

## CFD simulation of hydrogen sulfide gas absorption process in Venturi scrubber

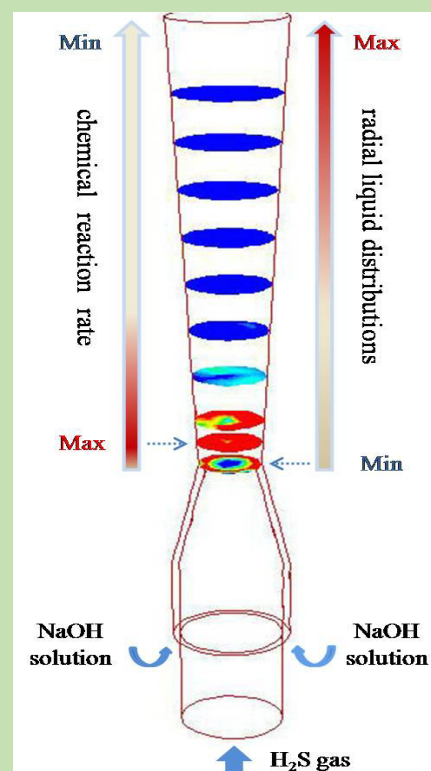
Shuai YANG<sup>1</sup>, Xiangdi ZHAO<sup>1</sup>, Yinmou XU<sup>1,2</sup>, Zheng WANG<sup>1</sup>, Jiwu YUAN<sup>1</sup>, Wanfu SUN<sup>1\*</sup>

1. SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, State Key Laboratory of Safety and Control for Chemicals, Qingdao, Shandong 266071, China

2. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China

**Abstract:** Venturi scrubbers are widely applied in gas adsorption and industrial dedusting fields as they have advantages of simple structure, high efficiency and convenient operation. Nowadays, computational fluid dynamics (CFD) method has become a more efficient and useful tool to explore the gas liquid flow characteristics and mass transfer process in Venturi scrubbers as the development of computing ability. Based on the process of hydrogen sulfide gas absorption by sodium hydroxide solution in a self-priming Venturi scrubber, the injection ability, mixing degree as well as scrubbing efficiency at different operation conditions were studied by using the two fluid models, the RNG  $k-\varepsilon$  turbulent model and the species transport model in CFD method. The accuracy of simulated injection flow rates were verified by the experimental data. The simulation results showed that, with increase of gas velocity, the injection flow rate increased, but the homogeneity of radial liquid dispersion in the diffuser became worse. The liquid phase was inclined to flow near the wall, which did not benefit for the hydrogen sulfide absorption process. With the increase of the distance above the throat, the velocities of gas and liquid decreased, resulting in more uniform radial liquid dispersion. In the hydrogen sulfide absorption process, the interphase chemical reaction mainly occurred in one fifth of the diffuser above the throat. In this area, the interphase chemical reaction rate increased and then decreased with the increasing distance above the throat. Therefore, the highest chemical reaction rate did not occur at the throat, but at nearly 5% of the diffuser above the throat. As the gas velocity increased, the interphase chemical reaction rate and scrubbing efficiency became higher, while the hydrogen sulfide concentration and scrubbing time decreased. The research findings provided the basis for the optimization of structure parameters and operation conditions in self-priming Venturi scrubbers.

**Key words:** Venturi scrubber; computational fluid dynamics; injection flow rate; multiphase reaction; scrubbing efficiency



收稿: 2018-03-29, 修回: 2018-07-24, 网络发表: 2018-10-16, Received: 2018-03-29, Revised: 2018-07-24, Published online: 2018-10-16  
基金项目: 国家科技支撑计划课题(编号: 2015BAK37B03)

作者简介: 杨帅(1989-), 女, 山东省德州市人, 博士, 工程师, 化学工程专业, E-mail: yangs.qday@sinopec.com; 孙万付, 通讯联系人, E-mail: swf.qday@sinopec.com.

**引用格式:** 杨帅, 赵祥迪, 徐银谋, 等. 文丘里洗涤器内硫化氢气体碱液吸收过程的 CFD 模拟. 过程工程学报, 2018, 18(增刊 1): 103-110.  
Yang S, Zhao X D, Xu Y M, et al. CFD simulation of hydrogen sulfide gas absorption process in Venturi scrubber (in Chinese).  
Chin. J. Process Eng., 2018, 18(S1): 103-110, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.20180105.

# 文丘里洗涤器内硫化氢气体碱液吸收过程的 CFD 模拟

杨 帅<sup>1</sup>, 赵祥迪<sup>1</sup>, 徐银谋<sup>1,2</sup>, 王 正<sup>1</sup>, 袁纪武<sup>1</sup>, 孙万付<sup>1\*</sup>

