

立式径向流吸附器传热传质过程模拟研究

徐攀¹, 文键¹, 彭荣梅², 洪坤², 李超龙¹, 王斯民³, 厉彦忠¹
(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 浙江智海化工设备工程有限公司, 313000, 浙江湖州; 3. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 为了揭示立式径向流吸附器吸附层内 CO₂ 和 H₂O 竞相吸附的传热传质规律,基于已有的氧化铝和分子筛的 CO₂ 和 H₂O 的吸附实验数据,采用计算流体动力学(CFD)技术对吸附层的 CO₂ 和 H₂O 的二元吸附过程进行研究,建立了吸附层内 CO₂ 和 H₂O 竞相吸附的传热传质数学模型,分析了流动均匀性和吸附性能的关系,同时对比了 4 种结构吸附器的吸附性能。结果表明:吸附过程中流动均匀性是反映吸附器内流场分布的参数,与吸附性能变化规律相近,且可侧面反映立式径向流吸附器的吸附剂利用率和吸附性能;向心 Z 型的吸附器其 CO₂ 与 H₂O 穿透区域不同,其他 3 种结构的 CO₂ 与 H₂O 穿透区域相同;向心 π 型的吸附器其 CO₂ 穿透区域和主要吸附区域为进气侧吸附层区域,其他 3 种结构为与进气侧相对的吸附层区域;吸附器性能方面,离心 π 型的性能最好,压降相对于向心 Z 型降低了 12.0%,吸附时间是向心 Z 型的 2.34 倍。该研究为立式径向流吸附器的选择和设计提供了理论参考。

关键词: 立式径向流吸附器;传热传质;吸附性能;流动均匀性;数值模拟

中图分类号: TQ110 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202202002 **文章编号:** 0253-987X(2022)02-0017-09



Simulation of Heat and Mass Transfer in Vertical Radial Flow Adsorbers

XU Pan¹, WEN Jian¹, PENG Rongmei², HONG Kun²,
LI Chaolong¹, WANG Simin³, LI Yanzhong¹
(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Zhejiang Zhihai Chemical Equipment Engineering Co. Ltd., Huzhou, Zhejiang 313000, China;
3. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to reveal the laws of heat and mass transfer of competitive adsorption of CO₂ and H₂O in the adsorption layers of vertical radial flow adsorber, based on the existing experimental data of CO₂ and H₂O adsorption of alumina and molecular sieve, CFD (Computational Fluid Dynamics) technology is used to study the binary adsorption process of CO₂ and H₂O in the adsorption layers. A mathematical model of heat and mass transfer of competitive adsorption of CO₂ and H₂O in the adsorption layer is established, the relationship between flow uniformity and adsorption performance is analyzed, and the adsorption performance of four types of adsorbers is compared. The results show that the flow uniformity in the adsorption process is a parameter reflecting the flow field distribution in the adsorbers, which has a similar change law with the adsorption performance and can be used to reflect the adsorbent utilization rate and adsorption performance of vertical radial flow adsorbers. The CO₂ and H₂O penetration regions of

centripetal Z-type are different, while those of the other three structures are the same. The CO_2 penetration region and main adsorption region of centripetal π -type are the adsorption layer near the inlet side, and those of the other three structures are the adsorption layer opposite to the inlet side. In terms of the adsorber performance, the centrifugal π -type has the best performance, the pressure drop is 12.0% lower than that of centripetal Z-type, and the adsorption time is 2.34 times that of centripetal Z-type. The research results provide a theoretical reference for the selection and design of vertical radial flow adsorber.

Keywords: vertical radial flow adsorber; heat and mass transfer; adsorption performance; flow uniformity; numerical simulation

吸附器约占空分系统总能耗的 16%，其作用是降低空气中杂质的浓度，使 H_2O 的体积分数小于 3×10^{-6} ， CO_2 小于 10^{-6} ，碳氢化合物小于 10^{-9} [1]。立式径向流吸附器具有床层流动截面积大、空间利用率高、压降小等特点，被广泛用于大型空分设备中。张成芳等对吸附层内的流动进行理论分析，得到了流动均匀分布的流道静压分布条件，为吸附层流场均匀分布提供了理论依据 [2]。文献 [3-5] 忽略了吸附过程对流场的影响，采用数值模拟方法研究了立式径向流吸附器的流场分布规律。文献 [1, 6] 提出了分层并联和多组床层设计方法用于解决大型立式径向流吸附器能耗和流动均匀性的问题。在吸附层传热传质研究方面，Gang 和 Kapoor 等通过一系列实验测定了分子筛吸附剂对 CO_2 和 H_2O 等气体的吸附特性，为研究吸附层的传热传质过程提供了实验依据 [7-10]。王浩宇等采用数值模拟的方法对变压吸附制氧吸附器的吸附过程进行了研究 [11-12]。文献 [13-14] 通过建立传热传质数值模型对 Z 型向心流动立式径向流吸附器内吸附过程进行了研究。目前大部分关于立式径向流吸附器的研究未考虑吸附层内传热传质过程，仅通过流动均匀性来衡量吸附性能 [1-6]，而不同结构立式径向流吸附器吸附层内的传热传质特性还不明确。因此，本文对立式径向流吸附器吸附层内 CO_2 和 H_2O 的吸附过程进行模拟研究，分析了流动均匀性和吸附性能的关系，揭示和对比了不同结构吸附器吸附层内的传热传质特性和吸附性能，为立式径向流吸附器的选择和设计提供了理论参考。

