

# 旋转切向流聚丙烯管式膜微滤能耗分析

王成端<sup>1</sup>, 侯锋<sup>2</sup>, 陈文梅<sup>3</sup> (1. 西南科技大学环境工程学院, 绵阳 621002, E-mail: wcd@sust.edu.cn; 2. 中国工程物理研究院; 3. 四川大学化工学院, 成都 610065)

摘要: 设计了一种新型旋转切向流聚丙烯管式膜器, 实验研究了聚丙烯 PA 管式膜器的能耗。通过建立的旋转切向流强化微滤实验装置系统, 测定了聚丙烯 PA 管式膜器在旋转切向流和轴向流下的膜通量与能量有效利用率。实验结果表明, 旋转切向流管式膜微滤比一般轴向流膜微滤的有效利用率要高得多, 是一种非常有效的强化膜分离技术。在实验条件下, 直线切向流膜微滤和圆弧切向流膜微滤的稳态能量有效利用率比轴向流稳态能量有效利用率分别高 11.185 倍和 14.591 倍。

关键词: 微滤; 旋转切向流; PA 管式膜; 能耗; 膜通量

中图分类号: TQ051.893 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)03-04-0059

## Analysis on Energy Consuming of Polypropylene Tubular Membrane Microfiltration in Rotating Tangential Flow

Wang Chengduan<sup>1</sup>, Hou Feng<sup>2</sup>, Chen Wenmei<sup>3</sup> (1. Institute of Environmental Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621002, China E-mail: wcd@sust.edu.cn; 2. China Academy of Engineering Physics; 3. Institute of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu, 610065, China)

**Abstract:** A new type of polypropylene tubular membrane module in rotating tangential flow was designed to experimentally study energy consuming of the polypropylene PA tubular membrane microfiltration. Through the experimental system of rotating tangential flow which was set up to enhance the microfiltration, the polypropylene PA tubular membrane fluxes and energy efficiency of rotating tangential flow and axial flow were measured under different fluid pressures. The experimental results demonstrate that rotary tangential flow tubular membrane microfiltration was a high efficiency technology of membrane separation. At test conditions, the stable energy efficiency of linear and circular tangential flow were higher than 11.185 times and 14.591 times of the stable energy applying efficiency of axial flow respectively.

**Key words:** microfiltration; rotating tangential flow; polypropylene tubular membrane; energy consuming; membrane flux

膜滤过程的强化一直都是膜分离领域倍受关注的课题, 因为浓差极化和膜污染会使过滤通量下降到工艺和经济性不能接受的程度, 从而严重制约膜分离技术的发展。多年来, 人们在消除或减轻浓差极化和膜污染方面取得了许多成果, 如: ①横向流过滤方式代替死端过滤方式; ②外加电场力作用; ③在膜面上或流道内设置湍流促进器, 利用流道截面变化促进流体扰动或反混, 膜滤压差或流量脉动等; ④利用同心圆管形膜与膜器管的相对旋转产生 Taylor 涡, 以及利用弯曲流道产生 Dean 涡; ⑤周期性反向冲洗技术等。虽然这些研究成果均从不同角度为强化过滤过程提供了一定的有效手段, 但有些方法也会带来相应的负效应, 如湍流促进器

的设置会增大流体流动阻力, 从而增加分离过程能耗; 另外, 湍流促进器的设置以及高速旋转构件均会使膜器结构复杂化。因此, 本文设计了一种新型旋转切向流聚丙烯管式膜器, 实验研究了聚丙烯 PA 管式膜器的能耗。通过建立的旋转切向流强化微滤实验装置系统, 测定了聚丙烯 PA 管式膜器在旋转切向流和轴向流下的膜通量与能量有效利用率。

### 1 实验测试系统

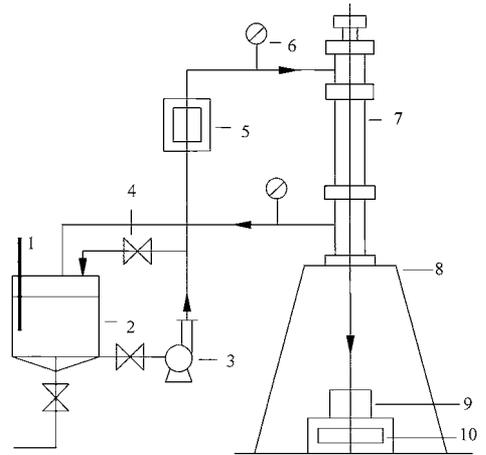
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(29976025); 四川省教委重点科研项目(川教科[1999]20号)

