

改性离子液体催化 α -烯烃聚合制备 PAO 基础油

冀 婕, 张 丹, 李君华*, 钱建华

(辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘要:采用两步法合成氯铝酸离子液体,并通过加入三氯化铁(FeCl_3)对氯铝酸离子液体进行改性,得到改性氯铝酸离子液体催化剂($2\% \text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$);分别研究了氯化铝(AlCl_3)摩尔分数、 FeCl_3 加入量、催化剂含量、聚合温度、聚合时间对润滑油基础油黏度性能、产率的影响。结果表明,在 AlCl_3 的摩尔分数为 0.67、 FeCl_3 加入量为 2%、催化剂用量为 3 mmol、温度为 90℃、时间为 1 h 时,可得到重均分子量为 500、黏度指数为 186 的高黏度指数润滑油基础油。

关键词:改性氯铝酸离子液体;1-辛烯;聚合;PAO 基础油

中图分类号:O643.36

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S1-0142-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S1.029

Production of PAO base oil from α -olefin polymerization catalyzed by modified ionic liquid

Ji Jie, ZHANG Dan, LI Jun-hua*, QIAN Jian-hua

(School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: Chloroaluminate ionic liquid is synthesized through a two-step method, and modified by adding FeCl_3 to obtain a modified chloroaluminate ionic liquid catalyst ($2\% \text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$). Its catalytic performance is studied in 1-octene polymerization. The effects of the molar fraction of AlCl_3 , the addition amount of FeCl_3 , catalyst dosage, polymerization temperature and polymerization time on the viscosity and yield of polyalpha-olefin (PAO) lube base oil are investigated. It is indicated that a PAO lube base oil with an average molecular weight of 500 and a viscosity index of 186 can be obtained when the molar fraction of AlCl_3 is 0.67, the addition amount of FeCl_3 is 2%, the dosage of catalyst is 3 mmol, the temperature is 90℃ and the polymerization lasts for 1 h.

Key words: modified chloroaluminic acid ionic liquid; 1-octene; polymerization; PAO base oil

润滑油基础油在润滑油配方中占比高达 90% 以上,作为润滑油的核心成分,其性能直接决定润滑油产品的基本性质和功能用途^[1-2]。随着制造业水平的提高,在绿色发展的环保政策下,对润滑油品质、性能有了更高的要求。仅通过已有润滑油基础油和添加剂调配比例改进的润滑油产品显然已不能满足需求,开发性能更加优良的润滑油基础油得到越来越多科研人员的关注,并投身其中。聚 α -烯烃 (PAO) 润滑油基础油因其氧化安定性好、黏温性能及低温流动性优良而受到国内外研究人员的关注^[3-4]。

PAO 通常指由 $\text{C}_8 \sim \text{C}_{12}$ 的 α -烯烃催化聚合得到的聚烯烃产物。常用的催化剂包括 AlCl_3 催化剂、 BF_3 -醇催化剂、齐格勒-纳塔催化剂及茂金属催化剂^[5-6],然而这些催化剂通常具有环境污染、催化剂

回收及贵金属催化剂制备条件苛刻等缺点。离子液体作为催化剂则有效地缓解了上述问题。离子液体催化剂具有“绿色”和“可设计”特性,能够限制传统有机溶剂或其他催化剂在催化反应中的许多负面影响,成功地成为催化领域的“一颗新星”^[7-8]。离子液体催化剂是一类由有机阳离子和无机或有机阴离子构成的新型催化剂,常见的阴、阳离子如图 1 所示。1914 年 Walden^[9] 首次合成离子液体 $[\text{EtNH}_3][\text{NO}_3]$,如今离子液体的定义“在 100℃ 下呈液体且由阴阳离子组成的熔融盐”便来自于此。围绕这个研究主题所发表的论文数量在一定程度上反映了该主题的热点程度及其发展趋势,通过对 Web of Science 检索离子液体催化剂主题词,如图 2 所示,可见从 2012 年开始离子液体催化剂迎来了发展的高峰阶段。离子液体催化剂的合成主要分为传统加

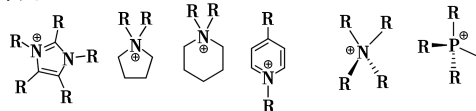
收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-05-17

