

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.05.029

金属壁移动对微波加热均匀性的影响

张春, 肖光念, 杨阳, 洪涛, 朱铎丞, 黄卡玛

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 本文通过矩形波导金属壁的移动,对腔体内电磁场分布的相位进行调节,从而改善矩形波导内因电磁场分布的不均匀而引起的加热不均匀性,并且提出了基于空间坐标变换的时变媒质方法来计算移动边界问题,对于处理大型工业用微波腔体的移动边界问题具有重要意义. 本文采用单模BJ-22波导加热系统为基准,分析短路面位置的调节对微波加热均匀性的影响,实验和计算表明短路面的调节可以大大提高微波加热的均匀性,且空间坐标变换理论可以准确的用于微波腔体的移动边界计算.

关键词: 微波加热; 加热均匀性; 矩形波导; 相位调节

中图分类号: O69 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)05-1062-05

The effect of moving metal wall on microwave heating uniformity

ZHANG Chun, XIAO Guang-Nian, YANG Yang, HONG Tao, ZHU Hua-Cheng, HUANG Ka-Ma

(College of Electronics and information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In this paper, the phase of electromagnetic field distribution in the cavity is regulated through movements of the metal wall of a rectangular waveguide, which can avoid the inhomogeneous heating caused by the uneven distribution of electromagnetic field in the rectangular waveguide. And the time varying medium method based on space coordinate transformation is proposed to calculate the moving boundary problem, which has a significant effect on solving the moving boundary problem of large industrial microwave cavities. A single mode BJ-22 wave guide heating system is used as the reference in this paper to analyze impacts of short circuit plane position on microwave heating uniformity. Experiments and calculation results show that the uniformity of microwave heating can be greatly improved by regulating of short circuit plane position, and the space coordinate transformation method can be used to calculate the moving boundary of the microwave cavity.

Keywords: Microwave heating; Heating uniformity; Rectangular waveguide; Phase adjustment

1 引言

微波作为一种新型加热方法,因具有即时性、选择性、高效性和安全性等特点,而受到广泛关注. 然而微波加热也存在加热不均匀的弊端,热点等非均匀加热问题是无法避免的. 在微波干燥后期,由

于水分降低,微波加热的非均匀性可能会造成被干燥物料的烧毁和食品结构的损坏,比如膨胀、爆裂等,微波加热不均匀的问题也制约着微波加热的广泛应用^[1-5].

在提高微波的均匀性加热方面, Funawatashi 和 Suzuki 利用数值方法研究了微波腔体和微波加

收稿日期: 2016-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展“973 计划”(2013CB328902, 2013CB328905); 国家自然科学基金(61501311).

作者简介: 张春(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微波能应用. E-mail: 409322725@qq.com

通讯作者: 朱铎丞. E-mail: hczyu@scu.edu.cn

热特性,提出可以利用金属搅拌和托盘转动来提高加热的均匀性^[6].而目前家用微波炉最常用的提高均匀加热的方式就是旋转加热,四川大学郭庆功、杨晓庆等研究了微波托盘旋转情况下加热水的计算与实验对比,结果表明旋转有助于提高加热的均匀性,但旋转速度对加热均匀性影响甚微^[7].而搅拌则可以极大的提高加热均匀性,搅拌速度越高均匀性越大. J. L. Pedreno-Molina 和 J. Tang 等人从样品的移动加热方式实现微波加热的均匀性,通过样品在微波腔内移动,是样品所处的电场区域变换,进而实现了较为均匀的加热方式^[8,9].腔体设计等方面,许多研究者提出了模式搅拌、相控加热、多端口等方式改变腔体内电场分布的方式,通过多模腔内电场模式变换,获得更加均匀的微波加热效果^[10-13].阿根廷学者 L. A. Campanone 根据相控加热,通过改变样品位置,实现了不同相位差的加热方式,加热均匀性得到了提升^[14].

