

文章编号: 2095-4980(2018)02-0302-05

## 微波加热效应的多物理场仿真与实验

郑亚琪, 陈 星

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘 要:** 微波对物质的加热涉及电磁、热、加热物的物理参数随温度变化等多种物理过程的综合作用。研究耦合电磁场、热传导和被加热物质物理参数方程构建多物理场方程组, 数值求解获得微波加热过程的温度变化。给出多物理场算法公式和计算流程, 以2.45 GHz微波加热水为例, 多物理场仿真了该加热过程的微波功率分布、热量累积和温度上升, 设计和加工制作了微波加热实验装置。在工作频点2.45 GHz处, 测试装置的回波损耗为16.2 dB, 同时测试了输入功率40 W时4个指定点处60 s内的温升, 多物理场仿真结果与测试结果吻合良好, 验证了多物理场仿真的正确性。

**关键词:** 微波加热; 多物理场仿真; 温度; 复介电常数

**中图分类号:** TN015

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201802.0302

## Multi-physics simulation and experiment research of microwave heating

ZHENG Yaqi, CHEN Xing

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

**Abstract:** Microwave heating involves multi-physical effects such as the electromagnetic, thermal, physical parameters of heating objectives varying with the temperature. The multi-physics simulation, which couples with the electromagnetic field, heat conduction and material physical parameter equations to construct a multi-physics equation, and numerically solves the equation to analyze the temperature variation in the microwave heating procedure. Taking 2.45 GHz microwave power heating water as an example, the multi-physics simulation is conducted to get the microwave power distribution, heat accumulation and temperature rise during the heating process. Moreover, an experiment equipment of microwave heating water is designed and manufactured. In the working frequency of 2.45 GHz, the testing return loss is 16.2 dB. The input power is set to 40 W and the temperature rises are tested at 4 designed points within 60 seconds of heating time. A good agreement is shown between the multi-physics simulation results and the measurement results, which validates the proposed multi-physics simulation.

**Keywords:** microwave heating; multi-physics simulation; temperature; complex permittivity

微波是指频率为 300 MHz~300 GHz 范围内的电磁波, 是一种高效清洁能源, 具有加热速度快、选择性加热、加热易于控制等优点<sup>[1]</sup>。1974 年 Hessek 把微波加热用于干燥样品, 此后微波加热的应用日益广泛<sup>[2]</sup>, 例如食品<sup>[3]</sup>、木材、橡胶、医药<sup>[4]</sup>、烟草行业等。

微波加热作为一种新型的加热方式, 国际上的学者对其研究也一直保持着浓厚的兴趣, 而多物理场仿真计算作为研究微波加热最直接有效的工具, 其重要性不言而喻。微波加热涉及电磁、热、被加热物质的物理参数随温度变化等多种物理过程综合作用, 因此对微波加热的仿真计算必须采用耦合和求解电磁场、热力学、被加热物质物理参数方程的多物理场仿真, 这迄今是一类复杂和困难的仿真计算, 确保多物理场计算的正确性是后续实验研究的必要保障。

本文介绍了微波加热的多物理场仿真算法公式和计算流程。以微波加热水为例, 多物理场仿真了该加热过程的微波功率分布、热量累积和温度上升, 并开展微波加热实验测试, 通过多物理场仿真和实验数据对比分析, 验证多物理场仿真的正确性。

### 1 微波加热多物理场仿真算法

#### 1.1 微波加热多物理场仿真算法公式和计算流程

在加热过程中, 电磁场和热场的计算<sup>[5-6]</sup>可由方程(1)和方程(2)给出, 方程(3)则描述微波能量耗散产生热。

$$\nabla \times \mu^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \tag{1}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \nabla^2 T + P \tag{2}$$

$$P = \sigma |\mathbf{E}|^2 = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\mathbf{E}|^2 \tag{3}$$

式中:  $k_0$  为自由空间波数;  $\epsilon_r, \mu, \sigma, \rho, K, C_p$  分别为被加热物质的相对介电常数、磁导率、电导率、质量密度、热传导系数和热容量;  $\epsilon''$  代表介电常数的虚部;  $\mathbf{E}$  为电磁场强度。

