

# 超微滤膜去除工程纳米粒子的可行性 ——以聚苯乙烯纳米颗粒为例

刘丽, 尚闯, 佃柳, 罗鸣, 郑祥

中国人民大学环境学院, 北京 100872

**摘要** 工程纳米粒子的广泛应用导致其直接或间接进入水环境, 对生物和人类造成健康风险。为研究超微滤膜去除水体中工程纳米粒子的可行性, 选用3种不同孔径的中空纤维膜对聚苯乙烯纳米颗粒进行截留, 并系统考查膜对聚苯乙烯纳米颗粒的去除效果及影响因素。研究表明: 超微滤膜能够有效去除水体中工程纳米粒子。在进水压力 25~125 kPa、进水切线流速 0.12~0.59 m·s<sup>-1</sup>, 以及纳米颗粒质量浓度在 25~100 mg·L<sup>-1</sup> 之间, 超滤膜对聚苯乙烯纳米颗粒的截留率均在 90% 以上; 压力与纳米颗粒质量浓度的提高导致膜对聚苯乙烯的截留率也相应提高, 而进水流速对截留率的影响不明显。纳米颗粒粒径与膜孔径的比在小于 1 时, 对截留率影响较大, 膜分离 10 min 时的实验截留率值与 Nakao 模型预测值较接近。

**关键词** 超滤膜; 微滤膜; 聚苯乙烯纳米颗粒; 截留率

基于特定目的设计和生产的工程纳米粒子 (engineered nanoparticles, eNPs) 现已广泛应用于电子、医药、化妆品、催化和材料等方面<sup>[1-2]</sup>。而 eNPs 的广泛应用将导致纳米粒子直接或间接排放到环境中, 在大气、土壤及水体中迁移, 并可通过食物链富集, 给微生物、植物、动物及人类造成一定的安全风险<sup>[3-5]</sup>。这类粒子若进入水体将对饮用水的安全造成很大的威胁<sup>[6-7]</sup>。所以有必要研究水体中纳米颗粒的去除, 以保障饮用水的安全及降低人体暴露的风险。目前, 研究处理纳米粒子的技术有混凝法、气浮法、生物法及膜技术等。混凝法<sup>[8]</sup>是使纳米颗粒沉降达到去除的目的, 但是混凝法对纳米颗粒去除率较低。气浮法<sup>[9-10]</sup>需要一定的添加剂才能达到理想的效果。生物法中有使用生物膜法相关工艺及活性污泥法等, 通过对纳米粒子进行吸附<sup>[11-12]</sup>去除, 虽然生物膜或者活性污泥一定程度上能吸附去除纳米颗粒, 但是 eNPs 会降低其中微生物多样性<sup>[13]</sup>, 并对硝化过程有一定的抑制作用<sup>[14]</sup>。

超微滤膜现已广泛应用于食品、医药及水处理等方面, 在一定条件下能较好地去除 eNPs<sup>[15]</sup>, 已有研究使用超微滤膜去除水体中的富勒烯纳米颗粒<sup>[16]</sup>。研究表明, 当膜孔径小于纳米颗粒或者膜对纳米颗粒有吸附作用时能较好的去除水体中的富勒烯纳米颗粒。聚苯乙烯微球 (polystyrene nanoparti-

cles, PNP<sub>s</sub>) 是有机物聚合形成的纳米颗粒, 具有高度的单分散性, 被广泛应用于标准计量、免疫医学、分析化学等领域<sup>[17-18]</sup>。已有研究表明, PNP<sub>s</sub> 对生物和人体存在一定的毒害作用<sup>[19-20]</sup>, 因此有必要研究水体中 PNP<sub>s</sub> 的去除。本研究选用中空纤维超微滤膜去除 PNP<sub>s</sub>, 考查在不同操作压力、进水流速、PNP<sub>s</sub> 质量浓度及 PNP<sub>s</sub> 粒径等条件下, 超微滤膜对 PNP<sub>s</sub> 去除的影响, 研究超微滤膜对 PNP<sub>s</sub> 去除的特点。

