

柴油质量升级中密度、十六烷值问题与应对措施

吕振辉¹, 曾榕辉¹, 薛冬¹, 潘云翔², 彭冲³

(1. 中石化(大连)石油化工研究院有限公司, 辽宁 大连 116000; 2. 上海交通大学 化学化工学院, 上海 200240;

3. 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 研究了我国柴油产量和消费量变化趋势以及不同来源柴油性质与国Ⅵ柴油标准差异,并分析了我国柴油池构成、质量现状和存在的问题。结果表明,在柴油质量升级中,我国面临的最主要压力是如何解决柴油的密度和十六烷值(包括十六烷指数)达标问题,而非柴油的硫质量分数。为此,提出了明确十六烷值和十六烷指数的区别、做好原油加工优化、对劣质柴油进行加氢转化以及调整炼厂产品结构等应对措施。

关键词: 柴油; 质量升级; 密度; 十六烷值; 十六烷指数

中图分类号: TE624

文献标志码: A

doi:10.12422/j.issn.1672-6952.2023.03.002

Problems and Countermeasures of Density and Cetane Number in Diesel Quality Upgrading

Lü Zhenhui¹, Zeng Ronghui¹, Xue Dong¹, Pan Yunxiang², Peng Chong³

(1. SINOPEC (Dalian) Research Institute of Petroleum and Petrochemicals Co., Ltd., Dalian Liaoning 116000, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: This paper compared the variation trend of the output and consumption of diesel and the difference of the qualities of different sources diesel with the standard of Ⅵ diesel in China, and analyzed the composition, quality and problems of diesel pool in detail. It is considered that the most important problems in diesel quality upgrading process is how to reach the standard of diesel density and cetane number (including cetane index), rather than diesel sulfur content. Therefore, some countermeasures were put forward, such as identify the difference between cetane number and cetane index, optimizing crude oil processing, hydro-converting inferior diesel and adjusting the product structure of refinery.

Keywords: Diesel; Quality upgrading; Density; Cetane number; Cetane index

柴油是重要的交通燃料,但其中的硫和多环芳烃燃烧形成的颗粒物是雾霾产生的重要原因^[1-2]。为了迎接21世纪环境保护的挑战,全世界对汽油、柴油产品质量的要求不断提高。1999年,我国开启油品质量升级之路,对柴油中硫化物和多环芳烃含量提出了严格限制,目前已经全面实施国Ⅵ柴油标准,将车用柴油硫质量分数全面限制在10 μg/g以下,同时要求多环芳烃质量分数小于7%^[3-5]。超低硫、低芳烃柴油的生产导致柴油加氢的工业装置运转周期大幅度缩短,严重影响炼化企业效益^[6]。

我国主要以加工进口高硫原油为主,各种柴油中的硫质量分数普遍较高,因此在柴油质量升级过程中,人们将更多的注意力和精力放在如何经济、有效地降低柴油的硫质量分数上,而对柴油密度和十六烷值在质量升级中可能出现的问题关注不够。但是,随着原油的进一步重质化、劣质化,含酸原油加工比例不断提高,在柴油质量升级过程中,降低柴油密度、提高十六烷值(包括十六烷指数)的任务将可能比降低硫质量分数更迫切、更艰巨。

收稿日期:2023-03-14 修回日期:2023-04-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFA1501200)。