作者简介: 王成端(1962~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为过滤与分离过程理论及设备、水处理与污染控制设备。

收稿日期: 2001-05-10; 修订日期: 2001-08-01

为减轻膜污染,提高膜通量,使膜管和膜器不运动,也不附加其它扰流器,而是使悬浮液切向进入膜器并绕膜管轴线旋转,这种悬浮液称为旋转切向流,简称为旋转流<sup>[1~2]</sup>。悬浮液沿膜管轴线方向进入膜器时,称为轴向流。旋转流是把水力旋流器的作用原理引入到管式微滤膜器中,把悬浮液切向送入中央膜管与外壳的环隙中形成旋转剪切流。此时旋转产生的离心惯性力会克服透过流的曳力,使之径向向外运动而远离膜面。主流旋转的强度应既能使粒子克服透过流的曳力,又保证透过流顺利穿过膜面。这种新型旋转切向流膜器机构不复杂,单位滤液能耗低。初步实验证明,旋转流横向过滤系统的过滤通量显著加大、能量利用率提高<sup>[3]</sup>。如图1所示,实验系统由流体输送系统、测试系统和新型旋转切向流膜器系统组成。在文献中<sup>[4]</sup>,为了比较旋转切向流入口结构不同膜微滤的区别,试验了旋转直线切向流和旋转圆弧切向流2种结构。直线切向流结构加工方便,但流体能量损失大,圆弧切向流结构加工比直线结构困难一些,但流体压力和能量损失小。管式膜器的膜材分有机和无机2大类,本实验研究选用上海医药工业研究院研制生产的PA-8型聚丙烯精密微孔过滤管式膜,管长500mm,外径50mm,内径34mm。PA-8型微滤膜管的平均孔径为5~10 $\mu\text{m}$ ,孔隙率39.9%。实验中选用平均粒径为10 $\mu\text{m}$ 的SiO<sub>2</sub>微粉,为了避免过细的颗粒对膜管形成严重的膜管阻塞,对SiO<sub>2</sub>微粉进行了沉淀清洗,取其沉淀液配成试验用不同浓度的SiO<sub>2</sub>悬浮液。

旋转切向流管式膜器的分离性能受到结构参数和操作参数的影响。主要结构参数有膜管表面微孔孔径分布、膜器环隙宽度;主要操作参数有环隙间切向流量或切向入口压力、悬浮液浓度等。实验开始前,先往膜器环隙间灌水,排出膜器中的空气,使悬浮液最大限度充满膜器。试验中尽可能使流量和压力保持稳定。悬浮液浓度按由低到高的顺序配制,这样可以节省纯净水和SiO<sub>2</sub>微粉。每试验完一种压力工况,就更换一根新膜管。



1. 温度计 2. 储料桶 3. 不锈钢泵 4. 阀  
5. 转子流量计 6. 压力表 7. 旋转切向流膜器  
8. 支座 9. 滤液杯 10. 电子天平  
图1 旋转切向流 PA管式膜器系统

Fig.1 PA tubular membrane separator of rotary tangential flow

试验中,室内温度保持在 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ,微滤后的过滤液用放置于电子天平上的烧杯收集,每得到2000g过滤液记录一次时间(s),用以计算膜器的通量,每次试验运行直到膜通量达到比较稳定的状态为止。

## 2 膜通量测试

开始时膜器环隙的悬浮液浓度与储料桶中悬浮液的浓度没有明显区别。随着时间的推移,在PA管表面逐渐附上一层白色物质,膜器环隙间的悬浮液变得非常浑浊,其浓度明显大于储料桶中悬浮液浓度,说明膜器环隙间已经出现了浓差极化现象。随着时间的推移,在膜管表面形成了棉絮状的白色物质,这种白色物质就是污染层。由试验可知,膜器在过滤10min后浓差极化现象变得非常明显,但是膜器的膜通量并没有因此而大幅度地下降,这正是旋转切向流膜微滤的主要优点。旋转切向流停止后,发现大部分污染层自动脱离膜表面,说明污染层很疏松,试验中未发现无污染层状态。每次试验后,将更换的膜管放入储料桶进行清洗,以保证悬浮液浓度稳定。膜器的膜通量在开始时最大,称为初始膜通量,然后逐渐递减并达到

