

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.003

膜组件选取的指标体系与中试框架——以欧洲超滤应用为例

郑兴¹, 吴林杰^{1,2}, 曹昕¹, 李丽¹, 王静³, 马卫东³

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 3. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 西安分公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 基于超滤膜技术经济指标, 构建旨在进行膜组件选取的指标体系与中试框架, 为用户在信息不对称情况下选择膜组件提供了参考。其中, 膜组件选取指标体系分为四级, 第一级指标包括经济性、安全与环保、质量保障三方面内容, 由多项二、三级指标量化支撑, 技术指标处于体系的第四级, 可作为区分产品性能的具体指标参数。依据欧洲市场调查数据, 对膜组件选取指标体系中涉及固定投资与运行费用的指标点进行了重点分析, 明确中试需要注意的关键对比参数。在此基础上, 总结提出超滤膜水处理中试对比试验的基本原则与试验构架, 进而以膜组件性能对比试验为例, 对指标体系进行了应用性总结。

关键词: 超滤; 膜组件; 中试; 指标体系; 水质

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0011-06

Index System for the Selection of Membrane Modules and Pilot Framework: Take European Ultrafiltration Application as an Example

ZHENG Xing¹, WU Lin-jie^{1,2}, CAO Xin¹, LI Li¹, WANG Jing³, MA Wei-dong³

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710068, China; 3. Xi'an Branch, North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: Based on the technical and economic indicators of ultrafiltration membrane, the index system and pilot test framework for membrane module selection were constructed, which provided a reference for users to select membrane components under asymmetric information. Among them, the selection index system of membrane module is divided into four levels: the first level includes economy, safety and environmental protection, and quality assurance. It is supported by a number of secondary and tertiary indicators. The technical indicators are in the fourth level of the system, which can be used as specific index parameters to distinguish product performance. Based on the survey data from European market, this paper focuses on the analysis of the index points related to fixed investment and operation cost in the selection index system of membrane module, and clarifies the key comparative parameters that should be paid attention to in the pilot test. On this basis, we propose the basic principles and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878555); 陕西省国际合作基金资助项目(2017KW-041)

experimental framework of the pilot scale test of ultrafiltration membrane water treatment. We then take the performance comparison test of membrane module as an example to summarize the application of the index system.

Key words: UF; membrane module; pilot test; index system; water quality

超滤膜过滤是一项较为成熟的分离技术,广泛应用于给水、污水深度处理、工业用水与海水淡化预处理等各个领域。目前,国际市场具有一定影响力的超滤膜厂家达20余家,国内厂家超过百家。然而,超滤膜组件的定型与生产没有可依循的全球统一标准,用户选择超滤膜产品时往往面临选项过多的困难^[1]。

目前,在工业应用领域,选择膜组件多先从膜材料的性质入手,重点考察膜材料通量、膜孔大小的适用性;在此基础上,进行实验室小试,将待处理水样通过超滤小试系统进行测试,观察研究其膜污染现象及过程、检测产水水质等技术指标;最后,选择效果较优的几种膜进行长期的中试规模现场测试,从而在经济、技术对比的基础上选择最优的膜组件和系统^[1]。

学术界普遍以膜材料指标反映和评价膜性能的优劣,具体在水处理应用中,相关重要影响参数包括反映亲、疏水性的接触角,以及表明电性的表面电位等^[2]。然而,有研究表明微观参数与宏观应用效果的关联性并不显著^[3]。因此,初选膜材料必须通过小试级的过滤试验,以确定不同膜受实际水质影响的膜污染情况^[4]。此外,还需要考量诸如膜寿命、物化清洗效果、药剂使用种类与用量等因素。因此,为了确保膜组件的实际应用效果,必须开展包含上述诸多因素的中试,才能最终确定膜组件的选取^[5]。

中试对比试验是产品在大规模使用前的较小规模试验。因此,在大规模应用中关注的技术、经济指标乃至某些社会性指标,都可通过中试进行量化验证。中试对比试验对膜组件的优选具有决定性作用。在膜法水处理中,往往需要通过长期的对比试验才能决定膜组件的选取。试验的主要内容包括:验证预处理的效果,记录水质变化的规律,确定包括运行参数、清洗、运行费用等方面的数据与内容,为最终决策奠定基础。然而,由于一般用户对超滤技术的认知程度有限,与膜生产商之间常处于信息不对称状态,在没有通过科学的中试作保障的情况下,