作者简介:吕振辉(1983-),男,硕士,副研究员,从事油品加氢催化剂方面的研究;E-mail:lvzhenhui@sinopec.com。

通信联系人:彭冲(1984-),男,博士,教授,博士生导师,从事能源化工及催化反应工程方面的研究;E-mail:pengchong@dlut.edu.com。

1 我国柴油消费量及柴油池构成

1.1 我国柴油消费量及用途

随着原油加工量增长,开工负荷上升,我国柴油产量和消费量也呈现增长态势。图1为2012—2022年我国柴油产量和消费量示意图。图2为2020年我国柴油消费结构。从图1和图2可以看出,我国柴油需求变化与经济转型和产业结构调整之间的关系更为密切;在2020年消费的1.43亿t柴油中,交通运输占柴油消费总量的67%,非交通运输占柴油消费总量的33%;2022年,我国柴油累计表观消费量达1.80亿t,与2021年相比,增加了22.77%。从近五年的历史数据来看,2022年柴油消费量已突破新高,与消费量较低的2020年相比,涨幅为27.50%。因此,未来在产业升级、传统行业油耗下降、运输结构调整、替代能源等因素影响下,柴油需求将处于稳定平台期。

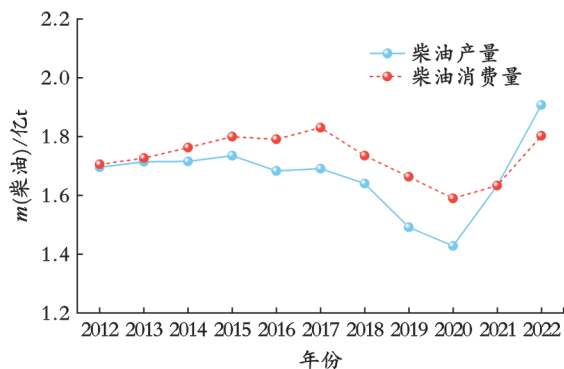


图1 2012—2022年我国柴油产量和消费量示意图

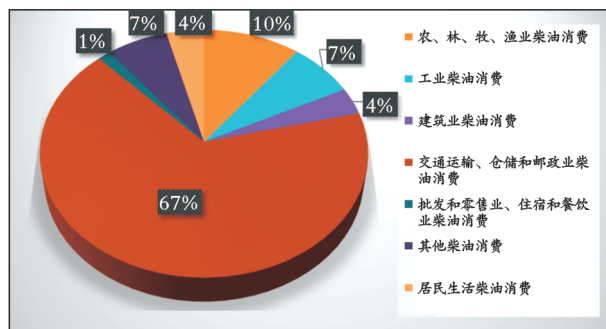


图2 2020年我国柴油消费结构

1.2 我国柴油池构成

我国生产的柴油主要来自常减压装置的直馏柴油,催化裂化装置的催化裂化柴油,延迟焦化装置的焦化柴油,加氢裂化装置的加氢裂化柴油和渣油加氢、蜡油加氢处理装置的副产加氢柴油。以我国某大型石化央企柴油加氢装置统计为例,直馏柴油占51%,催化裂化柴油占15%,焦化柴油占19%,加氢裂化和渣油加氢、蜡油加氢柴油占15%(见图3)。未来我国原油加工量将进一步提高,同时还将

