

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.004

# 轴向流吸附塔流场数值模拟与进口分布器优化

黄世钊<sup>1</sup>, 吴林杰<sup>1</sup>, 向冰<sup>2</sup>

(1. 广西大学 化学化工学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西工业技师学院 电气应用技术系, 广西 南宁 530031)

**摘要:**针对某糖厂烟道气变压吸附塔内气体分布不均的问题,采用计算流体力学 CFD 相关软件对其流场进行数值模拟,重点对进口区(进口管到吸附剂之间的区域)进行流场优化。通过对原始板式分布器流场模拟,发现吸附塔中心区域速度较大,导致进口区末端截面的轴向和径向速度分布不均,同时也有一定的漩涡。比较板式分布器在不同倾角下的布气效果,发现当板式分布器的倾角在 25°~40°有较好的布气效果;比较 4 种板式分布器,即原始分布器(I)、中间挡板不开孔的分布器(II)、中间挡板改为小孔的分布器(III)及原始分布器中间加挡板(IV)的布气效果,结果发现中间挡板不开孔的分布器和中间挡板改为小孔的分布器的布气效果都优于原始分布器,其中中间挡板改为小孔的分布器的布气效果最好。通过对吸附塔进口区分布器结构优化,明显提高了吸附塔内流体的分布均匀度。

**关键词:**吸附塔;板式气体分布器;烟道气;计算流体力学(CFD);流场优化

中图分类号:TQ051.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)02-0018-07

## Numerical Simulation and Optimization of Flow Field of Inlet Distributor of Axial Adsorption Tower

HUANG Shizhao<sup>1</sup>, WU Linjie<sup>1</sup>, XIANG Bing<sup>2</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Department of Electrical Application Technology, Guangxi Petrochemical Advanced Technical School, Nanning 530031, China)

**Abstract:** For the flue gas distribution problems of the pressure swing adsorption tower in sugar mill, CFD (computational fluid dynamics) software was utilized for the flow field in numerical simulation, which focused on the flow field optimization of the inlet area (the area between the inlet pipe to the adsorbent). The flow field simulation of the original plate distributor shows that the velocity of the center is larger, resulting in uneven distribution of axial and radial velocity of the end section of the entrance region and a certain swirl. The process of plate distributor in different dip angles was compared, and it was found that the dip angle of baffle distributor had better gas distribution effect at 25° to 40°. The effect of gas distribution of 4 kinds of plate distributor was compared, which were the original distributor (I), the distributor with the middle baffle without hole (II), the distributor with middle small hole (III) and the original distributor with baffle at middle (IV). It is found that the gas distribution effect of 2 and 3 is better than the original distributor, wherein the plate type effect is the best when the plate distributor is changed into small hole. Through optimization of the import area distributor for adsorption tower, the distribution of fluid is improved in the adsorption tower evenness.

**Keywords:** adsorption tower; plate gas distributor; flue gases; CFD (computational fluid dynamics); optimization flow field

在变压吸附过程中决定其最终效果的步骤为吸附过程,即气体与吸附剂之间的传质过程,而气体在流场中的分布是传质的基础,所以研究气体在流场中的初始分布十分重要<sup>[1]</sup>。工程中吸附塔型式主要有:卧式

径向流吸附塔、立式径向流吸附塔和立式轴向流吸附塔等。结构是吸附塔吸附剂性能充分发挥的关键,即布气是吸附过程的前提<sup>[2]</sup>。工程中常用的气体分布器有:多孔直管式、切片号角式、直管挡板式、单切片

收稿日期:2017-09-08;修回日期:2017-11-29

基金项目:广西科技成果推广与产业化示范项目(桂科产 1099051)。

第一作者简介:黄世钊(1963),男,壮族,广西桂平人,副教授,主要研究方向为化工过程设备技术。E-mail:huangsz@gxu.edu.cn

环流式、双切片环流式、双列叶片式和多孔板式等<sup>[3-4]</sup>。本文中糖厂变压吸附浓缩 CO<sub>2</sub> 装置采用的是立式轴向流吸附塔,多孔板式气体分布器。因为轴向流变压吸附塔具有内部结构简单、维护方便且初始投资少等优点。杜明等<sup>[5]</sup>采用 FLUENT 研究了不同气速时 TEG 脱水塔内气体分布器流场,发现数值模拟结果和实际情况基本一致,证明了 FLUENT 流场数值模拟对实际工业有一定的指导意义;王浩宇等<sup>[6]</sup>对轴向流吸附器内部流场进行了研究,发现了板式分布器在开孔孔径不变的情况下,开孔率为 0.338 时布气效果最好;程橙等<sup>[7]</sup>对径向流吸附塔流场进行了模拟与优化,发现了在吸附塔中增加挡板和改变开孔率都对气体分布器有一定的影响。

