

# 旋涂法制备 PVDF/PTFE 复合膜及其性能研究

肖凯军, 蔡胜, 董瑞, 朱良

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 旋涂技术具备薄膜厚度精确可控、高性价比、节能、低污染等优点, 在薄膜制备方法中脱颖而出。本文使用旋涂法制备了聚偏氟乙烯 (PVDF)/聚四氟乙烯 (PTFE) 复合膜, 并对其制备工艺进行了优化, 同时对旋涂成膜机理进行了研究。通过单因素试验, 分析了 PVDF 溶液浓度、旋涂仪的旋转速度和成膜温度对复合膜的拉伸强度和水通量的影响, 利用电子扫描显微镜 (SEM) 对复合膜胶粘层的微孔孔径变化进行了分析, 结果表明, PVDF/PTFE 复合膜制备的最佳工艺: PVDF 溶液浓度为 6 g/L, 旋涂仪的旋转速度为 2500 r/min 以及成膜温度为 90 °C。该条件下制备的复合膜的膜厚度为 200 μm, 平均孔径为 20 μm, 拉伸强度可达到 26.34 MPa, 水通量可达到 605.2 L/(m<sup>2</sup>·h)。此外, 分析旋涂 PVDF/PTFE 复合膜成型的机理, 其原因是由于 PVDF 溶胶分子与 PTFE 基膜之间存在范德华力等分子间力以及溶胶分子渗透到基膜微孔之间所形成的钩钉键等粘合作用。

**关键词:** 旋涂法; PVDF 溶胶; PTFE 微孔膜; 复合膜

文章编号: 1673-9078(2014)8-138-143

## Preparation and Properties of PVDF/PTFE Composite Membrane by Spin-coating

XIAO Kai-jun, CAI Sheng, DONG Rui, ZHU Liang

(School of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Spin-coating technique applied to film preparation stands out among other techniques owing to its advantages in terms of affording precise control of film thickness and producing minimal pollution in addition to being cost effective and energy saving. In this study, a PVDF/PTFE composite membrane was prepared by spin-coating; the preparation process was optimized, and the mechanism of film formation in spin-coating was investigated. Through single-factor experiments, the effects of the concentration of PVDF solution, spin speed of the spin coater, and the film-forming temperature on the tensile strength and water flux of the composite membrane were examined. The variations in pore size of the composite film adhesive layer were analyzed using scanning electron microscopy. The results showed that the optimum preparation conditions for PVDF/PTFE composite membrane were as follows: PVDF solution concentration of 6 g/L; coater spin speed of 2500 r/min, and film-forming temperature of 90 °C. Under these conditions, the film thickness of the prepared composite film was 200 μm, the average pore size was 20 μm, the tensile strength reached up to 26.34 MPa, and its water flux reached up to 605.2 L/(m<sup>2</sup>·h). Furthermore, the mechanism of PVDF/PTFE composite film formation using spin-coating involved Van der Waals forces and other intermolecular forces acting between PVDF sol molecules and the PTFE micro-porous membrane, while the adhesive effects resulted from hook bonding and nail bonding formed by penetration of PVDF sol-gel molecules into the pores of the PTFE membrane.

**Key words:** spin-coating; PVDF solution; PTFE micro-porous membrane; composite membrane

聚四氟乙烯 (PTFE) 微孔膜是一种具有一定孔径的白色薄膜材料, 其每平方厘米内大约有 90 亿个微孔, 其有孔径小、孔径分布均匀, 具有优良的化学稳定性、良好的润滑性、耐酸碱腐蚀性, 并且具有较高的力学性能, 但是由于 PTFE 微孔膜表面能低、润湿

收稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21176092); “十二五” 国家科技支撑计划课题 (2011BAE16B04); 广东省产学研项目 (2010B090400512)

