

# 季铵盐离子液体催化 $\alpha$ -烯烃聚合的研究

胡创彩, 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:**以三甲胺盐酸盐和 $\text{AlCl}_3$ 为原料合成不同摩尔比的离子液体催化剂,测试了不同反应条件对1-癸烯齐聚产物性能的影响,采用GPC(高温凝胶色谱)和FT-IR(傅里叶红外光谱)对齐聚物进行测试。结果表明,在 $n$ (三甲胺盐酸盐): $n$ (氯化铝)=1:2.5、聚合温度为90℃、用量为5%、时间为6h的反应条件下,得到的1-癸烯齐聚物在40℃和100℃的运动黏度分别为59.67 mm<sup>2</sup>/s和10.62 mm<sup>2</sup>/s,转化率为89.3%,凝点为-61.4℃,具有很好的低温流动性。当回收催化剂与新制催化剂的质量比为9:1时,聚合产物的性能浮动较小,表明催化剂可重复使用,经济效益好。

**关键词:**季铵盐型离子液体;齐聚反应;聚 $\alpha$ -烯烃;1-癸烯;循环使用

中图分类号:TQ426.94

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0155-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.029

## Research on $\alpha$ -olefin polymerization over quaternary ammonium salt ionic liquid catalyst

HU Chuang-cai, ZHANG Dan, LI Jun-hua\*, QIAN Jian-hua

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

**Abstract:** Ionic liquid catalysts with different molar ratios are synthesized from trimethylamine hydrochloride and  $\text{AlCl}_3$ , and used to test the impacts of different reaction conditions on the performance of 1-decene oligomerization products. GPC and FT-IR are utilized to characterize the products. The conditions are as follows:  $n$  (trimethylamine hydrochloride) :  $n$  ( $\text{AlCl}_3$ ) = 1 : 2.5, 1-decene polymerization happens at 90°C, the dosage of ionic liquid catalyst is 5%, and reaction lasts for 6 hours. The obtained oligomers have kinematic viscosities of 59.67 mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> and 10.62 mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup> at 40°C and 100°C, respectively, with a conversion rate of 89.3% and a pour point of -61.4°C, exhibiting good low-temperature fluidity. When the catalyst that contains 90% of recovered catalyst and 10% of fresh catalyst is served in the oligomerization, the products remain a stable performance, indicating that the catalyst can be reused, and the economic benefit is good.

**Key words:** quaternary ammonium salt ionic liquid; oligomerization reaction; polyalpha-olefins; 1-decene; recycling

进入21世纪以后,人民的衣食住行等各方面发生了极大的改变,汽车成为了人们出行的主要交通方式,汽车的长时间使用造成的高温、摩擦等问题,使用一种性能优异的润滑油便能很好地解决。近年来,国家对润滑油品质的要求也越来越严格。目前国内的I类、II类基础油供应基本稳定,但是III类合成基础油供给不足<sup>[1]</sup>。并且,我国近年来对环境保护的要求也越来越严格,I类、II类基础油已经不能满足现代环保的要求。PAO基础油属于III类基础油的一种,具有优异的黏温性能、黏度指数高、高温损失小等优点<sup>[2-3]</sup>,能够符合日益苛刻的环保、节能要求。因此,本文合成性能优异的PAO基础油,以此来满足我国对高端润滑油的需求<sup>[4-5]</sup>。

目前,烯烃聚合的催化剂主要有负载型金属氧化物、茂金属催化剂、路易斯酸催化剂、齐格勒-纳塔催化剂、离子液体催化剂或金属盐催化剂<sup>[7-9]</sup>;尽

管这些催化剂中的一些已经在工业上应用,但存在催化剂使用率高、无法回收、在后处理过程中产生大量污染等缺点<sup>[10-13]</sup>。季铵盐型离子液体催化剂作为一种环保、可循环使用的催化剂,并且离子液体催化剂的结构可以改变,在有机合成中应用较为广泛。设计制备酸性的离子液体催化剂,用于 $\alpha$ -烯烃齐聚,具有聚合时间短、催化剂与聚合物容易分离等优点<sup>[14-15]</sup>,实验通过合成三甲胺盐酸盐/ $\text{AlCl}_3$ 季铵盐型离子液体催化剂,研究不同的反应条件等因素对齐聚物性能的影响<sup>[17-20]</sup>。并且催化剂可以循环利用,与传统催化剂相比,经济性明显提高,同时减少了HCl气体的排放,在一定程度上保护了环境。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料及其预处理

