

加氢柴油掺炼减一线加氢生产 轻质白油和变压器油的研究

金吉海*

(中海油炼化化工科学研究院(北京)有限公司,北京102209)

摘要:以加氢改质柴油掺炼缓中减一线为原料,考察采用临氢降凝-补充精制-精密分馏工艺制备满足行业标准 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油(I)指标要求和国标 GB 2536 T-40℃ 变压器油指标要求产品的可行性。结果表明,在反应压力为 15 MPa、氢油体积比为 500、空速为 1.0/0.5 h⁻¹的条件下,以加氢柴油为原料,当反应温度为 T₁/T₂ 时,可生产满足轻质白油(I)、变压器油指标要求的产品;以缓中减一线为原料,无法生产满足轻质白油(I)、变压器油指标要求的产品;以加氢柴油掺炼 10% 减一线为原料,在反应温度 T₁+60/T₂+60℃ 时,可生产满足轻质白油(I)、变压器油指标要求的产品。

关键词:加氢柴油;缓中减一线;轻质白油;变压器油;精密分馏

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)12-0247-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.12.044

Study on production of light white oil and transformer oil through hydrogenation of hydrogenated diesel blending with first-line oil from vacuum distillation tower

JIN Ji-hai*

(CNOOC Research Institute of Refining and Petrochemicals (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: This study evaluates the feasibility which preparing NB/SH/T 0913—2015 light white oil (I) and GB2536 T-40℃ transformer oil through hydrodewaxing-supplementary refining-precision fractionation process with hydrogenated diesel oil and first-line oil from vacuum distillation tower of Suizhong crude oil as feedstocks. The results show that the light white oil (I) and transformer oil products meeting the requirements can be produced when the reaction pressure is 15 MPa, the volume ratio of hydrogen to oil is 500, and the space velocity is 1.0/0.5 h⁻¹, the hydrogenated diesel oil is used as feedstock and the reaction temperature is T₁/T₂. If first-line oil from vacuum distillation tower of Suizhong crude oil is used as feedstock, light white oil and transformer oil produced cannot meet the requirements of the standards. Qualified light white oil and transformer oil can be produced when the reaction temperature is T₁+60/T₂+60℃, and hydrogenated diesel oil blending with 10% of first-line oil from vacuum distillation tower is used as feedstock.

Key words: hydrogenated diesel oil; first-line oil from vacuum distillation tower of Suizhong crude oil; light white oil; transformer oil; precise fractionation

随着汽、柴油在市场上需求量的变化,合理降低柴油的生产能力,优化设计炼厂的加工工艺技术,提高企业的经济效益,是炼厂适应市场的需求重要举措^[1-3]。某炼厂新上一套 30 万 t/a 精密分馏装置,以加氢改质柴油为原料生产满足 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油(I)和 GB 2536 T-40℃ 变压器油,具有较好的经济效益。为进一步增加炼厂经济效益,提高缓中减一线的利用率,考察加氢改质柴油中掺炼缓中减一线生产满足上述轻质白油、变压器油的可行性。

本试验分别以炼厂生产的缓中减一线、加氢改质柴油中掺炼减一线为原料(以下简称加氢柴油、减一线),采用工业催化剂的装填体系,考察了以临

氢降凝-补充精制-蒸馏切割工艺生产轻质白油、变压器油的可行性;若以减一线为原料加氢产品中芳烃含量超过指标要求,则通过改变 m (减一线)/ m (混合油)(掺炼比,下同)制得混合原料油进行加氢反应降低产品中的芳烃含量生产满足 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油(I)和 GB2536 T-40℃ 变压器油,并得到加氢柴油中掺炼减一线的最高掺炼比及对应的最佳反应温度,为工业生产提供数据参考。

