

特约专栏

聚芳硫醚砜(PASS)研究进展

李素英¹, 孔雨¹, 袁书珊², 王孝军², 张刚², 龙盛如², 杨杰^{2,3}

(1. 四川大学高分子科学与工程学院, 四川 成都 610065)

(2. 四川大学分析测试中心 材料科学技术研究所, 四川 成都 610064)

(3. 四川大学 高分子材料工程国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 作为聚苯硫醚(PPS)的结构改性物, 聚芳硫醚砜(PASS)具有优异的机械性能、耐高温性、尺寸稳定性、耐腐蚀、阻燃和优良的电性能等。由于PASS本身具有的优势, 使其在环保、军工、电气、机械、航空等领域具有很好的应用前景。目前国内PASS的合成技术日趋成熟并有望在近年内实现工业化生产。总结了近年来国内尤其是四川大学在PASS基本特性、改性和应用等方面的研究进展: (1) 针对PASS在NMP溶液中的不稳定现象, 发现并研究了PASS/NMP的结晶溶剂化物, 对其形成的过程、结构及结晶行为进行了系统的研究。(2) 通过复配助剂以及PPS的引入很好地改善了PASS的熔体稳定性和流动性, 改善了其熔融加工性, 并对PASS/PPS共混体系进行了深入研究。合理控制加工工艺, 成功地制备了性能优良的PASS/连续纤维复合材料。(3) 探究氧化处理后PASS分离膜的耐溶剂性, 通过配方和工艺的改进制备出一系列不同孔径和结构的PASS耐腐蚀分离膜, 通过引入改性纳米二氧化钛成功地制备了抗污染PASS分离膜。这些研究为PASS的产业化应用打下了坚实的基础。

关键词: 聚芳硫醚砜; 结晶溶剂化物; 熔融加工; 分离膜

中图分类号: TQ332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2015)12-0869-08

Research Progress in Poly (arylene sulfide sulfone)

LI Suying¹, KONG Yu¹, YUAN Shushan², WANG Xiaojun²,
ZHANG Gang², LONG Shengru², YANG Jie^{2,3}

(1. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Institute of Materials Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(3. State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering (Sichuan University), Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As a chemical structurally modified substance of polyphenylene sulfide (PPS), Poly (arylene sulfide sulfone) (PASS) exhibits outstanding mechanical properties, heat resistance, dimensional stability, corrosion resistance, flame retardancy and electrical properties, etc. Because of the superiority, PASS has a good application prospect in the fields of environmental protection, military industry, electrical industry, machinery and aviation. This review introduced the physical properties, melt modification and membrane preparation of PASS: (1) PASS/NMP crystal-solvate was discovered from the unstable phenomenon. And its formation, structure and crystallization behavior was studied systematically; (2) With the addition of PPS and compounding processing aids, the melt stability and fluidity of PASS were improved dramatically, which made it suitable for melt processing. The morphology of blends of PASS/PPS was studied at the same time, and the continuous fiber reinforced PASS composites were successfully prepared. (3) The solvent resistance of post-oxidated PASS membrane was explored. By adding various additives, PASS membranes with different pore size and cross-section morphology were prepared. Also anti-fouling PASS/TiO₂ hybrid membranes were made via introducing PAA modified TiO₂ nano-particles.

Key words: poly (arylene sulfide sulfone); crystal-solvate; melt processing; membrane

1 前言

聚芳硫醚(PAS)类树脂作为特种工程塑料, 具有优异的综合性能。该类树脂分子主链上具有硫醚键和类似的芳环结构, 硫醚键的存在赋予了树脂本身良好的柔顺

收稿日期: 2015-05-18

第一作者: 李素英, 女, 1991年生, 硕士研究生

通讯作者: 王孝军, 男, 1980年生, 副教授, Email:

wangxj@scu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2015.12.01

性和化学稳定性,而芳环的结构赋予了材料优异的机械性能和耐高温性。由于这种独特结构的存在,PAS类树脂普遍具有优异的耐高温、尺寸稳定性、耐腐蚀、阻燃、耐辐射和优良的电性能和力学性能等^[1-2]。

作为PAS类树脂的一种,聚芳硫醚砜(PASS)可以看成是经聚苯硫醚(PPS)化学结构改性得到的无定形聚合物。PASS在保持PPS本身优异性能的同时,独特的分子链结构赋予其更多特有的优异性能。分子主链上强极性砜基($-\text{SO}_2-$)的引入,大幅度地提高了PASS的玻璃化温度(T_g 约为218℃),进一步增加了树脂的耐热性。同时,无定形的结构使其具备更好的抗冲击和抗弯曲性能。另外,PASS可以在某些强极性的非质子溶剂(N-甲基吡咯烷酮等)中溶解,使得该类树脂采用溶液加工方式成为可能,极大地扩展了其应用领域和范围。也因为这些优势,使得PASS在军工、电气、机械、航空等领域具有很好的应用前景^[3-5]。

与其它特种工程塑料,如PPS、聚醚砜(PES)和聚醚醚酮(PEEK)等相比,PASS具有合成成本低及功能性等特点,使其具有广泛的应用前景。国外关于PASS的报道主要集中在20世纪八九十年代,且主要以专利为主^[6-8],近年关于PASS的科研论文及相关研究也很少。国内关于PASS的相关研究报道主要集中在四川大学聚芳硫醚课题组,该课题组自20世纪80年代以来,在PASS的合成^[9-14]、加工改性^[15-22]及其产业化^[13,16]等方面开展了大量的研究工作。本文着重介绍了该课题组在PASS/N-甲基吡咯烷酮(NMP)结晶溶剂化物、PASS熔融加工改性以及PASS分离膜3方面的研究工作进展。

