数食品加热温度与陶瓷烧制相比要温和得多,所以对食品而言,比较对流和蒸发所产生的热传递,辐射可以忽略不计,传热方程简化为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = - \sum_i h_i I_i + Q$$

Vilayannur^[13] 在研究样品形状和尺寸对温度水分不均匀性的影响时,采用传热与传质耦合控制方程来预测温度分布:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = \rho L \frac{\partial M}{\partial t} + Q$$

式中: L 为潜热(J/kg), M 为水分质量分数(%),其中:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \cdot \nabla M)$$

D 为水分扩散系数(m^2/s)。

Knoerzer^[20] 等人在研究食品微波加热过程中的计算模型时,忽略水分损失,建立下面的传热方程来预测样品中的温度分布:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + P_V$$

式中: P_V 为单位体积功率吸收(W),计算方程为:

$$P_V = \frac{P}{V} = 2\pi\epsilon_0\epsilon''fE^2$$

对于高能量密度微波照射的食品,因为介电损失导致的热量变化远大于热传递损失, $\nabla \cdot (\kappa \cdot T)$ 项可忽略,传热方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{em} = 2\pi\epsilon_0\epsilon''fE^2$$

也有学者对微波加热过程进行数学分析,建立广义的数学模型来模拟不同形状大小的食品(食品中的功率分布可用朗伯定律求解)微波加热过程中的温度分布,Campan^[16] 传热方程中引入样品形状指数 GI (平板为 0,无限圆柱体为 1,球体为 2) 为:

$$V\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = V \frac{\partial \kappa}{\partial \chi} \frac{\partial T}{\partial \chi} + V\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial \chi^2} + VGI \frac{\kappa}{\chi} \frac{\partial T}{\partial \chi} + P$$

并通过 x 为轴向或径向坐标交互,考虑二维或三维模型(圆柱体和矩形样品) 预测温度分布。 $0 \leq x \leq L, L$ 为样品厚度的一半或样品半径, V 为样品的体积, P 为样品中功率耗散。

Vittorio Raffaele Romano^[17] 等人对不同尺寸圆柱体食品建立二维传热模型,取圆柱体中的微元体 $2\pi r\Delta r\Delta z$,基于傅里叶定律和能量守恒定律的传热方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] +$$

$$Q_s \left\{ \left(\frac{R}{r} \right) \left[e^{-2\alpha(R-r)} + e^{-2\alpha(R+r)} \right] + \left[e^{-2\alpha(L/2-z)} + e^{-2\alpha(L/2+z)} \right] \right\}$$

其中 $Q(r, z) =$

$$Q_s \left\{ \left(\frac{R}{r} \right) \left[e^{-2\alpha(R-r)} + e^{-2\alpha(R+r)} \right] + \left[e^{-2\alpha(L/2-z)} + e^{-2\alpha(L/2+z)} \right] \right\}$$

考虑径向和轴向的功率吸收,是单位体积的产热量。

2.3 初始条件和边界条件

初始条件:一般考虑初始样品的初始温度 $T = T_0$ 。

边界条件:样品边界表面温度或换热情况下的边界条件,主要分为三类:

- 1) 绝热边界: $-\kappa \frac{\partial T}{\partial \chi} = 0$
- 2) 对流热损失: $-\kappa \frac{\partial T}{\partial \chi} = h(T - T_a)$
- 3) 水分蒸发热损失: $-\kappa \frac{\partial T}{\partial \chi} = \frac{m_{ev}}{A} \Delta H_{ev}$

3 微波加热食品中的功率消耗

微波加热食品的功率消耗是食品温度升高的主要原因,目前很多学者主要通过麦克斯韦方程^[21-23] 或朗伯定律^[7-8] 来计算微波加热食品的产热量。

3.1 麦克斯韦方程

微波是一种电磁波,所以描述电磁波传播的麦克斯韦方程组是研究微波电磁场分布的理论基础。Ayappa^[21] 等用麦克斯韦方程描述了电磁场。Geedipalli^[23] 等人通过建模模拟转盘对样品加热均匀性的影响,用麦克斯韦方程来计算功率损耗。麦克斯韦方程组的复数形式为:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H,$$

$$\nabla \times H = -j\omega\epsilon_0\epsilon E$$

$$\nabla \cdot E = 0$$

$$\nabla \cdot H = 0$$

式中, E 为电场强度(V/m), ω 为角频率(rad/s)且 $\omega = 2\pi f, \mu$ 为自由空间的磁导率(H/m), H 为磁场强度(A/m), ϵ_0 为自由空间的介电常数(F/m), ϵ 为复数相对介电常数。