新建一批渣油加氢装置,在柴油池构成中,柴油池调和的关键瓶颈仍在密度、十六烷值和十六烷指数。

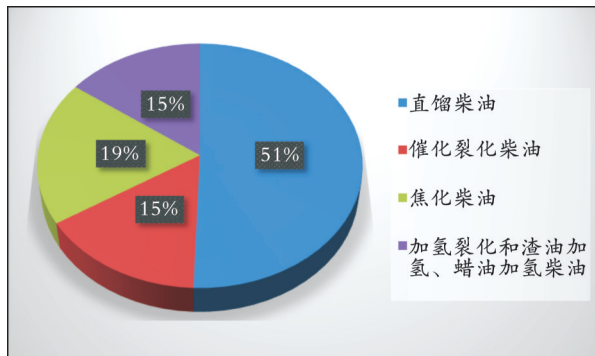


图3 我国典型企业柴油池构成

2 柴油质量升级面临的挑战

2.1 各种柴油质量情况对比

表1为各种柴油的主要性质与柴油标准的对比结果。由表1可知,加氢裂化柴油的密度(20℃)为0.810 0~0.850 0 g/cm³,硫质量分数<10 μg/g,多环芳烃质量分数为0.5%~5.0%;如果不切出喷气燃料组分,十六烷值为50.0~55.0,十六烷指数为50.0~53.0,如果切出喷气燃料组分,则十六烷值为60.0~65.0,十六烷指数为65.0~75.0;其各项主要指标与国Ⅵ柴油标准相比均有较大富余量,是最好的调和组分。渣油加氢、蜡油加氢装置所产柴油的密度(20℃)为0.860 0~0.880 0 g/cm³,硫质量分数为200~600 μg/g,多环芳烃质量分数5.0%~15.0%,十六烷值为40.0~46.0,十六烷指数为40.0~47.0,其硫质量分数、密度、十六烷值均达不到国Ⅵ柴油标准。虽然我国加工的原油品种很杂,但主要还是以中东含硫原油为主,经常减压获得的直馏柴油密度(20℃)为0.820 0~0.860 0 g/cm³,硫质量分数为600~1 500 μg/g,多环芳烃质量分数为5.0%~15.0%,十六烷值为40.0~56.0,十六烷指数为40.0~52.0,除硫质量分数和多环芳烃质量分数以外,其他主要指标均符合国Ⅵ柴油标准,也是很好的调和组分。焦化柴油的密度(20℃)为0.840 0~0.880 0 g/cm³,硫质量分数为2 000~30 000 μg/g,多环芳烃质量分数为15.0%~25.0%,十六烷值为36.0~48.0,十六烷指数为38.0~46.0,其中密度、硫质量分数和多环芳烃质量分数均超标,十六烷值和十六烷指数接近国Ⅵ柴油标准,但经加氢后可以作为车用柴油调和组分。催化裂化柴油质量极差,密度(20℃)为0.870 0~0.940 0 g/cm³,硫质量分数为1 000~20 000 μg/g,多环芳

烃质量分数为 30.0%~55.0%，十六烷值为 15.0~35.0，十六烷指数为 22.0~35.0，因此催化裂化柴油是我国各阶段柴油质量升级过程中必须面对的最大难题^[7-8]。

表 1 各种柴油的主要性质与柴油标准的对比结果

性质参数	数值					欧 VI 柴油 标准(EN 590—2013)	国 VI 柴油 标准 (GB252— 2011)
	加氢裂化 柴油	渣油加氢、蜡 油加氢柴油	直馏柴油	延迟焦化 柴油	催化裂化 柴油		
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.810 0~ 0.850 0	0.860 0~ 0.880 0	0.820 0~ 0.860 0	0.840 0~ 0.880 0	0.870 0~ 0.940 0	0.820 0~ 0.845 0	0.810 0~ 0.845 0
w(硫)/(μg·g ⁻¹)	<1	200~600	600~ 15 000	2 000~ 30 000	1 000~ 20 000	<10	<10
十六烷值	50.0~65.0	40.0~46.0	40.0~56.0	36.0~48.0	15.0~35.0	≥51.0	≥51.0
十六烷指数	50.0~75.0	40.0~47.0	40.0~52.0	38.0~46.0	22.0~35.0	≥46.0	≥46.0
w(总芳烃)/%	1.0~20.0	20.0~40.0	15.0~30.0	30.0~50.0	45.0~80.0	—	—
w(多环芳烃)/%	0.5~5.0	5.0~15.0	5.0~15.0	15.0~25.0	30.0~55.0	8.0	7.0

2.2 柴油质量升级中存在的主要问题

尽管柴油的质量指标很多,但在质量升级中需要解决的关键指标主要有多环芳烃质量分数、硫质量分数、密度、十六烷值和十六烷指数。我国在柴油加氢脱硫催化剂及工艺开发方面取得了长足进展,将柴油硫质量分数降低至 10 μg/g 以下,但多环芳烃质量分数、密度、十六烷值和十六烷指数仍需进一步关注。在我国各炼厂的柴油池构成中,多环芳烃质量分数超标的柴油主要是催化柴油和焦化柴油,尽管多环芳烃比较容易加氢,但将多环芳烃质量分数降至 7.0% 以下,经济代价仍然较大。由于受反应热力学平衡、反应机理及柴油结构组成特点等因素的制约,降低柴油密度、提高十六烷值和十六烷指数不仅存在经济方面问题,而且还受到技术方面的约束。表 2 为不同柴油加氢脱硫时密度和十六烷值的变化情况。