本文通过矩形波导的金属壁移动,实现对腔体内电磁场分布的相位调节,来提高加热的均匀性.当矩形波导终端短路时,波导中的场处于驻波分布状态.短路面处为电场的波节点,距离短路面 $\lambda/4$ 处为电场的波腹点,波导中电场分布具有 $\lambda/2$ 重复性,因此调节波导短路面位置,实现对腔体内电磁场分布的相位调节.而涉及到移动边界问题,可以利用移动网格技术来进行多物理场计算,但是在使用移动网格技术时,会遇到计算矩阵过大、计算时间长和网格畸变等问题.因此文中利用基于空间坐标变换的时变媒质方法来计算移动边界问题.利用该算法可以极大的减小计算量、提高计算效率、避免网格畸变.对于处理大型工业用微波腔体的移动边界问题具有重要意义.

2 多物理场计算

2.1 控制方程

在该模型中,电磁场和流体传热模块相互耦合计算.首先,对于电磁场模块,本文利用 Maxwell 方程来计算电场强度在腔体内的分布^[15,16]. Maxwell 方程为:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{D} &= \epsilon \cdot \vec{E}\end{aligned}\quad (1)$$

式中, \vec{E} 为电场强度, \vec{H} 为磁场强度, \vec{D} 为电位移矢量, \vec{B} 为磁感应强度, \vec{J} 为电流密度.

由 Maxwell 计算出电场强度分布后,再通过:

$$P_d(\vec{r}, t) = \frac{1}{2}(\vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - \vec{D} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) + \vec{J} \cdot \vec{E} \quad (2)$$

得到单位体积的功率损耗,然后利用 Fourier 定律获得反应体系中的温度分布:

$$\rho_m C_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = K_t \nabla^2 T(\vec{r}, t) + P_d(\vec{r}, t) \quad (3)$$

式中, ρ_m 为等效密度, C_p 为介质等效比热容, K_t 为等效热传导系数, P_d 为单位体积的功率损耗.

2.2 边界条件

2.2.1 电磁场边界条件 微波炉的金属腔体设置为理想电导体,理想电导体可以看成是两种媒质面的特殊情况,假设其中一种媒质为理想导体,而导体内部不存在场,此时边界条件可以写成:

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (4)$$

$$\hat{n} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

其中, \vec{E} 和 \vec{B} 是导体媒质外部的电场与磁场, \hat{n} 为导体的外法向单位矢量,在理想导体边界条件下,边界面上始终存在着面电流和面电荷^[17-19].

2.2.2 换热边界条件 换热边界条件顾名思义是温度场边界上存在着热交换,而我们通过给定温度场某部分边界 S 上任意一点 M 处每一时刻的对流系数和流体温度,来描述温度场边界的分布情况,其表达式如下:

$$k_n(\partial T / \partial n) |_{M \in S} + h(T_{S_s} - T_a) = 0 \quad (6)$$

式中, M 代表边界 S 上的点, k_n 为沿边界法线方向的导热系数, $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度场沿边界法线方向的热梯度, h 为对流换热系数, T_a 为周围空气的温度, T_s 为温度场边界 S 部分的温度^[17-19].

2.3 空间坐标变换理论

首先定义坐标变换:

$$\vec{r} \rightarrow \vec{r}' = T(\vec{r}), \quad (7)$$

其中, \vec{r} 和 \vec{r}' 分别是原坐标系和新坐标系的位置矢量.特别地,在不同的坐标系统下,麦克斯韦方程组保持形式不变.因此,在不同的坐标系统下,新坐标系下的介电系数和磁导率可表示为^[20]:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon \bar{\Lambda} \quad (8)$$

$$\bar{\mu} = \mu \bar{\Lambda} \quad (9)$$

$$\bar{\Lambda} = (\det \bar{J}) \cdot (\bar{J}^T) \cdot \bar{J}^{-1} \quad (10)$$

其中, ϵ 和 μ 是原坐标系下的介电系数和磁导率. \bar{J} 为雅可比张量,可表示为:

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \partial x' / \partial x & \partial x' / \partial y & \partial x' / \partial z \\ \partial y' / \partial x & \partial y' / \partial y & \partial y' / \partial z \\ \partial z' / \partial x & \partial z' / \partial y & \partial z' / \partial z \end{bmatrix} \quad (11)$$