基金项目: α -烯烃基础油合成关键技术及工业化(2020JH2/10100008);辽宁省教育厅项目(L2020004)

作者简介:冀婕(1997-),女,硕士生,研究方向为 α -烯烃聚合制备润滑油基础油,2183423288@qq.com;李君华(1982-),男,博士,教授,研究方向为烯烃聚合、甲醇转化及润滑油助剂研究,通讯联系人,lijunhua0521@163.com。

热法和仪器辅助法。传统加热法是在合适的温度、长时间加热回流合成;仪器辅助法是利用超声、微波反应器所发出的辐射能合成离子液体催化剂,可获得较高的收率,且具有低溶剂消耗、高能源效率和更温和的操作条件等优点,但所需成本较昂贵,所以尽管传统加热法合成时间较长,却仍是目前文献中常用的离子液体合成方法^[10-13]。

阳离子:



阴离子:

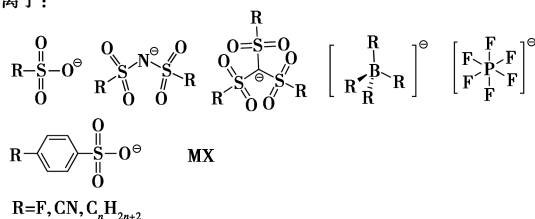


图1 常见阴阳离子结构

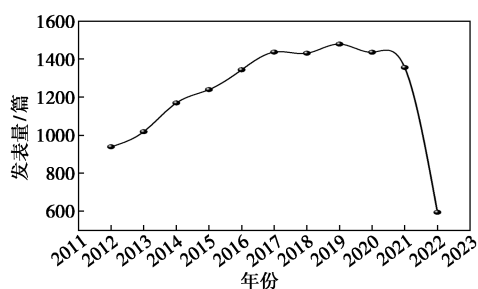


图2 2012—2022年离子液体催化剂相关论文发表情况

为了优化氯铝酸离子液体催化 α -烯烃制备润滑油基础油适用广度,本文采用传统加热法合成氯铝酸离子液体催化剂,通过 FeCl_3 进行改性,考察了改性后离子液体催化剂(2% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$)催化1-辛烯聚合制备PAO基础油的性能,并测定改性离子液体催化剂的重复使用性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

溴己烷、*N*-甲基咪唑、无水 AlCl_3 、乙酸乙酯、二甲甲烷、1-辛烯均购于安耐吉化学试剂。

Schlenk 双排管、旋转蒸发仪、真空干燥箱、氮气发生器、平式黏度计、Bruker 红外光谱仪

1.2 离子液体催化剂制备

离子液体合成采用两步法,合成路线如图3所示^[12-13]。

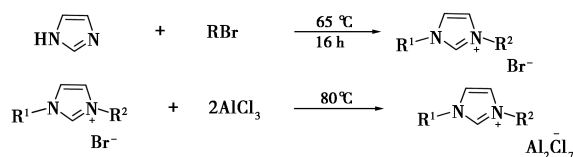


图3 离子液体的合成路线图

将摩尔比为1:1.1的*N*-甲基咪唑与溴己烷在65℃、氮气氛围下冷凝回流16 h,冷却。用乙酸乙酯洗涤数遍,旋蒸除去乙酸乙酯,80℃真空干燥12 h,得到产物[HMIM]Br,密封保存。

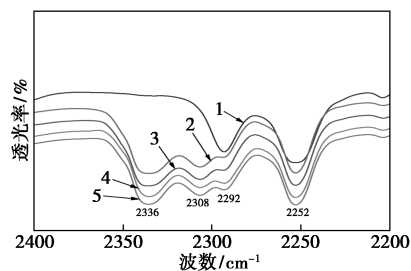
1.3 聚合反应

将干燥好的玻璃仪器组装好,在氮气氛围下加入0.8 g无水 AlCl_3 及适量 FeCl_3 ,随后加入一定摩尔比的阳离子,升温至80℃反应15 min,得到改性离子液体催化剂($x\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-n\text{AlCl}_3$)。随后用恒压滴液漏斗缓慢加入30 g 1-辛烯,继续反应1 h,冷却。产物经碱洗、水洗、减压蒸馏、白土精制等过程得到PAO产物。

