

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.01.014

微波多模腔金属边界移动对加热的影响研究

叶菁华¹, 于雨田¹, 洪涛², 朱铎丞¹, 黄卡玛¹

(1. 四川大学电子信息学院, 成都 610065; 2. 西华师范大学电子信息工程学院, 南充 637002)

摘要: 微波加热作为一种新型、高效的加热方法,在化学催化及材料处理等方面有着巨大的优势,但是微波加热的非均匀性限制了其在化工等行业中的大规模应用. 本文设计了一种可移动金属壁的微波加热多模腔. 在加热过程中,通过单向移动微波多模腔的金属壁,实现腔体内电场分布的不断改变,从而达到提高加热均匀性的目的. 在仿真计算中,通过使用移动网格方法实现了整个加热过程的模拟计算. 通过与离散位置的电场值和端口反射系数比较,验证了计算方法的准确性. 通过比较被加热物质的温度变异系数(COV),可以看出移动金属壁的微波多模腔的加热均匀性相对于固定尺寸的多模腔的提高了近18%~38%. 同时,本文分析了不同金属壁移动方式对加热效果的影响,提出可根据材料的属性和要求,计算选择理想的金属壁移动方式,获得更优的处理结果.

关键词: 微波加热; 边界条件; 移动网格; 移动金属壁; 加热均匀性; 加热效率

中图分类号: TN99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)01-0081-08

Study on the influence of metal boundary movement on the heating of microwave multimode cavity

YE Jing-Hua¹, YU Yu-Tian¹, HONG Tao², ZHU Hua-Cheng¹, HUANG Ka-Ma¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China

2. College of Electronical Information Engineering, China West Normal University, Nanchong 637002, China)

Abstract: As a new and efficient heating method, microwave heating has a great advantage in chemical catalysis and material processing. However, the non-uniformity of microwave heating has limited its application in the chemical industry. A multi-mode microwave cavity with a moving metal wall is designed in this paper. In the heating process, the electric field distribution of the cavity is constantly changing by moving the metal wall of the cavity, thereby achieving the purpose of improving the heating uniformity. In the simulation, by using the moving mesh method, the simulation of the whole heating process can be realized by a continuous algorithm. The accuracy of the algorithm is verified by comparing with the electric field distribution of the cavity and reflection coefficient of the port with that of the discrete position. By comparing the temperature coefficient of variation (COV) of the heated material, it can be considered that the heating uniformity of the microwave multimode cavity with a moving metal wall is increased by 18%~38% compared to that of the fixed size multimode cavity. Meanwhile, we analyzed the effect of different metal wall movement modes on the heating effect, and concluded that one can choose the metal wall movement mode according to the properties of the material and other requirements.

收稿日期: 2016-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61501311, 61601312)

作者简介: 叶菁华(1991-), 男, 博士生, 研究方向为微波能应用. E-mail: yjhsu@126.com

通讯作者: 朱铎丞. E-mail: hczyu@scu.edu.cn

Keywords: Microwave heating; Boundary condition; Moving mesh; Moving metal wall; Heating uniformity; Heating efficiency

1 引言

近年来,微波加热作为一种内部加热的方法,相比于传统方法,有直接与被加热物料作用的“体加热”特点,具有高效、快速和易控等优势^[1].因此,微波已经被广泛应用到了化学工程与食品工程等领域^[2-3].然而,微波加热也存在着一些不可忽视的缺点,其中最为严重的是微波加热的不均匀性.微波加热的不均匀来源于电磁场分布的不均匀和被加热物质介电常数的差异.一般来说,微波多模腔内的总会存在电磁场较强的区域和电磁场较弱的区域,当被加热物体的一部分位于电磁场较强的区域,另一部分位于电磁场较弱的区域时,就会造成加热的不均匀.而加热的不均匀,轻则会影响产品质量,重则会造成局部温度过高,甚至烧毁被加热物质和微波器件.因此,微波加热的不均匀性影响了微波在工业中的进一步应用,如何改善微波加热的不均匀性也成了人们关注的热点.