1 实验

1.1 试验原料

试验中采用加氢柴油、减一线馏分性质见表 1。

收稿日期:2022-01-28;修回日期:2022-09-27

作者简介:金吉海(1987-),男,硕士,工程师,从事润滑油加氢工艺研究工作,通讯联系人,jinjh4@cnooc.com.cn。

表 1 加氢柴油、减一线性质

	加氢柴油	减一线
20℃ 密度/(g·cm ⁻³)	0.8531	0.9241
40℃ 运动黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	3.254	11.33
赛色/号	11	
闭口闪点/℃	100.8	139
倾点/℃	-15	-36
硫含量/(μg·g ⁻¹)	<1.0	2880
氮含量/(μg·g ⁻¹)	<1.0	637
芳烃含量/%	15.1	40.6
馏程/℃		
初馏点(10%/50%/90%/95%)	183.7/234.8/285.6/ 350.4/355.0	264.2/293.8/321.0/ 349.2/360.2

由表 1 可知,相对于加氢柴油,减一线密度、黏度均增加,油品变重;硫、氮、芳烃含量均明显增加。

1.2 加氢中试装置

评价试验在 200 mL 固定床加氢试验装置上进行,各工艺参数均由 DCS 精确控制,系统压力采用高分尾气减压系统自动控制。

1.3 催化剂主要物化性质

试验采用的临氢降凝催化剂为负载金属的 ZSM-5 分子筛催化剂,加氢补充精制催化剂为负载金属的氧化铝催化剂,所有的催化剂均为工业剂,催化剂主要物化性质见表 2。

表 2 催化剂主要物化性质

	临氢降凝剂	补充精制剂	分析方法
化学组成(质量分数)/%	Ni/分子筛	W-Mo-Ni/ 氧化铝	
物理性质			
孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)	>0.18	>0.35	低温 N ₂ 吸附
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	>180	>150	低温 N ₂ 吸附
堆积密度/(g·cm ⁻³)	0.70~0.80	0.82~0.88	量筒法
直径/mm	1.3~1.6	1.0~1.4	游标卡尺
压碎强度/(N·mm ⁻¹)	>10	>15.0	强度测定仪
外观	三叶草	三叶草	目测

1.4 产品质量要求

加氢后 <280℃ 馏分切割制备满足 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油(I),轻质白油指标如表 3 所示;>280℃ 馏分生产 GB2536 T-40℃ 变压器油,变压器油指标如表 4 所示。

表 3 轻质白油标准

项目	黏度(40℃)/ (mm ² ·s ⁻¹)	芳烃/ %	硫含量/ (μg·g ⁻¹)	赛色/ 号
轻质白油 W1-20(120~160℃)	—	<0.2	<1.0	>28
轻质白油 W1-40(155~200℃)	—	<0.2	<1.0	>28
轻质白油 W1-60(185~225℃)	1.2~1.5	<0.5	<1.0	>28
轻质白油 W1-90(215~255℃)	1.8~2.3	<0.5	<1.0	>28
轻质白油 W1-110(245~285℃)	2.3~3.0	<0.5	<1.0	>28

表 4 变压器油标准

项目	T-40℃ 变压器油
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	≤0.895
黏度(40℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	≤12
闭口闪点/℃	>139
芳烃含量/%	<0.5
倾点/℃	<-50
硫含量/(μg·g ⁻¹)	<1.0
颜色(赛氏)/号	+22

2 结果与讨论

2.1 原料试验评价

以加氢柴油和减一线为原料,在固定反应压力、氢油比、空速条件下,开展了反应温度的考察试验,获得了多组工艺条件及对应试验产品性质。

2.1.1 加氢柴油为原料

表 5 列出了加氢柴油为原料进行的加氢工艺条件考察及产品性质。

表 5 加氢柴油原料加氢工艺及产品性质

项目	加氢柴油				GB 2536 T-40℃ 变压器油	
	T ₁ /T ₂	T ₁ +10/T ₂ +10	T ₁ +20/T ₂ +20			
降凝/精制反应 温度/℃						
反应压力/MPa	15	15	15			
降凝/精制 空速/h ⁻¹	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5			
氢油体积比	500:1	500:1	500:1			
馏分范围/℃	<280	≥280	<280	≥280	<280	≥280
样品收率/%	49.8	42.79	46.72	42.3	45.33	41.06
20℃ 密度/ (g·cm ⁻³)	0.855	0.876	0.854	0.875	0.851	0.875
40℃ 运动黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	2.231	7.798	2.119	7.548	2.111	7.086
赛色/号	—	>+30	—	>+30	—	>+30
闭口闪点/℃	—	134	—	133	—	131

