

# 页岩油与地沟油共催化裂化及其产物分布规律研究

陈进<sup>1</sup>, 石剑<sup>1</sup>, 王车礼<sup>1,2\*</sup>

(1.常州大学石油化工学院, 江苏常州 213164; 2.常州大学药学院, 江苏常州 213164)

**摘要:**以地沟油和龙口页岩油为原料,考察了不同配比的页岩油与地沟油共催化裂化及其产物分布规律。结果表明,地沟油质量分数为 25% 时,轻油收率和液收率最高,分别为 54.24% 和 78.13%,转化率达到 92.23%。对汽油馏分和柴油馏分组成进行分析可知,随着地沟油质量分数的逐渐增加,汽油中的芳烃质量分数先减少后增加,杂原子化合物的质量分数先减少后增加;当地沟油质量分数为 25% 时,汽油馏分中的芳香烃质量分数在 50% 左右。裂解气中主要是 C<sub>3</sub> 及以下气体,质量分数达到 65% 以上。

**关键词:**页岩油;地沟油;共催化裂化;轻油收率

**中图分类号:**TE621

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2022)04-0156-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.04.030

## Co-catalytic cracking of shale oil-waste cooking oil and products distribution

CHEN Jin<sup>1</sup>, SHI Jian<sup>1</sup>, WANG Che-li<sup>1,2\*</sup>

(1.School of Petrochemical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2.School of Pharmacy, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Using waste cooking oil and Longkou shale oil as raw materials, the co-catalytic cracking of shale oil and waste cooking oil under different ratios and the products distribution are studied. The results show when the mass fraction of waste cooking oil in feedstock oil is 25%, the yields of light oil and liquid reach the highest, 54.24% and 78.13%, respectively, and the conversion rate is 92.23%. The analysis shows that with the gradual increase of the mass fraction of waste cooking oil, the mass fractions of both aromatics and heteroatomic compounds in gasoline firstly decreases and then increases. The mass fraction of aromatic hydrocarbons in gasoline fraction is only about 50% when the mass fraction of waste cooking oil in feedstock oil is 25%. The cracked gas contains mainly C<sub>3</sub> and lighter hydrocarbons, with a mass fraction more than 65%.

**Key words:** shale oil; waste cooking oil; co-catalytic cracking; yield of light oil

随着石油质量趋向重质化、劣质化,难以满足对石油化工产品(如汽柴油、乙烯、丙烯等)的需求,急需寻找合适可替代能源<sup>[1-2]</sup>。我国页岩油资源丰富,其理化性质类似石油,可作为石油的补充能源。但因其含有较多的氮化物,特别是碱性氮含量较高,严重影响了其资源加工性能<sup>[3-4]</sup>。

页岩油炼制通常采用加氢裂化和酸碱精制等方式,对于加氢裂化,由于操作条件苛刻(需要高压、高氢油比等),因此造成设备投资大、操作费用高;而酸碱精制成本较高,且生产过程中会产生大量工业废水<sup>[5-6]</sup>。催化裂化是一种成本较低、技术较为成熟的石油加工方法,但由于页岩油中的碱性氮化物易于催化剂的酸性活性中间体络合结焦,因此会造成催化裂化过程中催化剂活性和产品选择性下降

等问题<sup>[7-10]</sup>。近年来,将重油与生物质油混合催化裂化的方法越来越受到关注<sup>[11-14]</sup>。

我国地沟油每年的产量大约在 5~10 万 t<sup>[15-16]</sup>。不仅对环境造成严重污染,还会造成极大的资源浪费<sup>[17-19]</sup>。地沟油主要由脂肪酸组成,因此,可以满足其与页岩油共催化裂化的要求<sup>[20-22]</sup>。笔者将主要研究地沟油以不同质量比掺入页岩油中共催化裂化,在一定的操作条件下,考察产品收率及分布,并对产品的物质组成进行表征。

## 1 实验部分

### 1.1 原料与设备

#### 1.1.1 原料油

页岩油为山东龙口油页岩干馏所得,地沟油来

收稿日期:2021-04-01;修回日期:2022-02-14

基金项目:江苏省教育厅面上项目(19KJB480004);江苏省前瞻性联合研究项目(BY2012091);中石化联合研发项目(411024)