难于做出最优综合决策。

通过系统介绍工业界膜过滤应用时所关注的主要经济、技术参数指标体系,以期帮助用户对膜系统的要求具有较为全面的把握,指导建立合理的中试对比试验的框架,实现膜组件的科学选择,避免因选择片面与遗漏造成不必要的损失。

1 膜组件选取的经济、技术指标体系

中试的根本目的在于对不同的备选膜组件进行评价,为用户构建成本合理、出水水质达标、系统安全、方便可靠的膜法水处理系统提供决策依据。中试过程中,需要依据膜组件的评价指标体系进行综合对比。

经济成本是选择确定膜法水处理系统的制约性因素。合理的评价结果,应能指导客户选择符合工程要求的、适宜的膜组件,而非一味追求过高的单位处理速率与截留效果。此外,系统构建与运行维护成本也是工业应用中必须考虑的重要因素。而确保出水水量与水质安全是所有水处理工艺的核心要求,膜材料及膜组件的质量与完整性,是决定膜法水处理工艺出水水质的决定性因素。在此前提下,处理工艺的环境友好性,也日渐为工程界所重视。对于膜组件产品,使用过程中会不可避免地出现各种技术问题,如需要组件更换、清理和系统维护等,都需要厂家提供支持,这些支持在一定程度上决定了系统正常运行的状况和客户的使用体验。综合工业界的应用经验来看,膜组件的选择需要从其经济性、安全环保、质量及售后保障来考虑。此三类内容因此被确定为评价体系的一级指标,用以体现产品的综合特征见图1~3。

每个一级指标由更细化的参数体系来支撑,称为二、三、四级指标。其中,二级指标是支撑一级指标的具体内容。三级指标则是反映二级指标水平高低的性能指标。而针对三级指标的具体技术参数与测试方法就构成了此体系中的四级指标,是三级指标在技术上的细化,是评价、选择膜组件产品的直观参数,亦可作为产品性能改进的具体评价参数,是膜技术研发工作的主要关注对象。

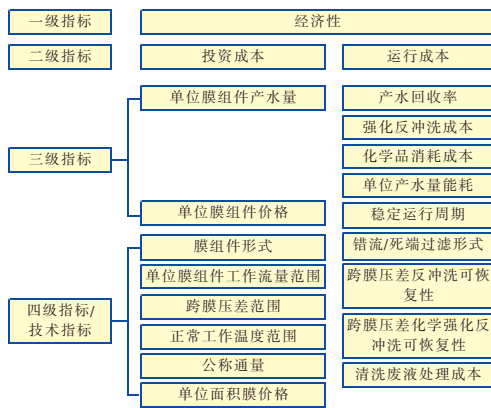


图1 超滤膜水处理中膜组件经济性指标体系概览

Fig.1 Overview about the economy indices of membrane module in UF membrane water treatment

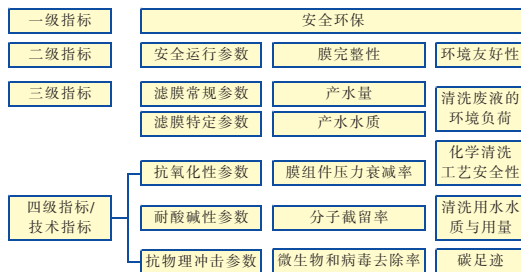


图2 超滤膜水处理中膜组件安全性指标体系概览

Fig.2 Overview about the safety warranty indices of membrane module in UF membrane water treatment

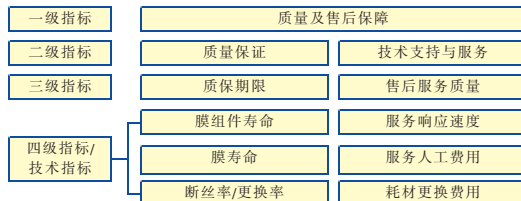


图3 超滤膜水处理中膜组件质量保障指标体系概览

Fig.3 Overview about the quality warranty indices of membrane module in UF membrane water treatment

在超滤膜组件的评价体系中,投资成本(CAPEX)与运行成本(OPEX)为一级指标经济性的二级支撑指标。决定投资成本的因素主要为单位膜组件及其附属设备价格和单位膜组件产水能力,其技术指标可细化为膜组件形式(如柱式、帘式、内压、外压等)、单位膜组件工作流量范围、跨膜压差范围、单位面积膜价格、正常工作温度范围等。决定运行成本的主要因素包括产水率、运行能耗、反冲洗能耗、化学品消耗情况和稳定运行周期的长短。当环保要求严格时,膜组件清洗废液的处理也会在一定程度上影响运行成本。决定运行成本的具体可量