课题组通过对原始板式分布器模型流场数值模拟分析,发现其不足之处,并进行优化改进,得出较为适宜吸附塔的板式气体分布器。对后续糖厂扩建浓缩 CO<sub>2</sub> 的变压吸附装置有一定参考作用。

## 1 计算模型

### 1.1 物理模型

因吸附塔和气体分布器都是轴对称图形,为了得出更精确的解,采用对称处理,使用平面 2D 模型代替

3D 实体模型。因为塔内支撑结构对流体分布的影响不大,所以忽略塔内的一些支撑结构。气体从进口区进入吸附塔,经过板式气体分布器的布气,均匀的进入吸附区,在吸附区完成吸附,惰性气体(主要为 N<sub>2</sub>)从出口分布器排出吸附塔外。在气体通过吸附区时吸附剂(硅胶颗粒)是固定不动的,属于固定床吸附过程。图 1 所示为吸附塔的结构简图。表 1 所示为吸附塔的简化模型尺寸表。

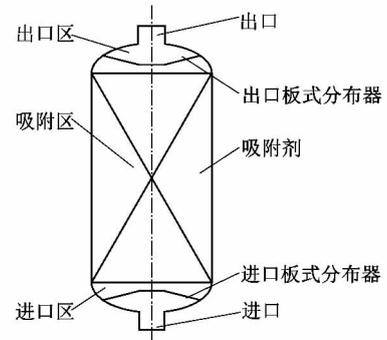


图 1 吸附塔结构简图

Figure 1 Adsorption tower structure diagram

表 1 吸附塔模型尺寸

Table 1 Simplified model dimensions of adsorption tower

进口直径/ mm	出口直径/ mm	塔径/ mm	塔中间圆筒/ 下封头高度/mm	上封头/ 位置/mm	进口分布器 位置/mm	出口分布器 位置/mm	气体板式分布 器孔径/mm	分布器孔间 间距/mm	分布器 厚度/mm	分布器倾斜 角度 $\Phi/(^{\circ})$
408	450	2 000	3 500/791/791		142	142	20	28	10	15

注:吸附塔采用标准椭圆形封头;分布器位置指中间平板距吸附剂距离;分布器孔按正三角形排列。

### 1.2 网格划分

在流场数值模拟中,网格的好坏直接决定着模拟计算精度与收敛性。本文采用 ANSYS 内置的 ICEM CFD 进行网格划分。一般网格分为结构网格和非结构网格,根据本文吸附塔模型的特点,在吸附区采用结构网格;而进口区和出口区,由于有分布器的存在,使得结构网格不易生成,所以采用非结构网格。图 2 所示为吸附塔的网络模型和进口区网络模型图。

### 1.3 网格独立性验证

为了降低客观条件对数值模拟结果的影响,现将相同吸附塔模型划为不同数量的网格模型。在相同初始条件下进行模拟,观察其结果变化,最后选出适宜的网格数量(全局最大网格尺寸)。表 2 所示为不同网格数量的模型在  $y_6 = 0.79$  m 的速度均匀度和平均速度分布表。

