

# 小分子添加剂在气体分离膜中的应用进展

刘宗华, 张子勇<sup>\*</sup>

(暨南大学生命科学技术学院化学系, 广州 510632)

**摘要:**综述了小分子添加剂在气体分离膜研究中的应用进展, 重点介绍了钴金属络合物和小分子液晶对提高膜渗透选择性能的特殊作用。

**关键词:**气体分离膜; 钴络合物; 液晶

## 引言

膜法气体分离技术是指混合气体在压力差驱动下, 利用高分子膜分离或富集其中某一组分的技术。它具有无污染、能耗低、分离效率高、设备体积小、规模和处理能力可任意变化等特点, 已在工业生产、环境保护<sup>[1]</sup>、生物材料<sup>[2]</sup>等方面显示出诱人的应用前景。气体分离技术被认为是适应当代新产业发展及 21 世纪最有发展前途的高新技术之一。

高分子膜是膜法气体分离过程的核心。膜材料的研制开发中存在一个基本矛盾: 即透过性能好的总是分离性差, 选择性好的却又透气性低。针对这一难题, 研究主要从两方面着手, 一是寻找性能优异的膜材料, 二是探索精湛的制膜技术。前者主要包括对已有膜材料的化学、物理改性, 以及新材料的设计合成<sup>[3~8]</sup>。其中, 从不同的气体透过机理考虑, 在膜中键入或混入各种小分子物质提高其透过和分离性能, 是当前值得注意的研究动向。小分子添加剂的种类颇多, 作用各异, 但大致归纳起来有这样几类: 金属络合物、小分子液晶、含氟含氮化合物以及无机物等; 其中, 前者的研究颇受关注。

## 1 膜法气体分离机理

用于气体分离的高分子膜主要是非多孔质膜。所谓非多孔质膜是指高分子链间由于分子运动能够张开 1nm 以下空隙的情况。气体在非多孔质膜中的透过, 一般被认为是溶解-扩散机制: 即在膜的高压侧气体首先吸附在膜的表面, 然后立即向构成膜的高分子链节之间渗透(此现象称为气体的溶解, 符合 Henry 定律, 用溶解系数  $S$  表征)。气体在膜内由于浓度差产生移动(这称为气体的扩散, 用扩散系数  $D$  表征); 最后, 气体由膜的低压侧逸出。此外, 当膜中存在能与某种气体进行可逆吸附的物质时, 除 Henry 吸附外, 还存在符合 Langmuir 方式的吸附。这一吸附方式增加了气体输送的途径, 被称为二元模型(Dual-mode model), 常将这一部分气体透过称为促进输送(Facilitated transport)。

由气体透过系数  $P$  ( $P = SD$ ) 作为分离膜透气性大小的量度, 其量纲为  $\text{cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 1.333\text{Kpa}$ ; 常用 Barrer 作为气体透过系数的单位( $1 \text{ Barrer} = 10^{-10} \text{ cm}^3(\text{STP}) \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 1.333\text{Kpa}$ )。将

**作者简介:**刘宗华(1977—), 女, 暨南大学生命科学技术学院硕士生, 研究方向为高分子气体分离膜;

<sup>\*</sup> 通讯联系人。

两种气体的透过系数之比称作理想分离系数,用  $\alpha$  表示,以此作为衡量分离膜对两种气体选择性的大小。

## 2 添加金属络合物

引入过渡金属离子改善膜的透气性和分离选择性,是从生物体血红蛋白中的铁卟啉络合物高效结合及可逆吸附  $O_2$  而受到启发的。研究发现,铁、铜、锰、银、钴等多种金属络合物对提高某些气体的选择透过性的确有效。膜中过渡金属络合物可选择吸附某一气体组分,促进或阻碍该气体对膜的渗透性能,其他气体不受影响,从而导致分离效率的提高。