化指标包括:过滤形式、跨膜压差的可恢复性、化学废液的处理成本等。由于地区差异较大,在此未将人工成本纳入考察范围。

安全的膜组件应确保其产品水水质与水量达到工艺要求,因此,需从膜材料的环境耐受性(耐用性)以及膜组件的完整性两方面对其进行评价。例如,为了描述膜材料耐受性,需要对抗氧化性(如活性氯浓度×浸泡时间)、耐酸碱性能、抗物理冲击(如气洗强度)等技术指标做出量化说明。完整性测试是在运行中保障安全性的主要手段,其关键在于监测滤膜对细小颗粒物、微生物、大分子物质的截留率是否与产品说明一致,具体方法可参见文献^[5-6]。环境友好性主要体现在清洗过程的环境负荷方面,具体需考虑的因素包括清洗药剂的选择、清洗工艺的安全性、清洗用水的水质与水量以及相应的碳足迹等。

在当今市场环境下,膜组件的质量及其保障对用户体验尤为重要。首先,膜组件及膜材料寿命水平直接体现其质量优劣;其次,有力的技术支持,包括故障报修后对用户的响应速度、耗材价格、人工服务价格等,会对用户的使用体验产生重要影响,日渐为客户与厂家自身所重视。

2 经济性指标的构成分析

在膜系统建设与运行中,经济性指标往往是首先考虑的指标。为了使用户更好地理解所购膜组件的价值及运行成本,结合已有调查数据,对膜组件选择进行经济性分析。与此相关的一些关键边界条件界定如下:所用膜组件(系统)是适用于以自然水体为水源的市政给水处理、工业给水处理或污水生物处理后深度处理回用的产品。膜材料主要为聚砜(改性 PES)、聚偏氟乙烯(改性 PVDF)等,其分子量切割为 $(5 \sim 25) \times 10^4$ u,运行压力为0.01~0.3 MPa。相应的主要预处理工艺包括:化学预氧化处理(多见于工业系统);投加絮凝剂(聚合氯化铝、氯化铝、氯化铁等)并进行絮凝、沉淀或砂滤的传统预处理;投加絮凝剂并进行微絮凝(在线絮凝,不需要搅拌池、沉淀池和预过滤)处理^[7-9]。

2.1 投资成本

2.1.1 膜组件的成本构成

图4为基于欧洲市场2013年数据的各种应用于水处理膜组件的价格构成情况。其中,膜材料费用在总价格构成中占比约为15%,而膜组件的其他

部分制作所用材料费用如用胶、膜壳等,反而高于或至少持平于膜材料的耗费。由于欧洲的劳动力价格较高,其成本构成中约25%为劳动力成本。在2013年的市场环境下,膜组件的毛利润保持在30%~40%。随着近年来市场竞争的日渐激烈,利润率会有一定幅度的下降。

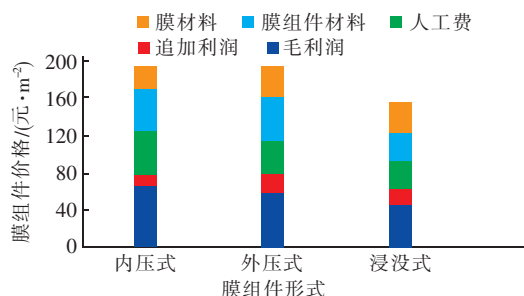


图4 膜组件价格构成 (基于欧洲市场2013年数据)

Fig. 4 Price composition of membrane module (based on the data from Europe market in 2013)

2.1.2 膜系统的成本构成

膜组件最终组成膜系统后,才能实现其过滤功能。同样以2013年欧洲市场为例,对小规模膜系统(处理量 $<2\,500\text{ m}^3/\text{d}$)生产商的调查结果见表1。

表1 欧洲市场膜系统的成本构成 (基于小型超滤膜系统)

Tab. 1 Cost composition of membrane system in European market (based on small UF system) %

