

文章编号: 2095-4980(2020)02-0255-04

一种微波辅助的气固耦合模型

单晓雯

(中国石油化工股份有限公司 青岛安全工程研究院, 山东 青岛 266071)

摘要: 针对微波辅助加热情况下气固热耦合及气固反应应用, 设计了一种利用微波加热多孔固体介质(碳化硅)来间接加热气体的气固耦合模型, 并利用有限元仿真软件进行建模。通过对电磁场、流体传热场、自由和多孔介质这3个物理场的耦合仿真, 验证了此气固耦合模型的准确性和可行性; 分析了该模型在不同石英管半径、不同多孔介质孔隙率和不同气体流速情况下的S参数和加热情况。结果表明, 当碳化硅的孔隙率为0.5, 石英管的半径为20 mm时, 微波转换效率最高, 微波能量利用率达到90%以上。

关键词: 微波加热; 多物理场计算; 气固耦合; 加热均匀性

中图分类号: TN12

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019442

A microwave-assisted gas-solid coupling model

SHAN Xiaowen

(Qingdao Research Institute of Safety Engineering, SINOPEC, Qingdao Shandong 266071, China)

Abstract: A gas-solid coupling model is designed, which uses microwave heating porous medium(silicon carbide) to heat gas indirectly, aiming for the application of gas-solid model coupling and gas-solid reaction under microwave assisted heating. Finite element simulation software is adopted to build the model. The accuracy and feasibility of the gas-solid coupling model are verified by coupling simulation of three physical fields: electromagnetic field, fluid heat transfer field, free and porous media. The results show that the microwave conversion efficiency is the highest when the porosity of silicon carbide is 0.5 and the radius of quartz tube is 20 mm, and the microwave energy efficiency is above 90%.

Keywords: microwave heating; multiphysics calculation; gas-solid coupling; heating uniformity

化学工业的生产有时需要较高的反应温度、较长的反应时间和较多的催化剂。与传统加热相比, 微波加热可以提高化学反应速率、产物质量和实现设备瞬时控制等优点^[1-2]。因此微波加热辅助已广泛用于化学工业生产。微波加热是一种与被加热物质直接作用的选择性加热方式, 但是这种加热效应在作用于极性分子时才具有好的效果。微波作用于极性分子时, 极性分子在快速变化的高频电磁场中其极性取向随着电场变化, 使得分子运动而相互摩擦产生热量。但若加热非极性分子, 其分子随高频电磁场的极性变化很小, 很难被加热^[3-5]。在化学工业生产中, 有时需要在催化剂中实现某些化学反应, 其过程需要足够的温度, 但又无法直接对反应物质进行加热。相对于传统加热来说, 微波加热不需要中间的传热介质, 气固耦合反应在微波辅助加热下可以减少副产物的生成, 加热均匀性更好且具有更快的反应速率^[6-7]。但是目前少有对微波辅助加热情况下气固反应的研究。为此提出了一种利用微波加热多孔催化剂介质来间接加热流过催化剂的气体的微波辅助气固耦合反应方法。

1 模型和方法

1.1 几何建模

仿真加热模型见图1, 电磁波从BJ22波导(109.2 mm × 54.6 mm)的一端馈入, 另一端为短路面。微波进入波导腔体后对圆柱石英管内的多孔固体介质(碳化硅)进行加热, 气体(氮气)从石英管下端口流入, 通过固体介质的孔隙以热传导的方式被加热, 然后从石英管上端口流出。

收稿日期: 2019-11-05; 修回日期: 2019-11-18

作者简介: 单晓雯(1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事有机气体治理领域的研究。email:40568478@qq.com

1.2 控制方程

该模型利用仿真软件对电磁场、流体加热、自由和多孔介质流动这 3 个物理场进行耦合计算。用 Maxwell 方程^[5-6]求解腔体内电磁分布。电磁能量损耗由电磁损耗公式来计算：

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

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； \mathbf{E} 为电场强度。非极性气体温度由固体传热方程计算^[8-9]：

$$\rho_0 C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_0 C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) \quad (2)$$

