

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.009

循环造粒流化床去除不同特性有机物的效果及强化

徐嘉琪^{1,2}, 黄廷林^{1,2}, 文刚^{1,2}, 邢翔轩^{1,2}, 许钰琪^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 循环造粒流化床作为一种新型高效固液分离技术,前期研究表明,其对不同水质水体的浊度均具有良好的去除效果,为此,进一步考察了其对不同特性有机物的去除效果,并将其与预氯化结合以探究对有机物的强化去除效果。结果表明,流化床系统对腐殖酸的去除效果明显好于富里酸,对腐殖酸的 UV_{254} 、 COD_{Mn} 、DOC去除率分别达到89.11%、74.55%、60.29%,而对富里酸的相应指标去除率分别为44.60%、5.74%、17.16%。与传统混凝沉淀工艺相比,循环造粒流化床对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率分别可提高1%~13%、4%~18%、1%~25%,这是因为循环造粒流化床去除有机物的途径不仅包括混凝作用,还包括结团絮体的表面吸附和截留作用。采用预氯化进行强化后,循环造粒流化床对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率分别可提升4.65%~29.10%、4.15%~58.59%和4%~10%,这是因为次氯酸钠破坏了包裹在颗粒外面的有机物,利于颗粒沉降,提升悬浮层性能。

关键词: 循环造粒流化床; 有机物; 腐殖酸; 富里酸; 预氯化

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0058-07

Removal Efficiency and Enhancement of Various Organic Matters in a Circulating Granulation Fluidized Bed System

XU Jia-qi^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2}, WEN Gang^{1,2}, XING Xiang-xuan^{1,2}, XU Yu-qi^{1,2}

(1. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: As an innovative high-efficiency solid-liquid separation technology, the circulating granulation fluidized bed has demonstrated significant efficacy in removing turbidity across various water qualities. Consequently, this study further examined its removal performance on different types of organic matter and investigated the enhanced removal efficiency when combined with pre-chlorination. The removal efficiency of humic acid in the fluidized bed system was significantly superior to that of fulvic acid. The removal efficiencies of humic acid in terms of UV_{254} , COD_{Mn} and DOC were 89.11%, 74.55% and 60.29%, respectively, whereas those for fulvic acid were 44.60%, 5.74% and 17.16%, respectively. Compared to the conventional coagulation and sedimentation process, the removal efficiencies of UV_{254} , COD_{Mn} , and DOC could be enhanced by 1% to 13%, 4% to 18%, and 1% to 25%, respectively. This improvement was attributed to the fact that the removal pathway of organic matters in the circulating

基金项目: 陕西省重点研发计划创新链项目(2020ZDLSF06-05); 国家重点研发计划项目(2019YFD1100102-04)

通信作者: 黄廷林 E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

granulation fluidized bed included not only coagulation but also surface adsorption and interception of the flocs. After implementing pre-chlorination, the removal efficiencies of UV_{254} , COD_{Mn} , and DOC could be enhanced by 4.65% to 29.10%, 4.15% to 58.59%, and 4% to 10%, respectively. This improvement was attributed to sodium hypochlorite's ability to disrupt the organic matters surrounding particles, thereby facilitating particle settling and enhancing the performance of the suspension layer.

Key words: circulating granulation fluidized bed; organic matter; humic acid; fulvic acid; pre-chlorination

天然有机物(NOM)主要包括腐殖质、微生物分泌物、溶解的动物组织和动物废弃物等,其中以腐殖质为主,占 NOM 的 50%~90%,按照在酸碱溶液中溶解度的差异,腐殖质在水中的主要形态可分为腐殖酸(HA)和富里酸(FA)^[1]。这些物质会导致水体的色度和臭味问题,同时也是微生物在水处理系统中生长的营养基质^[2]。研究发现,NOM 中的疏水组分是导致饮用水处理中可致癌消毒副产物(DBPs)产生的主要物质^[3-4]。已有研究表明,膜过滤^[5]、吸附^[6]、磁性离子交换^[7]、混凝^[8]等多种方法均可在一定程度上去除水中的 NOM,但其中有些方法因处理材料成本高及再生困难等而难以广泛应用。

