

其他水系统研究与应用

朱兆亮, 翟杨, 吴冬冬, 等. 气液两相对中空纤维膜错流过滤过程的影响[J]. 净水技术, 2022,41(3):104-109.

ZHU Z L, ZHAI Y, WU D D, et al. Influence of gas-liquid two-phase flow on cross-flow filtration process of hollow fiber membrane[J].

Water Purification Technology, 2022,41(3):104-109.



扫我试试?

气液两相流对中空纤维膜错流过滤过程的影响

朱兆亮¹, 翟杨¹, 吴冬冬^{2,*}, 刘永剑², 吴青², 于博文²

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 水发规划设计研究有限公司, 山东济南 250100)

摘要 采用聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜进行错流过滤试验,以中空纤维膜组件的膜通量、浊度以及高锰酸盐指数(COD_{Mn})的截留率为考察指标,通过在过滤时添加曝气形成气液两相流,研究在气液两相流条件下曝气量、进水流量、跨膜压差等参数对中空纤维膜错流过滤过程的影响。试验结果表明:在一定范围内,膜通量随着曝气量增大而增大,曝气量为120 L/h时对浊度的去除效果最好,为96.5%,COD_{Mn}的截留率为68.6%,达到动态平衡状态后膜通量最高,继续提升曝气量,膜通量随曝气量增加而减小,出水浊度也略有升高;跨膜压差越大,膜通量越高,中空纤维膜组件达到动态平衡状态的时间越早;增大进水流量利于提高膜通量。气液两相流能有效减缓浓差极化和膜污染,提高稳定通量,有利于提高膜过滤效率。

关键词 气液两相流 中空纤维膜 错流过滤 膜通量 截留率

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)03-0104-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.016

Influence of Gas-Liquid Two-Phase Flow on Cross-Flow Filtration Process of Hollow Fiber Membrane

ZHU Zhaoliang¹, ZHAI Yang¹, WU Dongdong^{2,*}, LIU Yongjian², WU Qing², YU Bowen²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract In this paper, PVDF hollow fiber membrane was used for cross-flow filtration experiment. Membrane flux, turbidity and COD_{Mn} retention rate of hollow fiber membrane module were taken as inspection indices, gas-liquid two-phase flow was formed by adding aeration during filtration. The effects of aeration quantity, influent flow rate and transmembrane pressure difference on cross-flow filtration process of hollow fiber membrane were studied. Results showed that within a certain range, membrane flux increased with the increasing of aeration rate, with aeration rate of 120 L/h, best turbidity removal efficiency was 96.5%, and the retention rate of COD_{Mn} was 68.6%. After reaching dynamic equilibrium state, the membrane flux was highest, and the membrane flux decreased with the continuous increased of aeration rate, and the effluent turbidity also increased slightly. The larger the transmembrane pressure difference, the higher the membrane flux, and the earlier the hollow fiber membrane module reached the dynamic equilibrium state. Increasing influent flow rate was beneficial to increase membrane flux. Gas-liquid two-phase flow could effectively slow down concentration polarization and membrane fouling, improve stable flux and membrane filtration efficiency.

Keywords gas-liquid two-phase flow hollow fiber membrane cross-flow filtration membrane flux retention rate