项目	德国	英国	法国	意大利	俄罗斯
劳动力价格 (组装+系统设计)	25~30	15~30	15~30	10~25	20~30
膜组件	20~35	25~40	30~40	30~50	25~30
控制系统	10~15	<10	10~15	<10	10~15
泵和阀门	15~20	20~25			
管道系统+水箱	<10	10~15	30~40	30~40	35~40
支撑结构	5~10				

由表1可知,膜组件价格是膜系统价格的主要构成部分,一般占总成本的30%以上;在更大规模的膜系统中,此部分成本所占比重更高,往往占膜系统总投资的50%以上。在西欧发达经济体中,由于劳动力价格的因素,人工费成本约占膜系统成本的25%。对于膜系统中已经实现产品全球化供应的组成部分,如泵、阀门、自动控制系统等,不同国家之间同品质产品的绝对价格差别并不明显。

2.2 运行消耗费用的成本构成 (不包括人工费)

根据膜系统进水的膜污染性质,典型淡水水源可细分为适于利用超滤膜直接过滤的地下水和地表水、需预处理(如预投加氯、进行在线絮凝)后方可

进行膜过滤的地表水和污水厂二级出水。膜系统的规模按日处理量分为大型($>50\,000\text{ m}^3/\text{d}$)、中型($10\,000\sim50\,000\text{ m}^3/\text{d}$)和小型($<10\,000\text{ m}^3/\text{d}$)。利用欧洲当地的统计结果(基于2013年英国、德国水厂的运行数据,来源于咨询公司),对不同规模、不同进水条件下膜系统的水处理运行成本进行了估算,其分布如图5所示。估算过程将价格全部转换为人民币价格,其中电价基准为 $0.6\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,化学品价格为实际现场使用价格,包括絮凝剂、消毒剂、清洗剂等,废弃物处置包括废液及固体废弃物处置。统计结果表明,大型水厂地下水直接过滤、地表水加药过滤、地表水直接过滤、二级出水加药过滤成本分别为 0.09 、 0.15 、 0.13 、 $0.26\text{ 元}/\text{m}^3$;中型水厂分别为 0.10 、 0.18 、 0.14 、 $0.29\text{ 元}/\text{m}^3$;小型水厂分别为 0.10 、 0.24 、 0.16 、 $0.33\text{ 元}/\text{m}^3$ 。

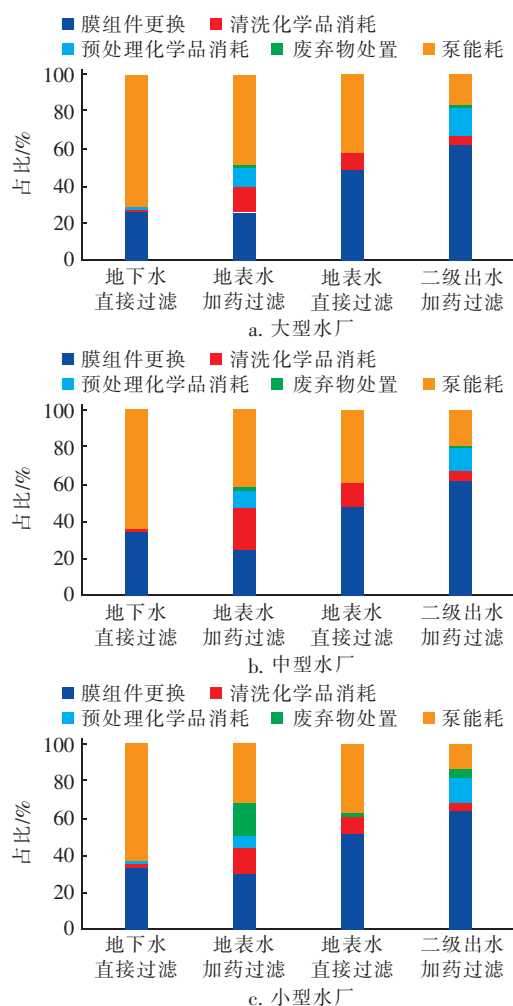


图5 大、中和小规模超滤膜系统基本运行成本分布

Fig. 5 Distribution of OPEX of large, medium and small scale UF membrane system

① 在不同进水条件下,膜组件更换费用占比差异明显。水质恶劣时,膜组件的更换费用可以占到成本的60%。化学品消耗与处置造成的费用亦因进水水质不同而存在明显差异,最高时此项费用甚至可达成本的50%。此外,系统运行能耗在水处理运行成本中一直占重要地位。

