

高性能气体分离聚苯胺膜

黄美荣¹ 周海骏¹ 李新贵¹ 张 炜²

(1. 同济大学材料学院混凝土材料国家重点实验室, 上海 200092;

2. 复旦大学聚合物分子工程教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 系统论述了聚苯胺自支撑膜和复合膜对气体的分离性能。聚苯胺自支撑膜、聚苯胺/尼龙、聚苯胺/氧化铝复合膜经去掺杂尤其是二次掺杂后, 气体分离系数会显著提高, 而透气系数略有提高。二次掺杂态聚苯胺自支撑膜和复合膜都具有极高的氧氮分离性能, 已超过了一般聚合物材料的上限, 最优异的聚苯胺膜的氧氮选择分离系数可达 30, 它在包括有高选择性能膜材料聚酰亚胺、聚吡咯、聚三唑等在内的所有聚合物膜中排行第一, 对空气分离显示出极大优势。预计聚苯胺复合膜及纳米膜在医疗保健等领域具有很大应用潜力。

关键词: 聚苯胺; 气体分离膜; 空气分离; 应用

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2003)01-0016-04

High-performance polyaniline membranes for gas separation

HUANG Mei-rong¹, ZHOU Hai-jun¹, LI Xin-gui¹, ZHANG Wei²

(1. State Key Laboratory of Concrete Materials Research, College of Materials Science & Engineering,

Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers,

Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: The gas separation performance of free-standing and composite polyaniline membranes are generally reviewed. The gas selectivity coefficients of the free-standing polyaniline membrane, polyaniline/nylon, polyaniline/alumina composite membranes will be significantly enhanced while the permeability coefficients are increased slightly after being treated by undoping, especially by the second doping step. The free-standing and composite polyaniline membranes treated by the second doping show extremely high selectivity coefficient for oxygen over nitrogen. Their perm-selectivity has exceeded the top limit of other general polymer materials. Their highest selectivity coefficient for oxygen over nitrogen can reach 30. Polyaniline ranks the first among the available high selectivity membrane materials including polyimide, polypyrrolone and polytriazole. Polyaniline membrane has shown predominance for air separation. It is forecast that polyaniline composite membranes and nanometer membranes have important potential of application in the areas such as medical and health protection.

Key words: polyaniline; gas separation membrane; air separation; application

气体分离膜材料主要有聚酰亚胺、聚吡咯、纤维素衍生物、硅橡胶、聚碳酸酯、沸石、碳分子筛等^[1]。近年来研究表明, 具有共轭大 π 键结构的导电聚合物也具有优异的气体分离性能, 其中以聚苯胺最为突出^[2-6]。笔者在总结国内外最新研究成果的基础上, 对聚苯胺自支撑膜及复合膜的气体分离性能进行综述, 阐明聚苯胺膜应用于空气分离领域的极大

优势, 并指明未来的研究方向。

1 聚苯胺自支撑膜

聚苯胺是一种最具发展潜力的共轭聚合物, 可以通过掺杂过程使其电导率从 10^{-10} S/cm 增大到 10^3 S/cm, 从绝缘体变为半导体。近来的研究发现, 聚苯胺膜在掺杂的过程中除电导率有变化外, 其气

收稿日期: 2002-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(20274030)和复旦大学聚合物分子工程教育部重点实验室基金

作者简介: 黄美荣(1963-), 女, 硕士, 副教授; 李新贵(1963-), 男, 博士, 研究员, 博导, 通讯联系人, 教育部长江学者特聘教授, 主要从事功能高分子材料的研究, lixingui@tongji.edu.cn。

体分离性能也有奇异的变化。其气体选择分离系数陡然增加,尤其以二次掺杂态聚苯胺膜最为显著,其中氢氮分离系数、氧氮分离系数和二氧化碳甲烷分离系数最高分别可达3 590、30和336(见表1),是高