循环造粒流化床是以絮凝动力学为原理的一种水处理技术,通过控制物理化学条件、动力平衡使设备中形成结构紧密的结团絮体,从而达到高效处理水体的目的^[9]。相比普通混凝工艺,其处理负荷更高,同时具有占地面积小、水力停留时间短、抗冲击负荷能力强等优点^[10]。前期研究表明,循环造粒流化床适用于各类水质的给水处理,对浊度具有良好的去除效果^[11-12],但是对有机物的去除效果研究较少。为此,笔者研究了循环造粒流化床对不同特性有机物的去除效果,并通过向循环造粒流化床中试系统中投加次氯酸钠,实现预氯化与强化混凝相结合,探究该系统对水中不同特性有机物的强化去除效果。

1 材料与方法

1.1 原水水质

实验用水由西安某水库水加标制得。水库原水浊度及有机物含量均较低,浊度、 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 平均值分别为 5.00 NTU、2.30 mg/L、0.05 cm^{-1} 、2.300 mg/L,pH 在 7.6 左右。采用加标的方法模拟 COD_{Mn} 较高的水库原水进行实验。实验使用的腐殖质基本特性如表 1 所示。投加不同比例腐殖酸

和富里酸而配制的实验用水水质如表 2 所示。

表 1 腐殖质的基本特性

Tab.1 Basic characteristics of humus

项目	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	UV_{254}/cm^{-1}	$DOC/(mg \cdot L^{-1})$	分子质量/ku	来源
腐殖酸	7.56±0.20	0.508±0.010	7.702±0.050	5~10	土壤
富里酸	7.79±0.10	0.193±0.010	20.168±0.010	0.5~1	土壤

表 2 实验用水水质

Tab.2 Experimental water quality

FA:HA	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	UV_{254}/cm^{-1}	$DOC/(mg \cdot L^{-1})$
0:10	8.33±0.09	0.522±0.010	7.644±0.070
1:9	8.34±0.04	0.507±0.010	8.576±0.090
3:7	8.50±0.07	0.479±0.005	9.368±0.090
5:5	8.53±0.06	0.447±0.004	12.402±0.030
7:3	8.53±0.05	0.393±0.010	15.487±0.030
9:1	8.48±0.05	0.317±0.020	18.157±0.100
10:0	8.45±0.03	0.248±0.003	22.462±0.100

1.2 实验装置及方法

循环造粒流化床系统如图 1 所示,包括加药系统及流化床主体设备,其中,加药系统包括内径为 20 mm、长为 20 m 的反应管道;流化床主体部分高 1.5 m,包括澄清区和循环区,循环区包括内筒、循环筒和排泥筒三部分,内径分别为 10、14、20 cm。原水中投加聚合氯化铝(PACl)后,在管式反应器中脱稳形成初始粒子,投加聚丙烯酰胺(PAM)后进入流化床主体,在强制搅拌及水力等作用附着在石英砂表面,形成高密度的结团絮体颗粒,水流流经循环区后在澄清区实现固液分离,清水从上部排出,污泥进入排泥筒底部从排泥管排出。

实验中,循环造粒流化床系统的上升负荷为 45 m/h,搅拌转速为 7 r/min,PACl、PAM 投加间隔为 1 min,投加量分别为 24、0.9 mg/L。改变进水水质,对

不同阶段流化床系统的出水水质进行检测分析,考察循环造粒流化床对不同特性有机物的去除效果;通过改变搅拌转速、PACl和PAM投加量、反应时间等,考察影响流化床系统处理效果的因素;通过前加氯进行强化循环造粒流化床去除有机物的研究。

