

研究论文

微波萃取器内流场的分布和改进

郝金玉 韩 伟 胡国勤 高 珊 邓 修

(华东理工大学化学工程研究所, 上海 200237)

摘 要 为了考察自行设计的微波萃取器是否符合连续生产时流体流动的要求, 用激光多普勒测速仪测定了该萃取器内流体的轴向速度和切向速度, 得到流体轴向速度和切向速度在内外环隙不同层数间的分布; 考察了流体轴向速度在不同旋转度 θ 上的分布, 讨论了入口流速 Q 的影响, 并将测得的数据用 Matlab 软件编程绘出二维和三维图。将初步设计的微波萃取器的实验数据图与 PHOENICS 软件模拟的流场分布图作比较, 两者吻合较好。利用 PHOENICS 软件对两次改进设计的微波萃取器作流场模拟和分析, 得到两次改进设计对流场分布有较大影响。第 2 次改进设计使其内筒呈锥台, 既能有效地吸收微波能, 又能使流体内部形成大漩涡。

关键词 微波萃取器 微波辅助提取 激光多普勒速度测量 Dual PDA PHOENICS 软件模拟

中图分类号 TQ 654.2 TQ 051.7 **文献标识码** A **文章编号** 0438-1157 (2003) 07-0923-07

DISTRIBUTION AND IMPROVEMENT OF FLOW
FIELD IN MICROWAVE EXTRACTOR

HAO Jinyu, HAN Wei, HU Guoqin, GAO Shan and DENG Xiu

(Chemical Engineering Research Center, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract In this paper a totally new microwave-assisted extraction apparatus is designed to develop the new technique—microwave extraction. The cylinder-shaped extractor has a concentric inner partition, which forms an annular space for the fluid to receive microwave energy from the inside of the concentric partition. In order to know whether it is fit for the demand of continuous production, the LDA (Laser Doppler Anemometer) method is used to measure axial velocity and tangential velocity of the fluid in the apparatus. The axial velocity and tangential velocity of different layers in the annular space are obtained, as well as the axial velocity at different rotation degrees θ . The effect of flow rate is also discussed. 2-D and 3-D figures are drawn by software Matlab to illustrate the data measured by Dual PDA. Another software PHOENICS is used to simulate and analyze the flow field in the microwave extractor. Compared with the experimental data, the result of PHOENICS is reliable. Improvement of flow field is achieved by revising the apparatus design with a conical inner partition.

Keywords microwave extractor, microwave-assisted extraction, LDA, Dual PDA, PHOENICS

引 言

微波萃取又名微波辅助提取 (microwave-assisted extraction, MAE), 是一种颇有发展前途的新型提取方法^[1]。多数情况下, 它利用外加能量

来强化溶剂对固体物料的萃取过程。这种提取方法采用的设备最早是改造后的家用微波炉^[2]。Pare 等^[3]的专利是微波辅助溶剂提取美国薄荷、大蒜和鲑鱼, 并给出了提取的流程, 包括至少一台微波介质加热源、一台用于混合生物物料和萃取剂的混合

2001-12-24 收到初稿, 2002-05-27 收到修改稿。

联系人: 韩伟。第一作者: 郝金玉, 女, 26 岁, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 20006003)。

Received date: 2001-12-24.

Corresponding author: HAN Wei. E-mail: whan @ ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20006003).

罐、系统萃取分离装置和再循环装置。此专利的重点不是微波萃取器和微波源，而是整个工艺流程。对于连续生产可移植性不强。徐有生^[4]使用了流体处理专用工业微波炉，流体在螺旋管中带动固体物料流动，阻力大，物料易阻塞，而且无法消除微波场加热不均匀的缺点。因此自行设计可用于连续微波萃取的设备具有重大意义。

