

# 电场强化错流膜过滤的研究

胡婧逸, 邓慧萍, 商冉

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 电场强化错流膜过滤技术可有效改善膜污染和浓差极化对错流过滤带来的不利影响。就电场膜过滤装置、机理、外加电场及影响渗透通量的因素这 4 个方面进行综述。目前研制的新型附加电场中空纤维膜组件克服了传统膜过滤组件的缺点, 显示出很大的工程应用前景。电场强化错流膜过滤中会发生电泳和电渗等电动力学效应以及电化学效应。电泳是减缓膜污染一个主要因素, 电泳和电渗两者共同作用, 可以大幅提高过滤通量。采用脉冲电场可以减缓过滤速率的衰减幅度, 节省单位体积滤液的电功率比耗。当颗粒具有较高 Zeta 电位、外加场强及跨膜压力接近临界值、错流速率较高时, 过滤通量极限值将会得到提高。

**关键词:** 错流; 电场强化; 电场膜; 膜污染; 通量

**中图分类号:** TQ028.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2455(2009)04-0013-06

## A study of electrically enhanced crossflow membrane filtration

HU Jing-yi, DENG Hui-ping, SHANG Ran

(Environmental Science and Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The technology of electrically enhanced crossflow membrane filtration can ameliorate the adverse impacts of membrane fouling and concentration polarization effectively. Four aspects: electrofiltration device, mechanism, applied electric field and factors which affect filtration flux of the said technology were reviewed. A newly developed external electric field hollow fiber membrane module overcomes the shortcomings of traditional membrane filtration module, and shows bright prospects of engineering application. Electrokinetic effect—electrophoresis and electroosmosis, as well as electrochemical effect can happen during the process of electrically enhanced crossflow membrane filtration. Electrophoresis is the main factor that cause the membrane fouling, and through the cooperative effect of it and electroosmosis, the filtration flux can be greatly improved. The pulsed electric field can slow down the decreasing degree of filtration velocity and save the consumption of electric power per unit volume of permeate. When the suspended particles possesses higher Zeta potential, external electric field is strong, transmembrane pressure approaches critical value and crossflow velocity is higher, the limiting filtration flux can be increased.

**Keywords:** crossflow; electric field enhancement; electric field membrane; membrane fouling; flux

错流膜过滤技术被广泛应用于分离和去除原水中的悬浮微小物质。但是, 由于膜污染及浓差极化导致膜通量下降, 成为该技术广泛应用的制约因素。膜污染是一个物理、化学、生物过程相互作用的复杂现象, Yamamura 等<sup>[1]</sup> 通过用微滤膜过滤地表水的试验后得出膜污染的机理: 含铁化合物、碳水化合物或蛋白质等相对较大的颗粒会覆盖膜表面或缩小膜孔; 而小分子颗粒(如含锰化合物或腐殖

酸)会进一步堵塞这些变小后的膜孔, 最终导致膜表面形成不可逆的膜污染。而一般进水悬浮物质和膜都是带有电荷的, 这些电荷之间相互作用使颗粒沉积下来, 也会产生膜污染。在处理含有亲水基团的大分子物质时, 膜表面会产生凝胶层, 不仅造成膜滤速率迅速衰减, 而且还会缩短膜的使用寿命,

收稿日期: 2009-02-17; 修回日期: 2009-04-24

是导致分离效率降低、限制膜过滤优势发挥的内在因素。为了更好地强化错流过滤，国内外研究者从各种角度出发来克服膜污染和浓差极化给过滤带来的不利影响。主要方法有：边界层控制、乱流发生、膜材料改进、结合外场(如磁场、电场等)<sup>[2]</sup>。

结合电场的错流膜过滤技术，即电场膜技术，被广泛应用于反冲洗水脱盐，皮革废水、纺织废水的脱色，水果汁、发酵(蛋白)液的净化等领域<sup>[3]</sup>。1977年Henry用电场错流微滤高岭土悬浮液和油污废水，并建立了一套关于膜理论的数学模型<sup>[3]</sup>；1994年J. Jurado利用激湍旋涡流动附加直流电场的方法进行血液蛋白回收<sup>[4]</sup>；1996年Jagannadh和Muralidhare关于电动方法控制膜污染进行了综述<sup>[2]</sup>；2005年J O Kim等发现将电场用于微滤预处理，可使渗透通量增加、原水中活性细菌减少，并且节省絮凝剂用量<sup>[5]</sup>；2007年B. Sarkar等进行附加电场错流超滤合成水果汁的试验，提出一种量化通量和凝胶层厚度的模型<sup>[3]</sup>。本文将从电场膜过滤装置、过滤机理、外加电场以及渗透通量的影响因素这4个方面对电场膜技术展开论述。