目前,国内外的学者已经提出了很多提高微波加热均匀性的方法.在 1999 年,Bows 等通过在加热过程中改变输入微波的频率和相位,有效地提高了微波加热的均匀性^[4,5].在 2007 年,Pedre ño-Molina 等通过优化被加热物质在腔体内的位置从而实现了更均匀的加热^[6].Geedipalli 等仿真计算了被加热物质在微波炉转盘上旋转加热的过程,并通过量化加热的均匀性发现微波炉转盘可以提高样品温度均匀性^[7].在 2016 年,廖胤鸿等则通过移动波导的滑动短路面,改变加热过程中被加热物质所处的微波相位位置,从而提高了加热均匀性^[8].还有一些学者通过在腔体内加入模式搅拌器改变腔体内的微波能量分布,达到提高加热均匀性的目的^[9,10].

然而,通过移动微波多模腔的金属边界来提高加热均匀性和加热效率的研究尚未见报道.由于固定尺寸的矩形腔体各面为金属壁,微波在面上发生全反射,从而微波经过反射后在腔体内形成谐振,造成各个点电场分布不同,导致了加热不均匀现象,且不随时间变化.但是,如果在加热过程中移动微波多模腔的金属边界,可能使得被加热物质吸收到的能量分布发生剧烈变化,从而提高加热均匀性.此方法不同于移动波导的短路面,因为微波多

模腔里的微波模式相比于波导复杂得多,移动波导短路面的话,波导内的微波模式并不会改变,但是如果移动微波多模腔的金属边界,微波多模腔体内的微波模式可能会发生剧烈的变化,导致移动微波多模腔金属边界的加热过程相比于移动波导短路面的复杂的多.鉴于在实际应用中的微波腔体一般都是多模腔,所以研究移动微波多模腔金属边界的加热过程对提高微波加热的均匀性有着积极的意义.同时,使用移动网格对微波多模腔金属边界的加热过程进行仿真,也对仿真计算带有运动单元的加热过程有指导意义.

本文通过使用一个基于移动网格的连续算法仿真了移动微波多模腔金属边界的加热过程,并通过与离散位置的电场值和端口反射系数比较,验证了本算法的准确性.此外,本文还优化了使用移动网格需要的一些参数,使其计算效率和准确度都满足合理的要求.通过比较被加热物质的温度变异系数(COV)和有效加热体积比,分析了移动金属壁的微波多模腔的加热均匀性.同时,本文对加热效率也进行了定量的分析.最后,本文分析了不同金属壁移动方式对加热效果的影响.

2 模型建立

2.1 几何模型

图 1 所示的模型结构图是本文进行仿真计算的模型,其矩形微波炉腔体的初始尺寸为 260 mm × 250 mm × 180 mm,金属壁的运动方向是 x 方向,运动的速度恒定为 10 mm/s,运动范围为 0 ~ 50 mm.一个长方体的被加热的介质模型被悬挂在腔体的中心位置,本文使用土豆作为被加热的介质,尺寸为 50 mm × 50 mm × 10 mm.其余部分填充的是空气.模型中使用矩形波导对微波炉进行馈波,其横截面尺寸为 86.4 mm × 43.2 mm,位于腔体正面的中心.端口激励源的模式为 TE_{10} 模、频率为 2.45 GHz、功率为 700 W.

2.2 控制方程

微波炉腔体内的电磁能量分布是由电磁场波动方程控制^[11]

$$\nabla \times \mu_r^{-1} \times (\nabla \times \vec{E}) - k_0^2 (\epsilon_0 \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega_0}) \vec{E} = 0 \quad (1)$$

其中, E 是电场; ϵ_0 是真空介电常数; ϵ_r 是介质的

相对介电常数; μ_r 是磁导率; ω_0 是角频率; k_0 在真空的波数; σ 是电导率. 在电磁波穿越一个有耗介质的时候, 部分电磁能会转化为介质内的热能. 转化为热能的电磁能与介质损耗因子和电场强度的平方成正比^[12].

$$P_d = \frac{1}{2} \omega_0 \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2)$$

耗散功率项用作瞬态热传导的热源, 计算介质每一时刻的温度场分布^[12]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P_d \quad (3)$$

其中, ρ 是介质的密度; C_p 是介质的常压热容; k 为介质的导热系数.