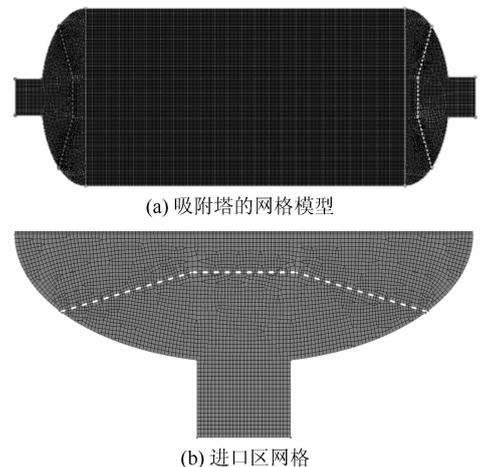


图 2 吸附塔的网络模型和进口区网格图

Figure 2 Grid model of adsorption tower and imported area

表2 不同网格数量模型在  $y_6 = 0.79$  m 的  
均匀度和平均速度分布

Table 2 Number of different grid models in  
uniformity of velocity distribution of  $y_6 = 0.79$  m

方案	最大网格 尺寸/mm	网格数	$y_6$ 处轴向平均 速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	$y_6$ 处轴向 速度均匀度
I	16	44 130	0.889	0.343
II	8	163 250	0.891	0.386
III	4	237 533	0.889	0.384
IV	2	501 729	0.890	0.383

由表2知,最大网格尺寸在8,4和2 mm时对数值模拟的结果影响不大,综合考虑精度和运算速度,文中采用最大全局网格尺寸为4 mm。(因为在ICEM中全局网格尺寸设置为2的幂的时候,系统更容易兼容、收敛<sup>[8]135</sup>。)

#### 1.4 数学模型

吸附塔流场模拟过程使用雷诺平均纳维-斯托克斯(N-S)方程、湍动能  $\kappa$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  的输运方程来描述<sup>[9]</sup>。

##### 1) 雷诺平均 N-S 方程

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0.$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) =$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j}).$$

式中: $\rho$ 为流体密度, $kg \cdot m^{-3}$ ;  $u_i, u_j$ 为速度分量;  $x_i, x_j$ 为坐标分量;  $\mu$ 为流体黏度系数, $Pa \cdot s$ ;  $\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

##### 2) 标准 $\kappa$ - $\varepsilon$ 模型的方程

湍流动能方程  $\kappa$ :

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_\kappa \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_M.$$

扩散方程  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} - R.$$

式中: $\mu_{\text{eff}}$ 为有效湍流黏度, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ ;  $\mu_t$ 为湍动黏度, $\mu_t = \rho C_\mu (k^2/\varepsilon)$ ,  $Pa \cdot s$ ;  $G_k$ 为层流速度梯度而产生

的湍流动能,  $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ;  $G_b$ 为由浮力产生的湍流动能;  $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的贡献项;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ 和  $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数;  $\alpha_\kappa, \alpha_\varepsilon$ 为湍动能和耗散率的有效普朗特数的倒数。

吸附剂在模拟过程中将其简化为多孔介质模型,通过吸附剂的空隙率和吸附颗粒的当量直径来计算吸附区的阻力损失。在FLUENT中多孔介质动量方程中附加动量源项,包括黏性力损失项  $\sum_{i=1}^3 D_{ij} \rho \mu v_j$  和惯性

力损失项  $\sum_{i=1}^3 D_{ij} \frac{1}{2} \rho \bar{v} v_j$ <sup>[9-10]</sup>。所以  $i$  方向的动量源项

$$s_i = \sum_{i=1}^3 D_{ij} \rho \mu v_j + \sum_{i=1}^3 D_{ij} \frac{1}{2} \rho \bar{v} v_j. \quad (1)$$

式中: $D_{ij}$ 为阻力损失系数(无量纲数);  $\bar{v}$ 为平均速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $v_j$ 为轴向速度,  $m \cdot s^{-1}$ 。

本文中吸附剂可简化为各向同性的多孔介质,所以公式(1)可简化为:

$$s_i = - \left( \frac{\mu v_j}{\alpha} + C_2 \frac{1}{2} \rho \bar{v} v_j \right).$$