作者简介: 肖凯军, 男, 教授, 博导, 研究方向: 膜材料的制备和食品加工保藏技术

性差、粘结力低、导热性能和耐磨性能差, 也导致其与其他材料的表面粘极为困难, 限制了其在工业上的应用<sup>[1-3]</sup>。以 PTFE 微孔膜作为基膜, 添加金属填料、无机物填料、有机物填料和纳米材料, 用来制备纳米复合材料是国内外的研究热点之一。Gabiella 等<sup>[4]</sup>利用脉冲激光沉积技术制备了负载 Ag 的 PTFE 复合膜, 当 Ag 的含量为 3.28% 具有最高的电导率, 可应用于电化学传感器领域中。Antar<sup>[5]</sup>研究了加入碳粉和石墨复合填充的 PTFE 复合膜, 结果表明复合材料具有良好的热传导能力和抗磨损性能。Sawyer 等<sup>[6]</sup>用粒径 40

nm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒填充 PTFE, 填充比例在 20% 时, 耐磨性比纯 PTFE 增强 600 倍。叶飞鹏<sup>[7]</sup>采用流延法、浸泡法、旋涂法以及电晕放电法成功制备了 PVDF/PTFE 双层驻极体, 发现旋涂法和浸泡法制备的复合膜的电荷储存能力和压电性均明显优于流延法制备的复合膜。PVDF/PTFE 复合膜作为一种新型的复合材料, 克服了 PTFE 微孔膜的缺点, 具有较高机械强度和优良透水性能, 可用于食品工业果汁分离澄清, 石油化工和电子电气等行业的配件材料和氟碳涂料等<sup>[8-10]</sup>。旋涂法是一种制备薄膜的高性价比技术, 广泛应用于物理学、医学、生物学和化学等领域功能性薄膜的制备。Kim<sup>[11]</sup>利用旋涂法制备得到了抗氧化保护膜层, 得出旋涂法制得的薄膜厚度均匀以及稳定性较好。Yimsiri P 等<sup>[12]</sup>通过对比旋涂法和浸涂法 (dip-coating) 两种方法制得的薄膜晶体管的性能, 总结出旋涂法制备薄膜具有薄膜厚度精确可控及均一性等方面的优势。未来市场对高性能智能材料的需求日益迫切, 而旋涂法具有高性价比、节能、低污染等优势, 使得旋涂法的应用前景必然成为研究的热点。

本文用改性后的 PTFE 微孔膜为基膜, 以旋涂法制备了 PVDF/PTFE 复合膜, 研究了不同的 PVDF 溶液浓度、旋转速度和成膜温度对复合膜拉伸强度的影响, 并以 SEM 和纯水通量对复合膜进行分析表征, 还探讨了旋涂法的成膜过程。以期制得一种性能优异的复合膜, 实现 PTFE 微孔膜的多功能化, 从而为拓展 PTFE 微孔膜的应用领域提供借鉴与指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

PVDF 树脂, 由扬中市东旭化工塑料有限公司生产; 低温空气等离子改性处理的 PTFE 微孔膜 (孔径  $0.62\ \mu\text{m}$ , 孔隙率 85.5%, 膜厚  $50\ \mu\text{m}$ ), 实验室自制; N,N-二甲基甲酰胺 (DMF), 由广州市化学试剂厂生产。

DDV-III EA 型万能材料试验机, 德国 Brabender Technologie KG 公司; 200 X 旋涂仪 (200 mm 及以下), 美国 CEE 公司; S 4700 扫描电子显微镜 (SEM), 日本 Hitachi 公司; DF-101 S 集热式恒温磁力搅拌器, 巩义市予华仪器有限责任公司; 水通量测试装置, 实验室自制。

### 1.2 PVDF/PTFE 复合膜的制备工艺流程

将干燥后的 PVDF 树脂与 DMF 溶剂按一定的比

例称取后混合, 置于恒温磁力搅拌器中, 在  $60\ ^\circ\text{C}$  的条件下搅拌致其完全溶解, 待搅拌至均相 (约 8 h) 后, 静置脱泡 (24 h 以上), 可以得到无色透明的 PVDF 溶液; 将经过等离子体改性的 PTFE 微孔膜置于旋涂仪的样品台上, 插上旋涂仪的电源以低速启动预热, 预热过程中使用微量进样器将配置好的 PVDF 溶液滴加在微孔膜的中央, 提高旋涂仪的转速, 溶胶分子在离心力的作用下向外扩散, 在微孔膜表面可以形成一层致密的胶粘层; 最后将粘胶层取出置于恒温真空干燥箱中干燥 3 h, 就可以得到 PVDF/PTFE 复合膜。制备工艺流程如图 1。