1 模型构建与验证

1.1 物理模型

如图 1 所示，立式径向流吸附器按照流动形式可以分为向心 Z 型、离心 Z 型、向心 π 型和离心 π 型等 4 种结构。本研究中向心流动和离心流动的同

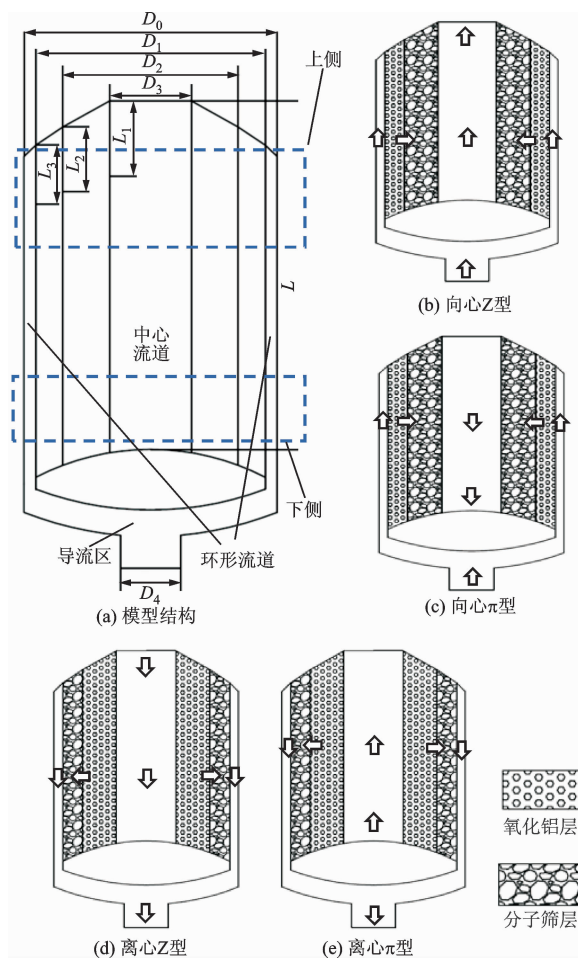


图 1 4 种立式径向流吸附器的模型结构

Fig. 1 Model structures of vertical radial flow adsorber

种吸附层的体积相等，但不同种类吸附层的位置不同，氧化铝层为活性氧化铝，分子筛层为分子筛 13X。结合图 1 的模型结构和流动形式，不同结构的立式径向吸附器结构参数如表 1 所示。

1.2 数学模型

吸附层内传热传质过程的数学模型基于以下假设：①工作介质是由空气、 CO_2 和 H_2O 组成的单相、不可压缩理想气体；②只考虑 CO_2 和 H_2O 的吸附过

表 1 立式径向流吸附器的结构参数

Table 1 Structural parameters of vertical radial flow adsorber

参数	向心流动	离心流动
外壳直径 D_0/m	0.840	0.840
格栅板 1 直径 D_1/m	0.760	0.760
格栅板 2 直径 D_2/m	0.680	0.434
格栅板 3 直径 D_3/m	0.270	0.270
入口直径 D_4/m	0.200	0.200
吸附层长度 L/m	1.600	1.600
挡板 1 长度 L_1/m	0.261	0.261
挡板 2 长度 L_2/m	0.224	0.224
挡板 3 长度 L_3/m	0.204	0.204

程,并且吸附热为定值,不随温度变化;③同种吸附层的填料均匀,吸附剂颗粒直径和孔隙率相等。基于以上假设,吸附层内传热传质过程的传质速率方程和吸附等温方程分别采用线性驱动模型(LDF)和扩展 D-A 模型^[13,15]来描述。

LDF 模型

$$\frac{\partial q_i}{\partial t} = k_m (q_i^* - q_i) \tag{1}$$

扩展 D-A 模型^[15,19]

$$V = V_0 \exp \left[- \left(K \ln \frac{p_{\text{sat}}}{p} \right)^m \right] \tag{2}$$

以上两式中: q_i 为 i 组分的吸附量, mol/kg ; t 为时间, s ; k_m 为传质系数,与吸附剂性质、吸附气体种类和流体流经吸附床的状态有关, s^{-1} ; q_i^* 为 i 组分的平衡吸附量, mol/kg ; V 为吸附的气体体积, m^3/kg ; V_0 为吸附剂理论吸附的最大气体体积, m^3/kg ; p_{sat} 为饱和压力, Pa ; p 为分压力, Pa ; K 和 m 为实验拟合系数,与吸附剂性质和吸附气体种类有关。

组分质量守恒方程

$$\frac{\partial (\epsilon_0 \rho_f Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_0 \rho_f \mathbf{u} Y_i) - \nabla (\epsilon_0 \rho_f D_{m,i} \nabla Y_i) = -S_{m,i} \tag{3}$$

$$S_{m,i} = (1 - \epsilon_0) \rho_s M_i \frac{\partial q_i}{\partial t} \tag{4}$$

总的质量守恒方程

$$\frac{\partial (\epsilon_0 \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_0 \rho_f \mathbf{u}) = -S_m \tag{5}$$

$$S_m = \sum_{i=1}^n S_{m,i} \tag{6}$$

式中: ϵ_0 为孔隙率; ρ_f 为气体密度, kg/m^3 ; Y_i 为组分质量分数; $\mathbf{u}$ 为速度, m/s ; $D_{m,i}$ 为组分 i 的气体扩散

系数, m^2/s ; S_i 为组分质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; ρ_s 为吸附剂密度, kg/m^3 ; M_i 为组分摩尔质量, kg/mol ; S_m 为总的质量源项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