两个坐标下的电场和磁场可表示为雅可比张量关系^[20, 21]：

$$\vec{E}(\vec{r}) = (\vec{J}^T)^{-1} \cdot \vec{E}'(\vec{r}'), \quad (12)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = (\vec{J}^T)^{-1} \cdot \vec{H}'(\vec{r}'). \quad (13)$$

3 实验

本文采用 BJ-22 矩形波导的金属边界移动均匀加热实验及算法验证,当矩形波导终端短路时,波导中的场处于驻波分布状态. 短路面处为电场的波节点,距离短路面 $\lambda/4$ 处为电场的波腹点. 波导中电场分布具有 $\lambda/2$ 重复性. 因此调节 BJ-22 波导短路面位置,电场分布变化见图 1:

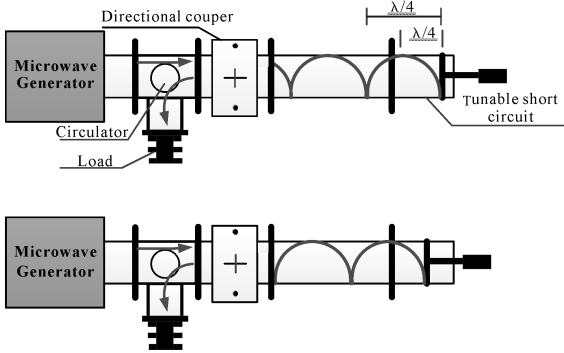


图 1 短路面位置对波导内电场分布的影响示意图
Fig. 1 The effect of short circuit on electric field distribution of waveguide

从上图可以看出当加热物料置于波导中时,我们可以通过调节短路面的位置来实现物料所处位置的电场大小调节. 为了验证该连续调节短路面方法对微波均匀加热的有效性,进行了如下实验.

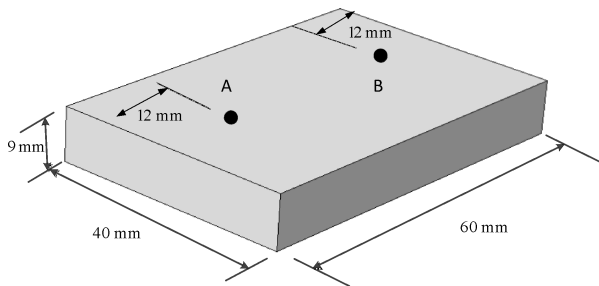


图 2 被加热样品尺寸示意图
Fig. 2 Mode of heated sample

由于电场分布沿波导长度方向具有 $\lambda/2$ (6.12 cm) 重复性,为了使样品在整个相位调节范围内被加热,短路面调节长度选为 8 cm (2 cm/s × 4 s). 放置在波导内的样品(土豆)的尺寸为 40 mm × 60 mm × 9 mm,见图 2. 样品左边缘距离最远短路面位置为 23 cm. 短路面以 2 cm/s 的匀速运动左右

移动,单边移动时长为 4 s. 微波源工作在 2450 MHz,输出功率为 700 W,是利用水为载体结合数值仿真与实验获得的腔体输入功率^[22]. 微波能量经环形器进入 BJ-22 加热腔体,反射的微波再次经环形器后被匹配负载吸收.

4 结果与讨论

为了验证计算的准确性,我们进行了实验与计算的对比. 加热后土豆的表面温度分布为从加热腔体取出后用 InfraTech VarioCam HenRis 红外摄像机拍摄,故表面温度分布低于计算结果的温度分布约 15 °C. 但热分布计算结果与实验结果基本一致,实验结果也表明短路面的移动加热方式可以极大的提高加热的均匀性. 加热实验分别为:(1) 短路面固定加热 8 s,土豆左边缘距离短路面 15 cm;(2) 短路面在 8 cm 范围内以 2 cm/s 匀速来回摆动加热 8 s(单边移动时长为 4 s).

