

# 配方原油技术及其在原油资源优化中的应用

章群丹, 许育鹏, 田松柏, 褚小立

(中国石化石油化工科学研究院, 北京 100083)

**摘要:**原油性质的相对稳定是保证炼油厂安全运行和利润提升的重要前提。中国石化石油化工科学研究院结合原油光谱库、原油评价数据库、原油快速评价技术和先进计算方法,将几种原油按一定比例巧妙搭配,可以得到与目标原油性质十分接近的多种原油配方,从而形成具有显著特色的配方原油技术。炼油厂可以根据原油价格、原油的可获得性、混合原油的加工性能、炼油厂的优化目标等原则选择合适的原油配方。实验室评价结果表明,实际分析结果与通过配方原油技术计算得到的结果相当,如果该技术能得到推广利用,可以在炼油厂增效中发挥重要作用。

**关键词:**配方原油 炼油厂优化 原油调合 原油快速评价

根据中国石油集团经济技术研究院发布的《2017年国内外油气行业发展报告》,我国2017年石油的表观消费量达到590 Mt,石油净进口量达到396 Mt,对外依存度达到67.4%。对外依存度的增加不仅意味着原油加工量的增加,而且还反映出原油品种的多样化,在增加炼油厂原油选择自由度的同时,也带来了炼油厂操作的不确定性。有些炼油厂从装置运行一开始加工的原油就不是当初设计所用的原油,配套建设的装置很难按设计的要求协调运转;另外一些炼油厂加工的合适原油供应不足或价格高企,也会影响炼油厂的正常生产;还有一些炼油厂加工的原油不是优化的目标原油,加上品种经常变化,不仅装置的安全平稳运行受到影响,而且优化工作很难落实到位。

针对国内炼油企业优化原油经常得不到保证,导致效益损失这一共性问题,中国石化石油化工科学研究院(简称石科院)结合原油评价数据库、原油光谱库、原油快速评价技术和先进计算方法开发出配方原油技术,其基本内容是利用先进算法,将几种不同原油进行组合,形成多种性质与目标原油相似的原油配方供炼油厂选择利用。以下主要介绍配方原油技术及其在原油资源优化中的应用情况。

## 1 配方原油技术的科学基础与实施流程

配方原油技术是一种基于先进算法,在原油评价数据库和原油光谱库所采集的大数据基础上,通过光谱拟合及原油品种和数量的巧妙搭配,得到与目标原油性质十分接近的“类原油”配方的

技术。例如,某炼油厂加工的目标原油是阿曼原油,当阿曼原油的供应受限时,通过配方原油技术,可从原油光谱库中找出一些原油,通过这些原油光谱按比例的组合,得到与阿曼原油光谱相似的混合光谱,通过混合光谱中各原油的比例,并结合原油评价数据库,即可计算出类阿曼原油的全部原油评价数据。图1是采用配方原油技术,将原油近红外光谱库中的0021号、0158号、0125号原油按质量比75:10:15的比例混合后,得到的与阿曼原油类似的近红外光谱。

配方原油和目标原油的相似度可用式(1)描述<sup>[1]</sup>。

$$S(O_A, O_B) = 1 - \sum_{i=1}^m \omega_i \left| \frac{A_i - B_i}{\text{Max}(i) - \text{Min}(i)} \right| \quad (1)$$

式中: $A_i$ 和 $B_i$ 分别为目标原油和配方原油的物性或组成数据; $\omega_i$ 为第 $i$ 个物性的权重; $\text{Max}(i)$ 和 $\text{Min}(i)$ 分别为参与配方设计原油的第 $i$ 个物性对应的最大值和最小值。

根据 $S(O_A, O_B)$ 的值来判断配方原油 $O_B$ 和目标原油 $O_A$ 之间的接近程度,其值越接近1代表配方原油与目标原油越相似。

收稿日期:2018-12-14; 修改稿收到日期:2019-01-20。

作者简介:章群丹,博士,高工,从事原油评价及油品分析工作。

通讯联系人:章群丹,E-mail:zhangqd.ripp@sinopec.com。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0306501); 中国石油化工股份有限公司合同项目(114135)。