动量方程

$$\frac{\partial (\rho_f \mathbf{u})}{\partial t} + (\rho_f \mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} + \rho_f \mathbf{g} + \mathbf{S} \tag{7}$$

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f k) + \nabla \cdot (\rho_f k \mathbf{u}) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho_f \epsilon - Y_M + S_k \tag{8}$$

ϵ 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_f \epsilon \mathbf{u}) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho_f \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \tag{9}$$

式中: $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量, Pa ; $\mathbf{S}$ 为动量源项, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^2)$; k 为湍动能, J ; μ 和 μ_t 分别为绝对黏度和湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 和 ϵ 的湍流普朗特数; G_k 为平均速度梯度引起的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; ϵ 为湍动能耗散率; Y_M 为可压缩湍流中膨胀对总耗散率的贡献; S_k 和 S_ϵ 分别为 k 和 ϵ 的源项; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为常数。采用多孔介质模型简化处理吸附层内流动。对于填料均匀的吸附层,动量源项 $\mathbf{S}$ 表达式为

$$\mathbf{S} = - \left(\mu \frac{\mathbf{u}}{\alpha} + \frac{1}{2} C_1 \rho_f |\mathbf{u}| \mathbf{u} \right) \tag{10}$$

式中: α 为渗透率, m^2 ; C_1 为惯性阻力系数, m^{-1} 。 α 和 C_1 的经验公式^[16]为

$$\alpha = \frac{d_p^2 \epsilon_0^3}{150 (1 - \epsilon_0)^2} \tag{11}$$

$$C_1 = \frac{3.5 (1 - \epsilon_0)}{d_p \epsilon_0^3} \tag{12}$$

式中: d_p 为吸附剂颗粒直径, m 。对于格栅板,动量源项表达式为

$$\mathbf{S} = - \left(\frac{1}{2} C_2 \rho_f |\mathbf{u}| \mathbf{u} \right) \tag{13}$$

C_2 的经验公式为

$$C_2 = - \frac{1}{C} \frac{\varphi^{-2} - 1}{\delta} \tag{14}$$

式中: φ 为开孔率; δ 为格栅板厚度, m ; C 为经验常数,与雷诺数 Re 和板厚孔径比 δ/D 有关 ($\delta/D > 1.6$ 且 $Re > 4\,000$ 时, C 取 0.98,其他情况取 0.62)。

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} [\epsilon_0 \rho_f E_f + (1 - \epsilon_0) \rho_s E_s] + \nabla [\mathbf{u} (\epsilon_0 \rho_f E_f + p)] =$$

$$\nabla \cdot [\lambda_e \nabla T + (\boldsymbol{u})] + S_{e,f} \tag{15}$$

$$S_{e,f} = (1 - \epsilon) \rho_s \sum_{i=1}^n \left(\Delta H_i \frac{\partial q_i}{\partial t} \right) \tag{16}$$

式中: E_f 为气体含有的能量,J/kg; E_s 为固体含有的能量,J/kg; λ_e 为床层有效导热系数,W/(m·K); T 为温度,K; ΔH_i 为气体吸附热,J/mol。

吸附层和格栅板的结构和性能参数如表 2 所示。吸附器运行流量为 2 000 m³/h,运行压力为 101 325 Pa,入口气体温度为 293 K,成分为空气、

表 2 吸附层和格栅板的结构和性能参数

Table 2 Structural and performance parameters of adsorption layers and grid plate

参数	氧化铝层	分子筛层	格栅板
填料空隙率 ϵ_0 , 格栅板开孔率 φ	0.435	0.37	0.39
填料颗粒直径 d_p /m, 格栅板厚度 δ /m	0.003 3	0.002 1	0.01
密度 ρ_s /(kg·m ⁻³)	810	689	
导热系数 λ_s /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	25	2.2	
比热容 C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 172	1 170	
H ₂ O 的吸附热 ΔH /(J·mol ⁻¹)	48 557.6	51 487.8	
CO ₂ 的吸附热 ΔH /(J·mol ⁻¹)	33 488	34 325.2	

1.3 模型验证

采用 ANSYS meshing 进行网格划分。为保证网格质量满足计算要求,以边界层网格形式对壁面和格栅板处的网格进行加密。以向心流动结构为例,区域离散化结果如图 2 所示。根据图 3 和表 3 可知,当网格数量≥8 万、时间步长≤0.02 s 后,吸附器的压降变化均小于 0.1%,CO₂ 和 H₂O 穿透时间的变化均小于 2%。因此,本研究选择网格尺寸为 3 mm,网格数量为 95 594,时间步长为 0.02 s。

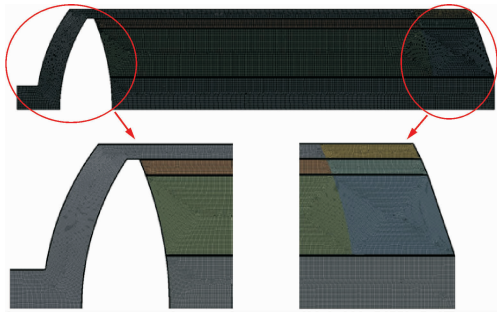


图 2 向心流动结构的区域离散化结果

Fig. 2 Regional discretization results of centripetal flow structure

采用文献[17]中的实验数据对数学模型进行验证,流动不均匀度的计算公式^[17]为

$$\eta' = 1 - \sqrt{\frac{p_{A0} - p_{B0}}{p_{An} - p_{Bn}}} \tag{17}$$

H₂O 和 CO₂, 三者的体积分数比为 99.76% : 0.20% : 0.04%。采用二维对称方式进行模型构建,采用 Fluent 基于压力的求解器,湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型,采用标准壁面函数处理近壁面处的流动,结合图 1 中不同形式的吸附器类型选择速度入口边界和压力出口边界。质量和能量源项通过 UDF 加载到 Fluent 中。压力离散格式为 PRESTO!,各方程离散格式都采用二阶迎风格式,收敛残差均设为 1×10^{-6} 。