## 1 截留率及预测模型

超微滤作为压力驱动的膜过程, 通常认为是基于筛分原理即膜孔尺寸对不同大小的物质进行分离与浓缩。因此, 膜孔径和被分离颗粒物质的粒径是影响膜截留的主要因素之一。通常可以通过孔模型描述膜对颗粒物质的截留效果, 在膜孔为圆孔形, 被分离颗粒为球形的前提下, 由膜孔径与颗粒直径可预测膜对颗粒物的截留率。Ferry<sup>[21]</sup>最早推导出膜对颗粒物质的截留率和颗粒粒径与膜孔径之比  $\lambda$  有关, 但 Ferry 方程没有考虑在截留过程中的表面效应 (吸附)、流动引发的变形、阻滞扩散及其他相互作用和流体力学效应。Verniory 等<sup>[22]</sup>及 Nakao 等<sup>[23]</sup>对 Ferry 模型进行了修订。R 为预测的截留率, 通过模型可以预测出膜对颗粒物截留的情况, 从而可分

收稿日期: 2016-09-01; 修回日期: 2016-10-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (10XNJ023)

作者简介: 刘丽, 硕士研究生, 研究方向为膜分离技术, 电子信箱: 18811791618@163.com; 郑祥 (通信作者), 教授, 研究方向为膜分离技术与公共卫生安全, 电子信箱: zhengxiang7825@163.com

引用格式: 刘丽, 尚闯, 佃柳, 等. 超微滤膜去除工程纳米粒子的可行性——以聚苯乙烯纳米颗粒为例[J]. 科技导报, 2016, 34(22): 37-42; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.22.004

析膜孔在截留颗粒中所起的作用。Ferry 模型为

$$R = 1 - 2(1 - \lambda)^2 + (1 - \lambda)^4 \quad \lambda \leq 1 \quad (1)$$

$$R = 1 \quad \lambda > 1 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{d_{\text{particle}}}{d_{\text{pore}}} \quad (2)$$

式中,  $d_{\text{particle}}$  为被截留颗粒的粒径,  $d_{\text{pore}}$  为膜孔直径。

Verniory 模型为

$$R = 1 - g(\lambda)S_F \quad (3)$$

$$S_F = (1 - \lambda)^2(2 - (1 - \lambda)^2) \quad (4)$$

式中,  $S_F$  反映溶液在膜孔中流动时的阻滞效应。

$$g(\lambda) = \frac{1 - \frac{2}{3}\lambda^2 - 0.2\lambda^5}{1 - 0.76\lambda^5} \quad (5)$$

式中,  $g(\lambda)$  为溶液对流传输时的修正因子。

Nakao 模型为

$$R = 1 - S_F \left( 1 + \frac{16}{9}\lambda^2 \right) \quad (6)$$

## 2 实验过程

### 2.1 材料及仪器

实验材料: 实验使用的中空纤维膜如表 1 所示。

聚苯乙烯纳米颗粒, 20、30、60、100、200 nm, 固含量均为 10%, 购自上海辉质生物科技有限公司。

表 1 实验所用中空纤维膜的基本参数

Table 1 Basic information of hollow fibers used in the study

编号	孔径/nm	材质	膜丝内径(外径)/mm
UF1	10	PVC	1.0(1.6)
UF2	60	PVDF	0.7(1.3)
MF3	400	PVDF	0.5(0.8)

实验仪器: 紫外可见分光光度计; 纳米粒度分析仪。

### 2.2 过滤实验

在实验室采用小型膜装置进行实验, 其装置构成如图 1 所示。膜丝封装在简易膜组件内, 膜面积约 0.003 m<sup>2</sup>, 通过隔膜泵提供压力和水流速度。每次实验使用新的膜组件。温度控制在 (25±1)°C。

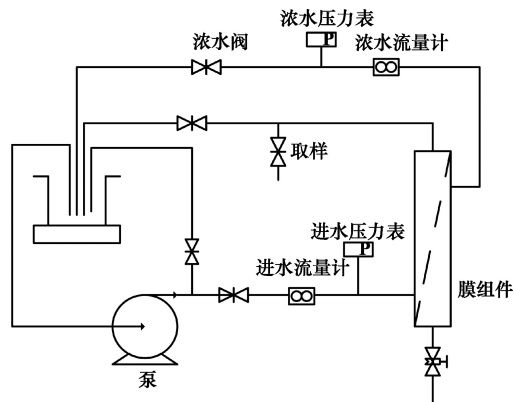


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up

先用超纯水将膜预压 30 min, 然后配制一定质量浓度的 PNP 溶液, 过滤一定时间后收集渗滤液, 用紫外分光光度计测量吸光度, 由标准曲线计算出 PNP 的质量浓度, 通过式 (7) 计算实验截留率。

$$R = \left( 1 - \frac{C_{\text{permeate}}}{C_{\text{feed}}} \right) \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $C_{\text{permeate}}$ 、 $C_{\text{feed}}$  分别为渗透液和原料液中 PNP 的质量浓度,  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 2.3 PNP 表征