## 1 电场膜过滤装置

### 1.1 板框式过滤

板框式膜组件如图1。电极分别加在膜两侧，两电极之间分为过滤循环与漂洗循环，其中过滤循环在膜两侧的进料通道和渗流通道中进行。由于电极上会发生一些电化学反应，因此可以在两电极内侧分别形成隔室来防止由此而导致的流态变化<sup>[6]</sup>，这些隔室由离子交换膜隔开。由于原水中的杂质粒子通常带负电荷，故将阳极置于进水端，阴极置于出水端。为了避免过滤时进料通道内离子浓度逐渐增加，将阴离子交换膜置于阳极端而阳离子交换膜置于阴极端。

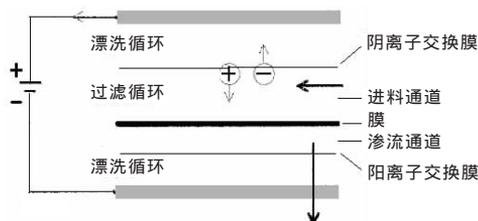


图1 附加电场的板框式膜组件

Fig. 1 Flat sheet membrane module with external electric field

### 1.2 管式过滤装置

管式膜组件如图2<sup>[6]</sup>。电场加在外围电极和中

心电极之间，外围电极通常由不锈钢制成，作为阴极；中心阳极为棒状电极，根据Bowen等<sup>[7]</sup>的研究，最好的阳极材料为钛涂层，如铂涂钛材料。当膜由导电材料制成时，可用膜直接作阴极，此时，膜间阻力会减小，这样的系统在维持相同场强的条件下能耗较少。Wakeman等<sup>[8]</sup>通过分析流动速率和电场剖面计算出颗粒在板框式膜组件中的运动轨迹，比较了平板电场和管式膜中的辐射电场的效率，结果表明辐射电场的效率较高。

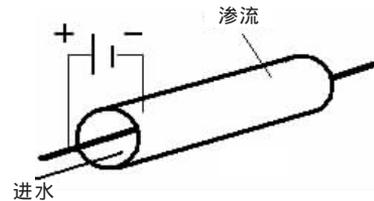


图2 膜作为电极的管式膜组件

Fig. 2 Tubular membrane module with membrane as an electrode

### 1.3 中空纤维管式膜过滤

由于上述板框式和管式膜组件一般只能装填一张膜，过滤面积难以提高，商冉等<sup>[9]</sup>设计出一种新型附加电场的中空纤维膜组件(Electric Hollow Fiber Membrane Module, E-HFM)，如图3。在该装置中，中心阳极为惰性钛合金材料，外围阴极采用不锈钢材料制成。中空纤维膜丝用环氧树脂AB胶固定，均匀分布于阳极和阴极之间。该装置具有装填密度高、有效膜面积比率高、耐高压且不需要支撑材料等优势，与上述两种膜组件相比具有更广泛的工程应用前景。

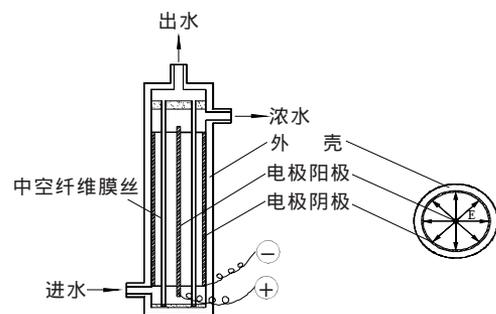


图3 附加电场的中空纤维膜组件

Fig. 3 External electric field hollow fiber membrane module (E-HFM)