2 结果与讨论

2.1 改性离子液体的酸性表征

由离子液体的乙腈红外谱图(图4)可知,纯乙腈在2 252、2 292 cm^{-1} 处有两个红外吸收峰,当加入改性离子液体后,2 252 cm^{-1} 处的红外吸收峰依然存在,而2 292 cm^{-1} 处吸收峰的强度减弱并向高波数2 308 cm^{-1} 移动。除此之外,2 336 cm^{-1} 出现新的红外吸收峰,此峰为Lewis酸的特征峰,并且随着 FeCl_3 加入量的增加,该峰吸收强度逐渐减弱^[14]。



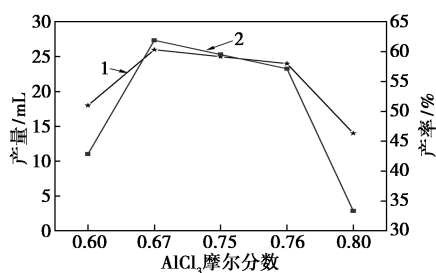
1—乙腈;2—0.5% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$;
3—1.0% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$;
4—2.0% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$;
5—4.0% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$

图4 离子液体的乙腈红外谱图

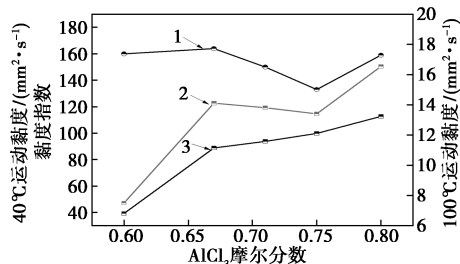
2.2 AlCl_3 摩尔分数对聚合效果的影响

氯铝酸离子液体催化剂的酸度主要由 AlCl_3 的摩尔分数决定, AlCl_3 的摩尔分数增加,离子液体催化剂的酸度也会随之增加,从而影响PAO聚合效

果。当 AlCl_3 的摩尔分数 $n < 0.5$ 时,液体呈碱性,且没有催化活性; AlCl_3 的摩尔分数 $n \geq 0.5$ 时,离子液体催化剂才会表现出酸性,从而达到一定的催化效果。通常认为在 AlCl_3 的摩尔分数 $n < 0.5$ 时,其阴离子主要存在形式是 Cl^- 和 $[\text{AlCl}_4]^-$, AlCl_3 的摩尔分数 $n \geq 0.6$ 时,离子液体中阴离子的主要存在形式是 $[\text{Al}_2\text{Cl}_7]^-$ 和少量的超酸性 $[\text{Al}_3\text{Cl}_{10}]^-$ [14],在此状态下,离子液体催化剂具有较好的催化效果,并且随着 AlCl_3 摩尔分数的增加离子液体催化剂的 Lewis 酸性也会递增,但随着 AlCl_3 摩尔分数的增加,会出现 AlCl_3 过剩的现象及聚合过程中释放大量的 HCl 气体等问题,同时也会对身体造成危害,所以选择合适的 AlCl_3 摩尔量至关重要。在催化剂用量 2 mmol、聚合温度 80°C 、聚合时间 1 h 的条件下,不同摩尔分数 AlCl_3 对催化聚合的影响如图 5 所示。当 AlCl_3 的摩尔分数由 0.6 增加到 0.8,聚合产物的产量先增加后减小,PAO 运动黏度总体呈递增状态,黏度指数呈递减状态,在 AlCl_3 的摩尔分数为 0.67 时,PAO 的产率最高,此时的黏度指数达到最高,产率为 62%、 40°C 时运动黏度为 $88.82 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、 100°C 时运动黏度为 $14.11 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数为 164;当 AlCl_3 的摩尔分数为 0.8 时,聚合产物的运动黏度最高,通过实验过程分析,该聚合产物中包含过剩 AlCl_3 催化所得的高黏度产物。综上所述,0.67 为最佳的 AlCl_3 摩尔分数。



