

# 微波对流体加热过程的数值分析

闫丽萍, 黄卡玛, 刘长军, 陈 星, 赵 翔

(四川大学电子信息学院, 四川成都 610064)

**摘 要:** 近年来,微波已被广泛用于流床进行各种工业处理.本文利用 FDTD 方法通过求解流体中的 Maxwell 方程组和热传导方程模拟了微波与流动液体介质间的相互作用,计算了流动液体中的温度分布,并研究了波导型流床中的反射和透射与介质流速、倾斜度及流体直径之间的关系.数值结果与实验结果相吻合,研究结果对工业应用具有指导意义.

**关键词:** 微波; 流床; FDTD; 温度

**中图分类号:** TN015 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 05-0667-04

## Numerical Analysis on Microwave Heating of Fluid

YAN Li-ping, HUANG Ka-ma, LIU Chang-jun, CHEN Xing, ZHAO Xiang

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

**Abstract:** A fluidized bed combined with microwave has been widely used in industry processing. Maxwell's equations of fluid combined with the heat transport equation have been solved by FDTD to simulate the interaction between microwave and flowing liquid and calculate the field and temperature distribution in the flowing liquid. Moreover, reflection and transmission in the fluidized bed based on waveguide are also investigated with respect to the velocity of liquid, the obliquity, and diameter of the pipe, through which the liquid flows. Numerical results are in good agreements with experimental ones.

**Key words:** microwave; fluidized bed; FDTD; temperature

## 1 引言

微波由于具有加热速度快、效率高、可以杀菌的优点而被广泛用于消毒、干燥以及其他工业处理中.最近,人们发现微波与工业中的流床结合使用具有许多优点,如能量利用率高、处理时间大大降低、产品性能增强等,因此微波流床已被广泛用于微波化学合成的在线处理、材料干燥和消毒、煤脱硫、放射性废物的处理以及高纯度硅的生产中<sup>[1]</sup>.但在实际生产中,根据匹配水负载改进的波导型微波流床,其微波能量的利用率并不高,且处理过程中流体内部的温度分布并不均匀,导致处理效果不好.如何使微波功率集中在流动介质中,产生较小的反射从而减小对微波功率源的影响,如何在流动介质中产生较均匀的温度分布,这些问题都需要进行深入的研究,其研究结果将对实际的工业生产具有重要的指导意义.

然而已有的研究<sup>[1]</sup>主要从热力学角度研究了腔体中微波辐射下流床中气态与固态混合介质中的温度分布.也有文献对基于微波炉的化学反应器中的流动水负载进行了研究<sup>[2]</sup>,但该研究从水负载吸收微波功率的角度,定性分析了负载体积、位置对微波炉有效输出功率的影响,并没有研究流体中的温度分布及其物理性质对反射特性的影响,而这恰恰是微波

流床在工业应用中必须深入探讨的问题.尽管 Torres 等对微波加热介质过程进行了完整的 FDTD 分析<sup>[3]</sup>,但被加热的介质是静止的而非流动的.而对于流床中的液体介质,在微波辐射下,其反射特性、场分布以及温度分布均与液体的流速有关,欲获得流床中液体介质内的场分布及温度分布,则需求解流体中的麦克斯韦方程和热传导方程,这使问题变得更加复杂.本文采用数值方法模拟了波导型微波流床中液体介质的加热过程,利用 FDTD 方法通过求解流体中的 Maxwell 方程组和热传导方程计算了流动介质中的温度分布,并研究了该波导型流床反射和透射与介质流速、倾斜度及流体直径之间的关系.