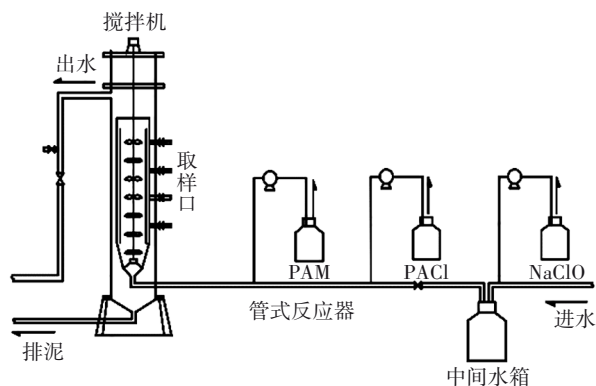


图1 循环造粒流化床系统示意

Fig.1 Schematic diagram of circulating granulation fluidized bed system

检测项目包括 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC、浊度、三维荧光光谱等。其中, COD_{Mn} 采用酸性高锰酸钾滴定法测定, UV_{254} 采用紫外分光光度计测定,浊度使用HACH 2100N型浊度仪测定,DOC采用岛津40L型总有机碳测定仪测定,三维荧光光谱采用日立F-7000型荧光分光光度计测定。

2 结果与分析

2.1 对不同特性有机物的去除效果

循环造粒流化床对浊度和不同特性有机物的去除效果如图2所示。可知,流化床系统对不同水质水体中浊度的去除效果均较好,出水浊度均稳定在1 NTU左右。当原水中富里酸与腐殖酸的浓度之比从0:10升高到10:0,即腐殖酸占比逐渐降低时, COD_{Mn} 、DOC及 UV_{254} 的去除率逐渐降低,分别由74.55%、60.29%、89.11%降低到5.74%、17.16%、44.60%。当原水有机物中腐殖酸为主要成分时,疏水性物质占比较大,有机物易于通过混凝去除^[13],有机物去除率较高;随着原水有机物中富里酸含量的增加,芳香族物质含量减少,此时有机物较难通过混凝去除^[14],去除率逐渐降低。程拓等^[15]对丹江口水库原水进行分析后发现,分子质量<1 ku的组分约占39%,采用聚合硫酸铁和聚丙烯酰胺处理后,对浊度、DOC和 UV_{254} 的去除率分别为76.33%、25.57%、37.78%。本研究中,循环造粒流化床处理

小分子有机物富里酸占比为30%的原水时,对浊度、DOC和 UV_{254} 的去除率分别为95.26%、50.13%、79.66%,循环造粒流化床对有机物及浊度的去除率均高于传统混凝沉淀工艺。

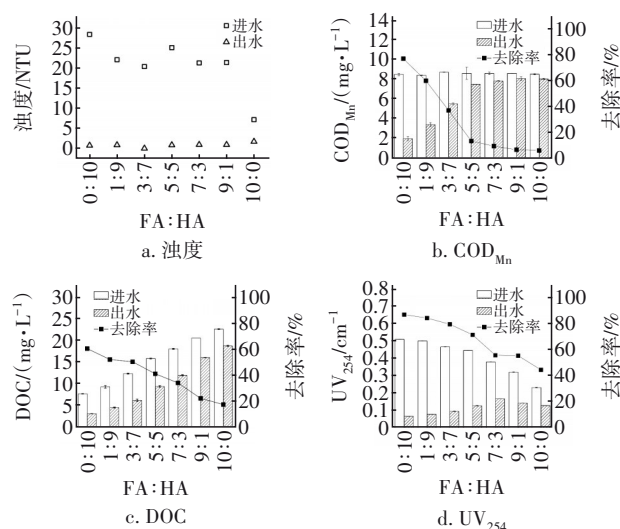


图2 循环造粒流化床对浊度和有机物的去除效果

Fig.2 Removal effect of turbidity and organic matter by circulating granulation fluidized bed