作者简介:陈进(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为页岩油与地沟油共催化裂化,chenj654123@163.com;王车礼(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为生物质绿色转化,通讯联系人,clwang@cczu.edu.cn。

自江苏卡特新能源有限公司,经预处理后地沟油和页岩油的基本性质如表1所示<sup>[23]</sup>。

表1 原料油基本性质参数

地沟油基础物性	参数	页岩油基础物性	参数
密度(20℃)/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.9302	密度(20℃)/(g·mL <sup>-1</sup> )	0.9022
运动黏度(50℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	8.523	运动黏度(50℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	12.616
凝点/℃	-15	凝点/℃	31
闪点(闭口)/℃	302	闪点(闭口)/℃	121
w(棕榈酸)/%	17.78	w(饱和分)/%	50.26
w(硬脂酸)/%	5.99	w(芳香分)/%	26.59
w(油酸)/%	28.43	w(胶质)/%	16.85
w(亚油酸)/%	39.65	w(沥青质)/%	6.30
w(亚麻油酸)/%	6.30	w(C)/%	82.14
w(其他)/%	1.85	w(H)/%	11.40
		w(S)/%	0.97
		w(N)/%	1.26
		w(O)/%	4.23

### 1.1.2 混合油品

配制地沟油质量分数分别为0%、25%、50%、75%和100%的混合油作为催化裂化原料。分别称取相应质量的地沟油和页岩油倒入烧杯中,杯口用保鲜膜覆盖,利用磁力搅拌装置进行搅拌,同时用恒温水浴对油品做恒温保护,加热温度为60℃,保持操作2h,使油品混合均匀。

### 1.2 催化剂

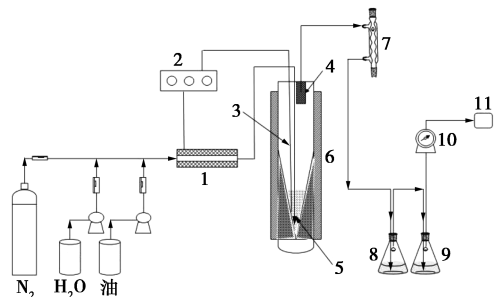
实验所用CIP-2型工业催化剂具有中孔结构,由中石化石油化工科学研究院研制。具体特性如表2所示<sup>[25]</sup>。

表2 CIP-2催化剂的性质

项目	微反活性/ %	堆密度/ (g·cm <sup>-1</sup> )	孔体积/ (mL·g <sup>-1</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均粒径/ μm
数值	59	3.10	0.24	156	73.8

### 1.3 实验设备

小型固定流化床装置流程如图1所示。



1—预热装置;2—温度显示仪表;3—热电偶温度计;4—过滤单元;5—催化剂;6—流化装置;7—冷凝装置;8—水吸收瓶;9—酒精吸收瓶;10—湿式气体流量计;11—气体收集

图1 小型固定流化床实验装置流程图

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 实验步骤

催化裂化条件:反应温度为500℃、剂油比为6、重时空速为10 h<sup>-1</sup>。首先,将水抽入预热器。然后让蒸汽进入反应器,在反应器中与催化剂高温接触形成流化。将混合油经油泵抽出,注入预热器,预热后的混合油与水蒸气一起进入反应器,与催化剂以流化状态反应。反应后,油气从反应器中汽提出冷凝冷却,油气先部分冷却进入一级接收瓶,再次冷却进入二级接收瓶,剩余油气用工业乙醇通过液化气吸收瓶吸收到液化气中,然后进入湿流量计测量干气。需要收集裂化气时,直接将二级接收瓶的排除导管连接集气袋收集裂化气。催化裂化反应所得的液体产物通过恩氏蒸馏的方式进行处理,首先用无水硫酸钠对其除去所含的微量水分,再进行蒸馏切割,分别接取汽油馏分(<205℃)、柴油馏分(205~350℃)、重油馏分(>350℃)。