2 PASS/NMP 结晶溶剂化物研究

PASS分子主链上刚性的苯环结构和强极性砜基的存在使得其无法有效地进行规整堆积而形成结晶区域,故通常情况下PASS表现出非晶态聚合物的性质。人们在对其溶解行为的研究中发现,溶解于NMP的PASS放置一段时间后,澄清的溶液出现了沉淀,如图1所示^[23-25]。

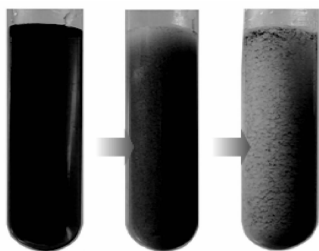


图1 PASS/NMP溶液静置不同时间后的照片:(a)初配溶液,(b)4 h以后,(c)10 h以后^[23-25]

Fig. 1 Photos of PASS/NNP solution after different resting time: (a) initial solution, (b) 4 h later and (c) 10 h later^[23-25]

利用偏光显微镜观察这种沉淀(如图2所示),可以发现这种沉淀实际上是由一种具有环带结构的球状晶体堆积而成的^[23-24]。通过PASS在NMP中形成的晶体的POM、XRD及H-NMR测试结果可以推断出,该晶体为PASS与NMP共同组成的结晶溶剂化物。此种结构并不稳定,其熔点低于130℃,而且利用抽提或蒸发的方法移除混合物中溶剂后,这种结晶结构将被破坏。

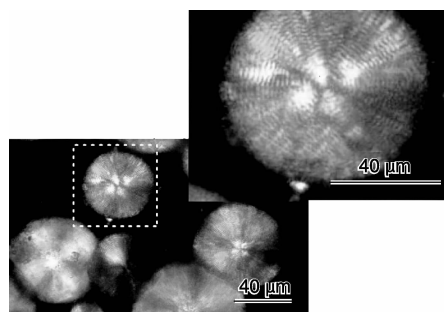


图2 PASS/NMP凝胶的偏光显微镜照片

Fig. 2 POM image of the obtained PASS/NMP gel

研究中还发现^[22],PASS/NMP结晶溶剂化物等温结晶过程中,初期满足Avrami方程且Avrami指数 $n=1.1$ 。对其PASS/NMP结晶溶剂化物熔融过程进行热力学分析,通过计算可以得到聚合物结晶溶剂化物的熔融热 $\Delta H=4.59 \text{ cal} \cdot \text{g}^{-1}$ 。PASS/NMP结晶溶剂化物体系相图与理论相图一致,且晶体中PASS分子链段与NMP分子的摩尔比为7:3,体系 T_g 与浓度的关系满足聚合物增塑体系 T_g 理论变化规律。

从溶液中析出的PASS/NMP结晶溶剂化物中具有大量未参与结晶的游离NMP分子,这部分分子的存在会对PASS/NMP结晶溶剂化物的相关测试结果产生一定的影响。为了减少游离NMP的影响,在50℃、真空负压条件下处理沉淀物,发现处理后结晶溶剂化物的熔点先增加,后期有轻微的下降(如图3所示);X射线衍射结果如图4所示,最大峰强 $2\theta=16.9$ 处的强度先增加后减小,

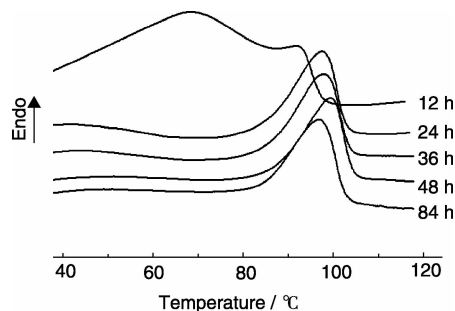


图3 结晶溶剂化物经真空热处理不同时间后的DSC升温曲线

Fig. 3 DSC curves of PASS/NNP crystal solvent after different time in vacuum heat treatment

证明结晶区域在 50 °C 的条件下不断完善。但是, 随着体系中游离 NMP 被不断地抽离, 结晶结构逐渐被破坏、晶粒尺寸不断减小^[25]。

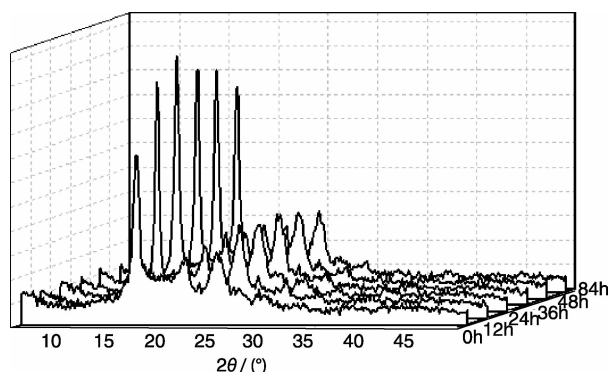


图 4 结晶溶剂化物经真空热处理不同时间后的 X 射线衍射图谱

Fig. 4 XRD patterns of PASS/NNP crystal solvent after different time in vacuum heat treatment