2.2 影响有机物去除的因素

实验考察了PACl和PAM投加量、搅拌转速、反应时间等因素对循环造粒流化床去除有机物的影响。混凝剂最佳投加量会受到天然有机物的憎水性、腐殖化程度等性质的影响^[16]。PACl投入水中后会形成聚合阳离子,对水中胶粒起电性中和及架桥作用,从而形成絮体,但是随着PACl投加量的增加,脱稳胶粒电荷变号或胶粒被包裹而重新稳定,处理效果会随之下降。在本研究中,随着PACl投加量的增加, COD_{Mn} 去除率先升后降,在PACl投加量为24 mg/L时去除率最高,此时对腐殖酸、富里酸的 COD_{Mn} 去除率分别为74.55%、5.74%,当PACl投加量超过24 mg/L时, COD_{Mn} 去除率降低,可能是由于胶粒上吸附了过量的正离子导致胶体间斥力变大,从而影响处理效果。 UV_{254} 及DOC的去除率变化同步,随着PACl投加量的增加而升高,当PACl投加量为24 mg/L时,对腐殖酸的 UV_{254} 和DOC去除率分别为89.11%和60.29%,对富里酸的 UV_{254} 和DOC去除率分别为44.60%和17.16%,当PACl投加量超过24 mg/L后, UV_{254} 和DOC的去除率增幅变缓。

另外发现,当PAM投加量较低时,增加PAM投加量可以略微提高对有机物的去除率,当PAM投加

量为0.9 mg/L时有机物去除效果达到最佳,继续增加PAM投加量则对有机物去除效果影响不明显,PAM作为助凝剂对流化床系统中悬浮层的形成影响更大。提高搅拌速度时有机物去除率缓慢升高,并在7 r/min时去除效果达到最佳,当搅拌速度提高至9 r/min及以上时,过快的搅拌速度破坏了吸附架桥结构进而影响悬浮层的形成,最终影响出水水质。随着PACl投加后反应时间的增加,有机物去除率升高,在反应时间超过65 s后增速变缓。

综上,最佳参数如下:PACl投加量为24 mg/L、PAM投加量为0.9 mg/L、搅拌速度为7 r/min、反应时间为65 s。

2.3 不同阶段对有机物的去除贡献

考察了不同阶段对有机物的去除贡献,结果表明,脱稳阶段对 UV_{254} 及DOC的去除效果良好。 UV_{254} 代表的有机物多含羟基和羧基等极性基团,在水中呈负电性,而混凝剂的水解产物带正电,所以在投加PACl后, UV_{254} 更容易被去除。脱稳阶段去

除的 UV_{254} 约占总去除量的80%~95%,去除的DOC约占总去除量的50%~75%。 COD_{Mn} 的去除主要发生在结团阶段,去除的 COD_{Mn} 约占总去除量的50%~90%。PACl在水中溶解后会产生氢氧化物絮体,可对天然有机物进行吸附去除^[17]。

循环造粒流化床处理过程中,水体的三维荧光光谱变化如图3所示。腐殖酸的特征峰在 $\lambda_{Ex}=250\sim300$ nm、 $\lambda_{Em}=380\sim480$ nm区域,富里酸的特征峰在 $\lambda_{Ex}=220\sim280$ nm、 $\lambda_{Em}=300\sim380$ nm区域。由图3可以看出,当原水中腐殖酸占比较大时,经循环造粒流化床处理后,荧光强度下降明显;随着富里酸占比的增加,荧光强度下降速度渐缓。腐殖酸的去除主要发生在投加PAM前的脱稳阶段,富里酸在PAM投加前去除效果不明显,其荧光强度甚至高于原水;在投加PAM后的结团阶段,对腐殖酸和富里酸均有去除,但去除率较低。总体来看,对腐殖酸的去除主要发生在脱稳阶段,对富里酸的去除主要发生在结团阶段。

