

膜技术在饮用水深度处理中的应用现状

吴礼光^{1,2}, 赵海洋³, 张林³

(1.浙江工商大学环境科学与工程学院,杭州 310018; 2.城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心浙江研究与开发基地,杭州 310012; 3.浙江大学化学工程与生物工程学系,杭州 310027)

[摘要] 从压力驱动膜及膜集成技术的特点出发,结合不同水源水质,对膜技术应用于饮用水深度处理方面的进展进行了分析和综述,并提出膜法饮用水深度处理的发展建议。

[关键词] 膜技术;集成过程;饮用水深度处理

[中图分类号] TU991.2 **[文章标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)07-0106-07

1 前言

水是生命之源,与人类的日常生活密切相关,而饮用水质量更是直接关乎人体健康。随着经济的高速发展以及人类活动程度的加速,饮用水水源污染问题已呈日益恶化的趋势。据世界卫生组织(WHO)调查资料显示,全世界已发现约80%的疾病和50%的癌症与饮用不洁净的水有关^[1]。

我国人口众多,人口与资源、环境以及经济社会发展的矛盾突出,由于过去过分关注发展速度,对环境关注不够,很多地区水污染问题较严重,饮用水水质难以保证。不仅如此,一些突发性的污染事件,对饮用水质同样造成很大影响。因此,开发实用的饮用水深度处理和应急技术具有重要意义。

近年来主要包括微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)和反渗透(RO)。相对于传统的水处理技术,压力驱动膜过程更为高效、低耗,因此,本文结合膜分离特点,对国内外膜法饮用水深度处理的研究与应用进展进行总结,并提出我国未来膜法饮用水处理技术的发展方向。

2 MF技术在饮用水深度处理中的作用

MF技术主要用于去除水体中的悬浮物、细菌等大颗粒物质,因此,常应用于饮用水生产的预处理或初级阶段,一般要结合其他工艺才能起到保障饮用水水质的作用。

朱建文等^[2]建立了一套MF中试系统直接用于杭州清泰水厂的沉后水处理,中试结果表明:MF膜对浊度的去除率>99%,对细菌、大肠杆菌的去除率接近100%,且基本不受通量的影响;对Fe和色度的去除效果也很好,出水中的铁<0.05 mg/L,色度<5倍,而对Mn的去除则受前处理的影响较大;水中的碱度和余氯基本无变化;对有机物、氨氮、UV₂₅₄等的去除效果较差,去除率均低于20%。之所以将MF用于沉后水处理,是因为MF膜的孔径相对较大,易发生膜污染。

为此,刘锋刚等^[3]详细研究了混凝前处理对MF膜污染的影响,发现混凝前处理对膜污染控制的主要作用在于降低滤饼层阻力和减轻不可逆膜污染。王锦等^[4]再次证实了混凝前处理对MF膜的影

[收稿日期] 2014-05-10

[基金项目] 浙江省重大科技专项(2009C03006-2)

[作者简介] 吴礼光,1964年出生,男,安徽枞阳县人,教授,博士,主要从事环境功能材料与分离膜、饮用水深度处理与安全保障技术研究;
E-mail: wulig64@mail.zjgsu.edu.cn

响,发现最优出水水质混凝条件与最佳减轻膜污染混凝条件有差异。随后,顾平等人在结合混凝技术的基础上,通过间歇抽吸的方式连续运行,结果表明:抽停比对出水水质影响不大,但会增强膜污染^[5]。

吴水波^[6]通过改善和优化混凝-MF工艺可将水中砷的浓度从100 μg/L左右降至4.40 μg/L,砷的去除率为92.8%~98%,从而满足生活饮用水安全卫生标准。陶润先等^[7]采用混凝-MF工艺有效改善了饮用水的生物稳定性,从而控制产水中细菌再生长趋势。除此之外,MF膜也被与电絮凝技术结合用以去除饮用水中的氟和微生物,表现出良好的去除效果^[8,9]。由此可以看到,适当的前处理工艺对利用MF技术解决饮用水安全问题起到重要的改善和促进作用。

在工业化应用方面,2005年美国康涅狄格州的Foxwoods Casino厂采用调节pH值后加曝气预氧化和压力式柱状微滤膜工艺对自来水进行深度处理,

水质净化效果良好^[10]。

3 UF技术在饮用水深度处理中的作用

UF膜孔径较MF的更小,对微生物和大分子有更好的截留效果,对于普通的自然水源,经UF处理后可达到饮用水安全标准,因此UF工艺更适用于改善农村饮用水水质^[11],对于盐度较高或小分子有机物较多的水源,则往往难以奏效。

