

# 海水脱硫散堆填料塔的流体力学计算

高梅杉<sup>1</sup>, 王小明<sup>2</sup>, 王世和<sup>1</sup>, 郭明春<sup>3</sup>

- (1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;  
2. 中国国电集团公司 国电环境保护研究院, 江苏 南京 210013;  
3. 上海霍林化工设备工程有限公司, 上海 200127)

**摘要:**采用体积平均法建立了描述散堆填料塔内气、液两相的流动模型;通过数值计算,获取了在不同液气比下塔内流体速度、孔隙率分布及压力分布,并就压力损失与实验值进行了对比,预测值与实验值吻合较好,趋势完全一致。分析海水速度分布图发现,靠近壁面处存在显著的壁流现象,并在沿流方向上液体有向壁区积聚的趋势,壁流现象变得更严重。由3种填料径向孔隙率分布图可看出,近壁面处的孔隙率明显高于中间区域,这是形成壁流的原因所在。

**关键词:**海水脱硫;散堆填料;流体力学计算

中图分类号:X01;TD849

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2011)03-0052-05

海水脱硫是以天然海水作为吸收剂脱除烟气中SO<sub>2</sub>的湿法脱硫技术,是海水直接利用的一个重要领域。海水烟气脱硫工艺的应用研究已经进行了约30 a,20世纪80~90年代有了快速增长。目前,关于海水脱硫的研究主要集中于提高脱硫效率、简化设计、减小设备尺寸、降低设备投资、降低运行费用以及排放海水对脱硫效率影响方面,对海水脱硫散堆填料的流体计算及传热方面的研究较少。国内外众多学者对散堆填料塔或固定床内的流体流动进行了实验及模型研究<sup>[1-4]</sup>,认为只有将正确的速度分布模型嵌入到填料塔或固定床的传热、传质过程设计模拟中,才能得到正确的浓度、温度场<sup>[5-6]</sup>。因此,对填料塔以及固定床内流体流动分布的实验及理论研究一直是科研人员的重要研究内容。由于散堆填料塔内填料床层结构的不均匀性<sup>[7-9]</sup>以及塔壁的共同作用,流体(尤其是液相)的流动远离活塞流假设<sup>[10-13]</sup>,使得大直径填料塔的工业设计、应用受到限制。尽管文献上提供了许多描述散堆填料塔内液相流动分布的数学模型<sup>[14-17]</sup>,

但都是纯经验的,不能正确描述液相分布。笔者以国电环境保护研究院在秦皇岛热电厂的中型海水脱硫试验塔为模型,采用3种工业型填料进行了大量的海水脱硫变工况实验,以实验中测量的压损数据拟合获得3种填料的干损及湿损公式。在平均体积法的基础上,将Brinkman方程与上述获得的压损方程相结合,并用孔隙率分布函数替代Ergun方程中的平均孔隙率,建立流体力学模型,获得海水在填料塔内表观流速的径向分布。由于计算流体力学相比于实验研究更经济、省时,可以更直观、详细地给出温度场的分布信息,因此对海水脱硫填料塔的流体计算进行研究可以深入了解海水脱硫中流场对传热传质的影响,同时可以以较低的成本进行变参数、变工况测试,为工程设计提供依据。

## 1 模型的建立

模型基本假设:①液相在散堆填料塔内流动为稳态的、轴对称;②流体不可压缩;③气体为活塞流运动。

收稿日期:2011-03-01

基金项目:国家863计划(2007AA061801)

作者简介:高梅杉(1975—),女,江西南丰人,东南大学博士研究生,主要从事煤炭转化过程中污染物的脱除控制研究。E-mail:sandy\_gms@163.com

根据体积平均连续性方程及体积平均动量守恒方程式建立流体力学模型<sup>[18]</sup>。模型中散堆填料床的孔隙率分布函数采用式(1)的关联式进行计算<sup>[19]</sup>。

$$\gamma = \gamma_{\infty} + \frac{1-\gamma_{\infty}}{2} \text{Er} \left[ (1-0.3P_d) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{c_r+1.6\text{Er}^2} \frac{R-r}{P_d d_p}\right) + 0.3P_d \right] \quad (1)$$