1. 中国石化青岛安全工程研究院化学品安全控制国家重点实验室, 山东 青岛 266071

2. 青岛科技大学机电工程学院, 山东 青岛 266042

**摘 要:** 采用双流体模型、RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和组分输运模型对不同工况下自吸式文丘里洗涤器内 NaOH 溶液洗消 H<sub>2</sub>S 气体的引射能力、气液混合度和洗涤效率进行数值模拟, 对引射量的模拟结果进行了实验验证。结果表明, 在气液流动过程中, 随气速增大, 自吸式文丘里洗涤器引射量增大, 洗涤器扩大段内液相径向分布均匀性减弱, 液相倾向于贴壁流动。距喉部越远, 气液速度越低, 液相径向分散越均匀。在 H<sub>2</sub>S 碱液吸收过程中, 气液相间化学反应主要集中于喉部至喉部上方扩大段长度 1/5 区域内, 反应速率随距喉部距离增加先升高后降低。最大反应速率在喉部上方扩大段长度 5% 处。随气速增大, 扩大段内气液相间化学反应速率提高, 洗涤器出口处 H<sub>2</sub>S 浓度降低, 洗涤效率增大, 洗涤时间缩短。

**关键词:** 文丘里洗涤器; 计算流体力学; 引射量; 多相反应; 洗涤效率

**中图分类号:** TQ086      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2018)S1-0103-08

## 1 前 言

文丘里洗涤器作为一种湿式洗涤器具有结构简单、净化效率高、操作方便等优点, 在气体吸收和工业除尘领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。根据液体注入方式的不同, 文丘里洗涤器分为自吸式和喷液式<sup>[2]</sup>。自吸式文丘里洗涤器通过气流在喉部加速形成低压将附近液体引射入文丘里洗涤器内, 引射量与操作条件及结构参数有关。喷液式文丘里洗涤器通过外加动力将液体喷入文丘里洗涤器内, 液体流量可以独立调节。相比于喷液式, 自吸式文丘里洗涤器具有非能动特性, 可减少动力设备, 在核电厂的安全系统中得到广泛应用<sup>[3]</sup>。

目前对文丘里洗涤器的研究多集中在喷液式, 对自吸式的研究较少, 相关报道主要集中在压力损失、引射特性和洗涤效率等方面。段振亚等<sup>[4]</sup>在考虑气体摩擦压力损失和扩散段液滴减速压力回收的基础上, 通过理论分析推导出文丘里洗涤器压力损失计算模型, 并在一定液气比和喉管气速下进行了模型验证。段振亚等<sup>[5]</sup>在考虑压力损失的基础上, 定性分析了操作条件对文丘里洗涤器脱硫性能的影响。文献<sup>[3,6,7]</sup>对自吸式文丘里洗涤器的引射特性及其影响因素进行了研究, 发现引射量主要与吸液口两侧静压差、截面积、高度差及液相流动通道的阻力系数有关。自吸式文丘里洗涤器对气凝胶颗粒的洗涤效率与液体引射量、喉部气速及结构参数有关<sup>[8,9]</sup>。Gulhane 等<sup>[10]</sup>采用实验方法对碘颗粒在自吸式文丘里洗涤器的洗涤过程进行研究, 分析了洗涤液 pH 值对洗涤效率的影响。Mayinger 等<sup>[11]</sup>定性分析了气体速度、液位高度、颗粒直径和液体进口数对自吸式文丘里洗涤器除尘效率的影响。上述研究多针对物

理吸收或洗涤过程, 研究结果多为定性分析, 相关成果及规律并不能应用在基于化学反应过程的有毒气体的洗消方面。由于有毒气体洗消过程危险性大, 实验风险性高, 目前实验数据较少, 无法对其进行系统研究。

近年来 CFD 方法日趋成熟, 与传统实验方法相比省时省力, 且可获得实验中难以采集的数据, 采用 CFD 方法研究自吸式文丘里洗涤器成为新趋势<sup>[12-15]</sup>。Horiguchi 等<sup>[12]</sup>采用离散方法对文丘里洗涤器内的气液流动进行模拟, Majid 等<sup>[14]</sup>对文丘里洗涤器的除尘效率进行模拟, Ahmadvand 等<sup>[16]</sup>对文丘里洗涤器内的液滴分布进行了 CFD 模拟, 与实验结果吻合良好, 常加富等<sup>[17]</sup>对文丘里洗涤器的焦油液滴脱除过程进行 CFD 模拟, 并进行了实验验证。目前针对自吸式文丘里洗涤器的 CFD 模拟研究主要集中在气液流动及除尘方面, 缺乏文丘里洗涤器内部化学反应等方面的研究, 现有模型及规律并不能直接应用于有毒气体洗消领域, 开展自吸式文丘里洗涤器内气液流动及化学反应过程的数值模拟十分必要。

本工作主要对自吸式文丘里洗涤器内气液流动和气液化学反应过程进行模拟, 建立相应的动量传递模型和质量传递模型, 并对其引射特性、气液混合度和洗涤效率等进行研究, 分析内部流场及洗涤过程随操作条件的变化规律, 为其结构优化提供理论基础。

## 2 实 验

实验系统如图 1 所示, 由旋涡式气泵、储水仓、文丘里洗涤器、分离器和计量器构成。旋涡式气泵的可调频率为 20~50 Hz, 对应空气流量为 212~530 m<sup>3</sup>/h。操作气速分别为 7.5, 11.25, 15, 16.87 和 18.75 m/s。文丘里洗

涤器由渐缩喷管和外套管构成,分为收缩段、喉部和扩大段,具体尺寸如图 2 所示.其中喉部位于水面以上,且在收缩段(外套管底部)设有吸液口,水面距吸液口的垂直距离为 0.19 m.