此外采用 NMP 对 PASS 的膜片进行液相诱导结晶也可以避免游离 NMP 的影响。图 5 为 NMP 诱导 PASS 结晶不同时间后的 DSC 升温曲线, 诱导产生的结晶熔点均在 90 °C 左右, 且与诱导时间无关。从 X 射线衍射图谱可以看出(图 6), 诱导结晶产生的晶型同沉淀物中晶型一致,

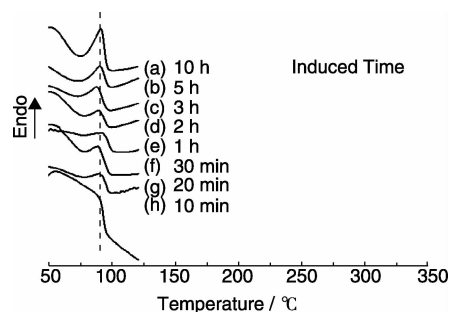


图 5 NMP 诱导 PASS 结晶不同时间后的 DSC 升温曲线

Fig. 5 DSC curves of NMP-induced PASS crystallization after different time

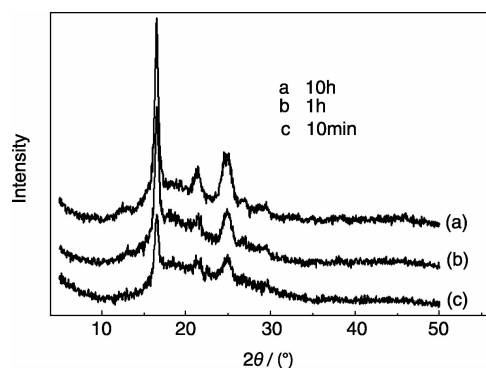


图 6 NMP 诱导 PASS 结晶不同时间后的 X 射线衍射图谱

Fig. 6 XRD patterns of NMP-induced PASS crystallization after different time

且均为共晶结构。随着诱导时间增加, 结晶区域不断完善, 晶粒尺寸变大^[23, 25]。

3 PASS 熔融加工改性研究

PASS 树脂本身熔体稳定性和流动性差, 很难通过传统的挤出或者注塑的方式进行成型加工, 极大地限制了 PASS 的广泛应用。国外主要通过一系列的后处理工艺来提高 PASS 熔体稳定性和流动性。此类方法虽然可以较好地改善 PASS 原料的熔体稳定性和流动性, 但是后处理的过程中需要高温高压, 工艺复杂。四川大学采用在加工过程中直接加入助剂的方式, 有效改善了 PASS 的熔体稳定性和流动性^[15, 19]。

图 7 为复配抗氧化剂和不同含量的醋酸锌 (ZnAc) 对 PASS 熔体流动性和稳定性的影响。可以看出, 3 份 ZnAc 和复配抗氧化剂可以很好地降低 PASS 的熔体粘度, 且熔体压力曲线在高剪切的作用下依然出现标准的阶梯形状。表明复配抗氧化剂和 ZnAc 的引入可以很好地改善 PASS 可熔融加工性。同时从图 8 中可以看出, 相比于纯的聚合物, 含复配抗氧化剂和 ZnAc 的 PASS 在长时间的高温剪切过程中, 熔体粘度变化很小, 说明所选助剂的高效性和长效性。同时, 在实际加工过程中, 利用所选的助剂可以顺利地 PASS 进行挤出和注塑成型。

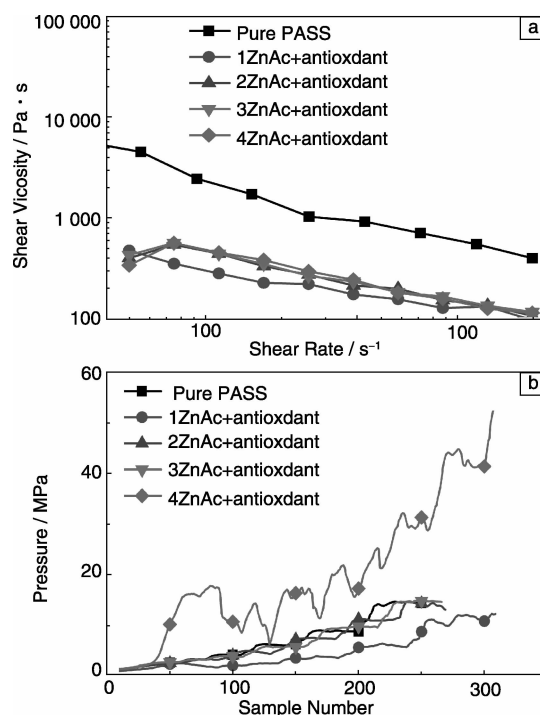


图 7 不同含量 ZnAc 和复配抗氧化剂对 PASS 熔体流动性 (a) 和稳定性 (b) 的影响

Fig. 7 The influence of ZnAc and complex antioxidant on the mobility (a) and stability (b) of PASS melt