图 4 为短路面固定加热后的上表面的温度分布与计算对比图,图 5 为短路面移动加热后的上表面的温度分布与计算对比图. 通过对比可以看出,实验与计算结果吻合良好,短路面移动条件下的微波加热相比不移动来说更加均匀. 其上表面中心线的温度分布对比如图 3,从中心线的温度分布可以看出移动加热在提高温度均匀性的同时也提高了吸收的效率. 而移动短路面造成的左部温度过高主要是因为,波导中其电场分布有 $\lambda/2$ 重复性,而我们的短路面活动范围为 8 cm,因此左部高电场分布会多出现一次,因此出现了左部温度稍微高的加热情况. 在以后的优化中将考虑去除这 1.88 cm 的重复,但目前的实验条件很难实现对 1.88 cm 的调控.

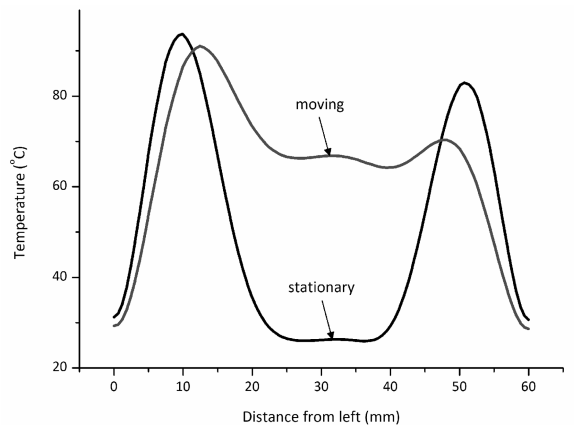


图 3 两种加热方式上表面中心线温度分布对比
Fig. 3 The comparison of temperature on the center of surface between two heating method

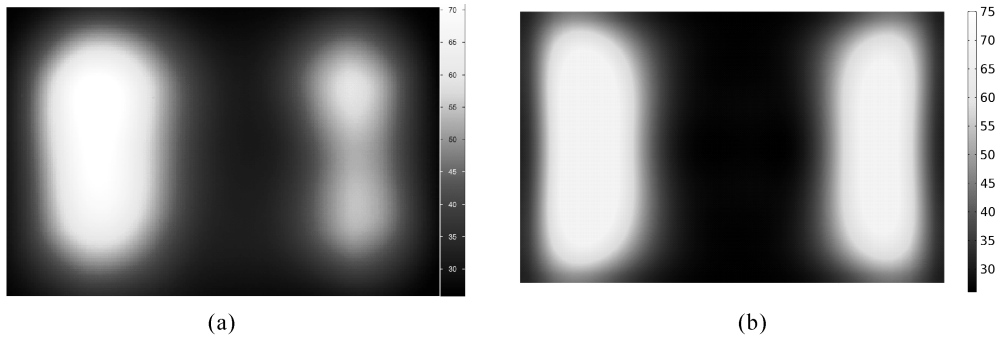


图 4 短路面不移动时加热 8 秒后的上表面温度分布实验结果图:(a)实测;(b)计算
 Fig. 4 The temperature distributions on the surface after heating 8s of the short circuit without moving:(a)Measurement;(b) simulation