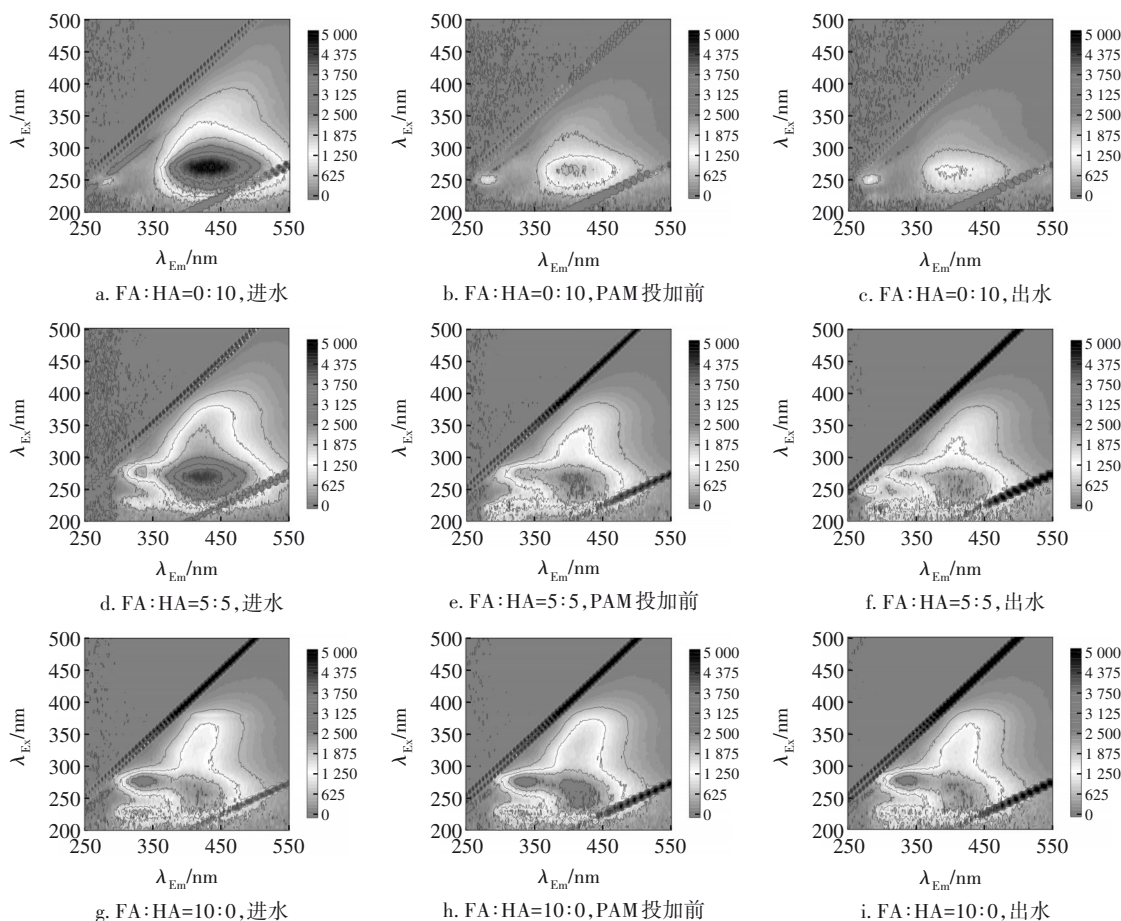


图3 不同阶段有机物的三维荧光光谱变化

Fig.3 EEM change of organic matter at different stages

对腐殖酸和富里酸两组分的区域荧光强度(FRI)去除率进行分析,结果显示,富里酸的FRI去除率为3%~7%,去除效果不明显;腐殖酸的FRI去除率最高达到62.91%,当富里酸与腐殖酸的比值大于7:3时,腐殖酸的FRI去除率明显降低。由此可知,循环造粒流化床对腐殖酸的去除效果良好,对富里酸的去除效果较差,并且腐殖酸的去除率随其占比的增加而增加,而富里酸的去除率基本不受其占比的影响。

2.4 循环造粒流化床与传统混凝沉淀效果对比

循环造粒流化床与传统混凝沉淀工艺对有机物的去除效果对比如图4所示。可见,流化床系统对不同特性有机物的去除效果均优于传统混凝沉淀工艺,对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和DOC的去除率分别可提升1%~13%、4%~18%、1%~25%。相比传统混凝沉淀工艺,循环造粒流化床实现了对有机物去除能力的提升,可为后续工艺减轻有机物去除压力。