[收稿日期] 2020-12-15

[作者简介] 朱兆亮(1975—),男,教授,研究方向为水污染控制等,E-mail:262263065@qq.com。

[通信作者] 吴冬冬(1987—),女,研究方向为水污染控制技术,E-mail:114982755@qq.com。

膜分离技术具有节能、高效、环保、易于操作等优点,是分离科学的重要手段之一^[1-2],已广泛应用于水处理、化工、医药、发酵等领域^[3-8]。中空纤维膜的外部形状类似于纤维,微孔存在于管壁上,在过滤压力的作用下,小于孔径的组分通过膜表面起到分离的作用。根据运行模式分类标准,中空纤维膜分离技术有死端过滤和错流过滤两种^[9]。错流过滤过程中,中空纤维膜表面同时受到两个力的作用,一方面在垂直于膜表面的作用力下,一部分原料液通过膜孔完成过滤过程;另一方面,在平行于膜表面的切向作用力下,中空纤维膜表面受到冲刷作用,可以有效地延缓污染物质在膜表面上的沉积,延缓滤饼层的形成,并减小滤饼层的厚度^[10-11]。随着过滤时间的增加,膜通量逐渐降低并且趋于稳定,达到动态平衡状态。因此,与死端过滤相比,错流过滤时膜污染相对较轻,膜通量下降比较缓慢,可以实现连续运行。张峰等^[12]研究发现,当曝气量为 400 L/h 时,与相同流速条件下单相流错流过滤相比,膜通量提升 87%。邢卫红等^[13]研究发现,曝气过程能有效降低膜过滤阻力,基本消除浓差极化的影响。Mercier 等^[14]在采用斑脱土和发酵液悬浮物超滤过程中引入曝气,膜通量提升了 200%。Cabassud 等^[15]研究发现,在曝气的表观速度为 1 m/s 时,膜通量提升 110%。同时,间歇曝气时膜分离效果好于连续曝气^[16]。曹伟奎^[17]研究发现,连续流错流过滤在延缓膜污染方面更具优势。本文通过在错流过滤时增加曝气,形成气液两相流,探究曝气量、跨膜压差(TMP)、进水流量等影响因素对中空纤维膜膜通量以及截留率的影响。

1 材料与方法

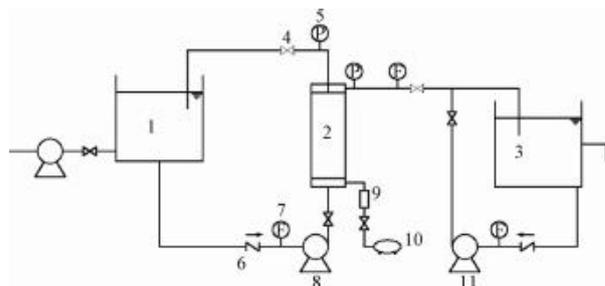
1.1 试验材料及装置

试验中空纤维膜采用 PVDF 膜,内径为 1.2 mm,外径为 1.8 mm,长度为 1.4 m,有效过滤面积为 0.008 m²,截留分子量为 80 000 Da。

试验以水厂高密度沉淀池进水为原水, COD_{Mn} 的含量约为 3 mg/L, 浊度约为 1.2 NTU。

试验装置流程如图 1 所示。由离心泵将原水送入进水桶,再通过进水泵将原水压入中空纤维膜组件进行错流过滤,一部分通过滤膜排至净水桶,剩余液回到进水桶循环操作。反冲洗时,通过反冲洗泵将净水桶内的水压入中空纤维膜组件进行反冲

洗,而后通过回流管道回到进水桶。通过空气压缩机为过滤与反冲洗提供曝气,调节中空纤维膜组件的进出口阀门以及回流阀门改变 TMP 和进水流量,通过调节曝气管道阀门改变曝气量。中空纤维膜组件进出水流量和压力分别由流量计和数字压力表在线测量,曝气量通过气量计进行观测。



注:1—进水桶;2—中空纤维膜组件;3—净水桶;4—旋转阀;5—数字压力表;6—止回阀;7—流量计;8—进水泵;9—气量计;10—空气压缩机;11—反冲洗泵

图 1 试验装置流程图

Fig. 1 Flow Chart of Experimental Device

1.2 分析方法

常规污染指标 COD_{Mn} 按照《生活饮用水标准检验方法 有机物综合指标》(GB/T 5750.7—2006) 酸性高锰酸钾滴定法进行检测,每组数据测定 3 次取平均值。浊度使用 WZG 台式浊度仪进行检测。

膜通量 J 计算如式(1)。

$$J = Q/S \quad (1)$$

其中: J ——膜通量, L/(m²·h);

Q ——中空纤维膜组件出水流量, L/h;

S ——中空纤维膜组件有效过滤面积, m²。

截留率 R 计算如式(2)。

$$R = 1 - \rho_1/\rho_0 \quad (2)$$

其中: R ——截留率;

ρ_1 ——中空纤维膜组件出水中 COD_{Mn} 的质量浓度, mg/L;