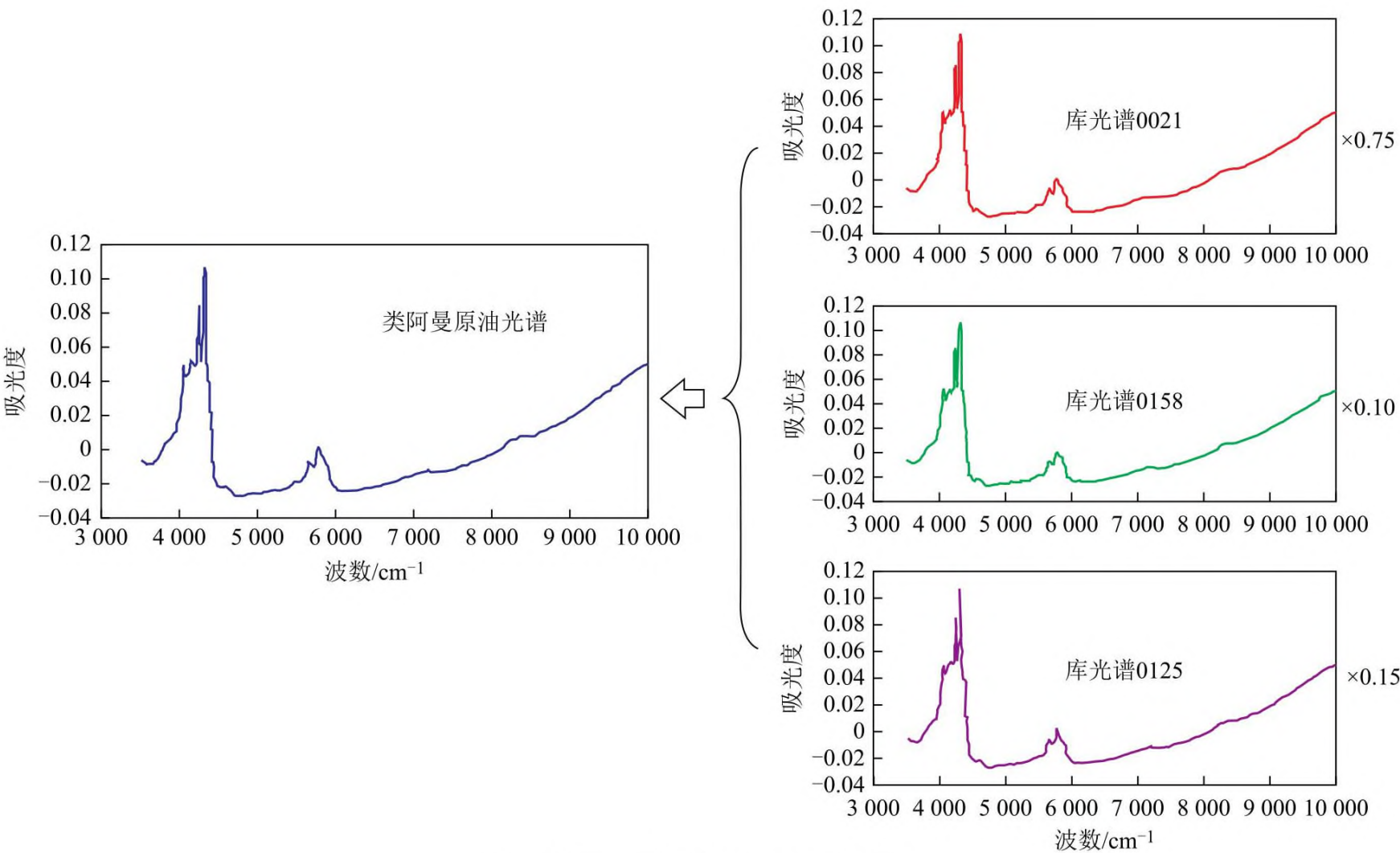


图 1 类阿曼原油近红外光谱形成示意

原油评价数据库、原油光谱库和原油快速评价技术也是配方原油技术的重要组成部分。在炼油厂原油资源的优化选择层面,需要有原油品种多、包含范围广(尤其是国内加工的原油)、原油评价数据更新快、原油和馏分性质及组成数据详细的原油评价数据库作支撑;在炼油厂生产过程操作层面,原油光谱库、原油评价数据库以及在此基础上建立起来的原油快评技术能够在短时间内迅速给出进厂原油的性质,甚至炼油厂储罐中混合原油的性质,由此得到的配方原油更为实用,而且与炼油厂原油调合设施一起,可以随时对配方原油的配比进行调整,真正实现炼油厂全流程的优化目标。

