

动态吸附装置数值模拟及均匀流场分析

贾欣宇¹, 党明岩¹, 王健², 姜夕宗², 刘宸希¹, 孙杰¹

(1. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 沈阳 110159; 2. 风帆(扬州)有限责任公司, 江苏 扬州 225600)

摘要: 采用流场模拟软件对动态吸附装置内部流场进行数值模拟, 以流场不均匀度和压降为评价指标, 探讨了动态吸附装置的结构参数对其流场不均匀度和压降的影响。结果表明: 加装多孔板分布器可以在一定程度上改善进入吸附剂床层流体的流动均匀性; 采用中心不开孔分布器结构可以很好地避开高速流体的正面冲击, 将中心区域的高速流体阻断并向两侧分散, 更好地改善流场均匀性; 随着入口直径的增大, 流场不均匀度逐渐减小, 但会造成较大的设备损耗; 随着高径比的增大, 流场不均匀度逐渐增大, 进出口压降变大, 减小装置的高径比对均匀流场有着积极作用, 并且造成的流体流动损耗较低; 增大流体的入口流速可以在一定范围内改善流场均匀性, 但会增大流体流动损耗。

关键词: 吸附装置; 数值模拟; 流场; 计算流体动力学

中图分类号: TQ051.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1251.2024.04.011

Numerical Simulation of Dynamic Adsorption Device and Analysis of Uniformity of the Flow Field

JIA Xinyu¹, DANG Mingyan¹, WANG Jian², JIANG Xizong², LIU Chenxi¹, SUN Jie¹

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China; 2. Fengfan (Yangzhou) Co., Ltd., Yangzhou 225600, China)

Abstract: In this paper, the flow field inside the dynamic adsorption device is numerically simulated by using the flow field simulation software. The influence of the structural parameters of the dynamic adsorption device on the flow field non-uniformity and pressure drop is discussed. The results show that the porous plate distributor can improve the flow uniformity of the fluid entering the adsorbent bed to a certain extent, and the high speed fluid in the center area can be blocked and dispersed to both sides to better improve the flow field uniformity. With the increase of inlet diameter, the non-uniformity of flow field decreases gradually, but it will cause large equipment loss. With the increase of the ratio of height to diameter, the non-uniformity of the flow field gradually increases, and the pressure drop of inlet and outlet becomes larger. Reducing the ratio of height to diameter of the device has a positive effect on the uniform flow field, and the resulting fluid flow loss is lower. Increasing the inlet flow rate can improve the uniformity of the flow field in a certain range, but it will increase the flow loss.

Key words: adsorption device; numerical simulation; flow field; computational fluid dynamics

近年来, 化工、冶金等工业生产规模加大, 导致了水体中的重金属污染加剧, 含重金属的工业

废水在全世界范围内造成了严重的环境问题,甚至构成了全球性的威胁^[1-3]。在含重金属离子废水的处理方法中,吸附法应用较为广泛^[4-5]。固定床吸附装置结构简单、处理量大、吸附效果好,吸附过程主要依靠流体与吸附剂间的传质实现,但往往存在传质效率低、吸附剂床层利用不充分等问题,流体在吸附剂床层是否均匀分布,对吸附剂的吸附效率有重要影响^[6-7]。流体分布不均主要与吸附装置的设计不当有关。崔世纯等^[8]指出,由于射流的存在,进入装置的流体分布极不均匀,导致吸附剂穿透时间差别较大,进而导致装置性能下降;Kareeri 等^[9]发现,吸附装置的结构对流体分布有决定性影响。为此,研究人员提出通过改变吸附装置的结构参数来改善流体分布均匀性;陈瑶等^[10]系统地研究了各结构参数对吸附装置内流体分布的影响,通过调整径向流吸附装置的结构尺寸来改善流体分布的均匀性;王浩宇等^[11]模拟了加装分布器时吸附器内的流场分布,发现在吸附装置的内部加装多孔板分布器与单级挡板,内部流体分布的均匀性得到明显改善;Zhang 等^[12]指出低压降和流体均匀分布对吸附性能至关重要,通过对环形通道和分布器进行结构优化可以显著提高整体流动均匀性。