## 2 电场膜过滤机理

电场膜过滤在理论上可认为是错流过滤与附加电场共同作用的结果。外加电场会引起一些电动力

学效应、电化效应, 其中电动力学效应包括电泳和电渗; 电化效应表现为氧化与还原反应, 并伴随有焦耳热和气泡等。

## 2.1 电动力学效应

### 2.1.1 电泳现象

水中杂质颗粒一般是带负电荷的, 施加电场后这些微粒朝背离膜表面的方向发生电泳迁移, 从而避免了在膜上沉积。图 4<sup>[3]</sup>表示在板框式膜组件中置入电极后, 原水中带电颗粒朝向阳极的电泳迁移现象。在该过程中, 溶液主体流产生的流体压力差使微粒向膜面沉积, 形成沉积层; 由于沉积层微粒浓度要高于主体流, 形成的浓差极化层使得这些微粒又背离膜面进行反向扩散。当电场达到一定强度, 电泳迁移和反向扩散将与微粒向膜面的沉积运动达到平衡, 这时膜表面的沉积层可能消失<sup>[10]</sup>。因此, 电泳迁移现象能防止膜污染。

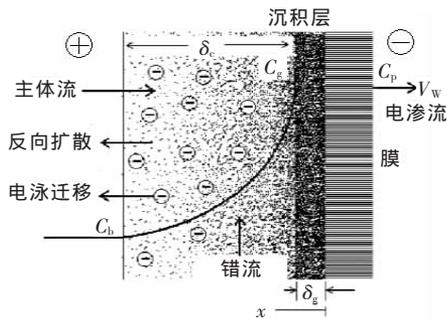


图 4 膜面颗粒传质过程示意

Fig. 4 Mass-transfer process of particles over the membrane surface

带电颗粒在单位电场强度下的电泳速度  $v_p$  (cm/s) 称为电泳迁移率  $u_p$  (cm<sup>2</sup>/(V·s)), 二者可由 Marian Smoluchowski<sup>[6]</sup> 公式进行计算:

$$u_p = v_p/E = 10 \varepsilon \zeta / \eta \quad (1)$$

式中:  $\zeta$  —— 带电颗粒的 Zeta 电位, mV;

$\varepsilon$  —— 溶液介电常数, F/m;

$\eta$  —— 溶液黏度, Pa·s;

$E$  —— 过滤装置中所施加的电场强度, V/cm。

从公式(1)可看出, 对于某种特定的原水, 水中带电颗粒的 Zeta 电位和所施加电场  $E$  是影响颗粒电泳迁移率  $u_p$  的关键因素。Zeta 电位是表征水中胶体悬浮物质带电性能的重要参数, 主要受溶液 pH 值、离子强度等的影响。对于蛋白酵母悬浮液, 其 Zeta 电位的变化是通过羧基和氨基的离子化电

离给出 COO<sup>-</sup> 或 NH<sub>3</sub><sup>+</sup> 来实现的, 使得低 pH 值下的蛋白质分子带正电荷, 而高 pH 值下带负电荷<sup>[11]</sup>。离子强度对 Zeta 电位的影响主要是通过压缩颗粒双电层结构<sup>[12]</sup>, 天然水体中存在的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>, 能在一定程度上改变水中杂质颗粒的电负性, 使得颗粒 Zeta 电位升高。当溶液电导率较低时, 随着离子强度的增大, 杂质颗粒 Zeta 电位呈下降趋势<sup>[6]</sup>。根据一些学者的研究, 溶液中 Zeta 电位较高的组分 ( $\zeta < -30$  mV) 是形成膜污染的主要物质, 而由公式(1)可知这些物质较其他组分具有较高的电泳速度, 因此是容易通过电泳迁移去除的, 进一步说明电泳能起到减缓膜污染的作用。

### 2.1.2 电渗现象

附加电场后膜过滤通量将会得到增强, 这是由于渗透于滤膜孔隙中的溶液定向透过膜孔<sup>[13]</sup>, 产生了与原主体渗流同向的电渗流<sup>[14-15]</sup>。由于电渗流的作用, 膜孔内的过滤阻力降低, 新的膜过滤阻力  $R_m'$  (cm<sup>-1</sup>) 减少为<sup>[2]</sup>:

$$R_m' = R_m / [(J_{E=0} + J_a) / J_{E=0}] \quad (2)$$

式中:  $R_m$  —— 无附加电场时的膜过滤阻力, cm<sup>-1</sup>;

$J_{E=0}$  —— 无附加电场时的膜过滤通量, mL/(cm<sup>2</sup>·s);

$J_a$  —— 电渗流所引起的膜通量增加量, mL/(cm<sup>2</sup>·s)。

过滤某时刻, 通量值  $J$  (mL/(cm<sup>2</sup>·s)) 通过串联阻力公式<sup>[3]</sup> 计算:

$$J = 1000 \Delta P / \eta (R_m + R_f + R_c) \quad (3)$$

式中:  $\Delta P$  —— 膜滤过程中跨膜压力, kPa;