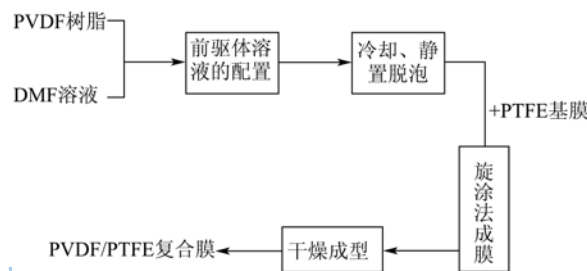


图 1 PVDF/PTFE 复合膜的制备工艺流程图

Fig.1 Preparation flow chart of PVDF/PTFE composite film

### 1.3 PVDF/PTFE 复合膜的拉伸强度测定

本试验采用 DDV-III EA 型万能材料试验机测定复合膜的水通量 (其中膜样品规格为  $15\ \text{cm}$  长  $\times 2.5\ \text{cm}$  宽)。试验条件: 夹距长为  $1\ \text{cm}$ , 拉伸速度为  $30\ \text{cm}/\text{min}$ 。

### 1.4 PVDF/PTFE 复合膜的纯水通量测定

通常膜的致密程度是用水通量来表征的, 本试验采用实验室自制的水通量测试装置进行测试。纯水通量的定义为: 在单位压力下, 单位时间通过单位膜面积的纯水的透过量。复合膜水通量  $F$  的计算公式为:

$$F = \frac{V}{A \cdot t}$$

式中,  $F$  为纯水通量,  $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $V$  为透过液的体积,  $\text{L}$ ;  $A$  为膜面积,  $\text{m}^2$ ;  $t$  为透过时间,  $\text{h}$ 。

### 1.5 PVDF/PTFE 复合膜的结构形貌分析

本试验采用 S 4700 型扫描电子显微镜来分析复合膜的微观结构。具体方法为, 将复合膜表面固定在样品台上, 进行喷金处理后, 置于扫描电镜下, 按照一定的放大倍数, 从荧光屏上观察复合膜胶粘层的微观结构, 并用相机拍照记录下来。试验条件: 加速电压为  $20\ \text{kV}$ , 倾角为  $15^\circ$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 PVDF 溶液的浓度对复合膜性能的影响

将经过低温空气等离子体改性处理的 PTFE 微孔膜置于样品台上, 旋涂浓度分别为 3 g/L、5 g/L、7 g/L、9 g/L 和 11 g/L 的 PVDF 溶液, 控制旋涂仪的其他操作条件为: 旋涂速度 2500 r/min, 成膜温度 60 °C, 所制备的复合膜的厚度为 200 μm, 平均孔径为 20 μm。测定不同浓度的 PVDF 溶液对 PVDF/PTFE 复合膜拉伸强度和纯水通量的影响, 如图 2。

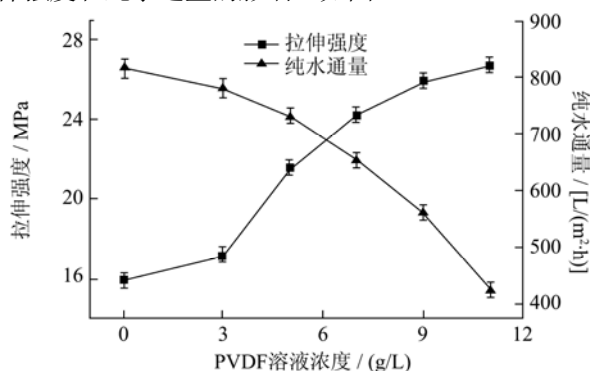


图 2 不同 PVDF 溶液浓度对 PVDF/PTFE 复合膜的拉伸强度和纯水通量的影响

Fig.2 Effect of different concentrations of PVDF solution on tensile strength and water fluxes of PVDF / PTFE composite membrane