1-癸烯(5A级分子筛除水)、三甲胺盐酸盐(分

收稿日期:2024-03-27;修回日期:2024-07-12

基金项目:辽宁省科技厅揭榜挂帅科技攻关项目(2021020845-JH1/104);抚顺市“抚顺英才计划”项目(FSYC202201001);中央引导地方科技发展专项(2023JH6/100100047)

作者简介:胡创彩(1995-),男,硕士生,研究方向为 $\alpha$ 烯烃齐聚性能的研究;李君华(1982-),男,博士,教授,研究方向为烯烃聚合、甲醇转化、润滑油助剂,通讯联系人,13941637905,lijunhua0521@163.com。

析纯)、正己烷(5A 级分子筛除水)、 $\text{AlCl}_3$ 、5% NaOH 溶液、无水乙醇(分析纯)、去离子水、5A 级分子筛(活化)、硅藻土等。

## 1.2 实验仪器

自动旋转蒸发仪、油浴锅、干燥箱、氮气瓶、折管式运动黏度计、Bruker 红外光谱仪、GPC 高温凝胶色谱仪、全自动凝点仪。

## 1.3 季铵盐型离子液体催化剂的制备

取适量摩尔比的三甲胺盐酸盐和  $\text{AlCl}_3$  于单口烧瓶中,放入磁子,采用正己烷作为溶剂;接着转移至油浴锅中,设定反应温度为  $80^\circ\text{C}$ ,通入冷凝循环水,反应 3 h 后停止反应,关闭油浴锅加热功能,待油浴锅的温度自然冷却后,除去单口烧瓶表面的二甲基硅油以及瓶内的磁子,然后通过旋转蒸发仪除去多余的溶剂,得到不同摩尔比的季铵盐型离子液体<sup>[12]</sup>。由于催化剂对空气和水比较敏感,需要将制备的催化剂密封保存备用。

## 1.4 1-癸烯齐聚反应

将聚合所用的玻璃仪器在烘箱中干燥、降温,待温度冷却后,取一个单口圆底烧瓶,加入一定量的离子液体催化剂,放入磁子,再取一定量的 1-癸烯,设置一定的温度,转移至恒温磁力搅拌器上,缓慢升温,反应一定时间后停止加热,待温度冷却后关闭电源。

反应结束后,溶液分层,上层为聚合粗产物,下层为反应的催化剂。使用分液漏斗分离粗产物与催化剂,得到粗聚合产物,对其粗聚合产物进行碱洗(5% NaOH 溶液)、水洗、减压蒸馏、硅藻土精制后,得到较为纯净的聚  $\alpha$ -烯烃基础油。

## 1.5 产品表征方法

产品  $40^\circ\text{C}$  和  $100^\circ\text{C}$  运动黏度按 GB/T 265 标准、采用 SYD-0956A-1 全自动折管式运动黏度试验器测量,通过 ASTM D2270 计算得到黏度指数;使用全自动凝点仪测量产品的凝点;采用德国 Bruker 红外光谱仪测量齐聚产物的红外谱图;通过 Polymer Char 高温凝胶色谱测验齐聚产物的组成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合成反应条件对于 1-癸烯齐聚的影响

#### 2.1.1 三甲胺盐酸盐与 $\text{AlCl}_3$ 摩尔比对聚合反应的影响

通过运用控制变量法,研究三甲胺盐酸盐与  $\text{AlCl}_3$  摩尔比对于 1-癸烯齐聚产物性能的影响,实验中  $\text{Me}_3\text{NHCl}/\text{AlCl}_3$  的质量分数为 5%,同时,聚合