## 2 波导型流床模型

波导型微波流床常用于液体的在线消毒及微波化学中合成反应的微波在线处理.如图 1 所示,液体从波导上部沿  $-y$  方向斜穿过波导接受微波辐射.整个结构由矩形波导及穿过波导宽壁中心的倾斜的硬聚四氟乙烯管组成,倾斜聚四氟乙烯管外有截止圆波导,以防止微波泄露.聚四氟乙烯管的内、外直径分别用  $D_2$  和  $D_1$  表示,可以通过改变管壁厚度来改变内直径  $D_2$ ,  $h$  为圆截止波导的高度,为圆截止波导与矩形

收稿日期:2001-06-02;修回日期:2002-01-01

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金(No. 60125102)

波导之间的夹角.

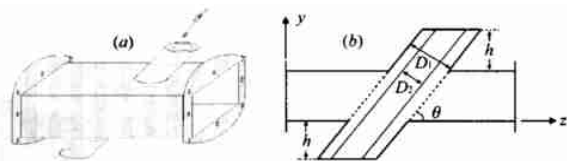


图1 波导型微波流床的结构图

### 3 微波流床加热过程的数值分析

为研究微波功率是否被有效利用,即微波功率是否集中在流床中的液体,且液体内的温度分布是否均匀,采用时域中的数值分析方法 FDTD 来模拟微波对流动液体介质的在线加热过程,以获得液体介质中的温度分布,以及该微波流床的反射特性和透射特性.考虑到工业中常用的微波频率为 2450MHz,因此在数值分析中频率  $f = 2450\text{MHz}$ .

由于液体介质为高损耗的流动介质,建模时必须考虑这些特性.流动介质中的麦克斯韦方程和本构关系已由 Jones 给出<sup>[4]</sup>,其中麦克斯韦方程保持不变,但本构关系中传导电流则与介质的流速密切相关,见式(1):

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} \quad (1a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1b)$$

$$\mathbf{J} - \mathbf{V} = (\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (1c)$$

热传导也不仅仅与流动介质的热传导率和介质所吸收的功率有关,而且还与介质的流速有关.式(2)给出了适用于流动介质的热传导方程<sup>[5]</sup>

$$m C_m \left( \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = k_t \nabla^2 T(x, y, z, t) + P(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中  $m$  为流动介质的密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $C_m$  为流动介质的比热 ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\mathbf{V}$  为介质的流速 ( $\text{m/s}$ ),  $k_t$  为介质的热传导率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $P(x, y, z, t)$  为每单位体积耗散的电磁功率 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

联合求解麦克斯韦方程和上述方程,可得到反应器中的场分布与温度分布.考虑到热传导过程的时间远大于 FDTD 中的时间步长,因此必须采取一定的措施加以处理.这里采用了时间压缩算法,将式(2)两边同乘以系数并整理可得:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{k_t}{m C_m} \nabla^2 T(x, y, z, t) - \mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{P(x, y, z, t)}{m C_m} \quad (3)$$

由上式可知,当损耗功率  $P$ 、热传导率  $k_t$  及流体速度  $\mathbf{V}$  增大一倍,则温度的变化率 ( $\partial T / \partial t$ ) 也将加快一倍,而其空间变化率保持不变.这种处理等效于加快了热传导过程,而 FDTD 计算的时间长度不变.因此称为时间压缩因子,其值等于实际加热时间与 FDTD 计算时间之比.式(3)的具体差分格式见文献[3].为了节约存储空间,整个结构被分成三个区域:上截止波导管、矩形波导和下截止波导管.计算中用水 ( $\rho = 0.0018/\text{cm}$ ) 模拟流动的液体.介质的复介电常数是温度的函数,因此在计算的每一个时间步,需根据温度的变化来更新介质的复介电常数.这里,水的复介电常数随温度变化的关系可通过德拜方

程获得<sup>[3]</sup>.聚四氟乙烯管复介电常数的实部和虚部分别为 2.1 和 0.005,为简化起见,假设其在整个加热过程中不随温度改变.计算中,取  $5 \times 10^9$ ,  $m = 1000 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_m = 4180 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $k_t = 0.55 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .由于水在聚四氟乙烯管中流动,因此可忽略其与周围介质的热交换.