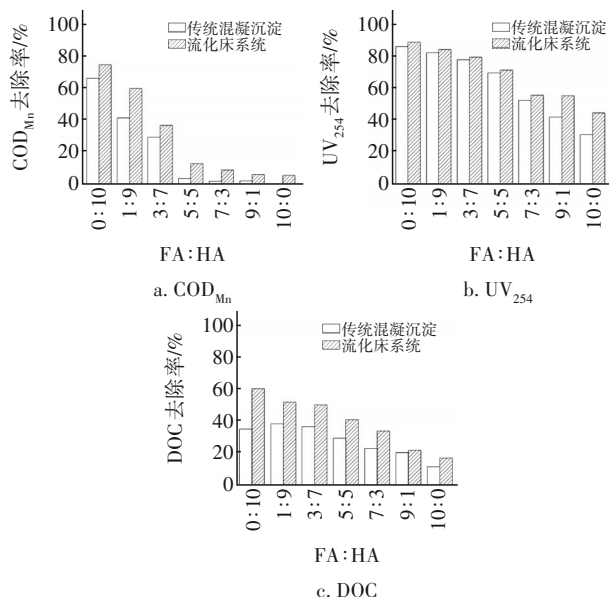


图4 循环造粒流化床与传统混凝沉淀工艺对有机物的去除效果对比

Fig.4 Comparison of organic matter removal effect between circulating granulation fluidized bed and traditional coagulation sedimentation process

2.5 预氯化强化循环造粒流化床的处理效果

2.5.1 有效氯投加量的优化

在不同有效氯投加量条件下(预氯化反应时间为1 min),考察循环造粒流化床对有机物的去除效果。结果显示,对于不同特性的有机物,最佳有效氯投加量有所差异。当原水中仅存在腐殖酸时,有

效氯投加量为3 mg/L时强化效果最佳,对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 及DOC的去除率分别可提升4.15%、4.48%和5.97%。当原水中富里酸与腐殖酸的比值大于5:5时,有效氯投加量为2 mg/L时强化效果最佳,对富里酸与腐殖酸的 COD_{Mn} 去除率分别可提升58.43%、8.64%。 $NaClO$ 可破坏包裹在颗粒外面的有机物,进而促进颗粒的沉降。

2.5.2 对不同特性有机物的强化去除效果

采用次氯酸钠强化循环造粒流化床去除有机物的效果如图5所示。

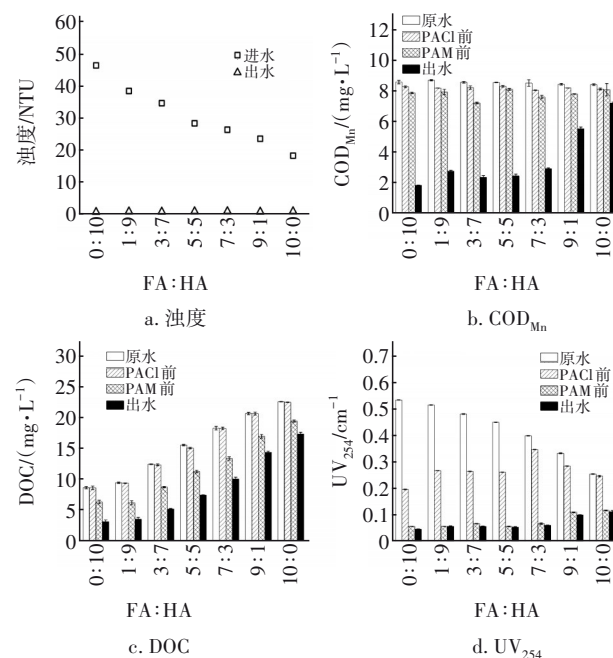


图5 预氯化强化循环造粒流化床去除有机物的效果

Fig.5 Effect of pre-chlorination enhanced circulating granulation fluidized bed on removing organic matter