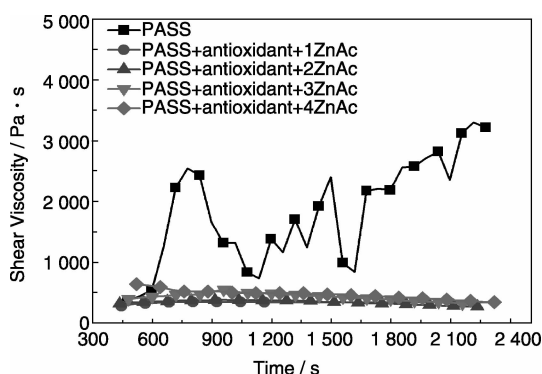


图 8 加入复配抗氧化剂/(1~4 份) ZnAc 的 PASS 熔体在恒定剪切速率(50 s^{-1})和恒定温度(315°C)条件下粘度随时间变化曲线
Fig. 8 Variations of viscosity of PASS melt with (1~4 percentage) ZnAc and complex antioxidant versus time at the constant shear rate and temperature(50 s^{-1} and 315°C)

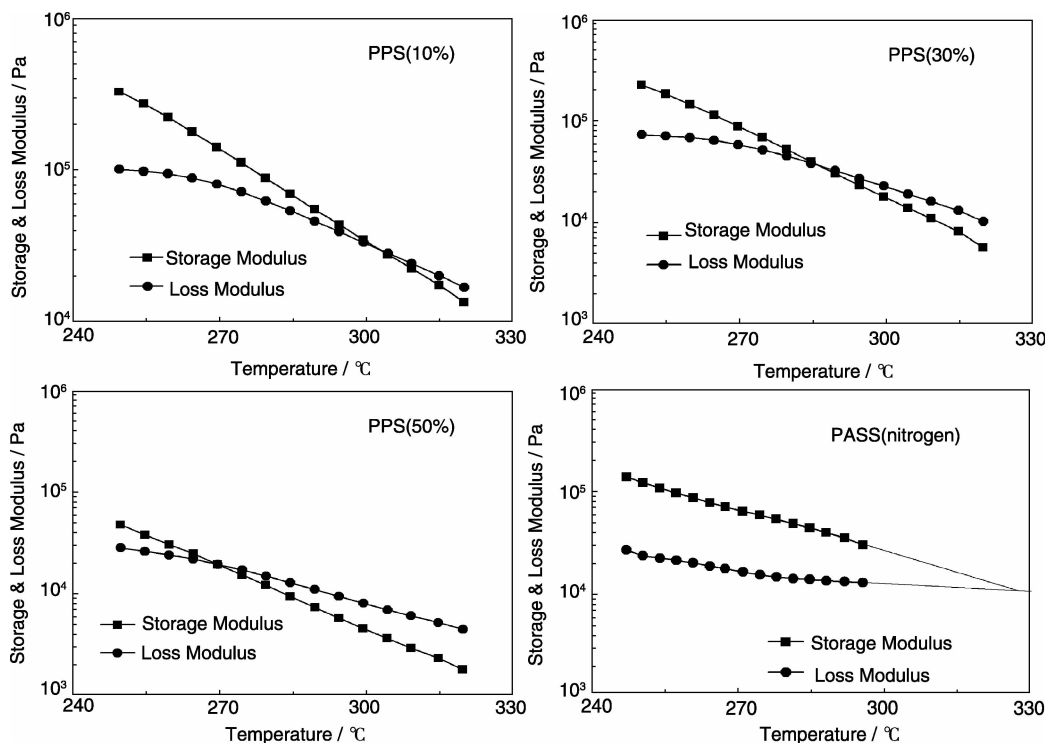


图 9 PPS 含量对 PASS 熔体流变行为的影响

Fig. 9 The influence of PPS content on the rheological behavior of PASS melt

表 1 含不同含量 GFC 的 PASS/GFC 复合材料机械性能

Table 1 Mechanical properties of PASS/GFC composites with different amounts of GFC.

Content of GFC / %	0	15	32	45
Tensile strength/MPa	70.05	89.25	112.79	139.7
Tensile modulus/MPa	1294	2043	2754	3136
Flexural strength/MPa	52.59	77.28	116.57	126.57
Notched impact strength/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$	11.7	44.2	56.2	96.85

同时, PPS 具有与 PASS 相近的化学结构, 和接近的加工窗口, 但 PPS 具有更好的熔体流动性和稳定性^[17]。如图 9 所示, PPS 的引入使得 PASS 的流动性得到了较大程度的提高。随着 PPS 含量的增加, PASS 熔体储能模量和耗能模量的交点向着低温方向移动, 加工窗口得到了进一步的拓宽, 有利于 PASS 的熔融加工成型。更进一步, 通过选择合适的纳米二氧化硅, 增加 PPS 相熔体粘度, 较好地控制了 PASS/PSS 共混体系的相形貌, 结果如图 10 所示。

此外, 连续纤维增强 PASS 复合材料具有优异的热学性能, 具有巨大的应用潜力。四川大学聚芳硫醚课题组详细地探讨了模压温度、时间和压力对 PASS 可成型性的影响。在合适的工艺条件下, 制备了玻璃纤维布(GFC)增强 PASS 复合材料^[18], 且树脂与纤维具有良好的浸渍, 其机械性能如表 1 所示。