续表

项目	加氢柴油						GB 2536 T-40℃ 变压器油
	倾点/℃	—	<-54	—	<-54	—	<-54
硫含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
芳烃含量/%	0.052	0.188	0.042	0.152	0.035	0.147	<0.5

由表 5 数据可知,在反应压力 15 MPa 下,随着临氢降凝、补充精制反应温度逐渐升高,芳烃含量逐渐降低^[4-5];当反应温度为 T_1/T_2 时,加氢生成油中 <280℃ 馏分收率 42.79%,芳烃含量 0.052%, >280℃ 馏分收率 41.06%,芳烃含量 0.147%,满足 T-40℃ 变压器油的指标要求。

对 <280℃ 馏分按照各轻质白油馏程进行精馏切割得到 W1-20/40/60/90/110 轻质白油,产品性质如表 6 所示。

表 6 加氢柴油原料轻质白油产品性质

项目	黏度(40℃)/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	芳烃/ %	硫含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	赛色/ 号
20 [#] (120~160℃)	—	0.013	<1.0	>+30
40 [#] (155~200℃)	—	0.022	<1.0	>+30
60 [#] (185~225℃)	1.4898	0.024	<1.0	>+30
90 [#] (215~255℃)	1.9940	0.028	<1.0	>+30
110 [#] (245~285℃)	2.9490	0.038	<1.0	>+30

由表 6 数据可知,<280℃ 馏分经精密分馏切割后,所得 20[#]、40[#]、60[#]、90[#]、110[#] 轻质白油产品性质均满足 NB/SH/T 0913—2015 中 W1-20、W1-40、W1-60、W1-90、W1-110 各项指标要求,且颜色为 +30 号,均为优质的轻质白油(I)产品。

该催化剂成套技术已在炼厂 30 万 t/a 精密分馏装置进行工业应用,装置截至 2022 年 2 月已开工平稳运行 24 个月,运行期间催化剂活性稳定,在较缓和的加氢反应条件下,产品芳烃、倾点均满足指标要求,产品性质稳定,节选装置加工期间的操作条件及产品性质进行分析,见表 7。

表 7 工业应用结果分析

工艺条件	
总压/MPa	15.02
处理量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	35.7
空速/ h^{-1}	1.034/0.479
氢油体积比	1000:1~1100:1
第一床层平均温度/℃	T+5
第二床层平均温度/℃	T+20
第三床层平均温度/℃	T+25

产品性质	轻烃油	石脑油	W1-40	W1-60	W1-90	W1-110	变压器油
液收/%	2.79	7.64	2.96	8.04	15.95	16.19	44.53
20℃密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	—	—	—	—	—	—	0.8699
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	—	—	—	1.59	2.12	2.94	8.41
闭口闪点/℃	—	—	43	65	90	113	145
倾点/℃	—	—	—	—	—	—	-61
芳烃含量/%	—	—	—	—	—	0.11	0.21
馏程/℃							
IBP	—	43	158	188	218	245	284
10%	—	74	167	195	222	254	298
50%	—	109	172	200	228	259	312
90%	—	147	178	208	239	266	345
FBP	—	172	198	219	250	283	362

由表 7 可以看出,在较为缓和的工艺条件下,生产出了优质的低凝、低芳变压器油和优质的低芳轻质白油(I)产品均满足指标要求。为进一步提高炼厂的经济效益,以炼厂生产的绥中减一线、加氢改质柴油中掺炼减一线为原料(以下简称加氢柴油、减一线),采用工业催化剂的装填体系,考察了以临氢降凝-补充精制-蒸馏切割工艺生产轻质白油、变压器油的可行性。