式中： ρ_0 为固体密度； k 为固体热导率； C_p 为恒定压力下的固体热容； \mathbf{u} 为流体流速； T 为温度。

多孔介质流动方程为：

$$\begin{cases} \frac{\rho_1}{\epsilon_p} \left[(\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\epsilon_p} \right] + \frac{\mu_0}{k_0} \mathbf{u} = \nabla \cdot \left\{ -p \cdot \mathbf{I} + \frac{\mu_0}{\epsilon_p} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu_0 (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} \\ \rho_1 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： ρ_1 为流体密度； k_0 为多孔介质渗透率； ϵ_p 为孔隙率； \mathbf{I} 为单位矩阵； μ_0 磁导率。由于碳化硅为多孔介质，它的孔隙率(φ)大小会对其所在区域的介电常数产生影响，所以还需要分析不同孔隙率对该模型计算的影响。等效介电常数计算方程为：

$$\epsilon^{1/3}(n) = \sum_{n=s,g} v_n \epsilon_n^{1/3}(n) \quad (4)$$

式中： ϵ 为固体材料； g 为气体材料； v_n 为体积分数，可以用孔隙率表示。

1.3 初始值和边界条件

仿真模型中，在计算电磁场分布时，金属波导和腔壁被认为是完美电导体，金属波导和腔壁上的电场为 0，满足如下方程：

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

式中 \mathbf{n} 为对应面的单位法向矢量。电磁波从 4 个端口进入腔体，故将其设置为激励端口，模式为 TE_{10} 模。仿真过程中只对被加热的物体进行固体传热分析，被加热物体的边界设置为热绝缘。满足如下方程：

$$-\mathbf{n} \times \mathbf{q} = 0 \quad (6)$$

式中 \mathbf{q} 为热流，即系统整体的热量在内部传导，与外界不存在热量交换。

被加热物体的温度初始值设置为 293.15 K。设置两个端口的输入功率均为 500 W，加热时长为 10 s。

1.4 材料参数

该模型的输入参数见表 1。

表 1 模型输入参数表
Table 1 Model input parameters

material	relative permittivity (2 450 MHz)	electrical conductivity /(S·m ⁻¹)	coefficient of thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	density /(kg·m ⁻³)	atmospheric heat capacity /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
SiC	20.08-1.5j	0.16	1 380	580	960
N ₂	1	0	0.025 3	1.262 7	1 039.5

2 结果与讨论

2.1 试验系统

为了验证仿真模型的正确性，本文利用 BJ22 波导系统测量了气体的温升，实验系统见图 2。在实验系统中，石英管半径为 19 mm，厚度为 2 mm，微波频率为 2.45 GHz，功率为 300 W，石英管顶部距离波导截止口的距离为 65 mm，氮气的流速为 0.4 m/s，碳化硅孔隙率为 0.5。

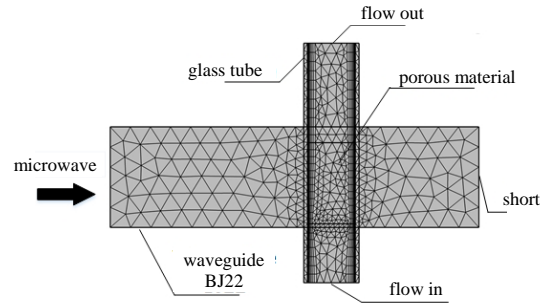


Fig.1 Geometric model of cavity
图 1 腔体几何模型

实验测量了石英管顶部中心点和试管壁点的温度，见图 2 中的 A,B 点。实验和仿真的对比见图 3，可以看到，仿真与实验的 A 点温度变化误差较小，而在 B 点的误差较大，可能是因为实验中外界空气流动带走一部分石英管壁的热量。

2.2 不同参数对加热的影响

保持石英管半径不变，气体流速为 0.5 m/s 时，不同孔隙率的 S_{11} 见图 4。可以看出，当孔隙率为 0.5 时，多孔介质区域对微波能量的吸收最好。图 5 为不同流速和不同孔隙率情况下碳化硅区域的体平均温度，结果显示流速大的曲线更平缓，表明气体流速越大，碳化硅区域的温升受孔隙率的影响越小。