液相总持液量  $h_L$  等于液相静持液量  $h_s$  以及液相动持液量  $h_d$  之和。采用 Engel 的关联式计算静持液量  $h_s$ ，采用 Stichlmair 关联式计算动持液量  $h_d$ <sup>[20-21]</sup>。

$$h_s = 0.033 \exp\left(-0.22 \frac{g \rho_L}{\sigma_L a_T^2}\right) \quad (2)$$

$$h_d = 0.555 \times \left(\frac{a_T U^2}{g \gamma^{4.65}}\right)^{1/3}$$

体积平均动量守恒方程中<sup>[18]</sup>的  $F_{LS}$  代表散堆填料施加给液体的阻力,  $F_{LG}$  为气液两相流动时气液两相间的相互作用力。

根据填料表面被液体完全覆盖的假设, 可以采用 Ergun 提出的半经验公式计算填料对液体流动造成的阻力  $F_{LS}$ 。

公式中的 2 个常数分别取为  $A=150, B=1.75$ 。

至于气液两相流动时气液两相间的相互作用力  $F_{LG}$  的计算, Robbins 根据大量实验数据总结出气体通过湿填料塔时总压力  $\Delta P_t$  可表示为<sup>[22]</sup>:

$$\Delta P_t = \Delta P_d + \Delta P_L \quad (3)$$

式中,  $\Delta P_d$  为干填料时气体压力降,  $\Delta P_L$  为存有液体时气液间相互作用导致的压力降。

气液间的相互作用力  $F_{LG}$  可以表示为:

$$F_{LG} = \frac{\Delta P_L}{|U_{slip}|} U_{slip} \quad (4)$$

其中, 滑移速度  $U_{slip} = U_G - U_L$ 。

## 2 模拟过程

图 1 为散堆填料塔计算区域示意, 整个区域为轴对称结构, 塔顶、塔底分别为海水入口和烟气入口条件, 右边界为墙壁条件。塔顶设为海水入口, 塔底为海水出口, 在塔顶设置海水初始温度, 塔底分别设置烟气初始温度及  $\text{SO}_2$  的初始浓度。由于在软件中不能设置重叠边界(既为海水入口, 同时又是烟气出口), 需要应用 UDS (User Defined Scalar) 进行处理。添加 3 个 UDS 分别求解  $\text{SO}_2$  浓度变化、海水

温度及烟气温度控制方程。FLUENT 中标量方程的通式为:

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( F_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} \quad (k=1, \dots, N_{\text{scalars}}) \quad (5)$$

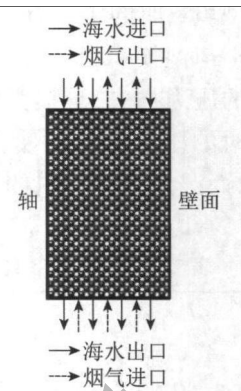


图 1 散堆填料塔计算区域示意

### (1) 塔顶

塔顶处设置为速度进口边界, 需定义海水速度及湍流特性参数。海水速度由实验中所测海水流量而得, 湍流特性参数由下列经验公式得出。

$$k_{in} = 0.003 U_{in}^2(r) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{in} = 0.09 \frac{k_{in}^{1.5}}{d_H} \quad (7)$$

式中, 散堆填料水力直径  $d_H$  表示为  $d_H = \frac{4\gamma_{\infty}}{a_T(1-\gamma_{\infty})}$ 。

对于烟气温度与  $\text{SO}_2$  浓度方程的求解, 在此边界上取充分发展条件, 设定海水的入口温度。

### (2) 塔底

对海水流动方程, 此边界设为压力出口边界, 规定此处的静压值。为求解添加的 3 个 UDS 方程, 需要在此边界上规定  $\text{SO}_2$  的初始浓度值、烟气的初始温度, 并认为海水温度在此处充分发展。

### (3) 对称轴

在对称轴边界上, 所有变量的径向能量变化率为 0, 即  $\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$ 。

### (4) 墙壁条件

墙壁处认为无滑移边界, 即速度、湍动能及湍动能耗散率都等于 0。采用标准壁面函数计算近壁区的速度及湍流变量的分布。

## 3 模拟结果

采用 3 种填料作为研究对象, 分别为空心球填料、雪花环填料和蜂窝环填料。它们的特性参数见

表1。由于所研究的填料为工业型填料,不能应用已有的经验公式来获得总压损。在实验中测量了应用3种不同散堆填料时,一定的气体流量下不同液气比的气体压力损失,根据这些数据可以得出气体通过这几种类型填料时的压力损失特性。气体总压力损失分为干损与湿损2个部分,干损即为气体流过干填料床时的压力损失,湿损为气体流过被海水浸湿的填料床时的压力损失。对于3种不同填料,认为干损相等,而湿损随着填料的变化会发生相应的改变。