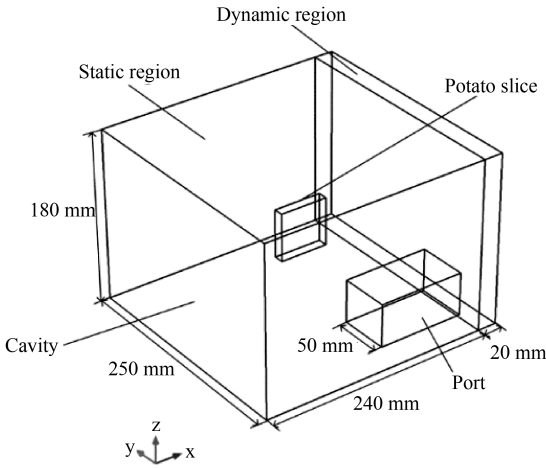


图 1 用于多物理场计算的模型
Fig. 1 Geometry used in the model

2.3 初始值和边界条件

金属波导和腔壁被认为是完美的电导体, 使用以下边界条件:

$$E_{\text{tangential}} = 0 \quad (4)$$

在这个模型中, 土豆片和空气之间的热边界条件设定为对流换热边界, 可表示为

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = h \cdot (T_{\text{air}} - T) \quad (5)$$

其中, $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度场沿边界法线方向的热梯度; T_{air} 为外部空气的温度; h 为传热系数; h 被设为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$, 这是一个典型的用于空气自然对流换热的值^[13]. 微波炉内的空气和土豆的初始温度均为 20 C .

2.4 材料参数

该模型的输入参数列在表 1 中. 在本文中所用的热参数和介电常数来自于文献[6, 12]. 土豆和空气的电导率都设为 $0 \text{ s}/\text{m}$, 相对磁导率都为 1.

表 1 模型的输入参数

Tab. 1 Input parameters used in the simulations

属性	值	单位
空气的相对介电常数	1	
土豆相对介电常数	50~15 j	
导热系数	0.648	W/(m·k)
密度	1067	kg/m ³
常压热容	3630	J/(kg·k)

2.5 计算方法

为了仿真这个加热过程, 我们采用了一种基于移动网格的连续算法. 在本文采用的商业软件 COMSOL Multiphysics (4. 3a, COMSOL Inc., Stockholm, Sweden) 中, 有两个主要的坐标系统, 分别由空间框架和材料框架描述. 空间框架通常是固定的欧氏坐标系统, 其空间坐标表示为 (x, y) . 而材料框架则是一个跟随材料实际变化状态的坐标系, 其坐标可表示为 (X, Y) . 当模型中没有使用移动网格时, 空间框架和材料框架是相互重合的, 如图 2(a) 所示. 当模型中定义了网格变形之后, 其空间框架和材料框架不再重合, 如图 2(b) 所示. 同时, 网格在材料框架里的坐标保持不变, 但其在空间框架中的坐标发生了变化^[14].

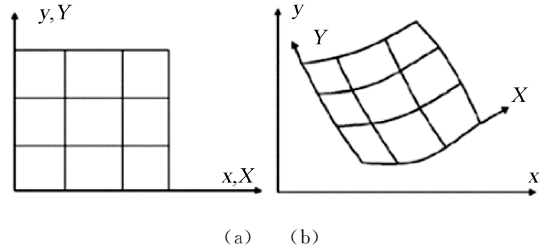


图 2 (a) 一个未变形的网格, 其中空间框架坐标 (x, y) 和材料框架坐标 (X, Y) 一致. (b) 定义了网格的变形之后, 其材料框架跟随着实际变形而变化, 而空间框架保持不变.

Fig. 2 (a) an undeformed grid, in which the space frame coordinates (x, y) and the material frame coordinates (X, Y) are consistent. (b) After the deformation of the mesh is defined, the frame of the material changes with the actual deformation, while the space frame remains unchanged.

为了提高计算效率和减少计算资源, 我们将整个模型分为静态区域和动态区域两部分, 如图 1 所示. 静态区域在计算过程中定义为固定网格, 而动态区域定义为自由变形网格. 在计算中, 腔体在动态区域的边界设置为沿 x 轴正方向做匀速直线运动, 速度为 $10 \text{ mm}/\text{s}$. 相关的网格随着移动而拉伸, 但网格数不变, 同时静态区域的网格保持不变, 如