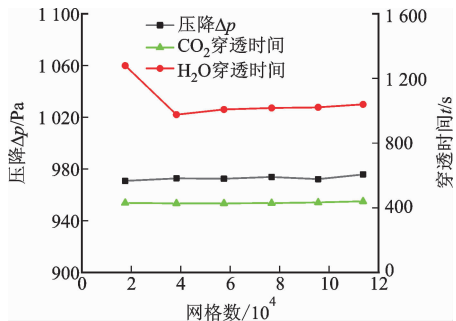


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Verification of grid independence

式中: $p_{A0} - p_{B0}$ 代表入口侧吸附层压差,Pa; $p_{An} - p_{Bn}$ 代表出口侧吸附层的压差,Pa。根据表 4 可知,计算结果与文献[17]的实验结果的相对误差在允许误差范围内。

表 3 时间步长无关性验证

Table 3 Verification of time step independence

时间 步长 Δt /s	压降 Δp /Pa	CO ₂		H ₂ O	
		穿透时 间/s	相对 误差/%	穿透时 间/s	相对 误差/%
0.2	971.3	590.00	17.2	1 271.60	12.3
0.1	972.3	503.50	9.2	1 132.10	6.5
0.05	972.4	461.05	6.4	1 063.10	4.1
0.02	972.2	433.38	1.9	1 021.62	1.4
0.01	972.1	425.50		1 007.88	

表 4 流动不均匀度对比

Table 4 A comparison of flow nonuniformities

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	结构	不均匀度	
		实验值 ^[17]	计算值
750	向心 Z 型	0.20	0.16
	离心 Z 型	0.11	0.09
	向心 π 型	0.19	0.16
	离心 π 型	0.50	0.07

采用文献[9]的结构对吸附过程的传热传质数学模型进行验证,模拟的 CO₂ 穿透曲线与文献[9]实验数据对比如图 4 所示。其中,文献[9]中无量纲时间的计算公式为

$$\tau = \frac{ut}{L}$$

(18)

式中: L 为轴向变压吸附器的长度,m。考虑到实验测量误差和模拟计算简化假设,模拟的 CO₂ 的穿透时间与实验数据基本一致,由此验证了数学模型的准确性。

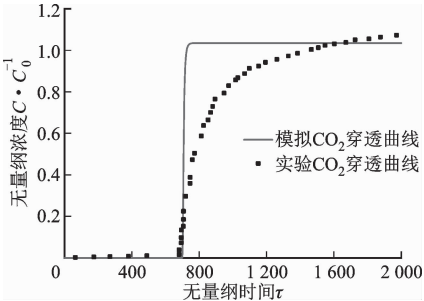


图 4 CO₂ 的穿透曲线对比

Fig. 4 A comparison of CO₂ breakthrough curves

1.4 吸附器性能指标

能耗和吸附性能是吸附器最重要的两个性能指标。能耗指标用吸附器的进出口压差表示。结合 H₂O 的体积分数小于 3×10^{-6} ,CO₂ 的体积分数小于 10^{-6} 的标准,实际中 CO₂ 比 H₂O 先穿透,因此本研究采用 CO₂ 的穿透时间作为吸附器吸附性能指标。文献中多采用流动均匀度来反映吸附器的吸附剂利用率和吸附性能,本文选择 Fluent 提供的流动均匀度计算公式

$$\eta = 1 - \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{u_{ri}}{\bar{u}_r} - 1 \right)^2$$

(19)

$$\bar{u}_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ri}$$

(20)

式中: u_r 为径向流动速度,m/s。记 3 层格栅板从外到内分别为 1、2 和 3,并取其平均值作为吸附器的

流动均匀度。

2 4 种立式径向流吸附器的性能对比

2.1 流场分布

结合图 5 可知,吸附过程中流动均匀度无明显变化,说明吸附过程中吸附器内的流场分布基本保持不变,流动均匀性指标可视为吸附过程中反映吸附器流场分布的常量。

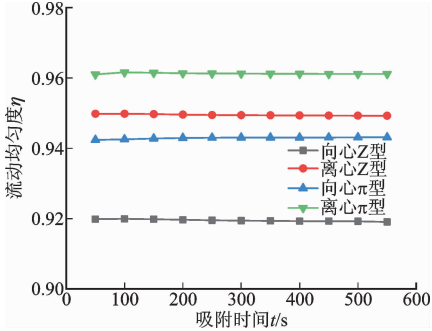
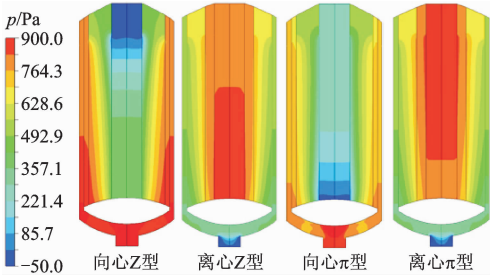