### 2.1 钴络合物

含钴络合物气体分离膜已有文献综述<sup>[9]</sup>,近来仍有不少报道。使用的钴络合物见图 1。各种含钴络合物膜的透气性能见表 1。膜材料已不再局限于聚丙烯酸酯。Chen 等<sup>[10]</sup>研究了聚碳酸酯(PC)/Co(Salen)共混物膜的透气性能。结果表明,Co(Salen)的加入,使  $O_2/N_2$  选择性上升, $O_2$ 、 $N_2$  的透过性能下降。例如,含 3%(wt)氧载体的 PC 共混物膜 5℃ 时  $P_{O_2}$  为 0.33Barrer,  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 15(PC 膜的  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 8.8),但  $O_2/N_2$  选择性随温度升高而下降。为提高共混物膜的透气性,Chen 等<sup>[11]</sup>在膜中又加入二甲基甲酰胺(DMF),发现与 Co(Salen)的影响相反,在提高透气性的同时,降低了  $O_2/N_2$  分离性能。通过调整二者的含量,性能较优的共混物膜(含有 19%(vol)的 DMF 和 4.8%(wt)的 Co(Salen)),35℃ 时的  $O_2$  透过速率为  $0.61 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 1.333 \text{ KPa}$ ,  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 4.7。放置 400 天后,该膜的  $O_2$  透过速率仍为  $0.88 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 1.333 \text{ KPa}$ ,而其选择性并不降低。5℃ 时,该膜的  $\alpha_{O_2/N_2}$  可高达 7.9。

Chen 等<sup>[12]</sup>还研究了三价钴络合物乙酰丙酮钴( $\text{Co}(\text{Acac})_3$ )与 PC 复合膜的富氧性能。 $\text{Co}(\text{Acac})_3$  的加入量高达 20%(wt)时仍可得到均质膜。随  $\text{Co}(\text{Acac})_3$  含量升高, $O_2/N_2$  的溶解度系数和扩散系数同时提高,而  $O_2/N_2$  分离系数的提高主要是由于膜扩散选择性的提高。在上游侧压力为 0.1MPa、25℃ 条件下,  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 8.4,但  $P_{O_2}$  仅为 0.65Barrer。

另外,Chen 等<sup>[13]</sup>还研究了钴 Schiff 碱络合物 Co(SalPr)与 PC 复合膜的富氧性能。发现当加入 3%(wt)的 Co(SalPr)时, $O_2$  透气性和  $O_2/N_2$  选择性可同时提高,35℃ 时,  $P_{O_2}$  为 1.65Barrer,  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 6.92。当 Co(SalPr)含量大于 3%(wt)时,透气性提高而选择性降低。

Nishide 等<sup>[14]</sup>选择偏氯乙烯与乙烯基咪唑的无规共聚物(PVDC-co-VIm)与钴卟啉络合物(CoP)制成复合膜。该复合膜由于 CoP 载体对  $O_2$  的选择性输送而获得较高的氧氮分离系数,例如,当上游侧  $O_2$  分压为 0.667KPa 时,CoP 含量大于 20%(wt)复合膜的  $\alpha_{O_2/N_2} > 100$ ,但是透气系数仅为几个 Barrer。

Park 等<sup>[15,16]</sup>采用聚烷基胺(PAAm)与水杨醛、二价钴反应,形成大分子钴 Schiff 碱络合物(见图 2)后与聚乙烯醇(PVA)共混制膜。该膜的  $P_{O_2}$  与  $\alpha_{O_2/N_2}$  均随大分子钴络合物含量增加而增大,其最大值( $P_{O_2}$  为 0.0282Barrer,  $\alpha_{O_2/N_2} = 8$ )分别是原始共混膜的 10 倍和 4 倍。选择性的提高主要是由于形成大分子钴络合物后  $O_2$  溶解能力的增加所致。

上述报道使用的膜材料的透气性较小。张子勇等<sup>[17,18]</sup>通过磺化、中和反应制备了乙丙三元橡胶(EPDM)磺酸钴离聚体( $\text{Co}^{2+} - \text{S} - \text{EPDM}$ )。发现该离聚体膜也具有对氧的促进输送功能,即透氧

系数随上游侧压力降低而升高。ESR 测定表明, 二价钴离子与磺酸基可能形成了大分子络合物。张子勇等<sup>[19]</sup>进一步研究了 Co(Salen) 与上述离聚体复合膜的富氧性能, 结果发现,  $P_{O_2}$  与  $\alpha_{O_2/N_2}$  随气体压差的降低或 Co(Salen) 含量的增加而同时升高, 与 EPDM 膜相比, 含 Co(Salen) 15% (wt) 的  $Co^{2+}$ -S-EPDM/Co(Salen) 共混膜的  $P_{O_2}$  和  $\alpha_{O_2/N_2}$  分别从 11.0Barrer 和 4.38 升到 37.0Barrer 和 9.60 Barrer(25℃, 0.05Mpa)。Co(Salen) 的加入量最高可达 15% (wt)。