$R_c$  —— 沉积层过滤阻力, cm<sup>-1</sup>;

$R_f$  —— 浓差极化层过滤阻力, cm<sup>-1</sup>。

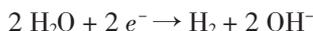
由公式(2), 附加电场引起的电渗流使得膜孔内的过滤阻力  $R_m$  减小; 当电场达一定强度后, 大部分带负电的杂质颗粒通过电泳迁移脱离膜表面, 使得整个过滤过程沉积层阻力  $R_c$  和浓差极化层阻力  $R_f$  降低, 由公式(3), 在相同跨膜压力下, 由于过滤总阻力 ( $R_m + R_f + R_c$ ) 的减小, 膜过滤通量将大幅增加。Chaung 等<sup>[11]</sup> 认为, 当膜表面尚有沉积层和浓差极化层时, 过滤通量主要通过电泳得到增强, 电渗并不如电泳作用明显; 而当电场强度增大到临界值 (见 3.1 节), 沉积层和浓差极化层消失时, 过滤通量则仅由电渗作用得到提高。但根据进水水质的不同, 一些带正电荷和电中性的颗粒物质

会有堵塞膜孔的趋势，而削弱电渗流的作用，反而使膜过滤阻力增大，过滤通量降低。经一些学者的研究<sup>[16-17]</sup>，与电泳速度  $v_p$  的影响因素一致，电渗流引起的膜通量增加量  $J_a$  主要受颗粒 Zeta 电位和电场强度的影响。

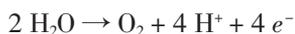
## 2.2 电化学效应

电化学反应是在电极上发生电子转移的化学过程，反应类型取决于进水物质和进水条件<sup>[6]</sup>。化学反应方程式为<sup>[18]</sup>：

阴极还原反应：



阳极氧化反应：



Mc、Ma 分别表示阴极和阳极材料。根据一些学者的研究<sup>[14]</sup>，溶液密度大、导电率高时电极上氧化与还原反应程度高，而为了保证电场膜过滤的有效运行，原水的电导率范围仅限于 0.10 ~ 10 mS/cm。由于高电导率下电泳作用将受到抑制，因此电化学和电泳是不可兼得的两个作用。电化学反应一般伴随着焦耳热的产生，Weber 等<sup>[19]</sup>认为焦耳热使得待滤液的温度升高，粘度将会随之降低。电极上水的电解产生  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2$ ，在一定程度上能加快膜过滤速度并微略提高沉积层上滤饼的残留水分，也可能扰乱胶体悬浮液的流态，导致颗粒在短时间内凝结。在气体产生的同时，由于水电解产生  $\text{H}^+$  或  $\text{OH}^-$ ，使得溶液 pH 值发生一定改变，可能对杂质颗粒的 Zeta 电位进行微略改性，从而影响其电泳速度。

## 3 外加电场

### 3.1 临界场强

临界场强是指所有颗粒移向膜一侧的净速率为零时的电场强度<sup>[6]</sup>。当电场强度小于临界值时，颗粒电泳迁移与反向扩散速度之和小于流体压力差引起的迁移速度，膜面不断有颗粒沉积；当电场强度大到一定值，电泳迁移与反向扩散速度之和等于流体压力差引起的迁移速度，颗粒悬浮于主体液中，膜面没有颗粒沉积<sup>[20]</sup>，此时的电场强度为临界场强  $E_{\text{critical}}$ 。临界场强是一种非常理想的状态，它可以减缓膜污染程度，延长膜的使用寿命<sup>[10]</sup>。

临界场强由下式计算<sup>[6]</sup>：

$$E_{\text{critical}} = J_{\text{critical}} / u_p \quad (4)$$

式中： $J_{\text{critical}}$ ——在给定跨膜压力下，浓差极化层和沉积层消失时的通量值， $\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

在电场膜过滤中，所施加电场强度大于临界场强时，膜污染程度能得到减轻，但膜过滤通量能否得到提高，还取决于原水水质特性。J. O. Kim 等<sup>[5]</sup>通过试验发现：在过滤初始阶段，所施加电场强度小于临界值时，渗透通量随着场强增大而呈曲线上升，这可能是原水中颗粒开始凝结或颗粒与膜面之间的静电力所致。而 G C C Yang 等<sup>[21]</sup>发现，当场强超过临界值时，由于膜面没有滤饼作为保护层，中性小分子微粒在膜孔内聚集，导致膜孔堵塞，膜阻力增大，渗透通量逐渐下降。