1—产量;2—产率
(a) AlCl_3 的摩尔分数对 PAO 产率的影响

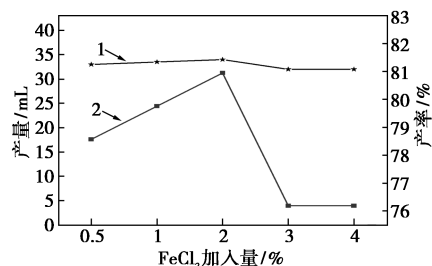


1—黏度指数;2— 100°C 运动黏度;3— 40°C 运动黏度
(b) AlCl_3 的摩尔分数对 PAO 性能的影响

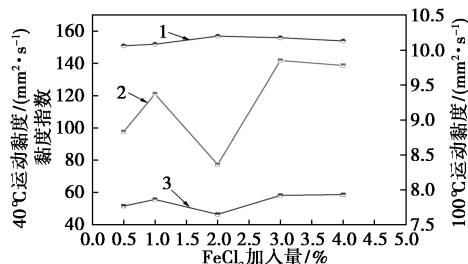
图 5 AlCl_3 摩尔分数对聚合效果的影响

2.3 FeCl_3 加入量对聚合效果的影响

众所周知,铁的电负性大于铝的电负性,当 AlCl_3 中加入 FeCl_3 ,便会形成双氯桥连接的双金属结构,铝上的电子受到铁的吸引通过氯桥转移到铁上,使铝的吸电子能力更强,更有利于聚合反应 [15]。从体系中离子的分布来说 FeCl_3 加入氯铝酸离子液体催化剂时,催化体系中不仅会以 $[\text{Al}_2\text{Cl}_7]^-$ 为主,同时存在一定的 $[\text{Al}_2\text{FeCl}_{10}]^-$ 活性成分,这两种强酸性阴离子对催化有利, $[\text{Al}_2\text{FeCl}_{10}]^-$ 活性离子的存在也使得改性催化剂活性高于纯的氯铝酸型离子液体催化剂。但是,随着 FeCl_3 加入量的增加,会出现 $[\text{FeCl}_4]^-$ 阴离子形式,该离子形式不具备酸性,从而导致催化体系酸量减少,催化活性降低 [16]。合适的催化剂加入量是衡量改性离子液体催化剂是否成功的关键。在 AlCl_3 的摩尔分数 0.67、催化剂用量 3 mmol、聚合温度 80°C 、聚合时间 1 h 的条件下, FeCl_3 加入量 (FeCl_3 占 AlCl_3 的质量分数) 对催化聚合的影响如图 6 所示。由图可知,随着 FeCl_3 加入量的增加聚合物产量呈现先增加后降低的趋势,运动黏度、黏度系数总体呈现先增加后降低的趋势,当 FeCl_3 加入量从 0.5% ~ 4%, 40°C 时 PAO 的运动黏度在 $46 \sim 58 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、 100°C 时运动黏度在 $8 \sim 10 \text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数为 140 ~ 160 之间。当加入 2% 的 FeCl_3 时,PAO 的产率、黏度指数达到最高,分别为 81%、157。随着 FeCl_3 加入量的增加, $[\text{FeCl}_4]^-$



1—产量;2—产率
(a) FeCl_3 加入量对 PAO 产率的影响



1—黏度指数;2— 100°C 运动黏度;3— 40°C 运动黏度
(b) FeCl_3 加入量对 PAO 性能的影响

图 6 FeCl_3 加入量对聚合效果影响

在体系中的含量增加,导致体系催化性能下降,产率下降。同时体系中活性组分的增大,也会导致异构化等副反应的增加,从而影响聚烯烃的性能。综上所述,2%为最佳的 FeCl_3 加入量。

2.4 催化剂含量对聚合的影响

催化剂的用量直接决定催化剂中活性组分的数量。催化剂太少,体系中的活性组分含量太低,不足以引发烯烃完全聚合,从而导致聚合产率低;而催化剂过量时,副反应则会增加,从而影响聚烯烃的性能。在 AlCl_3 的摩尔分数0.67、 FeCl_3 加入量2%、反应温度 80°C 、聚合时间1 h的条件下,催化剂用量对1-辛烯聚合的影响如图7所示。当催化剂用量从2 mmol增加到6 mmol时,产率先增加后减小,40 $^\circ\text{C}$ 时PAO的运动黏度在 $40\sim 72\text{ mm}^2/\text{s}$ 、100 $^\circ\text{C}$ 时运动黏度在 $7\sim 12\text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数在157~165之间。催化剂用量为3 mmol时,产率达到最大,为81%。催化剂用量增加导致催化活性中心增多,从而提高了PAO的黏度;但是大量的催化剂则会导致催化剂的浪费,增加成本。综上所述,3 mmol是最佳的催化剂用量。

