

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.013



硅藻土/纤维素复合助滤剂在微污染原水处理中的应用

盛超¹, 李孟¹, 黄凌凤², 章蕾³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 武汉芳笛环保股份有限公司, 武汉 430074; 3. 水利部产品质量标准研究所, 杭州 310024)

摘要:以硅藻土和纤维素为原料,通过溶胶-凝胶法制备出了新型硅藻土/纤维素复合助滤剂,探究了各种制备条件对助滤剂的影响,并在高岭土悬浊液中对硅藻土、纤维素和硅藻土/纤维素的助滤性能进行了比较,同时研究了硅藻土/纤维素助滤剂对实际微污染水过滤的影响。研究结果表明:复合助滤剂的最佳制备条件为纤硅比 0.67,氨水浓度 5.0×10^{-4} mol/L,蒸馏水/纤维素 40 mL/g, EtOH/硅藻土 20 mL/g, 60 °C 恒温水浴;硅藻土/纤维素复合助滤剂的助滤性能要明显优于硅藻土和纤维素助滤剂;在微污染原水直接过滤过程中,投加硅藻土/纤维素助滤剂可提高各微污染物的去除率,结合微滤膜深度处理工艺,最终出水水质满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。

关键词:硅藻土;纤维素;助滤剂;助滤性能;微污染原水

中图分类号: TU991.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)03-0090-06

Application of diatomite/cellulose composite filter aids on micro-polluted raw water treatment

Sheng Chao¹, Li Meng¹, Huang Lingfeng², Zhang Lei³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China;
2. Wuhan Fangdi Environment Corporation Ltd., Wuhan 430074, P. R. China;
3. Standard & Quality Control Research Institute, Ministry of Water Resources, Hangzhou 310024, P. R. China)

Abstract: The diatomite/cellulose filter aids were prepared using raw diatomite and cellulose via sol-gel technique. The effect of cellulose/diatomite, distilled water/cellulose, EtOH/diatomite, ammonia concentration and temperature on the properties of diatomite/cellulose filter aids were investigated. The filtration efficiency of diatomite, cellulose and diatomite/cellulose filter aids was compared. The influence of diatomite/cellulose filter aids on slightly polluted water filtration was studied. Results indicated that when 40 mL distilled water dissolved 1.0 g cellulose, 20 mL EtOH carried 1.5 g diatomite, the ratio of diatomite to cellulose was 0.67, the concentration of ammonia was 5×10^{-4} mol/L, the temperature was 60

收稿日期: 2016-01-15

基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金(155206009)

作者简介: 盛超(1991-),男,主要从事给水与污水处理研究,(E-mail)chaos0121@163.com.

Received: 2016-01-15

Foundation item: Independent Innovation Foundation of Wuhan University of Technology(No. 155206009)

Author brief: Sheng Chao(1991-), main research interest: municipal water and wastewater treatment, (E-mail)chaos0121@163.com.

℃, the best diatomite/cellulose filter aids were achieved. The efficiency of diatomite/cellulose filter aids was obviously better than that by diatomite and cellulose filter aids. The pollutants removal efficiency could increase by using the diatomite/cellulose filter aids in the direct filtration process to treat the micro-polluted raw water. The results showed that the combination of filtration and micro-filtration membrane could achieve excellent permeate water, which met the Standards for Drinking Water Quality (GB5749—2006).

Keywords: diatomite; cellulose; filter aids; filter performance; micro-polluted raw water

现如今微污染水体已越来越多地作为人们生活用水水源之一。在微污染水处理过程中直接过滤是常用的一种水处理工艺,而直接过滤时,滤浆中的颗粒极易形成滤饼堵塞过滤介质的孔道,使过滤的效率降低甚至无法继续进行^[1]。为解决这一问题,可在过滤时加入助滤剂以强化过滤过程^[2]。理想的助滤剂具有空隙率大,孔隙结构丰富,比表面积大和形状不规则,不可压缩的性质,而且可形成结构疏松几乎不可压缩的滤饼,形成通畅的液体流道,从而减小滤饼的过滤阻力。同时可以阻止悬浮液中微小颗粒穿透和堵塞过滤介质,提高过滤速度和滤液的澄清度^[3]。助滤剂过滤可滤除滤浆中的固体颗粒及悬浮物,吸附胶体粒子、大部分细菌、病毒及部分有害元素等^[4],其过滤作用主要是对污染物的机械截留作用和吸附作用,将简单的介质表面过滤变为深层过滤,产生较强的净化过滤作用。