ρ_0 ——中空纤维膜组件进水中 COD_{Mn} 的质量浓度, mg/L。

2 结果与讨论

2.1 曝气量的影响

试验中控制进水流量为 0.48 m³/h、TMP 为

0.02 MPa, 持续运行 3 h。改变曝气量(0、90、120、150、180 L/h)分别进行试验, 记录膜通量的变化(图 2), 并得到对浊度的去除效果与对 COD_{Mn} 的截留效果(图 3~图 4)。

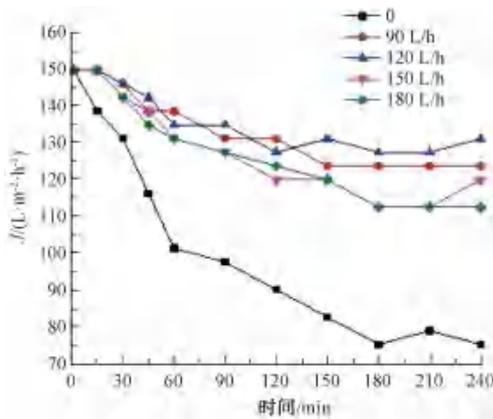


图 2 不同曝气量下膜通量随时间变化

Fig. 2 Variation of Membrane Flux with Time under Different Aeration Rates

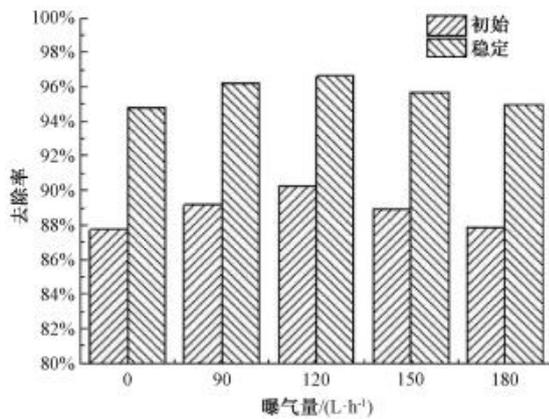


图 3 不同曝气量下对浊度的去除效果

Fig. 3 Turbidity Removal Efficiency under Different Aeration Rates

由图 2 可知, 随着过滤时间的增加膜通量逐渐降低, 直至降低到一定程度, 达成动态平衡状态。与曝气量为 0 时的试验数据对比, 增加曝气后膜通量的衰减情况有了明显的改善, 稳定以后的通量明显高于曝气量为 0 时的稳定通量。说明加入曝气后形成了气液两相流, 导致中空纤维膜组件内原料液的湍流程度增加, 原料液所施加的平行于膜面的切应力随之增加, 同时膜丝表面受到气泡的冲刷, 使得在膜表面沉积的污染物质不断被带走。气泡冲刷作用产生膜丝扰动现象, 更加有效地抑制了滤饼层的形

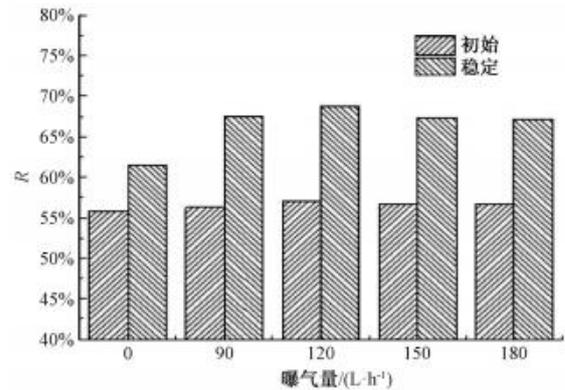


图 4 不同曝气量下 COD_{Mn} 截留率

Fig. 4 COD_{Mn} Retention Rate under Different Aeration Rates

成, 使滤饼层的厚度维持在较低的水平, 减小了凝胶层的厚度, 削弱了浓差极化带来的影响, 因此, 膜通量有了明显的升高, 有利于膜传质。

图 2 表明在一定范围内, 随着曝气量的增加, 中空纤维膜组件的稳定膜通量逐渐增大。当曝气量为 120 L/h 时, 中空纤维膜稳定膜通量最大, 与曝气量为 0 时的单相流错流过滤相比, 稳定膜通量增加了 65%。但当曝气量大于 120 L/h 时, 进一步增大曝气量, 膜通量反而出现了降低的现象, 说明过高的曝气会对中空纤维膜错流过滤系统造成负面影响, 与曝气量为 120 L/h 时的稳定膜通量相比, 曝气量为 150 L/h 和 180 L/h 时分别衰减了 5.88% 和 11.76%。这说明当曝气量超过 120 L/h 时, 中空纤维膜组件的稳定膜通量随着曝气量的增大而减小。这是因为当曝气量过高时, 受过高的剪切力会产生细小污泥颗粒, 增加直接堵塞膜孔的机会, 另一方面, 过高的曝气量产生的气泡附着在膜丝表面, 减小了滤膜的有效过滤面积。因此, 增加曝气形成气液两相流以后, 可以起到缓解膜污染、增加膜通量、增强传质的作用, 且在一定范围内, 中空纤维膜组件稳定通量随着曝气量的增加而增大。