在实施配方原油技术时,首先根据炼油厂装置、工艺、催化剂等特点,提出适合炼油厂加工的目标原油。目标原油可以是炼油厂设计时所选定的原油,也可以是炼油厂以前加工过且证明具有较高经济效益的原油<sup>[2]</sup>,还可以是通过流程优化软件计算出的优化原油,或者是各种性质具有一定变化区间的虚拟原油。通过流程优化软件,进行物料平衡和经济效益计算,从众多配方中筛选出几种进行可加工性能评价,对满足要求的配方原油进行评价,验证计算的可靠性,将合适的配方输出到炼油厂安排生产,不合适的淘汰掉,再从配方库中调出新的配方进行计算,反复循环,直到找到最合适的配方原油为止。配方原油技术实施的原则流程见图 2。

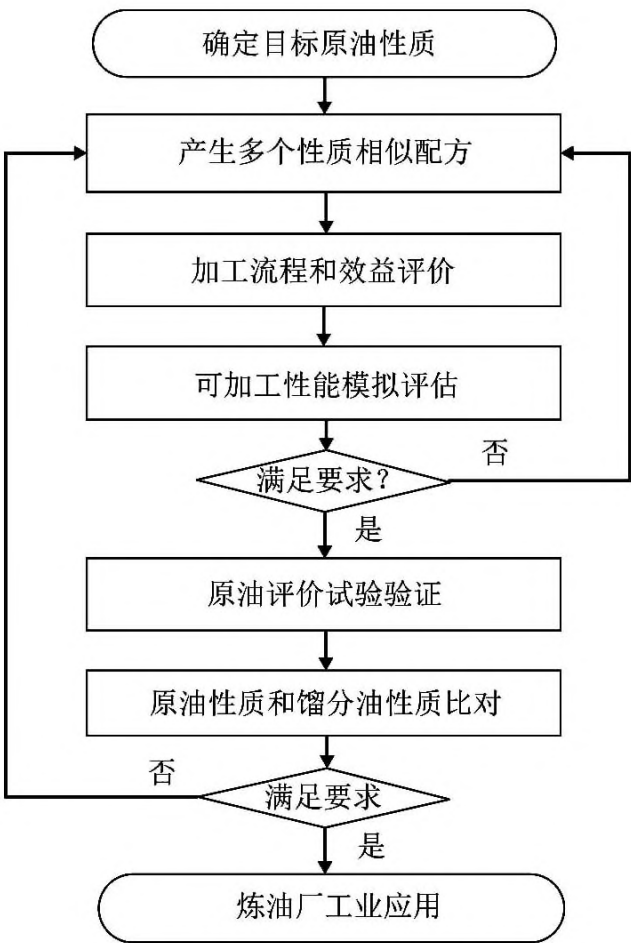


图 2 配方原油技术的实施流程

2 配方原油技术在类阿曼原油配方设计中的应用

阿曼原油具有轻质油收率高、柴油十六烷值高、常压渣油 *K* 值高、金属含量低等特点,适合在燃料-化工型炼油厂加工。但是,阿曼原油每年的产量只有 30 Mt 左右,满足不了全球原油贸易市场的需求,

而且,如果采购量过大,容易使原油的价格升高。因此急需寻找与阿曼原油类似的原油作为替代原油。采用配方原油技术,在组分原油不超过 4 种的情况下,可以产生上百种配方,能从多个方面满足炼油厂对类似原油的需求。以下是几个例子。

2.1 以原油性质为目标的类阿曼配方原油

将组分原油 1,2,3 按质量比 0.60 : 0.25 : 0.15 的比例(配方 1)混合,计算得到的性质与阿曼原油十分接近(见表 1)。另外,其他的一些配方也具有同样的特点。