有研究表明UF对总有机碳(TOC)、COD_{Mn}、UV₂₅₄的去除率仅为20%、30%、40%左右^[12,13]。因此,UF技术往往需要结合其他工艺才能保障饮用水的安全。如果在UF膜前设置适当的预处理,不仅可以提高整个处理系统的有机物去除率,而且可以减轻有机物对膜的污染,延长膜的反洗周期和使用寿命,减少膜更新费用。UF膜前预处理工艺主要有混凝工艺、活性炭吸附工艺、砂滤工艺等,效果如表1所示。

表1 针对不同去除对象的超滤组合技术

Table 1 The ultrafiltration technology of removing objects

去除对象	处理工艺	处理效果去除率	参考文献
DOC、UV ₂₅₄	混凝+UF	53%、78%,且降低膜污染	[12]
有机物	混凝+UF	明显降低有机物含量	[14]
高锰酸钾指数、NH ₄ ⁺ -N、酚、UV ₂₅₄ 、浊度和细菌	PAC+UF	高锰酸钾指数、NH ₄ ⁺ -N和酚的去除明显,对UV ₂₅₄ 的去除效果不大,对浊度和细菌总数的去除没有帮助,膜污染降低	[15]
色度、腐殖酸、苯	PAC+UF	96、89、97	[16]

注:PAC为粉末活性炭,DOC为溶解性有机碳

王晓昌^[12]等利用混凝+UF组合工艺对含有机物的水进行处理,发现对DOC和UV₂₅₄的去除率可达53%和78%。另外,有机物的减少将进一步减轻膜的污染,这主要是由于混凝处理使小分子有机物形成微絮体,在接近膜表面时已经发生沉淀,或者在膜表面被截留,减少进入膜孔的污染物质;在絮凝过程中絮体颗粒直径增大,导致其在膜表面的反向传输速度随之增大,从而减轻了有机物在膜表面的吸附沉积。

田家宇等^[17]采用UF膜+混凝生物反应器组合工艺处理受污染的水源,该工艺结合UF、生物降解以及混凝三者的协同作用去除溶解性有机物。就DOC的去除而言,三种作用的贡献率分别为11.1%、6.2%和26.7%。其中,混凝的作用占有主要地位。

然而,混凝过程对UF膜的影响有一定的争

议。一些学者认为加入混凝剂后,金属离子与水天然有机物发生结合,更容易在膜表面沉积,从而加重膜的污染^[18]。

活性炭+UF组合工艺在目前水处理的实际应用中更受青睐,因为该工艺把活性炭对小分子有机物的吸附作用和UF对大分子有机物及细菌病毒等的筛分作用较好地结合在一起,大大提高了水体污染物的去除率,有效缓解了膜污染问题^[19]。

张捍民等^[15]研究了粉末活性炭(PAC)的加入对UF处理效果的影响,发现PAC的加入可以增强浸没式中空纤维膜装置对高锰酸钾指数和NH₄⁺-N的去除效果,但对UV₂₅₄的去除效果不明显,对浊度和细菌总数的去除没有帮助。

Tomaszewska等^[16]通过实验发现单一的UF过程对色度、腐殖酸、酚的去除率分别为60%、40%、0%;投加PAC后,色度、腐殖酸、酚的去除率分别为

96%、89%、97%。另外,也有人发现使用PAC的UF工艺对合成有机物(SOC)、嗅和味的去除效果均有很大的改善^[20,21]。Tsujiimoto^[20]研究了颗粒活性炭(PAC)吸附和UF组合工艺,发现由于GAC的吸附作用和生物酶解作用,可以有效提高水中有机物的去除率,提高出水水质,降低膜污染。

但研究者在PAC对UF膜污染的影响上也存在分歧。大多数认为,预处理中的PAC可以缓解膜污染,例如,张捍民等^[15]认为PAC颗粒尺寸为10~50 μm,比膜孔径0.01 μm要大得多,PAC无法进入膜孔内部引起膜污染;而PAC在膜表面形成的滤饼则很容易被表面横向流引起的剪切力刷掉。然而Youshihiko等报道认为PAC对膜通量和污染没有明显的影响^[21]。Lin等发现投加PAC加剧了膜通量的下降和膜污染^[22]。这一看似矛盾的报道可能归咎于研究中使用PAC的量及颗粒大小有较大差异。