计算流体动力学(CFD)已广泛应用于解决实际工程问题,并取得了可靠的结果^[13-15]。本文采用流场模拟软件对动态吸附装置内部流场进行数值模拟,建立多孔介质吸附装置的仿真模型,以流场不均匀度和压降为评价指标,探讨了动态吸附装置的结构参数对其流场不均匀度和压降的影响,模拟计算结果可为动态吸附装置的结构优化提供理论支持。

1 物理模型及数学模型

1.1 物理模型

本文以实验室小型吸附装置为研究对象,为了捕捉精准的流体流动变化过程,采用 UG NX 10.0 三维建模软件建立 3D 实体物理模型,装置的支撑结构对流体分布的影响不大,因此对装置内部的一些支撑结构忽略不计。吸附装置包括 4 个部分:流体入口、多孔板分布器、吸附剂床层和流体出口。在吸附过程中,流体从入口流入吸附装置,流经吸附剂床层完成吸附,最后从出口流出。吸附剂床层由吸附剂颗粒构成,假定吸附剂颗粒固定不动,吸附剂床层上方获得均匀的初始

速度分布对短距离内流体均匀分布至关重要,因此选取吸附剂床层上方区域进行分析。图 1 为动态吸附装置物理模型。

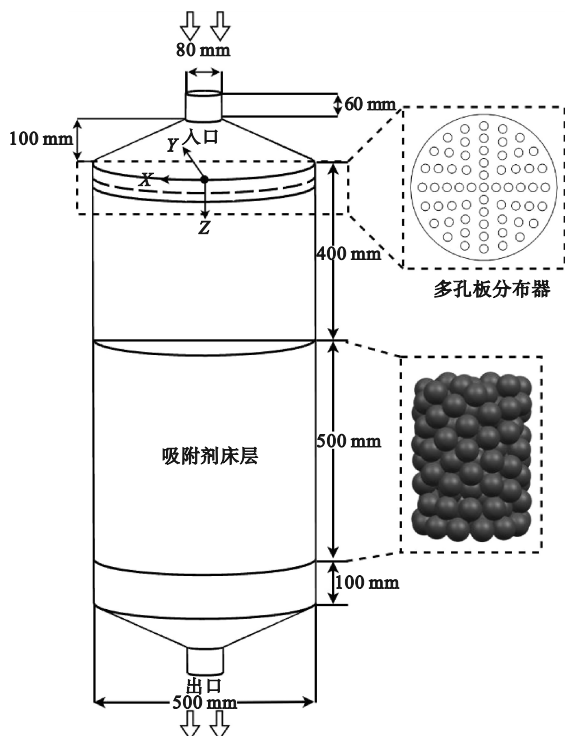


图 1 吸附装置物理模型

Fig. 1 Physical model of adsorption device

1.2 网格划分及网格验证

由于模型较为规则,本文采用 ANSYS ICEM 软件进行网格划分,并采用非结构化网格划分方式。为了更精准地进行 CFD 模拟,对进出口壁面进行近壁面加密处理,以充分捕捉壁面处的流动效应和湍流。多孔板分布器周围是流场变化最为剧烈的部分,为了更好地捕捉流动效应,采用局部网格加密处理,以提高数值计算的精度。计算域网格划分如图 2 所示。