表1 填料特性参数

填料名称	尺寸规格/mm	比表面积/( $m^2 \cdot m^{-3}$ )	孔隙率	堆重/( $kg \cdot m^{-3}$ )	堆积个数/( $个 \cdot m^{-3}$ )
多面球	$\phi 50 \times 50 \times 1.5$	237	0.90	82.8	11500
雪花环	$\phi 90 \times 34 \times 1.5$	138	0.97	49.0	4900
蜂窝环	$\phi 88 \times 22 \times 1.25$	142	0.92	67.0	5500

在直径为1.2 m,床高0.6 m的雪花环填料塔上,分别测量了不同烟气流速时,气体流过干床的压力损失,表2为不同烟气流速下烟气流经雪花环填料的单位长度压力损失测量值,对表2的数据按照 Ergun 公式进行拟合,图2为此组数据的拟合图。此干压损公式同样适应于其它2种填料。

表2 雪花环填料干床压力损失测量值

烟气流速/( $m \cdot s^{-1}$ )	单位长度压损/( $Pa \cdot m^{-1}$ )
1.46	24.3
2.16	31.2
2.36	70.7
2.75	173.8
3.50	188.9

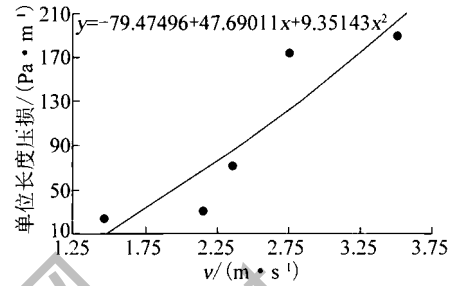


图2 雪花环填料干床压力损失随速度分布

向填料塔内通入海水之后,由于海水流过填料塔内孔隙会造成烟气压力损失的大幅提高,因此还需计算出填料塔在不同液气比操作条件下烟气流动的压力损失。图3为根据实验数据拟合出的填料塔湿床烟气压损与液气比的关系,其中雪花单位湿压损的计算公式为: $y = 139.84 \exp(x/5.465) - 166.2$ ,此公式同样适用于蜂窝环填料。而多面球单位湿压损的计算公式为: $y = 357.2 \exp(x/7.737) - 213.54$ , $x$ 为液气比, $y$ 为单位长度上压力损失。

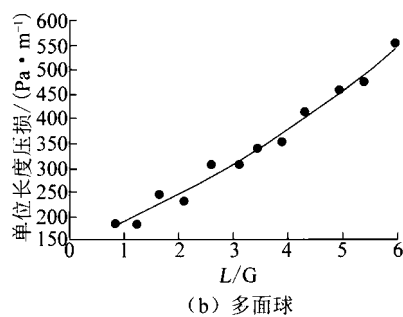
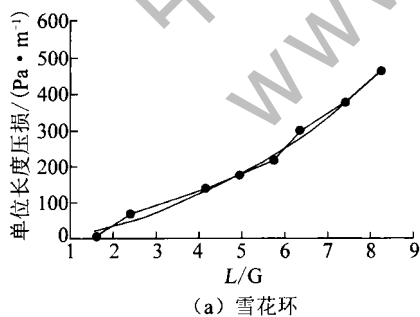


图3 单位湿压损与液气比的关系

### 3.1 压 损

图4为在不同液气比下,压力损失的预测值与实验值对比。图4(a)为雪花环填料高度为0.6 m,烟气流速11000  $m^3/h$ 时,在不同液气比下烟气压力损失的对比;图4(b)为多面球填料高度为1.2 m,烟气流速12000  $m^3/h$ 时,不同液气比下烟气压力损失的对比;图4(c)为蜂窝环填料高度为1.2 m,烟气流速12000  $m^3/h$ 时,不同液气比下烟气压力损失

的对比。

从图4中可看出,压损数值计算结果与测试结果吻合较好,预测值与实验测量值略有偏差,这是由于实验测量的压损值是取进出口中心处的压强计算,而预测值是取进出口的平面加权平均值计算。预测值与测试值的趋势完全一致,说明以实验数据进行拟合获得压损公式进行数值模拟计算的方法是可行的。