### 3.2 间断脉冲电场

由于外加连续电场需要较高能耗，电极反应程度高，对处理具有较高电导率和较高热敏度的原水有很大局限性。有研究者提出使用间断脉冲电场，它是在滤室内加电场一定时间后，停止加电一段时间，而后再加电场<sup>[10]</sup>。由于形成沉积层需要一定时间，因此可以改变不同加电、停电的时间间隔，来改变膜滤速率，控制膜污染现象的发生。

赵宗艾等<sup>[10]</sup>用 0.18  $\mu\text{m}$  的聚偏氟乙烯膜，在流体压差为 0.12 MPa，主体流量为 36 L/h，电场强度为 60 V/cm 的条件下，对质量分数为 0.015% 的  $\text{SiO}_2$  悬浮液，分别采用 10 s/10 s（即加电 10 s，停电 10 s）、3 min/3 min、6 min/6 min、10 min/10 min 的间断加电方式进行膜滤试验，得出各试验在第 50 min 的过滤速率值（此时速率已达初始稳定）及各工况下的平均电功率值。研究发现：在临界场强以上施加间断电场时，其过滤速率介于该恒定场强的稳定过滤速率及不加电场的稳定过滤速率之间，且加电频率越高，稳定膜滤速率越高，获得单位体积滤液电功率的比耗越低。

B. Sarkar 等<sup>[18]</sup>通过试验研究质量浓度为 3 kg/ $\text{m}^3$  果胶和糖度为 120 Brix 蔗糖的混合物，当跨膜压力为 360 kPa，错流速率为 0.12 m/s，连续场强为 1 000 V/m 时，渗透通量由 6.5 L/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  升高到 25.2 L/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，系统所需电耗为 0.83 kW·h/ $\text{m}^3$ ；而达到同样通量，脉冲电场（电场启闭时间比为 3:1）所需能耗为 0.65 kW·h/ $\text{m}^3$ 。连续电场下的电极反应使阴极生成过量  $\text{OH}^-$  和  $\text{H}_2$ ， $\text{OH}^-$  随渗流带出，导致出水 pH 值升高，而膜附近释放出气体会降低

渗透通量。试验中, 当连续恒定场强为  $500 \text{ V/m}$ , 渗流出水  $\text{pH}$  值由  $3.97$  升高到  $4.6$ , 而相同场强启闭时间比为  $3:1$  的脉冲电场, 出水  $\text{pH}$  值仅升高到  $4.4$ , 故相比连续场强模式能削弱  $\text{pH}$  值升高对溶液产生的不利影响。

#### 4 渗透通量的影响因素

影响电场下膜过滤通量的 4 个主要方面为: 进水悬浮物的性质(如粒径、Zeta 电位、浓度等); 电压(电场强度); 跨膜压力; 错流速率。

##### 4.1 进水悬浮物的性质

H M Huotari 等<sup>[22]</sup>认为当颗粒粒径很小( $< 30 \text{ nm}$ )时, 由于布朗运动, 这些颗粒将会以较小的速率向膜表面迁移, 膜污染程度较轻, 通量衰减幅度减慢; 当颗粒粒径在  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  时, 随着错流速率增加, 颗粒以紊流扩散的形式向膜表面迁移, 此时通量反而会降低。

颗粒 Zeta 电位要受到溶液  $\text{pH}$  值、离子浓度等影响。Cornelissen 等<sup>[16]</sup>在过滤油状乳液的过程中进行对比试验, 第一组油滴 Zeta 电位小于  $-5 \text{ mV}$ , 在  $15 \text{ kV/m}$  的电场下, 通量只能从  $35 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  增至  $70 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 另一组油滴 Zeta 电位较高:  $-67 \text{ mV}$ , 仅在  $2.4 \text{ kV/m}$  的场强下通量即由  $75 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  升高到  $350 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