#### 1.4.2 气相色谱分析

利用安捷伦6890GC-System气相色谱分析仪分析干馏气气体组成和含量。操作条件:氮气流量为4 mL/min,氢气流量为40 mL/min,空气流量为300 mL/min。仪器设定进口温度为50℃,FID温度为250℃,TCD温度为250℃。升温程序为:初始温度为50℃,停留时间为3 min,以5℃/min升温速率升至100℃后继续增加升温速率为10℃/min至终温保持3 min。

#### 1.4.3 气相色谱-质谱联用分析

汽柴油馏分采用GC/MS联用仪分析物质组成。选取美国Trace DSQ色谱质谱联用仪表征分析。色谱柱型号为HP-5MS的石英毛细管柱,气化室温度为300℃。电子轰击源电压为70 eV,载气为氦气。升温程序:初始温度为50℃,停留3 min,然后以5℃/min的升温速率升高到300℃,停留10 min。实验结果用Qual Browser软件进行分析。

#### 1.4.4 核磁分析

利用Bruker AVANCE III-400 MHz核磁共振仪对汽柴油馏分进行测试分析。用四甲基硅烷为内标,CDCl<sub>3</sub>为溶剂。<sup>13</sup>C谱扫描时间为3 s,扫描次数2048次。用软件MestReNova6.1.1定性定量分析样品的结构信息。

#### 1.4.5 热重分析

利用微机差热天平对样品进行热重分析。准确称量实验催化剂样品20 mg,以高纯氮气为保护载气,设定升温程序,热解终温为800℃,升温速率为

20℃/min<sup>[24]</sup>。

#### 1.4.6 场发射扫描电镜分析

利用扫描电子显微镜(德国蔡司 SUPRA-55)观察反应前后催化剂表面和中心孔道的结焦状况。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地沟油质量分数时产品分布的影响

不同地沟油质量分数的页岩油与地沟油共催化裂化的产品分布如表 3 所示。

表 3 页岩油与地沟油在不同地沟油质量分数下混炼的催化裂化产品分布 %

产品分布	地沟油质量分数/%				
	0	25	50	75	100
干气	2.57	3.44	3.85	5.93	6.45
液化气	20.35	23.89	24.53	25.10	26.31
汽油馏分	22.52	26.29	24.51	23.16	20.28
柴油馏分	24.13	27.95	25.19	23.07	21.14
重油馏分	4.10	3.37	3.43	3.68	4.09
结焦量	17.09	10.66	11.37	11.73	13.10
轻油收率	45.65	54.24	49.70	46.23	43.23
液收率	66.00	78.13	74.23	71.33	68.73
转化率	86.66	92.23	89.45	88.99	88.29

由表 3 可知,页岩油与地沟油质量比不同,共催化裂化后的产物分布变化显著。随着地沟油质量分数的增大,总收率呈现先升高后降低的趋势,当地沟油质量分数为 25% 时,转化率为 92.23%;同时,轻油收率、液收率均是先升高后降低,因此,将地沟油掺入页岩油中混炼可以改善反应情况,相比 2 种油品单独裂化时效果都要好。原料油催化裂化时的结焦量随地沟油质量分数的增加同样呈现先增加后降低趋势,原料油在催化剂上大量结焦时,焦炭容易堵住 CIP-2 催化剂中孔结构,使得原料油的催化裂化程度不足;页岩油催化裂化反应时,结焦量最大,干气、液化气和轻油的收率均为最低;随着地沟油质量分数的增加,结焦量先从 17.09% 下降到最低的 10.66% 后逐渐上升到 13.10%,干气和液化气的收率在逐渐上升,轻油收率先上升后降低;当地沟油质量分数为 25% 时,轻油收率和液收率达到最高,分别为 54.24%、78.13%。这是因为催化剂上的结焦量在减少,被堵住中心孔道的 CIP-2 催化剂量在减少,从而增加原料油的催化裂化程度、轻油的二次催化裂化机率,促使产生更多的干气和液化气,导致汽柴油馏分的收率呈现先上升后降低趋势。因此,页岩