式中: $\alpha$ 为渗透因子;  $C_2$ 为惯性阻力因子。两者可由欧拉公式计算得出。

$$\alpha = \frac{D_p^2 e^3}{150(1-e)^2}; C_2 = \frac{3.5(1-e)}{D_p e^3}.$$

式中: $e$ 为吸附层空隙率;  $D_p$ 为吸附剂颗粒直径,mm。

#### 1.5 求解方法与边界条件

吸附过程流场数值模拟选择2D双精度、压力基隐式求解器。湍流模型采用标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  湍流模型。采用速度进口边界,大小为  $6.263 m \cdot s^{-1}$ ; 湍流边界采用湍流强度和水利直径组合<sup>[8]214</sup>; 出口边界采用自由出流; 壁面为默认的无滑移壁面; 操作压力为0.2 MPa; 操作温度为298.15 K; 进气组成为糖厂烟道气: 体积分数为9.7%  $CO_2$ 和体积分数为90.3%  $N_2$ 。笔者模拟过程采用混合气体代替,在0.2 MPa、25℃状态下,混合气体密度为  $5.2077 kg \cdot m^{-3}$ , 运动黏度为  $1.52539 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ 。

#### 1.6 评价气体分布器性能指标

对气体分布器的性能评价,一般采用定性和定量的方法。定性分析,即对分布器区域的截面上的速度、压力云图和速度矢量图等物理量的分布情况进行分析; 定量分析,即对分布器区域(进出口)的压差和截面上速度均匀度进行分析。

1) 因为速度为矢量,所以用轴向分速度和径向分速度分别分析,才能更好地表达速度大小与方向的均

匀度。均匀度定义式为:

$$M = \sqrt{\frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} \left( \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 dS}$$

式中: $S_0$ 为参考平面, $m^2$ ;  $u_i$ 为*i*点的分速度(轴线速度 $u_{iy}$ 和径向速度 $u_{ix}$ ), $m \cdot s^{-1}$ ;  $\bar{u}$ 为参考平面的平均分速度(轴线速度 $\bar{u}_y$ 和径向速度的 $\bar{u}_x$ ), $m \cdot s^{-1}$ 。

$$\bar{u} = \frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} u_i dS$$

文中采用有限个参考点代替上面的连续积分,即分速度的均匀度

$$M = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中  $n$  为观测的参考点个数。

其中  $M$  的值越小,则说明在参考截面上的速度分布越均匀,即气体分布越均匀。

2) 压差定义为进口区域(进口截面到刚接触吸附剂之间的区域)的压力差,即  $\Delta p = p_{in} - p_{out}$ 。

式中: $p_{in}$ 为进口截面的压力,Pa; $p_{out}$ 为经过分布器后吸附剂外侧截面的平均压力,Pa。

通过分布器的压差值越小,说明流体经过分布器的能量损失越小。

3) 截面有限点的平均分速度

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{i0} \quad (3)$$

## 2 流场模拟结果分析与优化

### 2.1 结果定性分析

课题组对原始分布器模型数值模拟的结果进行分析,主要是速度场和压力场的定性分析。

#### 2.1.1 速度场分析

图3所示为吸附塔的速度云图。由图3可知,气体在进口区有几处漩涡,分别在刚刚进入的两侧和通过分布器后,这种漩涡既造成了速度分布不均,又造成了能量的损失;速度在吸附区分布较均匀,出口区分布也较均匀。因为经过吸附区后受到吸附剂颗粒的均匀化和降速,使得气体分布均匀且稳定。这说明出口区域的气体分布器性能较好,所以在接下来的流程优化过程中将不再对出口区域进行分析。

#### 2.1.2 压力场分析

图4所示为出、进口区域的压力云图。

气体分布器中分布器处的压差是气体分布器的另一主要指标。由图4可知,进口区在分布器中有相对较大的压差,这是由于通过分布器,横截面积减小导致局部速度增大,但整体压差不大。出口区压力均匀变

