

四端口微波扫频加热模型的数值建模与分析

杨丰铭^{1,2}, 朱铨承^{1,2}

1. 电子信息学院, 四川大学, 四川, 成都
2. 无线能量传输教育部重点实验室, 四川, 成都

简介:传统的微波加热存在加热不均匀和加热效率低等问题, 对此本文提出了一种微波四端口扫频加热模型。通过四个端口同时馈入能量和加热过程中不断改变微波频率的方法来提高加热的均匀性和效率。微波四端口扫频加热的过程是一个电磁场与固体传热场相互耦合的过程, 通过COMSOL软件与MATLAB软件的联合调用实现了四端口微波频率时变加热模型数值分析。并通过计算NPA值确定最优网格剖分, 最终通过实验验证了仿真的准确性与可靠性。

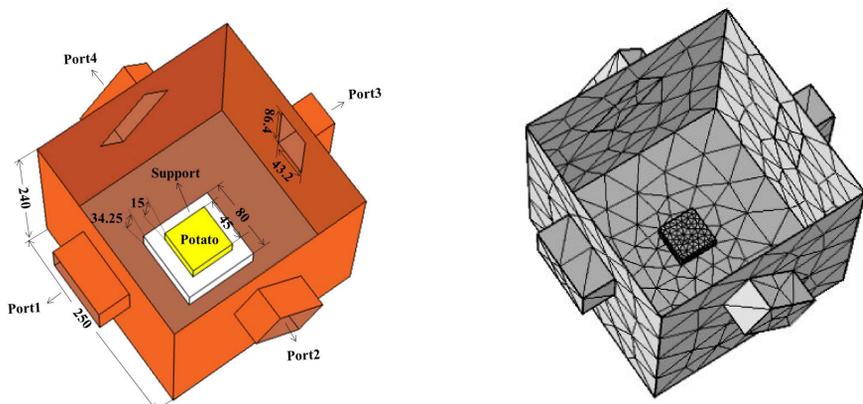


图 1. 左: 仿真建模图; 右: 网格剖分图

模型:仿真模型包括4个波导和1个多模腔, 如图1所示。微波通过尺寸为86.4mm×43.2mm的WR340波导输入, 每个端口的微波功率为100W, 扫频带宽为20MHz, 中心频率为2440MHz, 扫频间隔为10KHz, 加热时间为10S。

方法:在加热模型中, 利用电磁场和传热模块相互耦合计算。对于电磁场模块, 本文用Maxwell方程来求解腔体内电磁分布:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \end{cases} \quad (1)$$

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。电磁能量损耗由电磁损耗公式来计算:

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

式中 Q_e 为电磁能量损耗, ω 为角频率, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ'' 为介电常数虚部。而被加热物料的温度分布则由热传导公式计算获得:

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

式中 ρ 为物质的密度, C_p 为物质的常压热容, k 为物质的导热系数, T 为温度, t 为时间, Q_e 为电磁能量损耗, q 为热通量。

参考文献:

1. F.M. Yang, W.W. Wang, B. Yan, et al., "Sweep Frequency Heating based on Injection Locked Magnetron", Processes 2019, 7, 341.
2. H.C. Zhu, J.B. He, and T. Hong, "A Rotary Radiation Structure for Microwave Heating Uniformity Improvement," Applied Thermal Engineering, 2018,141,648-658.
3. W.Q. Ma, T. Hong, et al., "Simulation and Analysis of Oleic Acid Pretreatment for Microwave-Assisted Biodiesel Production," Processes, 2018, 6, 142.

仿真输入参数:由于加热过程中土豆的温度和微波的频率都在一个较小范围内变化, 因此忽略了温度和频率对土豆介电常数的影响。相关输入参数如表1。

表 3. 仿真模型输入参数

Property	Domain	Value	Unit
Relative permittivity	Air	1	--
	Potato	57-17j	--
	PTFE	2.3	--
Relative permeability	Air	1	--
	Potato	1	--
	PTFE	1	--
Conductivity	Aluminum	1	--
	Air	0	S/m
	Potato	0	S/m
	PTFE	0	S/m
Heat conductivity coefficient	Aluminum	3.774e7	S/m
	Potato	0.648	W/m-K
Density	Potato	1050	kg/m ³
Heat capacity at constant pressure	Potato	3640	J/kg-K

模型验证:使用热成像仪测量了微波四端口扫频加热实验的土豆上表面温度, 并与仿真结果进行对比。对比结果如图2。仿真与实验的土豆温升情况保持一致, 并且温度分布基本吻合。

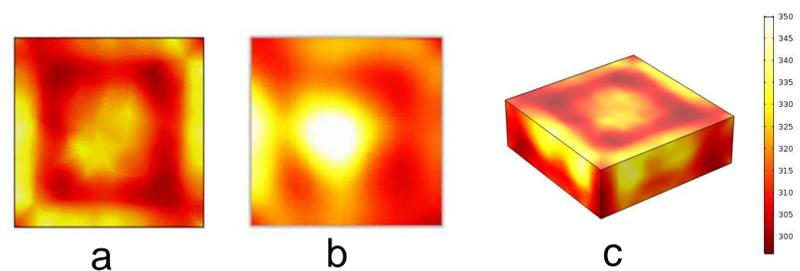


图 2. 微波加热结果对比图, a: 土豆上表面温度分布仿真结果; b: 土豆上表面温度分布实验结果; c: 土豆块温度分布仿真结果。

仿真结果:通过仿真计算了1端口对其他端口的能量传输情况, S参数如图3所示。可以看出四端口正交极化可以减少能量的相互耦合, 提高微波能量的利用率。

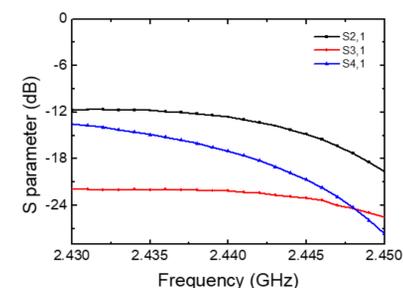


图 3. 不同频率下1端口对其他端口能量传输的S参数

仿真对比:单端口加热与四端口扫频加热的仿真结果如图4, 四端口扫频加热可以提高加热均匀性和效率。

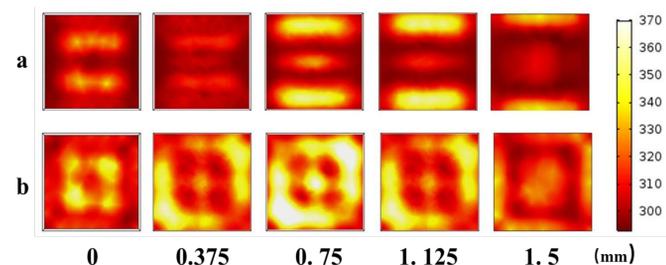


图 4. 土豆不同切面温度分布; a: 单端口加热; b: 四端口扫频加热

结论: (1) 模型仿真结果与实验结果基本一致; (2) 微波四端口扫频加热有助于提高加热均匀性和效率。