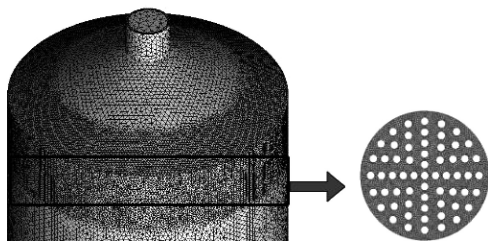


图 2 计算域网格划分

Fig. 2 Computational domain meshing

通过比较不同网格数的吸附装置内孔板出口通道中心区域处的速度分布,进行网格独立性研究。在入口流速为 0.1 m/s 时,分别计算网格数

为39.3万、77.4万、121.5万、270万和391万五种网格密度下孔板出口通道中心区域速度分布,结果如图3所示。

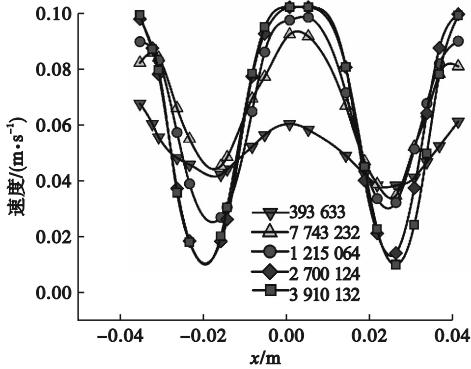


图3 不同网格数下多孔板分布器出口面轴向速度分布

Fig.3 Axial velocity distribution of orifice plate distributor under different grid numbers

由图3可知,网格数量低于270万时,速度偏离程度较大。网格数量高于270万时,速度的结果变化不大。因此网格数量为270万时,已经达到了计算所需的精度要求,故选择网格数量为270万。

1.3 模型验证

通过将周昊等^[16]推出的多孔板压降公式与本研究的数值模拟结果进行对比,验证本文数值模拟方法的有效性,对比结果如图4所示。

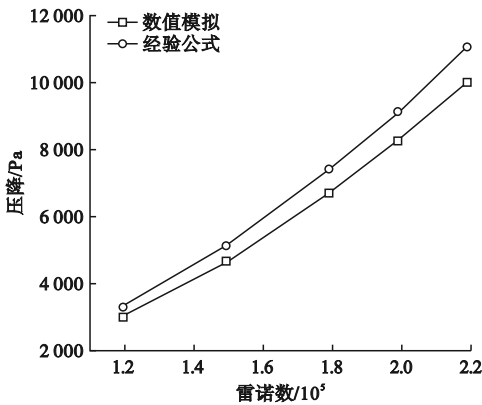


图4 通过模拟与经验公式计算获得的压降比较

Fig.4 Comparison of pressure drop obtained by simulation and empirical formula

由图4可知,两个结果之间的偏差均在10%以内,数据吻合较好,可以认为本文所采用的数值模拟方法可靠,可用于类似结构的流场仿真。

1.4 数学模型

本文采用质量守恒方程和动量守恒方程来计算吸附装置流场模拟过程流体流动的压力场和速

度场,方程如下^[17]。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - U'_i U'_j \right] \quad (2)$$

式中: U_i 、 U_j 为速度分量,m/s; x_i 、 x_j 为坐标分量,m; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; P 为流体压力,Pa; ν 为流体运动黏度, m^2/s ; $U'_i U'_j$ 为雷诺应力项。

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型通常用于模拟湍流状态下的流动特性,RNG $k-\varepsilon$ 模型通过在湍流动能耗散输运方程中加入一个额外的源项对 Navier-Stokes 方程进行重整化,可以更好地模拟多孔介质中的小尺度涡流。RNG $k-\varepsilon$ 模型的湍流动能方程和耗散率方程如下^[18]。

湍流动能方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: t 为流体运动时间,s; k 为湍流动能, m^2/s^2 ; σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数,取值为: $\sigma_k = 0.7194$; ε 为湍流耗散率, m^2/s^3 ; ν_t 为湍流动能黏度, m^2/s 。 C_μ 为模型经验常量。

扩散方程为

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \nu_t - \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} - C_\mu \eta^3 \frac{1 - \eta}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\eta = \left(\frac{k}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}{\nu_t} \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中: σ_ε 为 ε 方程的湍流普朗特数, $\sigma_\varepsilon = 0.7194$; C_{ε_1} 、 C_{ε_2} 、 η_0 、 β 均为模型经验常量, $C_{\varepsilon_1} = 1.42$, $C_{\varepsilon_2} = 1.68$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