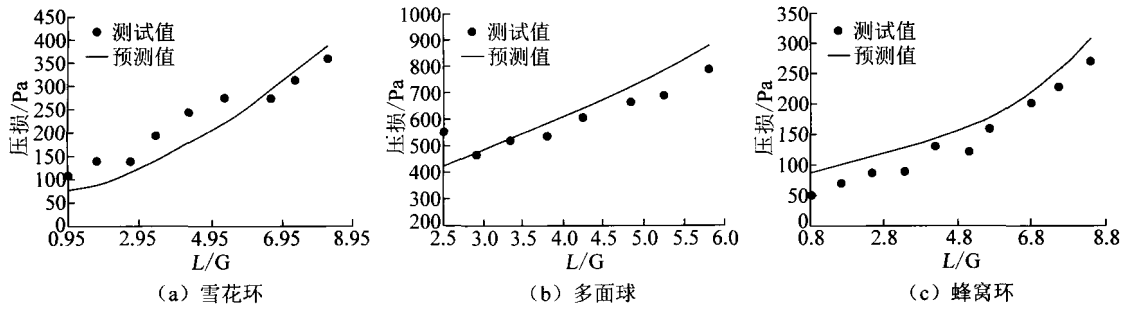


图4 压力损失的预测值和实验值对比

### 3.2 海水速度分布

图5为填料塔中间高度断面上的速度分布。从图5可看出,靠近壁面处存在显著的壁流现象,并且沿着液体的流动方向上,液体有向塔壁区附近积聚的趋势,壁流现象变得更严重。

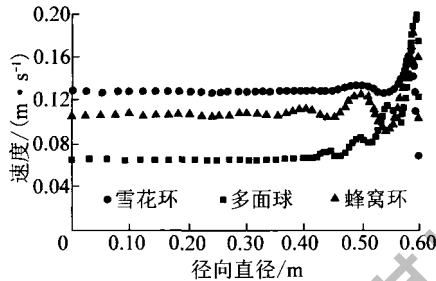


图5 中间高度断面速度分布

图6为径向方向上的孔隙率分布,由图6可看出,在靠近壁面处的孔隙率明显高于中间区域,这是形成壁流的原因所在。且孔隙率从壁面处开始呈周期性下降,在塔中心部位孔隙率保持为技术参数的数值。从图5可看出,横截面上的速度在近壁面处最大,径向方向上呈周期性下降,而在塔的中间部位速度值基本相同。

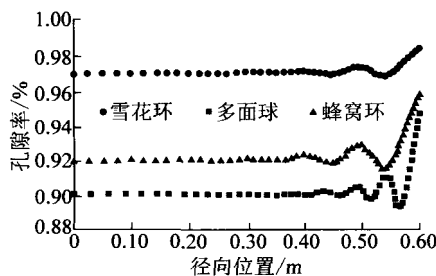


图6 径向孔隙率分布

## 4 结 论

(1)采用体积平均方法,建立了描述散堆填料塔内气、液两相的流动模型。模型中忽略了对烟气流动的数值求解,假设气体在塔内为活塞流运动,

且海水不可压缩。在基于3种不同填料的实验测试研究上,建立描述各自填料床内烟气流动的干损和湿损,压损模型计算结果与实验结果能较好地吻合。

(2)根据应用3种填料塔内海水在填料塔中间高度断面上的速度分布,发现靠近壁面处存在显著的壁流现象,并且沿着液体的流动方向上,液体有向塔壁区附近积聚的趋势,壁流现象变得更严重。

(3)根据3种填料径向方向上的孔隙率分布可看出靠近壁面处的孔隙率明显高于中间区域,这是形成壁流的原因所在。

### 参考文献:

- [1] Arno de Klerk. Voidage Variation in packed beds at small column to panicle diameter ratio [J]. AICHE Journal, 2003, 49(8): 2022-2029.
- [2] Ahmad Shariat, John G. Kunesh. Packing Efficiency Testing on a Commercial Scale with Good (and Not So Good) Reflux Distribution [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1995, 34(4): 1273-1279.
- [3] Papageorgiou J. N., Froment G. F.. Simulation models accounting for radial voidage profiles in fixed-bed reactors [J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(19): 3043-3056.
- [4] Daszkowski T., Eigenberger G.. A reevaluation of fluid flow, heat transfer and chemical reaction in catalyst filled tubes [J]. Chemical Engineering Science, 1992, 47(9-11): 2245-2250.
- [5] Froment G. F., Bischoff K. B.. Chemical reactor analysis and design [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1990.
- [6] Kister H. Z.. Distillation design [M]. New York: McGraw-will Inc., 1992.
- [7] Kufner R., Hofmann H.. Implementation of radial porosity and velocity distribution in a reactor model for heterogeneous catalytic gasphase reactions (TORUS - Model) [J]. Chemical Engineering Science, 1990, 45(8): 2141-2146.