4 PASS 分离膜研究

PASS 只溶于少数强极性非质子溶剂, 对常用的有机溶剂和酸碱有较强的抵抗能力, 其耐腐蚀性能优于传统的非晶形聚合物。因此 PASS 可以作为一种高性能的膜材料制备耐溶剂的分离膜^[26]。将 PASS 分离膜进行氧化处理后其耐溶剂和耐腐蚀性将得到进一步提高^[20], 如图 11 所示, 经氧化处理的 PASS 分离膜, 在 NMP、98% H_2SO_4 、

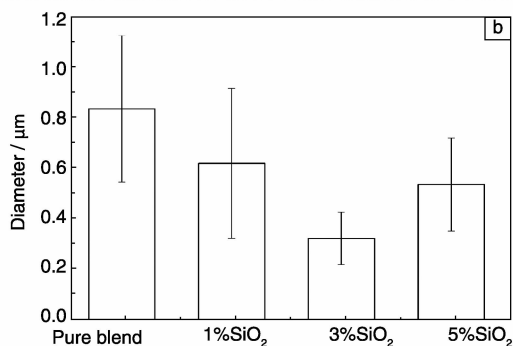
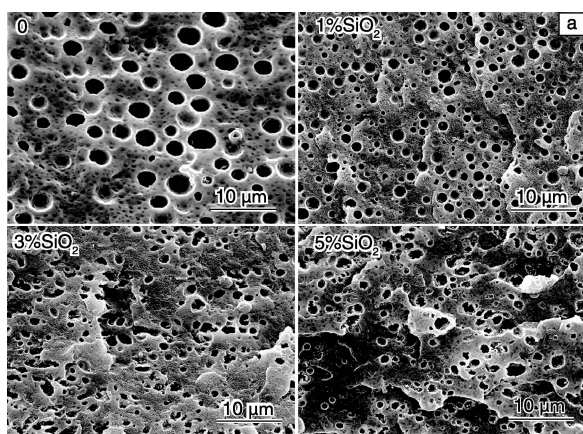


图 10 不同含量纳米二氧化硅对 PASS/PPS (30:70) 共混体形貌影响(a)及分散相尺寸统计(b)

Fig. 10 The influence of nano-silica on the morphology of PASS/PPS (30:70) (a) and the statistic graph of dispersion phase diameter(b)

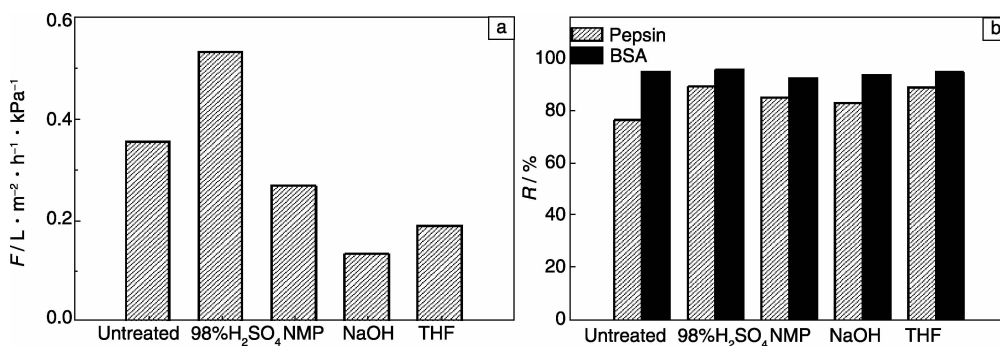


图 12 氧化 PASS 中空纤维膜在不同溶剂或溶液中的长期稳定性: 浸泡 30 d 后的水通量(a)和截留率(b)

Fig. 12 The long-term stability of post-oxidized PASS membrane immersed in solvent or solution for 30 days: (a) water flux and (b) retention rate

为了为 PASS 分离膜的工业化应用奠定基础, 四川大学聚芳硫醚课题组详细探究了分离膜配方和制膜工艺对分离膜结构域性能的影响^[21-22]。通过引入聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙二醇(PEG)、磺化 PASS、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、吐温 80、氯化钙等单一添加剂和复配添加剂对 PASS 分离膜进行结构调控, 并



图 11 氧化处理后 PASS 分离膜的耐溶剂性与 PASS 分离膜、PES 分离膜的对比(a), (b)和(c)分别为氧化处理后的 PASS 分离膜浸入沸腾 NMP 前后的 SEM 照片

Fig. 11 The comparison of solvent resistance to NMP, 98% H₂SO₄ and aqua regia between post-oxidized PASS membrane, PASS membrane and PES membrane (a), SEM images of post-oxidized PASS membrane (b) and after being immersed in boiling NMP (c)

王水、沸腾的 NMP 中不溶解, 且尺寸稳定性很好。并且氧化处理后的 PASS 分离膜在浓硫酸、NMP、NaOH、四氢呋喃中浸泡 30 d 后, 结构仍然完整, 通量虽然有一定的下降, 但对牛血清蛋白和胃蛋白酶的截留率增大, 如图 12 所示。

在制膜工艺中, 以单一凝固浴为基础, 进一步探究了复合凝固浴、双凝固浴对 PASS 分离膜结构与性能的影响。如图 13 和图 14 所示, 通过膜配方与膜工艺的结合, 制备出了孔径范围在 20 ~ 1000 nm PASS 分离膜, 膜通量 200 ~ 1 500 L/(m² · h), 分离膜结构既可以为对称型也可以为非对称型。