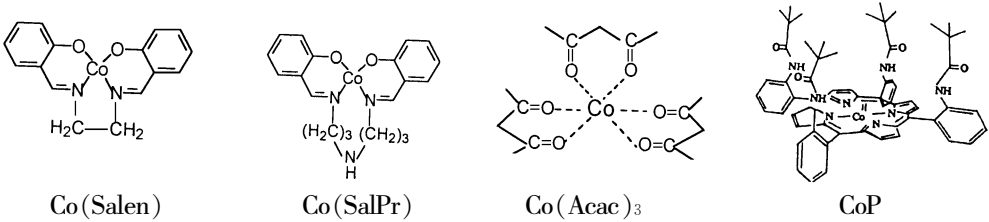


图 1 钴络合物的分子式

表 1 含钴络合物共混膜的渗透选择性

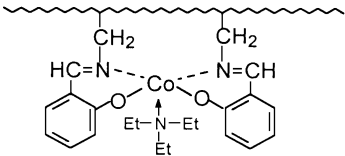
| 共混物膜                               | 络合物含量<br>/wt % | 压力<br>/Mpa           | 温度<br>/℃ | $P_{O_2}$<br>/Barrer | $\alpha_{O_2/N_2}$ | 文献   |
|------------------------------------|----------------|----------------------|----------|----------------------|--------------------|------|
| PC/Co(Salen)                       | 3              | 0.3                  | 5        | 0.33                 | 15                 | [10] |
| PC/Co(Salen)/DMF                   | 4.8            | —                    | 35       | 0.61 *               | 4.7                | [11] |
| PC/Co(Acac) <sub>3</sub>           | 20             | 0.1                  | 25       | 0.65                 | 8.4                | [12] |
| PC/Co(SalPr)                       | 3              | —                    | 35       | 1.65                 | 6.92               | [13] |
| PVDC-co-VIm/CoP                    | >20            | $6.7 \times 10^{-4}$ | 30       | 2.6                  | >100               | [14] |
| PAAm/Co <sup>2+</sup> +PVA         | —              | —                    | —        | 0.028                | 8                  | [16] |
| Co <sup>2+</sup> -S-EPDM/Co(Salen) | 15             | 0.05                 | 25       | 37                   | 9.6                | [19] |
| PDMS-S-VP/Co(Salen)                | —              | —                    | —        | 405                  | —                  | [20] |
| PDMS/CoP                           | 1              | 0.1                  | 30       | 680                  | 2.046              | [21] |

\* 单位为  $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot 1.333\text{Kpa}$ 。

Hong 等<sup>[20]</sup> 则选用透气性较好的二甲基硅氧烷、苯乙烯和 4-乙烯基吡啶的三元无规共聚物 (PDMS-S-VP) ( $P_{O_2}$  为 275 Barrer) 和 Co(Salen) 制膜,  $P_{O_2}$  提高到 405Barrer。O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 渗透性升高被认为是由于 Co(Salen) 分子体积较大, 增大了膜材质分子的自由体积, 但  $\alpha_{O_2/N_2}$  变化不大。杨继萍等<sup>[21]</sup> 采用硅橡胶 (PDMS) 与 CoP 制得复合膜, CoP 含量在 5% (wt) 时, 透气性稍有提高, 而  $\alpha_{O_2/N_2}$  同样变化不大。

2.2 其它金属络合物

Yang 等研究了大分子银络合物对四碳烯烃和烷烃的分离性能。通过 Ag<sup>+</sup> 与丙烯酸接枝聚乙烯 (PE-g-AA) 上的羧酸反应, 将 Ag<sup>+</sup> 固定在高分子链上, 制成的气体分离膜对烯烃有促进输送作用, 并用 IR 和 NMR 证实了 Ag<sup>+</sup> 与烯烃之间的可逆吸附作用<sup>[22]</sup>。另外发现, 丙烯酸接枝率为 95.6% 的硅橡胶 (PDMS-g-AA)/Ag<sup>+</sup> 离聚体膜在 25℃ 时, 对反-2-丁二烯与 n-丁二烯的分离系数为 4.0<sup>[23]</sup>。