物质中的功率吸收用坡印廷公式表示^[24]:

$$P = 2\pi\epsilon_0\epsilon''f E^2$$

式中, P 为单位体积吸收功率(W/m^3), E 为电场强

度(V/m), f 为微波频率(Hz), ϵ_0 为自由空间的介电常数(F/m), ϵ'' 为相对介电损耗因数。

Yang^[25] 在比较朗伯定律和麦克斯韦方程计算圆柱体食品中的温度分布时提出,若 E 、 H 是时间的函数,样品的磁导率近似自由空间的磁导率且呈电中性,可用一维模型分析时,麦克斯韦方程变形为薛定谔波动方程:

$$\frac{d^2 E}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE}{dr} + \kappa_1^2 E = 0 (0 \leq r \leq R)$$

式中: $\kappa_1^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 (\epsilon' + i\epsilon'')$, κ_1 为波动系数, ω 为角频率(rad/s), μ_0 为自由空间的磁导率(H/m)。

3.2 朗伯定律

通常计算微波产热量选用朗伯定律,相比于麦克斯韦方程而言,它不需要计算样品中的电磁场,且只考虑电磁波全部通过样品,忽略反射波和衍射的影响,因此计算比较简单方便。Kostoglou 等人^[26] 讨论对称样品微波加热中热源的计算方法,比较麦克斯韦方程和朗伯定律的差别,并初次讨论了温度依靠的介电特性的热源简化表达式的使用范围。Liu^[27] 和 Basak^[28] 等人比较了麦克斯韦方程和朗伯定律在微波加热中的应用。发现朗伯定律预测的温度分布与麦克斯韦方程预测的相同,都与实验结果有很好的拟合。Datta 和 Ni^[29] 研究得出吸收功率与微波能在样品中的穿透深度 D_p 有关系并呈朗伯定律指数形式衰减。微波吸收功率的朗伯定律表达式为^[30]:

$$q = q_0 e^{-2z/D_p}$$

也可用 $q = q_0 e^{-2\alpha z}$ 表示,式中, q 为微波吸收功率, q_0 为样品表面的入射功率, z 为样品的厚度(cm), 衰减因素

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon \{ [1 + \tan^2 \delta]^{1/2} - 1 \}}{2}}$$

D_p 为微波在样品中的穿透深度(cm), $D_p = (C_0/2\pi f) \{ 2\epsilon' [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1] \}^{-1/2}$ 。它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,为微波照射食品后,其能量衰减至表面能量的 $1/e$ 时的位置距表面的距离。其中, C_0 为自由空间光速(3.0×10^8 m/s), f 为所测定的频率, ϵ' 是测得的介电常数, $\tan \delta$ 为损耗角的正切, $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ 。

也有学者通过实验结果发现,朗伯定律在有些

条件下并不能真实反映实测结果。Basak^[28] 比较麦克斯韦方程和朗伯定律发现,麦克斯韦方程可以精确反应微波的传播和反射,而朗伯定律只考虑微波全部透过样品,因此对于低介电物质,朗伯定律预测结果接近精确解;对于高介电物质,朗伯定律预测的功率吸收要高于实验结果。Curet^[18] 等人比较冷冻土豆泥在解冻和加热阶段应用麦克斯韦方程和朗伯定律两种方法计算功率吸收,发现在解冻过程,因为发生共振现象,朗伯定律预测结果与麦克斯韦方程不一致。而在加热阶段,朗伯定律能很好的预测高介电物质的温度分布。Ayappa^[21] 比较麦克斯韦方程和朗伯定律预测平板上功率分布时得出平板厚度大于或等于穿透深度的 2.7 倍是朗伯定律代替麦克斯韦方程的临界条件。Vilayannu^[13] 在分析样品尺寸和形状对微波加热土豆中的温度和水分的的影响中应用朗伯定律来计算单位体积产热量,给出其适用范围为:

$$D_p \leq \frac{h}{1.7} (1 + \frac{0.08}{h})$$

式中, h 为平板厚度(cm), D_p 为穿透深度(cm)。

Swami^[4] 提出对于“无限”平板和圆柱体样品可直接使用朗伯定律,无限平板是指平板足够大,以致可忽略侧面热传递对温度的影响;无限圆柱体指圆柱体足够厚,以致样品内部温度只考虑侧面热传递的影响。Romano^[17] 在研究圆柱体食品的尺寸对温度分布的影响中得出: $R = 7.03\delta - 0.0001$ 是朗伯定律预测结果与麦克斯韦方程相同的临界条件。式中, δ 为波的穿透深度(cm), 且 $\delta = 1/\beta$, β 为衰减因子, R 为样品半径。

Kostoglou^[26] 对圆柱体中热源的近似分析,指出朗伯定律的限制条件为:在介电值为常数时, $\beta R \geq 3$;在介电性质是温度的函数时, $\beta_{r=0} R > 3$;其中, $\beta_{r=0}$ 为在半径为 $r = 0$ 处的衰减因子。

Curet^[31] 等人研究平面波均匀照射介电特性为常数的半无限平板时指出: $L \geq D_p$ 。 L 为平板样品厚度,此时可以使用朗伯定律来计算样品中的热源。

4 展望

传热模型的发展必须以模型参数的完整、测试系统和食品模型物质的健全、数值计算方法和计算

机能力的提高为前提。目前食品微波加热过程的传热建模还存在很多问题,一方面,食品热物性、介电性参数以及微波加热过程中的功率测定手段过于粗旷,计算微波吸收功率分布的方法必须进行相应参数的忽略及简化,所以不能全面、真实的反应客观规律;另一方面,目前的传热模型多是一些简单的食品模拟物(水,琼脂凝胶等),或者将热物性考虑为常数或将模型简化为一维或二维的基础上模拟温度分布。实际上,不同食品的成分、形状尺寸、微波工作状态和表面热损失情况在微波加

热时均有差异,而微波加热过程传热模型的建立必须根据不同食品的特性进行构建。此外,精确测温技术(如热电偶、光纤温度探针、MRI、电场分布测定技术、化学标记物应用于食品等)在模拟和控制食品微波加热过程的应用研究是传热模型进一步发展的必然趋势^[32]。

构建食品微波加热过程传热模型的最终目的是解决或调控加热不均匀性,同时提高物料对能量的利用率,此类研究的推广将进一步促进微波技术在食品工业中的应用。

参考文献(References):

- [1] 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, 4:6-11.
CHENG Yu-dong. Study on the temperature distributions in cylindrically packaged food during microwave heating [J]. **Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology**, 2002, 4:6-11. (in Chinese)
- [2] 曾欣, 辛明道, 张大明. 食品材料微波解冻的传热实验研究[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 1992, 2:40-45.
ZENG Xin, XIN Ming-dao, ZHANG Da-ming. An experiment on heat transfer by microwave thawing in food analogue material [J]. **Journal of Chongqing University**, 1992, 2:40-45. (in Chinese)
- [3] Ohlsson T, Bengtsson N. Microwave heating profiles in foods a comparison between heating and computer simulation[J]. **Micro Energy Appl Newsl**, 1971, 6:3-8.
- [4] Swami S. Microwave heating characteristics of simulated high moisture foods [D]. Massachusetts: University of Massachusetts, 1982.
- [5] Tong C H. Microwave heating of baked dough products with simultaneous heat and moisture transfer [D]. Madison: University of Wisconsin, 1988.
- [6] Wei C K, Davis H T, Davis E A, et al. Heat and mass transfer in water-laden sandstone: microwave heating [J]. **AIChE Journal**, 1985, 31(5):842-848.
- [7] Lin Y E, Anantheswaran R C, Purib V M. Finite element analysis of microwave heating of solid foods [J]. **Journal of Food Engineering**, 1995, 25:85-112.
- [8] Zhou L, Puri V M, Anantheswaran R C, et al. Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating—model development and validation [J]. **Journal of Food Engineering**, 1995, 25:509-529.
- [9] Chen Der-sheng, Singh R K, Haghghi K, Nelson P E. Finite element analysis of temperature distribution during microwaved particulate food[J]. **ASAE Paper**, 1990, 906602.
- [10] Lin Y E. Heating characteristics of simulated solid foods in a microwave oven [D]. PA: Pennsylvania State University, 1991.
- [11] Pangrle B J, Ayappa K G, Davis H T, et al. Microwave thawing of cylinders [J]. **AIChE Journal**, 1991, 37:1789-1800.
- [12] Datta A K. Heat and mass transfer in the microwave processing of food [J]. **Chemical Engineering Progress**, 1990, 6:47-53.
- [13] Vilayannur R S, Puri V M, Anantheswaran R C. Size and shape effect on nonuniformity of temperature and moisture distributions in microwave heated food materials: Part I simulation [J]. **Journal of Food Process Engineering**, 1998, 21:209-233.
- [14] Feng H, Tang J, Cavalieri R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature [J].