目前常用的助滤剂有硅藻土、纤维素等,但在实际应用中各有优缺点:硅藻土具有孔隙结构发达、硬度高、稳定性好、化学杂质含量少的特点^[5-6],但是滤速相对缓慢,堆密度较大,按其质量加入往往达不到预期要求,多加又将使成本上升^[7-8]。纤维素助滤剂在水中带负电荷,吸附阳离子,具有一定的吸附性能,所以同时可用作吸附剂,但过滤之后滤液的澄清度不太好^[9-11]。目前对于纤维素和硅藻土的改性研究甚多,方法也多种多样,但同时结合两种以上助滤剂材料来制备复合助滤剂并探讨其性能的研究甚少。

本研究以纤维素和硅藻土为原料,通过溶胶-凝胶法制备了硅藻土/纤维素无机-有机复合助滤剂,并分析了纤硅比(纤维素与硅藻土的质量之比)、氨水浓度、蒸馏水/纤维素、无水乙醇/硅藻土以及水浴温度这5个因素对复合助滤剂的影响,以得到最佳的制备条件,同时在不同进水浊度和不同滤速条件下对硅藻土、纤维素和硅藻土/纤维素复合助滤剂的助滤性能进行了比较,并研究了硅藻土/纤维素复合助滤剂对实际微污染原水过滤效果的影响。

1 材料与方法

1.1 实验材料和主要仪器

本研究所使用的药品主要为微晶纤维素,柱层析;无水乙醇,分析纯;稀硫酸,分析纯;氨水,分析纯;均为国药集团化学试剂有限公司生产;硅藻土,武汉百惠生物科技有限公司提供;蒸馏水,自制。主要仪器为DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,HACH 2100P高精度便携式浊度仪。

1.2 硅藻土/纤维素助滤剂的制备

将微晶纤维素分散于蒸馏水中作有机前驱物,待其完全浸润后抽滤,并用无水乙醇洗涤多次以除去残余水分。将1.0 g处理过的纤维素溶于一定量的蒸馏水(1.0 g纤维素/30 mL蒸馏水)中制得溶液A,向溶液A中逐滴加入1 mL的1 mol/L的稀硫酸,装入三角烧瓶并置于60 ℃恒温加热磁力搅拌器内搅拌预水解10 min。将1.5 g硅藻土与无水乙醇(EtOH)按1.5 g硅藻土/20 mL EtOH的比例配成溶液B,将溶液B加入溶液A中,恒温搅拌10 min后,加入1.8 mL的氨水(5×10^{-4} mol/L),反应10 min后,降至室温,用磁力搅拌器低速(20 r/min)搅拌,持续搅拌24 h,制得纤维素/硅藻土溶胶,过滤洗涤去除杂质,在45 ℃干燥24 h,再放入恒温干燥箱105 ℃下继续干燥24 h,研磨成粉后即可得到硅藻土/纤维素复合助滤剂。

分别改变纤硅比、氨水浓度、蒸馏水/纤维素、无水乙醇/硅藻土以及水浴温度,做纤维素含量变化的对照试验,以确定最佳的制备条件,复合助滤剂材料中纤维素含量可由硅藻土的质量增量来求得。助滤剂中硅藻土的增量越高,说明纤维素和硅藻土的复合效果越好,助滤剂的助滤性能就会越好。

1.3 硅藻土/纤维素助滤剂性能的测试

采用直径为25 mm,高1500 mm的透明有机玻璃柱为模型滤柱。滤柱中填充粒径 $d=0.6 \sim 1.2$ mm的石英砂滤料,滤层厚 $H=280$ mm。采用砾石作为承托层,从上到下粒径逐渐增大,总厚度100

mm。由于滤柱模型内径较小,故基本可以保证配水均匀性。取 3 份 1 L 自来水,分别投加 100 mg 自然黏土,充分搅拌混合,配成原水,各添加 1 mg 纤维素、1 mg 硅藻土和 1 mg 硅藻土/纤维素复合助滤剂,经过滤柱过滤。过滤中尽量保持进、出水流量稳定和原水浊度稳定,通过单因素实验,在不同的进水浊度和滤速下,测出水浊度。另取两份 1 L 的武汉南湖水为实际微污染原水,并向其中一份投加 1 mg 硅藻土/纤维素复合助滤剂,经过滤柱过滤,测出水中各污染物的含量。