本文针对粉碎后的植物物料黄花蒿，在已设计出的微波萃取器内进行连续萃取的流体流动研究。采用激光多普勒速度测量 (LDA) 的方法测定该萃取器内流体的分布。

1 实验设备和方法

微波源由微波发生器 (5000 W) 产生，经过波导传输，进入图 1 所示的微波萃取器内筒，微波从内筒辐射到外筒，物料从下方进料口入，从上方出料口出，在内外筒之间的环隙内流动，接受微波辐射，进行萃取。微波萃取器 (已申请专利) 上部接过渡法兰与波导相连，下部接快开结构。微波萃取器内流体的 LDA 实验研究是为了考察此微波萃取器是否符合连续生产时流体流动的要求，并确定流体入口流速等工艺参数。所以用玻璃制做了如图 1 所示的微波萃取器，以便于实验和观察。入口管和出口管内径为 10 mm，入口管中心距离萃取器底部的量纲 1 高度 $Z=0.175$ ，出口管中心距离萃取器底部的量纲 1 高度 $Z=0.75$ ，内筒外径、外筒内径的尺寸和流体流动方向见图 1。微波萃取器的高度和环隙的尺寸根据微波的特性和物料的特性选取。

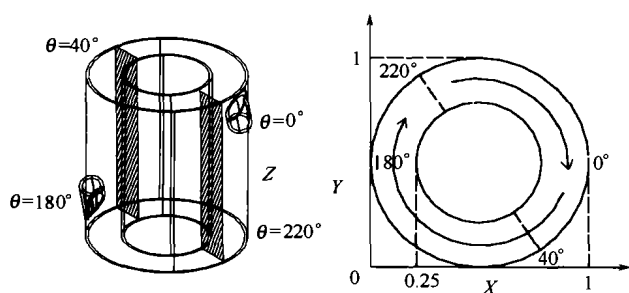


Fig. 1 Microwave extractor

本文在实验中采用的是逐点测量的激光双模相位多普勒测量装置 Dual PDA (phase Doppler anemometry, dantec, 丹麦)^[5]。数据有效率大于 90%。实验所用示踪粒子是亮白色轻质氧化镁粉末 (分析纯, μm 级)，流体选用水。采用在圆筒外加

方形玻璃水槽并在水槽中加水的方法来进行折射率补偿^[6]。

流场模拟软件是 PHOENICS 3.3。选用的基本数学模型是 $K-\epsilon$ 湍流模型^[7]。边界条件分别为：入口管平均流体轴向速度 u_0 给定， $K=0.005u_0^2$ 和 $\epsilon=\frac{500C_\mu K^2}{u_0 d_{\text{inlet}}}$ ；出口处令诸物理量沿 x 向的导数为 0；固壁边界用壁面函数法处理。 $K-\epsilon$ 湍流模型中的常数取常用值

$$C_\mu=0.09, C_{\epsilon 1}=1.44, C_{\epsilon 2}=1.92 \\ \sigma_k=1, \sigma_\epsilon=1.3$$

2 测量结果及分析

2.1 入口流速对底部沉淀的影响

将定量的黄花蒿粉末混入自来水中，考察入口流速对萃取器底部沉淀的影响 (黄花蒿粉末所用粒度是小试实验选出的较好的颗粒粒度^[8])。当流体完全注满圆筒且流动状况稳定后，开始观察其流动状况。入口流速 Q 分别为 0.566、0.283、0.0566 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，微波萃取器底部沉淀情况见图 2 (图中阴影为沉淀)。实验结果表明 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时萃取器底部沉淀较少，只有内侧有少量物料沉淀，而且物料不积累。而 $Q=0.283$ 和 $0.0566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，物料易在萃取器底部沉积。特别是入口流速 $Q=0.0566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，几乎整个萃取器底部都铺满了沉淀。

2.2 流体轴向速度和切向速度的分布

流体轴向速度是主要参数，它反映了流体向下流动的情况。切向速度则是流体的主体流动方向。径向速度 w 很小，不是考察的重点。因为激光多普勒测速仪对三维速度同时测量时数据有效率低，采样时间长，所以只用激光多普勒测速仪进行轴向速度和切向速度的二维测定。

实验分别选择入口流速 $Q=0.566$ 和 $0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在 $\theta=40^\circ$ 和 220° 的切面上考察流体轴向速度和切向速度的分布。测量面如图 1 阴影所示。