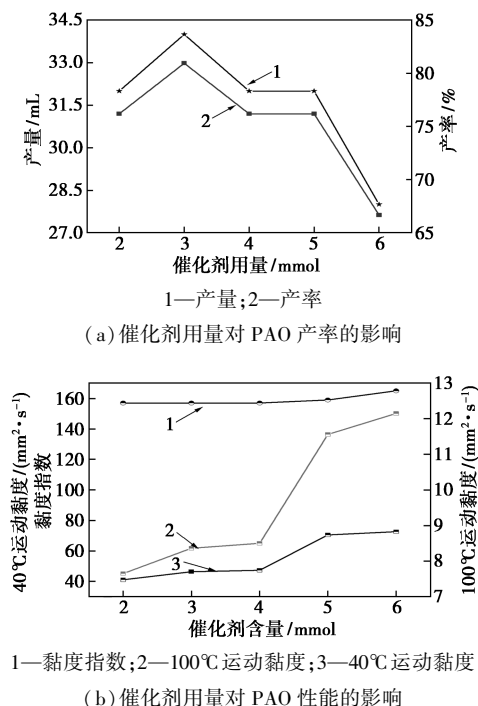


图7 催化剂用量对聚合的影响

2.5 温度对聚合效果的影响

聚合温度会影响催化剂活性进而影响催化剂与烯烃有效碰撞的次数。温度过高常会导致聚合产物异构化,影响产物性能,温度过低则催化剂活性弱,无法引发聚合反应。所以选择合适的聚合温度对聚

合反应非常重要。在 AlCl_3 的摩尔分数0.67、 FeCl_3 加入量2%、催化剂用量3 mmol、聚合时间1 h的条件下,聚合温度对催化聚合效果的影响如图8所示,聚合温度由 100°C 降低到 60°C 时,PAO的产率先增加后减少,运动黏度总体先增加后减小,40 $^\circ\text{C}$ 时PAO的运动黏度在 $36\sim 49\text{ mm}^2/\text{s}$ 、100 $^\circ\text{C}$ 时运动黏度在 $7\sim 11\text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数在160~186之间。聚合温度为 90°C 时,PAO的产率、黏度指数达到了最高,分别为81%、186。在 60°C 时由于聚合温度较低所以产物不易发生异构化,从而导致运动黏度较高,但 60°C 催化剂活性弱,聚合产率低。100 $^\circ\text{C}$ 时温度太高,PAO产物非常容易发生异构化,导致产物黏度下降。综上所述,90 $^\circ\text{C}$ 为最佳聚合温度。

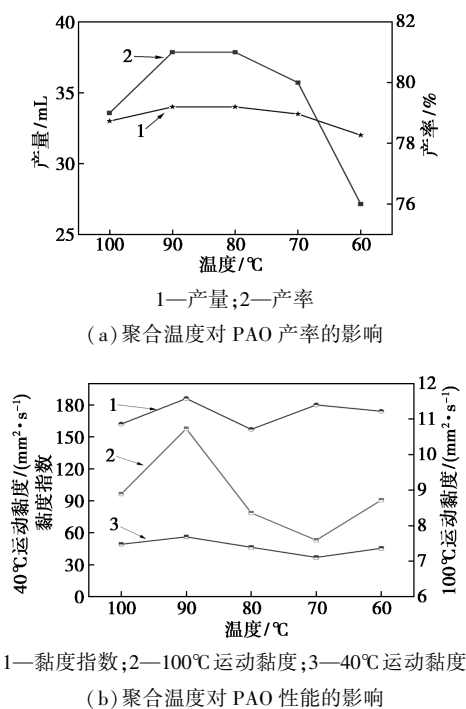
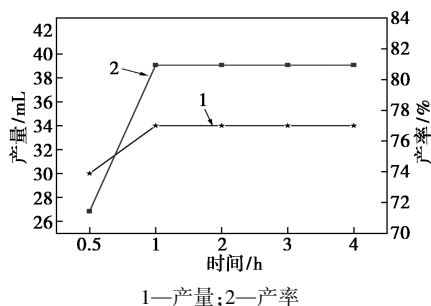