表 1 以原油性质为目标的类阿曼配方原油

项 目	阿曼原油	组分原油 1	组分原油 2	组分原油 3	配方 1
密度(20 ℃)/(g · cm <sup>-3</sup> )	0.863 7	0.847 4	0.868 3	0.943 2	0.867 0
酸值/(mgKOH · g <sup>-1</sup> )	0.42	0.04	0.13	2.05	0.36
残炭, %	4.58	2.51	6.00	8.20	4.24
w(S), %	1.27	0.54	2.90	1.90	1.33
w(N), %	0.18	0.09	0.13	0.39	0.15
w(蜡), %	4.9	2.4	4.0	9.8	3.9
w(胶质), %	7.9	5.4	7.7	22.4	8.5
w(沥青质), %	0.6	0.4	2.2	1.8	1.1
<180 ℃馏分收率, %	18.15	19.93	20.43	4.29	17.71
<350 ℃馏分收率, %	43.95	48.64	46.28	19.9	43.74
<540 ℃馏分收率, %	71.24	77.24	70.86	57.33	72.66

2.2 以原油价格为目标的类阿曼配方原油

如果炼油厂效益对原油的价格十分敏感,可以在式(1)中将原油的价格作为一个变量予以考虑。但相对“以原油性质为目标的配方原油”的应用来说,这项应用比较困难,主要原因是组分原油的价格一般应低于目标原油价格,这样很大程度

上限制了参与配方设计的组分原油的数量。表 2 是从 15 种价格比阿曼原油低的组分原油中通过配方原油技术计算出来的部分配方,在原油价格较高的情况下,通过组分原油的适当配比,可以得到价格比阿曼原油低 1~5 美元/bbl(1 bbl≈159 L)的配方原油。

表 2 以原油价格为目标的类阿曼配方原油

项 目	阿曼原油	配方 2 <sup>1)</sup>	配方 3 <sup>2)</sup>	配方 4 <sup>3)</sup>	配方 5 <sup>4)</sup>	配方 6 <sup>5)</sup>
原油价格/(美元 · bbl <sup>-1</sup> )	110.14	107.82	106.69	105.73	106.48	106.91
密度(20 ℃)/(g · cm <sup>-3</sup> )	0.863 7	0.861 4	0.861 1	0.865 1	0.865 5	0.862 2
酸值/(mgKOH · g <sup>-1</sup> )	0.42	0.10	0.07	0.30	0.47	0.39
残炭, %	4.58	4.56	4.72	4.50	4.75	4.50
w(S), %	1.27	0.98	1.36	1.44	1.41	1.32
w(N), %	0.18	0.21	0.20	0.17	0.11	0.10
w(Ni)/(μg · g <sup>-1</sup> )	12.2	14.0	18.4	18.5	19.1	17.5
w(V)/(μg · g <sup>-1</sup> )	10.2	26.8	66.6	39.3	52.2	47.5
<200 ℃馏分收率, %	21.15	21.11	20.48	20.03	21.94	22.86
200~350 ℃馏分收率, %	20.99	21.07	21.86	20.85	22.16	23.18
350~540 ℃馏分收率, %	27.29	28.22	28.75	28.53	26.78	27.77
>350 ℃馏分收率, %	57.86	57.82	57.66	59.12	55.90	53.96

1)组分原油 4,5,6 质量比为 0.40 : 0.40 : 0.20。  
2)组分原油 7,8,9 质量比为 0.41 : 0.39 : 0.20。  
3)组分原油 10,11,12 质量比为 0.40 : 0.37 : 0.23。  
4)组分原油 13,14,15 质量比为 0.38 : 0.32 : 0.30。  
5)组分原油 16,17,18 质量比为 0.38 : 0.35 : 0.27。