2.1.2 减一线为原料

表 8 列出了减一线为原料进行的加氢工艺条件考察及产品性质。

表 8 减一线原料加氢工艺及产品性质

项目	减一线					
降凝/精制反应 温度/℃	$T_1+60/$ T_2+60		$T_1+80/$ T_2+80		$T_1+100/$ T_2+100	
反应压力/MPa	15		15		15	
降凝/精制空速/ h^{-1}	1.0/0.5		1.0/0.5		1.0/0.5	
氢油体积比	500:1		500:1		500:1	
馏分范围/℃	<280	≥ 280	<280	≥ 280	<280	≥ 280
样品收率/%	49.8	41.06	45.72	44.3	44.33	44.79
20℃密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.876	0.894	0.871	0.892	0.856	0.877
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	2.886	10.38	2.677	9.95	2.248	7.953
赛色/号	>+30	>+30	>+30	>+30	>+30	>+30
闭口闪点/℃	—	142	—	—	—	139
倾点/℃	—	<-57	—	<-57	—	<-57
硫含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.3	5.2	<1.0	1.3	<1.0	1.2
芳烃含量/%	6.81	5.97	2.7	2.72	3.39	3.67

由表 8 数据可知,随着临氢降凝、补充精制反应温度升高,加氢产品中硫含量逐渐降低,芳烃含量先降低后升高。研究表明^[6-7],芳烃加氢是可逆反应,加氢过程中存在动力学、热力学平衡反应。由于芳烃加氢化学平衡的影响,在低温高压反应条件下,芳烃加氢反应可能为动力学控制,随着反应温度升高芳烃加氢反应为热力学控制。因此当反应温度小于 T_1+80/T_2+80 时,随着加氢反应温度的升高,馏分油中芳烃含量降低,此时反应为动力学控制,随着反应温度的升高,馏分油中芳烃含量升高,此时反应为热力学控制。

由表 8 数据可知,在最佳反应温度 T_1+80/T_2+80 时, $<280^\circ\text{C}$ 馏分、 $>280^\circ\text{C}$ 馏分芳烃含量均 $>0.5\%$,以绥中减一线为原料无法生产满足指标要求的轻质白油、变压器油,因此考察加氢柴油掺炼减一线生产轻质白油、变压器油的可行性。

2.2 加氢柴油掺炼减一线试验评价

试验原料油以加氢柴油为基准掺炼减一线,为了考察减一线的最大掺炼比,加氢柴油分别掺炼 50%、25%、10% 的减一线制备 3 种混合原料,在固定反应压力、氢油比、空速条件下,开展了反应温度的考察试验,获得了多组工艺条件及对应试验产品性质,掺炼后的混合原料性质见表 9。

表 9 掺炼减一线的混合原料性质

项目	基础原料		加氢柴油:减一线		
	加氢柴油	减一线	90:10	75:25	50:50
20℃密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.853	0.924	0.86	0.869	0.88
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	3.254	11.33	3.527	4.440	5.336
闭口闪点/℃	100.8	139	78.5	83.5	90
倾点/℃	-15	-36	-15	-24	-15
硫含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	<1.0	2880	321	735	1400
芳烃含量/%	15.1	40.6	19.6	22.6	28.7

由表 9 数据可以看出,随着减一线掺炼比例提高,混合原料的黏度增加,流动性变差,密度增加,平均分子质量增加;随着减一线掺炼比例的增加,混合原料的硫含量、芳烃含量逐渐增加。