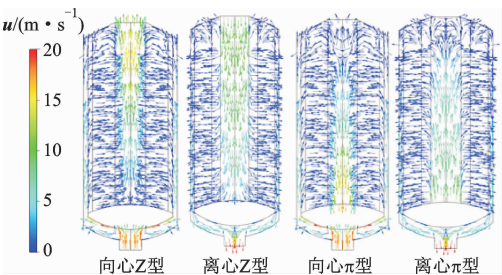
图 5 4 种吸附器流动均匀性随吸附时间的变化

Fig. 5 Variation of flow uniformity of four kinds of adsorbers with adsorption time

4 种结构的流场分布如图 6 所示,向心流动的两种吸附器气体经导流区进入环形流道,再依次经氧化铝层和分子筛层进入中心流道,最后向上或向下流出吸附器;离心流动的两种吸附器气体先进入中心流道,再依次经氧化铝层和分子筛层进入环形



(a) 静压分布



(b) 速度矢量分布

图 6 4 种结构立式径向流吸附器的流场分布

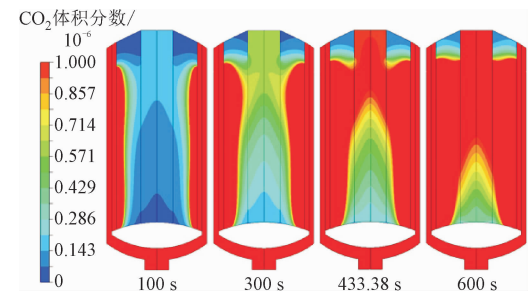
Fig. 6 Flow field distribution of four structures of vertical radial flow adsorber

流道,最后经导流区流出吸附器。4种吸附器内,沿着气体流动方向,静压不断降低,主要的压降区域在氧化铝层和分子筛层。

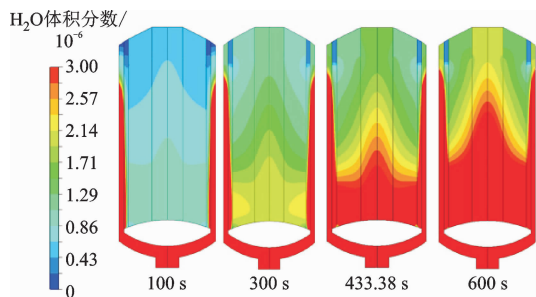
压降方面,向心 Z 型(974.3 Pa) > 离心 π 型(857.2 Pa) > 向心 π 型(856.8 Pa) > 离心 Z 型(828.3 Pa);以向心 Z 型为基准,离心 π 型的压降相对于向心 Z 型降低了 12.0%,向心 π 型的压降相对于向心 Z 型降低了 12.1%,离心 Z 型的压降相对于向心 Z 型降低了 15.0%。流动均匀性方面,两种流动均匀度均为:离心 π 型(0.961 1) > 离心 Z 型(0.949 3) > 向心 π 型(0.943 1) > 向心 Z 型(0.919 3)。

2.2 吸附传热传质过程

(1)向心 Z 型。向心 Z 型的 CO_2 穿透时间为 433.38 s,吸附时间 100、300、433.38 和 600 s 时 CO_2 和 H_2O 的体积分数分布如图 7 所示。对于向心 Z 型, CO_2 的穿透区域是上侧的吸附层区域, H_2O 的穿透区域是下侧的吸附层。



(a) CO_2 体积分数分布



(b) H_2O 体积分数分布

图 7 向心 Z 型吸附过程中 CO_2 和 H_2O 体积分数分布

Fig. 7 Concentration distribution of CO_2 and H_2O in adsorption process of centripetal Z-type

如图 8 所示,温度较高的区域是下侧的吸附层区域,该区域主要是 H_2O 的吸附。格栅板径向流速和吸附层压降分布如图 9 所示,进吸附层格栅板的径向流速主要受氧化铝层压降影响,出吸附层格栅板的径向流速主要受分子筛层压降的影响,吸附层内格栅板径向流速受两层吸附层压降的作用,吸附层上侧的压降较大从而使进出吸附层的气体的速度

分布(格栅板 1 和格栅板 3)均为上侧速度明显均大于其他位置,因此上侧的吸附层区域为最先穿透位置。

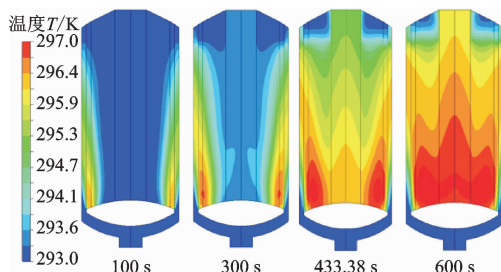


图 8 向心 Z 型吸附过程温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in adsorption process of centripetal Z-type

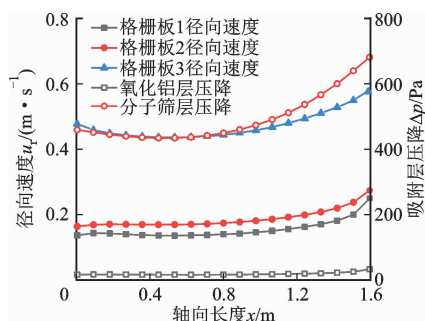
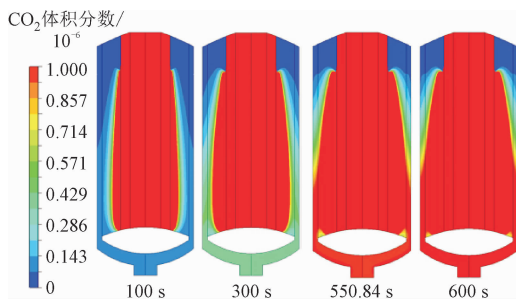