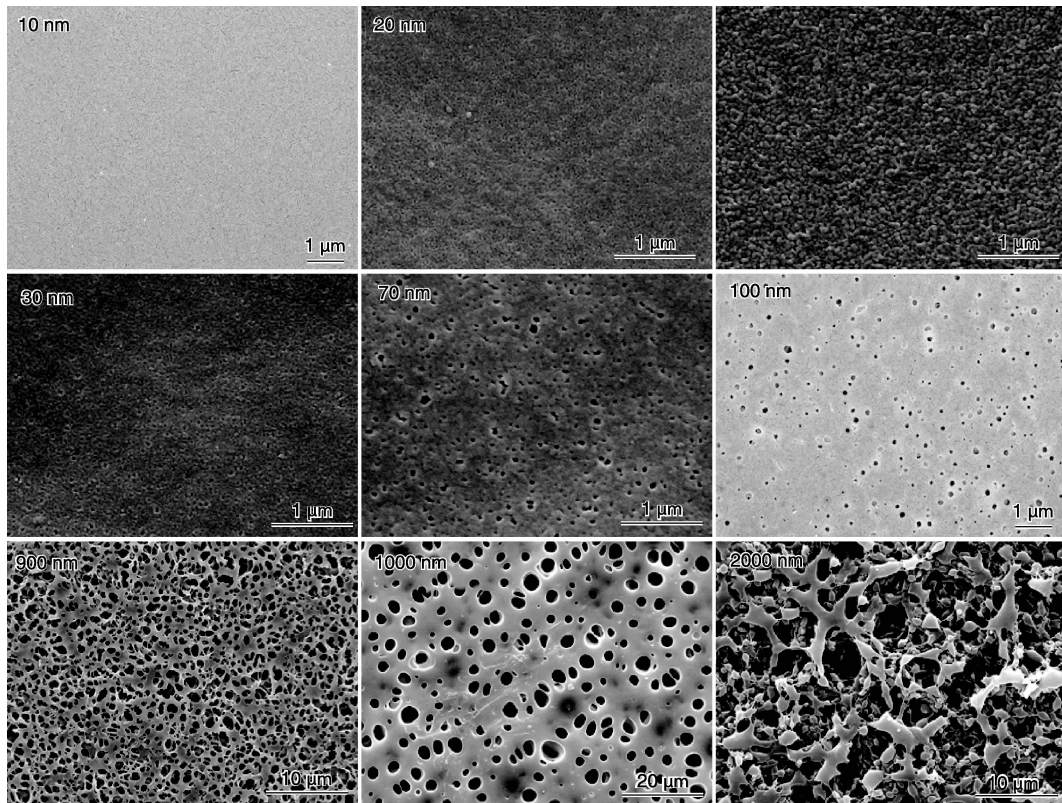


图 13 通过配方和优化制膜工艺所制备的不同孔径的 PASS 分离膜的形貌

Fig. 13 Morphologies of PASS membrane with different pore size made by adding additives and changing process

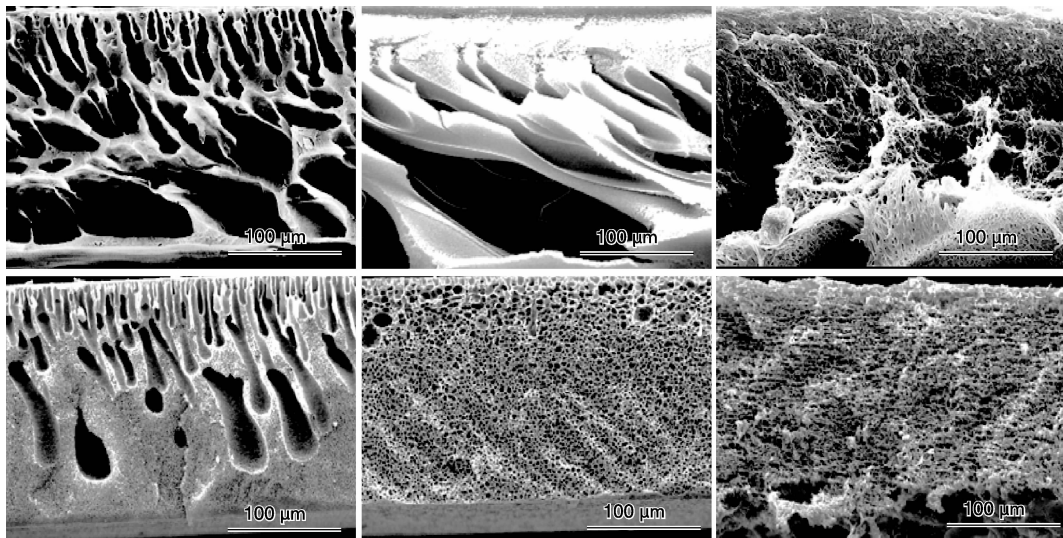


图 14 通过配方和优化制膜工艺所制备的 PASS 分离膜的截面形貌图

Fig. 14 PASS membranes with different cross-section morphologies made by adding additives and changing process

为了提高 PASS 分离膜的抗污染性, 通过在 PASS 中引入 PAA 改性的 TiO_2 纳米粒子, 制备得到有机无机杂化 PASS 分离膜, 接枝在纳米粒子表面的 PAA 分子链提高了纳米粒子的亲水性, 促进了纳米