由图 3 可知, 增加曝气形成气液两相流后, 浊度的去除率不论是在初始状态还是稳定状态均高于无曝气单相流过程。无曝气单相流条件下中空纤维膜组件对浊度的初始去除率和稳定状态去除率分别为 87.6% 和 94.7%。气液两相流条件下曝气量为 120 L/h 时, 对浊度的初始去除率和稳定状态去除率分别为 90.2% 和 96.5%; 曝气量为 180 L/h 时, 中空纤维膜组件对浊度的初始去除率和稳定

状态去除率分别为 87.7% 和 94.9%，可以发现随着曝气量的增加，去除率均呈现先增加后减少的现象。这是因为增加曝气以后，气泡的冲刷作用以及膜丝扰动现象导致中空纤维膜表面吸附沉积的污泥被快速带走，膜表面浓度降低，更多的溶质随着回流被带走，减小了溶质通过概率，因此，会产生去除率增加的现象。但当曝气量过高时，膜丝扰动作用过强，滤饼层过滤作用减弱，且过大的曝气量所带来的剪切作用增强，会产生更多的细小污泥颗粒，增加溶质通过膜孔的概率，因此，当曝气量过高时，会产生去除率下降的现象。

由图 4 可知，增加曝气形成气液两相流以后，对 COD_{Mn} 的稳定截留效果有了明显提升，这是因为增加曝气以后，气液两相流能起到缓解膜污染、减弱浓度极化差的效果，膜表面浓度较低，溶质通过也相对减少，因此，截留率有所升高。结合图 3 与图 4，随着曝气量的增加，浑浊度的截留效果变化更加明显，初始截留率的变化比稳定状态截留率的变化更加明显。 COD_{Mn} 截留率的变化主要体现在有曝气与无曝气时稳定截留率的变化，增加曝气量以后，对 COD_{Mn} 的稳定截留率提升了 11.5%，有曝气时，增加曝气量对于 COD_{Mn} 的初始截留率影响不大。因此，综合考虑膜通量变化、浑浊度去除效果以及 COD_{Mn} 的截留率，最适宜的曝气量为 120 L/h。

2.2 TMP 的影响

试验中控制进水流量为 0.48 m³/h，在曝气量为 120 L/h 的条件下持续运行 3 h。改变 TMP (0.010、0.015、0.020、0.025、0.030 MPa) 分别进行试验，记录膜通量的变化(图 5)，并得到对浑浊度的去除效果与对 COD_{Mn} 的截留效果(图 6~图 7)。