含 32.7% (wt)  $\text{AgClO}_4$  的聚三甲基硅基-1-丙炔(PTMSP)/ $\text{AgClO}_4$  复合膜对异丁烯/异丁烷的分离系数为 5.6<sup>[24]</sup>。IR 研究表明,  $\text{Ag}^+$  离子被络合到 PTMSP 的不饱和主链上而形成大分子络合物。

Bai 等<sup>[25]</sup> 研究了聚苯醚(PPO)与不同金属离子  $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pd}^{2+}$ 、 $\text{Ru}^{3+}$  和  $\text{Ir}^{3+}$  复合膜在 30℃ 对丙烯/丙烷混合气体的分离性能。PPO 膜本身对丙烯具有较高的分离系数, 混入金属离子后,  $\text{Ru}^{3+}$  膜和  $\text{Pd}^{2+}$  膜均能显著提高丙烯的透气性和选择性。例如, PPO/Pd 膜对丙烯的透气性提高了 2 倍, 而分离系数从 3.44 提高到 5.33。IR 研究显示,  $\text{Ru}$ 、 $\text{Pd}$ 、 $\text{Ag}$ 、 $\text{Ir}$  均与聚合物分子发生了相互作用。丙烯分离系数的提高是由于金属离子与聚合物的络合作用降低了相邻链段间的距离, 减小了聚合物的自由体积, 而丙烯透气性的提高则主要是由于金属离子的选择性输送。Lehmann 等<sup>[26]</sup> 由可溶性酞菁铁  $\text{PcFe}(\text{OCH}_2\text{CF}_3)_4$  (见图 3) 与氰乙基化的羟丙基纤维素制成超分子共混膜。透气性能的研究发现, 该膜的  $\text{O}_2/\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2/\text{N}_2$  分离系数分别为 3.5, 18。

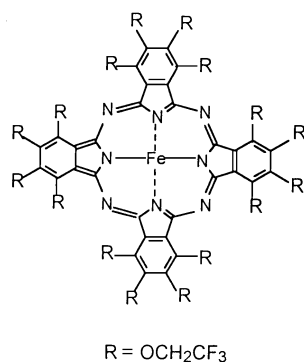


图 3 酞菁铁分子式

一个有趣的研究结果是, 通过对某种气体的不可逆络合可将其阻挡在膜的上游侧。Shim 等<sup>[27]</sup> 在 PC 膜中混入  $\text{RuCl}_3$ , 当膜中  $\text{RuCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  含量为 20% (wt) 时, 可以从 1:1 的  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}$  混合气体中分离到纯度高于 99% 的  $\text{O}_2$ 。IR 和 UV 测试表明,  $\text{Ru}^{3+}$  与  $\text{CO}$  形成非常稳定的  $\text{Ru}-\text{CO}$  键, 从而将  $\text{CO}$  阻挡在膜中。

### 3 添加小分子液晶

槐山千里等最早在 1979 年开创了高分子和小分子液晶共混物膜的研究<sup>[28]</sup>。在液晶态相变温度附近, 透过系数突变, 增加几十甚至上百倍不等, 引起了人们的极大兴趣。液晶分子排列容易受电场、磁场和应力等外场作用而发生变化。利用这一特性, 使液晶形成分子长轴方向垂直于分离膜的排列。如果液晶含量足够多, 形成有利于气体透过的连续相通道, 从而可极大提高透气性, 实际上成为固体支撑化液膜。近年来用于气体分离膜的小分子液晶结构式见图 4。