表 2 不同柴油加氢脱硫时密度和十六烷值的变化情况

柴油种类	密度降幅/ (kg·cm ⁻³)	十六烷值 增幅
直馏柴油	0~5	1~2
焦化柴油	5~10	3~5
催化裂化柴油	10~15	4~6
渣油加氢、蜡油加氢柴油	0	0

我国直馏柴油的密度、十六烷值和十六烷指数与国 VI 柴油标准相差不大,是生产国 VI 柴油最主要的调和组分。但是,随着原油加工量的不断增加和新发现原油的日趋劣质化,我国不可避免增加低 API 度、高酸原油的加工比例。低 API 度、高酸原油不仅轻组分少、对设备腐蚀严重,其直馏柴油密度

大、十六烷值低,加氢改质难度非常大。在不同条件下,对我国海洋环烷基原油(绥中 36-1)直馏柴油进行了加氢精制,加氢精制柴油的密度、十六烷值和十六烷指数变化情况见表 3。加氢反应条件:产品 1、2、3 的反应总压力分别为 10.0、15.0、15.0 MPa,总体积空速分别为 1.0、0.6、0.6 h⁻¹,平均反应温度分别为 350、350、380℃,装置耗氢分别为 0.81%、1.12%、1.30%。由表 3 可知,当含酸原油加工量提高到某一比例时,直馏柴油的密度、十六烷值和十六烷指数很难满足国 VI 柴油标准。

表 3 加氢精制柴油的密度、十六烷值和十六烷值指数变化情况

性质参数	数值			
	原料	产品 1	产品 2	产品 3
密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.885 5	0.867 7	0.863 3	0.851 9
十六烷值	25.6	29.5	30.3	29.9
十六烷指数	36.2	39.0	40.3	44.0
w(硫)/(μg·g ⁻¹)	1 206	<10	<10	<10

焦化柴油经过加氢后,其密度、十六烷值和十六烷指数一般在国 VI 柴油标准附近,不调和或适当调和便可达到国 VI 柴油标准。渣油加氢、蜡油加氢柴油的密度、十六烷值和十六烷指数较国 VI 柴油标准有较大差距,而且即使对这部分柴油再进行加氢,也很难进一步降低其密度、硫质量分数和提高其十六烷值及十六烷指数。

3 柴油质量升级的建议

尽管近几年我国的油品质量升级速度非常快,柴油产品质量升级的改造和建设已趋完成,绝大多数新建装置和改造装置的性能均已达到预期水平,

产品质量达到欧美发达国家先进水平,但仍有部分柴油性质需要加以关注。

3.1 十六烷值和十六烷指数的区别

十六烷值和十六烷指数是表示柴油着火性能的两个不同指标^[9-10]:十六烷值是使用十六烷值测试仪测试的实测值,十六烷指数是根据柴油的密度和馏程,通过 GB/T 11139—1989 计算的计算值,计算公式见式(1)。

$$\begin{aligned} \text{十六烷指数} = & 431.29 - 1\,586.88\rho_{20} + \\ & 730.79\rho_{20}^2 + 12.392\rho_{20}^3 + 0.051\,5\rho_{20}^4 - 0.554t_{50} + \\ & 97.803(\lg t_{50})^2 \end{aligned} \tag{1}$$

式中, ρ_{20} 为馏分油在 20 ℃时的密度,g/cm³; t_{50} 为馏分油的中平均沸点,即用 GB/T 6536—1997 方法对油品进行蒸馏,当馏出 50% 体积时所对应的温度,℃。