微波加热仿真首先采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain Method, FDTD), 有限元(Finite Element Method, FEM)等电磁场全波算法计算得到微波能量分布, 由此求解出该时间步内的微波能量耗散, 再由热传导方程计算出温度上升。在仿真迭代计算中, 随着时间推移, 不断更新物质属性参数, 然后不断重复电磁场和温度分布的计算, 直到微波加热过程结束。计算流程如图 1 所示。

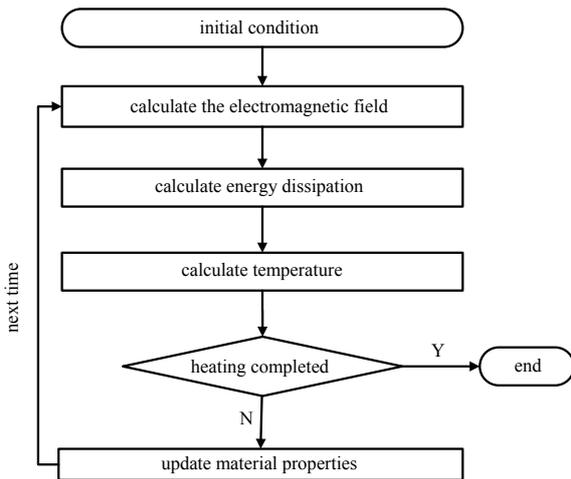


Fig.1 Flow chart of microwave heating  
图 1 微波加热的多物理场仿真流程图

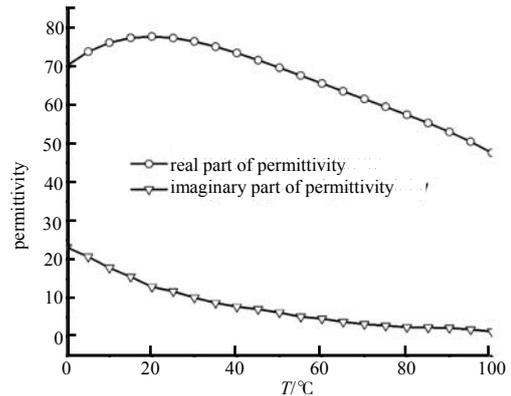


Fig.2 Complex permittivity of water shown as a function of temperature at 2.45 GHz  
图 2 2.45 GHz 频率下水复介电常数随温度的变化曲线

#### 1.2 物质介电常数随温度变化规律

对于微波作用下物质的介电常数随温度变化的预测, 一个比较公认的理论是 Debye 模型理论<sup>[7-9]</sup>, 其计算公式如下:

$$\epsilon(f, T) = \epsilon'(T) - j\epsilon''(T) = \epsilon_\infty(T) + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \tag{4}$$

式中:  $\epsilon_s$  指物质静电场中的介电常数;  $\epsilon_\infty$  指光频下的介电常数;  $\epsilon', \omega, \tau$  则分别代表介电常数的实部、角频率及弛豫时间。可以看到, 物质的复介电常数  $\epsilon(f, T)$  由工作频率  $f (f=2\pi\omega)$  及物质的温度  $T$  决定。

下面以水为例, 用 Debye 模型理论计算水的复介电常数随温度变化的规律, 通过查阅资料可以得到描述水的介电特性的各个参数值, 再由式(4)计算得到在 2.45 GHz 频率下水的复介电常数随温度变化曲线, 如图 2 所示。

#### 1.3 仿真计算的边界条件和初始条件

考虑到实验测试时的室温, 多物理场计算时设置水及周围环境的初始温度均为 17 °C。将水的各个表面都设置为热传导边界<sup>[10]</sup>, 水和周围环境的热传输系数为 20 W/m<sup>2</sup>·K。整个腔体的外表面都设置为理想电导体, 并且设置辐射器的输入功率为 40 W。