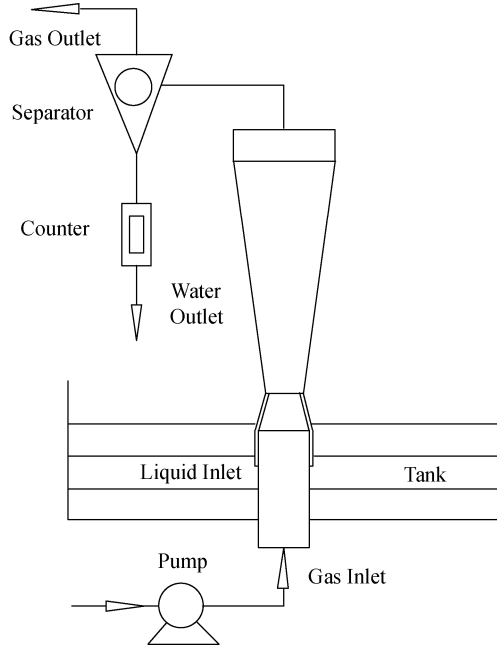


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic of experiment system

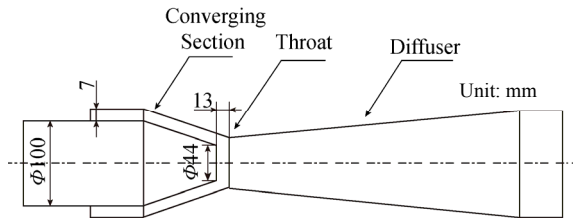


图 2 自吸式文丘里结构

Fig.2 Structure of self-priming Venturi scrubber

气泵开启后,空气通过进气口进入文丘里洗涤器,经收缩段后速度逐渐增加,静压强降低,在压差的作用下储水仓中的水被压入外套管和渐缩喷管之间的流通通道中,在喉部与空气混合,混合物通过扩大段后进入分离器.空气从分离器的出气口排出,水由于重力进入计量器后从出水口排出.实验主要对不同气速下文丘里洗涤器的引射量进行测量

### 3 数值模拟

采用 CFD 软件 Fluent 16.0 对自吸式文丘里洗涤器内气液流动过程和气液相间化学反应过程进行数值模拟,其中气液流动采用空气-水体系,气液相间化学反应过程采用浓度为 0.2vol% 的  $H_2S$  气体和浓度 4wt% 的

NaOH 溶液体系.

#### 3.1 两相流模型

选择双流体模型进行模拟,认为气相和液相是连续的流体,使用欧拉坐标进行描述.

连续性方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g) = \delta_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_l \rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l u_l) = -\delta_m, \quad (2)$$

其中,下标 g 和 l 分别代表气相和液相,  $\varepsilon$  为相体积分,  $\rho$  为密度,  $u$  为真实速度,  $\delta_m$  为相间质量交换速率.

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g u_g) = & -\varepsilon_g \nabla p_g + \\ & \nabla \cdot (\varepsilon_g \tau_g) + \varepsilon_g \rho_g g - \beta_l (u_g - u_l), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_l \rho_l u_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_l \rho_l u_l u_l) = & -\varepsilon_l \nabla p_g - \\ & \nabla p_l + \nabla \cdot (\varepsilon_l \tau_l) + \varepsilon_l \rho_l g - \beta_l (u_g - u_l), \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $p$  为压力,  $\tau$  为切应力,  $\beta$  为相间动量交换系数.

$$\beta = \frac{F_D \varepsilon_g}{(u_g - u_l)}, \quad (5)$$

式中,  $F_D$  为气液相间曳力,  $u_g$  为气相速度,  $u_l$  为液相速度.

文丘里洗涤器内气液流动呈现湍流状态,气液旋流度高,选择 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为湍流模型,近壁处理选择标准壁面方程.

#### 3.2 传质模型

应用最广泛的气液反应传质模型为双膜理论<sup>[18]</sup>,该理论假定气液界面两侧各存在一个静止膜,传质阻力完全集中于膜内;通过气膜的溶质均通过液膜,膜内无积累;溶质通过界面时无阻力,在气液相界面上,气体在液体中的浓度与其在气相中的浓度瞬间达到平衡;膜外气体和液体被充分搅拌,浓度均匀.气膜和液膜内的扩散速率计算如下:

$$N_g = k_g (p_{Ag} - p_{AE}), \quad (6)$$

$$N_{Al} = k_l (C_{Ai} - C_{Al}), \quad (7)$$

其中,  $k_g$  和  $k_l$  为气相传质系数和液相传质系数,  $C_{Ai}$  为平衡组分浓度,  $p_{AE}$  和  $p_{Ag}$  分别为气相平衡分压和气相主体分压.

如果在液相侧发生化学反应,需引入化学反应的增强因子  $E$  表示化学反应对吸收速率的影响,液膜内的扩散速率如下:

$$N_{Al}=Ek_1(C_{AE}-C_{Al}), \tag{8}$$

增强因子  $E$ :

$$E=\frac{k}{k_0}=\frac{N}{N_0}, \tag{9}$$

其中,  $k$  和  $N$  分别为传质系数和传质率, 下标 0 表示无化学反应时的值.