#### 2.3.1 PNP 粒径分布

图 2 为纳米粒度分析仪测得的 5 种 PNP 的粒径分布。

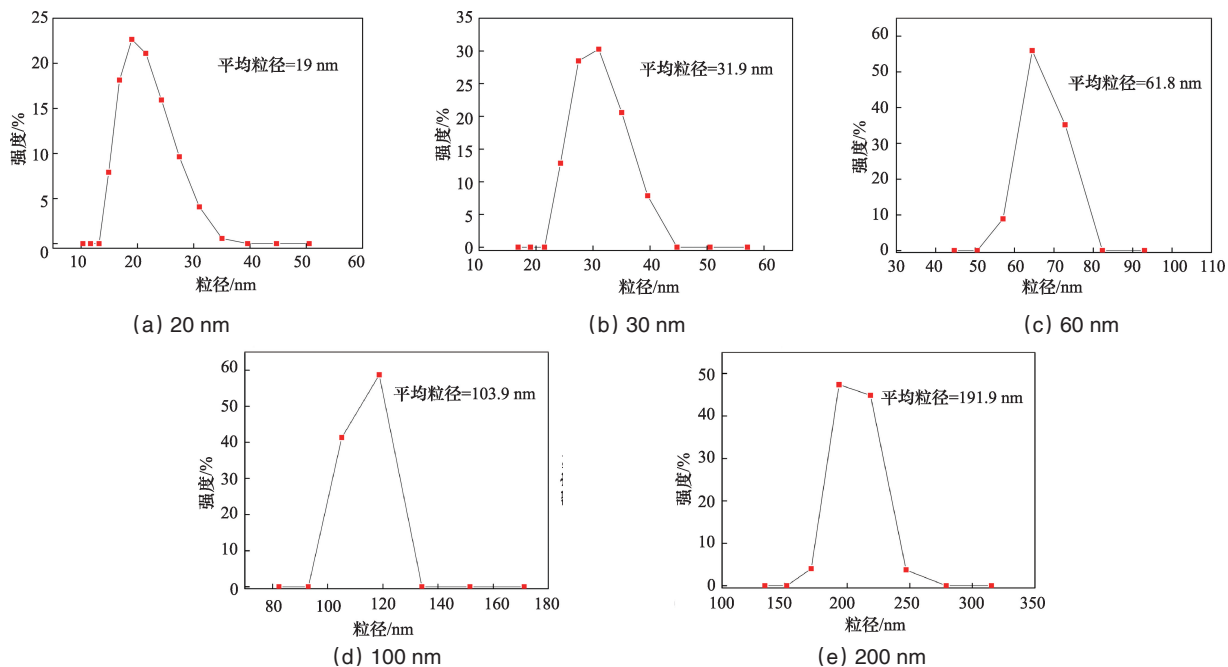


图 2 5 种 PNP 的粒径分布

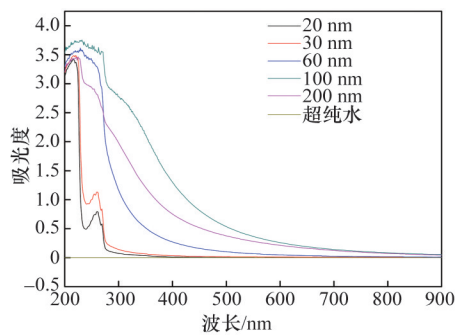
Fig. 2 Particle size distribution of five PNPs

购买的PNPs单分散性较好,平均粒径与厂家提供的较为一致。由于膜的孔径也存在一定的分布,UF1平均孔径为10 nm,其膜孔径分布可能会与20 nm和30 nm PNP的粒径分布存在部分重叠,即膜部分孔径与PNPs的部分粒径相同。UF2平均孔径为60 nm,与60 nm PNP的粒径分布会重叠较多,可能与10、20、100 nm有部分重叠。MF3的膜孔径分布与这几种纳米颗粒基本没有重叠或有少部分的重叠。已有研究表明如果纳米颗粒粒径分布和膜的孔径分布重叠较少或基本没有重叠,如果膜孔径比PNPs粒径小,则膜会将这部分粒径的PNPs全部截留,如果膜孔径远大于PNPs粒径,并

