

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.008

# 金属丝径大小对液膜流动影响的 CFD 研究

徐 承<sup>1</sup>, 金 浩<sup>2</sup>, 郑钦元<sup>3</sup>, 王熠东<sup>1</sup>, 金伟娅<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 化工机械设计研究所, 浙江 杭州 310014;  
2. 巨化集团公司电化厂, 浙江 衢州 324004; 3. 浙江诚信医化设备有限公司, 浙江 台州 318012)

**摘 要:**精馏过程气液两相流动分布特征对分离效率具有重要影响,为研究金属丝网波纹填料表面液膜流体动力学特性,建立基于 VOF 法的液膜在金属丝网表面上的气—液两相逆流 CFD 模型,并根据液膜流动特点考虑了表面张力动量源项和气液界面作用力动量源项。模拟结果与文献流动形式相符,表明文中提出的 CFD 液膜流动模型具有一定的可靠性。文中主要考察丝径大小对液膜流动的影响,模拟结果表明适当改变丝径的大小有助于改善液膜的稳定,对于提高丝网填料气液之间的传质效率有重要意义。

**关 键 词:**气液两相流;丝网填料;数值模拟;液膜

中图分类号:TQ028.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)01-0032-05

## CFD Simulation of the Effect of Wire Diameter Size on Liquid Film Flow

XU Cheng<sup>1</sup>, JIN Hao<sup>2</sup>, ZHENG Qinyuan<sup>3</sup>, WANG Zhaodong<sup>1</sup>, JIN Weiya<sup>1</sup>

(1. Institute of Process Equipment and Control Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;  
2. Electrochemical Factory of Juhua Group Corporation, Quzhou, Zhejiang 324004, China;  
3. Zhejiang Chengxin Pham & Chem Equipment Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 318012, China)

**Abstract:** The hydraulic characteristics of gas-liquid two-phase flow in distillation process are important factors for separation efficiency. A two-phase flow CFD model using the volume of fluid (VOF) method was presented for studying hydrodynamic performance of the falling film on the metal wire, where two momentum source terms, surface tension and interface stress shear were considered. The simulated results agreed well with experimental result from literature, which showed that the CFD model was reliable. This paper mainly investigated the influence of different wire diameter on the flow behavior of liquid film. It was shown that changing diameters of metal wire would improve the stability of liquid film, which was significant for improving the mass transfer efficiency between gas and liquid.

**Key words:** gas-liquid two-phase flow; wire packing; numerical simulation; liquid film

填料塔作为连续的气液接触设备,在石油、化工、医药等领域中有着极为广泛的应用<sup>[1]</sup>。填料为气液两相间的传热传质传递提供有效相界面,是填料塔的核心构件。M. Fourati<sup>[2]</sup>等人通过研究发现液体在填料层扩散系数与液体的流量、在 20%~80% 的液泛气速载荷区间、液体黏度都无关,仅仅与填料的几何结构有关。可见填料的几何结构在填料塔的气液逆流水力性能扮演重要的角色。不同的填料的不同几何结构为气液两相流动提供的不同界面特性是造成填料性能差

异的重要因素之一。在正常操作条件下,液相沿填料表面向下流动,而气相则根据工艺与液相逆向或同向流动,气液两相界面产生热质传递,达到吸收提纯的目的。因此填料间气液的流动状态及界面特性直接影响到精馏或吸收。

金属丝网波纹填料是 60 年代瑞士苏尔寿司研制最有代表性的规整填料,由于丝网独具的毛细作用,又使表面具有更为有效的润湿性,由此具有很高的分离效率<sup>[3]</sup>。问世以来,广泛用于工业精密精馏中。许多