油与地沟油混炼时不宜掺入过多地沟油,掺入少量地沟油与页岩油混炼可以获得较好产品分布。

### 2.2 裂解气组成分析

不同地沟油质量分数的页岩油与地沟油裂解气组成如表 4 所示。

表 4 不同地沟油质量分数下裂解气组成 %

地沟油质量分数/%	0	25	50	75	100
甲烷	5.32	6.21	4.12	3.83	3.21
乙烷	20.13	10.60	14.16	16.22	18.23
乙烯	11.34	19.45	18.66	15.29	12.33
丙烷	14.21	8.36	12.87	17.68	19.33
丙烯	8.01	22.53	18.88	15.28	13.33
异丁烷	8.66	7.42	7.52	6.72	7.54
正丁烷	13.36	5.50	7.22	11.38	14.43
正丁烯	12.62	13.35	10.49	8.24	7.78
异丁烯	4.12	4.01	4.64	3.27	1.52
正戊烷	2.21	2.56	2.44	2.10	2.28

从表 4 中可以看出,页岩油与地沟油混炼时裂解气中主要是 C<sub>4</sub> 及以下的烷烃和烯烃。其中烷烃主要是乙烷、丙烷,烯烃主要是乙烯、丙烯、正丁烯。随着地沟油质量分数的增大,烷烃呈现先下降后上升趋势,烯烃呈现先上升后下降趋势;丙烷的收率从纯页岩油时的 14.21% 先下降到地沟油质量分数 25% 时的 8.36% 后又逐渐上升到纯地沟油时 19.33%;而丙烯的收率从 8.66% 上升到了 22.53% 后又下降到了 13.33%。与页岩油或地沟油催化裂化时相比,混合油时的 C<sub>3</sub> 以下烃类物质更多,说明混合油裂化程度要高于页岩油和地沟油,这是因为页岩油中的含氮物和地沟油中含氧物对催化剂的毒害影响比较重,因此裂化程度不够,大量物质结焦,生成的焦炭包裹在催化剂表面和孔道内,影响了催化剂的性能。而当掺入地沟油之后,C<sub>3</sub> 以下的烃类气体产生量就相对增大,说明总体的原料裂化程度增大,因此将地沟油和页岩油掺炼能够得到很好的收率和产品分布。

### 2.3 汽柴油馏分组成分析

利用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对不同地沟油质量分数下的汽柴油馏分的组成以及含量进行分析。因为汽柴油馏分中含有的组分较多、含量不一,所以将馏分中的各种组分按照族组成进行分类,根据不同族的质量分数来观察规律。根据 GC-MS 分析得到的结果,将馏分的组分按照族组成归类,除了普遍使用的烷烃、环烷烃、烯烃、芳烃外;根据原料

的组成特点,增加杂原子化合物类别,并计算各类别的质量分数,结果如表5所示。

表5 不同地沟油质量分数下汽柴油的族组成 %

地沟油 质量分数/%	汽油				
	0	25	50	75	100
支链烷烃	21.22	25.34	26.14	18.81	9.98
环烷烃	2.89	3.65	5.49	9.65	12.87
烯烃	7.24	13.52	12.77	12.25	9.6
芳香烃	54.12	51.40	49.99	52.52	60.41
杂原子	14.53	6.0	5.61	6.77	7.14

地沟油 质量分数/%	柴油				
	0	25	50	75	100
支链烷烃	16.61	24.72	21.86	14.09	8.13
环烷烃	2.21	4.34	3.16	2.23	0.89
烯烃	10.61	5.59	3.39	2.42	1.12
芳香烃	56.65	58.39	63.28	70.35	74.62
杂原子	13.92	6.92	8.31	10.91	15.24