如图 2 所示, 根据膜的拉伸强度曲线可以得出, 添加的 PVDF 溶液使 PVDF/PTFE 复合膜的力学性能得到了大大地加强。当 PVDF 溶液浓度达到 11 g/L 时, 制备的复合膜的拉伸强度相比于未进行复合处理的 PTFE 微孔膜, 由 13.98 MPa 上升到了 26.73 MPa, 拉伸强度增加了一倍。而随着 PVDF 溶液浓度的增大, 复合膜拉伸强度增长的幅度不断减小。究其原因在于由于 DMF 溶剂的溶解作用, PVDF 树脂颗粒开始进行溶解变成了溶胶, 溶胶分子通过渗透作用进入到 PTFE 基膜的微孔结构中, 在微孔中形成的钩钉键具有胶粘作用, PVDF 溶胶分子和 PTFE 微孔膜粘结到一起形成了稳定的复合膜; 随着溶胶浓度的不断增大, 越来越多的溶胶分子填充到基膜的孔隙中, 因而复合膜的拉伸强度得到了很大的提升。因为复合膜在进行膜拉伸的时候, 不仅要克服复合膜分子间的作用力, 还需要克服 PVDF 溶胶分子与 PTFE 微孔膜之间所形成的钩钉键等胶粘作用。而复合膜拉伸强度的增长幅度不断减小的原因是由于 PVDF 溶胶分子不断增多, PTFE 微孔膜微孔数量是一定的, 渗透作用受到抑制

和 PTFE 微孔膜微孔的阻力作用。

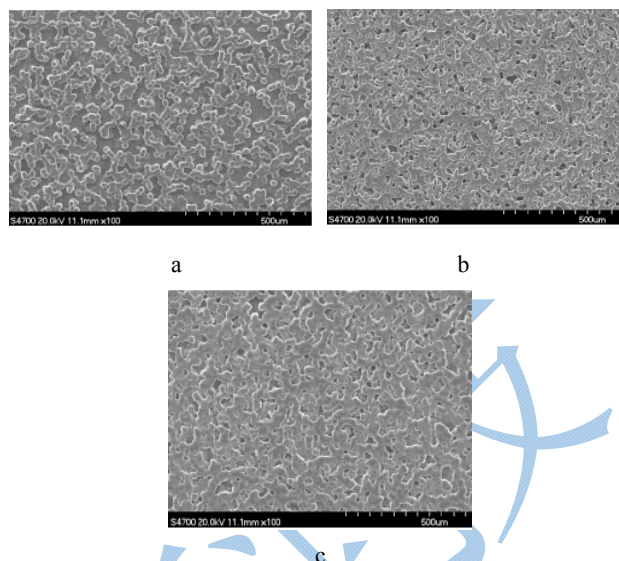


图 3 不同 PVDF 溶液浓度下制备的 PVDF/PTFE 复合膜 SEM 图  
Fig.3 SEM micrographs of PVDF/PTFE composite membrane prepared by different concentrations of PVDF solution

注: a: PVDF 溶液浓度: 5 g/L, b: PVDF 溶液浓度: 7 g/L, c: PVDF 溶液浓度: 9 g/L。

如图 3, 取上述 PVDF 溶液浓度为 5 g/L、7 g/L 和 9 g/L 所制得的复合膜, 进行 SEM (×100) 图像分析。结合纯水通量测试结果和 SEM 分析, 探讨了不同 PVDF 溶液浓度对 PVDF/PTFE 复合膜的纯水通量的影响。

以上可以得出, 随着 PVDF 溶液浓度的增大, PVDF/PTFE 复合膜的纯水通量不断减小, 在浓度为 11 g/L 时的纯水通量相比于浓度为 3 g/L 时减少了一半。究其原因可分为两方面, 其一是, PVDF 溶胶分子和 PTFE 基膜经过复合后, 膜厚度增加, 在一定的压力下渗透作用减弱, 纯水要透过复合膜中较小的孔变得困难。其二是, 根据 SEM 图分析可知, 随着 PVDF 溶液浓度的增大, 复合膜的分子含量也会变大, 由于分子晶核之间存在相互挤压作用, 致使分子间的微孔孔径缩小, 纯水难于透过复合膜, 水通量减小。