② 用于处理地下水的超滤系统运行费用最低,仅为处理污水厂二级出水时的30%左右。由于地下水中所含膜污染物质少,其运行费用主要包括运行能耗与膜组件的更换费用,用于化学清洗与预处理的化学品消耗很少,膜系统规模对水处理运行成本影响不大。

③ 地表水的水质差别较大,膜污染物含量较低的水体,可使用超滤膜直接过滤;对于直接过滤条件下难以控制跨膜压差的水体,则需进行某种程度的物化或生物预处理。在此涉及的主要是常用的化学预处理,如预加氯、絮凝等工艺。由图5可知,在投加药剂的情况下,超滤系统的水处理运行成本高于不投加时的情况。调查表明,地表水过滤中预处理对膜系统具有一定的保护作用,使得用于膜组件更换的绝对费用与相对费用均有明显降低。因此,在地表水处理中,选择适宜的预处理工艺对膜系统运行成本的控制具有积极意义。

④ 处理二级出水的运行费用最高。其中,控制膜污染的预处理、膜清洗和相关废弃物的处理占到总运行费用的20%左右。频繁的膜清洗操作对膜组件的损伤也较大,导致组件更新费用占运行费用的一半以上。

综上所述,在膜系统运行中,膜污染是决定运行费用的关键因素。对膜污染进行较好的控制,可大大降低化学品消耗、膜更换的频次,从而降低因停车检修造成的产量下降和人力投入。

膜组件的质量直接影响产品的保障服务要求,因此,膜工业领域有较多的技术指标对膜组件质量进行规范。以中空纤维膜为例,膜的断丝率及泄漏率是反映膜组件质量的常用指标,这些指标也决定了膜丝的修补率及组件的更换率。一般而言,断丝率及泄漏率应确保不高于1~2次/(a·组件)的水平。考虑到一般工业级应用中单个膜组件的膜丝往往多达数千根,且进水水质差异较大,故其允许上限可达到几次/(a·组件)。当断丝率及泄漏率明显高于此范围时,生产商应就膜组件质量或者其适用

领域进行明确说明。

3 中试对比试验的构架

依照上述膜选取指标体系,可建立膜组件的中试。例如,在水处理系统运行中,往往需要在一定水质范围内有针对性地测试膜性能。因此,其设备使用与处理规模应最大程度地模拟工业级应用时的真实状况。然而,利用中试系统虽可获取大量数据,但其花费高、不可控因素多、投入大(包括人力、物力等),故有必要进行周密的试验规划,从而确保达到预期试验的目的。根据经验,建议的试验步骤及相关举例说明如图6所示。

步骤1:明确试验目的、试验服务对象和试验设计人员,确定试验时间、预算及所需人才资源	举例:某公司为改进自身膜组件产品,开展膜系统对比试验,由研发部门负责试验的设计与执行,并要求检测实验室等部门提供技术与人才支持
步骤2:确定试验对比参数,根据当下或未来业务需求,详细定义拟进行对比的目标参数	举例:为评价膜组件性能,选择单位产水量能耗、跨膜压差增长率、单位产水运行费用、单位产水量投资进行全生命周期评价
步骤3:设定对比试验边界条件,对比试验结果可通过简化计算初步预测	举例:以进水水质、出水水质、膜系统构建形式(压力式或浸没式膜系统)作为边界条件,可通过简化计算,预估不同膜系统能耗范围,或预测膜污染进展
步骤4:确定各参数中绩效指标与各对比指标的优先级顺序	举例:以单位水处理能耗为绩效指标,要求其值小于0.15 kW·h,各指标优先级顺序可以设定为运行参数稳定性>运行费用>膜污染控制性能指标
步骤5:执行试验,确保各系统在相同的边界条件下开展试验	举例:以进水水质、膜系统构建形式、安装、运行条件为试验边界条件,在保证其值相同或可比条件下,对比不同膜材料的抗污染性能
步骤6:记录试验结果,得到量化评定	举例:在相同预处理条件下,比较不同膜材料的抗污染性能,对结果进行总结,得到最终评价结果

图6 超滤膜水处理中试对比试验的基本步骤与举例说明

Fig. 6 Basic steps of pilot test of UF membrane for water treatment and illustration with examples

