

The Relationship between Coking Reactivity with Super Critical Extraction Subfractions

Xuewen Sun¹, Xiuying Guo¹, Ping Li², Hai Zeng², He Huang²

¹State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum (Beijing), Beijing

²China Petroleum Liaohe Petrochemical Industries Co., Panjin Liaoning

Email: sunxwb2000@163.com

Received: Feb. 23rd, 2018; accepted: Mar. 2nd, 2018; published: Mar. 12th, 2018

Abstract

The relationship between coking reactivity with the properties of supercritical fluid extraction fractionation (SFEF) subfractions was studied in this paper. The results showed that the products yield can be related to K_H , good linear relationships are existed between them. Coke yield was increased with the SFEF subfractions becoming heavier, while the light oil produced in coking destroyed the stability of subfraction system and led aromatic rings including in aromatic and resin convert to coke. Hence, except CCR, the coke yield is also closely related to SARA. During coking, almost all asphaltene and 65.52% CCR were covered to coke, the contribution of aromatics and resin for coke were exceeded 15%. Furthermore, the coke yield was increased with the increasing of Ni + V content, but it was reduced with the increasing of sulfur existed in subfractions.

Keywords

Residua, Super Critical Extraction, Subfraction, Coking

渣油超临界萃取窄馏分与其焦化性能的关系

孙学文¹, 郭秀颖¹, 李平², 曾海², 黄鹤²

¹中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京

²中国石油天然气股份有限公司辽河石化公司, 辽宁 盘锦

Email: sunxwb2000@163.com

收稿日期: 2018年2月23日; 录用日期: 2018年3月2日; 发布日期: 2018年3月12日

摘要

本文研究了三种不同减渣超临界萃取窄馏分性质及其焦化性能的关系, 研究结果表明, 焦化产品收率与

原料的 K_H 之间存在良好的线性关系。随着萃取窄馏分变重,焦炭收率增加,生成的轻油破坏了窄馏分体系的稳定性,使得芳香分及胶质中的芳香环缩合成焦炭,也增加了焦炭的收率。研究发现,焦炭收率除了与CCR相关外,也与原料的SARA、杂原子含量有关。焦化反应过程中,沥青质几乎完全转化为焦炭,65.52%的残炭转化为焦炭,芳香分和胶质对生焦量的贡献超过15%。金属的存在,促进焦炭生成,硫对生焦具有抑制作用。

关键词

渣油, 超临界萃取, 窄馏分, 焦化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着渣油中金属、沥青质及残炭含量的增加,不能采用催化工艺进行渣油的加工,此时延迟焦化工艺的重要性凸显。为了更深入了解原料结构、性质与其焦化性能的关系,有必要对原料及产品的组成进行表征。Sawarkar 等[1]发表了关于此方面的综述性论文。

Gary 等[2]建立了渣油直馏馏分的生焦率与原料残炭(CCR)和比重指数的一系列关系,并且在炼油厂得到了广泛的应用。Maples 等[3]发现了焦炭收率、 C_5^+ 油品收率及瓦斯油收率与原料残炭之间的关系。Chen 等[4]发现焦炭收率与 CCR 之间存在良好的线性关系,直线的斜率在 0.9~1.66 之间变化。上述工作均试图在生焦与原料的 CCR 间建立一个合适的关联。尽管气体收率与 CCR 间具有很好的关联式,但汽油收率与 CCR 间的关联还没有发现。

为了更准确地预测产品的收率,预测模型中使用多个性质。Schabron 等[5]文章中使用诸如分子质量、杂原子含量及沥青质的质量百分数等因素关联焦炭收率。同时也提出了焦化指数[6]和离散颗粒溶液模型[7]。最近, Fan 等[8]根据 5 种中国减渣的焦化数据结果,提出了包含 H/C 原子比、分子质量、黏度和密度的特性因数与焦化气体、焦化液体和焦炭收率的新关联式。