2.2.1 掺炼 50%减一线试验评价

表 10 列出了掺炼 50%减一线为原料进行的加氢工艺条件考察及产品性质。

由表 10 数据可知,随着临氢降凝、补充精制反应温度逐渐升高,硫含量逐渐降低,由于加氢热力学

表 10 掺炼 50%减一线原料加氢工艺及产品性质

项目	掺炼 50%减一线							
	T_1+40/T_2+40	T_1+60/T_2+60	T_1+80/T_2+80	T_1+100/T_2+100				
降凝/精制反应 温度/℃								
反应压力/MPa	15	15	15	15				
降凝/精制 空速/ h^{-1}	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5				
氢油体积比	500:1	500:1	500:1	500:1				
馏分范围/℃	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280
样品收率/%	31.25 66.85	33.37 66.16	36.30 62.84	47.54 51.12				
20℃密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.858 0.892	0.857 0.886	0.855 0.879	0.848 0.869				
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	2.323 9.754	2.373 9.237	2.308 8.370	2.84 7.010				
赛色/号	— >+30	— >+30	— >+30	— >+30				
闭口闪点/℃	— 142	— 139	— 137	— 135				
倾点/℃	— <-54	— <-54	— <-54	— <-54				
硫含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	1.5 11.4	<1.0 1.6	<1.0 <1.0	<1.0 <1.0				
芳烃含量/%	6.67 9.32	1.99 2.76	1.29 1.60	2.84 3.8				

反应芳烃含量先降低后升高^[8-9],在最佳反应温度 T_1+80/T_2+80 时, $<280^\circ\text{C}$ 馏分、 $>280^\circ\text{C}$ 馏分芳烃含量均 $>0.5\%$,因此以加氢柴油掺炼 50%减一线为原料无法生产满足指标要求的轻质白油、变压器油。

2.2.2 掺炼 25%减一线

表 11 列出了掺炼 25%减一线为原料进行的加氢工艺条件考察及产品性质。

表 11 掺炼 25%减一线原料加氢工艺及产品性质

项目	掺炼 25%减一线							
	T_1+40/T_2+40	T_1+60/T_2+60	T_1+80/T_2+80	T_1+100/T_2+100				
降凝/精制反应 温度/℃								
反应压力/MPa	15	15	15	15				
降凝/精制 空速/ h^{-1}	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5				
氢油体积比	500:1	500:1	500:1	500:1				
馏分范围/℃	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280	<280 >280
样品收率/%	43.99 55.17	46.91 52.2	48.94 50.44	58.31 39.91				
20℃密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.852 0.881	0.854 0.878	0.851 0.872	0.843 0.861				
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	2.256 8.445	2.309 8.740	2.206 7.440	1.986 6.297				
赛色/号	— >+30	— >+30	— >+30	— >+30				

续表

项目	掺炼 25%减一线							
闭口闪点/℃	—	139	—	140	—	139	—	142
倾点/℃	—	<-54	—	<-54	—	<-54	—	<-54
硫含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	<1.0	2.4	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
芳烃含量/%	1.82	2.35	0.573	0.965	0.88	1.24	2.4	3.40

由表 11 数据可知,随着临氢降凝、补充精制反应温度逐渐升高,硫含量逐渐降低,由于加氢热力学反应芳烃含量先降低后升高,在最佳反应温度 T_1+60/T_2+60 时, <280℃ 馏分、>280℃ 馏分芳烃含量均 >0.5%,因此以加氢柴油掺炼 25%减一线为原料无法生产满足指标要求的轻质白油、变压器油。

2.2.3 掺炼 10%减一线

表 12 列出了掺炼 10%减一线为原料进行的加氢工艺条件考察及产品性质。

表 12 掺炼 10%减一线原料加氢工艺及产品性质

项目	掺炼 10%减一线						GB2536
							T-40℃ 变压器油
降凝/精制反应 温度/℃	T_1+40/T_2+40	T_1+60/T_2+60	T_1+80/T_2+80				
反应压力/MPa	15	15	15				
降凝/精制 空速/ h^{-1}	1.0/0.5	1.0/0.5	1.0/0.5				
氢油体积比	500:1	500:1	500:1				
馏分范围/℃	<280	>280	<280	>280	<280	>280	
样品收率/%	51.86	47.38	52.64	46.35	56.33	42.97	
20℃密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.849	0.874	0.851	0.872	0.847	0.865	≤0.895
40℃运动黏度/ ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	2.210	8.027	2.215	7.865	2.123	6.757	≤12
赛色/号	—	>+30	—	>+30	—	>+30	>+22
闭口闪点/℃	—	140	—	143	—	142	>139
倾点/℃	—	<-54	—	<-54	—	<-54	<-50
硫含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
芳烃含量/%	0.349	0.707	0.285	0.467	0.772	1.06	<0.5