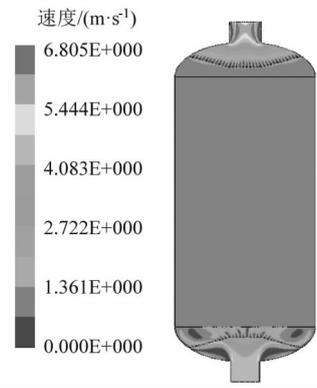


图3 吸附塔的速度云图

Figure 3 Adsorption velocity images of tower

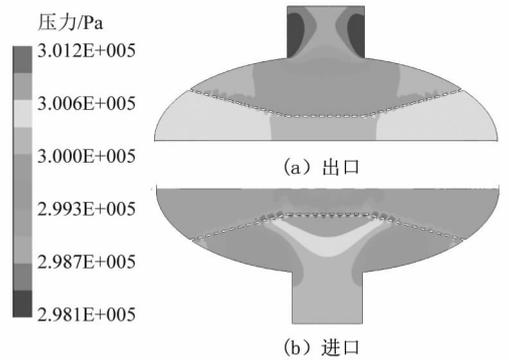


图4 出、进口区域的压力云图

Figure 4 Export and import regions of stress images

化,气体在经过分布器后有明显的压降。

### 2.2 结果定量分析

课题组对进口区域的轴向速度和径向速度的均匀度和平均分速度做定量的分析。图5所示为进口区作为参考截面的位置图。

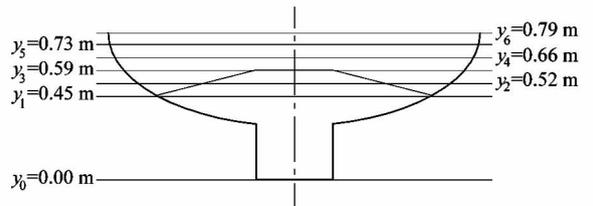


图5 进口区作为参考截面的位置

Figure 5 Position the region as reference section

因为速度沿坐标轴的方向为正方向,而径向速度是以吸附塔的中心线为对称轴对称分布,左边为负右边为正,所以在处理径向分速度时,采用对称的方法(对其一半进行处理)。图6所示为参考截面的平均轴向和径向速度的分布。

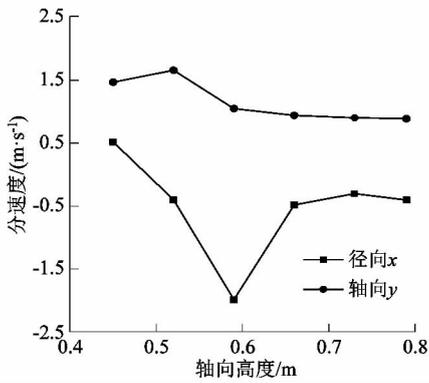


图6 参考截面的平均轴向和径向速度的分布  
Figure 6 Reference points of mean axial and radial velocity of section

由图6可得,进口区的轴向平均速度变化平缓,但是中心区域速度相对较大;径向平均速度除  $y = 0.59$  m 截面外,也比较平稳,因为进气分布器刚好在该区域附近,所以导致径向平均速度变化较大。

利用公式(2)计算图6中6个截面进行速度均匀度计算。图7为不同截面速度分量的均匀度。

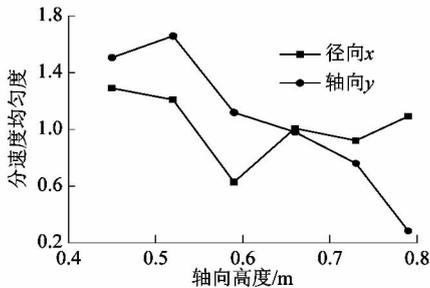


图7 不同截面的速度分量均匀度  
Figure 7 Uniformity of velocity in different sections

由图7可得,进口区的轴向速度均匀度随轴向距离的增大而减小,且在截面  $y = 0.59$  m 附近减小较为明显,这说明进气气体分布器的布气性能有一定的效果;径向速度的均匀度除在截面  $y = 0.59$  m 有明显的降低,其他截面基本不变,这变化和径向平均速度变化类似。综上可知,原型中进气分布器对进气区域布气有一定的效果,但是对径向布气效果不太好。

### 2.3 不同倾斜角度分布器流场

在原始模型孔板分布器倾斜角度  $\Phi$  为  $15^\circ$  的基础上,增加6组不同倾斜角度的分布器作为试验组。定义倾斜角度  $\Phi$  如图8所示,顺时针为正,反之为负。分别对比倾斜角度  $\Phi$  为  $-90^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 40^\circ$  及  $90^\circ$  时的流场。图9所示为不同倾斜角度下板式分布器在进口区的轴向和径向速度均匀度的趋势图。由