## 2 微波加热实验验证

### 2.1 实验装置设计

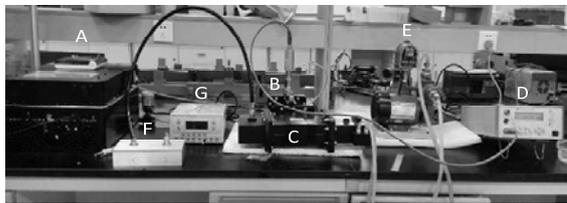
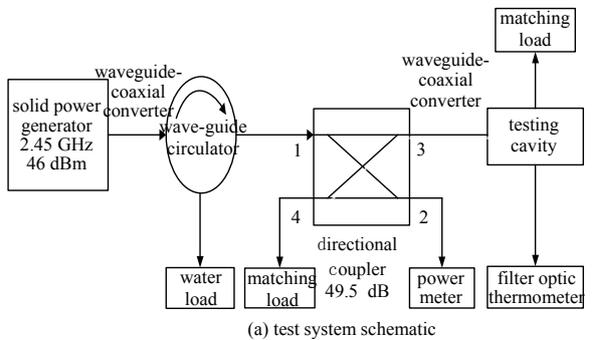
本次实验选取的加热物质为去离子水。设计的微波加热实验装置如图 3 所示。被加热的水放置于尺寸为  $98\text{ mm} \times 194\text{ mm} \times 37\text{ mm}$  金属腔体中心位置的介质盒中。为方便温度测量，加热物质水用厚度为  $2\text{ mm}$ 、相对介电常数  $2.65$  的聚四氟乙烯介质板分隔为 4 部分。

在金属腔上盖安装了 2 个 N 型接头用于馈入微波能量，并在上盖上开了 4 个圆孔，用于插入光纤温度计探头(如图 4 所示)，测量微波加热过程中水温度变化。上述 4 个圆孔设计为  $2.45\text{ GHz}$  频率下的截止波导，不会造成微波能量的泄漏。另外，选取模型中左边第一部分装水介质盒的中间截面 A(如图 3 所示)，并计算该截面上的微波功率分布情况。

### 2.2 测试系统介绍

实验测试主要分为散射参数的测试和温度测试，散射参数的测试使用的是二端口矢量网络分析仪，温度测试用的是实验室搭建的系统，温度测试系统具体的组件及实物图如图 5 所示。

在图 5(a)中，“1”为耦合器的输入端口、“2”为耦合端口、“3”为传输端口、“4”为隔离端口；图 5(b)中，A 是频率和功率都可调的固态微波功率源，B 是耦合度为  $49.5\text{ dB}$  的定向耦合器，C 是波导环形器，D 是功率计，E 是水负载，F 是待测的微波加热装置，G 是光纤温度计。待测装置 F 的实物图如图 6 所示。



(b) experimental setup for testing  
Fig.5 Temperature testing system  
图 5 温度测试系统

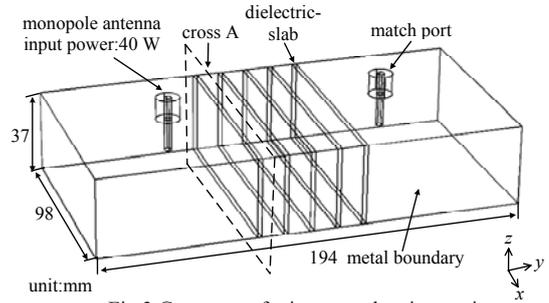


Fig.3 Geometry of microwave heating cavity  
图 3 微波加热实验装置结构图

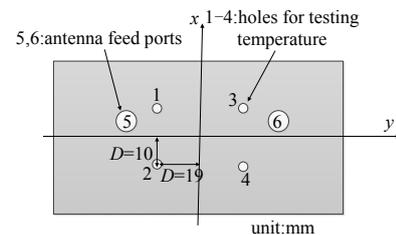
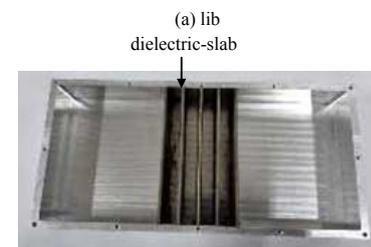
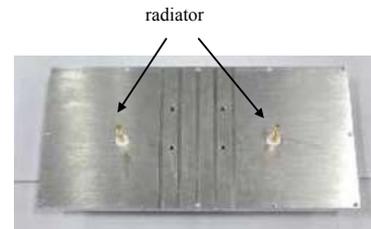