董秉直等^[14]对淮河原水进行微絮凝,然后结合砂滤+UF工艺较好的去除了水体中的有机物,COD_{Mn}去除率最高可达60%。此过程类似于混凝+UF工艺,这里的砂滤主要起到保护UF膜的作用,同时也分担一部分除污压力。

Sawada等^[23]进行了臭氧预氧化和UF的工艺探究,他们发现臭氧可以更好地去除有机物,从而提高产水安全性,降低膜污染。这是因为臭氧将水中的有机物分解成不易污染膜的小分子物质,从而缓解了膜污染。

超声波辐射可有效地提高多孔介质中流体的局部流速,常作为UF的辅助强化手段以提高渗透通量;此外,空化作用也是超声波强化清洗UF膜的主要机理^[24,25]。因此,超声波强化作用有望在保证产水安全性的同时,提高UF产水通量及抗污染性。

工业上典型UF深度处理案例为美国明尼苏达州的Minneapolis规模为 26×10^5 t/d的净水厂,在改造过程中,原工艺为投加石灰软化—铁盐混凝—沉淀—滤池过滤,改造后的工程则采用压力式柱状超滤膜代替滤池,产水水质明显提高^[10]。

4 NF膜技术在饮用水深度处理中的应用

与MF膜和UF膜相比,NF膜不仅可以保证饮用水的生物安全性,同时对各类有机物有较高的截留性能,对无机离子可适度去除,能够满足更广泛水源条件下的应用要求,也能在水源波动时和应急条件下满足最终供水的要求。

4.1 NF技术在保障饮用水安全中的作用

4.1.1 无机盐的去除

NF具有良好的截留高价盐离子的能力,常被用来去除硬度、硝酸盐、砷、氟化物以及铝、铅等无机盐。

1) 硬度。NF可去除水体中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,从而降低水体硬度,特别是对 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型苦咸水截留效果更加显著^[26],Bertrand等^[27]在铁矿区间用NF膜处理高含量的硫酸盐硬水制备饮用水,产水量为125 m³/h。Wittmann等^[28]用NF膜处理深井水,去除了其中约50%的 Ca^{2+} ,另一半的矿物质可以透过膜,因此不需要再矿化即可直接用氯消毒后供水。

2) 硝酸盐。采用NF膜可以部分去除硝酸盐,如陶氏公司的NF200膜对硝酸盐有76%的截留率。有研究表明致密型NF膜对硝酸盐截留率较大,但疏松型NF膜则对硝酸盐截留率较小,甚至当水中存在其他阴离子时,对硝酸根的截留率可能会出现负值^[29]。

3) 砷。过量砷对人体危害极大,在水中以两种价态存在,三价砷以中性分子 H_3AsO_3 的形式存在,而五价砷在高pH值下则以二价阴离子 HAsO_4^{2-} 的形式存在。NF膜对5价砷的截留率在60%~90%,但对3价砷的截留效果不理想。这是由于3价砷的空间位阻作用不大,而5价砷不仅有空间位阻还有静电排斥的作用^[30,31]。因此,若采用NF系统除砷,则需要在偏碱性的环境下操作。

4) 氟化物。研究表明由于 F^- 比 Cl^- 和 I^- 更容易发生水合作用,所以NF膜对卤素离子的截留顺序为 $\text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{I}^-$,即对氟离子有很好的截留效果^[32]。

5) 其他无机盐。工业生产中泄漏或排放的金属离子,包括铜、镉、铅、锰、汞、镍及放射性元素等一旦进入到饮用水源中,传统的自来水工艺难以达到去除目的,对人类健康会产生严重的威胁。侯立安等^[33]以模拟核爆后放射性物质污染废水为研究对象,采用膜分离与离子交换组合工艺对污染废水中具有代表性的碘、铯、钚、铀等放射性物质进行去除,结果表明该工艺对放射性的去除率可达99.93%。膜优选的研究结果则表明,尽管ROACM1型膜、NFTS40型膜、NFTS80型膜、活性炭都可以去除Ames致突变物,但TS40型NF膜的效果最好^[34]。

4.1.2 有机物的去除

NF膜能截留较多种类的有机物,但有机物的亲疏水性能、分子质量、荷电性是影响NF膜截留率的主要指标,不同性质的微量有机物对应的分离机理和截留率也可以通过适当的参数加以预测^[35]。