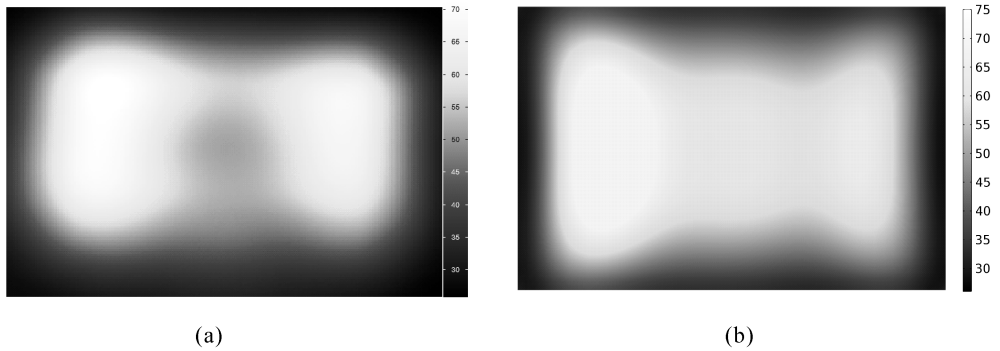


图 5 短路面在 8 cm 的范围内来回移动加热 8 秒后的上表面温度分布实验结果图:(a)实测;(b)计算
 Fig. 5 The temperature distributions on the surface after heating 8 s of the short circuit with moving:(a)measurement;(b) simulation

图 6 为固定短路面时光纤温度计在 A 与 B 点的温度测量结果与计算结果的对比. 可以看出 A 与 B 点同时处于温度的稳步增长. 因为从固定短路面加热的热分布图可以看出, A 点与 B 点分别在加热的两个峰值位置. 而从图 7 的短路面移动情况下 A 点与 B 点的温升, 可以明显看出短路面位置的调节对加热分布的影响, 也可以看出微波损耗的峰值位置在漂移. 但是结果显示这两种加热情况下的点温升的计算与实验结果吻合良好. 但实验结果有一定延迟, 这主要是由于: 1) 加热周期仅 8 s, 时间过短; 2) 光纤温度计的响应延时, 实验用 FISO FOT-L 光纤温度计 1 s 响应率仅为 63%.

5 总 结

本文通过对 BJ-22 波导的短路面进行移动, 实现了微波对样品的均匀加热. 同时利用基于空间从实验与计算可以看出, 实验与计算结果吻合良好, 短路面移动条件下的微波加热相比不移动来说更加均匀, 同时也提高了吸收效率. 坐标变换的时变媒质方法达到对金属边界移动的多物理场计算,

并通过实验进行了验证. 结果表明金属边界移动加热技术对于提高微波加热的均匀性是可行的, 新的算法可以实现金属边界移动情况的快速准确计算, 为微波能工业用腔体提供了均匀加热的设计思路和优化计算的解决方案.

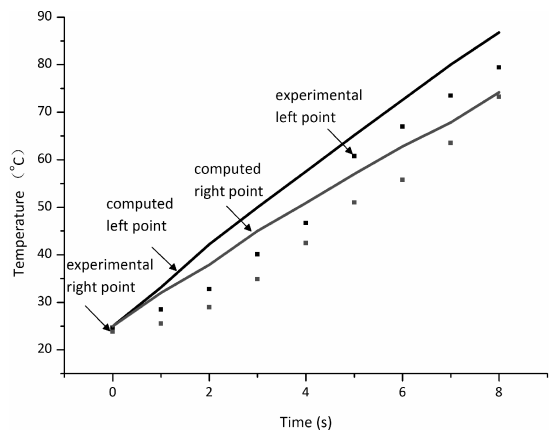


图 6 固定短路面加热时光纤温度计在 A 与 B 点的温度测量结果与计算结果对比
 Fig. 6 The temperature rises of point A and B in measurement and simulation of the short circuit without moving

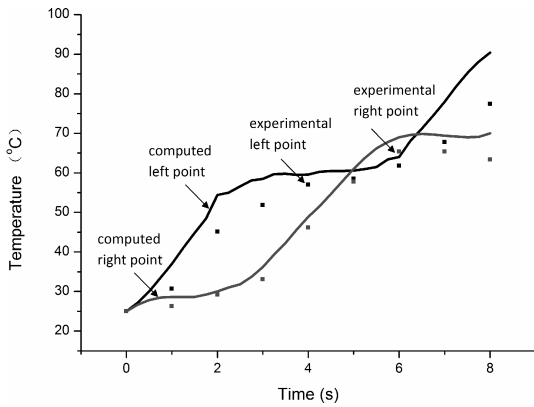


图 7 短路面移动加热时光纤温度计在 A 与 B 点的温度测量结果与计算结果对比

Fig. 7 The temperature rises of point A and B in measurement and simulation of the short circuit with moving