温度和时间为  $90^\circ\text{C}$  和 6 h,实验结果如表 1 所示。

表 1 三甲胺盐酸盐与氯化铝摩尔比对聚合产物的影响

$n(\text{Me}_3\text{NHCl})$ $n(\text{AlCl}_3)$	运动黏度/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		黏度 指数	凝点/ $^\circ\text{C}$	产率/ %
	$40^\circ\text{C}$	$100^\circ\text{C}$			
1:1.5	31.86	6.21	149	-66.0	84.7
1:2	47.76	8.66	162	-63.1	86.2
1:2.5	59.67	10.62	172	-61.4	89.3

通过表 1 可知,离子液体催化剂中三甲胺盐酸盐与氯化铝的摩尔比对产物的性能有着显著的影响,当三甲胺盐酸盐与氯化铝的摩尔比为 1 时,此时制备的季铵盐型离子液体催化剂不具有催化能力。随着离子液体催化剂中氯化铝所占的比例增大,产物的运动黏度和黏度指数均明显上升,同时转化率也有较大增加;并且其聚合物凝点均小于  $-60^\circ\text{C}$ ,具有较好的低温流动性。当  $\text{AlCl}_3$  与三甲胺盐酸盐的比例大于 2.5 时,离子液体中有  $\text{AlCl}_3$  析出,因此,离子液体催化剂中  $\text{AlCl}_3$  与三甲胺盐酸盐的摩尔比 2.5:1 较为合适。

#### 2.1.2 催化剂用量对聚合反应的影响

控制反应温度和时间为  $90^\circ\text{C}$  和 6 h,同时选取三甲胺盐酸盐与氯化铝的摩尔比为 1:2.5,验证催化剂的用量对齐聚物性能的影响,实验结果见表 2。

表 2 催化剂质量分数对 1-癸烯聚合产物性能的影响

催化剂 用量/%	运动黏度/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$		黏度 指数	凝点/ $^\circ\text{C}$	产率/ %
	$40^\circ\text{C}$	$100^\circ\text{C}$			
3	30.21	6.96	158	-68.5	82.1
4	44.92	8.27	162	-64.2	86.7
5	59.67	10.62	172	-61.4	89.3
6	59.50	10.60	171	-60.5	90.5
7	59.39	10.54	170	-60.0	91.2

由表 2 可知,当离子液体的含量为 3% 时,提供的催化剂活性位点较少,齐聚物的转化率及黏度指数比较低,反应进行的比较缓慢;随着催化剂的含量逐渐增加,聚合产物的运动黏度及产率均得到明显增加,并且聚合产物的凝点均低于  $-60^\circ\text{C}$ ,说明聚合物具有较好的流动性。1-癸烯的聚合反应属于碳正离子反应,当反应体系中催化剂的含量达到过饱和时,反应体系中的活性碳正离子过多,对于齐聚反应,不利于制备运动黏度和黏度指数较高的聚合产物<sup>[12]</sup>。因此,为了使其获得的产品的经济利益最大化,催化剂的质量分数采用 5% 较为

适合。

### 2.1.3 齐聚反应温度对产物的影响

温度能提高反应速率,加快反应进程,对聚合反应的影响较大。为验证聚合温度对1-癸烯齐聚产物性能的影响,采用以三甲胺盐酸盐与氯化铝摩尔比为1:2.5,催化剂的质量分数为5%,聚合反应的反应时间为6 h,测试结果见表3。

表3 聚合温度对产物性能的影响

聚合温度/ ℃	运动黏度/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		黏度 指数	凝点/ ℃	产率/ %
	40℃	100℃			
70	50.21	8.96	161	-67.2	83.5
80	56.79	10.14	169	-64.5	87.6
90	59.67	10.62	172	-61.4	89.3
100	57.30	10.25	170	-60.2	88.6
110	50.41	9.21	168	-62.1	87.2