图9可得,在不同倾斜角度板式分布器下轴向速度的均匀度是关于  $0^\circ$  对称,且  $0^\circ$  附近的速度均匀度也为最小;在不同倾斜角度板式分布器下径向速度的均匀度也基本关于  $0^\circ$  对称(在  $90^\circ$  出现异常情况,因为在  $90^\circ$  时,气体刚刚进入吸附塔被分布器“阻挡”导致径向速度波动较大),在  $40^\circ$  附近呈现均匀度最小值。

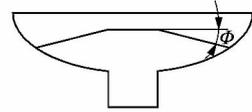


图8 进口区分布器倾斜角度  
Figure 8 Tilt angle of region distributor

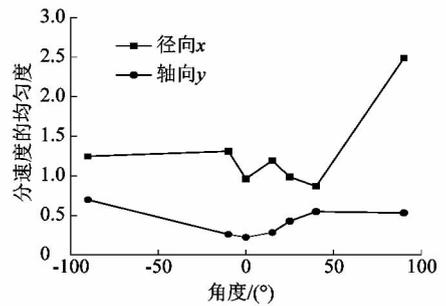


图9 不同倾角下的分速度均匀度  
Figure 9 Uniformity of velocity under different angle

图10所示为不同倾斜角度下板式分布器在进口区的轴向和径向速度的平均速度趋势图。由图10可得,不同倾斜角度板式分布器下轴向平均速度基本相等,约为  $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同倾斜角度板式分布器下径向平均速度在  $-90^\circ$  时,有最大值  $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (负号代表方向为向壁面);在  $-20^\circ \sim 20^\circ$  范围内,径向平均速度基本不变,为  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右;  $40^\circ$  附近为  $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

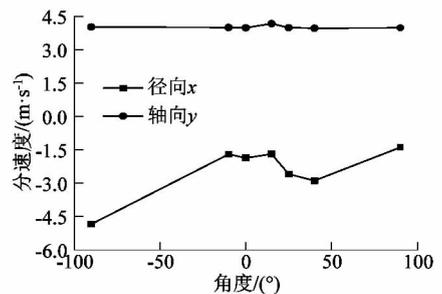


图10 不同倾斜角度下的平均速度  
Figure 10 Average speed under different angle of inclination

图11为不同角度板式分布器下进口区的压差。由图11可得,板式分布器在  $0^\circ$  和  $25^\circ$  附近时,进口区的压差相对较小。考虑到较小能量的损失,尽量选择

0°或 25°附近的板式分布器。

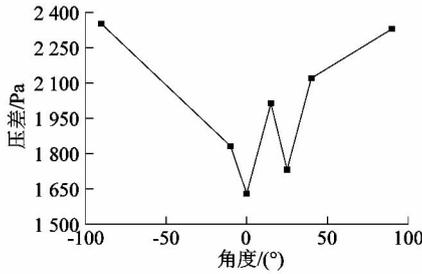


图 11 不同倾斜角度下压差

Figure 11 Pressure difference under different angle of inclination

综合均匀度和平均速度分析,板式分布器倾斜角度在 25°~40°有相对较好的布气效果(轴向和径向均匀度小且径向速度相对较大)。

### 2.4 板式分布器结构优化

由 1.1 节可知,原始板式分布器的中心(轴线)附近速度较大,这对进口区均匀度影响较大。课题组在原始板式分布器的基础上,改变分布器结构,试图减小中心区域速度,减小速度均匀度。不同孔板结构分布器型号: I 型——原型; II 型——中间不开孔; III 型——中间开小孔; IV 型——原型加挡板。图 12 所示为不同结构分布器的简图。

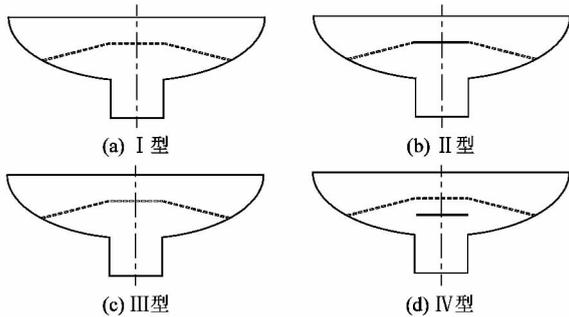


图 12 不同结构分布器的简图

Figure 12 Schematic diagram of different structural distributors

图 13 所示为 4 种分布器的速度比较,由图 13 可知,上述 4 种结构分布器的轴向平均速度基本一致; II、III 型孔板分布器的径向平均速度都大于原型;结构 IV 分布器基本和原型一样。径向平均速度增大避免了气体在吸附区轴向提前穿透(径向速度过小),这在分速度的角度上,优化了分布器。