由图5可知,增加预氯化后,流化床系统的出水浊度更加稳定,均维持在1 NTU以下,这与张爽等^[18]的研究结果一致。经预氯化强化后,流化床系统对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 和DOC的去除率分别在14.38%~70.45%、56.13%~91.54%、23.10%~62.58%,与未进行预氯化相比,分别提升了4.15%~58.59%、4.65%~29.10%、4%~10%。蔡广强等^[19]的研究表明,水厂采用混凝沉淀前加氯工艺时,混凝沉淀单元对TOC和 UV_{254} 的去除率分别为22.77%~58.41%、14.29%~65.40%。相比之下,预氯化对循环造粒流化床强化去除有机物的效果略优于对传统混凝沉淀工艺的强化效果。另外可以发现,当原水中富里酸与腐殖酸的比值在3:7~7:3之间时强化

效果最好。林杨杰等^[20]的研究表明, COD_{Mn} 是主要耗氯因素, 通过测定不同加氯条件下 COD_{Mn} 的变化情况可证明小分子有机物优先消耗氯。次氯酸钠改善了有机物表面性质, 使其易于与絮体结合。随着腐殖酸含量的减少, 预氯化阶段 UV_{254} 的去除量占整体去除量的比例逐渐减少, 当原水中只存在富里酸时, 预氯化阶段对 UV_{254} 的去除量仅占总去除量的 8.46%。

3 结论

① 循环造粒流化床对不同特性有机物均有一定的去除效果, 其中, 对腐殖酸的去除效果明显好于富里酸。循环造粒流化床对有机物的去除效果主要受 PACl 投加量及 PACl 投加后反应时间的影响, PAM 投加量及搅拌速度主要影响流化床系统的运行状况。对于不同水质的原水, 在进水 COD_{Mn} 相差不大时, 循环造粒流化床系统的最佳运行条件基本一致。

② 与传统混凝沉淀工艺相比, 循环造粒流化床对 UV_{254} 、 COD_{Mn} 和 DOC 的去除率分别可提升 1%~13%、4%~18%、1%~25%, 实现了对有机物去除能力的有效提升, 可为后续工艺减轻有机物去除压力。

③ 预氯化可有效提高循环造粒流化床对有机物的去除效果, 对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 、DOC 的去除率分别可提升 4.15%~58.59%、4.65%~29.10%、4%~10%。当原水中腐殖酸比例较高时, 有效氯投加量为 3 mg/L 时强化效果最佳; 当原水中富里酸与腐殖酸的比例大于 5:5 时, 有效氯投加量为 2 mg/L 时强化效果最佳。

参考文献:

- [1] TAK S, VELLANKI B P. Natural organic matter as precursor to disinfection byproducts and its removal using conventional and advanced processes: state of the art review [J]. *Journal of Water Health*, 2018, 16(5): 681-703.
- [2] KOROTTA-GAMAGE S M, SATHASIVAN A. A review: potential and challenges of biologically activated carbon to remove natural organic matter in drinking water purification process [J]. *Chemosphere*, 2017, 167: 120-138.
- [3] WANG D S, ZHAO Y M, YAN M Q, *et al.* Removal of DBP precursors in micro-polluted source waters: a comparative study on the enhanced coagulation behavior [J]. *Separation Purification Technology*, 2013, 118(1): 271-278.
- [4] HOW Z T, KRISTIANA I, BUSETTI F, *et al.* Organic chloramines in chlorine-based disinfected water systems: a critical review [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 58: 2-18.
- [5] DENG L, NGO H H, GUO W, *et al.* Pre-coagulation coupled with sponge-membrane filtration for organic matter removal and membrane fouling control during drinking water treatment [J]. *Water Research*, 2019, 157: 155-166.
- [6] KRISTIANA I, JOLL C, HEITZ A, *et al.* Powdered activated carbon coupled with enhanced coagulation for natural organic matter removal and disinfection by-product control: application in a Western Australian water treatment plant [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(5): 661-667.
- [7] METCALFE D, ROCKEY C, JEFFERSON B, *et al.* Removal of disinfection by-product precursors by coagulation and an innovative suspended ion exchange process [J]. *Water Research*, 2015, 87: 20-28.
- [8] NYSTROM F, NORDQVIST K, HERRMANN I, *et al.* Removal of metals and hydrocarbons from stormwater using coagulation and flocculation [J]. *Water Research*, 2020, 182: 115919.
- [9] 黄廷林, 李梅, 高晓梅. 结团絮凝工艺处理洗煤废水的研究[J]. *工业用水与废水*, 2002, 33(4): 23-25.
HUANG Tinglin, LI Mei, GAO Xiaomei. Study on the pellet coagulation process in treating coal-washing wastewater [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2002, 33(4): 23-25 (in Chinese).
- [10] 张刚. 水厂排泥水造粒流化床浓缩中试实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
ZHANG Gang. A Pilot-experimental Study on the Application of Pelleting Fluidized Bed Concentration Technology to Water Plant Wastewater Treatment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004 (in Chinese).
- [11] 黄廷林, 邵传民, 刘加强. 增效结团流化床处理春季低浊水的中试研究 [J]. *给水排水*, 2012, 38(1): 115-118.
HUANG Tinglin, TAI Chuanmin, LIU Jiaqiang. Pilot study on pelleting fluidized bed based on enhanced clarifier process for treatment of low turbidity water in spring [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(1): 115-118 (in Chinese).