2.3 以原油馏分性质为目标的类阿曼配方原油

如果炼油厂某些装置对全厂效益的贡献较大,则可以将该装置的原料性质或组成要求作为配方原油技术追求的目标。表 3 是针对

燃料-化工型炼油厂对石脑油的性质、收率、组成的特别要求而建议的配方之一,可以看出,配方原油石脑油的主要特点与阿曼原油石脑油十分接近。

表 3 以石脑油馏分性质为目标的类阿曼配方原油

项 目	阿曼原油	组分原油 19	组分原油 20	组分原油 21	配方 7 <sup>1)</sup>
原油性质					
密度(20 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.863 7	0.798 9	0.865 3	0.885 1	0.869 8
酸值/(mgKOH·g <sup>-1</sup> )	0.42	0.01	0.05	0.27	0.14
残炭, %	4.58	0.71	3.69	8.18	5.22
w(S), %	1.27	0.59	0.09	2.78	1.42
w(Ni)/(μg·g <sup>-1</sup> )	12.2	0.8	13.6	17.9	13.2
w(V)/(μg·g <sup>-1</sup> )	10.2	2.0	0.3	44.6	21.0
<200 ℃馏分收率, %	21.15	41.25	10.60	19.39	20.64
200~350 ℃馏分收率, %	20.99	31.16	17.06	22.64	22.50
350~540 ℃馏分收率, %	27.29	21.59	32.12	28.03	28.52
>540 ℃馏分收率, %	30.57	6.00	40.22	29.94	28.34
石脑油馏分性质					
密度(20 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.711 9	0.713 3	0.719 7	0.707 3	0.719 6
φ(链烷烃), %	74.65	66.76	70.13	80.14	73.99
φ(环烷烃), %	18.37	24.79	23.74	13.54	19.35
φ(芳烃), %	6.98	8.45	6.13	6.32	6.66

1)组分原油 19,20,21 质量比为 0.19 : 0.36 : 0.45。

2.4 以利用炼油厂储罐已有原油为目标的类阿曼配方原油

炼油厂原油储罐在长期的使用过程中,会有不同的原油混杂在一起的罐底油,难以获得可靠的原油评价数据;另外,原油进厂后,经过各种工序,由于操作和设施方面的问题,原油的混合比例、混合原油的性质可能经常会发生变化。采用配方原油技术中的原油快速评价模块,可以在几分钟内得到原油评价数据<sup>[3-4]</sup>,配方原油技术将其作为一个组分原油,与其他原油一起形成配方,也可以得到与目标原油性质接近的配方原油。表 4 为以利用炼油厂储罐已有原油为目标的类阿曼配方原油,其中储罐原油是取自某炼油厂储罐的一种混合原油,其性质是通过原油快速评价得到的。如果阿曼原油是炼油厂合适的原油,则可以允许硫含量较高、石脑油收率也较高的原油与储罐原油相配。表 4 中配方原油技术的计算结果表明,当储罐原油与卡塔尔海上原油按质量比 0.42 : 0.58

的比例(配方 8)混合时,也能得到与阿曼原油性质相似的配方原油。

表 4 以利用炼油厂储罐已有原油为目标的类阿曼配方原油

项 目	阿曼原油	储罐原油	卡塔尔海上原油	配方 8
密度(20 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.863 7	0.865 5	0.867 5	0.866 7
酸值/(mgKOH·g <sup>-1</sup> )	0.42	1.01	0.14	0.50
残炭, %	4.58	3.22	5.40	4.49
w(S), %	1.27	0.16	2.30	1.41
w(N), %	0.18	0.12	0.10	0.11
w(Ni)/(μg·g <sup>-1</sup> )	12.2	11.6	9.3	10.2
w(V)/(μg·g <sup>-1</sup> )	10.2	2.0	26.0	16.0
w(沥青质), %	0.5	0.4	1.9	1.3
<180 ℃馏分收率, %	18.15	11.97	19.66	16.45
180~350 ℃馏分收率, %	25.80	24.41	28.65	26.88
350~540 ℃馏分收率, %	27.29	31.40	26.95	28.81