1)消毒副产物(DBPs)及其前驱物(FP)去除。三卤甲烷(THMs)是饮用水氯化消毒过程中,氯与水中有机物反应生成的主要挥发性卤代烃类化合物,属于三致物质,是重要的消毒副产物。研究表明,相比直接去除DBPs,去除其前驱物是更有效和安全的方法,而NF膜技术则被认为是去除此类物质有效的方法^[36]。

2)环境内分泌干扰物(EDCs)去除。尽管在饮用水源中检测到的EDCs是微量的,但由于其对人体的危害极大,近年来在全世界范围内受到广泛关注。常用的EDCs主要来源于洗涤剂、有机氯和磷农药、除草剂、增塑剂,树脂原料等。一些学者已开始关注NF膜对此类小分子有机物的去除,并且取得了良好的研究结果^[37-39]。

3)持久性有机物(POPs)去除。持久性有机污染物,如多环芳烃(PAHs)和有机氯农药(OCPs)等在环境中残留水平虽然很低,但由于其具有高毒性、持久性、积聚性,对生态和健康的危害具有协同效应的特点,潜在威胁很大。一些研究者尝试利用NF膜来去除这些有毒小分子,发现其去除率可达>94%以上^[40]。

4)医药与个人护理品(PPCPs)去除。近十年来,PPCPs成为学术界和公众广泛关注的一类“新型”环境污染物质,其极性高、易溶于水、不易挥发,难以被混凝、过滤去除,会通过水相传递和食物链扩散^[41]。近年来发现某些河流水体中PPCPs的质量浓度已从初始的10 μg/L不断升高到1 000 μg/L左右;在处理后的饮用水中也被测出,虽然浓度低于1 μg/L,但也要对其引起足够的重视^[42]。Phillips等^[43]将52种EDCs和PPCPs按照物理化学特性分了两大类,一类为极性高、不易挥发、亲水性化合物,NF膜对这一类化合物截留率较低,约为44%~93%;另一类极性低、较易挥发、疏水化合物,NF膜对这类化合物的截留率较高。

5)生物可同化有机物(AOC)去除。AOC是指最容易被细菌利用并直接合成细菌体的有机物,已被广泛应用于鉴定饮用水的生物稳定性。研究表明AOC在50~100(乙酸碳)/L时水质能达到生物稳

定,当AOC小于10 μg(乙酸碳)/L时,异养菌几乎不能生长。NF膜对水体中的AOC去除率一般在42%~95%^[44]。龙小庆等^[45,46]分别以地表水和地下水为研究对象,探讨了活性炭-NF膜工艺对饮用水中总有机碳和可同化有机碳的去除效果及机理。结果表明,活性炭仅可去除部分AOC、TOC和Amcs致突变物,出水仍达不到生物稳定性的要求,但它可作为NF的预处理,确保NF膜进水符合要求;而NF则可将水中大部分TOC和可同化有机碳去除,确保饮用水的生物稳定性。

6)微囊藻毒素(MC)去除。蓝藻爆发是水体富营养化和水危机事件的典型特征,藻细胞死亡后释放到水体中的藻毒素如微囊藻毒素对人类危害极大,具有致癌和对特定酶系统活性抑制的双重作用,并且这类物质是水溶性的,分子质量小,很难被传统的混凝、过滤工艺去除。利用NF膜去除藻毒素成为研究者优先考虑的方案,结合一些传统处理工艺可将藻毒素完全去除^[47]。然而,另有报道表明UF膜对藻毒素的去除只有42%^[48]。这是因为蓝藻可产生两种藻毒素,分子质量较小的藻毒素(ATX-a)的去除机理是静电排斥和位阻效应,而分子质量较大的藻毒素去除主要是位阻效应^[49]。

Gaid等^[50]对世界上第一个大型NF饮用水深度处理系统,法国Mery-Sur-Oise水厂的NF工艺做了详细的研究,结果表明该工艺对有机物有着很好的去除效果,对DOC平均去除率为60%,对农药如莠去津(Atrazine)和西玛津(Simazine)去除率达90%以上,出水中残留的微污染物绝大部分低于分析检测限度。