图 9 向心 Z 型径向流速和吸附层压降分布

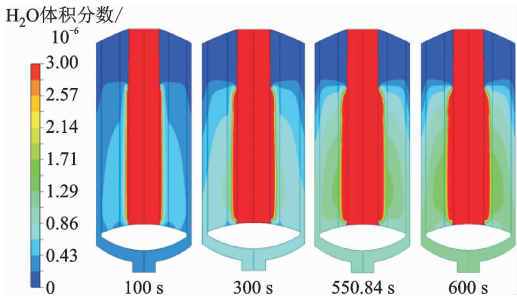
Fig. 9 Distribution of radial velocity and pressure drop of adsorption layers with centripetal Z-type

(2)离心 Z 型。离心 Z 型的 CO_2 穿透时间为 550.84 s,吸附时间 100、300、550.84 和 600 s 时 CO_2 和 H_2O 的体积分数分布如图 10 所示。对于离心 Z 型, CO_2 和 H_2O 的穿透区域均是下侧的吸附层区域。

如图 11 所示,温度较高的区域由上侧转移到中部偏下侧的吸附层区域,该区域是 CO_2 和 H_2O 的主要吸附区域。格栅板径向流速和吸附层压降分布如图 12 所示,受吸附层压降分布的影响,进吸附层(格栅板 3)的下侧速度均大于其他位置,出附层(格栅板 1)的中部偏下侧速度较大,因此中部偏下侧的



(a) CO_2 体积分数分布



(b) H₂O 体积分数分布

图 10 离心 Z 型吸附过程 CO₂ 和 H₂O 体积分数分布

Fig. 10 Concentration distribution of CO₂ and H₂O in adsorption process of centrifugal Z-type

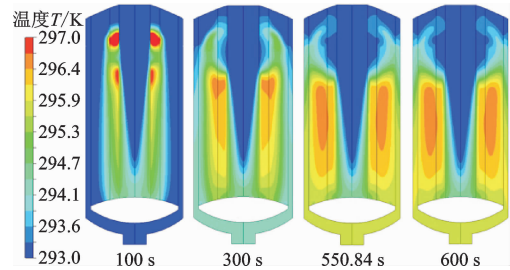


图 11 离心 Z 型吸附过程温度分布

Fig. 11 Temperature distribution in adsorption process of centrifugal Z-type

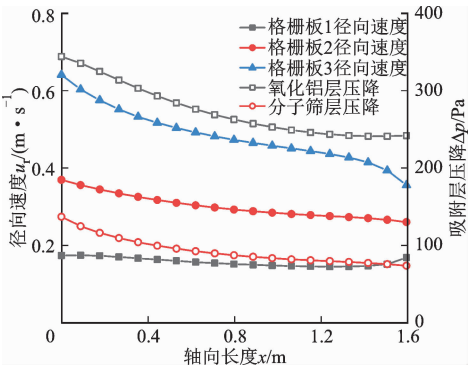


图 12 离心 Z 型径向流速和吸附层压降分布

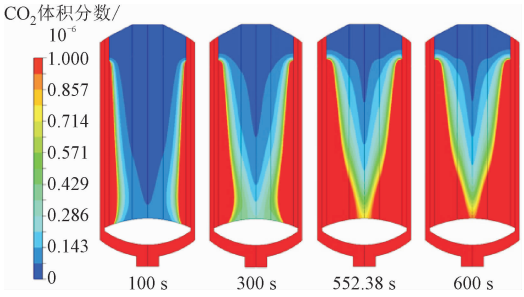
Fig. 12 Distribution of radial velocity and pressure drop of adsorption layers with centrifugal Z-type

吸附层区域为最先穿透位置。

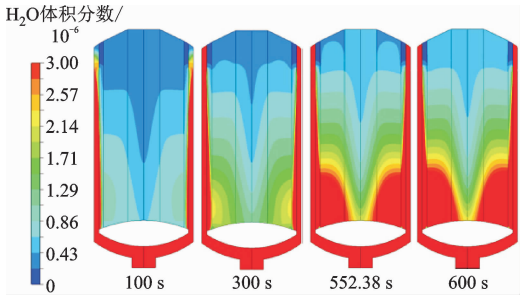
(3) 向心 π 型。向心 π 型的 CO₂ 穿透时间为 552.38 s, 吸附时间 100、300、552.38 和 600 s 时 CO₂ 和 H₂O 的体积分数分布如图 13 所示。对于向心 π 型, CO₂ 和 H₂O 的穿透区域均是下侧的吸附层区域。

如图 14 所示, 温度较高的区域在下侧的吸附层, 该区域是 CO₂ 和 H₂O 的主要吸附区域。格栅板径向流速和吸附层压降分布如图 15 所示, 受吸附层压降分布的影响, 进吸附层(格栅板 1)的速度是下侧速度凸起并大于其他位置, 出吸附层(格栅板

3) 的速度是下侧速度明显大于其他位置, 因此下侧



(a) CO₂ 体积分数分布



(b) H₂O 体积分数分布

图 13 向心 π 型吸附过程 CO₂ 和 H₂O 体积分数分布

Fig. 13 Concentration distribution of CO₂ and H₂O in adsorption process of centripetal π -type