在柴油中添加十六烷值改进剂可以提高十六烷值,但不能改变十六烷指数。由于十六烷值需要采用十六烷值测试仪测试,所需时间长、速度慢,因此企业和油品销售公司普遍采用十六烷指数,但在称呼上却仍叫“十六烷值”,久而久之,人们便将十六烷指数等同于十六烷值。表 4 为不同来源柴油的

十六烷值与十六烷指数的对应关系。由表 4 可知,当柴油的十六烷值较高或较低时,十六烷指数远高于十六烷值,但当十六烷值在 40.0~50.0 时,十六烷值略高于十六烷指数或与十六烷指数相当。

表 4 不同来源柴油的十六烷值与十六烷指数的对应关系

柴油类别	馏分 范围/℃	十六烷值	十六烷 指数
催化裂化柴油	180~360	≤15.0	23.8
加氢改质柴油	180~360	41.5	38.7
直馏柴油	180~365	53.2	52.2
加氢裂化柴油 1	165~380	47.5	48.8
加氢裂化柴油 2	260~380	59.2	75.7

表 5 为柴油的十六烷指数与密度的关系。由表 5 可知,十六烷指数由 46.1 提高到 49.0,密度需相应降低 0.010 0 g/cm³,若十六烷指数再从 49.0 提高到 51.1,密度还需再降低 0.006 5 g/cm³;如果继续把十六烷指数等同于十六烷值,等于将柴油密度指标再降低 0.010 0~0.017 0 g/cm³,这将给柴油池调和过程带来困难。

表 5 柴油的十六烷指数与密度的关系

性质参数	数值					
	柴油 1-1	柴油 1-2	柴油 1-3	柴油 2-1	柴油 2-2	柴油 2-3
密度(20 ℃)/(g·cm ⁻³)	0.834 0	0.824 0	0.817 5	0.849 5	0.840 5	0.835 0
馏程/℃						
IBP/10%	179/195	179/195	179/195	152/221	152/221	152/221
30%/50%	216/243	216/243	216/243	242/262	242/262	242/262
70%/90%	295/355	295/355	295/355	289/334	289/334	289/334
95%/EBP	363/373	363/373	363/373	356/368	356/368	356/368
十六烷指数	46.1	49.0	51.1	46.0	49.1	51.1

3.2 原油加工的优化

目前,在原油加工优化中,更多关注的是从装置加工原油硫质量分数和酸值的适应能力方面,很少甚至基本不考虑原油调和后直馏柴油的质量问题。但是,随着劣质原油加工比例的不断提高以及柴油质量执行国 VI 标准的大背景下,在今后的原油加工优化中,除了要考虑硫质量分数和酸值以外,还必须考虑原油调和后其直馏柴油的密度、十六烷值和十六烷指数是否能满足柴油指标要求。

3.3 劣质柴油的加氢转化

催化裂化柴油即使在非常苛刻的条件下加氢改质(包括采用柴油深度加氢精制、改善劣质柴油十六烷值(MCI)技术和催化柴油深度加氢处理(RICH)技术等),其十六烷值也难达到 40.0,而且氢耗大、生产成本高。因此,采用催化裂化柴油加氢改质生产清洁柴油在经济上是不可取的,较为理

想的方法是充分利用催化裂化柴油芳烃含量高的特点,在对其进行加氢改质的同时,生产部分价值更高的产品。

中压加氢裂化技术不仅可以明显改善劣质柴油的质量,大幅减少劣质柴油量,同时还可副产少量芳烃潜含量高的优质催化重整原料。表 6 为几种典型催化裂化柴油中压加氢裂化中试结果。