图8 温度对聚合效果的影响

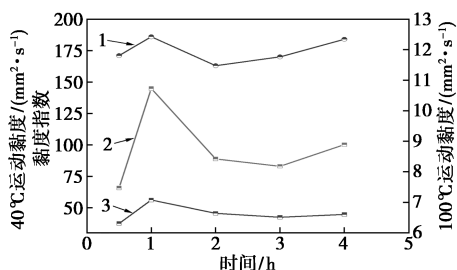
2.6 时间对聚合效果的影响

反应时间对聚合反应的影响意义深远。随着聚合时间的增加,聚合反应完全从而导致产率增加。在 AlCl_3 的摩尔分数0.67、 FeCl_3 加入量2%、催化剂用量3 mmol、聚合温度 90°C 的条件下,不同时间对催化聚合效果的影响如图9所示。随着聚合反应时间由0.5~4 h,40 $^\circ\text{C}$ 时PAO的运动黏度在 $37\sim 57\text{ mm}^2/\text{s}$ 、100 $^\circ\text{C}$ 时运动黏度在 $7\sim 11\text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数在160~186之间。1 h后,运动黏度下降,产率未发生变化,表明该聚合反应符合碳正离子聚合机理。时间对聚合产率影响较小。而随着时间的增加,PAO在 90°C 会发生异构化从而导致其黏度下降。

综上所述,1 h 为最佳反应温度。



(a) 聚合时间对 PAO 产率的影响



1—黏度指数;2—100℃运动黏度;3—40℃运动黏度

(b) 聚合时间对 PAO 性能的影响

图 9 时间对聚合效果的影响

2.7 离子液体重复使用性

离子液体催化剂优于其他传统 Lewis 酸催化剂的因素之一便是离子液体催化剂的可重复使用性,其可重复使用次数也是研究人员非常关注的一点。在 AlCl_3 的摩尔分数 0.67、 FeCl_3 加入量 2%、催化剂用量 3 mmol、聚合温度 90°C 、聚合反应时间为 1 h 的条件下,离子液体催化剂的循环使用次数如表 1 所示。离子液体催化剂循环使用 1~3 次时,PAO 产率均可达到 81%, 40°C 时 PAO 的运动黏度在 $56.15\sim 50.33\text{ mm}^2/\text{s}$ 之间,而 100°C 时运动黏度在 $10.73\sim 9.53\text{ mm}^2/\text{s}$ 之间,聚合稳定性较好。

表 1 离子液体循环使用次数

次数	产率/%	$V_{40}/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{100}/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	VI
1	80.95	56.15	10.73	186
2	80.95	51.35	9.71	177
3	80.95	50.33	9.53	176
4	80.95	33.08	7.14	185
5	66.67	32.85	7.16	184
6	59.52	12.93	3.56	162

注: V_{40} 为 40°C 运动黏度; V_{100} 为 100°C 运动黏度;VI 为黏度指数。

2.8 产物分析

由表 2 可知,改性后的离子液体催化剂相较于氯铝酸离子液体催化剂而言,PAO 的产率由 74% 增

长到 81%;运动黏度降低,黏度指数明显增加,使 PAO 的黏温性能更加优良。除此之外,PAO 产物向低聚物方向移动,为离子液体催化剂催化 α -烯烃制备低聚润滑油基础油提供了一种思路。

表 2 不同离子液体催化剂催化 1-辛烯聚合

催化剂	产率/%	$V_{40}/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$V_{100}/(\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	VI	M_n	M_w	PDI
$[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$	73.81	77.61	11.86	147	400	600	1.3
2% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$	80.95	56.15	10.73	186	400	500	1.3