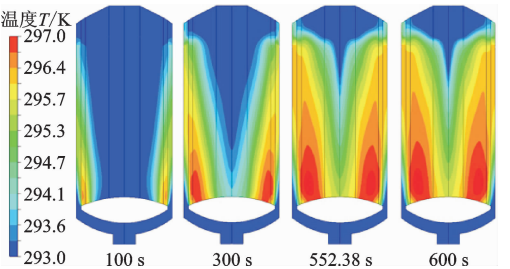


图 14 向心 π 型结构吸附过程中温度分布

Fig. 14 Temperature distribution in adsorption process of centripetal π -type

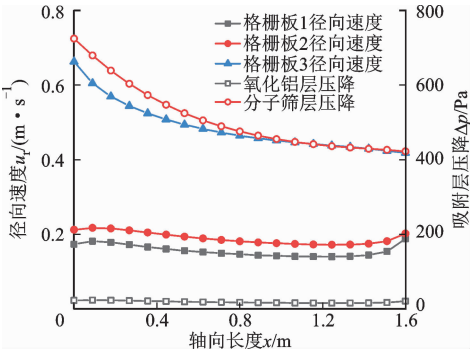


图 15 向心 π 型径向流速和吸附层压降分布

Fig. 15 Distribution of radial velocity and pressure drop of adsorption layers with centripetal π -type

的吸附层区域为最先穿透位置。

(4)离心 π 型。离心 π 型的 CO_2 穿透时间为 969.8 s, 吸附时间 200、400、600 和 969.8 s 时 CO_2 和 H_2O 的体积分数分布如图 16 所示。对于离心 π 型, CO_2 和 H_2O 的穿透区域均是上侧的吸附层区域。

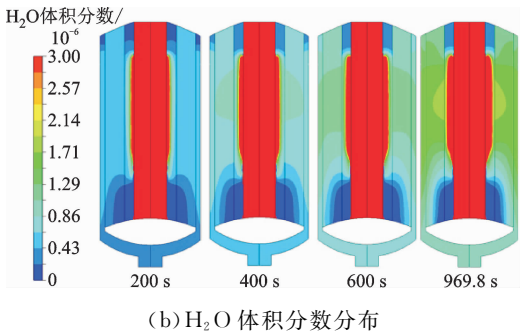
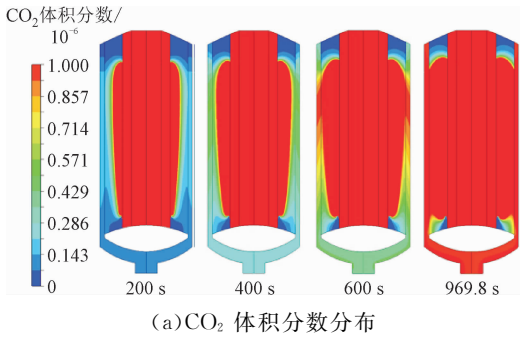


图 16 离心 π 型吸附过程 CO_2 和 H_2O 体积分数分布
Fig. 16 Concentration distribution of CO_2 and H_2O in adsorption process of centrifugal π -type

如图 17 所示, 温度较高的区域由下侧的吸附层区域转移到上侧的吸附层区域, 该区域是 CO_2 和 H_2O 的主要吸附区域。格栅板径向流速和吸附层压降分布如图 18 所示, 受吸附层压降分布的影响, 进吸附层(格栅板 3)的下侧速度略大于其他位置, 出吸附层(格栅板 1)的速度是上侧速度有凸起并大于其他位置, 因此上侧的吸附层区域为最先穿透位置。

对比 4 种形式吸附器的吸附过程, 不同结构的吸附器的穿透区域和主要吸附区域不同。向心 Z

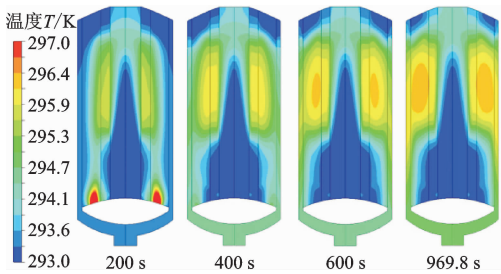


图 17 离心 π 型吸附过程温度分布
Fig. 17 Temperature distribution in adsorption process of centrifugal π -type

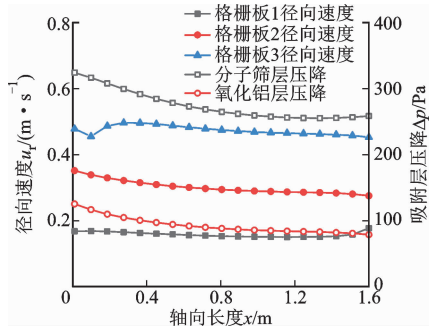


图 18 离心 π 型径向流速和吸附层压降分布
Fig. 18 Distribution of radial velocity and pressure drop of adsorption layers with centrifugal π -type

型结构的 CO_2 与 H_2O 穿透区域不同, 其他 3 种结构的 CO_2 与 H_2O 穿透区域相同。向心 Z 型、离心 Z 型和离心 π 型的 CO_2 穿透区域和主要吸附区域均为与进气侧相对的吸附层区域, 向心 π 型的 CO_2 穿透区域和主要吸附区域为进气侧吸附层区域。