5 RO膜技术在饮用水深度处理中的作用

由于RO操作压力高,膜价格昂贵,因此在饮用水深度处理中应用非常少,主要应用于海水、苦咸水淡化等。但针对部分特殊水源的饮用水,常规膜技术难以使水质达标,反渗透技术则是有效的深度处理技术。例如很多内陆地区从地下取水,但深井取水多会遇到苦咸水,不能直接饮用,UF或NF均难以达到理想的净化目标,因此,反渗透苦咸水脱盐是最常用的技术。

通常除了部分特殊物质外,反渗透产水中各种离子和有机物浓度均非常低,其中典型的代表为硼,根据世界卫生组织(WHO)的建议成人每天摄入硼的最大量为0.16 mg/kg,过多摄入会导致恶心,头

疼,腹泻,肾坏死,甚至死亡^[51]。因此,降低海水淡化水中硼的含量是保障淡化水安全的一个重要环节。RO是去除水体中硼的有效方法之一,经过多级RO处理之后,水体中硼的浓度可降至0.5 mg/L。尽管多级RO意味着较高的能耗,但与其他方法相比,RO能耗仍旧较低^[52]。研究发现在酸性条件下,硼主要以无电荷的硼酸分子的形式存在,而且分子尺寸相对较小,RO膜对其截留性较差;在碱性条件下,硼主要以(B(OH)₄⁻)形式存在,此时其离子半径较大,RO膜对其截留性较高^[53]。一般需要在碱性条件下才能保障RO膜更高的去除硼效率,但此时会增加二价盐在膜表面结垢的风险。多级RO可以解决此问题,首先选择在稍微偏碱的条件下去除二价盐和少部分硼,然后再在较高碱性条件下去除大部分的硼,还可以使用更多级的RO来保证较低的硼浓度。如果要将硼的浓度降至0.2 mg/L,pH需要被增加至9.9以上^[54]。

近年来,RO水处理技术发展很快,工程造价和运行成本持续降低,当前的主要发展趋势包括降低RO过程的操作压力,提高系统回收率,开发廉价高效的预处理技术,增强膜系统抗污染能力等。

6 膜集成技术在饮用水深度处理中的应用

为保障饮用水的安全性,单一膜技术有时很难达到处理要求,膜集成技术则能够更好地满足饮用水处理要求。膜集成技术多是将MF/UF与NF/RO结合使用,UF、MF作为NF、RO的预处理工艺代替复杂的传统预处理工艺,UF、MF不但可以完全去除污水中的细菌和悬浮物,对COD、BOD也有一定的去除效果,满足后续RO膜的进水水质要求,减缓了RO膜的负荷和污染,其清洗周期将比传统预处理工艺增长5~6倍^[55]。

水净化通常采用MF或UF进行处理。然而MF产水有时难以达到目标水质,直接使用UF又容易造成UF膜堵塞。比较合适的解决方法就是MF和UF同时使用,让MF减轻UF的负荷,让UF保证出水水质。Adam等^[56]通过实验证明,MF膜在搅拌和较低的跨膜压差的情况下,对脊髓灰质炎病毒的去除率大于99%,而对UF膜来说,该病毒则是完全去除。如果MF和UF同时使用,既能保障病毒的完全去除,又能保障两种膜的运行时间。然而,由于MF与UF的孔径都比较大,很难进行深度过滤,因此很

少同时使用这两种过程,一般是将其中一种与更为致密的NF和RO搭配使用。

针对某市城区水厂受到重金属与有机物污染,何少华等^[57]采用MF+RO工艺对被污染自来水进行深度处理。两年来的运行结果表明反渗透系统对水中的重金属离子、有机污染物和细菌的去除效率都非常高。

岛屿或沿海城市的饮用水往往容易受到海水倒灌或咸潮等的影响,导致水中盐分过高。周志军等^[58,59]利用UF和RO联合的海岛饮用水处理示范装置可以解决沿海池塘水在季节交替产生的淡咸水交替的问题,既保证供水质量,还降低了运行成本。

陈欢林等^[60,61]以钱塘江潮汐咸水水体为研究对象,将UF、NF和RO集成用于处理周期性变化的潮汐水。其中UF作为整个系统的预处理工艺,可以在淡水期使用;NF可以除去咸水中的大部分盐,可以用作咸水期;RO作为最后一个环节,可以从较高盐度的咸水进一步回收一部分水。在保证产水达标的情况下,整个系统的回收率可达到90%~95%。