计算采用均匀划分的 Yee 氏网格,空间步长为 1.56mm,相应的时间步长为 2.0ps.波导的尺寸为 109.2mm  $\times$  54.6mm,聚四氟乙烯管的外直径  $D_1$  为 31.2mm,圆截止波导的高度  $h$  为 46.8mm.计算中,采用  $TE_{10}$ 模进行激励,并使用 Hanning 窗函数使场分布快速达到稳定状态<sup>[6]</sup>.只有达到稳定状态后,才能开始加热过程的模拟.

### 4 结果与讨论

图2给出了波导型微波流床的反射系数与透射系数模值在不同管直径时随角度变化的数值计算结果.

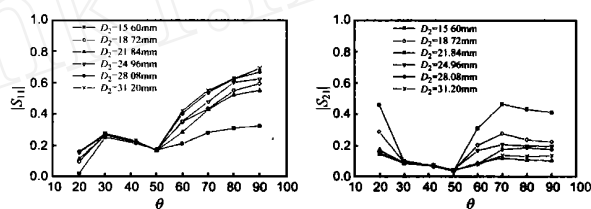


图2 流速为 0.1m/s 时,波导型微波流床的  $S$  参数幅值随角度及聚四氟乙烯管内直径变化

由图2可以看出:反射系数和透射系数的模值都随角度进行非线性变化.理论上,反射系数的模值随角度的增大而增大,但这里我们可以看到,在  $40^\circ \sim 50^\circ$  范围内,无论反射系数还是透射系数,其模值都比在其他角度时小.这是因为,在这个角度范围,由于管状水流斜穿过矩形波导,导致矩形波导内发生谐振.这个结果对波导型微波流床的设计非常重要,可以使液体充分吸收微波功率.除  $40^\circ \sim 50^\circ$  范围外,在其他所有角度,反射系数和透射系数的模值极大地依赖于水流的直径,而在  $40^\circ \sim 50^\circ$  范围内,反射系数和透射系数的模值几乎不受水流直径的影响.当角度大于  $50^\circ$  时,反射随角度的增加而迅速增大,而透射基本保持不变.因为角度越大,波导内的水流就越少,其功率损耗就越小.

为了使温度均匀分布,我们计算了  $=50^\circ$  时水流中的场分布和温度分布.图3给出了聚四氟乙烯管横截面

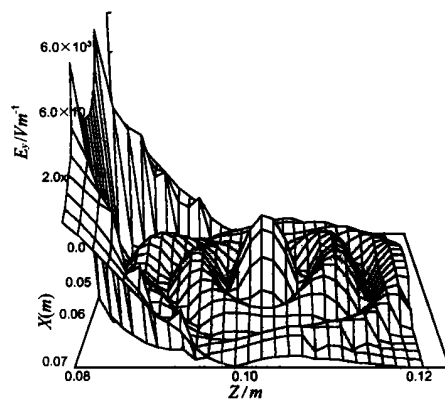


图3  $xz$  平面上 ( $y = 27.3\text{mm}$ ) 聚四氟乙烯管内电场  $E_y$  分量的分布,水流速为 0.1m/s,角度为  $50^\circ$

( $xoz$  平面,  $y = 27.3\text{mm}$ ) 上  $E_y$  场分量的分布。入射电场的幅值为  $5000\text{V/m}$ , 且波沿  $z$  方向传播。从图 3 可以看到管中的高次模, 管中中心  $E_y$  的幅值高于周围的分布; 由于水流斜穿过波导, 且水和聚四氟乙烯、空气的介电常数相差很大, 因此入射端的  $E_y$  分量的幅值远远高于管中  $E_y$  的幅值; 此外, 图中入射端处的两个峰值是由于采用阶梯近似模拟圆形结构造成的。