2.5 计算结果与实际原油评价结果的比较

为了验证配方原油技术计算结果的可靠性,对配方 1、配方 9 和配方 10 的原油性质进行实验室分析,结果见表 5。对配方 1 与阿曼原油还进

行了实沸点蒸馏曲线的比较,结果见图 3。从表 5 和图 3 可以看出,计算结果与实验室分析结果非常接近,完全可以满足炼油厂实际操作的需要。

表 5 计算结果与实际原油评价结果的比较

项 目	阿曼原油	配方 1		配方 9 <sup>1)</sup>		配方 10 <sup>2)</sup>	
		计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.863 7	0.867 0	0.865 7	0.864 0	0.863 3	0.863 1	0.860 0
酸值/(mgKOH·g <sup>-1</sup> )	0.42	0.36	0.35	0.62	0.52	0.13	0.18
残炭, %	4.58	4.24	4.41	4.18	4.30	4.57	4.52
w(S), %	1.27	1.33	1.30	1.40	1.10	1.45	1.50
w(N), %	0.18	0.15	0.15	0.11	0.12	0.12	0.11
w(蜡), %	3.1	3.9	3.5	3.5	3.3	3.5	3.4
w(胶质), %	7.9	8.5	9.0	8.0	7.9	7.6	7.5
w(沥青质), %	0.6	1.1	0.9	1.4	0.8	2.0	1.5
w(Ni)/(μg·g <sup>-1</sup> )	12.2	7.7	7.9	6.9	6.6	8.8	8.3
w(V)/(μg·g <sup>-1</sup> )	10.2	10.1	10.1	14.1	13.4	21.2	21.7
<180℃馏分收率, %	18.15	17.71	16.40	17.89		18.24	
<350℃馏分收率, %	43.95	43.74	44.03	44.60		45.16	
<450℃馏分收率, %	54.88	58.36	58.20	57.48		59.40	
<540℃馏分收率, %	71.24	72.66	73.80	73.43		73.78	

1)组分原油 22,23,24 质量比为 0.50 : 0.40 : 0.10。  
2)组分原油 25,26,27,28 质量比为 0.55 : 0.25 : 0.10 : 0.10。

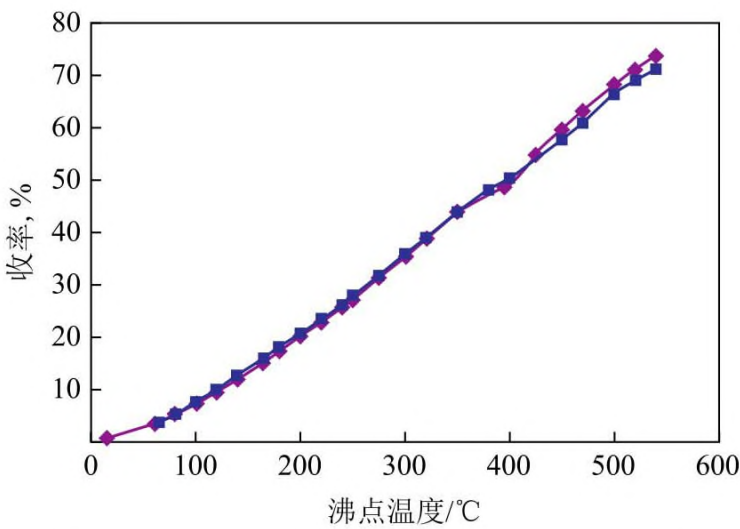


图 3 配方 1 原油与阿曼原油的实沸点蒸馏曲线  
■—阿曼原油; ◆—配方 1 原油

3 结 论

(1)基于大量的原油样本、原油评价数据库、原油光谱库以及相应算法形成了配方原油技术。配方原油技术可以方便、高效地调配出与目标原油相似的原油配方,实验室分析结果与计算结果有较好的相似性。

(2)炼油厂可以根据需要确定配方原油要达到的目标,既可以使配方原油的价格接近,甚至低于目标原油,也可以使配方原油和目标原油的性质尽可能一致,还可以使重要装置原料的性质与目标原油的相应馏分油性质基本一致。

参 考 文 献

[1] Yang Huihua, Ma Wei, Zhang Xiaofeng, et al. A method for crude oil selection and blending optimization based on improved cuckoo search algorithm[J]. China Petroleum Processing and Petrochemical Technology, 2014, 16 ( 4 ): 70-78

[2] 曾宿主,解增忠,田松柏,等. 某炼油厂大庆混合油替代原油的加工性能研究[J]. 石油炼制与化工,2016,47(4):1-6

[3] Chu Xiaoli,Xu Yupeng,Tian Songbai,et al. Rapid identification and assay of crude oils based on moving-window correlation coefficient and near infrared spectral library[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2011, 107 ( 1 ): 44-49

[4] 褚小立,田松柏,许育鹏,等. 近红外光谱用于原油快速评价的研究[J]. 石油炼制与化工,2012,43(1):72-77



## CRUDE FORMULATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATION IN OPTIMIZATION OF CRUDE RESOURCES

Zhang Qundan, Xu Yupeng, Tian Songbai, Chu Xiaoli  
(SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083)

**Abstract:** The relative stability of crude oil is important to ensure safe operation and profit improvement of refineries. By combining the crude oil spectral database, crude oil evaluation database, crude oil rapid assay and advanced calculation method, SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing has combined several crude oils in a certain proportion to obtain a formulated crude oil that are very close to the properties of target crude oil, thus forming the crude formulation technology. Refinery can choose the appropriate crude formula according to the principles of crude oil price, availability of crude oil, processing performance of mixed crude oil and optimization target of refinery. Laboratory evaluation shows that the actual analysis results are similar to those calculated by the technology. If this technology can be popularized and used, it can play an important role in improving refinery profit.