一个相对稳定的状态,这个稳态值称为膜器的稳态膜通量. 旋转切向流 PA 管式膜的初始膜通量与稳态膜通量都要比轴向流 PA 管式膜的高,如表 1 所示. 表中圆弧切向流和直线切向流分别指悬浮液入口为圆弧相切和直线相切结构. 悬浮液浓度为 0.05%, 0.25%, 0.75% 时的结果见文献[4]. 表 1 中的“比值”表示旋转切向流相应的初始通量与轴向流的初始通量的比,或旋转切向流相应的稳态通量与轴向流的稳态通量的比. 由表 1 可知,入口压力为 0.01 MPa ~ 0.03 MPa 时,圆弧切向流的初始通量是轴向流初始通量的 1.064 ~ 1.886 倍,直线切向流的初始通量是轴向流初始通量的 1.434 ~ 1.737 倍;圆弧切向流的稳态通量是轴向流稳态通量的 1.584 ~ 2.511 倍,直线切向

流的稳态通量是轴向流稳态通量的 1.697 ~ 2.298 倍. 由此可见,不管是旋转直线切向流还是旋转圆弧切向流,其膜微滤通量都比轴向流的大. 另据实验观察,轴向流的渗透通量始终在下降,停机卸压时,污染层虽然也从膜管上滑下,但清楚可见膜管表面有栓状滤饼,明显比旋转切向流的污染层结构致密. 这表明,旋转切向流膜微滤对膜管的污染程度大大低于轴向流膜微滤. 在 SiO<sub>2</sub> 悬浮液浓度为 1.0% 时,直线切向流均优于圆弧切向流,且入口压力 0.03 MPa 是旋转直线切向流的最佳工况. 而对旋转圆弧切向流,最佳工况是 0.02 MPa. 这表明膜微滤过程的影响因素复杂,浓度、压力、结构参数等因素与渗透通量不是简单的线性关系.

表 1 旋转切向流与轴向流膜器通量比较  $\times 10^{-4} / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Table 1 Comparison of flux for membrane separator of rotating tangential flow with axial flow

入口压力/MPa	圆弧切向流(1.0%)				直线切向流(1.0%)				轴向流(1.0%)	
	初始	比值	稳态	比值	初始	比值	稳态	比值	初始	稳态
0.01	8.59	1.742	3.93	2.312	7.07	1.434	3.27	1.924	4.93	1.70
0.02	14.45	1.886	6.63	2.511	11.36	1.483	4.48	1.697	7.66	2.64
0.03	10.26	1.064	5.48	1.584	16.74	1.737	7.95	2.298	9.64	3.46

### 3 旋转切向流管式膜器能耗分析

旋转切向流管式膜分离为一不可逆过程,通过膜的传递就要不断消耗能量. 通量与推动力密切相关,推动力变大,则能耗增加,通量也增加. 推动力是一个典型的工艺参数,推动力加大,则通量增加,实现某分离过程所需膜面积减小,因而投资下降,但分离过程所需能耗增加. 根据过程的类型和能源价格总可以找到最优性条件.

对压力驱动膜过程,需要消耗能量的有原料泵和循环泵. 原料泵的作用是使原料升至所需压力. 在微滤和超滤中,由于浓差极化和污染十分严重,因此通量衰减很厉害. 为尽可能减少这种影响,必须强化边界层内的传质过程,这可以通过提高横向流速来实现. 工业应用中,大多数横向流操作的膜过程需要 2 台泵,原料泵用于原料加压,循环泵用于调节和维持较高的横向流速. 因为微滤和超滤均要求较低

的流体压力和较高的横向流速度,所以能耗主要取决于循环泵而不是原料泵.

将液体从  $p_1$  加压至  $p_2$  所需能量为<sup>[5]</sup>:

$$E_t = \frac{q\Delta p}{\eta} \quad (1)$$

式中,  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 为流量,  $\Delta p$  ( $\text{N}/\text{m}^2$ ) 为压差或压力. 泵的效率一般为:  $0.5 \leq \eta \leq 0.8$ .

渗透液获得的有效过滤利用能量为<sup>[6]</sup>:

$$E_e = \frac{1}{2} \rho A v_m^3 \quad (2)$$

式中,  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 为渗透液密度,  $A$  ( $\text{m}^2$ ) 为过滤膜的膜面积,  $v_m$  ( $\text{m}/\text{s}$ ) 为膜的过滤渗透速率.