图 3 所示。

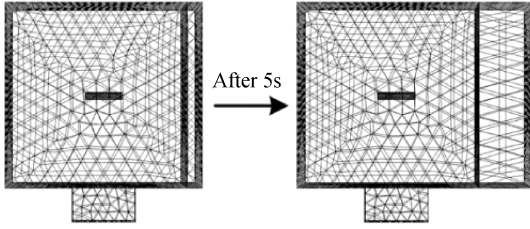


图 3 网格形变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mesh deformation

2.6 网格设置

由图 3 可以看到,在计算过程中动态区域的网格在不断拉伸,其网格的质量也在逐渐下降,当网格拉伸幅度大于一定的程度时,计算的结果可能会出现巨大的误差.因此,动态区域的网格需要进行加密.在本文中,加热时间为 5 s,网格拉伸幅度为 50 mm,所需的网格数通过计算腔体内样品的归一化功率吸收率来确定.图 4 给出了动态区域网格尺寸与其所对应样品的功率吸收率的关系.由图 4 可以看出,当动态区域的网格尺寸小于 22 mm 时,样品的归一化功率吸收率稳定在 0.642~0.644 之间.因此在考虑了计算效率的情况下,静态部分的空气域和土豆域网格尺寸分别设为 20 mm 和 3.5 mm,动态区域的网格尺寸设为 20 mm.

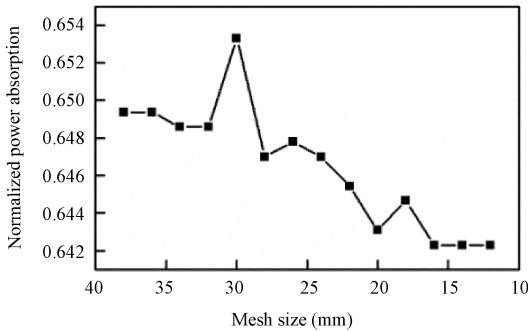


图 4 动态区域网格尺寸与其所对应土豆的归一化功率吸收率的关系

Fig. 4 The relationship between the mesh size of the dynamic region and the corresponding normalized power absorption rate of the potato

2.7 求解设置

本文使用 COMSOL Multiphysics 软件进行计算,求解使用频率-瞬态方式,计算中采用全耦合直接求解器的计算方式,计算时间步长由求解器根据相对容差(0.01)自动确定.计算平台中央处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-4790K CPU @ 4.00 GHz, 4 cores,内存为 32 G,操作系统为 WIN10.

3 结果与讨论

3.1 模型验证

为了验证本模型的正确性,我们将本文计算出的电场和端口反射系数与用离散位置的计算结果进行比较.图 5 给出了本文的方法计算出的土豆 $x-x$ 平面上表面在加热 0 s, 2.5 s 和 5 s 时电场分布及其对应的离散位置(也就是微波腔体 x 方向长为 260 mm, 285 mm 和 310 mm 时)计算出的电场分布.由于本文采用的是连续算法,时间步长是求解器根据相对容差自动确定.因此在计算过程中可能会没有计算到某一个时间点对应的离散位置的电场分布,而结果显示出的电场分布是由与该时间点相邻两个时间点对应的离散位置的电场分布插值得.另一方面,如前面提到的,在计算过程中网格的拉伸会降低网格的质量,其降低幅度与腔体的结构有关,在某个特定时间点,某个位置的网格质量可能会变得很小,这将会给计算结果带来较大的误差.综合以上两个原因,本方法结果显示出的某时间点的电场分布可能会与这个时间点对应的离散位置电场分布有较大的误差,如图 5 中加热 2.5 s 时的电场分布所示.不过,因为计算过程的时间步满足了相对容差的要求,即使没有计算到某一个时间点的电场分布,对整个加热过程计算的影响也是比较小的.总的来说,在图 5 中本文计算出来的电场与离散位置计算的结果吻合的较好.

图 6 给出了本文的方法计算出来的端口反射系数及其对应的离散位置计算出的端口反射系数.图 6 表明,两者有良好的一致性,其平均误差也小于 5%,这进一步证明了本文的算法可以有效地计算三维移动金属壁的微波加热过程.图 6 中出现的误差可能也是主要来自于时间步的不匹配和网格质量的降低.但是,如前面所说,在计算过程的时间步满足了相对容差的要求的情况下,即使没有计算到某一个时间点对应的端口反射系数,其对整个加热过程计算的影响也是比较小的.