### 2.2 旋涂仪旋转速度对 PVDF/PTFE 复合膜性能的影响

在制备复合膜的过程中, 控制旋涂仪旋转速度分别为 1000 r/min、1500 r/min、2000 r/min、2500 r/min 和 3000 r/min。其他操作条件为: PVDF 溶液浓度 6 g/L, 成膜温度 60 °C, 所制备的复合膜的厚度为 200 μm, 平均孔径为 20 μm。测定不同旋转速度对 PVDF/PTFE



复合膜的拉伸强度和纯水通量的影响, 如图 4。

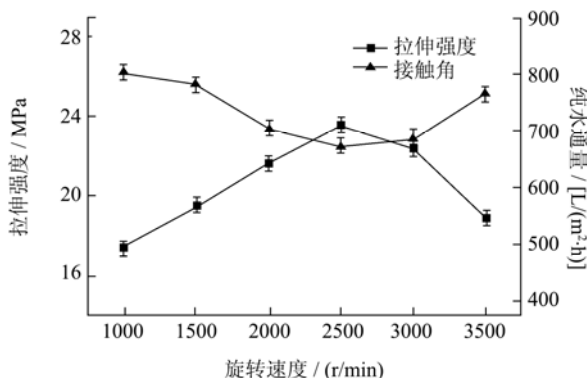


图4 不同旋转速度对PVDF/PTFE复合膜的拉伸强度和纯水通量的影响

Fig.4 Effect of different spinning speeds on tensile strength and water fluxes of PVDF / PTFE composite membrane

由图 4 可知, 随着旋转速度的增加, 复合膜的拉伸强度呈现出先增大后减小的趋势, 与此相反, 纯水通量呈现出先减小后增大的趋势。其中, 在旋转速度达到 2500 r/min 时, 复合膜的拉伸强度取得最大值 23.48 MPa, 此时纯水通量达到最小值 675.3 L/(m<sup>2</sup>·h)。

如图 5, 取上述旋转速度分别为 1000 r/min、2000 r/min、2500 r/min、3000 r/min 所制得的复合膜, 进行 SEM(×300)图像分析。结合纯水通量测试结果和 SEM 分析, 探讨了不同旋转速度对 PVDF/PTFE 复合膜的纯水通量的影响。

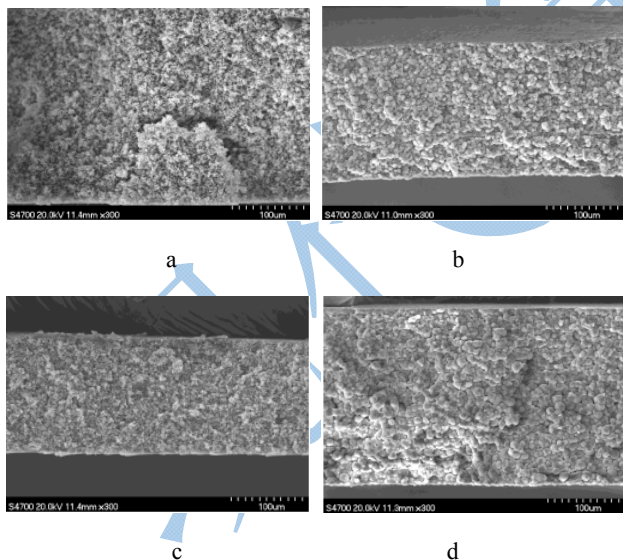


图 5 不同旋转速度下制备 PVDF/PTFE 复合膜的 SEM 图

Fig.5 SEM micrographs of PVDF/PTFE composite membrane prepared by different spinning speeds

注: a: 旋涂速度: 1000 r/min; b: 旋转速度: 2000 r/min; c: 旋转速度: 2500 r/min; d: 旋转速度: 3500 r/min。

如图 5 所示, 结合 SEM 图对复合膜胶粘层的微观结构分析, 高速旋转下产生的离心力太大, 而低速

旋转下产生的离心力太小, 导致 PVDF 溶胶分子在 PTFE 基膜表面涂覆不均匀, 粘胶层出现或大或小的裂缝, 降低了复合膜的机械强度, 同时这些裂缝会导致纯水更容易透过, 故而纯水通量相对较大; 而当旋涂仪的转速为 2000 r/min 或者 2500 r/min 时, 复合膜的结构由于涂覆均匀变得致密, 分子间晶核有序堆积使得微孔径减小, 纯水通量也会降低。