气液反应的总吸收速率方程为

$$N_A=K_g(p_A-p_{AE})=Ek_E(C_{AE}-C_{Al}), \tag{10}$$

$$\frac{1}{K_g}=\frac{1}{k_g}+\frac{H}{Ek_1}, \tag{11}$$

其中,  $K_g^{-1}$  为总传质阻力,  $k_g^{-1}$  为气相传质阻力,  $H/Ek_1$  为化学吸收的液相传质阻力.

3.3 化学反应模型

Fluent 软件中气液吸收过程中的化学反应过程模拟通过在气液流场模拟基础上添加组分输运模型实现. NaOH 溶液与 H<sub>2</sub>S 气体的反应过程及速率方程<sup>[19,20]</sup>如表 1 所示.

表 1 化学反应参数设置  
Table 1 Chemical reaction parameters setup

Chemical reaction	Equation of Chemical reaction rate/[mol/(L·s)]	Arrhenius rate		
		Pre-exponential factor/[m <sup>3</sup> /(kmol·s)]	Activation energy/[J/(kg·mol)]	Temperature exponent
H <sub>2</sub> S+NaOH=NaHS+H <sub>2</sub> O	$r=k_1C_{H_2S}C_{NaOH}$	$2.7\times10^9$	0	1
NaHS+NaOH=Na <sub>2</sub> S+H <sub>2</sub> O	$r=k_2C_{NaHS}C_{NaOH}$	$1\times10^{10}$	0	1

3.4 边界条件及参数设置

文丘里洗涤器的边界条件设置如图 3 所示, 气体进口和液体进口为压力入口, 顶部气液出口为压力出口, 具体边界条件及初始条件如表 2 所示, 其它模拟参数如表 3 所示.

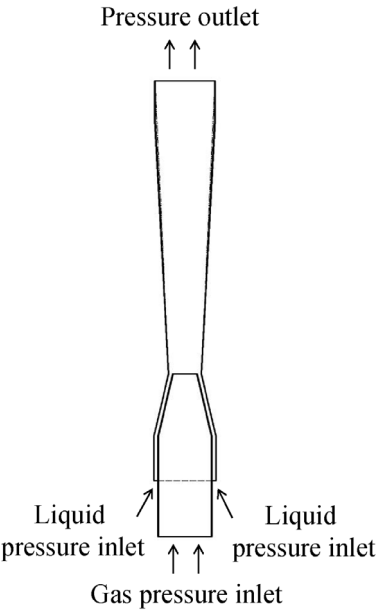


图 3 文丘里洗涤器边界条件设置  
Fig.3 Boundary conditions of the Venturi scrubber

3.5 网格无关性检验

为避免网格尺寸对模拟结果产生影响, 需进行网格无关性检验. 文丘里洗涤器的几何模型和网格绘制由前处理软件 Gambit 2.4.6 生成, 网格采用四面体非结构化网格. 在外套管环隙和壁面处采用间距为 3.5 mm 的

网格, 其余部分分别采用间距为 10 和 15 mm 的四面体网格, 对应网格数分别为 34890 和 13298. 工况气速为 18.75 m/s, 采用上述两种网格对文丘里洗涤器内气液流场进行模拟, 引射量随迭代的变化如图 4 所示. 由图可知, 流场稳定后两种网格计算的引射量几乎相同, 考虑计算的准确性和耗时性, 选择网格间距为 15 mm 的四面体网格作为计算网格.

表 2 边界条件及初始条件  
Table 2 Boundary conditions and initial conditions

Parameter		Value
Boundary condition	Gas pressure inlet	782.5 Pa (7.5 m/s)
		1853.52 Pa (11.25 m/s)
		3253.2 Pa (15 m/s)
		4074 Pa (16.87 m/s)
		4895.2 Pa (18.75 m/s)
Initial condition	Liquid pressure inlet	1862 Pa
	Pressure outlet	0 Pa
	H <sub>2</sub> S concentration	0.2vol%
	Concentration of NaOH solution	4wt%
	Distance between water surface and liquid inlet	0.19 m

表 3 数值模拟参数  
Table 3 Numerical simulation parameters

Parameter	Value
Restitution coefficient between solid particle	0.9
Under relaxation factor	0.3 for pressure, 0.2 for momentum, 0.2 for volume fraction and turbulent kinetic energy
Time step size/s	0.001
Max number of iterations per time step	30
Convergence criteria	0.001

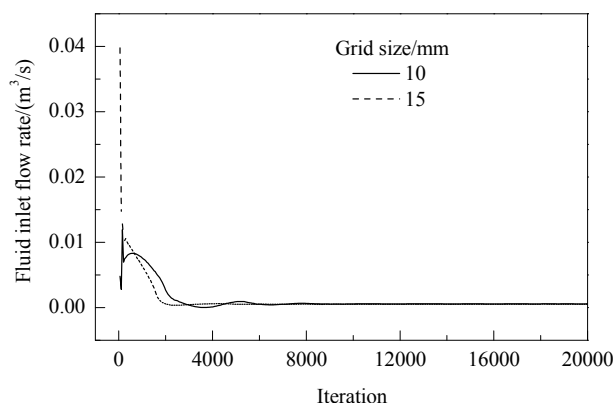


图 4 不同网格尺寸下引射量随迭代的变化

Fig.4 Comparison of injection flowrate of the Venturi scrubber in different grid resolutions