除了对焦化收率与原料的性质数学关联外,也研究了减渣的平均结构参数的影响。分子质量、CCR、H/C 原子比、碳型分布及金属含量对焦化气体、汽油、轻瓦斯油和重瓦斯油的贡献是不同的。Chen 等[9]发现,焦化过程中,芳香碳是增加的。

已经有人研究了饱和分、芳香分、胶质和沥青质在焦化过程中反应特性[10] [11] [12] [13]。Favre 等[14]研究了 420℃条件下 Safaniya 渣油的热反应,发现饱和分与胶质十分活跃。Gray 等[10] [11]研究了沥青质的结构与热转化性能。Guo 等[12]利用热重方法研究了渣油及其四组分的焦化反应性能,证明渣油中的饱和分具有从环烷-芳烃结构中强夺氢能力,从而导致生焦前驱体的形成并加速焦炭的产生,这些结果似乎与 Long 等[15]和 Roberts 等[16]的观点相反。

但是上述焦化行为的研究也仅限于渣油的整体行为。中国石油大学(北京)开发的超临界萃取分离技术,可以在不改变油品结构的前提下,将渣油分离成不同的窄馏分[17] [18], Zhao 等[19] [20]对萃取窄馏分的性质及反应特性进行了深入地研究。已发表的文献[20] [21]中已经报道了不同窄馏分的加氢脱硫(HDS)、加氢脱氮(HDN)和催化裂化(FCC)性能,但是超临界萃取窄馏分的焦化性能还没有系统的研究。最近,中国石油建立了梯级分离工艺,可以利用超临界溶剂将渣油进行分离并利用不同的工艺对不同的

馏分进行改质处理[22]。对于这些窄馏分焦化性能的研究,将有助于发现影响焦化及目的产物收率的关键因素,从而通过调节超临界分离的工艺条件,实现改变窄馏分性质的目的。

为了更深入研究窄馏分性质与其焦化反应行为的关系,本文选择三种减压渣油并采用超临界萃取分离的方法将其分别分离成一系列窄馏分,然后在高压釜中对不同的窄馏分进行焦化反应的考察,并将焦化气体、液体产物及焦炭反应产物分别收集。同时研究了窄馏分焦化产品收率、焦化反应性能与原料的性质、结构参数的关系。

2. 实验部分

2.1. 窄馏分的制备

采用超临界萃取分离的方法对三种减渣进行分离,该分离方法已经在不同的文献中有过描述[17][18]。以正戊烷为溶剂,用泵将大约 1000 g 的原料送入到装置中,萃取和分馏段的温度分别设定为 200℃ 和 220℃,装置的初始压力设定为 4 MPa,并以 1 MPa/h 的速度升压至 12 MPa,按照质量收率 5% 进行收集,分别得到一系列的窄馏分。分析每个窄馏分的性质并在装置中完成窄馏分的焦化反应性能。

2.2. 焦化反应

200 mL 间歇反应器如图 1 所示。

反应器可以快速地从加热炉中取出,从而快速降温实现停止反应的目的。首先,将 100 g 样品放入到反应器中并用氮气扫除反应器中的空气,加热炉的温度在反应器放入前已预设反应温度并保持稳定,以使反应器放入后,反应物快速达到反应温度。三种渣油的窄馏分焦化反应条件均设定为焦化反应温度 500℃,反应时间 1 h,反应压力为常压。反应结束后,从反应器中将焦炭收集起来并用甲苯回流 2 h,然后将含有焦炭的滤纸进行真空干燥后称重,计算其质量收率。甲苯冲洗下来的液体蒸出甲苯后与焦化液体放在一起计算液体产物收率。