Fig.4 Positions of temperature testing holes  
图 4 温度测试开口位置



(b) inside geometry  
Fig.6 Picture of microwave heating cavity  
图 6 微波加热装置实物图

实物加工尺寸与图 3、图 4 中标注的尺寸一致，装置中加热物质水每  $10\text{ mm}$  用厚度为  $2\text{ mm}$  的介质板隔开，并通过在金属内部开凿的方式插入介质板。

## 3 多物理场仿真和测试结果对比

设置微波加热总时间为  $60\text{ s}$ ，输入功率为  $40\text{ W}$ ，多物理场计算得到加热物质水内部截面 A(具体位置如图 3 所示)上的平均微波功率分布图如图 7 所示。多物理场计算和实验测试得到馈入端  $|S_{11}|$  曲线如图 8 所示，两者吻合

良好。

同时用光纤温度计测量了 4 个介质盒(分别标记为  $P_1, P_2, P_3, P_4$ )中的水温上升曲线, 并与该 4 点处温升的多物理场计算结果进行对比, 结果如图 9 所示。

从图 9 可看到, 实验测试与多物理场仿真结果吻合较好, 最大误差小于  $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。据分析, 误差主要原因包括: 多物理场仿真没有考虑到水的对流对温度分布的影响; 光纤温度计测量探头有一定长度, 测试温度不是严格意义上的某点温度。

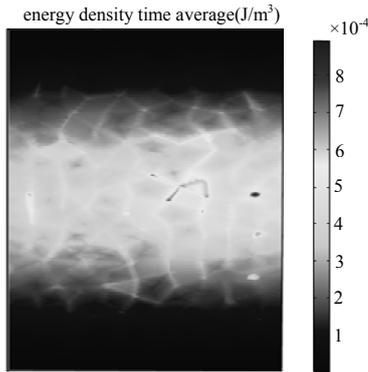


Fig.7 Energy density time average of the cross-section A  
图 7 截面 A 平均功率分布图

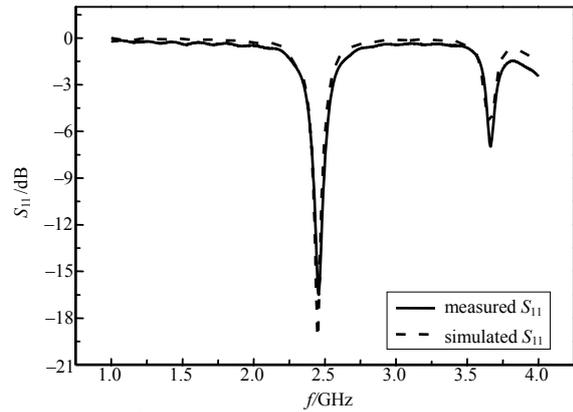


Fig.8 S parameter curves for simulation and experiment  
图 8 实测与仿真 $|S_{11}|$ 曲线对比

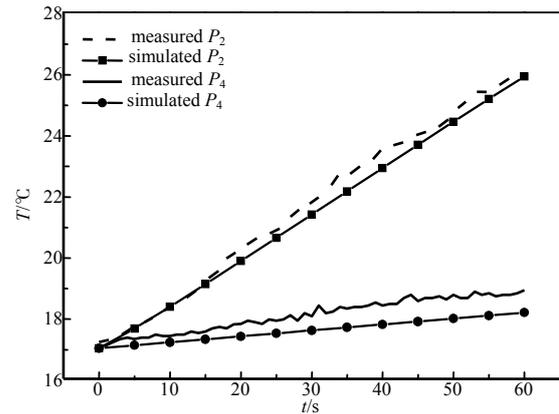
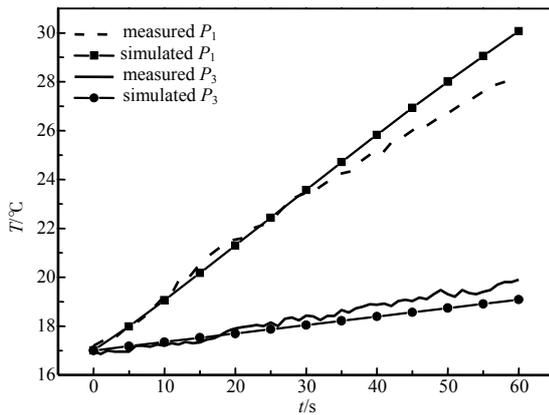