当发生强降雨等较大自然灾害时,供水系统容易受到水源污染、管道破裂、污水渗漏等损害,水中各种有机物、重金属、微生物等严重超标,使得水源中各组分异常复杂、水质变差,严重影响饮用水安全。采用常规的自来水制备工艺来处理雨水难以保证产水可达到饮用水标准,结合应急供水的特征,通过对雨洪等进行适当的预处理后,使其满足RO等膜技术的要求,经低压RO处理后即可获得符合国家标准的饮用水。

研究发现,基于UF和低压RO膜过程的双膜集成技术可以在雨洪应急供水安全中发挥重要的作用^[62]。针对多变、污染的水源,双膜处理后的产水水质稳定、达标。除此之外,膜集成应急净水装置还具有适合多途径运输、多方位组装,复杂的环境、气候,野外露天,长短期切换运行等用途。

7 结语

在水源污染状况未有显著改善的背景下,随着公众对饮用水水质安全的关注日趋增加,膜法水处理技术成为了目前最有效的饮用水深度处理手段,膜技术在饮用水深度处理中的作用主要体现在以下两个方面:a.保证饮用水水质安全,无论是多级单一膜技术还是多膜集成技术在合理的设计下都能保

障产水水质的安全性;b.保证饮用水水质水源的多样性,多膜集成技术能够满足不同水源,不同水质,不同产水需要的各种要求,给提供安全饮用水创造了可能。

参考文献

- [1] Guidelines for Drinking-Water Quality (3rd Ed); Vol, 1, Recommendations; World Health Organization: Geneva, 2004.
- [2] 朱建文,许阳,代荣,等. MF膜用于饮用水处理的中试研究[J].中国给水排水, 2008, 24(21): 13-18.
- [3] 刘锋刚,胡保安,何文杰,等. MF膜法饮用水处理工艺中膜污染控制的研究[J].给水排水, 2007, 33(11): 16-21.
- [4] 王锦,潘思茹,罗东平,等. 混凝预处理优化对MF膜污染的影响[J].北京交通大学学报:自然科学版, 2012, 6: 128-132.
- [5] 杨帆,王暄,吕晓龙,等. 混凝-MF饮用水处理中试装置运行的优化研究[J].膜科学与技术, 2009, 29(1): 73-80.
- [6] 吴水波. 混凝-MF工艺的饮用水除磷研究[D].天津:天津大学, 2007.
- [7] 陶润先,陈立,万宁,等. 混凝-微滤工艺提高饮用水生物稳定性的试验研究[J].膜科学与技术, 2012, 32(1): 106-110.
- [8] 李静波,赵璇,解明曙. 双铝电极电絮凝-微滤法去除饮用水中细菌的实验研究[J].内蒙古环境保护, 2006, 18(3): 9-13.
- [9] 李静波,赵璇,李福志. 电絮凝-微滤去除饮用水中的氟[J].清华大学学报:自然科学版, 2007, 9.
- [10] Christensen M. Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water [M]. Denver: Glacier Publishing, 2005.
- [11] 董浩,杨新新,王建良,等. UF技术在水农村饮用水处理中的应用[J].中国农村水利水电, 2007, 2: 61-65.
- [12] 王晓昌,王锦. 混凝-UF去除腐殖酸的实验研究[J].中国给水排水, 2002, 18(3): 18-22.
- [13] 陈益清,尹华升,尤作亮,等. UF处理微污染水库水的中试研究, 饮用水安全保障技术与管理国际研讨会会议论文集[C].北京:中国建筑工业出版社, 2005, 525-532.
- [14] 董秉直,刘凤仙,桂波. 在线混凝处理微污染水源水的中试研究[J].工业水处理, 2008, 28(1): 40-43.
- [15] 张捍民,张锦,邹联沛,等. 粉末活性炭与UF膜联用去除饮用水中污染物的研究[J].哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(3): 60-66.
- [16] Tomaszewska T, Mozia S. Removal of organic matter from water by PAC/UF system[J]. Water Research, 2002, 36(16): 4237-4143.
- [17] 田家宇,张宇,施雪华,等. UF膜/混凝生物反应器去除饮用水中有机物的效能[J].中国给水排水, 2009, 25(5): 20-26.
- [18] Maartens A, Swart P, Jacobs E P. Feed-water pretreatment: Methods to reduce membrane fouling by natural organic matter [J]. Journal of Membrane Science, 1999, 163(1): 51-62.
- [19] 陈治安,刘通,尹华升,等. UF在饮用水处理中的应用和研究进展[J].工业用水与废水, 2006, 37(3): 7-12.
- [20] Tsujimoto W, Kimura H, Izu T, et al. Membrane filtration and pre-treatment by GAC[J]. Desalination, 1998, 119: 323-326.
- [21] Yoshihiko M, Fraderic C, Akira Y. Removal of a synthetic organic chemical by PAC-UF systems II: Model application[J]. Water Research, 2001, 35(2): 464-470.
- [22] Lin C, Liu S, Hao O J. Effect of functional groups of humic substances on UF performance[J]. Water Research, 2001, 35(10): 2395-2402.
- [23] Tanaka Y, Fukase T, Sawada S. Organic-wastewater treatment method and organic-wastewater treatment apparatuses[P]. U.S.: Patent Application 13/393,715, 2009-9-29.
- [24] Tarleton E S, Wakeman R J. Electro-acoustic crossflow micro-filtration[J]. Filtration & Separation, 1992, 29(5): 425-432.