粒子在分离膜基体中的分散。如图 15 所示, 所制备的 PASS/ TiO_2 -PAA 杂化膜相对于纯 PASS 分离膜具有较低的 BSA 蛋白吸附量、较高的膜通量和通量恢复率。

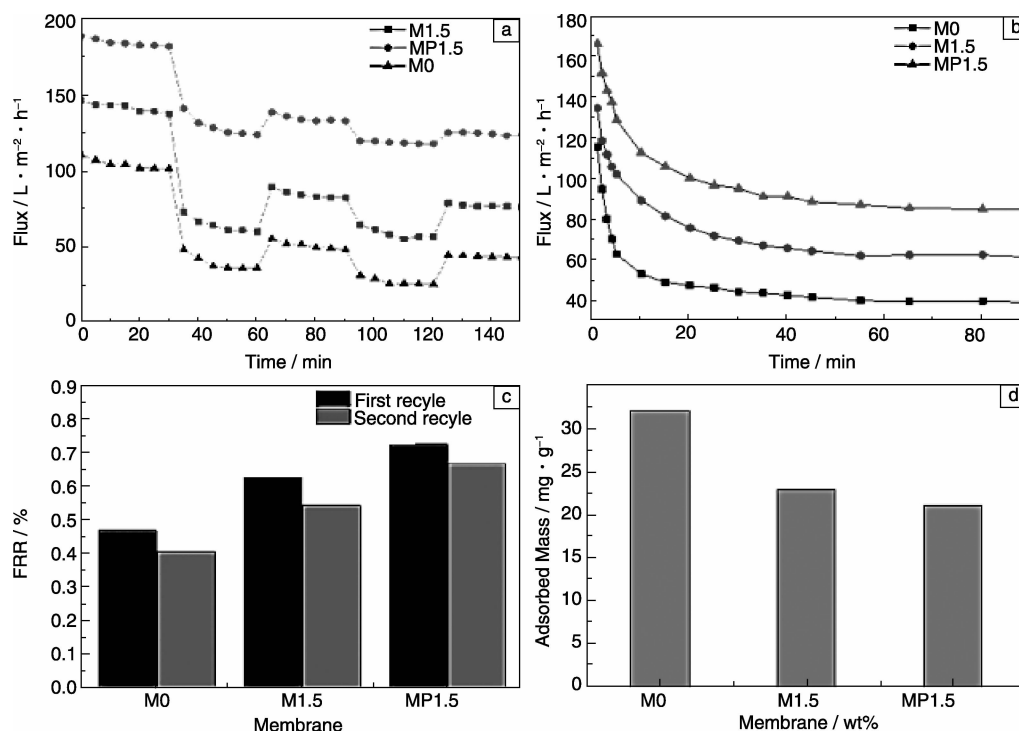


图 15 PASS/TiO₂-PAA 杂化膜的抗污染性: (a) PASS 分离膜在循环过滤中的通量变化, (b) PASS 分离膜在 BSA 溶液中通量随时间的变化, (c) PASS 分离膜通量的恢复率, (d) 不同分离膜对 BSA 的吸附量。(M0: 纯的 PASS 分离膜, M1.5: 添加 1.5% 的未改性 TiO₂ 纳米粒子制备的分离膜, MP1.5: 添加 1.5% 的 PAA 改性 TiO₂ 纳米粒子制备的分离膜)

Fig. 15 The antifouling property of prepared membrane of M0, M1.5, MP1.5: (a) Flux variation of membranes during two cycles of ultrafiltration of BSA, (b) Flux variation with time during ultrafiltration of BSA, (c) Water flux recovery of the membranes after BSA fouling, and (d) The amount of protein adsorption of prepared membranes.

5 结 语

聚芳硫醚砜(PASS)作为综合性能优异的特种工程塑料,具有良好的应用前景。关于 PASS 的基础性研究较少,在一定程度上也限制了其广泛应用。四川大学聚芳硫醚课题组在合成 PASS 树脂的基础上,针对其基本性能及加工与应用进行了深入的研究,探索了 PASS/溶剂结晶化物现象及其结构;通过复合添加剂改善了 PASS 树脂的熔融加工性,成功制备了性能优良的 PASS 复合材料;探索了 PASS 分离膜的制备及其性能提升的方法与手段,成功制备了耐高温、耐腐蚀的 PASS 高性能分离膜,为 PASS 的产业化及其后续应用打下了坚实的基础,具有重要的理论意义和实际的应用价值。

参考文献 References

- [1] Wang Zhiyuan, Hay A S. Synthesis of Poly (p-phenylene sulfide) by Thermolysis of Bos (4-halophenyl) Disulfide [J]. *Macromolecules*, 1991, 24(1): 333 - 335.
- [2] Ding Yong, Hay A S, et al. Novel Synthesis of Poly (p-phenylene sulfide from Cyclic Disulfide Ligomers) [J]. *Macromolecules*, 1996, 29(13): 4 811 - 4 812.