由表 12 数据可知,随着临氢降凝、补充精制反应温度逐渐升高,硫含量逐渐降低,芳烃含量先降低后升高,在最佳反应温度 T_1+60/T_2+60 时, >280℃ 馏分收率 46.35%,硫含量 <1.0 $\mu\text{g}/\text{g}$,闪点 143℃,倾点 <-54℃,芳烃含量 0.467%,满足 T-40℃ 变

压器油指标要求^[10-12]。

3 结论

(1)以加氢柴油为原料,通过临氢降凝-加氢补充精制过程,再经精密分馏切割工艺,在反应温度 T_1/T_2 时,所得轻质白油满足 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油 (I) 指标要求;所得变压器油满足 GB2536 T-40℃ 变压器油(通用)指标要求。

(2)以减一线为原料,采用临氢降凝-补充精制-蒸馏切割工艺路线无法生产满足指标要求的轻质白油、变压器油。

(3)以加氢柴油掺炼 10%减一线为原料,通过临氢降凝-加氢补充精制过程,再经精密分馏切割工艺,在反应温度 T_1+60/T_2+60 时,所得轻质白油满足 NB/SH/T 0913—2015 轻质白油 (I) 指标要求;所得变压器油满足 GB2536 T-40℃ 变压器油(通用)指标要求。

参考文献

- [1] 董元成,段永生,王文波.FCC 汽油加氢技术的现状及发展趋势[J].广州化工,2010,(38):31-51.
- [2] 张坤,李付兴,牛红林.国内柴油加氢改质技术与催化剂研究与应用现状[J].北工技术,2011,31(5):27.
- [3] 董大清.国外清洁柴油加氢催化剂技术进展[J].化工科技市场,2010,(7):1-5.
- [4] 庞新迎,王德会,张晓光,等.催化裂化轻循环油加工路线对柴汽比的影响[J].石油炼制与化工,2017,48(6):74-78.
- [5] 张罗庚,胡云涛,简建超.加氢装置降低柴汽比的优化措施[J].石油炼制与化工,2017,48(7):60-63.
- [6] 吴子明,彭冲,曹正凯,等.调整炼油厂产品结构的加氢技术的开发与应用[J].炼油技术与工程,2017,47(1):10-15.
- [7] 徐凯勃.降低柴汽比潜力分析与措施[J].石化技术与应用,2016,34(4):332-335.
- [8] 李宁,汪加民,张琰彬.催化裂化装置加工常三线直馏柴油的工业实践[J].炼油技术与工程,2016,46(2):27-30.
- [9] 李大东,聂红,孙丽丽.加氢处理工艺与工程[M].北京:中国石化出版社,2016:777-78.
- [10] 方向晨.加氢裂化工艺与工程[M].北京:中国石化出版社,2016:726-728.
- [11] 宋君辉,韩龙年,杨琅,等.环烷基减压蜡油生产环保橡胶油的加氢工艺研究[J].石油与天然气化工,2017,46(1):17-21.
- [12] 梁文杰,阙国和,刘晨光,等.石油化学[M].青岛:中国石油大学出版社,2009:283-288.
- [13] 于志敏,郭爱军,王宗贤.掺炼裂解重油对减压渣油焦化性能的影响[J].石化技术与应用,2012,30(2):115-118.
- [14] 赵晨曦,杨杰,李保良.煤柴油中压加氢裂化装置掺炼劣质催化裂化柴油的实践[J].石油炼制与化工,2018,49(11):40-44.
- [15] 王宏奎,王金亮.柴油加氢改质技术研究进展[J].工业催化,2013,21(10):16-19.■