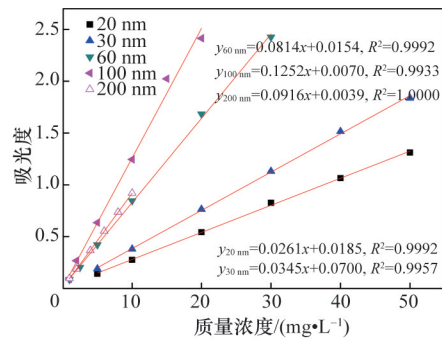
且两者之间不存在吸附作用,则纳米颗粒将会全部透过膜孔,如果存在吸附作用,纳米颗粒会被吸附在膜材料上而被去除<sup>[16]</sup>。

### 2.3.2 紫外全波段扫描

对5种粒径的NPS进行紫外可见全波段扫描,扫描波长范围200~900 nm,扫描结果如图3(a)所示,5种NPS在220 nm处均有较明显的吸收,并对5种NPS在220 nm处做标准曲线,如图3(b),线性结果均较好,检测限可到达 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此,可用紫外可见分光光度法检测聚苯乙烯的质量浓度。



(a) 紫外可见全波段扫描



(b) 标准曲线

图3 PNP的紫外可见全波段扫描及标准曲线

Fig. 3 UV-vis scanning and standard curves of PNP

## 3 结果与分析

### 3.1 运行时间对截留率的影响

膜在饮用水或再生水深度处理时,被分离溶液是一个由不同分子量蛋白质和可溶性大分子组成的复杂混合物体系。在膜系统运行过程中,由于膜孔的阻塞以及“滤饼层”或“凝胶层”形成,膜的分离特性会因上述原因造成膜污染而有所改变。不同物质吸附到膜表面的难易程度不同,不同的种类的被截留物分子大小以及对膜的吸附性能不同,因此达到稳定运行所需要的时间不同。通常操作压力越低、被分离溶液中溶质的质量浓度越低,需要越长的时间达到稳定的截留效果。在研究中,采用孔径为60 nm的UF2膜在25 kPa的压力下,对 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的PNPs(30 nm)进行为期60 min的截留实验,结果如图4所示。从图4可以看出,即使在较低的操作压力与低溶质质量浓度下运行,膜分离系统运行10 min后截留率基本维持稳定。

### 3.2 操作压力对截留性能的影响

Pavanasam<sup>[24]</sup>在研究超滤膜对不同粒径纳米氧化硅截留时,发现操作压力对截留率影响较大,在压力为20 kPa时比40 kPa和60 kPa截留率高。但也有研究表明压力升高会加快膜孔的阻塞以及“滤饼层”或“凝胶层”形成,从而加快膜污染的形成,这可能会提高膜对颗粒物的截留率。图5为不同操作压力对膜UF2截留效果的影响,25 kPa时膜对PNPs的截

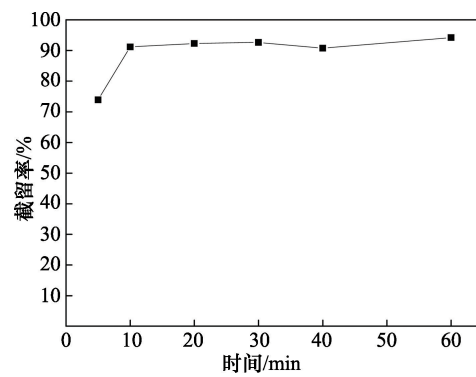


图4 运行时间对膜截留PNPs的影响(操作压力25 kPa,切线流速 $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,30 nm PNP,质量浓度 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,UF2)

Fig. 4 Retention effects of running time(inflow pressure 25 kPa, flow rate  $0.59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , PNP size 30 nm,  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , UF2)

留率为91.5%,当压力上升到125 kPa,截留率也相应升高到98.7%。可能的原因是UF2的孔径与30 nm PNP的部分颗粒粒径有重叠,导致部分纳米颗粒进入膜孔内而造成孔径缩小或是孔堵而使截留率升高,而水流只能冲刷掉表面的颗粒物,而无法去除膜内部集聚的纳米粒子,并且压力越大孔堵越明显。