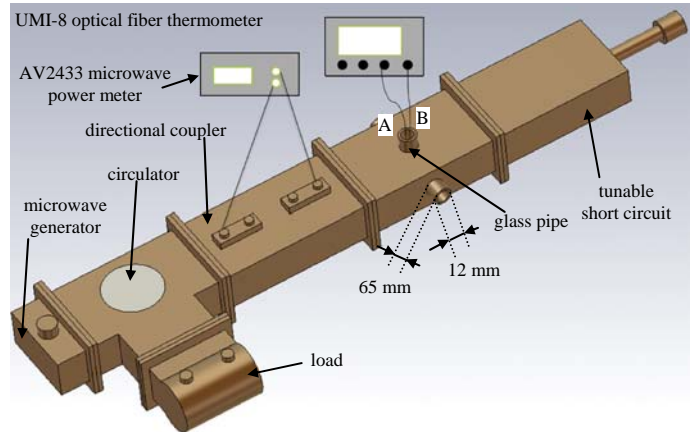


Fig.2 Measurement system
图 2 试验系统

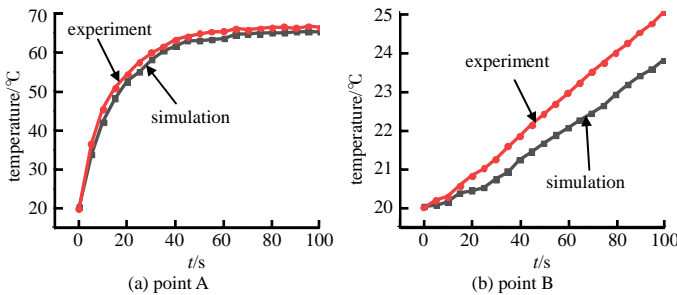


Fig.3 Comparison of experiment and simulation
图 3 实验与仿真结果对比

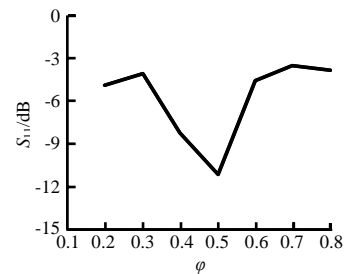


Fig.4 S_{11} with different porosity
图 4 不同孔隙率的 S_{11}

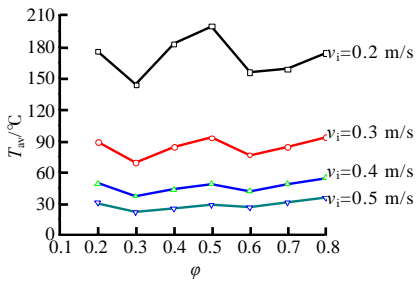


Fig.5 Average body temperature of different porosity and flow rates
图 5 不同孔隙率和流速的体平均温度

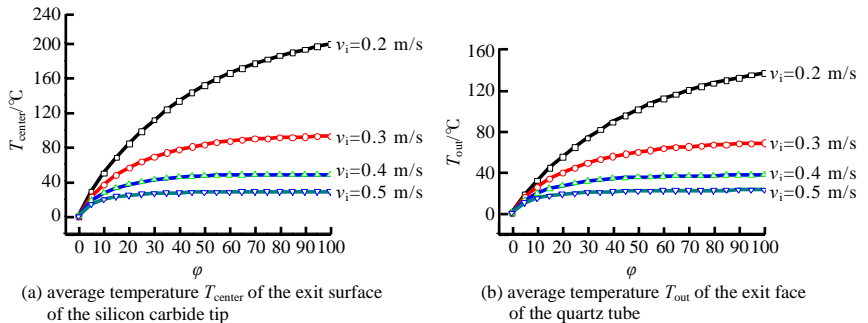


Fig.6 Temperature rise when the radius of the quartz tube is 20 mm
图 6 石英管半径为 20 mm 时的温升情况

图 6 为石英管半径为 20 mm 时不同气体流速下的温升情况。结果显示，当加热一定时间后，曲线趋于平稳，表示加热的温度不会再随加热时间而剧增；同时还可以看出，随着气体流速的增大，气体的温升减小。图 7 为不同半径和流速下的温度分布图，可以看出气体由石英管底端流入，流过碳化硅时被加热，但石英管顶端出口的气体温度低于碳化硅顶端出口的温度，这是因为气体流出碳化硅后，在石英管上段部分会向外部进行散热，会有一定的降温。