3.2 加热过程中电场和耗散功率的变化

由于在加热过程中,微波腔体的金属壁在不断移动,所以腔体的电场的分布也随着时间不断变化,从而也使样品的电磁场耗散功率分布随时间变化.图 7 和图 8 分别给出了在加热 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s 和 5 s 时,腔体内中心水平截面的电场分布和样品的电磁场耗散功率分布.从中我们可以看出在加热过程中强电场和弱电场的位置不再固定,

某时刻强电场的位置在下一个时刻很可能会变成弱电场的位置;样品的电磁场耗散功率分布也不再只有一种固定的模式.因此,在这种变化电磁场的加热条件下,相比于使用固定腔体尺寸的加热方式,样品的温度均匀性将会得到大大的提高.特别地,如果某腔体是要用于加热不同的材料时,即使

针对某一材料某一摆放位置可以优化出加热均匀性最好的腔体尺寸,其也难以适用于其他材料.但是,如果采用移动金属壁加热的话,无论加热的是什么材料,因为腔体内的电场分布一直处于变化的状态,所以由电场分布不均匀造成的加热不均匀性将会大大减少.

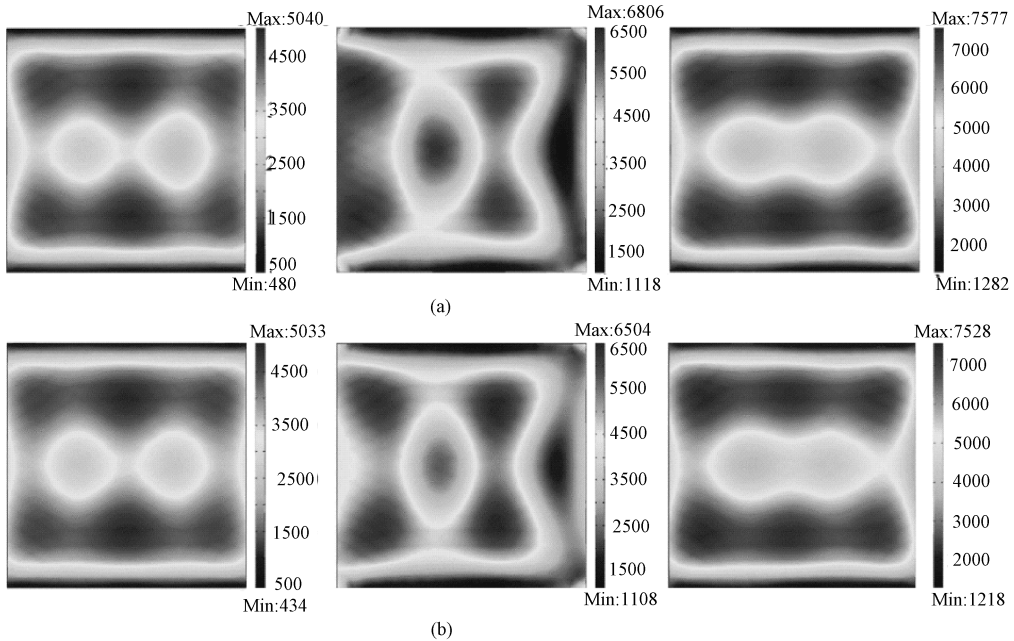


图 5 加热 0 s, 2.5 s 和 5 s 时土豆 $z-x$ 平面上表面电场分布: (a) 离散位置的计算结果; (b) 本文方法的计算结果.

Fig. 5 The electric field distribution of the potato surface in $z-x$ plane at heating time of 0 s, 2.5 s, and 5 s; (a) Calculated from discrete locations; (b) Calculated by the proposed method.

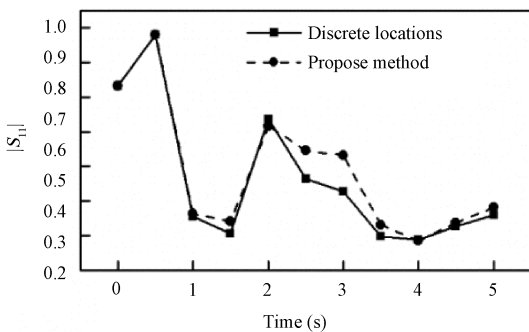


图 6 本文方法和离散位置计算所得的端口反射系数
Fig. 6 $|S_{11}|$ calculated by the proposed method and discrete locations

3.3 加热均匀性分析

目前,人们一般采用温度的变异系数(COV)来衡量温度的不均匀性,其计算方法为用样品各个位置的温升的标准差除以各个位置温升的平均值^[6].图 9 给出了腔体 x 方向长度为 260 mm, 270 mm, 280 mm, 290 mm, 300 mm 和 310 mm 的固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后温升的