假设体系中没有能量转换,也没有发生化学反应。由于吸附剂颗粒内部复杂的多孔结构,将吸附剂床层用多孔介质模型进行处理,采用 Ergun 方程计算多孔介质参数,多孔介质黏性阻力系数和惯性损失系数的表达式如下^[19]。

$$C_1 = \frac{150(1-\theta)^2}{d^2\theta^2} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\theta)}{d\theta^3} \quad (8)$$

式中: C_1 为黏性阻力系数, m^{-2} ; C_2 为惯性阻力系数, m^{-1} ; d 为吸附剂颗粒粒径, m ; θ 为孔隙率, %。

1.5 边界条件

吸附过程流场数值模拟选择 3D 双精度、压力基隐式求解器。湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。入口边界条件设置为入口速度, 湍流边界采用湍流强度和水力直径组合; 出口边界设置条件为压力出口, 壁面边界条件采用无滑移壁面。速度场和压力场的耦合计算采用改进的 SIMPLEC 算法^[20]。

2 评价方法

吸附装置的吸附效果与流体在吸附剂床层中的速度分布有关。本文采用流场不均匀度评价进入吸附剂床层前流体分布的均匀性, 采用进出口压降评价流体流动的损耗。

1) 流场不均匀度

$$M = \sqrt{\frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2 ds} \quad (9)$$

式中: M 为流场不均匀度; S_0 为截面面积, m^2 ; u_i 为 i 点的速度, m/s ; \bar{u} 为截面的平均速度, m/s 。

$$\bar{u} = \frac{1}{S_0} \int_0^{S_0} u_i ds \quad (10)$$

本文采用有限个速度点代替上述公式中的连续积分, 得到 M 为

$$M = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\bar{u}} \right)^2} \quad (11)$$

式中 n 为选取的速度点的个数。 M 越大, 说明内部流场均匀性越差; M 越小, 流场越均匀, 则越有利于吸附。需要强调的是, 不同截面上的 M 不同, 在计算时应明确截面。

2) 进出口压降

$$\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} \quad (12)$$

式中: P_{in} 为入口总压力, Pa ; P_{out} 为出口总压力, Pa ; ΔP 为进出口压降, Pa 。 ΔP 越大, 说明流体流动的损耗就越大。

3 计算结果分析

3.1 多孔板分布器对均流性能的影响

为了研究多孔板分布器对均流性能的影响, 选用 I 型(中心开孔)和 II 型(中心不开孔)两种不同结构的多孔板分布器。图 5 为不同结构的多孔板分布器简图。

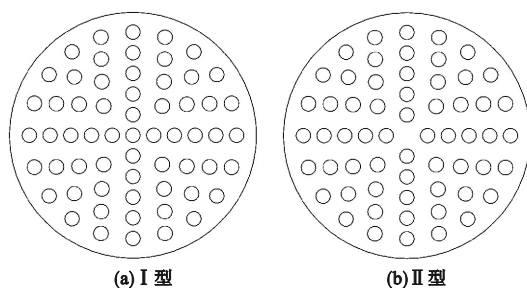


图 5 不同结构的多孔板分布器简图

Fig. 5 Schematic diagram of perforated plate distributor with different structures

分别取 $Z = 100, 200, 300, 350, 400$ mm 处五个截面的速度, 求取流场不均匀度, 得到装置内的流场不均匀度变化曲线如图 6 所示。

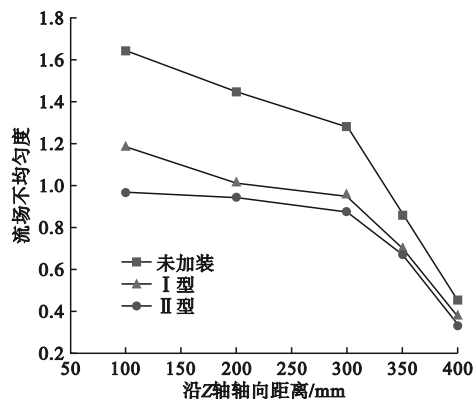


图 6 不同结构多孔板分布器流场不均匀度变化曲线

Fig. 6 Curve of non-uniformity of flow field with perforated plate distributor with different structures