由表5可知,当页岩油或地沟油催化裂化时,汽油馏分中的芳烃质量分数较多,随着地沟油质量分数的增加,芳烃的质量分数先减少后增加,而烷烃的质量分数先增加后减少,说明可以通过调节地沟油和页岩油之间的比例,将芳烃和烷烃的质量分数控制在合理的范围。同时,观察汽油馏分中的杂原子化合物发现,页岩油裂化所得到的汽油馏分中含有较多的杂原子成分,这是因为页岩油中含有较多的含氮化合物,因此馏分中会有一部分含氮化合物。而地沟油掺入页岩油后,含杂原子化合物下降很快,说明存在部分含杂原子化合物在反应中被裂化,杂原子生成较轻的气体,从而减少了产物中的杂原子质量分数,同时也能够做到抑制杂原子化合物对催化剂的毒害。而柴油馏分中,随地沟油质量分数的增加,芳烃的质量分数逐渐增加,烷烃先增加后减少,杂原子化合物先减少后增加。说明催化剂结焦量在减少时,提升油品深度催化裂化程度,促使更多脂肪烃缩合供氢,从而油品中部分杂原子被去除,也降低了芳烃的质量分数。

#### 2.4 汽柴油馏分的<sup>13</sup>CNMR分析

不同地沟油质量分数的页岩油与地沟油共催化裂化所得到的汽油和柴油馏分油的<sup>13</sup>C核磁分析结果如图2所示。

由图2中可以看出,不同地沟油质量分数混合油催化裂解产物汽柴油馏分中,碳结构主要为甲基碳(化学位移为12~20 ppm)、亚甲基碳(化学位移

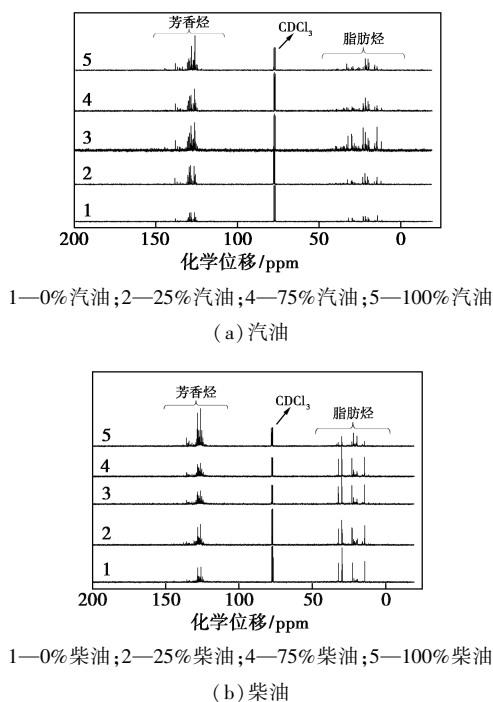


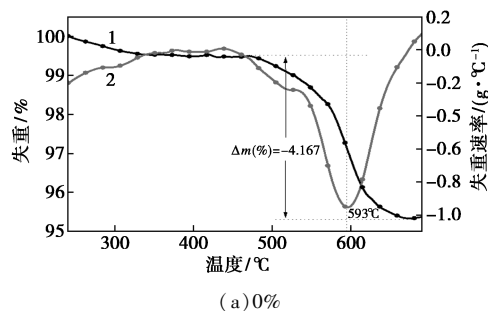
图2 不同地沟油质量分数下汽柴油碳谱图

20~40 ppm)和苯环中的碳(化学位移120~160 ppm),其汽油中脂肪族类的碳质量分数随地沟油质量分数增加先增加后减少,芳族类的碳质量分数先减少后增加;而柴油中脂肪族类的碳质量分数随地沟油质量分数的增加而逐渐减少,芳族类的碳质量分数逐渐增多。说明随着地沟油质量分数的增加,混合油裂化程度逐渐加深,汽柴油中脂肪族化合物二次反应,一部分产物向小分子移动,产生更多的裂化气;一部分加剧直链烷烃烯烃的芳构化,从而形成更多的芳烃。与GC-MS结果基本一致。

#### 2.5 CIP-2催化剂热重分析

根据催化裂化产物分布结果,选取催化裂化效果相对较好时的催化剂和页岩油或地沟油反应后的催化剂进行热重分析,结果如图3所示。

从图3可知,3种催化裂化原料反应后的催化剂主要失重温度在400~650℃之间。在该温度范围内,TG曲线斜率增加明显,从热失重速率上看,在593℃左右时失重速率达到最大值,此时催化剂上的