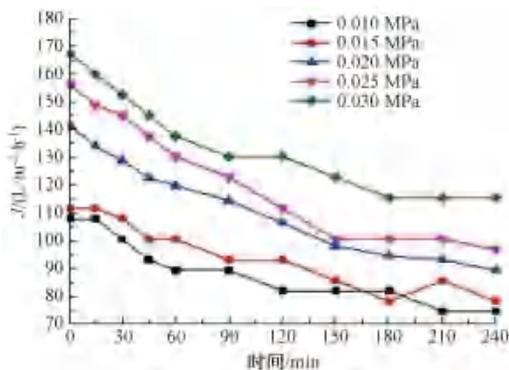


图 5 不同 TMP 下膜通量随时间变化

Fig. 5 Variation of Membrane Flux with Time under Different TMP

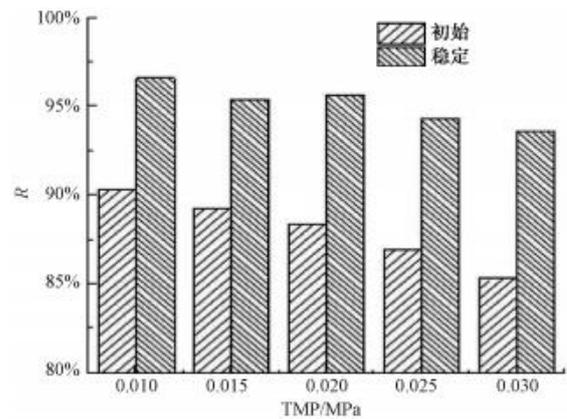


图 6 不同 TMP 下对浑浊度的去除效果

Fig. 6 Turbidity Removal Efficiency under Different TMP

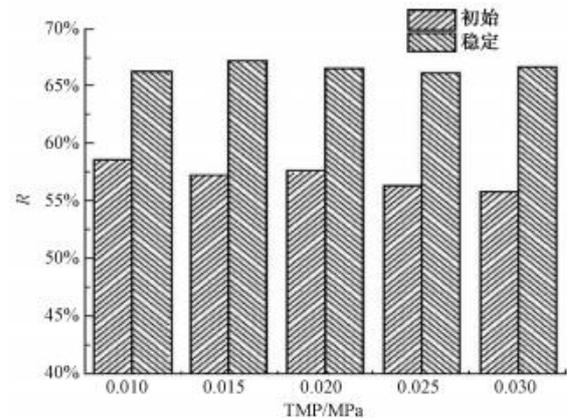


图 7 不同 TMP 下 COD_{Mn} 截留率

Fig. 7 COD_{Mn} Retention Rate under Different TMP

由图 5 可知，随着过滤时间的增加，膜通量逐渐降低，然后趋于稳定状态。观察发现 TMP 为 0.010、0.015、0.020、0.025、0.030 MPa 时，90 min 膜通量较初始通量分别衰减了 17.2%、17.7%、19.1%、21.4%、22.2%。由前 90 min 膜通量变化可知，随着 TMP 逐渐增大，膜通量的衰减速率也逐渐增大，且膜通量的衰减速率与 TMP 强度基本呈线性关系。随着 TMP 增大，膜通量增大，膜表面污泥快速堆积，更多溶质通过中空纤维膜，膜表面的浓度极化差加剧。因此，在前期时 TMP 越大，膜通量的衰减越明显。同时，可以观察到较低的 TMP 下，通常在 210 min 才会达到稳定状态。当 TMP 达到 0.020 MPa 以上时，在 180 min 可达到稳定状态，这是因为受到膜表面污泥快速堆积的影响，滤饼层形成早，达到稳定状态的时间相对缩短，因此，在高 TMP 下能更快达到平衡状态。

由图 6 可知, TMP 为 0.030 MPa 时对浊度的初始去除率与稳定去除率分别为 85.3%、93.5%, 较 TMP 为 0.010 MPa 时的初始去除率(90.3%)、稳定去除率(96.5%), 去除率的降低率分别为 5.54% 和 3.11%。随着 TMP 逐渐增大, 对浊度的初始去除效果与稳定状态去除效果均有所降低, 这是由于 TMP 增大, 膜通量增加, 浓差极化现象加剧, 膜表面浓度升高, 溶质通过增多, 因此, 初始去除效果随着 TMP 升高衰减越明显; 当达到平衡状态, 在膜表面滤饼层过滤作用下, 虽然高的 TMP 仍然具有较高的膜通量, 但一部分溶质被滤饼层过滤截留, 然后受到错流过滤剪切力的作用随浓缩液回流, 因此, 稳定状态去除率衰减较少。

由图 7 可知, 随着 TMP 的增大, COD_{Mn} 的初始截留率有所减小, 稳定截留率基本不变。主要是因为随着 TMP 的增大, 膜通量相对增大, 溶质通过增多, 引起了初始截留率的降低, 随着运行时间的增加, 中空纤维膜表面的滤饼层逐渐形成, 对以颗粒状以及胶体状存在的 COD_{Mn} 去除率提高, 同时滤饼层内附着的微生物提供了一部分生物降解作用。因此, 达到稳定状态时, 滤饼层形成并稳定, TMP 对 COD_{Mn} 的截留率影响不大。因此, 综合考虑膜通量变化、浊度去除效果、 COD_{Mn} 的截留率以及设备运行效果, 最适宜的 TMP 为 0.020 MPa。

2.3 进水流量的影响

试验中控制 TMP 为 0.020 MPa, 在曝气量为 120 L/h 的条件下持续运行 3 h。改变进水流量 (300、360、420、480 L/h) 分别进行试验, 记录膜通量的变化 (图 8), 并得到对浊度的去除效果与对 COD_{Mn} 的截留效果 (图 9~图 10)。