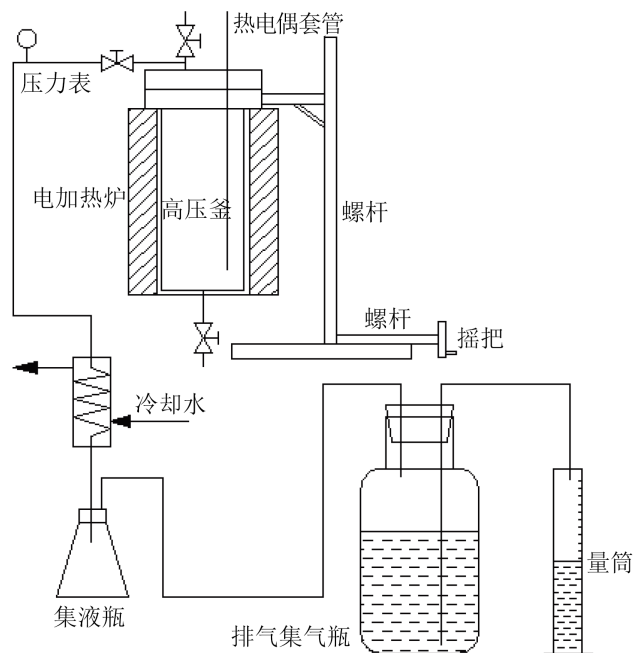


Figure 1. Flow sheet of batch coking reactor
图 1. 间歇焦化反应装置流程图

2.3. 性质与组成分析

根据 ASTM D2007-11 标准分析原料的四组分(SARA), 渣油及其萃取窄馏分的平均分子量在 60℃, 以甲苯为溶剂, 采用德国诺尔 K-7000 型渗透压仪测定, 使用 Flash EA 1112 与 Antek 7000 元素分析仪进行元素分析, 采用电感耦合等离子发射光谱仪分析金属含量, 利用比重瓶法测定密度, 使用上海宇通设备公司生产的 YT-30011 分析残炭值。利用 UNITY INOVA 600 MHz 核磁共振波谱仪结合改进的 B-L 法计算窄馏分的芳碳率。

3. 结果与讨论

3.1. 渣油及其萃取窄馏分的性质

塔河减渣、辽河混合减渣及委内瑞拉减渣的性质见表 1。

从表中可以看出, 三种减渣的残炭值较高, 密度均超过 1 g/cm³, 三种渣油的 Ni 含量相近(分别为 105.7 μg/g, 166.8 μg/g 和 155.1 μg/g), 但是 V 含量差别很大, 分别为 582.3 μg/g、714.3 μg/g 和 3.5 μg/g。辽河混合减渣的沥青质含量为 5.61 wt%, 而塔河减渣与委内瑞拉减渣的沥青质含量分别为 32.96 wt% 和 15.94 wt%。此外, 三种渣油中, 委内瑞拉的硫含量最高, 达到 4.8 wt%。采用超临界萃取, 塔河减渣可以得到 10 个窄馏分, 而其他两种减渣可以得到 13 个窄馏分。图 2 列出了窄馏分的密度、H/C 原子比 CCR 和平均分子量。

从图中可以看出, 窄馏分的密度、CCR 和分子量均随窄馏分的变重而增大, 而窄馏分的 H/C 原子比下降。三种减渣中, 在相同的累积收率条件下, 辽河混合减渣萃取窄馏分的 CCR 值最低, 塔河减渣萃取窄馏分的最高。三种渣油萃取窄馏分的焦化实验结果如表 2 所示。