性能聚吡咯膜的相应分离系数389、12.5和150的9.5、2.4和2.2倍,比热门研究领域聚酰亚胺膜更高,只是聚苯胺膜的透气系数还不高,其中透氢系数和它们相当、透氧系数和透二氧化碳系数要小数倍。

表1 几种二次掺杂态聚苯胺膜的透气性能^[2,4-6]

溶剂	成膜参数		渗透系数/Barrer					选择系数				研究者
	质量分数/%	膜厚/ μm	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ /N ₂	O ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄	H ₂ /O ₂	
THF、NMP	5.0	100	9.1	—	—	—	0.0035	3590	30	336	—	Anderson 等 ^[2]
NMP	—	20	3.33	—	0.64	0.107	0.021	150.8	4.86	—	31.12	Illing 等 ^[4]
NMP	1.5	10~15	—	0.007	0.547	0.142	0.010	435	14.2	78.1	30.6	Rebattet 等 ^[5]
THF、NMP	5.0	—	11.6	0.004	1.30	0.200	<0.002	1102	19	>160	—	Mattes 等 ^[6]

注:1 Barrer是指每秒钟1 cmHg压力差下1 cm²膜面积中透过1 cm的膜的气体在标准状态下的毫升数的十亿分之一,即1 Barrer = 10⁻¹⁰ cm²·s⁻¹·cmHg⁻¹,1 cmHg = 1 333 Pa。

尽管膜材料相同,但不同的研究者的研究结果有很大的差距(表1)。氢氮分离系数最大的有3 590,而最小的只有150.8;二氧化碳甲烷分离系数也是从336到78.1不等,只有氢氧分离系数相差不大。如此大的差异除了与各自合成或选用的聚苯胺的相对分子质量和相对分子质量分布不同之外,还与各自的成膜工艺如成膜时间、成膜温度、成膜液组成及浓度等密切相关,因为它将导致膜的二次结构产生巨大差异,而这一差异又将导致膜在酸掺杂和去掺杂过程中的掺杂度的差异。例如,Anderson^[2]和Mattes^[6]等先使用四氢呋喃(THF)将聚苯胺溶胀,再使用N-甲基吡咯烷酮(NMP)配成一定浓度的溶液浇铸所得的聚苯胺膜,都具有较大的气体分离选择系数。这与低沸点溶剂的存在使成膜过程中的挥发速度适度增加进而形成较致密的形态结构有关。另外,掺杂度以及掺杂态稳定性的差异也是导致透气性能差异的原因之一,这一点和掺杂态聚苯胺的电导率的多样性和不稳定性同出一辙。

同种聚苯胺在不同掺杂态下透气性能也有很大的差异^[5,7-8]。表2列出了经盐酸掺杂的不同掺杂态的聚苯胺膜的气体透过性能。对于同一种气体而言,一次掺杂膜的透过系数比本征态膜小,而经过去掺杂后,渗透系数又有较大的提高。用较低浓度质子酸二次掺杂后,其渗透系数仍有一定程度的下降,但仍然大于本征态膜和掺杂态膜。分离系数的变化更为明显,尽管本征态膜经一次掺杂后分离系数有所下降,但经去掺杂和二次掺杂后,其分离系数显著提高,尤其是二次掺杂后,可使聚苯胺膜对H₂/N₂、O₂/N₂和CO₂/CH₄气体对的分离系数与本征态相比均提高1倍多。

表2 盐酸掺杂的不同掺杂态聚苯胺膜的透气性能^[5]

掺杂状态	渗透系数/Barrer					分离系数				
	H ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	H ₂ /N ₂	O ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄	H ₂ /O ₂	
本征态	3.707	0.476	0.121	0.019	0.013	195	6.4	36.6	30.6	
一次掺杂	0.29	0.035	0.01	0.004	0.003	73	2.5	11.7	29	
去掺杂	4.53	0.568	0.15	0.016	0.011	283	9.4	51.6	30.2	
二次掺杂	4.35	0.547	0.142	0.01	0.007	435	14.2	78.1	30.6	