- [8] Giese M., Rottschäfer K., Vortmeyer D.. Measured and modeled superficial flow profiles in packed beds with liquid flow[J]. *AIChE Journal*, 1998, 44(2):484-490.
- [9] Mueller G. E.. Radial void fraction distributions in randomly packed fixed beds of uniformly sized spheres in cylindrical containers[J]. *Powder Technology*, 1992, 72(3):269-275.
- [10] Toye D., Marchot P., Crine M., et al. Local measurements of void fraction and liquid holdup in packed columns using X-ray computed tomography[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1998, 37(6):511-520.
- [11] Saleh S., Thovert J. f., Adler P. M.. Flow along porous media by particle image velocimetry [J]. *AIChE. Journal*, 1993, 39(11):1765-1776.
- [12] Lamine A. S., Colli Serrano M. T., Wild G.. Hydrodynamics and heat transfer in packed beds with liquid upflow [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 1992, 31(6):385-394.
- [13] Marchot P., Toye D., Crine M., et al. Investigation of liquid maldistribution in packed columns by x-ray tomography [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, 77(6):511-518.
- [14] Mantle M. D., Sederman A. J., Gladden L. F.. Single- and two-phase flow in fixed-bed reactors: MRI flow visualization and lattice-Boltzmann simulations [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(2):523-529.
- [15] Sederman A. J., Johns M. L., Bramley A. S., et al. Magnetic resonance imaging of liquid flow and pore structure within packed beds [J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(14):2239-2250.
- [16] Jaekeun Park, Stephen J. Gibbs. Mapping flow and dispersion in a packed column by MRI [J]. *AIChE Journal*, 1999, 45(3):655-660.
- [17] 张泽廷, 王树楹, 余国琮. 填料塔传质模型的研究——二维混合池随机模型[J]. *化工学报*, 1989, 40(1):53-59.
- [18] 刘国标. 计算传递学及其在填料床传质与反应过程中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [19] Liu S. J.. A continuum model for gas-liquid flow in packed towers [J]. *Chemical Engineering Science*, 2001, 56(21-22):5945-5953.
- [20] Engel V., Stichmair J., Geipel W. New model to predict liquid holdup in packed columns-using data based on capacitance measurement techniques [J]. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series*, 1997, 142(2):939-947.
- [21] Stichmair J., Bravo J. L., Fair J. R.. General model for prediction of pressure drop and capacity of countercurrent gas/liquid packed columns [J]. *Gas Separation and Purification*, 1989, 3(1):19-28.
- [22] Robbins L. A.. Improve pressure-drop prediction with a new correlation [J]. *Chemical Engineering Progress*, 1991, 87(5):87-90.

## CFD in random packing columns within seawater desulfurization

GAO Mei-shan<sup>1</sup>, WANG Xiao-ming<sup>2</sup>, WANG Shi-he<sup>1</sup>, GUO Ming-chun<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Power Environmental Protection Research Institute, China Guodian Co., Nanjing 210013, China;

3. Shanghai Huolin Engineering Plastics Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

**Abstract:** Gas-liquid two-phase flow CFD model is established to describe the random packing column in seawater desulfurization with the method of volume average. Through numerical calculation, the flow velocity, porosity distribution and pressure distribution of seawater are obtained. Pressure loss are compared with experimental data, the predictive value and experimental value are well consistent, both have the same developing trend. Combination of seawater velocity vector in packed columns and velocity profile of the section on the middle high of the paced tower is analyzed, and find that there is a significant “wall flow” phenomena, and there is an accumulating trend near the wall along the direction of the liquid flow, and the “wall flow” becomes much more serious. According to the chart of the three kinds of filler porosity distribution on the radial direction, can see that porosity near the wall is significantly higher than the porosity of the middle region, indicate that this is the reason for the formation of “wall flow”.

**Key words:** seawater desulfurization; random packing columns; CFD