3.2. 窄馏分的焦化性能及其与 CCR 的关系

根据文献[23]与图 2 中的数据, 如果将 CCR 看作为生焦的主要影响因素, 塔河减渣窄馏分的生焦率应该是最大的。焦炭收率与 CCR 之间的关系见图 3。

Table 1. Properties of three different VRs

表 1. 三种不同减压渣油性质

Properties	Feedstocks		
	Tahe VR	Orinoco VR	Liaoh mix VR
Density, g/cm ³	1.0530	1.0502	1.0271
CCR, wt%	35.01	26.19	18.11
Molecular weight (VPO), g/mol	1036	3382	1190
Saturate, wt%	19.93	7.98	16.42
Aromatic, wt%	28.70	35.38	36.88
Resin, wt%	18.41	40.70	41.09
Asphaltene, wt%	32.96	15.94	5.61
H/C atomic ratio	1.30	1.40	1.49
S, wt%	3.58	4.80	0.50
N, wt%	0.82	0.98	1.51
Ni, μg/g	105.7	166.8	155.1
V, μg/g	582.3	714.3	3.5

表中 Tahe VR、Orinoco VR、Liaoh mix VR 分别代表塔河减渣、委内瑞拉减渣和辽河混合减渣。

Table 2. The coking results of subfractions from three VRs
表 2. 三种减渣萃取窄馏分的焦化产品分布结果

Number of subfractions	Coking products yields, wt%								
	Gas + loss			Liquid products			Coke		
	Tahe	Orinoco	Liaohe	Tahe	Orinoco	Liaohe	Tahe	Orinoco	Liaohe
1	5.30	11.20	8.41	80.50	71.40	79.67	14.20	17.40	11.92
2	6.60	13.00	8.69	79.80	72.30	79.38	13.60	14.70	11.93
3	9.00	13.40	8.46	78.50	71.20	78.43	12.50	15.40	13.11
4	9.80	13.90	8.78	76.70	69.70	76.59	13.50	16.40	14.64
5	11.20	14.90	10.28	72.10	67.50	73.61	16.70	17.60	16.11
6	9.50	15.30	10.23	69.20	65.30	71.67	21.30	19.40	18.10
7	10.10	15.10	10.92	63.80	63.40	69.20	26.10	21.50	19.88
8	12.20	14.10	11.56	59.50	60.90	66.87	28.30	25.00	21.57
9	9.60	16.90	11.25	56.80	58.70	64.76	33.60	24.40	23.99
10	12.30	13.80	11.60	53.90	56.60	61.42	33.80	29.60	26.98
11		13.80	12.28		52.30	59.37		33.90	28.35
12		10.70	12.68		51.20	55.60		38.10	31.72
13		11.30	12.46		48.90	52.49		39.80	35.05