2.3 性能对比

4 种结构立式径向流吸附器的性能对比如表 5 所示, 向心 π 型的 CO_2 和 H_2O 穿透时间相隔最近, 其他 3 种结构基本上 H_2O 穿透时间都是 CO_2 穿透时间的 2 倍多。虽然入口气体中 H_2O 的体积分数是 CO_2 的 5 倍, 但是氧化铝和分子筛层对 H_2O 的吸附能力远大于 CO_2 并且会优先吸收 H_2O , 因此 CO_2 穿透时间快于 H_2O 。4 种结构的吸附性能为: 离心 π 型 > 向心 π 型 > 离心 Z 型 > 向心 Z 型, 以向心 Z 型的吸附时间为基准, 离心 π 型的吸附时间是向心 Z 型的 2.34 倍, 向心 π 型的吸附时间是向心 Z 型的 1.28 倍, 离心 π 型的吸附时间是向心 Z 型的 1.27 倍。流动均匀性指标在吸附过程中为反映吸附器流场分布的参数, 根据表 5 可知, 流动均匀性指标与吸附器吸附性能变化规律相近, 因此采用流动均匀性反映吸附器的吸附剂利用率和吸附性能是合理的。综合对比 4 种结构的吸附器的性能, 离心 π 型的性能最好, 吸附时间为 969.8 s, 是向心 Z 型的

表 5 4 种结构的吸附性能对比

Table 5 A comparison of adsorption performance of four structures

性能参数	向心 Z 型	离心 Z 型	向心 π 型	离心 π 型
CO_2 穿透时间/s	433.38	550.84	552.38	968.80
H_2O 穿透时间/s	1 021.62	1 398.78	604.42	2 082.38
压降 $\Delta p/\text{Pa}$	974.3	828.3	856.8	857.2
流动均匀度 η	0.919 3	0.949 3	0.943 1	0.961 1

2.34倍,压降为857.2 Pa,相对于向心Z型降低了12.0%。

3 结 论

(1)流动均匀性指标是吸附过程中反映吸附器流场分布的常量,与吸附性能变化规律相近,可用于侧面反映立式径向流吸附器的吸附剂利用率和吸附性能。

(2)向心Z型结构的CO₂与H₂O穿透区域不同,其他3种结构的CO₂与H₂O穿透区域相同。

(3)向心Z型、离心Z型和离心π型的CO₂穿透区域和主要吸附区域均为与进气侧相对的吸附层区域,向心π型的穿透区域和主要吸附区域为进气侧吸附层区域。

(4)综合对比4种形式吸附器的性能,离心π型的性能最好,压降为857.2 Pa,相对于向心Z型降低了12.0%,吸附时间为969.8 s,是向心Z型的2.34倍。

参考文献:

- [1] 芮道哲. 大流量立式径向流吸附器分层并联均布方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 1-26.
- [2] 张成芳, 朱子彬, 徐懋生, 等. 径向反应器流体均布设计的研究[J]. 化工学报, 1979(1): 67-90.
ZHANG Chengfang, ZHU Zibin, XU Maosheng, et al. An investigation of design on the uniform fluid distribution for radial flow reactors[J]. CIESC Journal, 1979(1): 67-90.
- [3] 唐忠利, 徐明杨, 张俊. 径向流空气纯化器内流场的模拟与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(3): 305-313.
TANG Zhongli, XU Mingyang, ZHANG Jun. Simulation and analysis on gas flow distribution in radial flow air adsorber[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(3): 305-313.
- [4] KAREERI A A, ZUGHBI H D, AL-ALI H H. Simulation of flow distribution in radial flow reactors[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8): 2862-2874.
- [5] 陈瑶, 张学军, 陆军亮, 等. 径向流吸附器流体流动特性及其结构参数优化[J]. 化工学报, 2014, 65(9): 3395-3402.
CHEN Yao, ZHANG Xuejun, LU Junliang, et al. Flow characteristics of radial flow adsorber and its structure parameters optimization[J]. CIESC Journal,

2014, 65(9): 3395-3402.

- [6] 田奇琦. 大型空气分离系统建模与低能耗化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 50-73.
- [7] LI Gang, XIAO P, WEBLEY P, et al. Capture of CO₂ from high humidity flue gas by vacuum swing adsorption with zeolite 13X[J]. Adsorption-Journal of the International Adsorption Society, 2008, 14(2): 415-422.
- [8] KAPOOR A, YANG R T. Kinetic separation of methane-carbon dioxide mixture by adsorption on molecular sieve carbon[J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(8): 1723-1733.
- [9] LI Gang, XIAO P, ZHANG Jun, et al. The role of water on postcombustion CO₂ capture by vacuum swing adsorption: bed layering and purge to feed ratio[J]. AIChE Journal, 2014, 60(2): 673-689.
- [10] LI Gang, XIAO P, WEBLEY P A, et al. Competition of CO₂/H₂O in adsorption based CO₂ capture[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1123-1130.
- [11] 王浩宇. 变压吸附制氧径向流吸附器内变质量流动研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017: 58-84.
- [12] 王浩宇, 刘应书, 张传钊, 等. π型向心径向流吸附器变质量流动特性研究[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3385-3395.
WANG Haoyu, LIU Yingshu, ZHANG Chuanzhao, et al. Study on variable mass flow laws in π-shaped centripetal radial flow adsorber[J]. CIESC Journal, 2019, 70(9): 3385-3395.
- [13] 陈瑶. 径向流吸附器内流动与传热传质理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 14-42.
- [14] LI Yao, SI Haiqing, WANG Bing, et al. Optimization design research of air flow distribution in vertical radial flow adsorbers[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2018, 35(4): 835-846.
- [15] REGE S U, YANG R T, BUZANOWSKI M A. Sorbents for air prepurification in air separation[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(21): 4827-4838.
- [16] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [17] 宋续祺, 汪展文, 金涌, 等. 移动床径向反应器中流体力学行为的研究[J]. 化工学报, 1992(3): 268-274.
SONG Xuqi, WANG Zhanwen, JIN Yong, et al. Hydrodynamics of radial flow moving-bed reactor[J]. CIESC Journal, 1992(3): 268-274.

(编辑 亢列梅)