劣质柴油加氢转化技术(成熟的技术有催化裂化柴油选择性加氢裂化生产高辛烷值汽油的 RLG 技术和催化柴油加氢转化 FD2G 技术^[11-13])采用单段串联部分循环工艺流程,在中压条件下对催化裂化柴油进行加氢转化,同时副产高辛烷值汽油/BTX 组分。表 7 为催化裂化柴油加氢转化(FD2G)的中试结果。由表 7 可知,催化裂化柴油加氢转化(FD2G)技术可以将劣质的低十六烷值催化裂化柴油部分转化为高辛烷值汽油,同时提升柴油质量。

表 6 几种典型催化裂化柴油中压加氢裂化中试结果

油品及工艺条件	性质参数	数值			
		柴油 1	柴油 2	柴油 3	柴油 4
原料油	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.891 0	0.922 6	0.944 0	0.950 0
	十六烷值	32.6	≤18.0	≤15.0	≤15.0
	十六烷指数	35.6	29.6	23.8	24.0
工艺条件	压力/MPa	6.4	6.4	8.0	12.0
	总体积空速/h ⁻¹	0.66	0.80	0.80	0.70
	化学氢耗/%	2.96	3.02	3.06	4.13
65~180℃重石脑油	收率/%	17.9	12.9	17.1	16.5
	芳潜/%	72.6	75.4	72.8	72.5
>180℃柴油	收率/%	79.0	85.3	79.7	80.4
	十六烷值	45.2	32.7	31.3	40.5
	十六烷值增幅	12.6	14.7	16.3	>25.5
	十六烷指数	45.7	—	33.7	40.4

表 7 催化裂化柴油加氢转化(FD2G)的中试结果

油品及工艺条件	性质参数	数值
原料油	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.950 0
	十六烷值	—15.0
	十六烷指数	25.2
工艺条件	压力/MPa	8.0
	总体积空速/h ⁻¹	0.80
	平均反应温度/℃	376/418
	化学氢耗/%	3.48
	收率/%	53.27
汽油	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.792 5
	w(硫)/(μg·g ⁻¹)	5.0
	w(芳烃)/%	53.74
	w(苯)/%	2.75
	研究法辛烷值(RON)	92.4
	收率/%	35.95
柴油	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.864 5
	十六烷值	45.0
	十六烷指数	44.8
	w(硫)/(μg·g ⁻¹)	8.0

对 FD2G 技术获得的<210℃汽油馏分进行了窄馏分切割,各窄馏分的主要性质见表 8。由表 8 可知,65~165℃馏分的芳烃质量分数高达 54.45%,可直接送到芳烃抽提装置生产芳烃产品,而剩余的<65℃馏分和>165~210℃馏分仍是高辛烷值的优质清洁汽油的调和组分。

表 8 FD2G 技术获得的<210℃汽油馏分中各窄馏分的主要性质

油品	性质参数	数值
<65℃馏分	收率/%	7.95
	w(苯)/%	5.94
	w(异构烃)/%	74.64
	研究法辛烷值(RON)	85.4
65~165℃馏分	收率/%	30.70
	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.805 9
	w(烷烃)/%	13.49
	w(环烷烃)/%	32.06
	w(芳烃)/%	54.45
	研究法辛烷值(RON)	93.1
>165~210℃馏分	马达法辛烷值(MON)	82.5
	收率/%	14.62
	密度(20℃)/(g·cm ⁻³)	0.857 9
	w(烷烃)/%	15.30
	w(环烷烃)/%	14.93
	w(芳烃)/%	69.77
	研究法辛烷值(RON)	89.7

3.4 炼厂产品结构的调整

催化裂化柴油是柴油质量升级中难度最大、成本最高的柴油组分,因此建议催化裂化装置通过采用多产汽油催化剂、提高催化汽油终馏点以及降低催化裂化柴油终馏点等操作方式多产汽油,少产催化柴油,渣油加氢、蜡油加氢装置少产甚至不产柴油。渣油加氢、蜡油加氢副产柴油收率在 10% 左