COV 值.为了更好的描述加热均匀性,我们也采用了有效加热体积作为评价工具,其如下式定义^[15]:

$$V_{eff} = \{V | T_{(x,y,z)} \geq T_{av}\} \quad (6)$$

其中, T_{av} 表示样品的平均温升值.而有效加热体积比率(R_{eff})则是定义为有效加热体积与样品体积的比值,有效加热体积比率越大,意味着样品被加热的越均匀.图 10 给出了腔体 x 方向长度为 260 mm, 270 mm, 280 mm, 290 mm, 300 mm 和 310 mm 的固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后有效加热体积分布图及其对应的有效加热体积比率.从图 9 我们可以看出,采用移动金属壁加热的均匀性始终要比固定尺寸的加热均匀性要好,其提高幅度最大可达 38%,最小也有 18%.图 10 说明了固定尺寸的有效加热体积总体偏小,而且一般都是集中在在表面或者样品的边缘,而移动金属壁的有效加热体积则要比固定尺寸的大 12%~17%,并且移动金属壁的有效加热位置分布的相对更加均匀,这进一步证明了移动金属壁可以提高加热的均匀性.

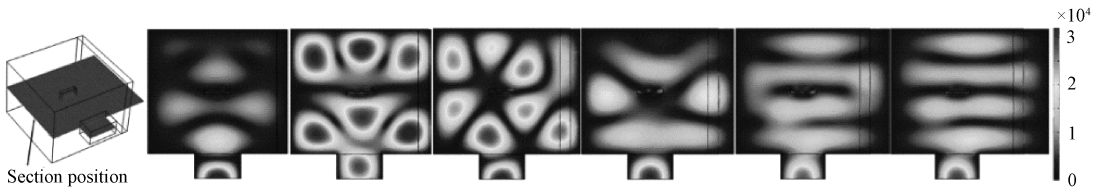


图 7 加热 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s 和 5 s 时腔体内中心水平截面的电场分布(单位:V/m)

Fig. 7 Electric field distribution of the central horizontal section in the cavity at heating time of 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, and 5 s (Unit: V/m)

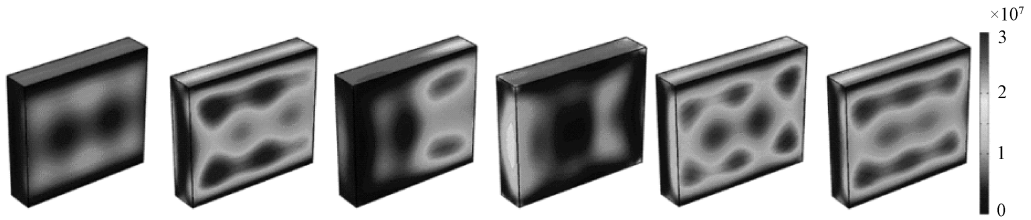


图 8 加热 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s 和 5 s 时样品的电磁场耗散功率分布(单位:W/m³)

Fig. 8 Dissipation power distribution of potato at heating time of 0 s, 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, and 5 s (Unit: W/m³)

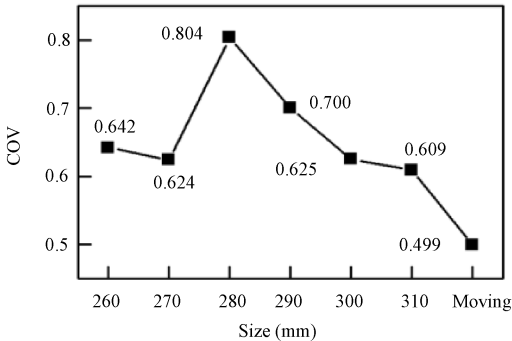


图 9 固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后土豆温升的 COV 值

Fig. 9 COV of the potato temperature rise after heating for 5 s with fixed cavity size or moving metal wall