### 2.3 成膜温度对 PVDF/PTFE 复合膜性能的影响

成膜温度是指将旋涂好的复合膜在恒温真空干燥箱中进行干燥时的温度。在复合膜的初成品进行恒温真空干燥时, 调整烘箱的温度分别为 30 °C、60 °C、90 °C、120 °C、150 °C 和 180 °C, 其他操作条件为: PVDF 溶液浓度 6 g/L, 旋涂速度 2500 r/min, 所制备的复合膜的厚度为 200 μm, 平均孔径为 20 μm。测定不同成膜温度对 PVDF/PTFE 复合膜的拉伸强度和纯水通量的影响, 如图 6。

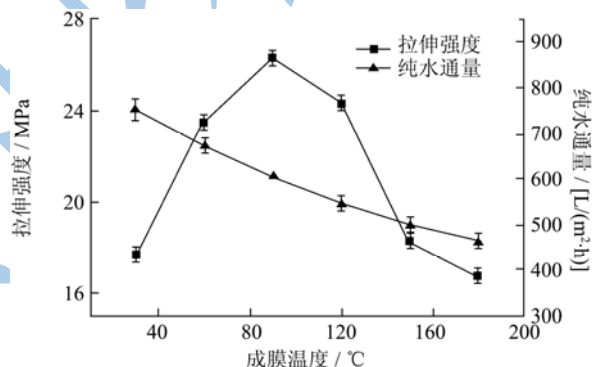


图 6 不同成膜温度对 PVDF/PTFE 复合膜的拉伸强度和纯水通量的影响

Fig.6 Effect of different preparing temperatures on tensile strength and water fluxes of PVDF/PTFE composite membrane

根据图 6 可以得出, 随着成膜温度的升高, PVDF/PTFE 复合膜的拉伸强度呈现先增大后减小的趋势, 并在成膜温度为 90 °C 时达到最高值 26.46 MPa。根据吸附粘合理论可知, 由于分子间的微布朗运动, PVDF 溶胶分子在 PTFE 基膜表面不断迁移逐渐吸附在基膜表面, 溶胶分子的极性基团与 PTFE 基膜表面上的极性基团相互吸引, 两种极性基团间的距离不断减小, 当距离缩小至两种分子间力的半径大小时, PVDF 溶胶分子和 PTFE 基膜由于范德华力等分子力的作用相互紧密结合在一起, 形成了复合膜。由此可知, 当成膜温度为 40 °C 时, PVDF 溶胶分子在基膜表面的微布朗运动受温度影响, 由于温度较低, 溶胶分

子在基膜表面迁移速度变慢,溶胶分子不易吸附在基膜表面形成足够的分子间力相互结合,导致复合膜的拉伸强度降低;而当成膜温度较高的时候,PVDF溶液的蒸发速率会加快,导致PVDF溶胶分子还未发生微布朗运动就过早地沉积在基膜表面,分子间难以形成范德华力,PVDF溶胶分子和PTFE基膜相互结合变得困难,因而也降低了复合膜的拉伸强度;而只有当成膜温度为90℃的时候,PVDF溶液的蒸发速率和PVDF溶胶分子微布朗运动可以达到一个合适的水平,有利于PVDF溶胶分子在PTFE基膜表面的迁移而形成足够的分子间力,使得复合膜结合致密,因而提高了复合膜的拉伸强度。