(a) 0%

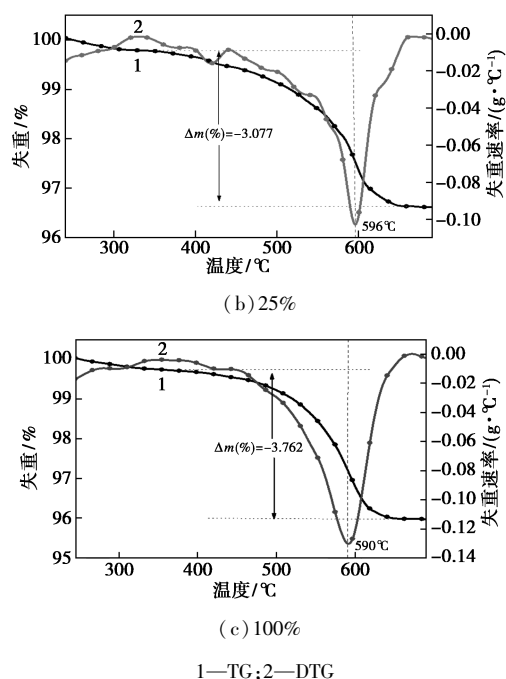


图 3 不同地沟油质量分数催化裂化后的 CIP-2 催化剂的热重分析

焦炭逐渐被分解,温度达到 650℃后焦炭基本被分解完全,只剩下催化剂本身质量。从损失的相对质量可以看出,催化剂相对失重量从页岩油时的-4.167 减少到混合油时的-3.077 再增加到地沟油时的-3.762,说明催化裂化反应时,页岩油或地沟油反应结焦量比混合油反应结焦量大。即整体来说,随地沟油质量分数的增加,催化剂结焦量先减少后增加,与产品分布计算的结果基本一致。

### 2.6 CIP-2 催化剂的 SEM 分析

不同质量分数的纯页岩油或地沟油反应后的催化剂及新鲜催化剂的 SEM 图如图 4 所示。

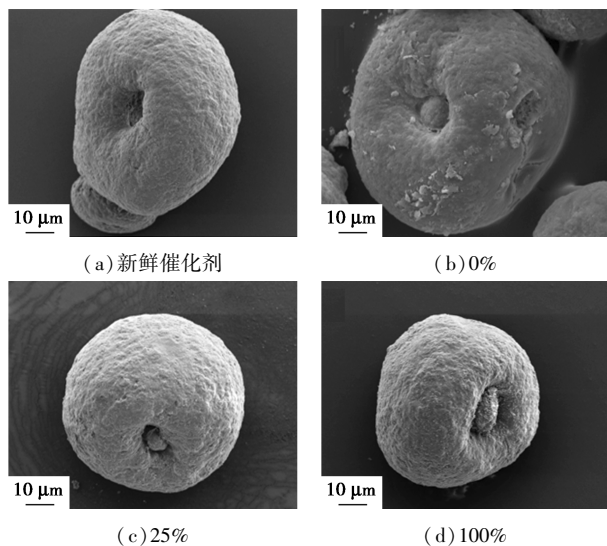


图 4 CIP-2 催化剂 SEM 图

由图 4 中可以看出,与新鲜催化剂相比,反应后的催化剂表面和中心孔道出现不同程度的结焦;页岩油反应后的催化剂有大量结焦,中心孔道明显被堵塞。其次地沟油反应后的催化剂中心孔道也大部分被堵塞,而地沟油质量分数为 25%的混合油反应后的催化剂也有结焦,但结焦量相对较少,相比较而言中心孔道堵塞不严重。该结果与计算出催化剂结焦量和催化剂热重分析结果也比较相符。

### 3 结论

(1)当质量分数为 25%的地沟油与页岩油共催化裂化时,轻油收率、液收率和转化率最高,分别达到了 54.24%、78.13%和 92.23%。且结焦量随地沟油质量分数的增加先减少后增加。总体来说,掺入地沟油对页岩油的催化裂化有促进作用,能改善催化裂化产品分布。