聚苯胺膜的这种气体分离性能随掺杂态的变化可用自由体积模型(图1)来解释^[2]。在本征态聚苯胺膜中,假设其自由体积在膜内部形成了许多自由通道[图1(a)],并且相邻的两条通道之间有一些更小的通道联结,但这些通道只允许小分子气体较快地通过,而较大的气体分子通过的速度较慢,因此本征态聚苯胺膜具有中等的渗透系数和分离系数(见表2)。当本征态膜经质子酸掺杂后,H⁺与聚苯胺分子链中亚胺上的氮原子结合的同时,其溶剂化的反离子[图2(b)中黑点]也伴随于其附近,且这种反离子直径较大,从而导致膜内自由体积变大,使分离系数下降,但是此时掺杂剂的存在,占据了一部分空间,所以此时膜对气体的渗透系数较小。聚苯胺膜经去掺杂后,掺杂剂被除去,同时又没有外力使聚苯胺的分子链回复到未掺杂前的状态,这就使总的自由体积较本征态时有所增大[图1(c)],所以此时膜对气体的渗透系数和分离系数都有较大的提高;二次掺杂后,又有部分自由体积被掺杂剂占据[图1(d)],也使得气体的渗透系数下降,但此时自由体积对大分子和小分子的影响是不同的,小分子气体的渗透系数变化不大,而大分子气体的渗透系数却下降较大,这也就使得在二次掺杂的聚苯胺膜中,氢氮

分离系数、氧氮分离系数和二氧化碳甲烷分离系数都有较大的提高,而氢氧分离系数的变化不大。因此可以通过控制二次掺杂时的掺杂剂的用量,调节聚苯胺膜对各气体对的分离系数。

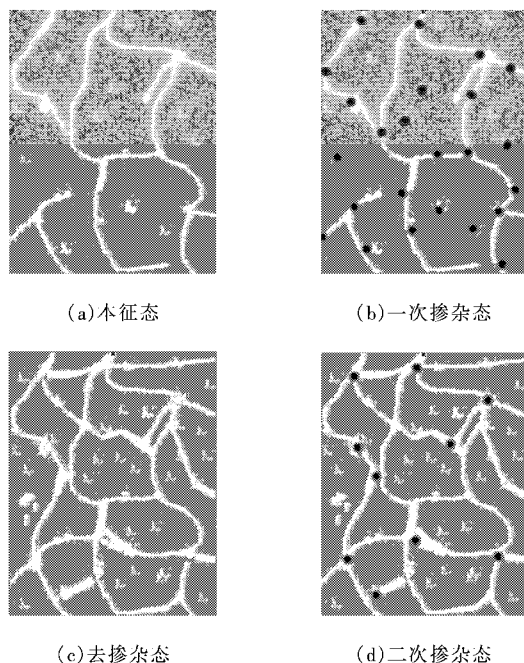


图 1 不同掺杂态下的聚苯胺膜的自由体积模型

不同的质子酸掺杂剂对聚苯胺膜的气体分离性能也有较大的影响^[9-10]。Kuwabata 等^[9]分别用盐酸、硫酸和对甲基苯磺酸二次掺杂后的聚苯胺膜,其渗透系数逐渐下降,而分离系数变化不大(表 3)。这与反离子的体积大小有关,掺杂度相同时,反离子体积越小,膜内自由空间越大,则渗透系数越大。但掺杂剂对分离系数影响不大。

表 3 不同掺杂剂对聚苯胺膜二次掺杂态透气性能的影响^[9]

掺杂剂	掺杂度	渗透系数/Barrer				分离系数	
		N ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄
盐酸	0.36	0.0096	0.142	0.0089	0.462	14.7	51.9
硫酸	0.36	0.0089	0.119	0.0082	0.426	13.4	52.0
对甲基苯磺酸	0.36	0.0067	0.100	0.0073	0.401	14.9	54.9