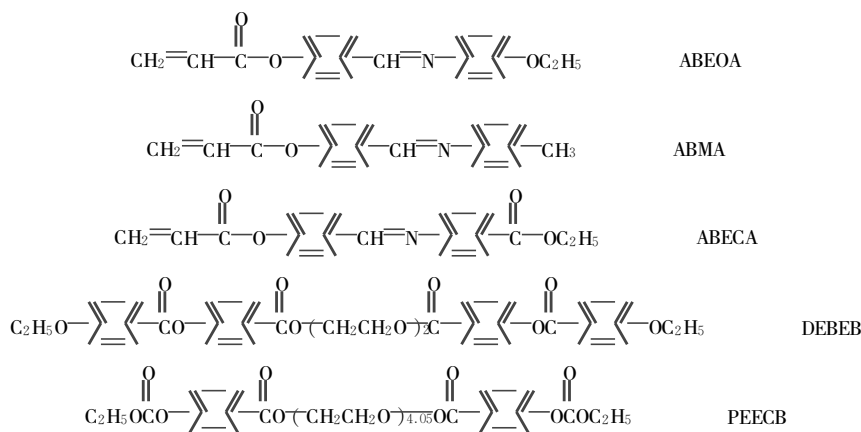


图 4 液晶化合物的分子式

周长忍等<sup>[29~31]</sup> 以聚丁二烯(PB)为基材, 分别加入不同数量的三种 Schiff 碱液晶化合物 ABECA、ABEOA 和 ABMA, 制成 PB/液晶共混物膜, 研究了液晶种类、含量对  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  透过分离性能的影响。

液晶种类的研究发现, *cis*-PB/ABECA 共混物膜的  $\alpha_{O_2/N_2}$  和  $P_{O_2}$  最高, 认为是由于 ABECA 中氧元素含量最高, 与  $O_2$  相似相容的原理。对于液晶含量, 只有当液晶达到 30%(wt) 以上时, 共混物膜才能形成连续的液晶相, 具有突变的透气性能。

张子勇合成了具有二重液晶相的液晶化合物双 4-(4'-乙氧基苯甲酰氧基) 苯甲酸-缩乙二醇酯 (DEBEB)<sup>[32]</sup>, 制备了 PB/DEBEB 共混物膜并研究了其富氧性能<sup>[33,34]</sup> 和富二氧化碳性能<sup>[35]</sup>。结果发现: (1) PB/DEBEB 复合膜在液晶含量 10%(wt) 时, 室温下具有比基质 PB 膜大几倍的透气系数 ( $P_{O_2}$  为 54.7 Barrer,  $\alpha_{O_2/N_2}=3.2$ ); (2)  $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CO_2$  透过系数与温度的关系曲线均呈现“N”型特征, 即, 随着温度的升高,  $P$  先上升, 然后下降, 最后再上升。膜的形态结构研究表明<sup>[36]</sup>, 这些现象与共混物膜中可能存在界面微隙及液晶的相行为有关。界面微隙提供了气体通道, 使透气系数增大。N 型曲线则与液晶的相变温度相对应。此项研究还发现, 共混物膜在放置一段时间后, 在向列相温度范围内, 第二次测量的结果比第一次更佳。其原因是膜中的液晶分子经历了第一次测量的热历史后再次升温, 其取向程度更高, 更有利于气体分子的透过。

孙群辉等<sup>[37]</sup> 研究了丁苯橡胶 (SBR) 和硅橡胶 (PDMS) 与  $\alpha$ 、 $\omega$ -对乙氧羰氧基苯甲酸聚乙二醇酯 (PEECB) 液晶组成的共混物膜。当 PEECB-4.05 (4.05 为聚醚软段的数均聚合度) 的含量超过某一临界值 (约 23.0%(wt)) 时, 室温下 SBR/PEECB-4.05/PDMS 复合膜的氧气透过系数  $P_{O_2}$  达 70~634 Barrer,  $\alpha_{O_2/N_2}$  为 2.59~3.47。

## 4 其他小分子添加剂

Quinn 等<sup>[38]</sup> 将两种季胺盐  $[(CH_2)_4N]F \cdot 4H_2O$  和  $[(C_2H_5)_4N]CH_3CO_2 \cdot 4H_2O$  分别混入聚丙烯商业膜中, 测定了对  $CO_2$ 、 $H_2$ 、 $CH_4$  混合气体的分离性能。50℃ 时, 两种膜对  $CO_2$  的透气性均随上游侧  $CO_2$  分压的降低而升高, 显示出促进输送膜的特征。而由于  $H_2$  和  $CH_4$  的渗透性都与上游侧压力无关, 故当上游侧压力降低时,  $CO_2$  与  $H_2$ 、 $CH_4$  的分离系数也提高。