## 4 结果与讨论

### 4.1 气液流动特性

图 5 为实验拍摄的不同气速下文丘里洗涤器内气液流动图, 液体被喉部气体产生的负压吸入文丘里洗涤器内, 在喉部与气体混合并部分雾化为小液滴, 被气体夹带至顶部扩大段出口。随气速增加, 文丘里管内液体所占比例越来越高, 顶部出口处液体喷出量也越来越多。由于该透明文丘里洗涤器为三维模型, 实验中很难观察到其内部剖面的气液流动状态, 因此需采用 CFD 方法对文丘里洗涤器内部的气液流动状态进行研究。图 6 为

文丘里洗涤器中心剖面处不同气速下液相体积分布云图, 与图 5 显示的规律相同, 气速增加, 引射量增大。为验证模拟的准确性, 将不同气速下引射量模拟值与实验值进行对比, 如图 7 所示, 二者基本吻合, 在气速较低时误差稍大, 且略高于实验值, 原因在于实验时, 液位由于水流被抽入文丘里洗涤器而不断降低, 而模拟时为简化模型使液位保持不变, 因此引射量略高于实际值。

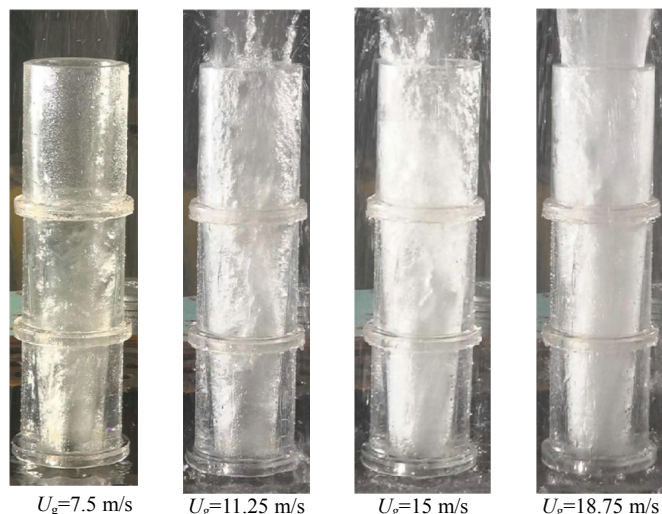


图 5 不同气速下文丘里洗涤器内气液分布

Fig.5 Gas-liquid flow pattern in the Venturi scrubber under different gas velocities

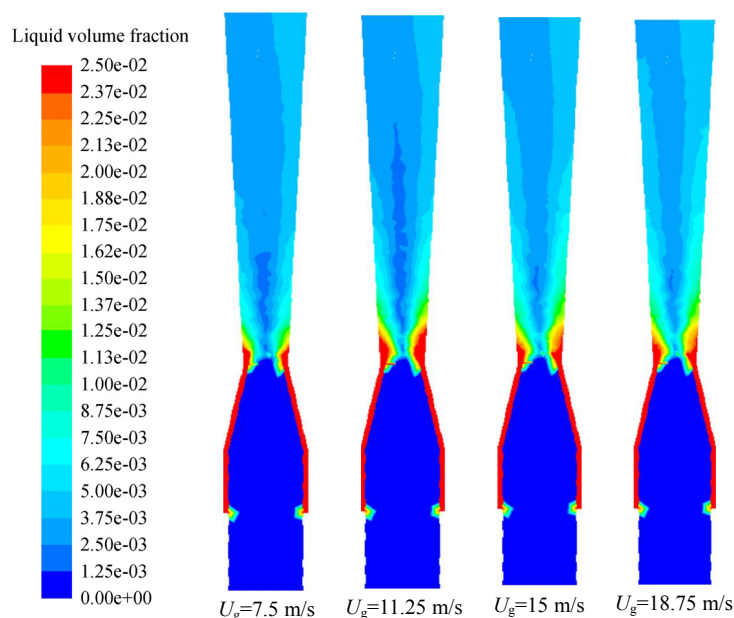


图 6 不同气速下文丘里洗涤器中心剖面处液相体积分数分布

Fig.6 Contours of liquid volume fraction distributions in central cross-section of the Venturi scrubber under different gas velocities

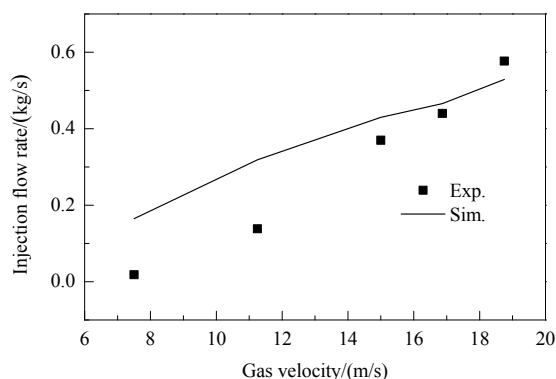


图 7 不同气速下引射量模拟值与实验值对比

Fig.7 Comparison of simulation results and experimental data of injection flow rate in the Venturi scrubber under different gas velocities