由于内部流体流动阻力的存在, 流速沿着流动方向逐渐减小, 流经多孔介质区域时, 受到吸附剂颗粒均匀化和降速作用, 流体流速较低且分布均匀。由图 6 可知, 加装多孔板分布器可以显著改善进入吸附剂床层流体的流动均匀性。这是由于加装多孔板分布器后, 中心区域的流动速度降低, 使得内部流场的流体分布得到一定改善。相比于 I 型结构, II 型结构可进一步改善吸附装置的流体流场分布, 这是由于 II 型多孔板采用中心不开孔的结构, 避开了高速流体的正面冲击, 将中

心区域的高速流体阻断并向两侧分散,吸附装置中心区域速度和管壁周围速度差变小,吸附剂表面速度分布变均匀, M 减小,均流效果变优。因此,II型多孔板分布器可以更好地改善流场均匀性。

3.2 多孔板分布器对压降的影响

图7为不同结构下多孔板分布器的压降变化。

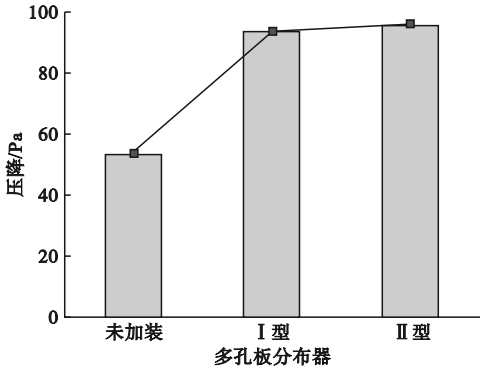


图7 不同结构的多孔板分布器压降变化

Fig.7 The pressure drop of perforated plate distributor with different structures

由图7可知,未加装多孔板分布器时压降为53.7378 Pa,多孔板分布器I型对应的压降为93.7124 Pa,多孔板分布器II型对应的压降为95.9883 Pa。在相同操作条件下,加装多孔板分布器可以较大程度上提高吸附装置的均流性能,但会造成一定的流体流动损耗,使进出口压降增大。II型分布器没有中心通道,中心区域的高速流体被阻断,在一定程度上增加了内部阻力,因此会比I型分布器造成更多的流体流动损耗。

3.3 入口直径对均流性能的影响

入口直径对流场不均匀度的影响如图8所示,图中 v 为入口流体流速。

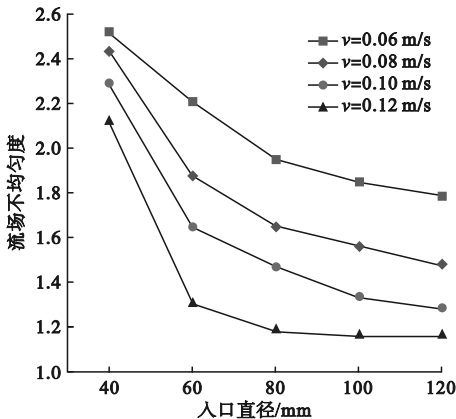


图8 流场不均匀度随入口直径的变化

Fig.8 Variation of non-uniformity of flow field with inlet diameters

由图8可知,当入口直径为40 mm时,流场不均匀度较高,随着入口直径的增大,流场不均匀度逐渐减小,入口直径为120 mm时,流场不均匀度最小。分析可知:在入口流速不变的情况下,减小入口直径,进水只在中心区域,导致中心速度较高,壁周围速度较低,流场不均匀度增大;增大入口直径会使中心进水速度减小,中心区域速度和壁周围速度差变小,中心速度与壁周围速度较平均,流场不均匀度减小。入口流速可以在一定范围内影响流场不均匀度,通过纵向比较可知,在入口直径相同时流场不均匀度随入口流速的增大而下降。当入口直径较小时,流场不均匀度受入口流速的影响较小,随着入口直径的增大,流场不均匀度随入口流速的增大迅速下降,并且下降趋势逐渐趋于稳定。