Paul 等<sup>[39]</sup> 研究了四甲基六氟基团 (TMHF) 取代的聚砜 (TMHFPSF) 及双酚 A-特丁基间苯二甲酸聚合物 (TMHFBPA-*t*BIA) 与烷基化萘齐聚物 (Kenflex A) (见图 5) 复合膜对不同气体的透过选择性。研究发现, 对聚合物基材同时进行化学 (TMHF 取代) 和物理 (加入 Kenflex A) 修饰可同时提高该膜的选择性和渗透性。当 TMHF-PSF 和 TMHFBPA-*t*BIA 中的 Kenflex A 含量为 20%(wt) 时, 其渗透选择综合性能优于未取代的膜材料。此外, Kenflex A 对 TMHFPSF 的影响比 TMHFBPA-*t*BIA 更显著。在同一透过水平上, TMHF-PSF/Kenflex A 对  $H_2/CH_4$  和  $CO_2/CH_4$  的选择能力均高于 TMHFBPA-*t*BIA。

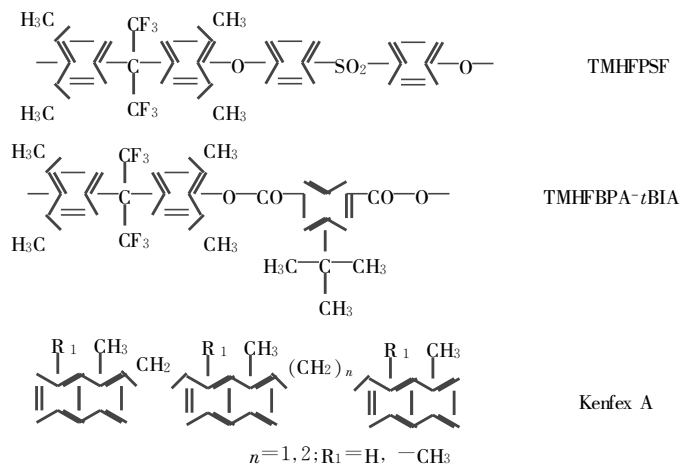


图 5 TMHFPSF, TMHFBPA-*t*BIA 和 Kenflex A 的分子式

Le Roux 等<sup>[40]</sup>研究了含氟表面活性剂(PAO; $C_7F_{15}CO_2^-NH_4^+$ ;PKO; $C_7F_{15}CO_2^-K^+$ ;KO; $C_7H_{15}CO_2^-K^+$ ;PFA; $CF_3CO_2^-K^+$ ;BFA; $CF_3CO_2(C_6H_5)$ )的加入对聚砜(PSF)气体分离膜渗透选择性能的影响。表面活性剂的加入使聚砜膜的气体分离性能普遍提高。特别是含 0.1%(wt)PAO 的膜对  $O_2$  的透过速率提高了 44%,而选择性稍降低。增加 PAO 用量[0.2%(wt)],膜的选择性和渗透性同时提高,被认为是最优浓度。所有表面活性剂都不同程度地降低了膜材料的玻璃化转变温度,其中 PKO 最显著。对于以上结果,被认为在膜形成过程中,表面活性剂疏水尾部与聚合物链的相互作用改变了高分子链的堆砌结构。