Anderson^[2]和 Conklin^[11-12]等研究了不同的卤化氢对聚苯胺膜分离性能的影响。当用卤化氢水溶液对聚苯胺膜进行掺杂时,气体渗透系数变化趋势为:HF > HCl > HBr > HI,这主要是因为在水溶液中由于溶剂化作用,反离子 F⁻、Cl⁻、Br⁻、I⁻的体积依次由大到小变化。当用气态卤化氢对聚苯胺膜进行

掺杂时,得到结果则不同。气体渗透系数的变化趋势为:HF > HI > HBr > HCl。对于气态卤化氢,各反离子大小为:I⁻ > Br⁻ > Cl⁻ > F⁻,但是这些气态卤化氢对聚苯胺膜有着不同程度的腐蚀作用,HCl 最强,其次是 HBr 和 HI,而 HF 对膜腐蚀最小,由于反离子大小以及酸对膜腐蚀作用两方面的综合作用,导致出现以上结果。

聚苯胺膜中的残留溶剂对透气性能也有影响。由 NMP 溶液浇铸的聚苯胺膜,当热处理时间分别为 0、2 和 5 h 时,膜内残留溶剂质量分数分别为 10%、3% 和 0%,此时,氢气的渗透系数从 1.15 Barrer 升高至 2.8 Barrer,再增大为 3.7 Barrer;氧气的渗透系数分别为 0.045、0.1 和 0.13 Barrer^[13-14],其他气体的渗透系数也是依次升高,这可能是由于溶剂的存在,限制了气体在膜表面的溶解以及在膜内的扩散。且溶剂含量越高,对气体的溶解与扩散的阻力越大。

从表 1 ~ 表 3 以及 Wang 等^[15]研究可以看出,不论何种聚苯胺膜,它们对各种气体的透气系数大小基本上按下列次序依次变小:He ≈ H₂ > CO₂ > O₂ > N₂ > CH₄。这与其他均质致密膜变化规律一致。操作温度对聚苯胺膜的气体透过行为的影响也和其他气体分离膜类似。Wang 等^[15]研究了 15 ~ 40℃ 下聚苯胺膜对上述 6 种气体的透过行为,并计算出它们的渗透系数活化能分别为:18.8、18.4、20.3、20.7、26.8 和 37.5 kJ/mol。各气体对的分离系数也是随着温度升高而下降,如氧氮分离系数从 9.2 减为 8.2;而二氧化碳甲烷分离系数则从 92 减小为 50。Chang 和 Hiroshi^[16-17]等则研究了气体在 19 ~ 60℃ 下的分离性能,得到了同样的结论,但计算出的气体活化能有一定的差异,氦气、氢气、二氧化碳、氧气和氮气的渗透系数活化能分别为 17.5、20.8、23.5、23.8 和 27.6 kJ/mol,这一差异与他们所研究的温度范围不完全相同有关。

2 聚苯胺复合膜

由上述讨论可知,聚苯胺自支撑膜的最大缺陷就是透气系数低,比常见聚合物膜要低 1 个数量级,严重阻碍了它在膜分离中的应用。解决膜的透气流量低的简单而有效的方法之一是将膜薄化,尽管薄化不能提高膜的透气系数。当然,薄化会带来膜的力学性能的降低,解决的办法就是进行 2 层或多层膜的复合。通常的方法是将高选择分离性能的膜材料在膜厚度上微米化或纳米化后充当选择分离致密层,将高力学性能的聚合物膜材料高空隙率化后充

当支撑层,由此组成复合膜。复合方法可以是简单的层压复合;也可以先制得一种膜,然后将另一种膜材料的溶液涂敷其上,或将膜浸渍于另一种聚合物或单体溶液中进行复合;在多孔支撑层上进行原位聚合直接成膜也是常用方法之一。一般而言,复合膜的透气性能主要由选择分离致密层所决定,而支撑层对分离性能影响不大。