图 14 为不同结构的平均分速度的均匀度比较。由图 14 可知,4 种结构的轴向速度均匀度基本相等,在均匀度为 0.29 左右基本达到均匀; II、III 型结构的

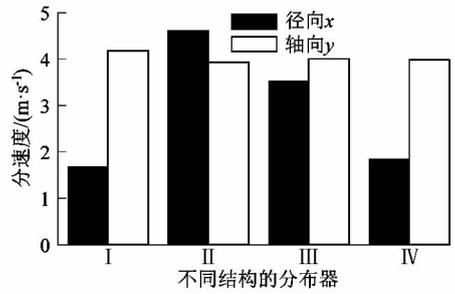


图 13 不同结构的平均分速度比较

Figure 13 Average speed comparison of different structure

径向均匀度都小于原型,III 型结构的效果更好;IV 型结构径向均匀度在 1.8 左右,比原型大,布气效果不好。

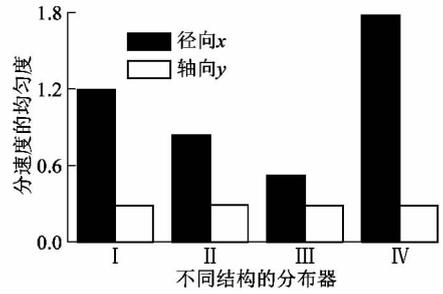


图 14 不同结构的平均分速度的均匀度比较

Figure 14 Comparison of different structure average speed uniformity

图 15 为不同结构板式分布器进口区压差。由图 15 可知,分布器 II 和 III 在相同操作条件下,进口区压差都小于原始模型;分布器 IV 在相同条件下,进口区压差大于原始模型。所以在压差方面,分布器 II 和 III 性能较好。

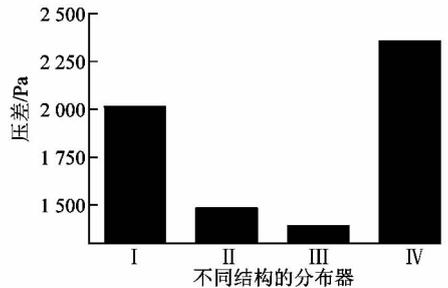


图 15 不同结构板式分布器进口区压差

Figure 15 Pressure difference of different structural plate distributor importing regions

综上可得,采用中间小孔结构和中间不开孔都有利于气体分布;中间开孔加挡板,对气体均布效果相对不太好。

### 3 结论

1) 对原糖厂浓缩 CO<sub>2</sub> 变压吸附塔流场模拟, 分析其进口气体分布器有一定的布气效果, 但吸附塔内中心处速度较大, 导致气体有些分布不均和能量损失。

2) 进口板式分布器, 在倾斜角度在 25° ~ 40° 有较好的分布效果。

3) 在新结构板式分布器中, 中间挡板改成小孔的板式分布器和中间挡板不开孔的板式分布器相比原型分布器有较好的分布效果, 在中间加挡板时布气效果不好, 中间挡板改为小孔时布气效果最好。

#### 参考文献:

[1] 张文卿. 大型填料塔分布器内计算流体力学行为研究及优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2004: 78.

[2] 王浩宇, 刘盛书, 杨雄. 空气预纯化的技术研究进展 [J]. 化工进展, 2014, 33(3): 545.

[3] 潘国昌, 郭庆丰, 杨伯极. 填料塔进料气体分布器的研究 [J]. 炼油设计, 1995, 25(2): 30.

[4] CHEN G K, CHUANG K T. Recent developments in distillation [J]. Hydrocarbon processing, 1989, 68(2): 37 - 41.