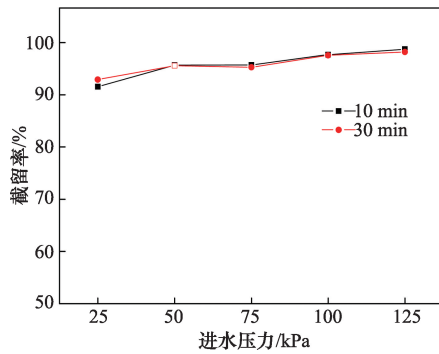


图5 进水压力的影响

(切线流速 0.59 m/s, 30 nm PNPs, 质量浓度 25 mg·L<sup>-1</sup>, UF2)

Fig. 5 Retention effects of inflow pressure

(flow rate 0.59 m·s<sup>-1</sup>, PNPs size 30 nm, 25 mg·L<sup>-1</sup>, UF2)

### 3.3 切线流速对截留性能的影响

通常较高的料液流速可以减小浓差极化或沉积层的形成。Herath<sup>[25]</sup>采用0.1 μm的陶瓷膜对Qβ噬菌体(24~25 nm)进行截留试验,当料液流速从0.6 m·s<sup>-1</sup>提高到2.4 m·s<sup>-1</sup>,发现膜对Qβ去除率从25%上升到75%。Hwang<sup>[26]</sup>使用平板超滤膜截留牛血清蛋白和葡聚糖,在错流速率为0.1~0.5 m·s<sup>-1</sup>范围内,膜对葡聚糖截留率会随切线速率升高而升高,对于截留牛血清蛋白时,截留率随切线流速变化不明显。因此对于截留不同物质,可能由于其与膜之间的相互作用不同,切线流速对于截留率影响会不同。图6是UF2在不同进水切线流速下对PNPs(30 nm)的截留,在切线流速为0.12~0.59 m·s<sup>-1</sup>的范围内,对截留率的影响并不明显。本文的后续实验均选择0.59 m·s<sup>-1</sup>的切线速率以减少膜的污染。

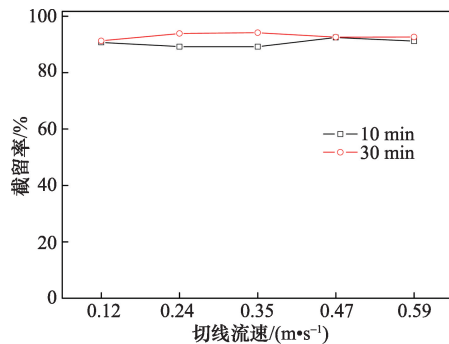


图6 切线流速对超滤膜截留PNPs的影响

(进水压力 25 kPa, PNPS 25 mg·L<sup>-1</sup>, 30 nm, UF2)

Fig. 6 Retention effects of flow rate (inflow pressure 25

kPa, PNPs size 30 nm, 25 mg·L<sup>-1</sup>, UF2)

### 3.4 PNP<sub>s</sub>质量浓度对截留性能的影响

原料液浓度会影响膜表面的浓差极化,罗鸣等<sup>[27]</sup>研究超滤膜对蛋白质的截留时,牛血清蛋白浓度对截留率影响较大,可能是蛋白质浓度升高时更易被膜吸附,造成孔堵,而使截留率升高,而胃蛋白酶浓度对截留率影响不明显,分析可能与被截留物质和膜之间的相互作用有关。图7是UF2对不同质量浓度30 nm的PNPs的截留,对于PNPs质量浓度从25~100 mg·L<sup>-1</sup>,UF2对其截留率均较高,在90%以上,10 min时的

截留率从91.2%升高到98.5%,截留率随质量浓度升高而略有升高,由于30 nm的PNPs粒径小于UF的膜孔径,可能较高质量浓度的纳米颗粒更容易在膜内堆积,缩小膜孔径而使截留率升高。

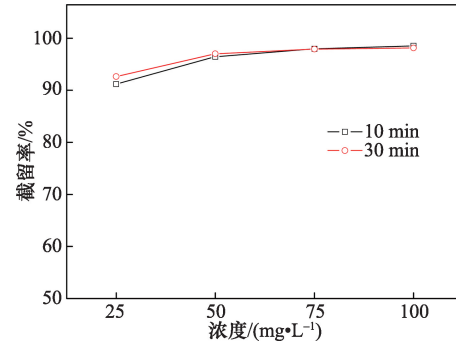


图7 PNPs质量浓度的影响

(进水压力 25 kPa, 进水流速 0.59 m·s<sup>-1</sup>, PNPS 30 nm, UF2)