在恒定场强下, 渗透通量与进料浓度呈反比。这是由于较高的浓度使得浓差极化现象明显, 导致渗透压力增大, 因此降低了渗透通量<sup>[23]</sup>。

##### 4.2 电压(电场强度)

Weng Y H 等<sup>[17]</sup>用氯化钠作为电解质来研究电场对于过滤通量的影响, 氯化钠溶液的电导率为  $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 以无外加电场时溶液的过滤通量为标准, 试验结果显示: 过滤通量增加量(即渗透通量)随电压的增大而增大。在  $25$ 、 $50$ 、 $75$  和  $100 \text{ V}$  的电压下, 通量增加率分别为  $4\%$ 、 $7\%$ 、 $11\%$ 、 $18\%$ , 基本与所施加电压大小呈线性增长的趋势。当施加场强接近临界值时, 膜过滤氯化钠溶液的通量接近于无外加电场时过滤去离子水时的通量。

##### 4.3 跨膜压力

当电场膜过滤的跨膜压力低于使通量达到极限值的压力时, 过滤通量随着跨膜压力的增大而增加。但在较高跨膜压下过滤, 膜面的沉积层生成较快, 这样, 通量会很快达到极限值(极限通量)。G C C Yang 等<sup>[21]</sup>通过试验, 作出电场强度为  $110 \text{ V}/$

$\text{cm}$ (临界场强), 错流速率为  $17.36 \text{ cm/s}$  时, 跨膜压力分别为  $68.9$ 、 $137.8$ 、 $275.6 \text{ kPa}$  时所对应的通量变化曲线, 发现: 压力为  $275.6 \text{ kPa}$  时有最大的初始通量  $1.9 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ , 但  $10 \text{ min}$  之后很快衰减至  $0.9 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ,  $20 \text{ min}$  后其对应的通量为三者中最小。故得出结论: 即使在临界场强下进行过滤, 高跨膜压也不能提高过滤速率, 由于膜面并没有滤饼形成, 此时滤速降低可能是因为一些小分子微粒堵塞了膜孔。

##### 4.4 错流速率

渗透通量与错流速率呈正比, 这是由于较高的错流速率产生强制对流, 颗粒反向扩散运动加剧, 导致膜面颗粒浓度较低, 膜污染得到减缓, 从而通量得到提高<sup>[24]</sup>。工程中错流速率一般取为  $0.1 \text{ m/s}$ , 以此降低能耗<sup>[8]</sup>。

#### 5 结语

(1) 电场膜过滤装置一般分板框式和管式, 新型的附加电场中空纤维膜组件(E-HFM)克服了传统膜过滤组件过滤面积小、效率低下等缺点, 显示出很大的工程应用前景。

(2) 电场膜过滤在理论上可认为是错流过滤与附加电场共同作用的结果。外加电场会引起电泳和电渗等电动力学效应以及电化学效应。其中电泳是防止颗粒在膜面沉积, 进而减缓膜污染和提高膜通量的一个主要因素。

(3) 外加直流电场分连续电场和脉冲电场。过滤过程中, 持续的直流电场会有更高的渗流稳定速率, 但采用加电、停电的脉冲模式, 停电时沉积层还没来得及在膜面形成, 使得脉冲电场下滤速衰减得慢, 且能节省单位体积滤液的电功率比耗。因此, 脉冲电场作为一种节省电耗的模式正日益得到推广。

(4) 电场膜过滤中通量的变化主要取决于 4 个方面: 进水悬浮物的性质、电场强度、跨膜压力和错流速率。当颗粒具有较高 Zeta 电位、外加场强及跨膜压力接近临界值、错流速率较高时, 过滤达到稳定时的通量会得到提高。

(5) 电场膜技术不仅能有效防止膜污染, 延长膜的使用寿命; 还能极大地降低膜阻力, 增加膜通量, 显示出诱人的应用前景。在今后的应用过程中以下几个问题尚需进一步地深入研究: ① 装置设计问题。装置设计影响到电流在整个装置中的分