收稿日期:2013-07-07;修回日期:2013-09-20

作者简介:徐承(1988),男,江西宜春人,硕士,主要研究方向为规整填料塔液泛实验研究。E-mail:xuchengfc@163.com

学者对其进行了广泛而深入的研究,由于液体在填料塔填料表面流动状态的不可见性,学者在研究液体在填料表面流动状态时,常取填料的结构特征单元作为模型进行研究。Cerro<sup>[4]</sup>等认为液体在板波纹规整填料表面的流动可看作是液膜在倾斜波纹板上的流动过程。Hattori<sup>[5]</sup>把金属丝网填料看作平行垂直捆装金属丝,这种几何结构为填料提供垂直的气相通道。针对填料表面液膜流动研究,大多数主要集中于平板降膜研究,Nusselt<sup>[6]</sup>进行了垂直和倾斜板上的降膜研究,获得了液膜厚度的经典公式。此外也有针对液体在圆柱结构流动进行的研究,Rayleigh<sup>[7]</sup>认为液体在圆柱结构表面形成波浪状流动状态是由于毛细现象造成的。Jurig<sup>[8][12]</sup>等采用单根金属丝在气液逆流条件下,进行了实验研究并发现压降比波纹板填料小,而相应载点要高。然而对丝径大小结构在气液逆流条件下对其性能影响研究甚少,为此,本文拟对丝径大小对丝网填料性能影响进行 CFD 模拟研究。

## 1 建模分析

### 1.1 物理模型

金属丝网波纹填料是由金属丝网编织而成,文章拟对液膜在单根金属丝上流动进行 CFD 模拟研究,模型如图 1 所示。该模型采用二维轴对称圆柱坐标模型,模型中  $D$  为金属丝的半径,  $d$  为液相入口宽度,  $L$  为金属丝的长度。为了单一考察丝径对气液流动的影响,液相的初始流量和初始速度相等,模拟中的液相入口宽度  $d$  是根据不同丝径下图 2 所示圆环面积相等条件下取值,具体结构尺寸如表 1 所示。

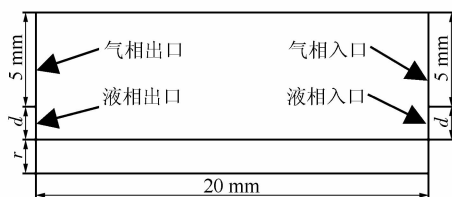


图 1 模型结构和边界条件

Figure 1 Model structures and boundary conditions

表 1 模型结构尺寸表

Table 1 Structure size of model

| 模型序号 | 金属丝半径<br>$D/\text{mm}$ | 液相入口宽度<br>$d/\text{mm}$ | 金属丝长度<br>$L/\text{mm}$ |
|------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1    | 0.2                    | 0.50                    | 20                     |
| 2    | 0.4                    | 0.42                    | 20                     |
| 3    | 0.8                    | 0.31                    | 20                     |
| 4    | 1.0                    | 0.27                    | 20                     |

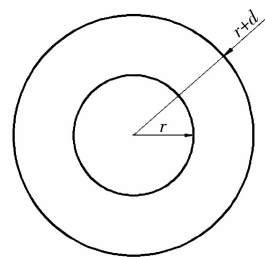


图 2 金属丝和液相入口径向界面放大图

Figure 2 Local structure

### 1.2 控制方程

对于金属丝表面的气液两相逆流的运动规律,本文使用具有追踪气液两相界面移动变化功能的体积函数 VOF (Volume of Fluid) 模型,该模型关于多相流模拟计算的控制方程如下

#### 1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

#### 2) 动量方程

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}')] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

式中:  $\rho$  为各相合密度,  $\mu$  为动力学黏度,  $\mathbf{v}$  为速度向量,  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $p$  为压力,  $\mathbf{F}$  动力源项。

#### 3) 物质属性方程

$$\rho = \alpha_L \rho_L + \alpha_G \rho_G$$

$$\mu = \alpha_L \mu_L + \alpha_G \mu_G$$

式中:  $\alpha_L$ 、 $\alpha_G$  分别为液相、气相组分的体积分率。

#### 4) 体积分数方程

$$\frac{\partial \alpha_G}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \alpha_G = 0$$