2 结果与讨论

2.1 硅藻土/纤维素复合助滤剂的最佳制备条件分析

2.1.1 纤硅比对硅藻土/纤维素助滤剂制备的影响 保持其他条件不变,测定不同纤硅比对硅藻土增量百分比(硅藻土增加的量/纤维素质量)的影响。如图 1 所示,当纤硅比为 0.33 时,硅藻土的增量百分比最小,只有 64%;当纤硅比为 0.67~1.67 时,硅藻土的增量百分比都趋于平稳,稳定在 85%左右。纳米 SiO_2 /纤维素复合材料中,无机 SiO_2 纳米粒子以薄片和球状颗粒形式存在, SiO_2 纳米颗粒由于纤维素聚合物链的包覆作用而均匀地分散在树枝状的纤维素基体中,纤维素聚合物链对 SiO_2 纳米颗粒的包覆作用主要是通过氢键^[12]。纤维素分子链上所有的羟基都处于分子链内或者分子链间的氢键中^[13],羟基的数量是一定的,只能包覆一定量的 SiO_2 纳米颗粒。硅藻土的化学成分主要是 SiO_2 ,因此,当纤硅比大于 0.67 之后,纤维素都只能与一定量的硅藻土复合,故硅藻土的增量百分比保持在 85%左右。

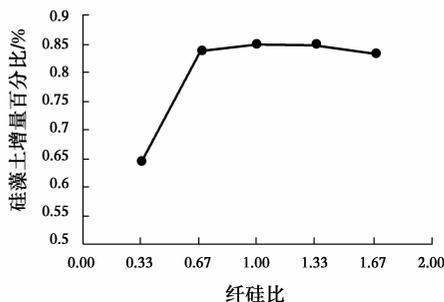


图 1 纤硅比对硅藻土增量的影响

Fig. 1 Effect of cellulose/diatomite on diatomite increment

2.1.2 蒸馏水/纤维素对硅藻土/纤维素助滤剂制备的影响 保持其他条件不变,改变蒸馏水/纤维素

的大小。如图 2 所示,随着蒸馏水/纤维素的增加,硅藻土增量百分比先增大后减小。在蒸馏水/纤维素为 40 mL/g 时,硅藻土增量百分比达到最大值 93%;纤维素的水解需要一定的水分,当蒸馏水/纤维素小于 40 mL/g 时,蒸馏水的投加量不足,只有部分纤维素水解,此时纤维素的水解产物与未水解的纤维素分子之间继续聚合,形成大分子溶液,体系内无固-液界面,属于热力学稳定系统,复合效果不好;当蒸馏水/纤维素达到 40 mL/g 时,纤维素得以充分水解,体系内形成存在固-液界面的热力学不稳定系统,与硅藻土复合效果最好;当蒸馏水/纤维素大于 40 mL/g 时,体系内剩余水分过多,稀释了聚合物的浓度,减少了颗粒之间碰撞的几率,与硅藻土产生凝胶质量较差,从而导致助滤剂复合效率降低。