文丘里洗涤器扩大段内气液分布的均匀性对洗涤效率有较大影响,为定量研究气速对扩大段气液分布均匀性的影响,选取距喉部高度为  $H=0.1, 0.2, 0.3$  和  $0.4$  m 处的水平截面,分析不同截面液相体积分数径向分布结果如图 8 所示.由图可知,液相体积分数随气速增大而增大,但径向分布均匀性逐渐变差,气速增至  $15$  m/s 后,其均匀性变化很小.随距喉部距离增加,液相体积分数径向分布逐渐变均匀,原因在于气速增加,扩大段中液体从边壁处流向中心处的阻力增大,液体更倾向靠近扩大段边壁流动.距喉部越远,截面直径越大,气液速度降低,液相径向分散越均匀.

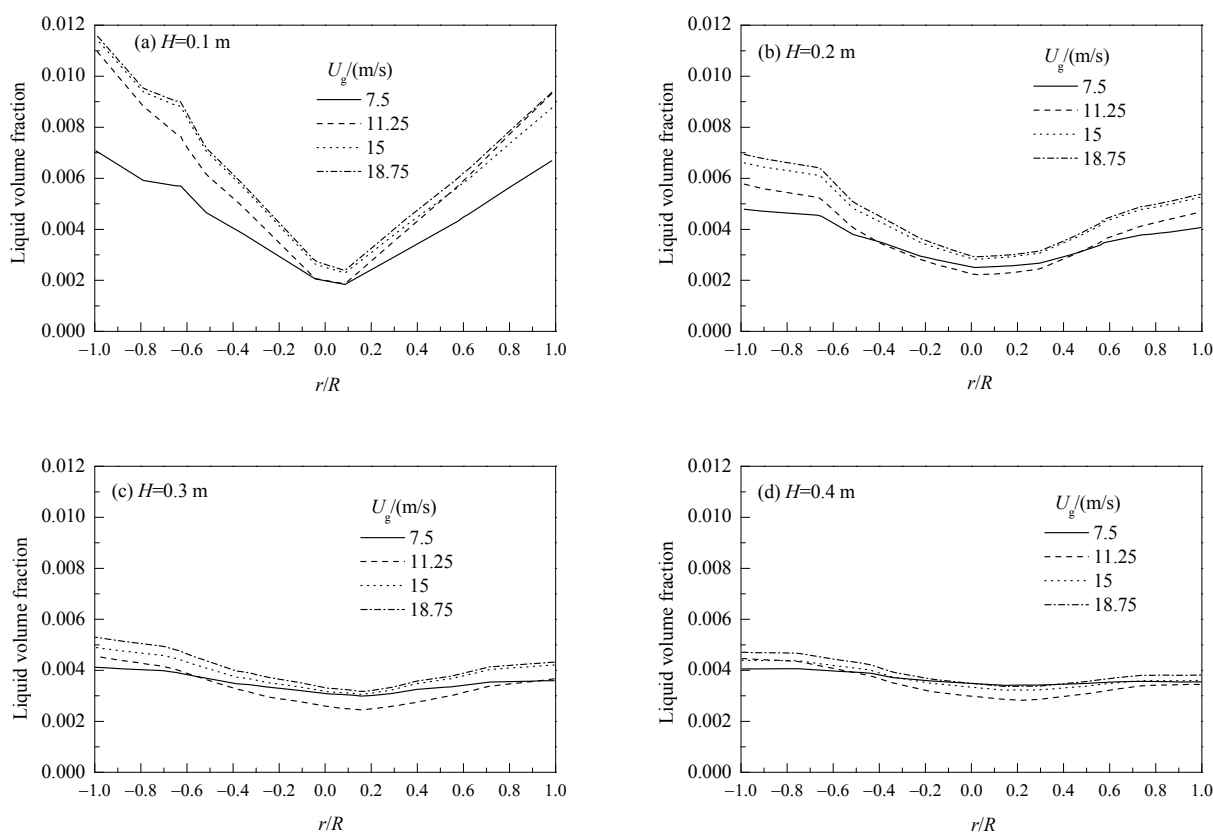


图 8 不同气速下距喉部不同高度处液相体积分数径向分布

Fig.8 Radial liquid volume fraction distributions at different distance above the throat under different gas velocities

#### 4.2 自吸式文丘里洗涤器内气液化学反应特性

图 9 为文丘里洗涤器出口处  $H_2S$  气体浓度随迭代的变化关系.随气速增加,稳定状态下文丘里洗涤器出口处平均  $H_2S$  浓度逐渐减小.由于进口  $H_2S$  气体浓度恒定,气体流量增加,进口处  $H_2S$  总量增加,而出口处  $H_2S$  浓度随气速增大减小,表明洗涤效率随气速增大而增

大.气速为  $11.25$  m/s 时,  $H_2S$  气体浓度随迭代发生脉冲式突增,气速升至  $15$  m/s 后该现象消失,原因可能是低气速时液体引射量随时间呈脉冲式变化(实验中也观测到该现象),引射量较小时,  $H_2S$  气体只有少量被  $NaOH$  溶液吸收,大部分从出口排出,因此会出现  $H_2S$  气体浓度突增的现象.