### 1.3 表面张力和壁面黏附

由于金属丝直径属于亚毫米级,液膜在金属丝表面流动时,表面张力和壁面的吸附力在气液两相间流动占主导地位。因此在 VOF 模型时,要定义动量方程中表面张力和壁面黏附作用所产生的源项。Fluent 中表面张力模型是 Brackbill<sup>[9]</sup>等提出的连续表面张力模型。该模型中表面张力以动量方程源项的形式加入到 VOF 计算中,其表达式如下

$$\mathbf{F} = 2\delta\rho K_G \nabla \alpha_G / (\rho_G + \rho_L)$$

其中,  $K_G$  是从垂直于界面的表面的局部梯度计算的表面曲率。该模型假定于壁面附近单元表面的法向  $K_G$  是由流体与壁面产生的接触角调整的,而不是加强壁面本身的边界条件。设定  $\theta_w$  是壁面接触角,那么挨着壁面的实际单元的表面法向为<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta_w + \mathbf{t}_w \sin \theta_w$$

其中  $\mathbf{n}_w$  和  $\mathbf{t}_w$  分别是壁面的单位法向量和切向量。

同时考虑到填料表面液膜流动主要受重力、表面张力等作用,动量方程中体积力和压力梯度项作用接近,而对流项和扩散项较小,因此采用隐式体积力 (implicit body force) 方法,增加体积力修正项,可以使迭代计算更稳定<sup>[11]</sup>。

#### 1.4 网格划分和有关参数设定

物理模型计算区域采用规则的四边形网格划分,在壁面处采用渐近加密网格以准确跟踪气液界面,网格划分如图3所示。对于模拟液相流速为 0.1 m/s,气相流速从 0.5 m/s 开始逐渐增大直至液膜难以维持稳定的状态。模拟在联想 Intel CPU 2.6 GHz 计算机模拟耗时 90 h,模拟过程用离散型非稳态求解器,采用的对流项为一阶迎风格式;压力求解选择 PRESTO! 算法;方案采用 PISO;时间步长为  $10^{-5}$ ;气液界面的追踪方法选用精度较高的 Geo-Reconstruct 格式;计算求解器选 Fluent 流体力学软件包。设定气液相入口为速度入口,气液相出口为压力出口,设定表压为 0 Pa。设定液相进口处液相体积分数为  $\alpha_L = 1$ ,表示该处全为液体;同时,设定气相进口处气相体积分数  $\alpha_G = 1$ ,表示该处全为气体。气相为空气,液相为水,相关物理参数见表2。

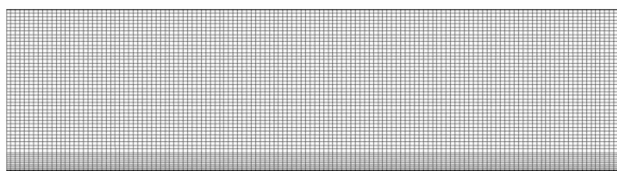


图3 网格划分的局部放大图

Figure 3 Enlarged local computational

表2 模拟流体的物理性质

Table 2 Physical properties of simulated fluids

| 体系 | 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 黏度 $\nu / (\text{Pa} \cdot \text{s})$ | 表面张力 $\tau / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ |
|----|---------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| 水  | 998.200                                     | 0.001 005 0                           | 0.077 2                                      |
| 空气 | 1.205                                       | 0.000 018 1                           | /                                            |