- [3] Campbell R W. *Production of Aromatic Sulfide/Sulfone Polymers*: USA, 4016145 [P]. 1977.
- [4] Yang J, Wang H D, Xu S X, et al. Study on Polymerization Conditions and Structure of Poly (phenylene sulfide sulfone) [J]. *J Polym Res*, 2005, 12: 317 - 323.
- [5] Meyer D R, Carnevale P, Bersee H. PPSS: New Thermoplastic for High Performance Composite Applications [J]. *Plast Rubber Compos*, 2010, 39: 122 - 127.
- [6] Rex L, Bobsein, et al. *Melt Stabilization of Poly(arylene sulfide sulfone)s*: USA, 4774276 [P]. 1987.
- [7] Lacey E, Scoggins, et al. *Treatment of Poly(arylene sulfide/sulfone) Polymers*: USA, 5015702[P]. 1991.
- [8] Rex L, Bobsein, et al. *Melt Stable Phenylene Sulfide/Sulfone Polymers and Method*: USA, 5075420[P]. 1991.
- [9] Zhang G, Yang J, Li D S, et al. Synthesis of Highly Refractive and Transparent Poly(arylene sulfide sulfone) Based on 4, 6-dichloropyrimidine and 3, 6-dichloropyridazine [J]. *Polymer*, 2013(54): 601 - 606.
- [10] Yang Jie, Wang Huadong, Xu Shuangxi, et al. Study on Polymerization Conditions and Structure of Poly (phenylene sulfide sulfone) [J]. *J Polym Res*, 2005(12): 317 - 323.

- [11] Wang Huadong (王华东). *Studies on the Synthesis and Characterization and Properties of Poly (phenylene sulfide sulfone)* (聚苯硫醚砜的合成、表征及性能研究) [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003.
- [12] Li Dongsheng (李东升). *Study on Synthesis Amplification and Copolymerization Research of Polyarylene Sulfide Sulfone (PASS)* (聚芳硫醚砜中试放大及改性研究) [D]. Chengdu: Sichuan University, 2014.
- [13] Yang Jie (杨杰), Long Shengru (龙盛如), et al. *The Method of Preparation of Polyarylene Sulfide Sulfone* (聚芳硫醚砜及其制备方法); China, 1461763 [P]. 2003-12-17.
- [14] Yang Jie (杨杰), Li Dongsheng (李东升), et al. *The Method of Preparation of Block Copolymer of Polyarylene Sulfide Sulfone/ Polyether Sulphone* (聚芳硫醚砜/聚醚砜共聚物及其制备方法); China, 102952269 [P]. 2013-03-06.
- [15] Kong Yu, Yang Jie, et al. The Influence of Processing Aids on the Properties of Poly (arylene sulfide sulfone) [J]. *High Perform Polym*, 2014(26): 914-921.
- [16] Huang Guangshun (黄光顺). *Study on Synthesis and Melting Processing Modification of Polyarylene Sulfide Sulfone (PASS)* (聚芳硫醚砜合成及加工改性研究) [D]. Chengdu: Sichuan University, 2013.
- [17] Wang Xiaojun (王孝军), Zhang Kun (张坤), Huang Guangshun (黄光顺), et al. 聚芳硫醚砜/聚苯硫醚合金的流变行为[J]. *Polym Mater Sci and Eng* (高分子材料科学与工程), 2013(29): 2-9.
- [18] Kong Yu, Yang Jiacao, et al. Preparation and Mechanical Properties of Polyarylene Sulfide Sulfone -Glass Fiber Cloth Composites [J]. *Mater Sci For*, 2015: 496-502.
- [19] Yang Jie (杨杰), Kong Yu (孔雨), et al. *A Method with Processing Aids to Improve the Melt Stability and Mobility of Poly (arylene sulfide sulfone)s* (一种提高聚芳硫醚砜稳定性和流动性的加工助剂及其制备方法); China, 103772989A [P]. 2014-05-07.
- [20] Wang Juan (王娟), Yuan Shushan (袁书珊), Wang Xiaojun (王孝军), et al. 高耐腐蚀性聚芳硫醚砜中空纤维膜的制备及性能研究 [J]. *Technology of Water Treatment* (水处理技术), 2014(05): 70-78.
- [21] Liu Jia (刘佳), Wang Xiaojun (王孝军), Yang Jie (杨杰). 聚芳硫醚砜(PASS)分离膜的磺化改性研究 [J]. *China Plastics Industry* (塑料工业), 2014(05): 127-131.
- [22] Wang Xiaojun (王孝军), Yu Qingquan (于清泉), Huang Hengmei (黄恒梅), et al. 聚芳硫醚砜分离膜的制备—制膜条件对分离性能的影响 [J]. *Polymer Materials Science & Engineering* (高分子材料科学与工程), 2010(10): 140-143.
- [23] Wang Xiaojun (王孝军). *A Study on Solution Behaviors and Applications of Polyarylene Sulfide Sulfone* (聚芳硫醚砜的溶液行为及其应用研究) [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [24] Wang Xiaojun, Yang Jie, Li Guangxian, et al. NMR Characterization of PASS and PASS/NMP Crystal Solvent [J]. *Polym Mater Sci Eng*, 2009(25): 107-110.
- [25] Gong Yuewu (龚跃武). *A Study on Solution Behaviors of Polyarylene Sulfide Sulfone in N-Methyl Pyrrolidone* (聚芳硫醚砜在N-甲基吡咯烷酮中的溶液行为研究) [D]. Chengdu: Sichuan University, 2014.
- [26] Liu L, Wang X J, Yang J, et al. Preparation and Characterization of Asymmetric Polyarylene Sulfide Sulfone (PASS) Solvent-Resistant Nanofiltration Membranes [J]. *Mate Lett*, 2014(132): 11.

(编辑 惠 琼)