2.3 不同材料属性对加热的影响

仿真对比了被加热固体的介电常数对加热结果的影响，气体流速为 0.4 m/s，仿真结果见表 2。可以看出，介电常数实部增加，气体流出端面的平均温度呈现减小的趋势；介电常数的虚部增大，气体流出端面的平均温度越高。当介电常数实部为 15 时，端面温度只有 53.57 °C，可能原因是此介电常数下的这种材料与微波输出端口的匹配较差造成的。计算结果可以看出，该微波反应器适用于不同介电常数的固体加热模型。

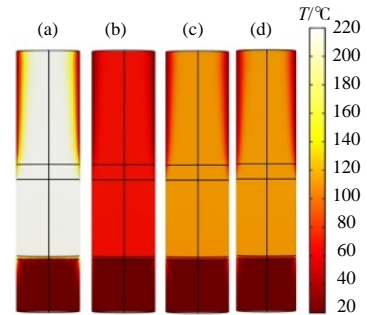


Fig.7 Temperature profiles at different radii and flow rates
图 7 不同半径和流速下的温度分布图

3 结论

本文设计了一种利用微波加热多孔固体介质(碳化硅)来间接加热气体(氮气)的计算模型,使用有限元法对电磁场频域、流体传热、自由和多孔介质多物理场进行耦合分析,仿真计算了各种情形下的气体加热情况,验证了该气固耦合模型能够有效仿真出微波通过加热多孔固体介质来间接加热气体的过程。计算结果显示碳化硅的孔隙率对其吸收微波的能力有较大的影响,当孔隙率为 0.5 时,吸收能力最好;石英管半径为 20 mm 时,碳化硅吸收的微波能量最多;气体流速越大,其温升越小。该模型为工业生产上气体加热的模拟计算提供了一种方法。

参考文献:

- [1] LU X,XI B,ZHANG Y,et al. Microwave pretreatment of rape straw for bioethanol production:focus on energy efficiency[J]. *Bioresource Technology*, 2011,102(17):7937–7940.
- [2] LI J,XIONG Q,WANG K,et al. Combining sliding mode neural network with Cuckoo Search to make a uniform microwave heating process[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2015,49(1):61–77.
- [3] 朱铎丞,马伟权,杨阳,等. 一种非极性溶液微波间接加热方法的仿真计算[J]. *真空电子技术*, 2018(3):50–52. (ZHU Huacheng,MA Weiquan,YANG Yang,et al. Simulation calculation of microwave indirect heating method for nonpolar solution[J]. *Vacuum Electronics Technology*, 2018(3):50–52.)
- [4] MUDGETT R E. Microwave properties and heating characteristics of foods[J]. *Food Technology*, 1986,40(6):84–93.
- [5] MULEY P D,BOLDOR D. Multiphysics numerical modeling of the continuous flow microwave-assisted transesterification process[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2016,46(3):139–162.
- [6] SAIFUDDIN Nomanbhay,ONG Meiyin. A review of microwave-assisted reactions for biodiesel production[J]. *Bioengineering*, 2017,4(2):57.
- [7] 郑亚琪,陈星. 微波加热效应的多物理场仿真与实验[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2018,16(2):302–306. (ZHENG Yaqi,CHEN Xing. Multi-physical field simulation and experiment of microwave heating effect[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2018,16(2):302–306.)
- [8] PANDIT R B,PRASAD S. Finite element analysis of microwave heating of potato—transient temperature profiles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003,60(2):193–202.
- [9] PITCHAI K,BIRLA S L,SUBBIAH J,et al. Coupled electromagnetic and heat transfer model for microwave heating in domestic ovens[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012,112(1/2):100–111.

表 2 介电常数实部对加热的影响

relative permittivity	outlet port average temperature/°C	S_{11}/dB
10–1.5j	59.56	-4.029
15–1.5j	53.57	-4.936
20–1.5j	56.46	-9.548
25–1.5j	56.57	-13.905
30–1.5j	48.90	-5.756
20.08–0.5j	56.23	-11.046
20.08–1j	56.74	-11.176
20.08–1.5j	57.74	-11.152
20.08–2j	57.56	-11.021
20.08–2.5j	57.91	-10.825