布, 进而影响过滤过程中的能耗, 合理的设计同时还能防止电极腐蚀, 使电极上生成气泡和一些干扰物质的现象得到消除, 是具有开发潜力的一项研究; ② 电极反应问题。阳极氧化是否可以用进一步去除原水中的有机污染物, 以及电极反应对于膜过滤中流态的影响亟待全面和深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] Yamamura H, Chae S, Kimura K, *et al.* Transition in fouling mechanism in microfiltration of a surface water [J]. *Wat Res*, 2007, 41(17): 3812-3822.
- [2] Jagannadh S N, Muralidhare H S. Electrokinetics methods to control membrane fouling[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(4): 1133-1140.
- [3] B Sarkar, S Pal, T B Ghosh, *et al.* A study of electric field enhanced ultrafiltration of synthetic fruit juice and optical quantification of gel deposition [J]. *Membrane Science*, 2008, 311(1-2): 112-120.
- [4] 李海波, 徐新阳, 胡筱敏, 等. 电场强化十字流膜滤的研究进展[J]. *金属矿山*, 2000, 35(12): 27-30.
- [5] J O Kim, J T Jung, I T Yeom, *et al.* Electric fields treatment for the reduction of membrane fouling, the inactivation of bacteria and the enhancement of particle coagulation [J]. *Desalination*, 2007, 202(1-3): 31-37.
- [6] Huotari H M, Tragardh G, Huisman I H, *et al.* Crossflow membrane filtration enhanced by an external DC electric field: A review [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1999, 77(A5): 461-468.
- [7] Bowen W R, Cassey B, Jones P, *et al.* Modelling the performance of membrane nanofiltration - application to an industrially relevant separation [J]. *Membrane Science*, 2004, 242(1-2): 211-220.
- [8] Wakeman R J, Tarleton E S. An experimental study of electroacoustic crossflow microfiltration [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1991, 69(A5): 386-397.
- [9] 商冉, 邓慧萍, 赵纯, 等. 附加电场对中空纤维膜污染的减缓作用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1): 1-5.
- [10] 赵宗艾, 柴哈里·拉赫, 刘姝红, 等. 利用电泳迁移运动抑制膜面微粒沉积的研究[J]. *过滤与分离*, 1998, (1): 3-8.
- [11] Chung C J, C Y Wu, C C Wu. Combination of crossflow and electric field for microfiltration of protein/microbial cell suspensions [J]. *Desalination*, 2008, 233(1-3): 295-302.
- [12] Prieve D C. Changes in Zeta potential caused by a dc electric current for thin double layers [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2004, 250(1-3): 67-77.

- [13] Larue O, Vorobiev E. Sedimentation and water electrolysis effects in electrofiltration of kaolin suspension [J]. *AIChE Journal*, 2004, 50(12): 3120-3133.
- [14] Wakeman R J, Sabri M N. Utilizing pulsed electric fields in cross-flow microfiltration by the use of electric fields [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1995, 73(A4): 455-463.
- [15] 赵宗艾, 钟富优, 王淑娥. 电膜滤中电渗效应的研究[J]. *流体机械*, 1996, 24(5): 10-14.
- [16] Cornelissen, Huang C P, Weng Y H, *et al.* Enhancing the separation of nano-sized particles in low-salt suspensions by electrically assisted cross-flow filtration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 54(2): 170-177.
- [17] Weng Y H, Li K C, Chung-Hsieh L H, *et al.* Removal of humic substances (HS) from water by electro-microfiltration (EMF) [J]. *Wat Res*, 2006, 40(9): 1783-1794.
- [18] B Sarkar, S De, S D Gupta. Pulsed electric field enhanced ultrafiltration of synthetic and fruit juice [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 63(3): 582-591.
- [19] Weber K, Stahl W. Improvement of filtration kinetics by pressure electrofiltration [J]. *Separation and Purification Technology*, 2002, 26(1): 69-80.
- [20] Radovich J M, Behnam B, M C. Steady-State modeling of electroultrafiltration at constant concentration [J]. *Separation Science and Technology*, 1985, 20(4): 315-329.
- [21] G C C Yang, T Y Yang, S H Tsai. Crossflow electro-microfiltration of oxide-CMP wastewater [J]. *Wat Res*, 2003, 37(4): 785-792.
- [22] H M Huotari, I H Huisman, G Tragardh. Electrically enhanced crossflow filtration of oily wastewater using membrane as a cathode [J]. *Membrane Science*, 1999, 156(1): 49-60.
- [23] B Sarkar, S D Gupta, S De. Cross-flow electro-ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice [J]. *Food Engineering*, 2008, 89(2): 240-245.
- [24] B Sarkar, S D Gupta, S De. Prediction of permeate flux during osmotic pressure-controlled electric field-enhanced cross-flow ultrafiltration [J]. *Colloid and Interface Science*, 2008, 319(1): 236-246.

作者简介: 胡婧逸(1986-), 女, 湖北天门人, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理理论与技术, (电子邮箱)nevermindyi@hotmail.com; 邓慧萍(1964-), 女, 上海人, 教授, 研究方向为水处理理论与技术。

# 欢迎订阅 刊登广告