

## 低雷诺数气液交叉流装置研究 (I)

## ——孔流液柱流动特性数值模拟

杜怀明<sup>1</sup>, 罗容珍<sup>2</sup>, 贺西林<sup>3</sup>, 朱家骅<sup>3</sup>

(1. 四川理工学院材料与化学工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 四川理工学院化学与制药工程学院, 四川 自贡 643000;

3. 四川大学化工学院, 成都 610065)

**摘要:** 针对低雷诺数的气液交叉流气体净化过程, 提出有效避免二次雾沫夹带的液柱流体力学条件。数值模拟结果表明, 液柱表面随着离开孔口的距离而变化, 采用公式  $L_b/d = 2.84Ve^{0.694}$  能有效预测液柱的断裂行为。

**关键词:** 气液交叉流; 气体净化; 数值模拟

**中图分类号:** TQ 442.14

**文献标识码:** A

## 引言

现代工业生产所排放的大量含尘尾气, 使得大气污染日益加剧。以磷铵生产为例, 吨产品的尾气排放物就高达  $4000 \text{ Nm}^3 - 6000 \text{ Nm}^3$ <sup>[1]</sup>。大气污染作为环境问题之一, 不仅直接影响人们的生活质量, 而且还成为企业自身发展道路上的桎梏。因此, 目前亟待解决的问题是提高清洁生产水平, 通过清洁工艺改造, 使企业走上良性循环的道路<sup>[2]</sup>。

高效的气液接触过程与装备在当今工程技术和环境保护的许多领域有着十分重要的应用, 是传质与分离过程重点研究与技术开发的内容。现有的气液直接接触气体净化与传热传质技术, 多是以气体为连续相的气液接触方式, 由此引起气相阻力损失和雾沫夹带不可避免。为此提出一种基于连续液相表面吸附、吸收和传热传质的低雷诺数气液交叉流气体净化技术。本文对所提出的低雷诺数气液交叉流的液柱流动特性进行了数值研究, 以期为该技术的应用和进一步的技术开发提供理论依据。

## 1 物理模型

气液交叉流中气液两相流动如图 1 所示: 液体在液层静压力作用下从筛孔自由流出, 形成均匀分布、具有

较高自由表面积连续液柱, 气体则在与液柱相垂直的方向形成规则的气液交叉流动, 由于在气液两相直接接触的表面上既有正对气流的法向动量传递, 又有气体绕流形成的切向动量传递, 因此具有良好的气体净化和传递特征。同时, 在适宜的操作条件下, 自由液柱表面光滑连续而不发生断裂, 液相界面无破裂, 可避免雾沫夹带现象发生。将此基本单元串联组装, 则可实现多程气液交叉流气体净化。

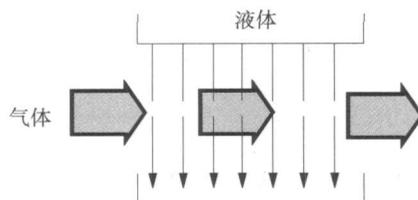


图 1 气液交叉流装置示意图

实现气液交叉流无雾沫夹带的操作, 其前提条件必须保证液相表面连续。事实上, 流体从小孔或喷嘴进入气体介质空间, 当速度很低时, 直接在出口处形成液滴, 增加至一定大小后脱落, 随着液体孔口流速的增加, 将会形成连续液柱。液柱表面受到外界扰动后会不稳定而断裂成为液滴。通常使用稳定性曲线来描述, 即断裂长度  $L_b$  随孔口流出速度  $u$  变化的特征曲线<sup>[3-4]</sup>。

对于本文提出的低雷诺数气液交叉流气体净化技

收稿日期: 2009-07-07

基金项目: 国家“863”计划高效节能与分布式供能技术专题(2006AA05Z235)

作者简介: 杜怀明(1976), 男, 四川邛崃人, 讲师, 博士, 主要从事化工传质与分离方面的研究。

术, 由于气体流速低 ( $Re < 2000$ ), 可忽略气体流动对液体流动的影响, 液体从孔口流出及形态变化如图 2所示。

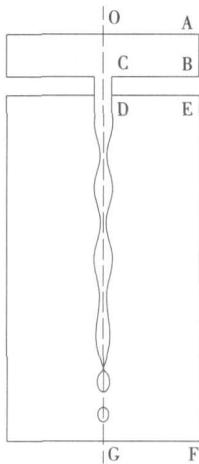


图 2 液柱流动状态示意

## 2 数学模型

从孔口流出形成的液柱在气相空间的运动过程可以采用二维轴对称模型, 计算区域如图 2所示, 针对实验采用的物系(空气-水), 液柱断裂现象做如下简化假设:

- (1)射流为稳定的轴对称扰动。
- (2)忽略水的可压缩性。
- (3)孔口出流速度均匀, 不存在径向速度分布。

在柱坐标系下, 通用的传递方程为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\varphi) = \text{div}(\Gamma_\varphi \text{grad}\varphi) + S_\varphi$$

二维柱坐标下展开形式为:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r \varphi) \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + S_\varphi \end{aligned}$$

其中  $\Gamma_\varphi$  和  $S_\varphi$  为参与运输的物理量  $\varphi$  所对应的扩散系数和源项, 其所代表的各参数见表 1

表 1 扩散系数和源项

	$\Phi$	$\Gamma_\varphi$	$S_\varphi$
continuity equation	1	0	0
momentum equation in z-direction	$u_z$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \sigma$
momentum equation in r-direction	$u_r$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \sigma$

## 3 数值模拟

构建常温常压下流动的双组分系统(空气-水), 并对流场进行数值模拟。与实验装置几何特征相对应, 形状参数为孔径  $d = 3\text{mm}$  (或  $4\text{mm}$ ,  $5\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$ ,  $7\text{mm}$  和  $8\text{mm}$ ), 轴向高度  $L = 400\text{mm}$ 。

### 3.1 边界条件

(1)入口 ( $z = 0$ )

$$p_{in} = \rho_l g h$$

其中  $\rho_l$  为所用液相的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 根据实际液位的高度确定进口压力的大小。

(2)出口 ( $z = L$ )

$$p_{out} = 0 \text{ (表压)}$$

其他变量的出口值由模拟结果唯一确定。

(3)其它固体壁面 (BC、DE)

由于过程不考虑热量和质量传递, 故这些面均考虑为壁面边界 (wall)。

### 3.2 数值计算

网格节点采用  $60 \times 200$  (径向  $\times$  轴向), 轴向网格为非均匀划分, 在靠近筛孔处采用密集网格分布; 径向网格划分采用均匀布点。采用 VOF 模型描述该气液两相流体系, 选用非稳态求解器, 运输方程的离散方法采用控制容积法, 压力-速度耦合采用 SIMPLEC 方案<sup>[6]</sup>。迭代精度取各运输标量计算残差达到  $10^{-3}$ 。

## 4 结果与讨论

在实验中, 选取了两种不同大小的测试孔:  $d = 3\text{mm}$  和  $d = 5\text{mm}$ , 研究液柱的断裂现象并考察断裂长度  $L_b$  的影响因素。图 3(a)与图 3(b)分别是孔径  $d = 3\text{mm}$  和  $d = 5\text{mm}$  时, 液柱断裂长度的实验值和模拟值的比较。根据实验条件, 可知孔口出流状态位于层流区<sup>[4]</sup>。从图 3可以看出, 液柱断裂长度随着孔口韦伯数  $We$  增大 (即孔口出流速度  $u$  的增加) 而增长。

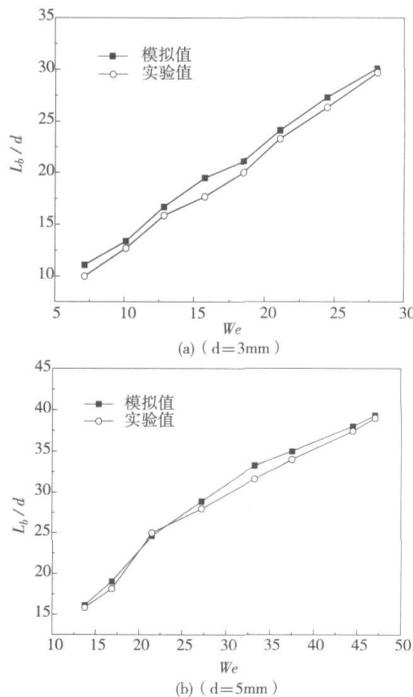


图 3  $L_b/d$  与孔口  $We$  的关系

通过对计算结果的整理分析, 得出无量纲参数  $L_b/d$  和孔口韦伯数  $We$  之间的关系拟合曲线:

$$L_b/d = 2.84We^{0.694}$$

应用曲线关系所得的计算值与实验值相比较 (图 4), 其相对误差在  $\pm 10\%$  以内, 可见该曲线能较好地预测该条件下液相的流动行为。

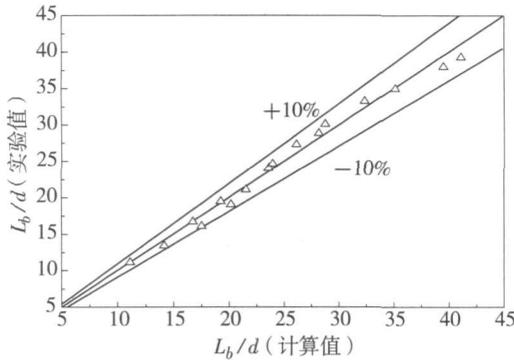


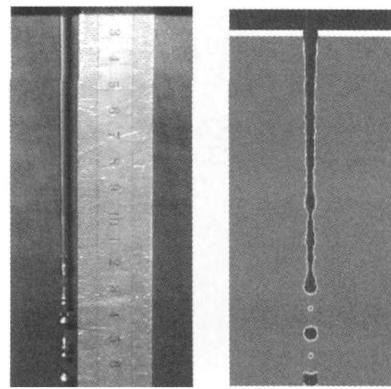
图 4 计算值与实验值的比较

实验所拍摄的液柱断裂现象如图 5 (a) 所示, 通过观察可以发现: 液体从孔口流出后, 在起始阶段表面波动的幅值不大, 液柱表面显得较为光滑且平整, 液柱并未出现明显被撕裂的迹象。流动发展一定距离后, 其表面波的幅度明显增加, 在表面张力的作用下, 液柱表面被不断撕裂破坏, 最终导致液柱断裂分散成为液滴。图 5 (b) 为液柱断裂现象的模拟效果图, 可见该模型能较好地预测液柱的断裂现象。

## 5 结束语

采用数值方法对气液交叉流的液柱流体力学行为进行了研究, 结果表明:

(1) 恒定进口压力推动下二维非稳态流动条件下数值模拟结果表明。进口阶段液相流动平稳, 液柱表面较为光滑且平整, 这样的流动行为可以有效地减少二次雾沫夹带。模拟结果与实验观察结果相一致。



(a) 液柱断裂实验现象 (b) 液柱断裂模拟结果

图 5 液柱断裂实验结果与模拟结果比较

(2) 在上述条件下, 液柱断裂高度与孔口直径与孔口韦伯数  $We$  之间的关系可以用  $L_b/d = 2.84We^{0.694}$  描述, 模拟结果与试验数据吻合良好。

## 参考文献:

- [1] 朱家骅, 夏素兰, 杜怀明, 等. DAP 尾气循环联产 MAP 过程分析与现场实验 [J]. 化工学报, 2004, 55 (12): 1982-1988
- [2] 周中平, 赵毅红, 朱慎林. 清洁生产工艺及应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [3] 董谊仁, 一示波. 填料塔液体分布器设计中一些问题的探讨: 穿孔射流研究 [J]. 浙江工学院学报, 1994, 62: 44-51.
- [4] Leick J The hydrodynamics of a free liquid jet and their influence on direct contact heat transfer-I hydrodynamics of a free cylindrical liquid jet [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 3: 239-249
- [5] Byron Bird R. 传递现象 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [6] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamic [J]. Essex Addison Wesley Longman Ltd, 1995, 18: 12-27

## Research on Gas-liquid Cross Flow Equipment at Low Reynolds Number ( I ) —Numerical Simulation for the Fluid Characteristic of Liquid Column

DU Huaiming<sup>1</sup>, LUO Rongzhen<sup>2</sup>, HE Xilin<sup>3</sup>, ZHU Jiahua<sup>3</sup>

(1 School of Material & Chemical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

2 School of Chemical and Pharmaceutical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

3 School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract** According to the gas purifying process of low Re number of gas-liquid cross flow, provided the conditions which can avoid the liquid entainment effectively is proposed in the paper. The numerical simulation of fluid dynamics showed that the surface of liquid column changing with the distance at the beginning. The correlation of  $L_b/d = 2.84We^{0.694}$  can be used to predict the liquid column's break length.

**Key words** gas-liquid cross flow; gas purify; numerical simulation