[5] 杜明, 张敏华, 李海燕, 等. TEG 脱水塔内气体分布器流场 FLUENT 数值模拟 [J]. 石油和化工设备, 2012, 1(15): 20.

[6] 王浩宇, 刘应书, 吴义民, 等. 轴向流吸附器内部流场特性 [J]. 工程科学学报, 2016, 38(4): 575.

[7] 程橙, 王煤, 陈果, 等. 径向吸附塔的流场模拟及优化 [J]. 工业生产与技术, 2012, 19(1): 28.

[8] 胡坤. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 135 - 214.

[9] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7 - 125.

[10] ERGUN S. Fluid flow through packed columns [J]. Chemical engineering progress, 1952, 48(2): 89 - 94.

(上接第 10 页)

[6] ZHANG Chaofeng, WANG Longfei, WU Meiping, et al. Plastic behavior of metallic damping materials under cyclical shear loading [J]. Materials, 2016, 9(6): 496.

[7] JIA Liangjiu, KUWAMURA H. Ductile fracture simulation of structural steels under monotonic tension [J]. Journal of structural engineering, 2014, 140(5): 04013115.

[8] BRIDGMAN P W. Studies in large plastic flow and fracture [M]. Manhattan: McGraw-Hill, 1952.

[9] HOLLomon J H, MEMBER J. Tensile deformation [J]. Metals

technology, 1945, 12(4): 1 - 22.

[10] LING Yun. Uniaxial true stress-strain after necking [J]. AMP journal of technology, 1996, 8(5): 42 - 47. ([http://www. te. com/documentation/whitepapers/pdf/5jot\\_6. pdf](http://www.te.com/documentation/whitepapers/pdf/5jot_6.pdf))

[11] MELENK J M, BABUSKA I. The partition of unity finite element method: basic theory and applications [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996, 139(1/2/3/4): 289.

[12] 张超锋, 张志胜, 武美萍, 等. 机分分离型软钢阻尼器的性能 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 97.

(上接第 17 页)

#### 参考文献:

[1] 田广伟. 高速铣削 3Cr2Mo 刀具磨损研究与铣削参数优化 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014: 16 - 29.

[2] 陈魁. 试验设计与分析 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 72 - 90.

[3] 杨晓明. 弹性力学 [M]. 4 版. 江苏: 高科学技术出版社, 2013: 143 - 183.

[4] 滕朝晖. 1. 2085 葛利兹模具钢高速铣削参数的正交实验优选 [J]. 轻工机械, 2015, 33(3): 30 - 32.

[5] 魏兆成. 球头铣刀曲面加工的铣削力与让刀误差预报 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011: 3 - 23.

[6] 张学中. 数控铣削过程铣削力建模及仿真系统研发 [D]. 天津: 河北工业大学, 2010: 21 - 27.

[7] 谢英星. 基于响应曲面法的模具钢高速铣削切削力模型研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6): 24 - 27.

[8] 王灼建, 贺辛亥, 董红坤, 等. 铝合金薄壁零件铣削力模型的研究 [J]. 机床与液压, 2016, 44(3): 154 - 157.

[9] 章振翔, 张金明, 王来钱. 基于 DEFORM - 3D 的不锈钢切削力有限元仿真 [J]. 轻工机械, 2011, 29(4): 40 - 42.

[10] 陈锦江, 田广伟, 王哲, 等. 高速铣削 P20 模具钢铣削力的建模及试验研究 [J]. 机床与液压, 2015, 43(7): 57 - 60.

[11] SONG Qinghua, AI Xing, WAN Yi, et al. Influence of tool helix angle on stability in high-speed milling process [J]. Transactions of nanjing university of aeronautics & astronautics, 2008, 25(1): 18 - 25.

[12] KIM G M, CHU C N. Mean cutting force prediction in ball-end milling using force map method [J]. Journal of materials processing technology, 2004, 146(3): 303 - 310.

[13] URBANSKI J P, KOSHY P, DEWES R C, et al. High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture [J]. Material and design, 2000, 21(4): 395 - 402.

[14] WOJCIECHOWSKI S, TWARDOWSKI P, PELIC M. Cutting forces and vibrations during ball end milling of inclined surface [J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 113 - 118.