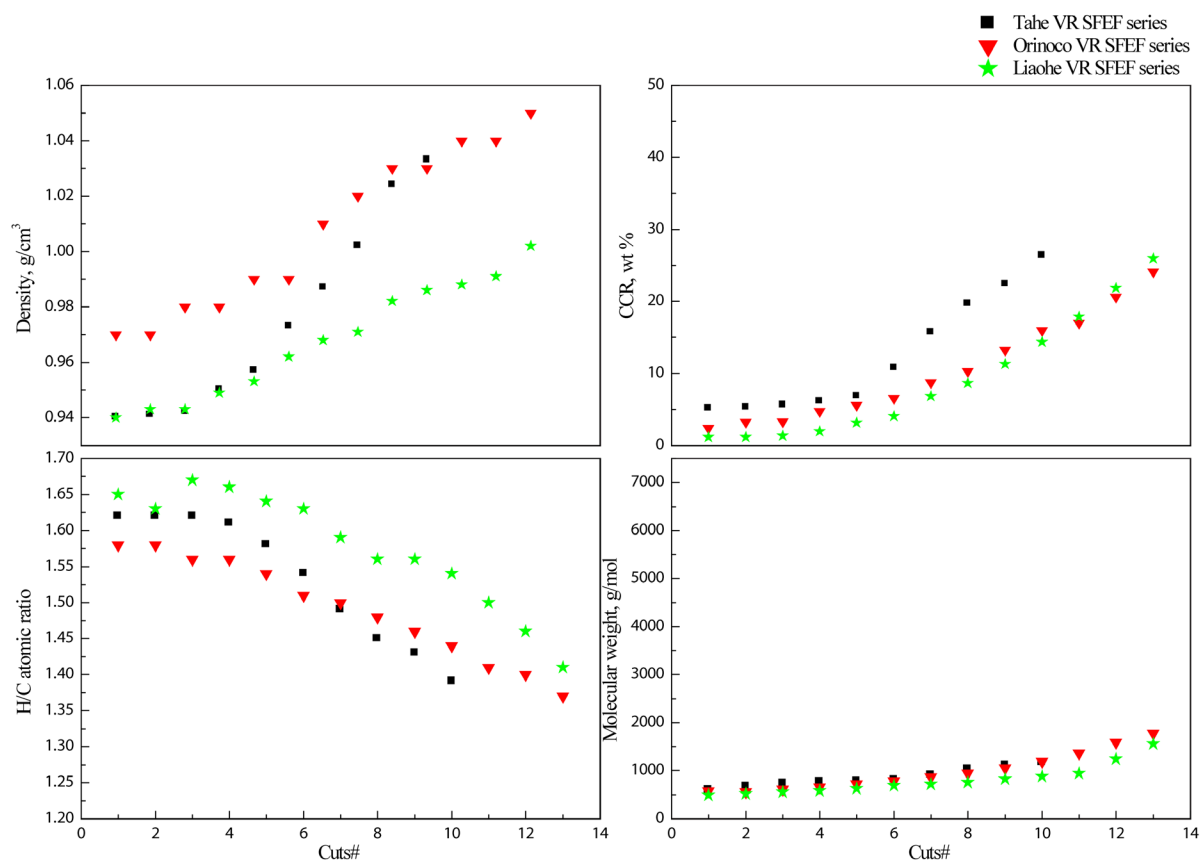


Figure 2. Property of SFEF subfractions for Tahe VR, Orinoco VR and Liaohe VR: density, CCR, hydrogen to carbon atomic ratio, average molecular weight

图 2. 三种减渣萃取窄馏分的密度, 残炭, 氢碳原子比及平均分子质量变化图

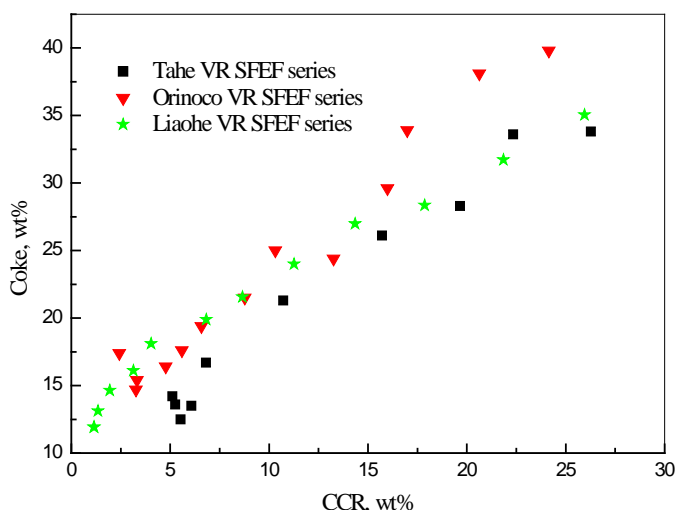


Figure 3. The relations between coke yield and CCR
图 3. 焦炭收率与残炭值的关系图

但结果并非如此,从图中可以看出,相同 CCR 值的情况下,塔河减渣窄馏分的生焦率最低。这种现象证明,CCR 并不是决定生焦量的唯一因素。那么除了 CCR 外,焦炭收率还受哪些因素影响呢?为此本文从减渣窄馏分的四组分分析结果入手,研究四组分对生焦量的影响。三种减渣窄馏分的 SARA 分析结果见图 4。