根据以往的中试对比试验经验与教训,为了得到可靠、详实的试验结果,图6中所列步骤均不可省略。在中试过程中,须尽可能详尽地对试验系统进行描述;在进行对比试验时,应尽量保持除需要对比参数以外其他参数的一致性,并对需要比较的内容(参数)进行正确量化。由于中试现场情况复杂,试验过程中往往存在不确定性因素,因此,需采取必要的措施,确定待对比参数的优先级,在不能兼顾的情况下,须确保对试验结果影响程度最大的参数/指标进行优先测试。为了提高对比试验的可靠性与可信度,可参考其他行业的规范,要求膜组件供应商按照质量监督部门建议的标准程序进行中试对比试验,

并提供通过质监部门认证的试验结果。

除了直接针对膜组件的中试外,典型的超滤中试对比试验还可包括:膜系统的对比,如,相同进水条件下,对不同超滤膜组件系统膜污染速度对比;预处理工艺的对比,即利用同一超滤系统,比较相同进水水质在不同预处理工艺(如100 μm 膜过滤和生物滤池过滤)处理下,膜污染速度的差异;水处理的控制系统对比,例如对具有相同进水条件和构造的多个膜系统,比较其人工运行与智能自动运行的膜污染控制效果等。工业领域中试对比试验可根据具体问题,依照图6所示步骤,设计适合自身情况的程序和注意事项并进行中试规划。

4 结语

① 膜组件选取指标可明确建立在以经济性、安全环保、质量及售后保障为一级指标的体系上,以分类量化的形式形成对比基础。每一类指标可由多项二、三级指标支撑量化,技术指标作为四级指标,可作为区分产品性能的具体指标参数。

② 通过对欧洲市场调查结果进行分析可知,膜质量与膜污染控制是组件选取中经济性指标的核心参数。

③ 选择膜组件须利用中试对比试验确定,试验步骤可依照文中建议的基本步骤进行;试验中须尽量保持除待对比参数以外其他参数的一致性,在复杂环境中,须确保对试验目的影响程度最大的参数/指标进行优先测试。

致谢:相关工作的积累得益于和英国 Membrane Consultancy Associates 公司的 Graeme Pearce 博士和德国 Markus Spengler Technology Consulting 公司的 Markus Spengler 的合作与讨论,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] YANGALI-QUINTANILLA V A, HOLM A H, BIRKNER M, *et al.* A fast and reliable approach to benchmark low pressure hollow fibre filtration membranes for water purification[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 499:515-525.
- [2] FILLOUX E, TEYCHENE B, TAZI-PAIN A, *et al.* Ultrafiltration of biologically treated domestic wastewater:

how membrane properties influence performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 134:178-186.

- [3] NGUYEN A H, TOBIASON J E, HOWE K J. Fouling indices for low pressure hollow fiber membrane performance assessment[J]. *Water Research*, 2011, 45(8):2627-2637.
- [4] HUANG H, LEE N, YOUNG T, *et al.* Natural organic matter fouling of low-pressure, hollow-fiber membranes: effects of NOM source and hydrodynamic conditions[J]. *Water Research*, 2007, 41(17):3823-3832.
- [5] *Membrane Filtration Guidance Manual*: EPA 815-R-06-009[S]. USA:US EPA, 2005.
- [6] RICHARD W B. *Membrane Technology and Applications* [M]. 3rd ed. USA:John Wiley & Sons Inc, 2012.
- [7] HUANG H, SCHWAB K, JACANGELO J G. Pretreatment for low pressure membranes in water treatment: a review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 43(9):3011-3019.
- [8] ZHENG X, PLUME S, ERNST M, *et al.* In-line coagulation prior to UF of treated domestic wastewater - foulants removal, fouling control and phosphorus removal[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 403/404:129-139.
- [9] ZHENG X, KHAN M T, CROUE J P. Contribution of effluent organic matter (EfOM) to ultrafiltration (UF) membrane fouling: isolation, characterization, and fouling effect of EfOM fractions[J]. *Water Research*, 2014, 65:414-424.

作者简介:郑兴(1973-),男,四川成都人,博士,教授,陕西省“节水与水回用技术创新团队”负责人,专注于膜技术在水和废水深度处理中的应用以及水处理过程中微生物代谢产物的分析与控制,并在水质基因毒理、工业冷却循环水和工业废水处理与智慧水务领域开展研究和应用工作,发表SCI一区论文20多篇,获得国际国内发明专利授权10余项,主持国际国内科研项目20余项。

E-mail: xingzheng@xaut.edu.cn

收稿日期: 2019-05-03

修回日期: 2019-08-21

(编辑:丁彩娟)