3 总结

通过 FeCl_3 对氯铝酸离子液体催化改性,得到离子液体催化剂 2% $\text{FeCl}_3/[\text{HMIM}]\text{Br}-2\text{AlCl}_3$ 。在 AlCl_3 的摩尔分数 0.67、 FeCl_3 加入量 2%、催化剂用量 3 mmol、聚合温度为 90°C 、聚合时间为 1 h 的条件下催化 1-辛烯聚合制备润滑油基础油,得到的 PAO 产率为 80% 以上, 40°C 时的运动黏度为 $56.15\text{ mm}^2/\text{s}$ 、 100°C 时的运动黏度为 $10.73\text{ mm}^2/\text{s}$ 、黏度指数高达 186,催化剂可重复使用 3 次并保持较好的催化性能。该改性离子液体催化剂相较于传统氯铝酸离子液体催化剂而言,产率更高,产物运动黏度更低,黏度指数更高,黏温性能更好。

参考文献

- [1] 郑发正,谢凤.润滑剂性质与应用[M].北京:中国石化出版社,2006:32-40.
- [2] 何谷.新型热增粘润滑油脂的制备及其润滑机理研究[D].北京:北京化工大学,2015.
- [3] 褚洪岭,马克存,王斯哈,等. $\text{BF}_3/\text{乙酸}$ 催化 1-癸烯合成低黏度聚 α -烯烃润滑油基础油[J].化工进展,2018,37(8):3016-3020.
- [4] 冯黄河,蒋瑜芳,袁诗谣,等. $\text{BF}_3/\text{乙醇}$ 催化 1-癸烯连续齐聚过程牌号定制策略[J].化学反应工程与工艺,2021,37(4):329-337.
- [5] 谭朝阳.茂金属/MAO 催化 1-癸烯齐聚制聚 α -烯烃[J].石油化工,2017,46(6):759-762.
- [6] 徐鑫磊.茂金属催化混合 α -烯烃制备高粘度润滑油基础油的研究[D].上海:华东理工大学,2018.
- [7] 吕春胜,李东凯,许云飞,等.离子液体催化 1-癸烯齐聚制备润滑油基础油[J].现代化工,2013,33(5):79-81,83.
- [8] McNeice P, Marr P C, Marr A C. Basic ionic liquids for catalysis: The road to greater stability[J]. Catalysis Science & Technology, 2021, 11(3): 726-741.
- [9] Walden P. Molecular weights and electrical conductivity of several fused salts[J]. Bull Acad Imper Sci, 1914, 8: 405-422.

(下转第 150 页)

污染膜表面附着的 BaSO_4 垢已被完全去除。由钡离子浓度计算得出反渗透膜表面 BaSO_4 垢的含量约为 1.21 mg/cm^2 。

表 2 膜片钡元素含量

样品	Ba^{2+} 质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
1	63.40
2	66.10
3	64.95
平均值	64.82 ± 1.11

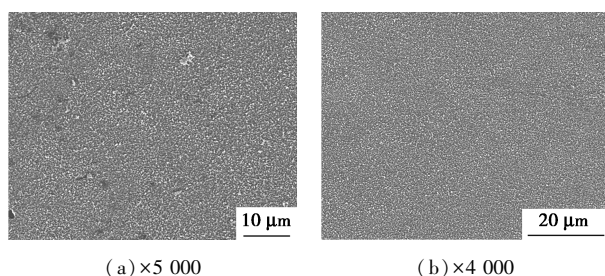


图 7 不同放大倍数下污染膜表面污染物去除后 SEM 图

2.4 反渗透膜性能测试

为考察反渗透膜表面 BaSO_4 去除后膜修复性能变化情况,本实验将前述 80°C 下 EDTA-4Na 溶液协同超声处理后的膜片进行膜性能测试,结果如图 8 所示。由图中结果可见, BaSO_4 污染膜初始截留率和通量分别为 90.1% 和 $62.8 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,清洗后反渗透膜的截留率上升到 93.4% ,通量降低到 $59.9 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。膜表面 BaSO_4 被大量去除后膜通