- Transactions of the ASAE**, 2002, 45(1):129—135.
- [15] Lee D S, Shin D H, Yam K L. Improvement of temperature uniformity in microwave— reheated rice by optimizing heat/hold cycle [J]. **Food Service Technology**, 2002, 2:87—93.
- [16] Campanone L A, Zaritzky N E. Mathematical analysis of microwave heating process [J]. **Journal of Food Engineering**, 2005, 69:359—368.
- [17] 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, 71:233—241.
- [18] Curet S, Rouaud O, Boillereaux L. Microwave tempering and heating in a single— mode cavity: numerical and experimental investigations [J]. **Chemical Engineering and Processing**, 2008, 47:1656—1665.
- [19] Seyhun N, Ramaswamy H, Sumnu G, et al. Comparison and modeling of microwave tempering and infrared assisted microwave tempering of frozen potato puree [J]. **Journal of Food Engineering**, 2009, 92:339—344.
- [20] 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.
- [21] Ayappa K G, Davis H T, Davis E A, et al. Analysis of microwave heating of materials with temperature— dependent properties [J]. **AIChE Journal**, 1991, 37(3):313—322.
- [22] Ayappa K G, Davis H T. Two— dimensional finite element analysis of microwave heating [J]. **American Institute of Chemical Engineers**, 1992, 38(10):1577—1592.
- [23] 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, 82:359—368.
- [24] Decareau R V. Microwave foods: new product development [M]. Trumbull: Food & Nutrition Press, 1992.
- [25] Yang H W, 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.
- [26] Kostoglou M, Karapantsios T D. Approximate computation of heat sources in axisymmetric microwave heating [J]. **American Institute of Chemical Engineers**, 2006, 52(1):408—413.
- [27] Liu C M, Wang Q Z, Sakai N. Power and temperature distribution during microwave thawing, simulated by using Maxwell's equations and Lambert's law [J]. **International Journal of Food Science & Technology**, 2005, 40(1):9—21.
- [28] Basak T. Analysis of microwave propagation for multilayered material processing: Lambert's law versus exact solution [J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2004, 43(23):7671—7675.
- [29] Datta A K, Ni H. Infrared and hot— air assisted microwave heating of foods for control of surface moisture [J]. **Journal of Food Engineering**, 2002, 51:355—364.
- [30] Datta A K, Prosetya H, Hu W. Mathematical modeling of batch heating of liquids in a microwave cavity [J]. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**, 1992, 27:38—48.
- [31] Curet S, Rouaud O, Boillereaux L. Effect of sample size on microwave power absorption within dielectric materials: 2D numerical results vs. closed— form expressions [J]. **American Institute of Chemical Engineers**, 2009, 55(6):1569—1583.
- [32] 张懋, 张鹏. 食品干燥新技术的研究进展 [J]. **食品与生物技术学报**, 2006, 25(2):115—119.
ZHANG Min, ZHANG Peng. Progress of new food drying technology [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2006, 25(2):115—119. (in Chinese)