参考文献:

- [1] Singh S, Gupta D, Jain V, *et al.* Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: a review[J]. *Mater Manuf Processes*, 2015, 30: 1.
- [2] Jha S N, Narsaiah K, Basediya A, *et al.* Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review [J]. *J Food Sci Technol*, 2011, 48: 387.
- [3] Arslan D, Özcan M M. Study the effect of sun, oven and microwave drying on quality of onion slices [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2010, 43: 1121.
- [4] Sagar V, Kumar P S. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables; a review [J]. *J Food Sci Technol*, 2010, 47: 15.
- [5] Laaksonen T J, Roos Y H. Thermal, dynamic-mechanical, and dielectric analysis of phase and state transitions offrozen wheat doughs [J]. *J Cereal Sci*, 2000, 32: 281.
- [6] Funawatashi Y, Suzuki T. Numerical analysis of microwave heating of a dielectric [J]. *Heat Transfer—Asian Res*, 2003, 32: 227.
- [7] Guo Q G, Yang X Q, Yang L J. Influences of stir and viscosity coefficient on the formation of hotspots during microwave heating [J]. *Asian J Chem*, 2010, 22: 4450.
- [8] Pedreño-Molina J L, Monzó-Cabrera J, Catalá-Civera J M. Sample movement optimization for uniform heating in microwave heating ovens [J]. *Int J RF Microw Comput-Aided Eng*, 2007, 17: 142.
- [9] Chen H, Tang J, Liu F. Simulation model for moving food packages in microwave heating processes using conformal FDTD method [J]. *J Food Eng*, 2008, 88: 294.
- [10] Bows J R, Patrick M L, Janes R, *et al.* Microwave phase control heating [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1999, 34: 295.
- [11] Plaza-González P, Monzó-Cabrera J, Catalá-Civera JM, *et al.* Effect of mode-stirrer configurations on dielectric heating performance in multimode microwave applicators [J]. *Microw Theory Tech, IEEE Trans on*, 2005, 53: 1699.
- [12] Pitarch J, Canós A J, Peñaranda-Foix F L, *et al.* Synthesis of uniform electric field distributions in microwave multimode applicators by multifeed techniques [J]. *9th Int Microw High-Freq Heating Conf*, 2003, 1: 221.
- [13] Requena-Pérez M E, Pedreño-Molina J L, Monzó-Cabrera J, *et al.* Multimode cavity efficiency optimization by optimum load location-experimental approach [J]. *Microw Theory Tech, IEEE Trans on*, 2005, 53: 2114.
- [14] Campanone L A, Bava J A, Mascheroni R H. Modeling and process simulation of controlled microwave heating of foods by using of the resonance phenomenon [J]. *Appl Thermal Eng*, 2014, 73: 914.
- [15] 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]. *Int J Food Sci Tech*, 2005, 40: 9.
- [16] Yllidz A, Palazoglu T K, Erdogdu F. Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices [J]. *J Food Eng*, 2007, 79: 11.
- [17] Geedipalli S, Rakesh V, Datta A. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens [J]. *J Food Eng*, 2007, 82: 359.
- [18] Geedipalli S, Datta A, Rakesh V. Heat transfer in a combination microwave-jet impingement oven [J]. *Food Bioprod Process*, 2008, 86: 53.
- [19] Zhang H, Datta A. Heating concentrations of microwaves in spherical and cylindrical foods: part one; in planes waves [J]. *Food Bioprod Process*, 2005, 83: 6.
- [20] Özgün O, Kuzuoglu M. Form invariance of Maxwell's equations: the pathway to novel metamaterial specifications for electromagnetic reshaping [J]. *IEEE Antenn Propag M*, 2010, 52: 51.
- [21] Dollin L. On the possibility of comparison of three-dimensional electromagnetic systems with nonuniform anisotropic filling [J]. *Izv VUZov Radiofizika*, 1961, 4: 964.
- [22] Zhang H, Datta A. Microwave power absorption in single-and multiple-item foods [J]. *Food Bioprod Process*, 2003, 81: 257.