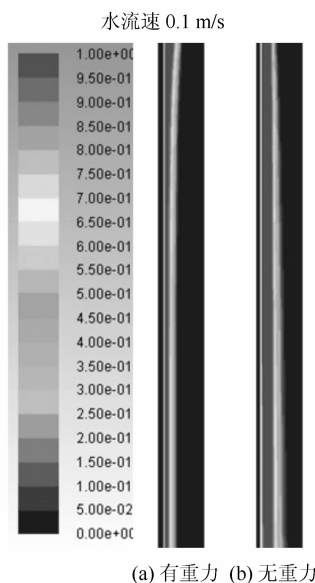
## 2 模拟结果与讨论

文中模拟了丝径大小不同的4个流体模型,对每个模型在水流速为 0.1 m/s 和空气流速 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 和 3.0 m/s 初始条件下,模拟金属丝表面液膜的流动状态变化情况。

### 2.1 重力对液膜流动的影响

一般认为,液体在亚毫米级的毛细管管内流动时,由于毛细作用,气液两相间的表面张力和壁面的吸附力占主导地位,重力作用因素可以忽略。然而模拟中液体在亚毫米级金属丝上流动时,发现重力作用因素不可忽略。

如图4所示是  $D = 0.2 \text{ mm}$  丝径有无重力零气速条件下的液膜流动对比图,有重力条件下液膜厚度随液体流动方向变化不大,而无重力条件下,液膜厚度随着液体流动方向越来越厚。从两图对比可以看出有重力条件液膜厚度明显比无重力条件下要薄,这是由于金属丝的毛细作用吸附了液体量比较大,不可忽视重力的影响。此外,在另外三种丝径上存在类似的情况,说明重力因素对于液膜在金属丝表面流动的作用不可忽略。



(a) 有重力 (b) 无重力

图4  $D = 0.2 \text{ mm}$  模型有无重力项对比图

Figure 4 Effect of gravity on liquid film in wire of diameter 0.2 mm

### 2.2 气速对液膜流动状态的影响

在丝径  $D = 0.2 \text{ mm}$  流体模型和水流速为 0.1 m/s,液膜在不同空气流速下,金属丝表面液膜流动状况如图5所示。

初始时,流域内气相流速为 0 m/s,此时液膜流动平稳,液膜厚度沿金属丝轴向变化不大。当液膜流动基本稳定之后,往计算域内吹入空气。当持续吹入空气一段时间后,由于气流对液膜表面的曳力作用,液膜有明显被向上吹送的趋势。当气速较低时 (0.5 m/s),气流只是在液膜表面吹起一些小振幅的波纹,而这

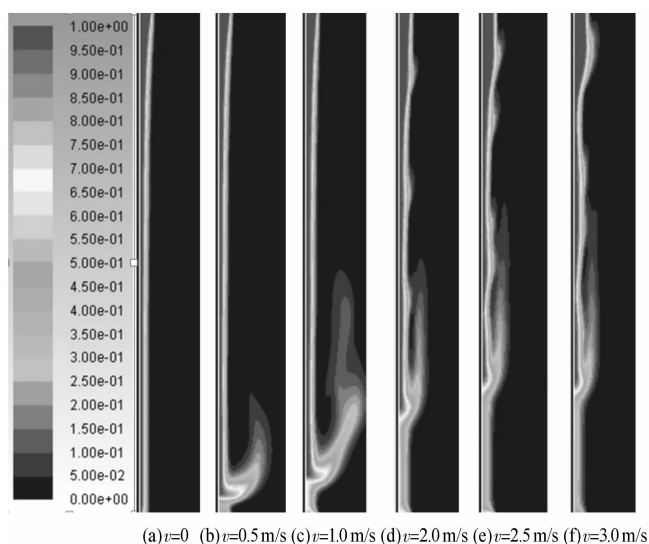
图5 丝径  $D=0.2$  mm 液膜随气速变化图

Figure 5 Liquid film flows with gas velocity change on the wire of diameter 0.2 mm