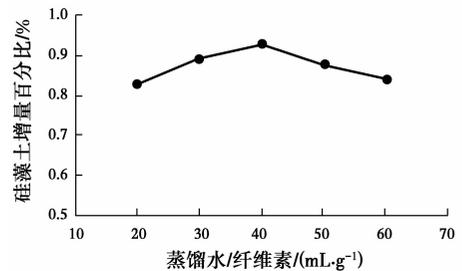


图 2 蒸馏水/纤维素对硅藻土增量的影响

Fig. 2 Effect of distilled water/cellulose on diatomite increment

2.1.3 氨水浓度对硅藻土/纤维素助滤剂制备的影响 溶胶-凝胶法中酸、碱性催化剂的用量,主要影响溶胶-凝胶过程中纤维素的水解和缩聚反应。纤维素的水解速率常数随酸浓度的增大而增大,碱有利于其缩聚反应^[12]。因此,针对不同催化条件下,水解与缩聚反应的特点,使得溶胶-凝胶过程中水解和缩聚反应分别在强酸硫酸和弱碱氨水催化条件下发生。为了加快纤维素的水解,加入稍过量的硫酸,使纤维素快速充分水解后,再用氨水调节溶液的 pH,故主要考虑氨水的浓度对硅藻土增量的影响。如图 3 所示,当氨水浓度为 2.8×10^{-4} mol/L 的时候,反应体系仍然处于酸性条件下,抑制了作为控速步骤的缩聚反应,不利于纤维素与硅藻土交联网络结构的形成,硅藻土增量百分比只有 26%,随着氨水浓度的增加,硅藻土增量也逐渐增加;当氨水浓度增至 4.2×10^{-4} mol/L 时,硅藻土增量百分比达到 54%,曲线斜率最大,硅藻土含量增加的最快,这类类似于酸碱中和临近滴定终点的时刻,极少量的氨水就能使反应体系由弱酸性突变为适于纤维素缩聚反

应的碱性体系,在弱碱性条件下,温和的缩聚反应有利于硅藻土充分均匀地与纤维素形成交联网络,此时纤维素与硅藻土的复合效果最佳。当氨水浓度为 5×10^{-4} mol/L 的时候,硅藻土增量百分比到达 67%,趋于稳定。当氨水浓度大于 5×10^{-4} mol/L 时,溶液的 pH 值继续增大,硅藻土增量也没有明显增加。

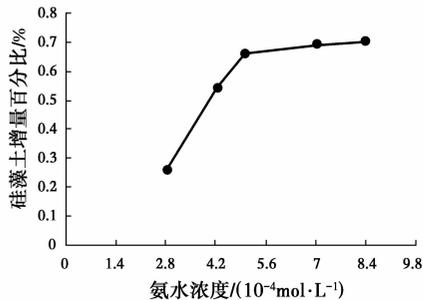


图3 氨水浓度对硅藻土增量的影响

Fig. 3 Effect of ammonia concentration on diatomite increment

2.1.4 无水乙醇/硅藻土对硅藻土/纤维素助滤剂制备的影响 保持其他条件不变,改变无水乙醇/硅藻土的大小,如图4所示,当 EtOH/硅藻土由 6.7 mL/g 逐渐增大到 13.3 mL/g 的时候,硅藻土增量百分比也逐渐增大,当 EtOH/硅藻土达到 13.3 mL/g 时,硅藻土增量百分比达到最大值 84%;当 EtOH/硅藻土继续增大到 16.7 mL/g 乃至 20 mL/g 时,硅藻土增量百分比趋于稳定。无水乙醇会减缓纤维素水解产物缩聚反应的速率,从而影响复合助滤剂中硅藻土的含量。当 EtOH/硅藻土过小时,缩聚反应过快,硅藻土未能充分均匀地进入交联网络中;随着无水乙醇用量的增加,缩聚反应减慢,胶凝时间延长,硅藻土进入交联网络的机率增加,硅藻土增量百分比增加;当 EtOH/硅藻土超过 13.3 mL/g 时,硅藻土已充分进入,能最大限度地进入交联网络中,含量不再增加,硅藻土增量百分比趋于稳定。

2.1.5 温度对硅藻土/纤维素助滤剂制备的影响 保持其他条件不变,改变纤维素预水解恒温水浴反应的温度。如图5所示,硅藻土增量百分比在温度从 50 °C 升高至 60 °C 时大幅增加,当温度在 60 °C 时达到最大值 88%,在 60~80 °C 范围内时先减小后增大,总体相差不大,保持在 85% 以上,但当温度升至 90 °C 时又显著降低。原因是纤维素的水解为吸热反应,水解温度过低时,水解速度缓慢,水解不彻底,甚至不能形成凝胶;水解温度过高时,水解速度