- [25] 陈健,郭祀远,李琳,等. 超声波强化UF的研究进展[J].水处理技术, 2003, 29(4): 191-193.
- [26] 侯立安,高鑫,赵兰. 纳滤膜技术净化饮用水的应用研究进展[J].膜科学与技术, 2012, 32(5): 1-9.
- [27] Bertrand S, Lemaitre I, Wittmann E. Performance of a nanofiltration plant on hard and highly sulphated water during two years of operation[J]. Desalination, 1997, 113: 277-281.
- [28] Wittmann E, Cote P, Medici C, et al. Treatment of a hard borehole water containing low levels of pesticide by nanofiltration [J]. Desalination, 1998, 119(1-3): 347-352.
- [29] Thanuttamavong M, Yamamoto K, Oh J I, et al. Rejection characteristics of organic and inorganic pollutants by ultra low-pressure nanofiltration of surface water for drinking water treatment[J]. Desalination, 2002, 145(2-3): 257-264.
- [30] Vrijenhoek E M, Waypa J J. Arsenic removal from drinking water by a loose nanofiltration membrane[J]. Desalination, 2000, 130: 265-277.
- [31] Seidel A, Waypa J J, Elimelech M. Role of charge (Donnan) exclusion in removal of arsenic from water by a negative charged porous nanofiltration membranes[J]. Environ Eng, Sci., 2001, 18(2): 105-113.
- [32] Lhassani A, Rumeau M, Benjelloun D, et al. Selective demineralization of water by nanofiltration application to the defluorination of brackish water[J]. Water Research, 2001, 35(13): 3260-3264.
- [33] 侯立安,左莉. NF膜分离技术处理放射性污染废水的试验研究[J].给水排水, 2004, 10.
- [34] Verliefde A, Cornelissen E, Amy G, et al. Priority organic micropollutants in water sources in Flanders and the Netherlands and assessment of removal possibilities with nanofiltration[J]. Environmental pollution, 2007, 146(1): 281-289.
- [35] 毕飞,陈欢林,高从塔. 纳滤膜去除饮用水中微量有机物的研究进展[J].现代化工, 2011, 31(7): 21-29.
- [36] Lin Y L, Chiang P C, Chang E E. Removal of small trihalomethane precursors from aqueous solution by nanofiltration[J]. Journal of Hazardous materials, 2007, 146(1): 20-29.
- [37] Hilal N, Al-Zoubi H, Darwish N A, et al. A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy[J]. Desalination, 2004, 170(3): 281-308.
- [38] Kim J H, Park P K, Lee C H, et al. A novel hybrid system for the removal of endocrine disrupting chemicals: Nanofiltration and homogeneous catalytic oxidation[J]. Journal of Membrane Science, 2008, 312(1): 66-75.
- [39] Yoon Y, Westerhoff P, Snyder S A, et al. Removal of endocrine disrupting compounds and pharmaceuticals by nanofiltration and ultrafiltration membranes[J]. Desalination, 2007, 202(1): 16-23.
- [40] Caus A, Vanderhaegen S, Braeken L, et al. Integrated nanofiltration cascades with low salt rejection for complete removal of pesticides in drinking water production[J]. Desalination, 2009, 241(1): 111-117.
- [41] Huerta-Fontela M, Galceran M T, Ventura F. Occurrence and removal of pharmaceuticals and hormones through drinking water treatment[J]. Water research, 2011, 45(3): 1432-1442.
- [42] Phillips P J, Smith S G, Kolpin D W, et al. Pharmaceutical formulation facilities as sources of opioids and other pharmaceuti-