不同聚四氟乙烯管内径对应的管内温度分布见图 4, 水的流速为  $0.1\text{m/s}$ , 入射功率为  $30\text{W}$ 。

由图中可以看出, 随着管径的增大, 温度分布逐渐变得不

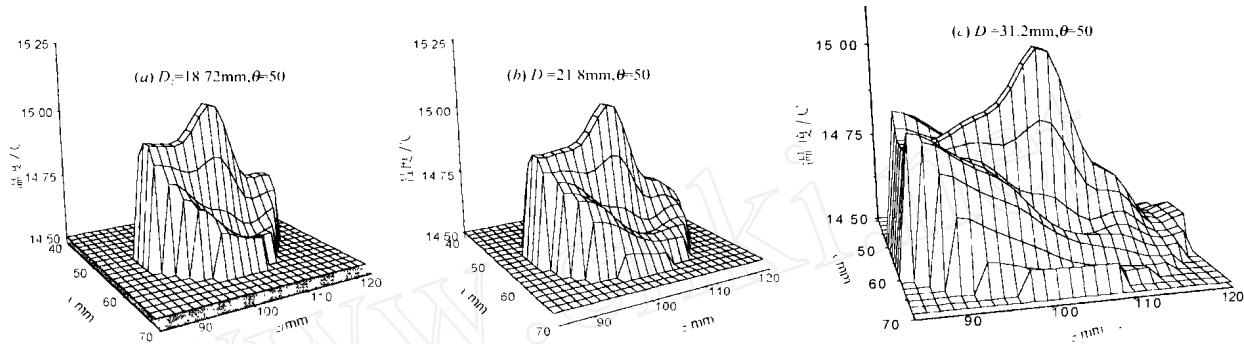


图 4  $xoz$  平面上 ( $y = 27.3\text{mm}$ ) 流动水内的温度分布, 流速为  $0.1\text{m/s}$

不同流速时该微波流床的  $S$  参数的数值结果见表 1。为了证明整个计算的有效性, 这里采用实验进行了验证。先由实验测得不同流速的  $S$  参数(水流的速度由泵进行控制), 然后在计算中

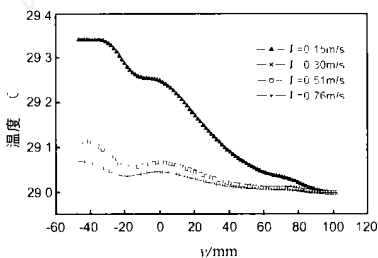


图 5 不同水流速度时, 聚四氟乙烯管中心轴线上的温度值

使用相同的条件获取相应的数值结果。其中聚四氟乙烯管的内直径为  $18.72\text{mm}$ , 为  $90^\circ$ , 使用功率为  $30\text{W}$ 。实验使用 HP8410C 网络分析仪测量  $|S_{11}|$  和 Bailey 公司 BAT. 8 型温度计测量出口处的温度。该温度计的响应时间为  $0.07\text{s}$ , 测量精度为  $0.1$ 。对于水, 如果温度变化很大,  $S$  参数也将发生明显的变化。但从表 1 可以看到, 当水流动较快时,  $|S_{11}|$  随速度没有明显变化, 因为水迅速通过矩形波导(例如, 流速为  $0.15\text{m/s}$  时, 穿过波导的时间为  $0.364$  秒), 因此单位体积单位时间内水吸收的功率非常少, 温升很小(如图 4 所示)。从表 1 可以看出, 数值计算结果与实验结果较吻合。

表 1 不同流速时微波流床  $S_{11}$  参数与水温升的数值结果与实验结果的比较

速度 (m/s)	温升( $^\circ\text{C}$ )		$ S_{11} $	
	实验值	计算值	实验值	计算值
0.15	0.5	0.341	0.60	0.62725
0.30	0.2	0.153	0.64	0.62971
0.51	0.2	0.115	0.63	0.62966
0.76	0.1	0.071	0.63	0.62964