3.4 加热效率分析

表 2 列出了腔体 x 方向长度为 260 mm, 270 mm, 280 mm, 290 mm, 300 mm 和 310 mm 的固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后样品的平均温升和归一化功率吸收率. 由表 2 我们可以看出, 使用移动金属壁加热的效率并不是最好的, 甚至比最大的固定尺寸加热效率低了 24%. 但是这里只是对一种材料、一种样品摆放位置的加热效率, 如果我们盲目地采用一种优化好的固定尺寸腔体对其他材料或者改变了位置的同种材料进行加热, 有可能出现微波反射很大, 加热效率很低的情况, 如表 2 中的腔体 x 方向长度为 260 mm、280 mm 时那样. 此时, 过大的反射能量甚至会损坏微

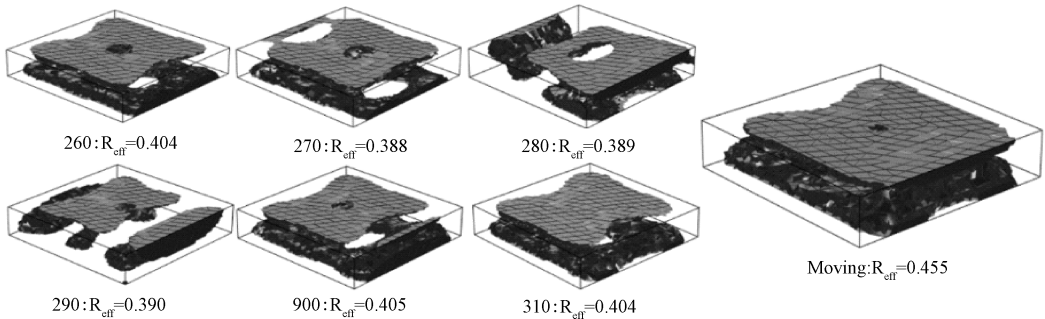


图 10 固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后土豆的有效加热体积分布图及其对应的有效加热体积比率

Fig. 10 Effective heating volume distribution and the corresponding effective heating volume ratio of the potato after heating for 5 s with fixed cavity size or moving metal wall

波源,造成财产损失.而另一方面,采用移动金属壁加热,则不会出现针对一种材料一种摆放位置,只有一种固定的反射系数和能量吸收率的情况,而且根据实验操作前的仿真计算,我们可以灵活地改变金属壁的移动范围和速度,获得较好的加热均匀性和合理的加热效率.这将会大大提高腔体的适用范围并且可以更好地保护微波器件,有利于实验安全.

表 2 固定尺寸加热与采用移动金属壁加热 5 s 后土豆的平均温升和归一化功率吸收率

Tab. 2 Mean temperature rise and normalized power absorption of the potato after heating for 5 s with fixed cavity size or moving metal wall

加热方式	平均温升(°C)	归一化功率吸收率
260 mm	11.310	0.308
270 mm	29.130	0.793
280 mm	16.870	0.459
290 mm	26.540	0.723
300 mm	31.210	0.850
310 mm	28.980	0.816
Moving	23.640	0.643

3.5 金属壁移动方式对加热效果的影响

在之前的计算中,腔体的金属壁是以恒定的速度移动的,其实在实际操作中,金属壁还可以根据实际需求采用合适的移动方式.例如,从图 6 可以看到,在加热 0~1 s 之间时,端口反射系数很大,这不利于微波能量的使用,而在 1~2 s 和 3~5 s 之间时,端口反射系数比较小,微波能量得以有效的馈入.因此,加长金属壁在这些距离段的停留时间,并减少或者直接去除金属壁在反射系数大的距离段的停留时间将会有效地提高微波能量的使用效率.要实现这个目标,金属壁可以采用变速运动或者“走走停停”的移动方式.如果所设计腔体金属壁的移动范围不大,金属壁还可以采用迂回运动的移动方式,以实现较好的加热均匀性.在本文中,为了演示这个效果,对于 5 s 的加热,金属壁采用了三种移动方式:(1)金属壁在腔体 x 方向长度为 270~280 mm 之间速度为 5 mm/s,在 280~290 mm 之间速度为 20 mm/s,在 290~310 mm 之间的速度为 8 mm/s;(2)金属壁在 270 mm 处停留加热 1 s,然后以 10 mm/s 的速度移动到 300 mm 处,在此停留加热 1 s.(3)金属壁以 16 mm/s 的速度从 270 mm 移动到 310 mm,再以 16 mm/s 的速度从 310 mm 移动到 270 mm 处.这三种加热方式所得的平均温升、归一化功率吸收率、温升 COV 和

有效加热体积比率 R_{eff} 列在表 3 中.从表 3 可以看出,金属壁采用了这些不同的移动方式后,加热效率相对于采用匀速运动的情况有所提高,加热均匀性也与采用匀速运动的情况基本持平,个别方式的加热均匀性还有少量的提升.因此,在实际的操作中,对一个现成的带移动金属壁的腔体结构,人们可以根据样品的属性、摆放位置和自身的要求优化选择最佳的金属壁移动方式,而不需要因为被加热介质的更换而更换腔体的结构,这将会大大地节省腔体设计和生产的资源.