(2)裂解气中主要是 C<sub>4</sub> 及以下的小分子,其中乙烯和丙烯的质量分数随地沟油质量分数的增加而先增加后减少;而丙烷的收率从页岩油时的 14.21%下降到地沟油质量分数 25%时的 8.36%,后又上升到地沟油时的 19.33%。

(3)GC-MS 分析得到汽柴油馏分中主要是芳烃,在汽油馏分中,随着地沟油质量分数的增加,支链烷烃质量分数先增加后减少,芳烃的质量分数先减少后增加,杂原子化合物则是先减少后增加;在柴油馏分中,随着地沟油质量分数的增加,支链烷烃质量分数逐渐减少,芳烃质量分数逐渐增加。

### 参考文献

- [1] 赵雪.2016 中国原油对外依存度超 65%[J].中国石油石化, 2017,15(2):15-17.
- [2] 刘长久,张广林.石油和石油产品中非烃化合物[M].北京:中国石化出版社,1991.
- [3] 申云生,马海燕,温博,等.页岩油加工工艺实验研究[J].辽宁石油化工大学学报,2015,35(1):20-23.
- [4] 李楠,王斌,杨朝合,等.页岩油窄馏分性质表征及其催化裂化性能研究[J].石油炼制与化工,2016,47(2):17-20.
- [5] 李广欣,韩冬云,曹祖宾,等.抚顺页岩油新型加工工艺研究[J].现代化工,2011,31(2):74-78.
- [6] Luik H,Vink N,Lindaru E, et al.Upgrading of Estonian shale oil distillation fractions(5): Hydrogenation of heavy mazute[J]. Oil Shale,2000,17(2):25-30.
- [7] 唐勋,李术元,岳长铸,等.龙口页岩油中中压加氢精制研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(6):135-144.
- [8] 于航,李术元,靳广洲.桦甸页岩油柴油馏分中氮化物的加氢反应性能[J].石油化工,2010,39(2):162-166.

(下转第 166 页)