为了更直观地表达流体的流动状况，将测得的数据用 Matlab 编程绘出三维立体图 (见图 3 和图 4)。每个图大约由 100 条矢量组成。每个矢量的起点坐标表示测量点的位置；方向是流体轴向速度 u 和切向速度 v 的矢量合方向；矢量的大小是 u 和 v 矢量和的大小。从图 3 和图 4 可以明显地看出在入

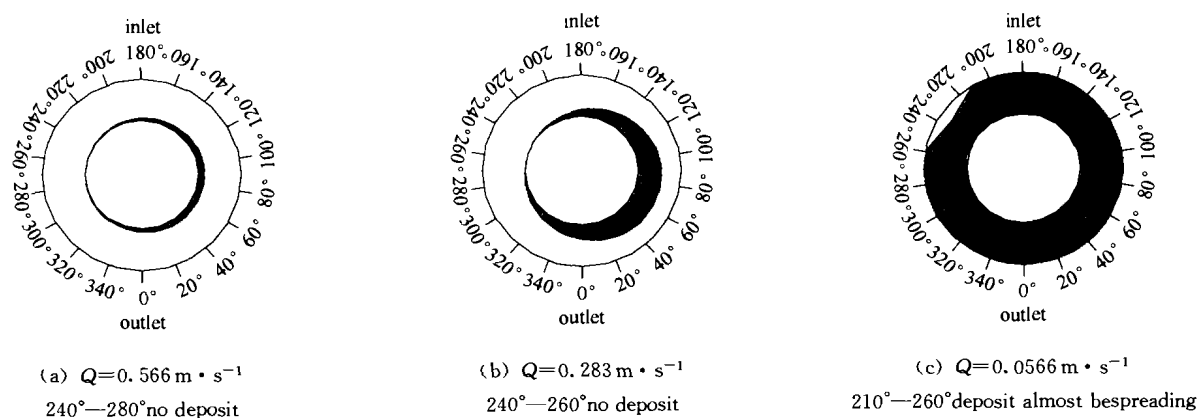
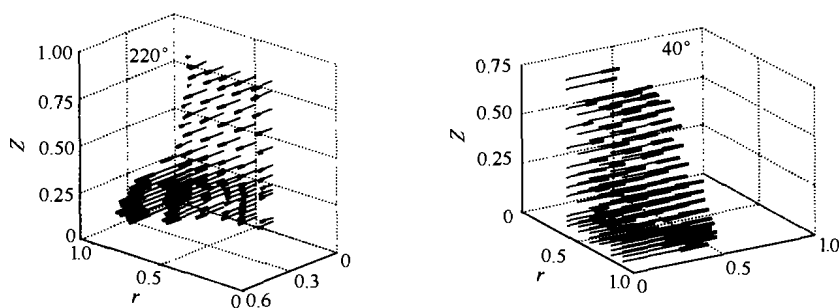
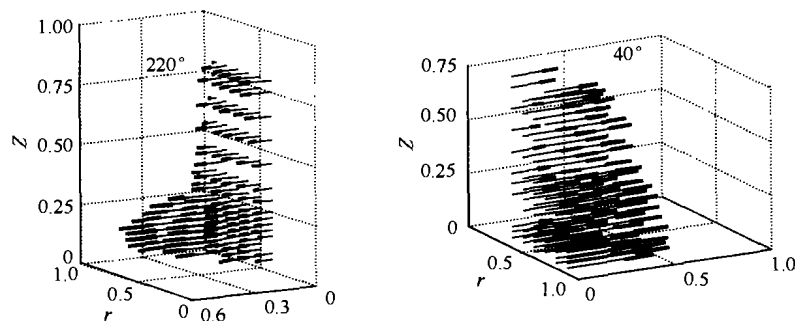


Fig. 2 Deposit in bottom of microwave extractor in different quantities of flow

Fig. 3 Experimental resultant velocities ($Q=0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 4 Experimental resultant velocities ($Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