- [12] 黄廷林, 邵传民, 刘加强. 微砂增效结团絮凝技术处理低浊高藻水的中试研究[J]. 给水排水, 2012, 38(5): 115-119.
HUANG Tinglin, TAI Chuanmin, LIU Jiaqiang. Pilot study on pellet flocculation process enhanced by micro-sand to treat low-turbidity and high-algae reservoir water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(5): 115-119 (in Chinese).
- [13] LIANG L, SINGER P C. Factors influencing the formation and relative distribution of haloacetic acids and trihalomethanes in drinking water [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13): 2920-2928.
- [14] JIAO R Y, CHOW C W K, XU H, *et al.* Organic removal assessment at full-scale treatment facilities using advanced organic characterization tools [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2014, 16(10): 2451-2459.
- [15] 程拓, 徐斌, 朱贺振, 等. 南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 898-904.
CHENG Tuo, XU Bin, ZHU Hezhen, *et al.* Composition of NOM in raw water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and comparison of efficacy of enhanced coagulation [J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 898-904 (in Chinese).
- [16] ARCHER A D, SINGER P C. SUVA and NOM coagulation using the ICR database [J]. Journal - American Water Works Association, 2006, 98(7): 110-123.
- [17] WANG D, ZHAO Y, XIE J, *et al.* Characterizing DOM and removal by enhanced coagulation: a survey with typical Chinese source waters [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 110: 188-195.
- [18] 张爽, 管士莹, 孙妍. 次氯酸钠预加氯对混凝效果的影响[J]. 供水技术, 2019, 13(2): 23-24.
ZHANG Shuang, GUAN Shiyang, SUN Yan. Study on the effect of pre-chlorination with sodium hypochlorite on coagulation [J]. Water Technology, 2019, 13(2): 23-24 (in Chinese).
- [19] 蔡广强, 张金松, 刘丽君, 等. 常规处理工艺对有机物及三氯乙醛生成潜能的去除[J]. 中国给水排水, 2017, 33(19): 46-50.
CAI Guangqiang, ZHANG Jinsong, LIU Lijun, *et al.* Removal of organic matter and chloral hydrate formation potential by conventional treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(19): 46-50 (in Chinese).
- [20] 林杨杰, 田一梅, 吴云龙. 高锰酸钾预氧化与预氯化协同预处理再生水原水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(1): 118-120.
LIN Yangjie, TIAN Yimei, WU Yunlong. Synergistic effect of potassium permanganate pre-oxidation and pre-chlorination in pretreatment of reclaimed raw water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(1): 118-120 (in Chinese).

作者简介: 徐嘉琪(1998-), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向为循环造粒流化床同步高效去除水中的浊度和有机物。

E-mail: xu081826@163.com

收稿日期: 2023-01-22

修回日期: 2023-03-11

(编辑: 刘贵春)

以水定城、以水定地、以水定人、
以水定产, 发展节水产业