些小波纹不足以携带液体向上流动,当气速逐渐增大(到  $2.0$  m/s),液体被吹离出口越远,并且液膜波动越来越明显,这是由于气速增大,气流对界面曳力作用增强液膜表面扰动加剧。气速进一步增大到  $3.0$  m/s 时,液膜滞留在大振幅界面波位置处,并形成较大而又非常不稳定的液团,容易破碎。当这些液团破碎时,被气体吹离金属丝表面,最终会使气体耗费大量动能从而使气体压降急剧增加,并造成气液流动不畅喘振频率增大,液泛即将形成。本文 CFD 模拟的流动形式与 Jurrig<sup>[8]127</sup> 等采用单根金属丝在气液逆流条件下液膜流动形式,都是呈波浪状向下流动。

在其他丝径模型中,液膜随气速增大而波动程度增大,只不过波动程度大小不同。

### 2.3 不同丝径下,气速对液膜流动状态的影响

液膜在不同丝径的金属丝表面流动随着气速的增大而波动程度增大,为更好显示丝径大小对液膜流动影响,选取模拟最大气速  $3$  m/s 条件,不同丝径大小液膜流动状况进行对比,结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在  $3$  m/s 的气速条件下,丝径  $D=0.2$  mm、 $D=0.4$  mm、 $D=0.8$  mm、 $D=1.0$  mm 为金属丝表面液膜均有不同程度界面波动和液体回流。 $D=0.2$  mm 时丝径液相波动最明显,波浪最大; $D=1.0$  mm 时虽然波浪最小,但是液体回流最多,说明回流比较严重; $D=0.8$  mm 时波动比较小且液体回流比较小,说明在相同水流量流速下,丝径  $D=0.8$  mm 时金属丝表面液膜流动最为稳定。对于某些气液吸收比比

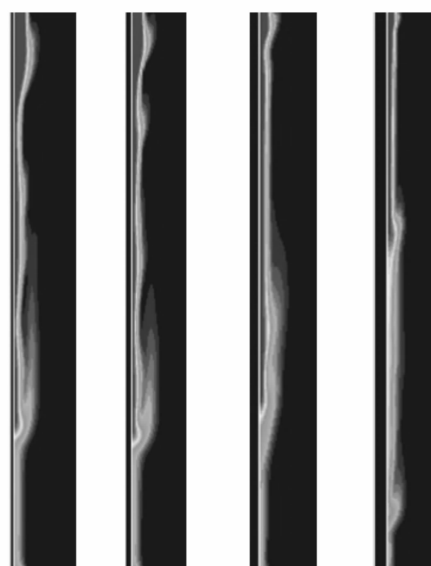


图6 不同丝径金属表面液膜在气速

$3$  m/s 流动对比图

Figure 6 Comparison chart of liquid film's flow on mental surface of different diameter wire under gas velocity 3 m/s

较大的物系,相应丝网波纹填料可以考虑用  $D=0.8$  mm 丝径金属丝编织。因为丝径  $0.8$  mm 金属丝表面液膜流动最为稳定,这样容许更大的气相通量,提高相应传质效率。目前大部分丝网填料丝径都在  $0.4$  mm 左右,单根  $0.8$  mm 丝径表面积比  $0.4$  mm 丝径表面积大,但是相应的总表面积要下降,势必减少填料总体表面积。而且丝径增大,丝网填料网格相应要疏一点,但黄庆<sup>[12]</sup>等在研究液态锂在金属丝网毛细作用时发现丝网网格疏密对毛细力作用不大,在其他液相是否存在类似规律,有待于进一步研究。

### 3 结语

通过对不同丝径金属丝气液逆流两相流 CFD 模拟研究,得出以下结论:

- 1) 在考虑液膜在金属丝表面流动不可忽略重力因素的影响。
- 2) 液膜沿金属丝表面流动的波动和回流程随着气速增大而增大。
- 3) 类比 4 种不同丝径金属丝表面液膜在高气速流动状况,发现  $0.8$  mm 丝径的金属丝表面液膜流动最稳定。对于改进丝网填料有一定指导意义,但还需进一步验证。

(下转第 41 页)