口流速 $Q=0.566$ 和 $0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时切向速度是流体的主体速度, 流体轴向速度影响较小。比较图 3 和图 4, 可以发现入口流速 Q 从 $0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 下降到 $0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 流体轴向速度和切向速度的合矢量组成的流场形状变化不大。在 $\theta=220^\circ$ 时靠近萃取器底部 ($Z=0 \sim 0.25$) 外筒附近 ($r=1, \frac{6}{7}$) 的合速度矢量较大, 这是因为此处离切向进料口较近, 流体流速较大的缘故。

图 5 是 PHOENICS 软件对最初的微波萃取器

相应阴影部位 (图 1) 的模拟图。由于矢量的大小和方向所取标准一致, 所以图 4 和图 5 中的矢量可以比较。比较图 5 和图 4, 可以看出 PHOENICS 软件的模拟流场图与实验测得的流场图非常相似, 几乎所有计算数据的数量级都与实验值一致。PHOENICS 软件的模拟图比实验测得的流场图所取数据约多 5 倍, 而且数据取得比后者规则。

图 6 是实验数据和 PHOENICS 软件计算数据进行定量比较。在量纲 1 半径 $r=5/7$ 、旋转度 $\theta=$

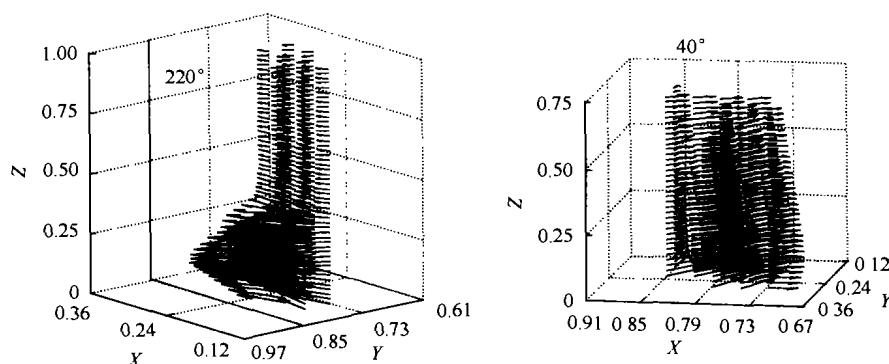
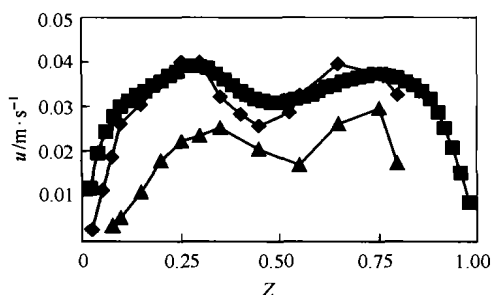
Fig. 5 PHOENICS simulating flow field ($Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Axial velocity height curve

▲ experimental $Q=0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ◆ experimental $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; ■ PHOENICS calculated $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

40° 时, 比较轴向速度 u 在量纲 1 高度上的分布. 量纲 1 半径 r 的值为 (测量点半径-内筒半径) / (外筒半径-内筒半径). 从图 6 可以发现, 当 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, PHOENICS 计算出的数据能与实验数据较好地吻合. 当入口流速从 $Q=0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加 1 倍到 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 流体的轴向速度也相应有所增加.

2.3 流体轴向速度在不同旋转度 θ 上的分布

由于流体轴向速度关系到微波萃取器最终能否进入连续生产, 所以重点考察流体轴向速度在微波萃取器各个方位的分布情况, 也就是在不同旋转度 θ 上的分布. 将测得的数据用 Matlab 编程绘出二维平面图, 如图 7 所示, 是 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时流体轴向速度在不同旋转度 θ 上的分布, 每个图由许多矢量组成. 实验中分别取旋转度 $\theta=0^\circ, 65^\circ, 110^\circ, 180^\circ, 250^\circ$ 和 310° . 其中 $\theta=180^\circ, Z=0.175, r=1$ 为切向进料口中心; $\theta=0^\circ, Z=0.75, r=1$ 为切向出料口中心.