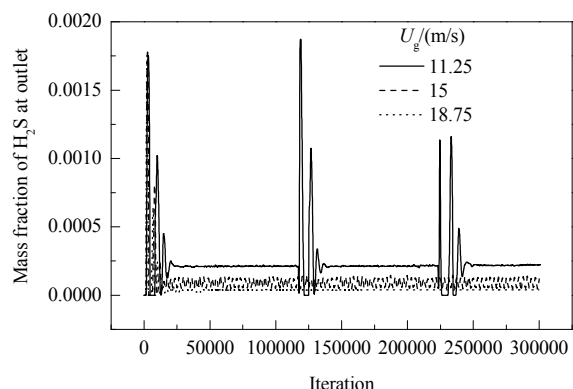


图9 文丘里洗涤器出口处  $\text{H}_2\text{S}$  浓度随迭代的变化  
Fig.9  $\text{H}_2\text{S}$  mass fraction at the outlet across iterations under different gas velocities

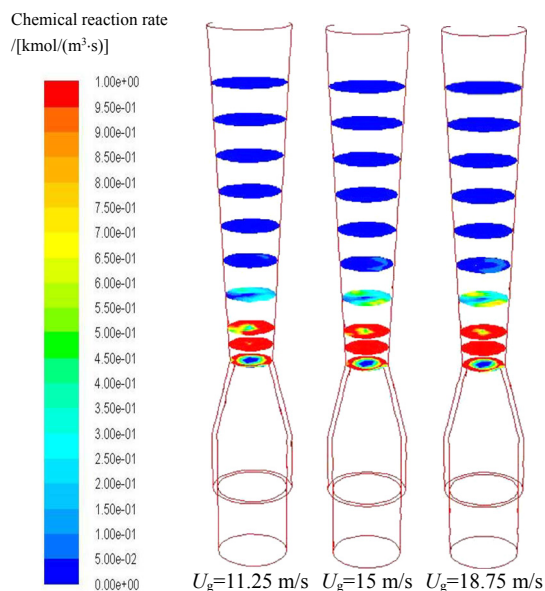


图10 不同气速下文丘里洗涤器内气液相间化学反应速率  
Fig.10 Gas-liquid chemical reaction rate distributions in the Venturi scrubber under different gas velocities

图10 为文丘里洗涤器内气液相间化学反应速率分布云图, 化学反应主要集中于喉部至喉部上方扩大段长度  $1/5$  范围内, 且反应速率随距喉部距离增加先升高后降低. 由于喉部附近气速太高, 液相径向分布不均匀, 喉部截面化学反应速率并不高. 随距喉部距离增加, 气速逐渐减小, 液相径向分布逐渐均匀, 气液接触效率较高, 化学反应速率增加. 与喉部距离增大至一定值后, 气速减小,  $\text{H}_2\text{S}$  气体浓度降低,  $\text{NaOH}$  溶液浓度降低, 化学反应速率减小. 随气速升高, 相间化学反应速率增大, 液体的贴壁流动造成了同一截面上边壁的气液相间化学反应速率明显高于中心区域. 不同于图10中化学反应速率的变化关系,  $\text{H}_2\text{S}$  气体浓度在扩大段内随距喉部距离增加逐渐降低, 如图11所示.

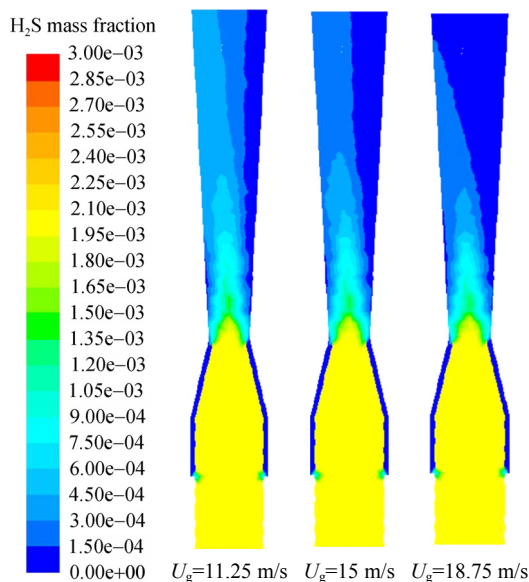


图11 不同气速下文丘里洗涤器内  $\text{H}_2\text{S}$  浓度分布  
Fig.11  $\text{H}_2\text{S}$  mass fraction distribution in the Venturi scrubber under different gas velocities

## 4 结论

采用 CFD 方法对自吸式文丘里洗涤器内的气液流动特性及气液吸收过程进行研究, 得到以下结论:

- (1) 气速  $7.5 \sim 18.75 \text{ m/s}$  下自吸式文丘里洗涤器的引射量随气速升高而增大, 低气速(小于  $11.25 \text{ m/s}$ )时引射量随时间呈脉动式变化.
- (2) 扩大段内液相体积分数径向分布均匀性与气速呈负相关, 与距喉部高度正相关.
- (3) 气液相间化学反应主要集中于喉部至喉部上方扩大段长度  $1/5$  区域内, 反应速率随距喉部距离增加先升高后降低.