**Key Words:** formulated crude; refinery optimization; crude oil blending; crude oil rapid assay



### IMO 2020 船用燃料新规对船用 润滑剂的影响评估

鲁克石油公司(Lukoil)船用润滑剂代表称,IMO 2020 法规实施后,预计有 72% 的船舶会使用低硫燃料油,还称因船用行业缺少使用这种燃料油的经验,这会增加对船用润滑剂影响的不确定性。

早在 2019 年 4 月中东的基础油和润滑剂年会上,Lukoil 船用润滑剂技术经理 Sanjiv Wazir 就称在基准情景中,2020 年对低硫燃料油(硫质量分数为 0~0.5%)的需求约为 233 Mt。

船用市场使用新燃料的经验有限,且新燃料还存在稳定性和相容性问题,这就增加了燃料对内燃机性能影响的不确定性。Wazir 称发动机点火和燃烧问题以及催化剂粉末的含量水平,都会对原始设备制造商(OEM)的润滑剂使用造成挑战。OEM 目前建议二冲程内燃机汽缸油的碱值为 15~40 mgKOH/g,四冲程筒形活塞式发动机油的碱值为 20~40 mgKOH/g。

Wazir 说他们希望市场上系统油的碱值设定在 25~30 mgKOH/g,这对系统油没有影响,但筒形活塞式发动机油的碱值要设定在 20~25 mgKOH/g 区间。还称 OEM 担心每批燃料的质量不同,这可能会促使使用两套气缸油。一套是为了适应低端馏分油燃料市场,另一套是为了适应更高端一些的燃料市场。

同时,硫质量分数低于 0.1% 的超低硫燃料油需求预计会达到 39 Mt,约占船用燃料市场的 12%。液化天然气需求预计约占船用燃料市场的 4%。

Lukoil 称,目前市场上仅用一种碱值为 40 mgKOH/g 的汽缸油不能同时满足超低硫燃料油和低硫燃料油对清净性的要求。这就会使每种燃料都需要碱值为 20 mgKOH/g 和 40 mgKOH/g 的汽缸油。但是 Lukoil 认为当市场在转换为使用 IMO 履约燃料时,多功能汽缸油还是有市场的。

调配不同级别的汽缸油需要进行额外的操作,这就增加了润滑剂供应商的复杂性和成本。2017 年,Lukoil 推出了 Navigo MCL Extra 船用汽缸油,为 SAE 50 黏度级别油品,碱值为 40 mgKOH/g,用于使用馏分油或硫质量分数高达 0.5% 重质燃料油的低速、二冲程柴油内燃机。该产品既可用于超低硫燃料油,也可用于低硫燃料油。测试显示该产品所具有的热稳定性和氧化安定性可使内燃机部件保持清洁,表现出良好的抗磨性能。包括 MAN、Winterthur 在内的 OEM 已经对该产品进行了认证。

2018 年,ExxonMobil 公司推出了 Mobilgard 540。Chevron 船用润滑剂公司推出了碱值为 25 mgKOH/g 和 40 mgKOH/g 的 Taro Ultra 汽缸油,适用于使用低硫燃料且持续在排放控制区运行的二冲程船用内燃机。

在 2020 年前,如果越来越多的国家禁止在当地水域中使用开环式脱硫洗涤装置,那么船用润滑剂市场还可能会面临额外的挑战。安装了洗涤器可以使船主使用硫质量分数高于 0.5% 的燃料,但要求使用更高碱值的润滑剂。

Cockett 船用油公司的 Caroline Huot 称低硫燃料油的发展将降低对高碱值汽缸油的需求,突然转变成使用符合 IMO 2020 要求的较低碱值的船用油,在 2020 年初将会供应困难。

由于全球的大量贸易需要使用海运,对于船主和船用润滑剂供应商来讲所面临的压力就是要确保顺利过渡,然而,在 IMO 2020 即将到来之际,该行业还会迎来越来越多的挑战。

[黄丽敏摘译自 Lube Report Americas,2019-06-05]