从图 7 可以看出, $r=1$ 时在切向进料口下方有较大的向下的流体轴向速度, 这与实验中肉眼观

察到的现象一致. 从实验中也可观察到在切向进料口处流体以较高速度喷射进入实验装置, 当流体流动状况稳定后, 流体在同轴的垂直圆筒内总体作稳定的逆时针旋转上升流动. 比较图 7 中各图, 可以发现流体轴向速度方向随着 r 的减小发生了较大的变化, 特别是在萃取器下部, 在外层 $r=1$ 处几乎所有矢量的方向都向上; 随着层数 r 的减小, 越来越多的矢量方向变成向下, 当 $r=2/7$ 时达到最多; 减小至 $r=1/7$, 方向向下的矢量略微减少; 继续减小至 $r=0$, 方向向下的矢量数目有了较大幅度的减少, 但仍有一部分矢量方向向下. 也就是说, 微波萃取器外层流体轴向速度向上, 内层流体轴向速度向下, 接近内筒壁后受其影响, 方向又有所改变. 这与 PHOENICS 软件模拟结果, 即外层流体轴向速度向上, 内层流体轴向速度向下吻合, 见图 8(a). 进一步实验考察 $Q=0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时流体轴向速度的分布, 也可以得出与 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时相似的结论.

2.4 PHOENICS 软件模拟流场

PHOENICS 软件模拟微波萃取器初始模型流场, 如图 8 所示, $Z=0.55$ 表示该图所有矢量的起点都在垂直 Z 轴经过刻度 0.55 的切面上; 同理, $Y=0.24$ 表示该图所有矢量的起点都在垂直 Y 轴经过刻度 0.24 的切面上, 如此类推. 从实验中观察到, 在切向进料口处, 流体以较高速度喷射进入实验装置, 当流体流动状况稳定后, 流体在同轴的垂直圆筒内总体作稳定的旋转上升流动; 流体流动平稳. 从图 8(a) 可以清楚看到流体在萃取器中作稳定旋转上升流动. 图 8(b) 反应出流体流动很平稳, 湍流强度小. 从图 8(c) 可以看出, 萃取器出口方向与流动方向相反, 流体必须转弯后才能流出, 造成出口阻力大, 所以出口方向需改变.