- cals to wastewater treatment plant effluents[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(13): 4910–4916.
- [43] Yoon Y, Westerhoff P, Snyder S A, et al. Nanofiltration and ultrafiltration of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals and personal care products[J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, 270: 88–100.
- [44] 徐悦, 董秉直, 高乃云. 纳滤膜对饮用水中可同化有机碳的去除效果[J]. *给水排水*, 2006, 32(11): 3–7.
- [45] 龙小庆, 罗敏, 王占生. 活性炭-NF膜工艺去除饮用水中总有机碳和可同化有机碳[J]. *水处理技术*, 2000, 26(6): 351–354.
- [46] 龙小庆, 王占生. 活性炭-NF膜工艺去除饮用水中总有机碳和Ames致突变物[J]. *环境科学*, 2001, 22(1): 75–79.
- [47] Teixeira M R, Rosa M J. Integration of dissolved gas flotation and nanofiltration for *M. aeruginosa* and associated microcystins removal[J]. *Water research*, 2006, 40(19): 3612–3620.
- [48] 赵勇, 李伟英, 张明, 等. 超滤膜对水中微囊藻毒素去除机理及影响因素研究[J]. *工业水处理*, 2010 (004): 26–29.
- [49] Ribau T M, Rosa M J. Neurotoxic and hepatotoxic cyanotoxins removal by nanofiltration [J]. *Water research*, 2006, 40(15): 2837–2846.
- [50] Gaid A, Bablon G, Turner G, et al. Performance of 3 year's of nanofiltration plants[J]. *Water Supply*, 1999, 17(1): 65–74.
- [51] Steven J, Hamilton, Kevin J, et al. Acute toxicity of boron, molybdenum, and selenium to fry of chinook salmon and coho salmon[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1990, 19(3): 366–373.
- [52] Xu Y, Jiang J Q. Technologies for boron removal[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47 (1): 16–24.
- [53] Oron G, Gillerman L, Bick Y, et al. Membrane technology for sustainable treated wastewater reuse: agricultural, environmental and hydrological consideration[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57 (9): 1383–1388.
- [54] 张永利, 应年华, 郑伟达, 等. 嵊泗县海水淡化水水质研究与分析[J]. *中国卫生检验杂志*, 2007, 17(2): 371–373.
- [55] Leslie G L, Duniwin W R, Gabillet P, et al. Pilot testing of microfiltration and ultrafiltration upstream of reverse osmosis during reclamation of municipal wastewater[J]. *Proceedings of ADA, Biennial Conference, Monterey, California*: 1996.
- [56] Adam S A, Gacangelo J G, Laine J M. Characteristics and costs of MF and UF plants[J]. *AWWA*, 1996, 88(5): 22–31.
- [57] 何少华, 娄金生, 熊正为, 等. 反渗透系统在饮用水深度处理中的应用[J]. *南华大学学报(理工版)*, 2003, 17(1): 55–59.
- [58] 蓝俊, 周志军, 江增, 等. UF和RO联用的海岛饮用水处理示范装置[J]. *水处理技术*, 2012, 38(4): 126–130.
- [59] 邵卫云, 周永潮, 周志军. 沿海岛屿村镇饮用水净化技术与工程示范[J]. *建设科技*, 2013, 2: 29–31.
- [60] 毕飞, 李伟, 陈小洁, 等. 潮汐咸水的NF集成处理系统[J]. *青岛: 2012青岛国际脱盐大会*, 2012.
- [61] 陈欢林, 毕飞, 张林, 等. 潮汐咸水NF集成脱盐除污[C]// 2012北京国际海水淡化高层论坛论文集. 北京, 2012.
- [62] 赵海洋, 周志军, 张林, 等. 双膜法集成技术保障城市雨洪应急供水的可行性研究[J]. *中国市政工程*, 2013, z1, 79–81.

Application status of membrane processes for advanced potable water treatment

Wu Liguang^{1,2}, Zhao Haiyang³, Zhang Lin³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, R & D Base in Zhejiang, Hangzhou 310012, China; 3. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[Abstract] In this paper, a detailed review was drawn on the application of different membrane processes in the advanced water treatment, based on the features of these pressure-driven membrane processes and the quality of different water resource. In addition, several suggestions were listed for the development of membrane-based potable water treatment.

[Key words] membrane technology, integrated process, advanced potable water treatment