人们已在聚苯胺复合膜的研究方面进行了一些成功的尝试。Lee等^[18]使用特殊的粘结复合技术制得了聚苯胺/尼龙复合膜。先将聚苯胺溶液浇铸在玻璃板上,真空干燥后,将事先浸渍有20% NMP水溶液的、孔径为0.2 μm的尼龙多孔膜贴于其上,于60℃真空干燥除去水和NMP。由于水蒸发得比NMP快,因此,烘干过程中NMP浓度逐渐增加,位于两膜之间的NMP将溶解聚苯胺膜表面。待NMP完全蒸发后,尼龙膜就粘结在聚苯胺膜上了。这样可制得5 μm厚的聚苯胺/尼龙复合膜。它对氧气渗透系数为0.49 Barrer,氧氮分离系数为7.2;一次掺杂并去掺杂后氧气渗透系数下降为0.28 Barrer,氧氮分离系数上升为8.5;而经0.02 mol/L盐酸二次掺杂2 h后,则氧气渗透系数继续下降为0.1 Barrer,氧氮分离系数陡然上升为28。二次掺杂后获得这样高的氧氮分离系数在现有膜材料中是极为少见的。

Kuwabata等^[9]利用溶液浇铸法制得了聚苯胺/微孔氧化铝复合膜。所使用的微孔氧化铝基膜含有几乎贯穿整个膜厚的、孔径为200 nm的圆柱状孔,这些孔在膜的一侧近表面处分支为孔径约20 nm的孔。将聚苯胺的NMP溶液浇铸在处理过的微孔氧化铝基膜上,待溶剂挥发后,即可获得厚度为3~4 μm的聚苯胺/氧化铝复合膜。研究该复合膜在不同掺杂度时的气体透过性能可知,用1.0 mol/L盐酸对聚苯胺/氧化铝复合膜进行掺杂,当二次掺杂度分别为0、13%、22%、31%、38%和50%,它们对氧气渗透系数从0.55 Barrer逐渐下降为0.15 Barrer,而氧氮分离系数却从9.5逐渐上升至15。此外,Kuwabata等还发现,对于复合膜来说,聚苯胺膜的厚度必须大于3 μm才能得到无微孔或缺陷的致密膜。而这一厚度比聚苯胺自支撑膜的最小厚度20 μm要小得多,由此可见氧化铝基膜支撑层的作用。

尽管聚苯胺复合膜在透气系数上与自支撑膜不相上下,但预计它们在实际混合气体的分离过程中,与选择分离层厚度密切相关的气体渗透速率或气体流量将有大幅度上升,这主要是由起选择分离作用的膜薄化而引起的,且膜越薄,上升幅度越大。

3 应用

有关聚苯胺膜用于气体分离的研究目前多集中在纯气体透过行为的研究阶段,商业性的应用还未见报道。分析现有研究结果,在化工领域中常见的3个气体分离对——氢与氮、氧与氮以及二氧化碳与甲烷中,聚苯胺膜都具有很大的分离系数,因而具有很大的应用潜力,这其中又以氧氮分离最具吸引力,因为聚苯胺不管掺杂与否,其氧氮分离系数均在5以上(表1~表3)。聚苯胺膜的这种亲氧性主要来自于氧气分子与聚苯胺之间存在顺磁相互作用^[3],使氧气在膜中具有较大的扩散系数,因而聚苯胺膜特别适合用于氧氮混合气体或空气的分离。当然,各种不同掺杂态的聚苯胺或不同组装方式的聚苯胺具有不同的氧氮分离性能(图2),其中以二次掺杂态聚苯胺膜和聚苯胺复合膜性能最为优异,它们的透氧系数和氧氮分离系数都超过了一般聚合物的分离上限。最优异的聚苯胺膜的氧氮选择分离系数是如此之高,它在包括高选择性能的聚酰亚胺膜、聚吡咯膜、聚三唑膜在内的所有聚合物中排行第一。它的氧氮分离系数与制作成本高昂的沸石4A/Matrimid[®]有机无机共混膜相当^[1],这对于商业应用来说具有极大的吸引力。惟一遗憾的是它们的透气量还偏小,还没有进入高吸引力的商业化膜区域。目前,攻克聚苯胺膜的低透气性已成为其实用化、工业化的核心问题。笔者认为,这可以从成膜技术上入手,膜的纳米化是提高膜透气量的有效办法之一。目前所制得的聚苯胺膜厚度都在微米级范围,今后应探求新的制膜技术使膜厚度达到纳米级尺度,或者,将纳米级聚苯胺粉末包覆在某种聚合物膜基体中,形成携带有纳米颗粒的所谓纳米膜。当然,膜在厚度上的极薄化将带来力学性能的下降,这可以通过各种形式的复合方式来解决。如通过等离子体原