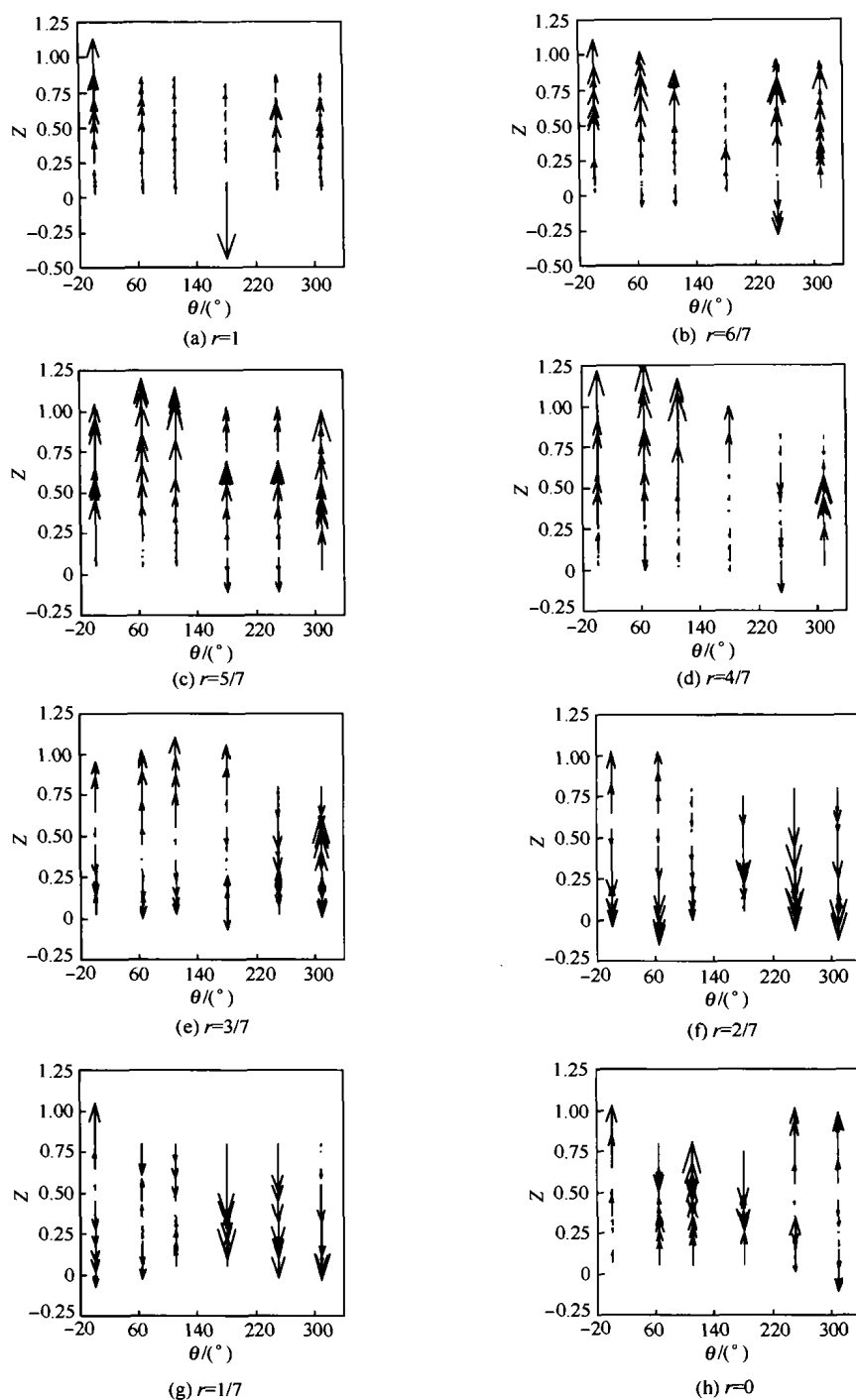


Fig. 7 Distribution of axial velocities in different rotation degrees θ ($Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.5 微波萃取器的改进

为了增加微波萃取器底部流动速度,并减少底部物料的沉淀,同时减少出口阻力,将微波萃取器的出口方向按照流体流动的方向变成与入口管同侧,同时将进口管位置降低,尽可能靠近微波萃取

器底部 [如图 9(a),(b)], 流场模拟图见图 10. 从软件模拟流场图可以看出流体流动总体趋势没有变,但流动的湍流强度有所增加. 在入口对面底部有较强的流速撞击壁面后反射 [如图 10(a)所示],但漩涡很少 [见图 10(b)]. 总体流动仍

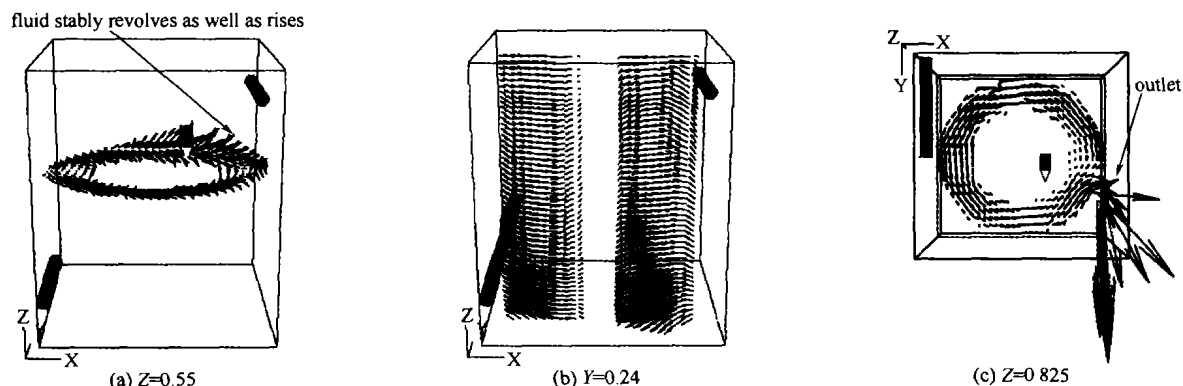


Fig. 8 PHOENICS simulating flow field in preliminarily designed microwave extractor

较平稳, 见图 10(c). 经改进的出口方向与流动方向一致, 大大降低了流动出口阻力 [比较图 10(a) 和图 8(c) 的出口].