## 参考文献:

- [1] 川上浩良·高分子,1998,47(12);872.
- [2] Matsumoto T,Uchida T·J Appl Polym Sci,1997,64(6);1153.
- [3] Gao X S,Lu F C·J Appl Polym Sci,1994,54;1965.
- [4] Nagai K,Higu A,Nakagawa T·J Appl Polym Sci,1994,54;1353.
- [5] Nagai K,Higuchi A,Nakagawa T·J Appl Polym Sci,1994,54;1207.
- [6] Matsui S,Nakagawa T·J Appl Polym Sci,1998,67;49.
- [7] Wang D L,Li K,Teo W K·J Appl Polym Sci,1997,66;837.
- [8] Li X G,Huang M R·J Appl Polym Sci,1997,66;2139.
- [9] 张子勇,林尚安·高分子通报,1994,(4);200.
- [10] Chen S H,Lai J Y·J Appl Polym Sci,1996,59;1129.
- [11] Chen S H,Ruaan R C,Lai J Y·Sep Sci Technol,1997,32(5);925.
- [12] Chen S H,Lai J Y,Ruaan R C,Wang A A·J Membr Sci,1997,123(2);197.
- [13] Ruaan R C,Chen S H,Lai J Y·J Membr Sci,1997,135(1);9.
- [14] Nishide H,Tsukahara Y,Tsuchida E·J Phys Chem B,1998,102(44);8766.
- [15] Park C K,Choi M J,Lee Y M·Polymer,1995,36(7);1507.
- [16] Choi M J,Park C K,Lee Y M·J Appl Polym Sci,1995,58;2373.
- [17] Zhang Z Y,Lin S A·Macromol Rapid Commun,1995,16;927.
- [18] 张子勇,林尚安·高分子学报,1997,(1);55.
- [19] Zhang Z Y,Lin S A·J Appl Polym Sci,1999,74;1071.
- [20] Hong J M,Lee S W·J Ind Eng Chem,1997,3(3);165.
- [21] 杨继萍,朱鹤孙,黄鹏程·高分子材料科学与工程,1998,14(6);41.
- [22] Yang J S,Hsiue G H·J Polym Sci,Part B;Polym Phys,1997,35(6);909.
- [23] Yang J S,Hsiue G H·J Membr Sci,1997,126(1);139.
- [24] Yang J S,Hsiue G H·J Membr Sci,1996,120(1);69.
- [25] Bai S,Sridhar S,Khan A A·J Membr Sci,1998,147(1);131.
- [26] Lehmann H D,Eberhardt W,Hanack M·J Membr Sci,1998,147(1);49.
- [27] Shim I W,Oh W S,Seo D K·React Funct Polym,1997,34;1.
- [28] Kajiyama T,Najata Y,Maemura E,Takayanagi M·Chem Lett,1979;679.
- [29] Zhou C R,Lin S A·Eur Polym J,1998,34(11);1663.
- [30] 周长忍,林尚安·高分子材料科学与工程,1997,13(6);110.
- [31] 周长忍,林尚安·高分子材料科学与工程,1998,14(1);62.
- [32] 张子勇,林尚安·高等学校化学学报,1999,20(8);1307.
- [33] 张子勇,林尚安·高等学校化学学报,1996,17(4);659.
- [34] Zhang Z Y,Lin S A·Polymer,1996,37(15);3455.

(下转封三)

# Compatibility and Phase Separation of Polymer Blends

ZHAO Xiao-bin<sup>1</sup>, DU Lei<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>1</sup>

(1. The 42th Institute of the Fourth Academy of the CASC, Xiangfan, 441003, China;

2. Shanghai Space Bureau, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Research progress of polymer blends are reviewed, including compatibility and phase separation. The theory of polymer compatibility, influence factors on the compatibility, methods of improving and evaluating the compatibility are elucidated. The phase separation mechanisms of polymer blends control the properties, different morphology and structure are formed according to the spinodal decomposition and nucleation and growth mechanism. The kinetic process for the two phase separation mechanism is obvious different. The scatter intensity is increased exponentially with the phase separation time for the spinodal decomposition, however, it is power-law increase for the nucleation and growth phase separation.

**Key words:** Polymer blends; Compatibility; Thermodynamics of compatibility; Phase separation; Kinetics of phase separation

---

(上接第 68 页)

- [35] 张子勇. 高分子材料科学与工程, 2000, 16(4): 96.
- [36] Zhang Z Y. J Polym Sci. Part B: Polym Phys, 2000, 38: 1833.
- [37] 孙群辉, 林尚安. 高分子学报, 1995, (5): 554.
- [38] Quinn R, Appleby J B, Pez G P. J Membr Sci, 1995, 104(1~2): 139.
- [39] Ruiz-Trevino F A, Paul D R. J Appl Polym Sci, 1998, 68: 403.
- [40] Le Roux J D, Van Schalkwyk O G. J Appl Polym Sci, 1999, 71: 163.

## Advance on Polymer Gas Separation Membrane Containing Low Molecular Weight Additives

LIU Zong-hua, ZHANG Zi-yong

(Department of Chemistry, Institute of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** Advances on polymer gas separation membranes containing low molecular weight additives were reviewed. Especially, improvements of cobalt complexes and liquid crystals on the permeaselectivity of the gas separation membranes were introduced.

**Key words:** Gas separation membrane; Cobalt complex; Liquid crystal