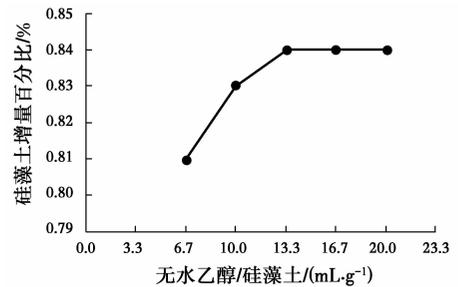


图4 无水乙醇/硅藻土对硅藻土增量的影响

Fig. 4 Effect of EtOH/diatomite on diatomite increment

过快,容易产生沉淀或小颗粒的悬浮物,影响凝胶的性质,当水解温度达到 90 °C 时,体系中产生微小气泡,影响水解产物性质,进而影响溶胶的稳定性。反应温度越高能耗越高,综合考虑,最佳水解温度应控制在 60 °C。

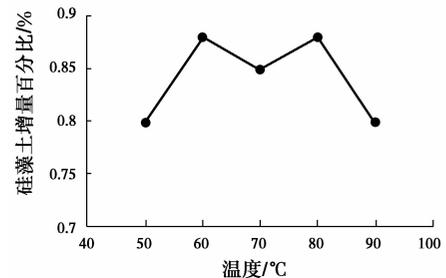


图5 温度对硅藻土增量的影响

Fig. 5 Effect of temperature on diatomite increment

2.2 硅藻土/纤维素复合助滤剂的助滤性能分析

2.2.1 原水浊度对硅藻土/纤维素助滤剂助滤性能的影响 取3份1L自来水,分别投加一定量的自然黏土,充分搅拌混合,配制成不同浊度的原水,并向其中各添加1mg硅藻土、1mg纤维素和1mg硅藻土/纤维素复合助滤剂,经过滤柱过滤。过滤中尽量保持进、出水流量稳定和原水浊度稳定,滤速控制在4m/h。

如图6所示,本研究制备的硅藻土/纤维素复合助滤剂对于不同浊度的进水都能起到较好的浊度去除效果,且较单独投硅藻土或纤维素能显著提高原水浊度去除率。这是因为硅藻土表面通常显负电性,可使待滤水中可能存在的未脱稳悬浮颗粒脱稳,同时,其良好的孔隙结构可加强待滤水中悬浮颗粒的吸附,滤除滤浆中的杂质颗粒,还能有效地防止过滤介质的污染与堵塞。纤维素高分子聚合物具有发达的链状结构和自由基团,能牢固吸附在滤料和悬浮颗粒表面,并在各种颗粒之间形成架桥作用,从而

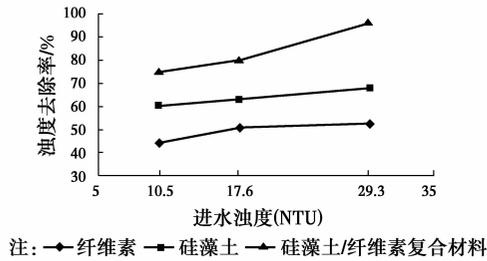


图 6 进水浊度对浊度去除率的影响

Fig. 6 Effect of original turbidity on turbidity removal efficiency

起到阻止或延缓悬浮颗粒穿透的作用。而硅藻土/纤维素复合助滤剂是由多孔结构的硅藻土经溶胶-凝胶反应后与链状的纤维素形成的,具有更加稳定、均匀的立体网状结构,相对于单独投硅藻土或纤维素能更好地改善滤饼结构,提高细小颗粒的截留率,获得更高澄清度的滤液。

2.2.2 滤速对硅藻土/纤维素助滤剂助滤性能的影响 取 3 份 1 L 自来水,各投加 100 mg 自然黏土,充分搅拌混合,并向其中各添加 1 mg 硅藻土、1 mg 纤维素和 1 mg 硅藻土/纤维素复合助滤剂,在一定的滤速下经过滤柱过滤。过滤中尽量保持进、出水流量稳定和原水浊度稳定,滤速分别保持在 2 m/h、4 m/h、6 m/h、8 m/h。