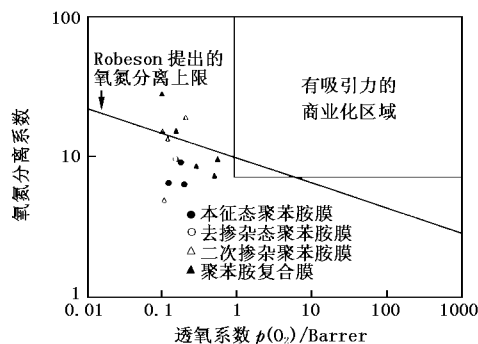


图2 聚苯胺膜的氧氮分离性能汇总

业化发展的阶段,要投入实际应用还有待继续努力。 TiO_2 光催化作为一项很有前途的水处理技术,在基础理论和实际应用等方面还有许多工作有待进一步完善。

参考文献

- [1] 赵进才,张丰雷.[J].感光科学与光化学,1996,14(3):269-273.
- [2] 沈伟初,赵文宽,贺飞,等.[J].化学进展,1998,10(4):349-361.
- [3] 范崇政,肖建平,丁延伟.[J].科学通报,2001,46(4):265-273.
- [4] 孙奉玉.[J].催化学报,1999,19(3):233.
- [5] Bieckley I B, Gonzalez-Carreño T, Lees J S, *et al.* [J]. J Solid State Chem, 1991, 92: 178-190.
- [6] 陶跃武,赵梦月,陈士夫,等.[J].催化学报,1997,18(4):345-347.
- [7] 陈士夫,赵梦月,陶跃武.[J].太阳能学报,1995,16(3):234-239.
- [8] Okamoto K, Yamamoto Y, Tanaka H, *et al.* [J]. Bull Chem Soc Jpn, 1985, 58: 2023.
- [9] Bahnemann D, Bockekmann D, Goslich R. [J]. Sol Ener Mat, 1991, 24: 564-583.
- [10] 曹亚安,陈咏梅,管自生,等.[J].感光科学与光化学,1999,17(2):100-102.
- [11] 许宜铭.[J].高等学校化学学报,2000,21(10):1539-1542.
- [12] Ohno T, Saito S, Fujihara K, *et al.* [J]. Bull Chem Soc Jpn, 1996, 69: 3059-3064.
- [13] Jineai Zhao, Hidaka H, Takamura A, *et al.* [J]. Langmuir, 1993, 9: 1646-1650.
- [14] 曹亚安,沈东方,张昕彤,等.[J].高等学校化学学报,2001,22(11):1910-1912.
- [15] 王承遇,钟萍,姜妍彦,等.[J].催化学报,2000,21(5):443-445.
- [16] Masakazu A, Takafumi K, Sukeya K. [J]. J Phys Chem, 1988, 92(2): 438-440.
- [17] Fu X Z, Clark I. A, Yang Q, *et al.* [J]. Environ Sci Technol, 1996, 30: 647-653.
- [18] Anderson C, Bard A J. [J]. J Phys Chem, 1995, 99: 9882-9885.
- [19] Pelizzetti E, Maurino V, Minero C, *et al.* [J]. Environ Sci Technol, 1990, 24: 1559-1565.
- [20] 陈士夫,赵梦月,陶进武.[J].工业水处理,1996,16(1):17-19.
- [21] Ollis D F, Pelizzetti E, Serpone N. [J]. Environ Sci Technol, 1991, 25(9): 1522-1529.
- [22] Hidaka H, Yamada S, Suenaga S, *et al.* [J]. J Mol Cat, 1990, 59: 279-290.
- [23] Pelizzetti E, Minero C, Maurino V, *et al.* [J]. Environ Sci Technol, 1989, 23: 1380-1385.
- [24] 于亮. 纳米 TiO_2 光催化剂的制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学. 2000.
- [25] 方佑龄,赵文宽,尹少华,等.[J].应用化学,1997,14(2):81-83.