Fig.9 Temperature deviation between simulation and measurement  
图 9 实测和仿真温度变化曲线

## 4 结论

本文介绍了针对微波加热过程的多物理场仿真计算。通过耦合电磁场、热传导和被加热物质物理参数方程并数值求解, 多物理场仿真能够计算并获得微波加热过程中温度上升数据。以  $2.45\text{ GHz}$  微波加热水为例, 多物理场仿真和实验测试结果吻合良好, 验证了多物理场仿真的正确性。微波能作为一种高效和清洁能源, 多物理场仿真为其在工业生产中的广泛应用提供了高效和准确的计算和分析手段。

### 参考文献:

- [ 1 ] 孙凤坤,邢泽炳. 微波技术原理及其发展与应用[J]. 科技创新与应用, 2014(6):3-4. (SUN Fengkun,XING Zebing. The development and application of microwave technology[J]. Technology Innovation and Application, 2014(6):3-4.)
- [ 2 ] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Changjun,WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [ 3 ] CAMPANONE L A,PAOLA C A,MAASCHER R H. Modeling and simulation of microwave heating of foods under different process schedules[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012,5(2):738-749.

- [4] ROSEN A,STUCHLY M A,VANDER V A. Applications of RF microwaves in medicine[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002,50(30):963-974.
- [5] 李鹏飞,谢扩军. 微波热模型传热边界算法的改进[J]. 实验科学与技术, 2010,8(1):7-8. (LI Pengfei,XIE Kuojun. Improved algorithm of boundary of microwave-thermal model[J]. Experiment Science and Technology, 2010,8(1):7-8.)
- [6] ALPERT Y,JERBY E. Coupled thermal-electromagnetic model for microwave heating of temperature-dependent dielectric media[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002,27(2):555-562.
- [7] 张文聪,黄卡玛. 考虑磁控管不稳定性的微波德拜介质加热[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2014,51(5):983-990. (ZHANG Wencong,HUANG Kama. Microwave heating for Debye media considering instability of magnetron[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2014,51(5):983-990.)
- [8] IRELAND D,ABBOSH A. Modeling human heat at microwave frequencies using optimised Debye models and FDTD method[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013,61(4):2352-2354.
- [9] KAATZE U. Hydrogen network fluctuations and the microwave dielectric properties of liquid water[J]. Subsurface Sensing Technologies & Applications, 2000,1(4):377-391.
- [10] 李友荣,吴双应. 传热学[M]. 北京:科学出版社, 2012. (LI Yourong,WU Shuangying. Heat transfer theory[M]. Beijing: Science Press, 2012.)

#### 作者简介:



郑亚琪(1992-),女,浙江省金华市人,在读硕士研究生,主要研究方向为天线、微波加热多物理场计算.email:982860070@qq.com.

陈星(1970-),男,四川省巴中市人,博士生导师,教授,主要研究方向为天线、微波成像、全局优化、电磁场数值方法和并行计算领域.

(上接第 301 页)

- [13] DAMAJ L,BEGAUD X,LEPAGE A C. Wideband antenna with wideband harmonic suppression using non-uniform defected ground structure[C]// 2012 15th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics(ANTEM). Toulouse,France:IEEE, 2012:1-4.
- [14] RAJKUMAR R,KOMMURI K U. Study of harmonic suppression using defected ground structure for OSRR antenna[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016,58(6):1353-1358.
- [15] WU C H,PAN G P,HSU H M,et al. A 2.45 GHz planar array antenna with harmonic suppression for wireless power transmission applications[C]// 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference(WPTC). Taipei,Taiwan,China:IEEE, 2017:1-3.

#### 作者简介:



李路(1993-),女,河南省安阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为无线能量传输应用.email:13258380251@163.com.

刘一麟(1990-),男,兰州市人,在读博士研究生,主要研究方向为无线能量传输与电磁兼容.

李君(1992-),女,河南省濮阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波无线输能的工业应用.

黄卡玛(1964-),男,重庆市人,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,国家杰出青年基金获得者,973计划首席科学家,主要研究方向为微波能基础理论与创新应用.

杨阳(1983-),男,重庆市人,副教授,硕士生导师,美国Clemson University联合培养博士生,主要研究领域为微波测量、微波化学以及微波功率合成.