表 3 采用不同的金属壁移动方式加热 5 s 后土豆的平均温升和归一化功率吸收率

Tab. 3 Mean temperature rise and normalized power absorption of the potato after heating for 5 s with different types of metal wall movement

移动方式	平均温升(°C)	归一化功率吸收率	温升 COV	有效加热体积比率 R_{eff}
方式 1	28.230	0.789	0.499	0.449
方式 2	27.530	0.750	0.487	0.457
方式 3	27.288	0.743	0.525	0.452

4 结 论

(1) 本文设计了带有可移动金属壁的微波多模腔,使用了一个基于移动网格方法的连续的算法实现对这个加热过程的仿真计算,并将计算结果与离散位置的结果进行了对比,两者吻合良好,验证了算法的有效性.

(2) 本文通过比较被加热物质的体温度变异系数(COV),可以认为移动金属壁的微波多模腔的加热均匀性相对于固定尺寸的多模腔的在加热 5 s 之后提高了近 18%~38%;移动金属壁的微波多模腔的有效加热体积比也较固定尺寸多模腔的大,证明了金属壁的移动可以有效地提高微波多模腔加热的均匀性.

(3) 本文分析了不同金属壁移动方式对加热效果的影响.结果表明,对于一个现成的带移动金属壁的腔体结构,人们可以根据实际需要,选择最佳的金属壁移动方式.而不需要因为被加热介质的更换同时更换腔体的结构,这将会大大地提高腔体结构的适用性.

本文将对微波在工业生产和实验研究中的腔体设计有指导作用.

参考文献:

[1] 肖光念,朱铎丞,杨阳,等.冰冻程度对微波加热

- 的影响研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2016, 53: 809.
- [2] 朱铎丞, 兰俊卿, 吴丽, 等. 微波辅助生物柴油生产的一体化计算[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2015, 52: 1285.
- [3] 唐正明, 黄卡玛. 多模微波加热腔电场刷变条件研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2016, 53: 1273.
- [4] Bows J R. Variable frequency microwave heating of food [J]. J Microw Power E E, 1999, 34: 227.
- [5] Bows J R, Patrick M L, Janes R, *et al.* Microwave phase control heating [J]. Int J Food Sci Technol, 1999, 34: 295.
- [6] Pedre ño-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 C E, 2007, 17: 142.
- [7] Geedipalli S S R, Rakesh V, Datta A K. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens [J]. J Food Eng, 2007, 82: 359.
- [8] Liao Y, Lan J, Zhang C, *et al.* A phase-shifting method for improving the heating uniformity of microwave processing materials [J]. Mater, 2016, 9: 309.
- [9] Sebera V, Nasswetrová A, Nikl K. Finite element analysis of mode stirrer impact on electric field uniformity in a microwave applicator [J]. Dry Technol, 2012, 30: 1388.
- [10] Plaza-González P, Monzó-Cabrera J, Catalá-Civera J M, *et al.* Effect of mode-stirrer configurations on dielectric heating performance in multimode microwave applicators [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2005, 53: 1699.
- [11] 陈方园, 陈星. 一种新型微波加热腔体多物理场耦合分析[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2016, 53: 1053.
- [12] Pandit R B, Prasad S. Finite element analysis of microwave heating of potato-transient temperature profiles [J]. J Food Eng, 2003, 60: 193.
- [13] Pitchai K, Chen J, Birla S, *et al.* A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: development and validation [J]. J Food Eng, 2014, 128: 60.
- [14] COMSOL. COMSOL multiphysics user's guide, version: 4.3a [R]. CM020002. Stockholm: COMSOL, 2012.
- [15] Liao Y H, Zhu H C, Huang K M. Fast algorithm for electromagnetic pulse heating on dispersive medium [J]. Int J Appl Electrom, 2016, 50: 275.