四组分的分析结果表明,尽管所有窄馏分中的沥青质含量相近,而饱和分、芳香分及胶质的含量差别却是十分明显的。通过比较三种减渣窄馏分发现,塔河窄馏分的饱和分含量与辽河窄馏分相当,其胶质含量最低,而辽河窄馏分的胶质含量最高,且辽河窄馏分的芳香分最低。因此,是否可以推断,辽河混合减渣窄馏分焦化反应过程中生成的轻油使得芳香度较低的体系破坏,胶质从破坏的体系中暴露出来,导致胶质中的芳香环聚合生焦呢?不同窄馏分的轻油收率见图 5。

从图中可以明显看出,相同反应条件下,窄馏分相同累积收率时,塔河减渣窄馏分的焦化轻油收率是最低的。我们推测,由于其轻油收率低,且窄馏分的芳香分含量较高,生成的轻油对体系的芳香度破坏不严重,胶质及沥青质中易生焦的部分并没有完全暴露出来,从而导致其生焦量小。但是对于辽河混合减渣窄馏分就不同了,由于其胶质含量高,且芳香分最低,生成的轻油很容易降低体系的芳香度,导致生焦倾向较大的胶质与沥青质暴露出来,从而增加生焦量。

根据传统观点,焦炭收率一定与 CCR 含量一致,为此对单位 CCR 的原料生焦量进行了计算,结果见图 6。

从图中可以看出,三种减渣窄馏分中,辽河混合减渣窄馏分的单位残炭的生焦量最大,而塔河减渣窄馏分的单位残炭的生焦量最小。同时也可以看到,当残炭值较低时,Coke/CCR 值变化较大,与传统值 1.6 相差较大,而当残炭值超过某一值后,Coke/CCR 值变化趋缓,并逐渐接近一条直线。该结果说明仅用 CCR 值预测焦炭收率是不够的。

为此,本文研究了不同窄馏分单位 CCR 值的生焦量与窄馏分芳碳率及 CCR 值的关联,具体关联结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,单位 CCR 值的生焦量与原料的 CCR 值、芳碳率 f_a 之间具有良好的关联性,得到如下的关联式:

$$\text{Coke\%/CCR\%} = 1.6580 + 488.7946 \times \exp(-3.9208 \times \text{CCR} \wedge f_a)$$