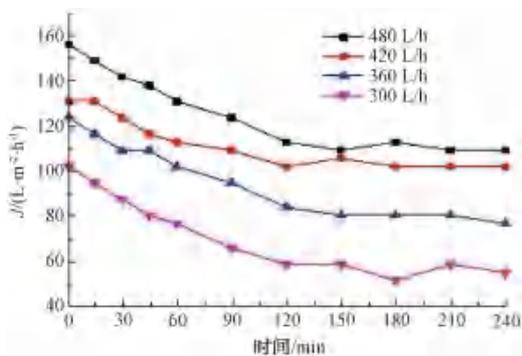


图 8 不同进水流量下膜通量随时间变化
Fig. 8 Variation of Membrane Flux with Time under Different Inflow Rate

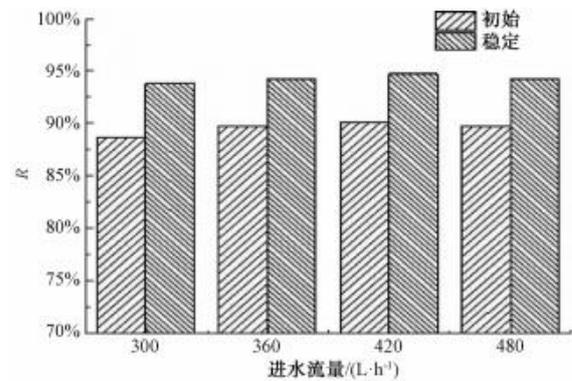


图 9 不同进水流量对浊度去除效果
Fig. 9 Turbidity Removal Efficiency under Different Inflow Rate

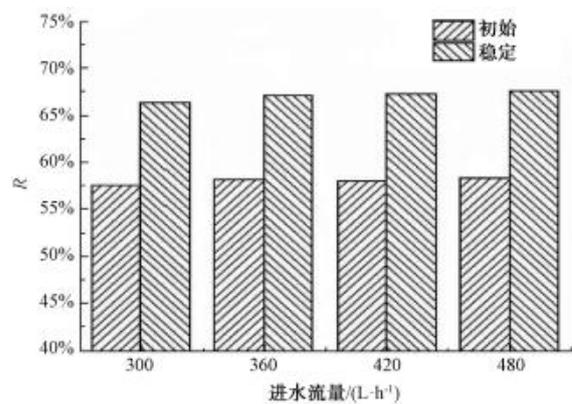


图 10 不同进水流量下 COD_{Mn} 截留率
Fig. 10 COD_{Mn} Retention Rate under Different Inflow Rate

由图 8 可知, 随着过滤时间的增加, 膜通量逐渐降低, 并趋于稳定, 进水流量为 480 L/h 时的稳定膜通量为 108.75 L/(m²·h), 较初始膜通量 157.50 L/(m²·h) 降低了 30.95%; 进水流量为 300 L/h 时的稳定膜通量为 52.50 L/(m²·h), 较初始膜通量 101.25 L/(m²·h) 降低了 48.10%。说明进水流量越低, 膜通量衰减越明显, 增大进水流量可以起到增大膜通量、降低膜通量衰减率的作用。这主要是因为中空纤维膜错流过滤过程中, 水流方向与中空纤维膜丝方向平行, 在增大进水流量过程中, 增加了中空纤维膜组件内的膜面流速, 随着中空纤维膜组件内膜面流速的增大, 原料液对于中空纤维膜表面的冲刷作用相对增强, 气液两相流的湍流程度也相对增强, 进一步减小了浓度极化差现象, 使得膜通量得以提高。

由图 9~图 10 可知, 增大进水流量后浊度的

去除效果和 COD_{Mn} 的截留率无明显变化。分析原因可能是本试验为平行错流过滤,进水流量增大引起膜面流速增加,对中空纤维膜膜表面的冲刷作用加强,主要起到了缓解膜表面污染、增加膜通量、延长过滤时间的作用,对截留作用影响不大。因此,综合考虑膜通量变化、浑浊度去除效果、 COD_{Mn} 的截留率以及设备运行效果,最适宜的进水流量为 480 L/h。