由表3可知,齐聚反应产物的性质与反应温度影响最为密切,反应温度较低时,催化剂的活性较低,故聚合效率比较低,从而转化率比较低;随着反应温度升高,催化剂的活性升高,催化剂的转化率和运动黏度均先升高后下降,转化率在温度为90℃时达到最高,此时的黏度指数也最大。出现这种现象的原因是,随着温度的逐渐升高催化剂的活性达到最大,降低了反应的活化能,使反应时间缩短,此时运动黏度达到最高。但温度超过了催化剂的适宜温度后,聚合过程中会引发异构化、分子重排等副反应<sup>[6]</sup>,从而使得支链数量增加,也会导致油品的黏度指数降低。因此,1-癸烯聚合过程的反应温度设定为90℃较为合适。

### 2.1.4 聚合反应时间对产物的影响

为探究时间对1-癸烯聚合产物性能的影响,以三甲胺盐酸盐与氯化铝的摩尔比为1:2.5的离子液体作为催化剂,催化剂的质量分数为5%,聚合反应的反应温度为90℃,观察反应时间对1-癸烯聚合产物性能的影响,结果见表4。

表4 聚合时间对产物性能的影响

聚合时间/ h	运动黏度/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		黏度 指数	凝点/ ℃	产率/ %
	40℃	100℃			
4	46.35	8.55	165	-63.5	87.6
5	53.77	9.72	169	-62.0	88.7
6	59.67	10.62	172	-61.4	89.3
7	58.70	10.45	170	-60.5	90.2
8	58.80	10.50	171	-62.6	92.1

由表4可知,齐聚反应得到的产物凝点均小于-60℃,具有较好的黏温性能,随着反应的进行,齐聚产物的黏度指数表现为先上升后又略微下降,这主要是由于随着齐聚反应的进行,体系中的碳正离子含量较少,整个反应体系的速率就会呈现略微下降的趋势。结果表明, $\alpha$ -烯烃的齐聚反应属于碳正离子反应,反应具有增长快、快引发、易转移、难终止的特点。由结果可知,季铵盐离子液体催化 $\alpha$ -烯烃聚合过程,也遵循此反应特点,反应时间较短。

## 2.2 齐聚产物的红外光谱分析

在多次优化后,得到的黏度指数和运动黏度都比较高的条件下进行1-癸烯的齐聚反应,最终得到的1-癸烯齐聚产物,通过红外光谱分析其聚合物的结构以及聚合反应的进行程度,实验结果如图1。

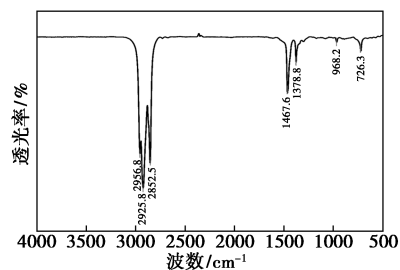


图1 1-癸烯聚合产物的红外光谱图

由图1可知,1-癸烯末端碳碳双键中C—H伸缩振动峰、C—H键的面外弯曲振动吸收峰,在聚合产物的红外光谱中已经基本消失,说明齐聚反应进行的比较彻底。谱图中在968.2  $\text{cm}^{-1}$ 处的峰为反式烯烃的特征吸收峰,证明产物中存在双键,其原因可能是齐聚反应中存在异构化现象,进而使正构烯烃转化为少量反式烯烃。726.3  $\text{cm}^{-1}$ 处为含有多个碳数的烷烃的特征峰,可判断聚合产物中有较长线性侧链。2956.8  $\text{cm}^{-1}$ 和2852.5  $\text{cm}^{-1}$ 处对应于甲基中C—H键的不对称和对称伸缩振动峰,2925.8  $\text{cm}^{-1}$ 处的是—CH<sub>2</sub>—中C—H键的对称伸缩振动峰;1378.8  $\text{cm}^{-1}$ 处为甲基中C—H键的弯曲振动峰,1467.6  $\text{cm}^{-1}$ 处为亚甲基中C—H键的弯曲振动峰<sup>[16]</sup>,另外,红外光谱中没有多余的杂峰,进一步说明制备的聚合产物比较纯净。