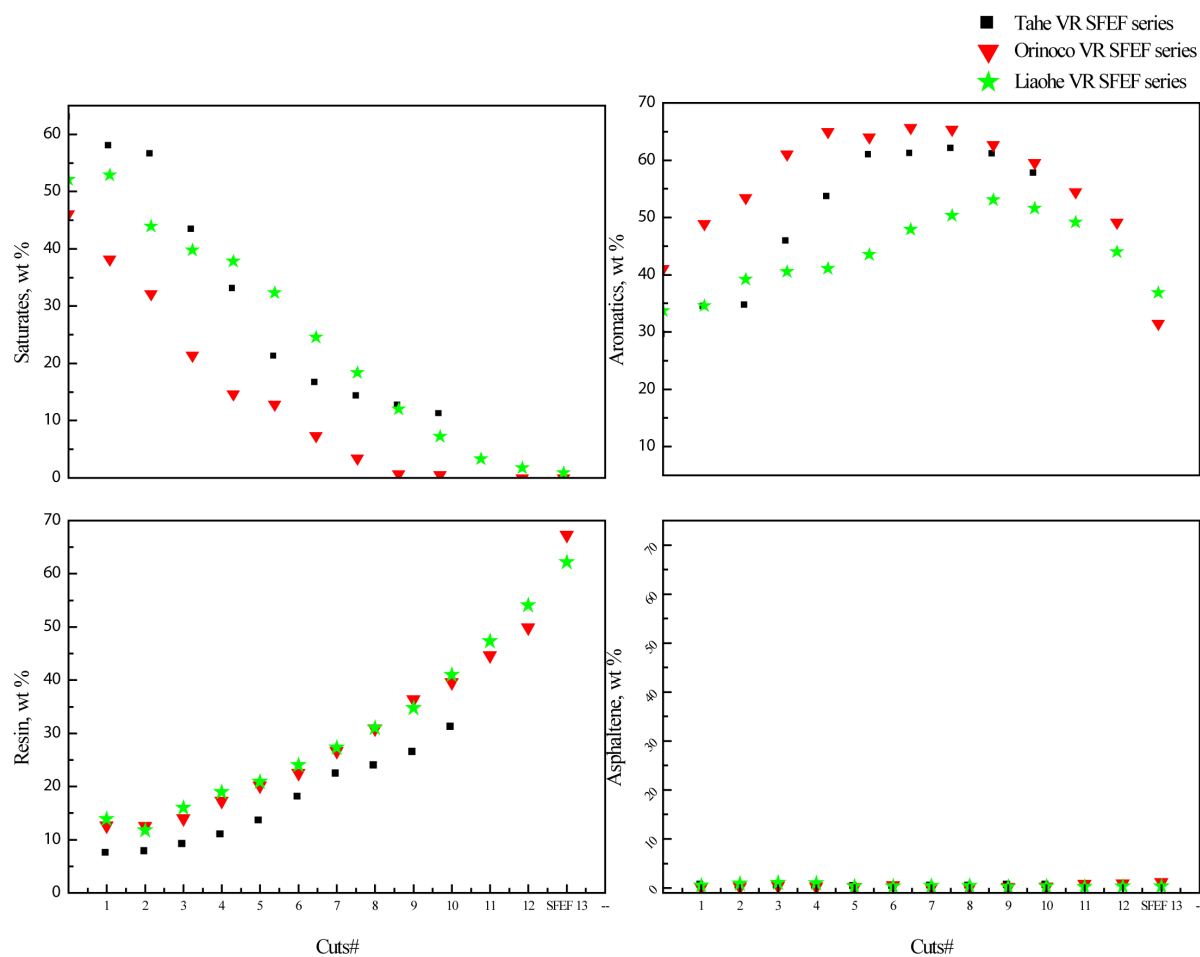


Figure 4. SARA components of Tahe VR, Orinoco VR and Liaohe VR SFEF series
图 4. 三种减渣萃取窄馏分的四组分组成图