右,尽管这些柴油占各企业柴油池的比例不大,但是副产柴油不仅密度大($0.86\sim 0.88\text{ g/cm}^3$)、硫质量分数高($300\sim 600\text{ }\mu\text{g/g}$)、十六烷值低($40\sim 45$),更主要的是在较高压力下加氢过一次,如果想再通过加氢的方法进一步降低其密度、硫质量分数和提高十六烷值则难度非常大,因此可将副产柴油全部作为催化裂化原料。调整加氢裂化装置的操作条件,多产加氢裂化柴油组分,特别是切出喷气燃料组分后的加氢裂化柴油,不仅十六烷值高(>60),而且十六烷指数更高(>70),是最理想的清洁柴油调和组分^[2]。

4 结论及建议

我国以加工进口高硫原油为主,各种柴油组分

的硫质量分数普遍较高,在柴油质量升级过程中,更多的注意力和精力集中在经济、有效降低柴油的硫质量分数上,对柴油密度、十六烷值和十六烷指数在质量升级中可能出现的问题关注不够。随着原油的进一步重质化、劣质化,含酸原油加工比例不断提高,柴油生产过程中的密度、十六烷值和十六烷指数面临更大的挑战,建议在应对柴油质量升级过程中明确十六烷值和十六烷指数的区别,做好原油加工优化,将劣质柴油进行加氢转化,特别是科学利用催化裂化柴油中的多环芳烃生产高附加值产品的同时,降低柴油池调和的难度,深入调整炼厂产品结构,全面提升柴油池质量。

参 考 文 献

- [1] 李大东,任亮.中压加氢改质(MHUG)系列技术开发和应用[J].石油与天然气化工,2022,51(5):1-8.
- [2] Xu G Y, Shan W P, Yu Y B, et al. Advances in emission control of diesel vehicles in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 123(1): 15-29.
- [3] 王哲,张乐,葛泮珠,等.柴油产品质量升级与清洁柴油生产技术应用进展[J].石油炼制与化工,2021,52(12):113-118.
- [4] Zhu H H, Mao Z W, Liu B, et al. Regulating catalyst morphology to boost the stability of Ni-Mo/ Al_2O_3 catalyst for ebullated-bed residue hydrotreating[J]. Green Energy & Environment, 2021, 6(2): 283-290.
- [5] 彭冲.促进多环芳烃向单环芳烃加氢转化的机理和过程研究[D].上海:华东理工大学,2018.
- [6] Khouri N G, Bahú J O, Miranda N T, et al. Diesel upgrading: A modeling of its microemulsions[J]. Fuel Processing Technology, 2023, 239(1): 107545.
- [7] 丁石,张锐,鞠雪艳,等.催化裂化柴油加氢处理综合利用技术方案[J].石油炼制与化工,2022,53(12):1-7.
- [8] 丁石,习远兵,张乐,等.高低温双反应区平台工艺RTS在炼油领域的应用[J].石油炼制与化工,2021,52(12):38-42.
- [9] 牟明仁,蒋晓光,王月江,等.不同方法对柴油十六烷指数计算结果的影响[J].辽宁石油化工大学学报,2007,27(4):5-8.
- [10] 李琳,王鹏飞,孙悦超,等.柴油十六烷值预测模型研究[J].石油炼制与化工,2022,53(11):42-45.
- [11] Cao Z K, Zhang X, Xu C M, et al. Selective hydrocracking of light cycle oil into high-octane gasoline over bi-functional catalysts[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 52(1): 41-50.
- [12] Peng C, Liu B, Feng X, et al. Engineering dual bed hydrocracking catalyst towards enhanced high-octane gasoline generation from light cycle oil[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 389(6): 123461.
- [13] Peng C, Zhou Z M, Cheng Z M, et al. Upgrading of light cycle oil to high-octane gasoline through selective hydrocracking over non-noble metal bifunctional catalysts[J]. Energy Fuels, 2019, 33(2): 1090-1097.

(编辑 宋官龙)