Fig. 7 Retention effect of PNPs concentration (inflow

pressure 25 kPa, flow rate 0.59 m·s<sup>-1</sup>, PNPs size 30 nm, UF2)

### 3.5 纳米颗粒粒径与膜孔径的比对截留PNPs的影响

超滤膜截留ePNPs的机理<sup>[28-30]</sup>不仅与膜孔的筛分作用有关,还跟膜材料与颗粒物表面之间的相互作用有关。当纳米颗粒粒径与膜孔径的比λ大于1时,纳米颗粒大部分被膜阻截在膜外而被去除;而λ≈1时,纳米颗粒会聚集在膜的内部,缩小膜孔径,造成孔堵,而使去除率升高;但当λ远小于1,纳米颗粒的粒径分布与膜的孔径分布也基本没有重叠时,如果膜与纳米颗粒之间存在吸附作用,则纳米颗粒会被吸附在膜表面或膜孔内而被去除,但若是没有相互作用,则膜将不能有效截留纳米颗粒。根据Ferry(式(1))、Verniory(式(3))和Nakao(式(6))3个模型,对于不同λ值,膜对颗粒物的预测截留率与实际对PNPs的截留率如图8所示。

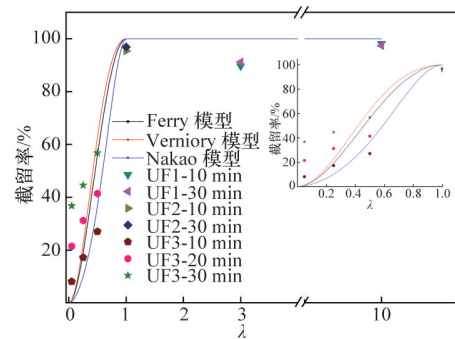


图8 纳米颗粒粒径与膜孔径的比对截留PNPs的影响(进水压力 100 kPa,切线流速0.59 m·s<sup>-1</sup>,UF1使用PNPs 30,100 nm进行截留;UF2使用PNPs 60 nm进行截留;MF3使用PNPs 20 nm,100 nm,200 nm进行截留实验)

Fig. 8 Retention effects of particle to pore diameter ratio (inflow pressure 100 kPa, flow rate 0.59 m·s<sup>-1</sup>, UF1 with PNPs size 30, 100 nm, 25 mg·L<sup>-1</sup>; UF2 with PNPs size 60 nm, 25 mg·L<sup>-1</sup>; MF3 with PNPs size 20, 100, 200 nm, 25 mg·L<sup>-1</sup>)

当 $\lambda > 1$ 时,3个模型得到的预测截留率均为100%,而实际的截留率虽比较接近,但仍小于100%,分析可能是UF1和UF2膜中存在较大的孔,使得仍有少部分的颗粒物不能被完全截留。当 $\lambda = 1$ 时,PNPs粒径与膜孔重叠较多,PNPs主要是堆积在膜孔内,缩小膜孔径而被去除。当 $\lambda < 1$ ,MF3对20、100和200 nm的PNPs有一定的截留,分析可能是MF3膜孔径分布与20、100和200 nm PNPs的粒径分布有少部分重叠,或是MF3膜与PNPs颗粒之间存在一定的吸附作用有关。3种模型对颗粒物的截留率预测值与实际值的标准偏差如表2所示

表2 实验截留率与模型预测值的标准偏差

Table 2 Standard deviation between the experimental and predicated values

$\lambda$	Freyy 模型			Verniory 模型			Nakao 模型		
	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min	10 min	20 min	30 min
0.05	5.05	14.81	25.34	4.94	14.38	36.79	5.36	14.81	25.65
0.25	1.39	14.90	17.97	3.74	6.19	44.56	4.96	14.90	24.32
0.50	20.65	3.25	0.36	25.38	15.23	56.76	6.90	3.25	14.11
标准偏差之和	27.09	32.95	43.67	34.05	35.80	138.11	17.23	32.95	64.09

#### 4 结论

采用超微滤膜过滤PNPs,考查了进水压力、进水流速、PNPs质量浓度及PNPs粒径与膜孔径的比对膜截留PNPs的影响。研究表明,应用超微滤膜去除水体中工程纳米粒子的方案是可行的。