3.4 入口直径对压降的影响

入口直径对压降的影响如图9所示,可以看出,当入口直径较小时,进出口压降较小,随着入口直径的增大,进出口压降也随之增大。这是由于当入口直径较小时,高速流体只集中在中心区域,吸附剂床层上方旋涡程度较小,压降较小;当入口直径较大时,高速流体区域的增大使得旋涡区域扩大,压降增大。通过纵向比较可知,当入口直径为40~60 mm时,压降受入口流速的影响较小,随着入口直径的增大,压降受入口流速的影响较大,当入口直径为120 mm时,压降随入口流速的增大而迅速上升。综合分析可知,增大入口直径可以较好地改善流场均匀性,但是会造成较大的流体流动损耗。

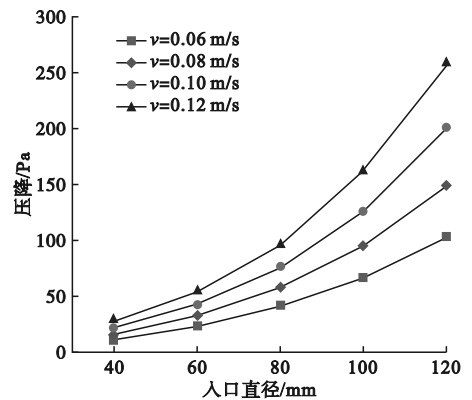


图9 压降随入口直径的变化

Fig.9 Variation of pressure drop with inlet diameters

3.5 高径比对均流性能的影响

在其他条件不变的情况下,通过改变吸附装置的直径来改变装置的高径比,高径比分别取为

1.25、1.42、1.67、2、2.5,探究高径比对流场不均匀度的影响,如图10所示。

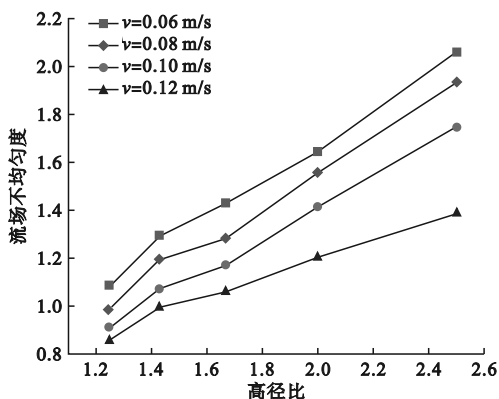


图10 流场不均匀度随高径比的变化

Fig. 10 Variation of non-uniformity of flow field with height-diameter ratios

由图10可知,在入口流速和入口直径不变的情况下,随着高径比的增大,流场不均匀度逐渐增大,在高径比为2.5时,流场不均匀度达到最大。分析可知:随着床层高径比的增大,吸附装置内部直径逐渐变小,导致流体没有足够的空间进行分散,流体在重力作用下集中在中心区域,内部流体分散不均匀,导致流场不均匀度较高。通过纵向比较可知,当高径比较小时,流场不均匀度受入口流速的影响较小,随着高径比的增大,流场不均匀度随入口流速的增大迅速下降。

3.6 高径比对压降的影响

进出口压降随高径比的变化如图11所示。

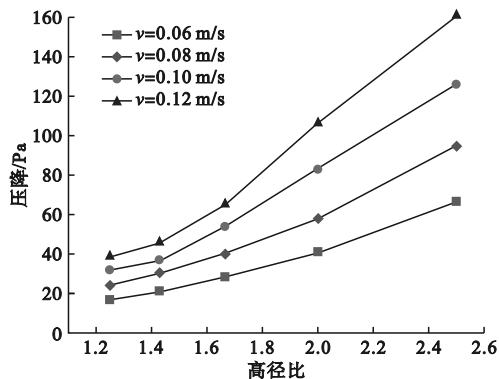


图11 压降随高径比的变化

Fig. 11 Variation of pressure drop with height-diameter ratios

由图11可知,当高径比较小时,进出口压降较小,随着高径比的增大,进出口压降也随之增大。分析可得:当床层的高径比较小时,吸附装置内部直径较大,流体有足够的径向空间进行分散,流体动能转化为压力能的程度降低,旋涡区域变