如图 7 所示,当滤速控制在 2~8 m/h 范围内时,采用硅藻土/纤维素复合助滤剂作助滤材料的出水浊度去除率均保持在 80% 以上,去除效果较好。并且投加硅藻土/纤维素复合助滤剂进行过滤的浊度去除效果都远好于单独投加硅藻土或纤维素的去除效果。这主要是因为单独投加硅藻土或纤维素时,助滤剂对杂质颗粒的吸附作用和截留能力有限,随着滤速的增加,水流剪切力增大,当水流剪力大于附着力时,原先附着在助滤剂表面的杂质颗粒被剥落下来,导致滤后水的浊度增加,浊度去除率明显降低;而在投加硅藻土/纤维素复合助滤剂的过滤中,

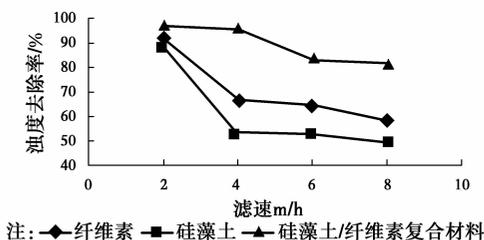


图 7 滤速对浊度去除率的影响

Fig. 7 Effect of filtration rate on turbidity removal efficiency

随着滤速的增加,其滤后水浊度去除率仅略有降低。这是因为硅藻土/纤维素复合助滤剂含有均匀的立体网状交联结构,形成了良好的过滤通道,减少滤饼的过滤阻力,在高滤速下对颗粒仍有很强的吸附截留能力,能去除极微小的颗粒,提高了滤饼的截污精度和容量,延长过滤周期,同时可获得高澄清度的滤液。

2.3 硅藻土/纤维素助滤剂对实际微污染水过滤的实验研究

取 2 份武汉南湖水(洪山地区)为试验微污染水(浊度 25.7 NTU,色度=32 度, $COD_{Mn}=7.6 \text{ mg/L}$, $UV_{254}=0.178 \text{ cm}^{-1}$),充分搅拌混合,并向其中一份投加 1 mg 硅藻土/纤维素复合助滤剂,试验水经过滤柱过滤后,再经微滤膜(膜孔径大小为 $0.1 \mu\text{m}$,膜面积为 7 m^2 ,运行方式为外压式死端过滤,操作压力为 0.1 MPa)深度处理。过滤过程中保持其他条件不变,滤速控制在 4 m/h。膜处理前后出水水质效果及滤柱的过滤周期见表 1。

表 1 出水水质参数

处理工艺	浊度/(NTU)	色度/(°)	$COD_{Mn}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	UV_{254}/cm^{-1}	过滤周期/h
未投加助滤剂	9	11.84	5.09	0.12	24
未投加助滤剂+微滤膜	1.54	7.68	3.5	0.09	—
投加助滤剂	2.06	8.96	3.72	0.08	36
投加助滤剂+微滤膜	0.26	6.08	2.28	0.05	—

如表 1 所示,微污染水中投加 1 mg/L 的硅藻土/纤维素助滤剂过滤后,出水中浊度、色度、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 均明显降低。与未投加助滤剂过滤相比,出水的浊度从 9 NTU 降到 2.06 NTU,色度从 11.84 度降到 8.96 度, COD_{Mn} 从 5.09 mg/L 降到 3.72 mg/L, UV_{254} 从 0.12 cm^{-1} 降为 0.08 cm^{-1} ,同时,滤柱的过滤周期也从原来的 24 h 提高到了 36 h。原因是硅藻土/纤维素助滤剂能很好的改善滤饼结构和过滤通道,加强对水中的细小固体颗粒和胶体粒子的吸附、截留作用,提高滤料对水中微污染物的去除效果,特别是对胶体类和非溶解态污染物的去除率能有显著提高。故投加助滤剂过滤后,随着滤料对水中粒径更加细小的悬浮固体及胶体颗粒的去除,各种水质指标的去除效果均有显著提高。但由于试验水浊度较大,有机物含量高,且相当部分有

机物是以溶解态存在,投加助滤剂强化过滤后出水中浊度和有机物浓度略高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中关于浊度不超过 1 NTU, COD_{Mn} 不超过 3 mg/L 的规定。因此,在投加硅藻土/纤维素助滤剂直接过滤后设置微滤膜深度处理工艺,进一步降低水中的浊度和有机物含量,最终出水水质达标。