在进水压力25~125 kPa、进水流速0.12~0.59  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以及质量浓度在25~100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,膜分离系统运行10 min后超滤膜对聚苯乙烯纳米颗粒的截留率即可基本维持稳定。

随着操作压力与颗粒物质量浓度的增加,膜对聚苯乙烯的截留率也相应提高,但进水流速在本试验范围内对截留率影响不明显。

纳米颗粒粒径与膜孔径的比小于1时,实测膜截留率与Nakao模型预测值较接近。

#### 参考文献(References)

- [1] Vodyanov V J, Daniels Y, Pustovyy O, et al. Engineered metal nanoparticles in the sub-nanomolar levels kill cancer cells[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2016, 11: 1567-1576.
- [2] Benn T M, Westerhoff P, Herckes P. Detection of fullerenes (C60 and C70) in commercial cosmetics[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(5): 1334-1342.
- [3] Mohamud R, Xiang S D, Selomulya C, et al. The effects of engineered nanoparticles on pulmonary immune homeostasis[J]. *Drug Metabolism Reviews*, 2014, 46(2): 176-190.
- [4] Pacurari M, Lowe K, Tchounwou P, et al. A Review on the Respiratory System Toxicity of Carbon Nanoparticles[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(3): 325.
- [5] 薄洋,金承钰. 纳米颗粒对细胞亚结构的影响[J]. *实验室研究与探索*, 2013(10): 308-311.  
Bo Yang, Jin Chengyu. Influence of nanoparticles on subcellular struc-

ture. *Research and Exploration in Laboratory*, 2013(10): 308-311.

示,可以反映出实际值与预测值之间的偏离程度,第10 min时,实际截留率与Nakao模型的预测值之间的标准偏差之和相对最小,说明在截留刚开始,主要是膜孔筛分起主要作用,实际的截留与Nakao模型的预测值更为接近,随着过滤的进行,PNPs逐渐在膜孔内部堆积,缩小膜孔径而使截留率升高。但是在 $\lambda \leq 0.5$ 时,前30 min的实际截留率均小于90%,而基于模型预测截留率为90%时对应的 $\lambda$ ,Ferry模型为0.775, Verniory模型为0.731, Nakao模型为0.855,即对于模型预测的截留率, $\lambda$ 大于这些值时才能保证对颗粒物的有效截留。

- [6] Troester M, Brauch H, Hofmann T. Vulnerability of drinking water supplies to engineered nanoparticles[J]. *Water Research*, 2016, 96: 255-279.
- [7] Tiede K, Hanssen S F, Westerhoff P, et al. How important is drinking water exposure for the risks of engineered nanoparticles to consumers [J]. *Nanotoxicology*, 2016, 10(1): 1-9.
- [8] Chang M R, Lee D J, Lai J Y. Nanoparticles in wastewater from a science-based industrial park—Coagulation using polyaluminum chloride [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(4): 1009-1014.
- [9] Zhang M, Guiraud P. Elimination of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles with the assist of humic acid: Influence of agglomeration in the dissolved air flotation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 260: 122-130.
- [10] Lien C Y, Liu J C. Treatment of Polishing Wastewater from Semiconductor Manufacturer by Dispersed Air Flotation[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(1): 51-57.
- [11] Jing H, Mezgebe B, Aly Hassan A, et al. Experimental and modeling studies of sorption of ceria nanoparticle on microbial biofilms[J]. *Biore-source Technology*, 2014, 161: 109-117.
- [12] Kiser M A, Ryu H, Jang H, et al. Biosorption of nanoparticles to heterotrophic wastewater biomass[J]. *Water Research*, 2010, 44(14): 4105-4114.
- [13] Li D, Li B, Wang Q, et al. Toxicity of  $\text{TiO}_2$  nanoparticle to denitrifying strain CFY1 and the impact on microbial community structures in activated sludge[J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 1334-1341.
- [14] Liang Z, Das A, Hu Z. Bacterial response to a shock load of nanosilver in an activated sludge treatment system[J]. *Water Research*, 2010, 44(18): 5432-5438.
- [15] 刘振中,邓慧萍,陈战利. 纳米颗粒的危害及在水体中的去除研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2015(04): 272-277.  
Liu Zhenzhong, Deng Huiping, Chen Zhanli. Hazard and removal of nanoparticles in aqueous system[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015(04): 272-277.
- [16] Floris R, Nijmeijer K, Cornelissen E R. Removal of aqueous  $\text{nC}_{60}$