小,从而导致进出口压降减小。通过纵向比较可知,当高径比处于1.2~1.4范围内时,压降受入口流速的影响较小,当高径比高于1.6时,压降会随入口流速的增大而迅速上升。综上可知,减小装置的高径比可以较好地改善流场均匀性,并且造成的流体流动损耗较低。

4 结论

通过探究动态吸附装置的结构参数对其流场不均匀度和压降的影响规律,得出如下结论。

1) 加装多孔板分布器可以显著改善进入吸附剂床层流体的流动均匀性,采用中心不开孔的多孔板分布器可以将中心区域的高速流体阻断并向两侧分散,使得吸附剂表面速度分布变均匀,但会增加流体流动损耗。

2) 增大装置入口直径可以显著改善装置内部流场均匀性,但同时要综合考虑入口直径增大造成的流体流动损耗增大。减小装置的高径比对均匀流场有着积极作用,并且造成的流体流动损耗较低。

3) 增大流体的入口流速可以在一定范围内改善流场均匀性,但会增大流体流动损耗。

参考文献 (References):

- [1] RAFIQUE M, HAJRA S, TAHIR M B, et al. A review on sources of heavy metals, their toxicity and removal technique using physico-chemical processes from wastewater[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29 (11): 16772 - 16781.
- [2] ALI I, BASHEER A A, MBIANDA X Y, et al. Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater[J]. Environment International, 2019, 127: 160 - 180.
- [3] SOLIMAN N K, MOUSTAFA A F. Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (5): 10235 - 10253.
- [4] THAKUR A K, SINGH R, TEJA PULLELA R, et al. Green adsorbents for the removal of heavy metals from wastewater; a review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 57: 1468 - 1472.
- [5] JJAGWE J, OLUPOT P W, MENYA E, et al. Synthesis and application of granular activated carbon from biomass waste materials for water treatment; a review [J]. Journal of Bioresources and Bioproducts, 2021, 6(4): 292 - 322.
- [6] LI Y, SI H Q, WANG B, et al. Optimization design research of air flow distribution in vertical radial flow adsorbents[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2018, 35(4): 835 - 846.
- [7] LIU Y S, ZHENG X G, DAI R F. Numerical study of flow maldistribution and depressurization strategies in a small-scale

- axial adsorber[J]. Adsorption, 2014, 20(5): 757-768.
- [8] 崔世纯, 陈金娥. 轴向流固定床反应器流场计算研究: 数学模型与计算方法[J]. 上海力学, 1999, 20(3): 242-246.
- CUI S C, CHEN J E. Study on flow field computation in axial flow fixed-bed reactor—mathematical model and computational method[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1999, 20(3): 242-246. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 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 Y, ZHANG X J, LU J L, et al. Flow characteristics of radial flow adsorber and its structure parameters optimization[J]. CIESC Journal, 2014, 65(9): 3395-3402. (in Chinese)
- [11] 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): 575-580.
- WANG H Y, LIU Y S, WU Y M, et al. Internal flow characteristics of axial flow absorbers[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(4): 575-580. (in Chinese)
- [12] ZHANG R Y, WANG Y H, YU X X, et al. Flow characteristics of air separation in VPSA process with radial flow adsorber[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117672.
- [13] MAO H L, LI S Y, LAN S, et al. Uniform flow field design in porous media filter tower and experimental verification[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 150: 68-78.
- [14] HAO Z, ZHANG T, LV L, et al. Numerical simulation and an innovative design of the inlet gas distributor in an industrial adsorption tower[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2022, 173: 108848.
- [15] HOSSEINI S M, ALIZADEH R, ALIZADEHDAKHEL A, et al. Enhancement of gas distribution uniformity in a Claus process catalytic reactor using computational fluid dynamics[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2019, 144: 107653.
- [16] 周昊, 赵锴, 郭无双, 等. 中高开孔率电除尘器多孔板的阻力特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2629-2637.
- ZHOU H, ZHAO K, GUO W S, et al. Research on resistance characteristics of electrostatic precipitator's perforated plates with medium and high porosity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2629-2637. (in Chinese)
- [17] ZHU D, ZHANG J C, ZHANG K L, et al. Electrochemical machining on blisk cascade passage with dynamic additional electrolyte flow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1): 637-645.
- [18] ANALYTIS G T. Implementation and assessment of the renormalization group(RNG), quadratic and cubic non-linear eddy viscosity k-ε models in GOTHIC[J]. Nuclear Engineering and Design, 2001, 210(1/2/3): 177-191.
- [19] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [20] VAN DOORMAAL J P, RAITHBY G D. Enhancements of the simple method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7(2): 147-163.