- selective adsorption of nickel ion [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 428: 110–117.
- [6] Taghizadeh M, Hassanpour S. Selective adsorption of Cr( VI ) ions from aqueous solutions using a Cr( VI )-imprinted polymer supported by magnetic multiwall carbon nanotubes [J]. *Polymer*, 2017, 132: 1–11.
- [7] Huang Y, Wang R. An efficient lithium ion imprinted adsorbent using multi-wall carbon nanotubes as support to recover lithium from water [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 205: 201–209.
- [8] Santos W, Santhiago M, Yoshida I, *et al.* Electrochemical sensor based on imprinted sol-gel and nanomaterial for determination of caffeine [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 166(6): 739–745.
- [9] Fallah N, Taghizadeh M, Hassanpour S. Selective adsorption of Mo( VI ) ions from aqueous solution using a surface-grafted Mo( VI ) ion imprinted polymer [J]. *Polymer*, 2018, 144: 80–91.
- [10] 程玉雯, 黎先财, 胡伟强. 硅胶印迹聚合物的制备及对钆离子吸附性能研究 [J]. *离子交换与吸附*, 2018, 34(1): 19–28.
- [11] 王燕, 叶思, 吕珊珊, 等. 磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ 离子印迹聚 (MMA-HPMA-DVB) 复合材料的合成及其对水中 Ni( II ) 选择性吸附 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2846–2855.
- [12] Jiang H, Zhang Y, Chen R, *et al.* Preparation of ion imprinted magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles for selective remediation of Pb( II ) [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017, 80: 184–191.
- [13] Zhu C, Hu T, Tang L, *et al.* Highly efficient extraction of lead ions from smelting wastewater, slag and contaminated soil by two-dimensional montmorillonite-based surface ion imprinted polymer absorbent [J]. *Chemosphere*, 2018, 209: 246–255.
- [14] Rahangdale D, Kumar A. Chitosan as a substrate for simultaneous surface imprinting of salicylic acid and cadmium [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 202: 334–344.
- [15] Zhang M, Zhang Z, Liu Y, *et al.* Preparation of core-shell magnetic ion-imprinted polymer for selective extraction of Pb( II ) from environmental samples [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 178: 443–450.
- [16] 张明磊, 张朝晖, 罗丽娟, 等. 磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub>@ CS 镉离子印迹聚合物的制备及吸附性能 [J]. *高等学校化学学报*, 2011, 32(12): 2763–2768.
- [17] 张英英, 王兵, 鲁佩佩. 碳纳米管表面苯唑西林印迹聚合物的制备及应用 [J]. *功能材料*, 2017, 48(4): 4199–4204.
- [18] Yang W, Jiao F, Zhou L, *et al.* Molecularly imprinted polymers coated on multi-walled carbon nanotubes through a simple indirect method for the determination of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid in environmental water [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 284(11): 692–699.
- [19] Wang A, Li B, Wang Y. Adsorption behavior of Congo red on a carbon material based on humic acid [J]. *New Journal of Chemistry*, 2022, 46: 498–510.
- [20] Wang A, Sun X, Li B, *et al.* Preparation of carbon-iron composites materials and studies of its adsorption properties for the methylene blue [J]. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2021, (31): 1293–1303.
- [21] Cha J, Kang S, Ali I, *et al.* Humic acid enhances heat stress tolerance via transcriptional activation of Heat-Shock Proteins in Arabidopsis [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 810–832. ■
- (上接第 160 页)
- [9] 赵桂芳, 苏重时, 刘灏. 页岩油加氢裂化生产柴油的研究 [J]. *当代化工*, 2007, 36(4): 361–362.
- [10] 刘洁, 马波. 我国页岩油非加氢脱氮技术的研究现状 [J]. *现代化工*, 2015, 35(5): 21–24.
- [11] 王乃鑫, 汪燮卿, 刘泽龙, 等. 生物重油与减压蜡油共催化裂化生产高辛烷值汽油的研究 [J]. *石油炼制与化工*, 2016, 47(7): 27–31.
- [12] 田华, 李春义, 杨朝合, 等. 动植物油脂在催化裂化装置上的掺炼应用 [J]. *石化技术与应用*, 2007, 25(5): 425–428.
- [13] Corma A, Cristina Martinez, Sauvanaud L. New materials as FCC active matrix components for maximizing diesel (light cycle oil, LCO) and minimizing its aromatic content [J]. *Catalysis Today*, 2007, 127(1–4): 3–16.
- [14] 山红红, 刘熠斌, 陈小博, 等. 废弃油脂与减压蜡油共催化裂化技术开发及工业试验 [J]. *石油学报*, 2015, 31(2): 460–467.
- [15] 丁传芹, 陈胜利, 杨朝合. 废弃油脂替代石油资源研究进展 [J]. *中国油脂*, 2012, 37(8): 53–56.
- [16] Chen G, Cong L, Ma W, *et al.* Co-pyrolysis of corn cob and waste cooking oil in a fixed bed [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 61(8): 2363–2366.
- [17] 李臣, 周洪星, 石骏, 等. 地沟油的特点及其危害 [J]. *农产品加工*, 2010, 35(6): 69–70.
- [18] 余擎宇, 何若滢. 地沟油对人体健康的危害 [J]. *粮油食品科技*, 2011, 19(4): 36–37.
- [19] Wang Y, Cao Y, Li J, *et al.* Preparation of biofuels with waste cooking oil by fluid catalytic cracking: The effect of catalyst performance on the products [J]. *Renewable Energy*, 2018, 124: 34–39.
- [20] 陈洪雁, 潘高峰, 刘艳杰, 等. 页岩油含氮化合物分离研究 [J]. *辽宁化工*, 2011, 40(11): 1124–1126.
- [21] 王妍, 张玫美, 宋林, 等. 抚顺页岩油碱性氮化物的脱除 [J]. *当代化工*, 2011, 40(8): 856–858.
- [22] Maher K D, Bressler D C. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals [J]. *Bioresour Technology*, 2007, 98(12): 2351–2368.
- [23] 高晓龙. 地沟油制备生物柴油的工艺研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
- [24] 石剑. 沥青作为中间产物的油页岩热解特性研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- [25] 顾浩. 地沟油流化床催化裂解研究 [D]. 常州: 常州大学, 2019. ■