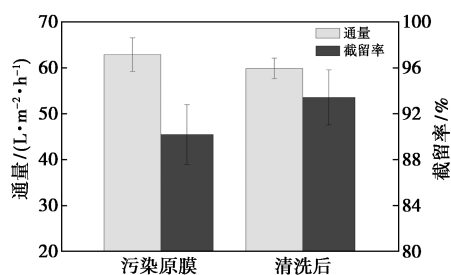


图 8 污染膜清洗前后性能变化

量略有下降,这可能是因为 80°C 清洗时使膜孔发生了收缩,从而使膜通量降低、截留率上升。

3 结论

(1)研究了 NaCl 盐度、溶液体积、温度等因素对 EDTA-4Na 去除 BaSO_4 效果的影响。当不添加 NaCl,溶液体积为 1000 mL ,温度为 80°C 时, BaSO_4 溶解于 EDTA-4Na 的效果最佳。

(2)研究了超声频率和超声功率等因素对新膜通量和截留率变化情况的影响。当超声频率和超声功率分别为 25 Hz 和 192 W 时,新膜的皮层不会出现破损现象,膜性能最佳。

(3)氨羧络合剂及超声可有效协同去除反渗透膜表面的 BaSO_4 污染物,通过计算得出反渗透膜表面 BaSO_4 垢的含量约为 1.21 mg/cm^2 ,清洗后反渗透膜的截留率为 93.4% ,通量为 $59.9 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,较清洗前膜性能得到有效恢复。

参考文献

- [1] 何灿,刘兆峰,熊日华.膜浓缩技术在高盐废水零排放处理中的应用[J].现代化工,2019,39(10):42-45,50.
 - [2] Zhang X, Huang J, Cheng X, *et al.* Mitigation of reverse osmosis membrane fouling by electrochemical-microfiltration-activated carbon pretreatment[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 656: 120615.
 - [3] 李晨璐,郭雅妮,李玉林,等.煤化工废水反渗透处理系统的运行效果及膜污染分析[J].环境科学学报,2021,41(9):3464-3477.
 - [4] Baig N, Matin A, Khan M, *et al.* Reverse osmosis membranes functionalized with polyglycidol decorated hyperbranched copolymer exhibits superior filtration performance and improved fouling resistance [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10: 108943.
 - [5] 顿小宝,郑勃,郭云飞,等.反渗透膜污染原因分析及清洗技术在电厂的应用[J].工业水处理,2022,42(2):187-190.
 - [6] 袁舰兰,杨旭,董雅杰,等.一种新型硫酸钡垢复配除垢剂的研究[J].应用化工,2016,45(4):728-731,736.
 - [7] 黄霞,莫耀.MBR 在净水工艺中的膜污染特征及清洗[J].中国给水排水,2003,(5):8-12.
 - [8] 徐岩,徐佳,王铎,等.不同内径超滤膜处理海水的分离性能及清洗方案的研究[J].水处理技术,2010,36(11):31-36. ■
- (上接第 146 页)
- [10] 王国芹,宋河远,李瑞云,等.新型高效 Bronsted 酸性离子液体催化剂体系催化烯烃齐聚反应[J].催化学报,2018,39(6):1110-1120.
 - [11] 谢亚丽,李学琴,曹玲,等.微波辅助合成碱性离子液体 [Bmim] OH 机理探讨[J].山东化工,2017,46(1):1-4.
 - [12] Tabrizi M, Sadjadi S, Nekoomanesh-Haghighi M. The effect of ionic liquid containing AlCl_3 catalytic systems on the microstructure and properties of polyalphaolefin based lubricants[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 335: 116299.
 - [13] Mashayekhi M, Talebi S, Sadjadi S, *et al.* Production of polyalphaolefin-based lubricants using new (poly) ionic liquid/ AlCl_3 catalysts as environmentally friendly alternatives to commercial AlCl_3 route[J]. Applied Catalysis A: General, 2021, 623: 118274.
 - [14] Li L, Zhao X, Chen C, *et al.* Highly selective synthesis of polyalkylated naphthalenes catalyzed by ionic liquids and their tribological properties as lubricant base oil[J]. Chemistry Select, 2019, 4(18): 5284-5290.
 - [15] 谷霞,王若飞,邵怀启,等. AlCl_3 /促进剂协同催化 1-癸烯齐聚制备聚 α -烯烃合成油[J].化工进展,2020,39(11):4497-4502.
 - [16] 王贝贝.基于离子液体烷基化催化剂的制备及性能研究[D].南京:东南大学,2019. ■