## 2.3 齐聚产物的高温凝胶色谱分析

在多次优化后,得到的黏度指数和运动黏度都比较高的条件下进行1-癸烯的齐聚反应,最终得到的1-癸烯齐聚产物,对其进行GPC结构分析,实验

结果如图 2 所示。

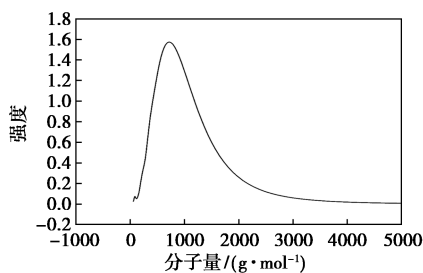


图 2 1-癸烯聚合产物的 GPC 高温凝胶色谱图

聚合物的性质同分子量的大小有着密切的关系,由图 2 可知,聚合产物的分子量分布呈正态分布, $M_p = 600 \text{ g/mol}$ ,表明主要聚合物占体系的 85% 以上,重均分子量  $M_w = 700 \text{ g/mol}$ ,齐聚物是由 1-癸烯聚合而成,所以聚合产物中主要以四、五聚体为主;此外,图中还存在一个小型峰,说明还有少量 1-癸烯未聚合。此外,体系的多分散系数为  $M_w/M_n = 1.5$ ,说明分子量都集中在一个比较狭窄的范围内,表现出图形位置相对集中、分布较窄的特点。

#### 2.4 催化剂循环次数对产品性能的影响

在多次优化后,得到的黏度指数和运动黏度都比较优良的条件下进行 1-癸烯的齐聚反应,最终得到的 1-癸烯齐聚产物,进而测量产品的性能。由于,使用后的催化剂比较黏稠,容易粘到瓶壁,从而使催化剂的真正用量减少,所以需要补充新鲜的催化剂,并按照回收与新鲜的催化剂质量比为 9:1 添加进行实验。3 次回收循环利用后,测量的齐聚物产品性能如表 5。

表 5 催化剂循环利用次数对 1-癸烯聚合产物性能的影响

循环次数	运动黏度/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		黏度指数	凝点/ $^{\circ}\text{C}$	产率/%
	40 $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$			
1	59.67	10.62	172	-61.4	89.3
2	58.01	10.51	174	-62.1	88.2
3	58.28	10.43	171	-61.2	87.6

由表 5 可知,催化剂循环使用 3 次后,齐聚物的性能基本没有发生太大的改变,说明制备的催化剂可以循环利用,增加了催化剂的使用次数,使产品的生产成本减小,为企业增加效益。但是在反应中存在催化剂使用后变得较黏稠、容易粘到烧瓶瓶壁上的现象,且催化剂的颜色较使用前相比变深,可能是由于聚合反应原料中还含有少量的水,催化剂接触水后失效导致的。

### 3 结论与展望

(1) 通过实验合成了  $\text{Me}_3\text{NHCl}/\text{AlCl}_3$  的季铵盐型离子液体催化剂,多次优化实验条件,最后在  $\text{Me}_3\text{NHCl}/\text{AlCl}_3$  的摩尔比为 1:2.5、催化剂的质量分数为 5%、反应温度和时间为 90 $^{\circ}\text{C}$  和 6 h 的条件下得到的齐聚物性能最好,齐聚产物在 40 $^{\circ}\text{C}$  和 100 $^{\circ}\text{C}$  时的运动黏度分别为 59.67  $\text{mm}^2/\text{s}$  和 10.62  $\text{mm}^2/\text{s}$ ,黏度指数为 172,凝点为 -62.1 $^{\circ}\text{C}$ ,转化率为 89.3%,各项性能指标均优于国家对润滑油的要求标准。

(2) 通过对齐聚物进行 FT-IR 和 GPC 测试结果分析,齐聚反应进行的比较完全,聚合产物主要以四、五聚体为主,并且含量达到 85% 以上;同时,反应中存在异构化现象;此外,红外光谱中,齐聚物的峰比较纯净,进一步说明齐聚反应进行的比较完全。

(3) 季铵盐型离子液体催化剂的回收循环使用是可行的,与首次使用的催化剂相比,回收的离子液体催化剂的催化效率有所下降;采用补充新制的离子液体催化剂的方法,并按照回收催化剂与新制催化剂的质量比为 9:1 进行循环使用,产物的组成及性能无明显区别。采用此方法可以降低生产成本,同时也有利于保护环境。