(责任编辑:徐淑姣)

(上接第62页)

- [5] HUANG D L, HU C J, ZENG G M, et al. Combination of Fenton processes and biotreatment for wastewater treatment and soil remediation[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1599-1610.
- [6] TUŠAR N N, MAUČEC D, RANGUS M, et al. Manganese functionalized silicate nanoparticles as a Fenton-type catalyst for water purification by advanced oxidation processes(AOP)[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(4): 820-826.
- [7] SONG S J, WANG Y L, SHEN H, et al. Ultrasmall graphene oxide modified with Fe₃O₄ nanoparticles as a Fenton-like agent for methylene blue degradation[J]. ACS Applied Nano Materials, 2019, 2(11): 7074-7084.
- [8] FUJITA Y, YAMASAKI A, NITTA R, et al. Cu₂O films without impurities fabricated via the mist spin spray technique using a mixed alkaline solution for flexible glucose sensors[J]. Thin Solid Films, 2023, 787: 140123.
- [9] SUN M, ZHANG L X, TIAN F L, et al. Mechanistic investigation on Ag-Cu₂O in electrocatalytic CO₂ to CH₄ by in situ/operando spectroscopic and theoretical analysis[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 88: 521-531.
- [10] 郭昕, 汪天霄, 张书彬, 等. 球形 Cu₂O@HP-β-CD 合成、表征及类芬顿去除水中亚甲基蓝的研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2023, 40(1): 15-22.
- GUO X, WANG T X, ZHANG S B, et al. Synthesis, characterization of spherical Cu₂O@HP-β-CD and the Fenton-like catalytic removal of methylene blue in aqueous solution[J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2023, 40(1): 15-22. (in Chinese)
- [11] 何余生, 李忠, 奚红霞, 等. 气固吸附等温线的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2004, 20(4): 376-384.
- HE Y S, LI Z, XI H X, et al. Research progress of gas-solid adsorption isotherms[J]. Ion Exchange and Adsorption, 2004, 20(4): 376-384. (in Chinese)
- [12] 刘晨浩, 姜承志. TiO₂/GO-Fe₃O₄ 复合材料的制备及性能研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2022, 41(3): 46-52, 58.
- LIU C H, JIANG C Z. Preparation and properties of TiO₂/GO-Fe₃O₄ composites[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2022, 41(3): 46-52, 58. (in Chinese)
- [13] 康琳, 周明, 林博文, 等. Cu₂O/H₂O₂ 类芬顿工艺用于染料废水的脱色研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(3): 18-22, 27.
- KANG L, ZHOU M, LIN B W, et al. Decolorization of dye wastewater by Cu₂O/H₂O₂ Fenton-like process[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(3): 18-22, 27. (in Chinese)
- [14] 张寒旭, 何争光, 刘亚琦, 等. 氧化石墨烯负载纳米 Fe₃O₄ 类芬顿处理制药废水[J]. 水处理技术, 2021, 47(3): 124-128.
- ZHANG H X, HE Z G, LIU Y Q, et al. Graphene oxide-loaded nano-Fe₃O₄ multiphase Fenton-like treatment for pharmaceutical wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(3): 124-128. (in Chinese)

(责任编辑:宋颖韬)