好的消除作用. 同时可看出在出口附近有较小的阻力.

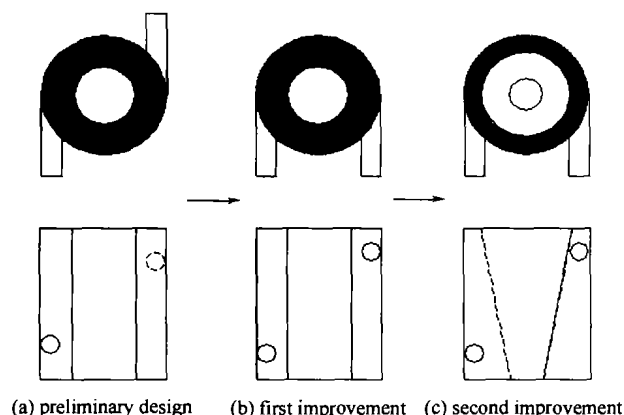


Fig. 9 Improvement of design of microwave extractor

为了能更高效地吸收微波能, 将微波萃取器再次改进, 使其内筒上部直径大、下部直径小, 呈倒锥台状, 如图 9(c)所示. 流场模拟图见图 11. 从 PHOENICS 软件模拟结果看, 第 2 次改进模型的流场分布有较大变化, 湍流强度增大, 形成漩涡, 但总体旋转上升流动趋势没有改变 [与图 8(a) 相似], 这些改变对传质传热有利. 从图 11(a) 俯视图和图 11(b) 侧视图可以发现入口管附近流体流动速度很大, 萃取器内部有漩涡, 在入口管的对面壁有较大返混, 有流体反射倒流现象. 从图 11(c) 也可以发现流体的湍流强度很大, 有明显的漩涡, 流体内部有大、小漩涡存在, 这对微波加热时场强分布不均匀、局部过热等现象有很

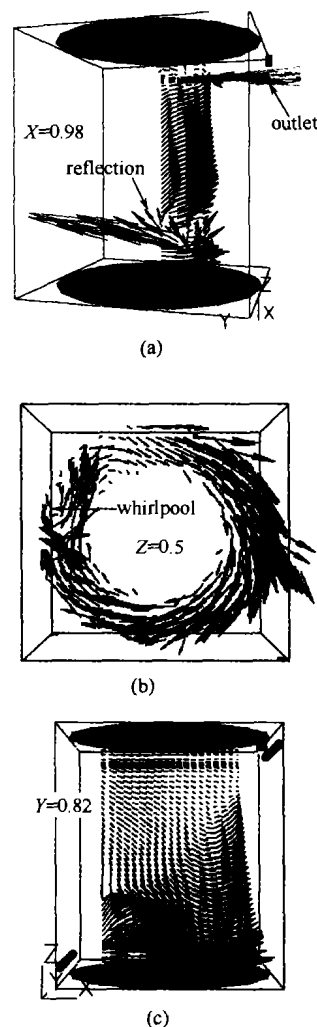


Fig. 10 PHOENICS simulating flow field in first improvement of microwave extractor