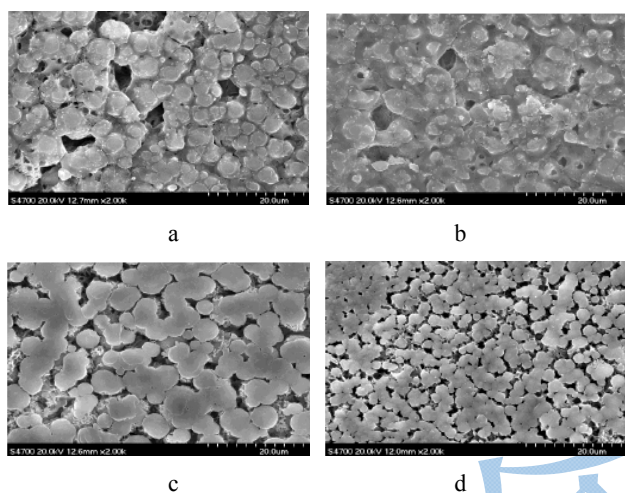


图7 不同成膜温度下制备PVDF/PTFE复合膜的SEM图

Fig.7 SEM micrographs of PVDF/PTFE composite membrane prepared by different preparing temperatures

注: a: 成膜温度: 30℃; b: 成膜温度: 60℃; c: 成膜温度: 90℃; d: 成膜温度: 120℃。

如图7,取上述成膜温度分别为30℃、60℃、90℃和120℃条件下所制得的复合膜,进行SEM( $\times 2000$ )图像分析。结合纯水通量测试结果和SEM分析,探讨了不同成膜温度对PVDF/PTFE复合膜的纯水通量的影响。

结合图7的SEM(放大倍数 $\times 2000$ )综合分析,当成膜温度较低的时候,PVDF溶液的蒸发速度减慢,PVDF溶胶分子在基膜表面有充足的时间形成大些的微孔,纯水更容易通过,因而复合膜的水通量较大;但随着成膜温度的逐渐升高,加快了PVDF溶液的蒸发速度,在较短的时间内PVDF溶胶分子在PTFE基膜上无法形成较大的微孔结构,因而复合膜水通量不断降低。此外,当温度升至180℃(PVDF分子的熔融温度为170℃)时,PVDF溶胶分子开始溶解而形成块状的紧密结构,同时部分微孔相应消失,因而纯水通量最小。

## 2.4 旋涂法制备PVDF/PTFE复合膜的成膜机理<sup>[10]</sup>

旋涂法制备PVDF/PTFE复合膜过程中,根据旋涂速度的不同,整个旋涂过程可以分为以下三个阶段:开始阶段为吸附滴胶阶段,在旋涂速度为180 r/min的条件下,将PVDF溶胶缓慢地滴加到低速旋转的PTFE微孔膜基膜上。此阶段滴加适量的溶胶量可使基膜完全浸润的同时获得要求的膜厚度,因而使用的溶胶量要比最终成膜所需要的多;中间阶段为扩展阶段,将旋涂速度从180 r/min增加到1000~3500 r/min,在这个加速过程中使PVDF溶胶在旋涂仪旋转并沿PTFE微孔基膜径向扩展。此阶段由于离心力的作用,PVDF溶胶不断甩离基膜中心,而开始阶段基膜上已经沉积了一定厚度的溶胶,在惯性力的作用下,上层部分的溶胶和下层部分的溶胶产生相对扭转形成漩涡,使得溶胶层不断变薄,基膜表面的溶胶层厚度非常均匀。在高速旋转的过程中,基膜表面粘性层之间的剪切力和惯性力逐渐达到平衡,溶胶也可以达到理想的厚度。最后阶段为旋离蒸发阶段,在旋涂速度为3500 r/min的条件下,PTFE微孔基膜高速旋转,溶胶层开始以相同的速度逐渐变薄,多余的溶胶由于离心力的作用流到基膜周边并以液滴的形式脱离,溶胶的粘性力占据主导地位;接着溶胶内部由于粘性效应形成一个微观流体网络,在溶胶变薄过程中溶剂的挥发逐渐占据主导地位,同时因溶胶粘度的不断提高,也加速了溶胶的凝结;最后,在范德华力等分子间作用力和PTFE基膜微孔中形成的钉键、钩键等胶粘作用下,PVDF溶胶分子和PTFE基膜发生有效结合,生成了稳定性良好的PVDF/PTFE复合膜。

## 3 结论

3.1 在一定的工艺条件下,通过控制PVDF溶液的浓度、旋涂仪旋转速度,以及成膜温度等,在PTFE微孔基膜上用旋涂法可以制得均匀致密的PVDF/PTFE复合膜,膜的厚度为200  $\mu\text{m}$ 。