由表 1 测试数据可知,相同工况下,由于旋转切向流的渗透速度比轴向流的渗透速度高,因此,旋转切向流的膜结构用于过滤的能量比轴向流的能量利用高. 若有效过滤能量利用率  $f$  定义为系统总能量  $E_t$  和有效过滤利用能量  $E_e$  之比,则:

$$f = \frac{E_c}{E_t} = \frac{\rho \eta A v_m^3}{q \Delta p} \quad (3)$$

于是可以把  $f$  作为特定结构膜器和膜过滤过程的过滤性能指标,在对膜器的性能评价和考虑

表 2 旋转切向流与轴向流能量有效利用率  $f(10^{-6})$  比较 / %

Table 2 Comparison of energy efficiency  $f(10^{-6})$  for rotating tangential flow with axial flow

入口压力 / MPa	圆弧切向流(1.0%)				直线切向流(1.0%)				轴向流(1.0%)	
	初始 $f$	比值	稳态 $f$	比值	初始 $f$	比值	稳态 $f$	比值	初始 $f$	稳态 $f$
0.01	1.790	5.296	0.171	12.214	0.997	2.950	0.099	7.071	0.338	0.014
0.02	3.553	6.716	0.343	15.591	1.726	3.263	0.106	4.818	0.529	0.022
0.03	0.707	1.206	0.108	4.00	3.069	5.237	0.329	12.185	0.586	0.027

圆弧切向流的能量有效利用率与轴向流的能量有效利用率之比。相同压力或相同浓度下,希望设计的旋转切向流膜器结构尽可能使膜通量越大,能量有效利用率越高越好。在实验条件和范围内,由表 2 可得到以下分析结果:

(1) 旋转切向流结构比一般轴向流的过滤有效利用率要高很多。

(2) 在给定的入口压力范围内,悬浮液浓度为 1.0% 时,直线切向流膜微滤的最优工况是入口压力为 0.03 MPa,此时,其初态能量有效利用率比轴向流初态能量有效利用率高 4.237 倍,稳态能量有效利用率比轴向流稳态能量有效利用率高 11.185 倍。

(3) 悬浮液浓度为 1.0% 时,圆弧切向流膜微滤的最优工况是入口压力为 0.02 MPa,此时,其初态能量有效利用率比轴向流初态能量有效利用率高 5.716 倍,稳态能量有效利用率比轴向流稳态能量有效利用率高 14.591 倍。

#### 4 结论

(1) 悬浮液浓度越高,聚丙烯 PA 管式膜的通量越低。

(2) 悬浮液浓度相同,流体压力越高,聚丙烯 PA 管式膜的通量也越高。

(3) 旋转切向流 PA 管式膜通量比轴向流的 PA 管式膜通量要高。由表 1 知,流体压力在 0.01 MPa ~ 0.03 MPa 时,旋转圆弧切向流与旋转直线切向流 PA 管式膜初始通量分别是轴向流 PA 管式膜初始通量的 1.064 ~ 1.886 倍和

膜器放大时,可作为定量评价其经济性的参数。不同流动状态的管式膜微滤能量利用率如表 2 所示。

表 2 中“比值”表示旋转直线切向流或旋转

1.434 ~ 1.737 倍,旋转圆弧切向流与直线切向流 PA 管式膜稳态通量是轴向流 PA 管式膜稳态通量的 1.584 ~ 2.511 倍和 1.697 ~ 2.298 倍。

(4) 旋转切向流膜微滤结构比一般轴向流膜微滤的过滤有效利用率要高很多,完全达到了强化膜滤的目的。在实验条件下,当悬浮液浓度为 1.0% 时,直线切向流膜微滤的最优工况是入口压力 0.03 MPa,此时,其初态能量有效利用率比轴向流初态能量有效利用率高 4.237 倍,稳态能量有效利用率比轴向流稳态能量有效利用率高 11.185 倍;而圆弧切向流膜微滤的最优工况是入口压力 0.02 MPa,其初态能量有效利用率比轴向流初态能量有效利用率高 5.716 倍,稳态能量有效利用率比轴向流稳态能量有效利用率高 14.591 倍。

#### 参考文献:

- 褚良银,陈文梅,钟月华. 旋转流强化管式膜微滤过程中分离因数研究. 过滤与分离,1999,9(2):9~12.
- 褚良银,陈文梅,刘培坤,李晓钟,李建明,石岩. 管式陶瓷膜十字流微滤过程强化研究. 膜科学与技术,1998,18(6):49~53.
- 方为茂,陈文梅. 管式膜十字流微滤过程分析. 过滤与分离,2000,10(1):10~15.
- 王成端. 旋转切向流强化管式膜微滤的机理研究. 博士学位论文,成都:四川大学,2001.
- [荷兰]Marcel Mulder 著. 李琳译. 膜技术基本原理,第二版. 北京:清华大学出版社,1997. 325.
- 方为茂. 管式陶瓷膜十字流微滤特性及旋转流强化研究. 博士学位论文,成都:四川联合大学,1997.