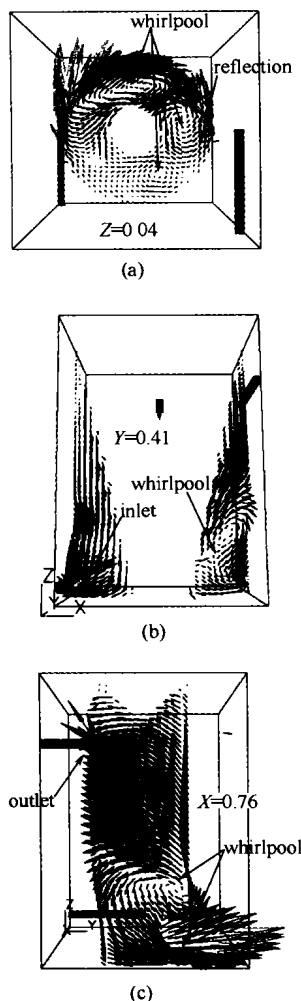


Fig. 11 PHOENICS simulating flow field in second improvement of microwave extractor

3 结 论

(1) 当黄花蒿粉末在初始设计的萃取器内以入口流速 $Q=0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速流动时, 底部几乎没有沉淀, 只有内筒外侧有很少量物料沉淀, 而且物料不积累。可选用较大入口流速如 $Q \geq 0.566 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 来减少物料沉淀, 增加湍流强度, 加强传质传热。

(2) 入口流速 $Q=0.566$ 和 $0.283 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时流体轴向速度的分布相似。初步设计的微波萃取器外层流体轴向速度向上, 内层流体轴向速度向下, 接近内筒壁后受其影响方向又有所改变。这与 PHOENICS 软件模拟结果吻合。

(3) 初始设计的两次改进, 改变出口方向、降低进料口的高度和变内筒为锥台对流场分布有较大影响, 增加了萃取器内的漩涡。第 2 次改进设计使

其内筒呈上大下小的锥台, 既能有效地吸收微波能, 又能使流体内部形成大漩涡。

符 号 说 明

$C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ —— $K-\epsilon$ 湍流模型中的参数

d_{inlet} ——入口管直径, m

H ——微波萃取器高度, mm

K ——湍流动能

Q ——入口流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

r ——量纲 1 半径, $r=1$ 表示紧靠外筒 (离外筒约 1 mm), $r=0$ 表示紧靠内筒的一层

u ——流体轴向速度 (方向向上为正), $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

u_0 ——入口管平均流体轴向速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

v ——切向速度 (顺时针为正), $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

w ——径向速度 (离圆心为正), $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

X ——量纲 1 坐标, $0 \leq X \leq 1$

Y ——量纲 1 坐标, $0 \leq Y \leq 1$

Z ——量纲 1 高度, $Z=\bar{Z}/H$

$\bar{Z}$ ——测量点高度, mm

ϵ ——湍流动能耗散率, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

θ ——旋转度数, ($^\circ$)

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ —— $K-\epsilon$ 湍流模型中的参数

References

- 1 Hao Jinyu (郝金玉), Huang Ruohua (黄若华), Deng Xiu (邓修), Wang Pingyan (王平艳). Microwave Extraction of Seed of Passionflower. *Journal of East China University of Science and Technology* (华东理工大学学报), 2001, 27 (2): 117—120
- 2 Ganzler K, Salgo A, Valko K. Microwave Extraction—a Novel Sample Preparation Method for Chromatography. *Journal of Chromatography*, 1986, 371: 299—306
- 3 Pare J R Jocelyn. CN 1061729A. 1992
- 4 Xu Yousheng (徐有生). CN 1231213A. 1999
- 5 Liu Yingzheng (刘应征), Chen Hanping (陈汉平). 3-D Measurement for Vortex Breakdown in a Cylindrical Container by LDA. *Journal of Experimental Mechanics* (实验力学), 1999, 14 (4): 477—483
- 6 Fujimura K, Koyama H S, Hyun J M. Time-dependent Vortex Breakdown in a Cylinder with a Rotating Lid. *J. Fluids Eng.*, 1997, 119: 450—453
- 7 Launder B E, Spalding D B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974 (3): 269—289
- 8 Han Wei (韩伟), Hao Jinyu (郝金玉), Xue Boyong (薛伯勇), Ye Fei (叶飞), Deng Xiu (邓修). Microwave-assisted Extraction of Artemisinin. *Chinese Traditional Patent Medicine* (中成药), 2002, 24 (2): 83—86