- [26] 方佑龄,赵文宽,张国华,等.[J].环境化学,1997,16(5):413-417. ■
- [1] 黄美荣,李新贵,董志清.[J].现代化工,2002,22(9):10-15.
- [2] Anderson M R, Mattes B R, Reiss H, *et al.* [J]. Science, 1991, 252: 1412-1415.
- [3] Rebattet L, Escoubes M, Genies E, *et al.* [J]. J Appl Polym Sci, 1995, 58: 923-933.
- [4] Illing G, Hellgardt K, Wakeman R J, *et al.* [J]. J Membrane Sci, 2001, 184: 69-78.
- [5] Rebattet L, Escoubes M, Genies E, *et al.* [J]. J Appl Polym Sci, 1995, 57: 1595-1604.
- [6] Mattes B R, Anderson M R, Conklin J A, *et al.* [J]. Synthetic Metals, 1993, 55-57: 3655-3660.
- [7] Anderson M R, Mattes B R, Reiss H, *et al.* [J]. Synthetic Metals, 1991, 41-43: 1151-1154.
- [8] Regents of the University of California. Membranes having selective permeability[P]. US 5096586, 1992-03-17.
- [9] Kuwabata S, Martin C R. [J]. J Membrane Sci, 1994, 91: 1-12.
- [10] Hachisuka H, Ohara T, Ikeda K I, *et al.* [J]. J Appl Polym Sci, 1995, 56: 1479-1485.
- [11] Conklin J A, Anderson M R, Kaner R B. [J]. Polym Preprints, 1994, 35: 313-314.
- [12] Conklin J A, Anderson M R, Reiss H, *et al.* [J]. J Phys Chem, 1996, 100: 8425-8429.
- [13] Rebattet L, Escoubes M, Pineri M, *et al.* [J]. Synthetic Metals, 1995, 71: 2133-2137.
- [14] Yang J P, Sun Q S, Hou X H, *et al.* [J]. Chin J Polym Sci (Eng Ed), 1993, 11: 121-124.
- [15] Wang H L, Mattes B R. [J]. Synthetic Metals, 1999, 102: 1333-1334.
- [16] Chang M J, Liao Y H, Myerson A S, *et al.* [J]. J Appl Polym Sci, 1996, 62: 1427-1436.
- [17] Hiroshi T, Masakatsu Y, Kazuyuki O, *et al.* [J]. Jpn J Polym Sci Technol, 1994, 51: 137-139.
- [18] Lee Y M, Seong Y H, Lee Y K, *et al.* [J]. Ind Eng Chem Res, 1999, 38: 1917-1924. ■

(上接第19页)

位聚合将苯胺单体沉积聚合在高空隙率的纳米孔基膜上;或在微米孔基膜和苯胺膜之间夹入高透气性的硅橡胶膜,以更有效的封闭多孔基膜的气体泄漏。

4 结语

聚苯胺是近年来合成的一种崭新的膜分离材料,虽然聚苯胺膜在气体分离方面的研究取得了长足的进展,但离工业化应用还有差距。在保持其分离系数的同时,大大提高透气流量,并进行适宜的掺杂使其性能稳定已成为其进一步发展过程中亟待解决的关键问题。

参考文献