3.2 PVDF/PTFE复合膜的拉伸强度和纯水通量与PVDF溶液浓度、旋涂仪旋转速度和成膜温度等因素密切相关,结合SEM对胶粘层PVDF溶胶分子所形成的微孔结构的分析,可知较为适宜的复合膜制备工艺为:PVDF溶液浓度6 g/L,旋涂速度2500 r/min,成膜温度90℃,在此条件下制备出的复合膜的纯水通量为605.2 L/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ),拉伸强度达26.34 MPa,相对于原先制备的PTFE微孔膜有显著的提升。

3.3 旋涂法制备 PVDF/PTFE 复合膜的过程可以分为滴胶、溶胶扩展和旋离蒸发三个阶段,每个阶段的主导因素不同,其对复合膜的成型有着重要的影响。此外,旋涂 PVDF/PTFE 复合膜成型的原因在于 PVDF 溶胶分子与 PTFE 基膜之间可以形成一定的分子间力及溶胶分子在基膜微孔之间渗透形成的钩键、钉键等胶粘作用。

### 参考文献

- [1] 郑振超,寇开昌,张冬娜,等.聚四氟乙烯表面改性技术研究进展[J].工程塑料应用,2013,2:105-110  
ZHENG Zhen-gang, KOU Kai-chang, ZHANG Dong-na, et al. Research progress on surface modification of PTFE [J]. Engineering Plastics Application, 2013, 2: 105-110
- [2] 董瑞,肖凯军. Al(OH)<sub>3</sub> 胶体对 PTFE 微孔膜表面改性的影响[J]. 现代食品科技,2013,2:6  
DONG Rui, XIAO Kai-jun. Surface modification of PTFE micro-porous membrane by Al(OH)<sub>3</sub> gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 2: 6
- [3] Tabata Y, Suzuki H, Ikeda S. Radiation modification of PTFE and its application [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 84: 14-19
- [4] Kecskeméti G, Hopp B, Smausz T, et al. Production of porous PTFE-Ag composite thin films by pulsed laser deposition [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(20): 7982-7988
- [5] Antar Y M M. Appendix I preliminary ideas: PTFE-based microwave laminates and making prototypes [J]. Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications, 2010: 463
- [6] Sawyer W G, Freudenberg K D, Bhimaraj P, et al. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles [J]. Wear, 2003, 254(5): 573-580
- [7] 叶飞鹏. PVDF/PTFE 复合膜驻极体性能的研究[D]. 浙江大学, 2006: 23  
YE Fei-peng, The study of PVDF/PTFE composite film electrets and its properties [D]. Zhejiang: Zhejiang University Master's Degree Thesis, 2006: 23
- [8] Teoh M M, Chung T S. Membrane distillation with hydrophobic macrovoid-free PVDF-PTFE hollow fiber membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2009, 66(2): 229-236
- [9] Teoh M M, Chung T S, Yeo Y S. Dual-layer PVDF/PTFE composite hollow fibers with a thin macrovoid-free selective layer for water production via membrane distillation [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 171(2): 684-691
- [10] Bamperng S, Suwannachart T, Atcharyawut S, et al. Ozonation of dye wastewater by membrane contactor using PVDF and PTFE membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 72(2): 186-193
- [11] Kim S W. Preparation and barrier property of poly (vinyl alcohol)/SiO<sub>2</sub> hybrid coating films [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2008, 25(5): 1195-1200
- [12] Yimsiri P, Mackley M R. Spin and dip coating of light-emitting polymer solutions: Matching experiment with modelling [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(11): 3496-3505

欢迎订阅 EI 收录期刊、中文核心期刊

## 《现代食品科技》

邮发代号: 46-349 刊号: ISSN 1673-9078/CN 44-1620

每期定价 15 元, 全年 12 期仅 180 元。欢迎食品及相关行业的机构和科学工作者到各地邮局订阅, 并踊跃投稿或建立广告宣传和产学研合作关系。

地址: 广州五山华南理工大学轻工与食品学院麟鸿楼 508, 邮编: 510640

电话: 020-87113352

E-mail: xdspkj@126.com

投稿系统: www.xdspkj.cn