- fullerene from water by low pressure membrane filtration[J]. *Water Research*, 2016, 91: 115–125.
- [17] Yin G, Zheng Z, Wang H, et al. Slightly surface-functionalized polystyrene microspheres prepared via Pickering emulsion polymerization using for electrophoretic displays[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 361(2): 456–464.
- [18] Wang T, Keddie J L. Design and fabrication of colloidal polymer nanocomposites[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, 147–148: 319–332.
- [19] Nomura T, Miyazaki J, Miyamoto A, et al. Exposure of the Yeast *Saccharomyces cerevisiae* to functionalized polystyrene latex nanoparticles: Influence of surface charge on toxicity[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47: 3417–3423.
- [20] Paget V, Dekali S, Kortulewski T, et al. Specific uptake and genotoxicity induced by polystyrene nanobeads with distinct surface chemistry on human lung epithelial cells and macrophages[J]. *Plos One*, 2015, 10(4): e123297.
- [21] Ferry J D. Statistical evaluation of sieve constants in ultrafiltration[J]. *Journal of General Physiology*, 1936: 95–104.
- [22] Verniory A, Dubois R, Decoodt P, et al. Measurement of the permeability of biological membranes application to the glomerular wall[J]. *The Journal of General Physiology*, 1973, 62: 489–507.
- [23] Nakao S, Kimura S. Analysis of solutes rejection in ultrafiltration[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 1981, 14(1): 34–37.
- [24] Pavanasam A K, Abbas A, Chen V. Influence of particle size and operating parameters on virus ultrafiltration efficiency[J]. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2011, 11(1): 31.
- [25] Herath G, Yamamoto K, Urase T. The effect of suction velocity on concentration polarization in microfiltration membranes under turbulent flow conditions[J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, 169: 175–183.
- [26] Hwang K, Sz P. Effect of membrane pore size on the performance of cross-flow microfiltration of BSA/dextran mixtures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 378(1–2): 272–279.
- [27] 罗鸣, 尚闽, 郑祥. 蛋白截留法评价超滤膜分离性能研究[J]. *膜科学与技术*, 2014(6): 56–61.
- Luo Ming, Shang Min, Zheng Xiang. Discussion about assessment of ultrafiltration membranes retention performance by separating protein method[J]. *Membrane Science and Technology*, 2014(6): 56–61.
- [28] Ladner D A, Steele M, Weir A, et al. Functionalized nanoparticle interactions with polymeric membranes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 211–212(2): 288–295.
- [29] Jassby D, Chae S, Hendren Z, et al. Membrane filtration of fullerene nanoparticle suspensions: Effects of derivatization, pressure, electrolyte species and concentration[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 346(2): 296–302.
- [30] Chen S, Segets D, Ling T, et al. An experimental study of ultrafiltration for sub-10 nm quantum dots and sub-150 nm nanoparticles through PTFE membrane and nuclepore filters[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 497: 153–161.

## Feasibility of removing engineered nanoparticles by hollow fiber UF/MF membrane: Case of polystyrene nanoparticles

LIU Li, SHANG Min, DIAN Liu, LUO Ming, ZHENG Xiang

School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

**Abstract** Wide applications of engineered nanoparticles (eNPs) have potential environmental and health risks. This paper focuses on the removal of polystyrene nanoparticles by hollow fiber membranes of three different pore sizes. The effects of the running time, the inflow pressure, the flow rate, the concentration and the particle to pore diameter ratio are investigated. The results show that it is feasible to remove the eNPs by the UF/MF membrane. The retention rate is stable and there are no obvious differences after the filtration of the UF membrane for 10 minutes. The retention rate increases when the inflow pressure increases from 25 kPa to 125 kPa, the concentration increases from 25 to 100 mg·L<sup>-1</sup>, but no obvious variation when the flow rate increases from 0.12 to 0.59 m·s<sup>-1</sup>. The retention rate is influenced when the particle to pore diameter ratio is less than 1. The retention rate at 10 min is very close to the value predicted by the Nakao model.

**Keywords** ultrafiltration membrane; microfiltration membrane; polystyrene nanoparticles; retention rate

(编辑 田恬)