我们计算了圆截止波导的漏能, 以确保该装置的安全性。

均匀, 且沿传播方向( $z$  方向)迅速下降。这是由于水为高损耗介质, 电磁波在水中迅速衰减。因此, 为了获得均匀的温度分布, 对水这种溶液聚四氟乙烯管的内直径应小于  $22\text{cm}$ 。图 4(a) 中的温度分布比图 3 中的  $E_y$  电场均匀, 是由于热传导所致。图 5 为当流床垂直穿过矩形波导( $\theta = 90^\circ$ ) 时, 聚四氟乙烯管中心轴线上的温度值。位置  $y = 0\text{mm}$  处的波动是由于矩形波导和圆截止波导连接处的不均匀性引起的。由图 5 可以看出, 水流动地越慢, 出口端的温度就越高, 这与物理事实吻合。

当入射功率为  $100\text{W}$ , 圆截止波导的直径为  $31.2\text{mm}$  时, 角度  $20^\circ$  对应的圆截止波导的漏能为  $2\text{mW/cm}^2$ , 而角度为  $90^\circ$  时则为  $0.1\text{mW/cm}^2$ 。

## 5 结论

本文对工业中常用的波导型微波流床在线处理液体的过程进行了建模和分析, 通过用 FDTD 求解流体中的麦克斯韦方程组和热传导方程获得了一些有用的结果。该微波流床反射和透射都随聚四氟乙烯管的倾斜度进行非线性变化。在优化角度范围内, 反射和透射都很小, 且几乎不随聚四氟乙烯管的直径变化, 该结果对提高微波能量的利用率具有重要意义。流体横截面上温度分布存在不均匀性; 对于水, 管内直径小于  $22\text{cm}$  时温度均匀性较好; 但对于工业应用, 流体横截面较大的情况下, 可以采用螺旋状流床或多模腔微波流床, 以提高流体内温度分布的均匀性。实验表明本文的计算结果与实验结果吻合较好, 这些结果对实际工业应用具有重要指导意义。

## 参考文献:

- [1] G Roussy, et al. Modeling of a fluidized bed irradiated by a single or a multimode electric microwave field distribution [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1995, 30(3): 178 - 187.
- [2] 邵明望, 张文敏. 微波反应器水负载加热性能的研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 1999, 22(2): 155 - 157.
- [3] Torres F, Jecko B. Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media [J]. IEEE Trans, 1997, MTT-45(1): 108 - 117.
- [4] Jones D S. The Theory of Electromagnetism [M]. Oxford, London, Pergamon Press, 1964: 736 - 738.
- [5] Datta A, Prosetya H, Hu W. Mathematical modeling of batch heating of

liquids in a microwave cavity [J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1992, 27(1): 38 - 47.

[ 6 ] Prescott D T, Shuley N V. Reducing solution time in monochromatic FDTD waveguide simulation [J]. IEEE Trans, 1997, MTT-42(8): 1582 - 1584.

#### 作者简介:



闫丽萍 女, 1972 年 3 月出生于河北省栾城, 1996 年毕业于四川大学, 获无线电物理专业硕士学位, 同年留校任教, 现为在职博士, 主要从事电磁场数值计算方法、微波在生物医学工程中的应用等方面的研究工作, 发表论文十余篇。

Email: wpylp @263. net



黄卡玛 男, 1964 年 6 月生于重庆, 教授、博士生导师, 91 年电子科技大学获得博士学位, 2001 年美国 Clemson 大学博士后, 中国电子学会理事、会士, IEEE 高级会员, 国家杰出青年基金获得者、教育部跨世纪优秀人才、享受政府津贴专家, 近年来主要从事电磁场仿真、微波生物医学工程和微波化学方面工作, 主持 863、自然科学基金等国家项目多项, 获得省部级奖励 4 项, 出版专著一部, 在国内外发表论文 80 多篇。Email: kmhuang @scu. edu. cn

www.cnki.net