(4) 由于制备的催化剂使用的原料是  $\text{AlCl}_3$ ,制备过程中产生  $\text{HCl}$  气体,会污染环境。因此,可考虑采用  $\text{FeCl}_3$  或  $\text{ZnCl}_2$  来代替  $\text{AlCl}_3$ ,从而改善催化剂的性能,减少环境污染,制备出性能更优良的 PAO 基础油。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 吕春胜,许云飞,颜子龙,等.1- $\text{C}_{12}$  烯烃齐聚制备高性能润滑油基础油[J].石油学报(石油加工),2014,30(3):446-452.
- [3] Kioupi L I, Maginn E J. Molecular simulation of poly- $\alpha$ -olefin synthetic lubricants: Impact of molecular architecture on performance properties[J]. Journal of Physical Chemistry B, 1999, 103(49):10781-10790.
- [4] 王桂荣,闫云,杨秋生,等.季铵盐类氯铝酸离子液体的表征及其催化苯与苯酚的酰基化反应[J].石油化工,2022,51(2):115-123.
- [5] Shao H, Gu X, Wang R, et al. Preparation of lubricant base stocks with high viscosity index through 1-decene oligomerization catalyzed by alkylaluminum chloride promoted by metal chloride[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(2):2214-2220.

(下转第 165 页)

- [12] 张文勃, 李晓玲, 刘心怡, 等. EDTA-2Na/Fe(II)对自养生物体系下硝酸盐还原过程的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3149-3155.
- [13] Zhang Y, Klammerth N, Chelme-Ayala P, *et al.* Comparison of classical Fenton, nitrilotriacetic acid (NTA)-Fenton, UV-Fenton, UV photolysis of Fe-NTA, UV-NTA-Fenton, and UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for the degradation of cyclohexanoic acid [J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 178-185.
- [14] Li Y, Sun J, Sun S. Comparison of metoprolol degradation by Fe<sup>III</sup>-NTA modified Fenton-like reaction in the absence and presence of manganese; Efficiency and intermediates [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313(1): 769-776.
- [15] 马红芳, 杨浩宇, 陈思颖, 等. NTA 强化 Fe(II)/PMS 体系降解橙黄 G 的效能与机制 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 222-232.
- [16] 陈越, 郭波, 邢海双, 等. 生物纳米铁/铈联用过碳酸钠改善污泥脱水性能 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(9): 4708-4717.
- [17] Guo B, Xu T, Zhang L, *et al.* A heterogeneous Fenton-like system with green iron nanoparticles for the removal of bisphenol A: Performance, kinetics and transformation mechanism [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 272: 111047.
- [18] 张乃东, 郑威, 彭永臻. 褪色光度法测定芬顿体系中产生的羟自由基 [J]. 分析化学, 2003, (5): 552-555.
- [19] 廖滢滢, 邻二氮菲分光光度法测定水中铁离子含量实验设计 [J]. 化工管理, 2021, (12): 116-117.
- [20] Xiang W, Huang M J, Wu X H, *et al.* Amplification effects of magnetic field on hydroxylamine-promoted ZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> near-neutral Fenton like system [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2022, 33(3): 1275-1278.
- [21] 崔航, 臧学轲, 吕树光. 抗坏血酸强化 Fe(III) 催化过碳酸钠体系降解水溶液中乙苯 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40(11): 1262-1266.
- [22] Liang J, Zhang L, Yan W, *et al.* Mechanistic insights into a novel nitrilotriacetic acid-Fe<sup>0</sup> and CaO<sub>2</sub> process for efficient anaerobic digestion sludge dewatering at near-neutral pH [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116149.
- [23] Xiong L, Ren W, Lin H, *et al.* Efficient removal of bisphenol A with activation of peroxydisulfate via electrochemically assisted Fe(III)-nitrilotriacetic acid system under neutral condition [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123874.
- [24] 王真然, 彭蕴斓, 刘义青, 等. 羟胺强化 Fe(III)-NTA 络合物活化过二硫酸盐降解磺胺甲噁唑 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 1163-1172.
- [25] Xu X M, Zhou Y H, Li S S, *et al.* Activation of sodium percarbonate with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MXene composite for the efficient removal of bisphenol A [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6): 11.
- [26] 臧学轲. 羟胺促进柠檬酸-Fe<sup>2+</sup> 活化过碳酸钠降解三氯乙烯 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 454-462.
- [27] Martone L, Minella M, Minero C, *et al.* Effective degradation of ibuprofen through an electro-Fenton process, in the presence of zero-valent iron (ZVI-EF) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 367: 132894.
- [28] 李赛, 田瑜, 徐婷婷, 等. 绿色纳米零价铁为催化剂的类芬顿法降解甲基橙 [J]. 应用化工, 2020, 49(2): 302-307.
- [29] Lin J, Sun M, Liu X, *et al.* Functional kaolin supported nanoscale zero-valent iron as a Fenton-like catalyst for the degradation of Direct Black G [J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 664-672.
- [30] 李赛. 绿色合成纳米零价铁与膨润珍珠岩负载纳米零价铁降解混合染料的研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019. ■