3 结论

(1)在过滤时增加曝气,形成气液两相流对错流过滤过程有着明显的强化作用。曝气量为 120 L/h 时效果最好,比无曝气单相流错流过滤条件下稳定通量增加了 65%。气液两相流对于中空纤维膜错流过滤的影响主要体现在以下几个方面:一方面,增加曝气形成气液两相流,气泡可以起到冲刷膜表面的作用,同时还使中空纤维膜组件内流体的湍流程度增加,削弱了浓差极化所造成的影响,使中空纤维膜组件的稳定状态膜通量增大;另一方面,受曝气的影响造成膜丝扰动现象,进一步减少了污泥在中空纤维膜膜表面的堆积,减少错流过滤过程中的膜面污染,增加了错流过滤运行时间,进而减少中空纤维膜反冲洗的次数与冲洗强度,有利于工程实践运用;最后,曝气量过大会导致微小污泥颗粒的产生,增加堵塞膜孔的概率,降低膜通量。

(2)气液两相流与无曝气单相流相比,在延长过滤时间、提高膜通量、缓解表面膜污染、改善对浑浊度的去除效果与 COD_{Mn} 的截留效果方面均有明显的强化作用。在气液两相流条件下,随着 TMP 增大,膜通量增大,膜通量的衰减速率增大,对浑浊度的去除效果与 COD_{Mn} 的截留效果降低,改变进水流量主要影响了过滤时间与膜通量变化,对浑浊度的去除效果与 COD_{Mn} 的截留效果无明显影响。

参考文献

- [1] 何绪文,张斯宇,何灿. 焦化废水深度处理现状及技术进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 100-107.
- [2] 辛清萍,梁晴晴,李旭,等. 膜分离技术高效脱硫脱碳研究进展[J]. 膜科学与技术, 2020, 40(1): 322-327, 339.
- [3] 李建国,李剑锋,任静,等. 超疏水疏油改性 PVDF 膜用于膜蒸馏深度处理焦化废水[J]. 水处理技术, 2018, 44(3): 58-62, 68.
- [4] YOUSEFI N, NABIZADEH R, NASSERI S, et al. Decolorization of Direct Blue 71 solutions using tannic acid/polysulfone thin film nanofiltration composite membrane; preparation, optimization and characterization of anti-fouling[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017, 34(8): 1-12.
- [5] 蒋成浩,冯霄,王博. 共价有机框架膜的制备及其在海水淡化和水处理领域的研究进展[J]. 化学学报, 2020, 78(6): 466-477.
- [6] 张涛,阮金锴,程巍. 切削液废水处理技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2362-2377.
- [7] 李红宾,石文英,张海霞,等. 中空纤维膜膜蒸馏过程研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(1): 175-182.
- [8] 方亚平,刘杰,胡栋梁,等. 固液两相流对管式膜超滤过程强化的研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(12): 57-60.
- [9] 赵玉博. 死端过滤中空纤维膜系统过滤模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [10] 白凤蛟. 平板膜错流微滤性能的实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [11] 张雪艳,陆茵,张颖,等. 流动形态对 PVC 支撑膜过滤自来水性能影响研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(8): 40-44.
- [12] 张峰,景文珩,邢卫红. 弹状流对陶瓷膜超滤葡聚糖水溶液的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(11): 2792-2797.
- [13] 邢卫红,王开文,顾俊杰,等. 外环流气升陶瓷膜精制盐水研究[J]. 膜科学与技术, 2011, 31(3): 256-260.
- [14] MERCIER M, FONADE C, LAFFORGUE-DELORME C. How slug flow can enhance the ultrafiltration flux in mineral tubular membranes[J]. Journal of Membrane Science, 1997(1): 103-113.
- [15] CABASSUD C, LABORIE S, LAIN J M. How slug flow can improve ultrafiltration flux in organic hollow fibres[J]. Journal of Membrane Science, 1997(1): 93-101.
- [16] GUIBERT D, AIM R B, RABIE H, et al. Aeration performance of immersed hollow-fiber membranes in a bentonite suspension[J]. Desalination, 2002(1): 395-400.
- [17] 曹伟奎. 曝气生物滤池耦合超滤工艺处理山区水库水的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.

(上接第 103 页)

- [2] 花发奇,唐湘姬. 生活垃圾焚烧发电厂渗滤液处理工程实例[J]. 中国新技术新产品, 2018(17): 38-39.
- [3] 薛勇,谢杰,蒋宝军. 垃圾渗滤液的特点及处理方法[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2006, 23(4): 21-26.
- [4] 袁江,夏明,黄兴,等. UASB 和 MBR 组合工艺处理生活垃圾焚烧发电厂渗滤液[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(4): 21-22, 24.
- [5] 申欢,金寺庭,李明波,等. 膜生物法处理城市垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水, 2004, 20(3): 56-59.