(4) 气速越高, 相同高度下气液相间化学反应速率越高, 出口处  $\text{H}_2\text{S}$  浓度越低, 洗涤效率越高.

## 参考文献

- [1] Rudnick S N, Koehler J, Martin K P, et al. Particle collection efficiency in a Venturi scrubber: comparison of experiments with theory [J]. Environmental Science & Technology, 1986, 20(3): 237-242.
- [2] 周艳民, 孙中宁, 谷海峰, 等. 自吸式文丘里洗涤器引射特性及其影响因素 [J]. 化工学报, 2015, 66(1): 99-104.  
Zhou Y M, Sun Z N, Gu H F, et al. Injection performance and influencing factors in self-priming Venturi scrubber [J]. CIESC Journal, 2015, 66(1): 99-104.
- [3] 王盟, 孙中宁, 谷海峰, 等. 自吸式文丘里水洗涤器阻力特性实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46(11): 1353-1356.

- Wang M, Sun Z N, Gu H F, et al. Experimental study of pressure drop characteristics of Venturi scrubber working at self-priming mode [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(11): 1353–1356.
- [4] 段振亚, 胡金榜, 宗润宽, 等. 文丘里洗涤器压力损失计算模型 [J]. 天津大学学报, 2004, 37(10): 863–867.
- Duan Z Y, Hu J B, Zong R K, et al. Prediction model for pressure drop in Venturi scrubbers [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(10): 863–867.
- [5] 段振亚, 张俊梅, 张伟湘. 文丘里洗涤器脱硫性能研究 [J]. 石油化工设备, 2008, 37(1): 24–27.
- Duan Z Y, Zhang J M, Zhang W X. Experimental investigation on the desulfurization characteristics of Venturi scrubbers [J]. Petro-chemical Equipment, 2008, 37(1): 24–27.
- [6] 周艳民, 孙中宁, 谷海峰, 等. 自吸式文丘里水洗器引射特性研究 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(6): 1075–1079.
- Zhou Y M, Sun Z N, Gu H F, et al. Research on injection characteristics of Venturi scrubber worked in self-priming mode [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(6): 1075–1079.
- [7] Zhou Y M, Sun Z N, Gu H F, et al. Structure design on improving injection performance for Venturi scrubber working in self-priming mode [J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 80: 7–16.
- [8] Zhou Y M, Sun Z N, Gu H F, et al. Experimental research on aerosols collection performance of self-priming Venturi scrubber in FCVS [J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 85: 771–777.
- [9] 王盟. 文丘里洗涤器过滤性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 25–38.
- Wang M. Research on filtering characteristics of the Venturi scrubber [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 25–38.
- [10] Gulhane N P, Landge A D, Shukla D S, et al. Experimental study of iodine removal efficiency in self-priming Venturi scrubber [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 78: 152–159.
- [11] Mayinger F, Lehner M. Operating results and aerosol deposition of a Venturi of a scrubber in self-priming operation [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1995, 34: 283–288.
- [12] Horiguchi N, Yoshida H, Abe Y. Numerical simulation of two-phase flow behavior in Venturi scrubber by interface tracking method [J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 210: 580–586.
- [13] Mohebbi A, Taheri M, Fathikaljahi J, et al. Simulation of an orifice scrubber performance based on Eulerian/Lagrangian method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 100(1/3): 13–25.
- [14] Majid A, Yan C Q, Sun Z N, et al. CFD simulation of dust particle removal efficiency of a Venturi scrubber in CFX [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 256: 169–177.
- [15] 朱立博. 矩形截面文丘里洗涤器的数值模拟研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016: 3–4.
- Zhu L B. Research on numerical simulation of rectangular section Venturi scrubber [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016: 3–4.
- [16] Ahmadvand F, Talaie M R. CFD modeling of droplet dispersion in a Venturi scrubber [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 160: 423–431.
- [17] 常加富, 董玉平, 刘庆磊, 等. 文丘里洗涤器净化生物质燃气流场数值模拟及试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 186–192.
- Chang J F, Dong Y P, Liu Q L, et al. Experimental study and numerical simulation on flow field of Venturi scrubber purifying biomass gas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 186–192.
- [18] 范晓丹. 鼓泡反应器中氢氧化钠吸收二氧化碳的数值模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 11–18.
- Fan X D. Numerical simulation of sodium hydroxide absorbing carbon dioxide gas in bubble column [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 11–18.
- [19] 杨兰和, 刘淑琴, 梁杰, 等. 废碱液同时吸收  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{S}$  方法与传质模型的研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 64–68.
- Yang L H, Liu S Q, Liang J, et al. Study on the method of absorbing  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$  simultaneously via waste alkali liquor and the mass transfer model [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 64–68.
- [20] 陈庚良. 硫化氢在碱性介质中吸收的反应机理和动力学 [J]. 天然气工业, 1983, (1): 50–58.
- Chen G L. Reaction mechanism and dynamics of absorption of hydrogen sulphide in alkaline medium [J]. Natural Gas Industry, 1983, (1): 50–58.