(上接第 158 页)

- [6] 邵怀启, 李会, 林吉超, 等. 聚  $\alpha$ -烯烃合成润滑油催化剂的技术进展 [J]. 精细石油化工进展, 2014, 15(4): 51-55.
- [7] 张耀, 段庆华, 刘依农, 等. 离子液体催化 1-癸烯齐聚制备聚  $\alpha$ -烯烃的研究 [J]. 石油炼制与化工, 2011, 42(11): 62-65.
- [8] Nomura K, Zhang S. Design of vanadium complex catalysts for precise olefin polymerization [J]. *Chemistry Review*, 2011, 111(3): 2342-2362.
- [9] Wang Y, Zuo M, Li Y. Theoretical investigation of the mechanism of ethylene polymerization with salicylaldiminato vanadium (III) complexes [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2015, 36(4): 657-666.
- [10] Lahtela M, Pakkanen T A, Nissfolk F. Molecular modeling of poly- $\alpha$ -olefin synthetic oils [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1995, 99(25): 10267-10271.
- [11] 张大伟. 离子液体催化 1-癸烯齐聚物的合成及其应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [12] 王成欢, 毕玉琦, 杨明. 润滑材料 1-癸烯齐聚物的合成与性能研究 [J]. 航空材料学报, 2015, 35(1): 45-50.
- [13] 李洪梅, 曹祖宾, 石薇薇, 等. 1-癸烯聚合制备高黏度聚  $\alpha$ -烯烃合成油 [J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(9): 81-85.
- [14] Small B L, Marcucci A J. Iron catalyst for the head-to-head dimerization of  $\alpha$ -olefins and mechanistic implications for the production of line  $\alpha$ -olefins [J]. *Organometallic*, 2001, 20(26): 5738-5744.
- [15] Antonsen D H, Hoffman P S, Stearns R S. Preparation and properties of oligomers from 1-octene [J]. *I & E Product Research and Development*, 1963, 3(2): 224-226.
- [16] 王成欢. AlCl<sub>3</sub>-Et<sub>3</sub>NHCl 离子液体催化  $\alpha$ -烯烃齐聚反应的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [17] 王京, 吴燕珍, 王乃鑫, 等. 运用多谱学分析技术测定高黏度聚  $\alpha$ -烯烃的结构 [J]. 石油炼制与化工, 2016, 7(1): 93-100.
- [18] Leckel D, Liwanga-Ehumbu M. Diesel-selective hydrocracking of an iron-based Fischer-Tropsch wax fraction (C<sub>15</sub>-C<sub>45</sub>) using a MoO<sub>3</sub>-modified noble metal catalyst [J]. *Energy & Fuels*, 2006, 20(6): 2330-2336.
- [19] 吴学谦, 翁惠新. 煤制烯烃合成低黏度聚  $\alpha$ -烯烃基础油工艺研究 [J]. 中外能源, 2013, 18(10): 71-74.
- [20] Peuckert M, Keim W. A new nickel complex for the oligomerization of ethylene [J]. *Organometallics*, 1983, 2(5): 594-597. ■