由上述分析可知,在微污染水源直接过滤过程中,通过投加硅藻土/纤维素复合助滤剂强化过滤可提高水中各微污染物的去除效果,同时延长了过滤周期,这对提高滤池周期产水量具有重要意义。

3 结 论

1)溶胶-凝胶法可成功制备出新型硅藻土/纤维素复合助滤剂,最佳制备条件为纤硅比 0.67,氨水浓度 5×10^{-4} mol/L,蒸馏水/纤维素 40 mL/g, EtOH/硅藻土 20 mL/g, 60 °C 恒温水浴。

2)在滤速为 4 m/h,进水浊度为 29.3 NTU,投加 1 mg/L 的硅藻土/纤维素复合助滤剂的条件下,滤后水的浊度仅为 1.17 NTU,去除率达到 96%,具有良好的技术、经济效益。

3)硅藻土/纤维素复合助滤剂可显著改善微污染原水直接过滤对浊度、色度、 COD_{Mn} 和 UV_{254} 等水质指标的去除效果,结合微滤膜深度处理工艺,最终出水水质满足中国《生活饮用水卫生标准》的要求。

参考文献:

[1] PETERSON D L. Studies of asbestos removal by direct filtration of a lake[J]. Superior Water, JAWWA, 1980, 72(3): 155-163.

[2] KRISTIANA I, JOLL C, HEITZ A. 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

[3] 余健, 曾光明, 谢水波, 等. 投加助滤剂改善常规过滤的性能[J]. 南华大学学报(理工版), 2003, 17(1): 50-54.

YU J, ZENG G M, XIE S B, et al. Study on the influence of filter aids on the performance of conventional filtration [J]. Journal of Nanhua University (Science & Engineering Edition), 2003, 17(1): 50-54. (in Chinese)

[4] 尤兆玮, 孙昕. 精细过滤及硅藻土助滤剂的应用[J]. 过滤与分离, 2005, 15(2): 32-35.

YOU Z W, SUN X. Application of diatomite filter aid in filtration [J]. Journal of Filtration & Separation, 2005, 15(2): 32-35. (in Chinese)

[5] KHRAISHEH M, AL-DEGS Y S, MCMINN W. Remediation of wastewater containing heavy metals using raw and modified diatomite [J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 99(2): 177-184

[6] HAIDER S, PARK S Y. Preparation of the electrospun chitosan nanofibers and their applications to the adsorption of Cu (II) and Pb (II) ions from an aqueous solution [J]. Journal of Membrane Science, 2009, 328(1/2): 90-96

[7] 徐亚斌, 吴纯德, 王林, 等. 硅藻土强化混凝去除微污染原水中的有机物[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 3919-1922.

XU Y B, WU C D, WANG L, et al. Removal of organic matter in micro-polluted raw water using enhanced coagulation with diatomite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(11): 3919-1922. (in Chinese)

[8] BOITTELLE C, et al. Advance in the precoat filtration process [J]. Separation Science and Technology, 2008, 43(7): 1701-1712.

[9] GINDLA W, KECKESB J. All cellulose nanocomposite [J]. Polymer, 2005, 46(23): 10221-10222.

[10] 聂水源, 吕小梅, 李继, 等. 纤维与石英砂过滤技术的比较研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 141-145.

NIE S Y, LV X M, LI J, et al. Comparison between fiber and sand filtration technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(1): 141-145. (in Chinese)

[11] KIM J, YUN S, OUNAIES Z. Discovery of cellulose as a smart material [J]. Macromolecules, 2006, 39(12): 4202-4203.

[12] 莫尊理, 赵仲丽, 陈红, 等. 纳米 SiO_2 /纤维素复合材料的非均相制备及其性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(4): 24-28.

MO Z L, ZHAO Z L, CHEN H, et al. Heterogeneous preparation and properties of nano- SiO_2 /cellulose composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(4): 24-28. (in Chinese)

[13] 高洁, 汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 42-44.

GAO J, TANG L G. Cellulose science [M]. Beijing: Science Press, 1999: 42-44. (in Chinese)