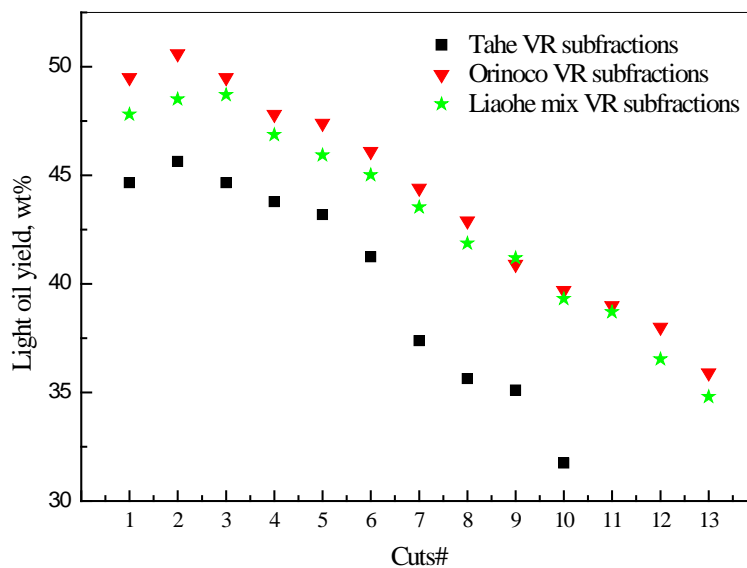


Figure 5. Light oil yield of three VRs subfractions
图 5. 三种减渣萃取窄馏分的焦化轻油收率图

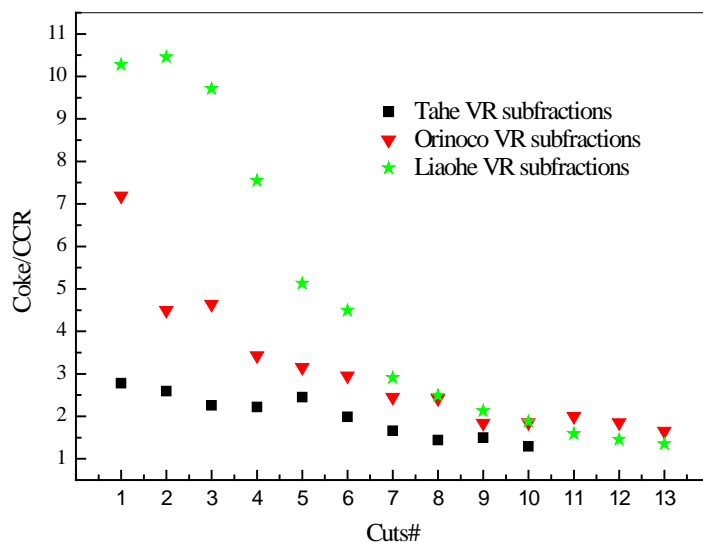


Figure 6. Coke yields per unit CCR for three VRs subfractions

图 6. 三种减渣萃取窄馏分单位残炭值的焦炭收率图

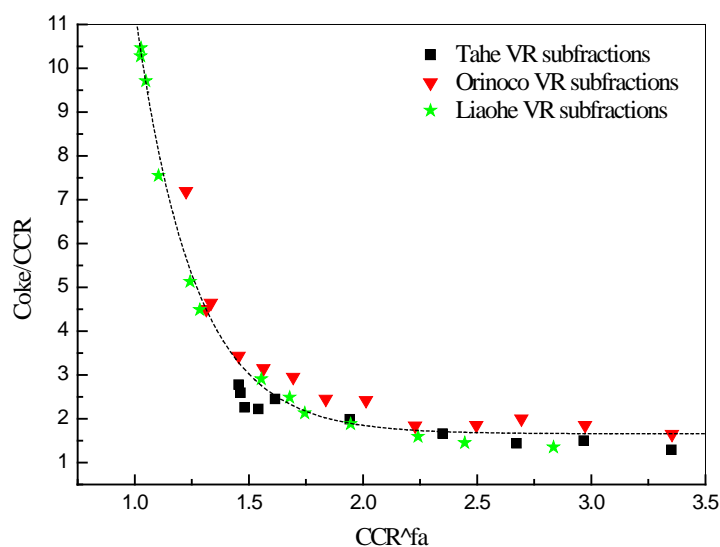


Figure 7. Coke yields per unit CCR as function of CCR^{fa} for SFEF series from three different VR

图 7. 三种减渣萃取窄馏分单位残炭值焦炭收率随 CCR^{fa} 的变化图

关联式的相关系数达到 0.9696, 进一步证明不同渣油窄馏分焦化反应的生焦量不仅与原料的残炭值 CCR 有关, 而且与原料的芳香度有关。

3.3. 结构参数对焦化反应性能的影响

除了 CCR 和 SARA, H/C 原子比也可以用来表示原料的平均化学组成, 因此馏分的裂化性能与 H/C 原子比之间可能存在良好的关联。焦炭及总液收与 H/C 原子比的关系如图 8 所示。

从图中可以看出, H/C 原子比增加, 总液收增大, 而焦炭收率降低。对于不同的窄馏分, 总液收及焦炭收率与 H/C 原子比之间存在线性关系。比较可以看出, 在相同 H/C 原子比条件下, 辽河混合减渣窄馏分的焦炭收率高, 而其总液收低。根据文献[24]可知, 特征化参数 KH 可以很好地表示原料的二次裂化

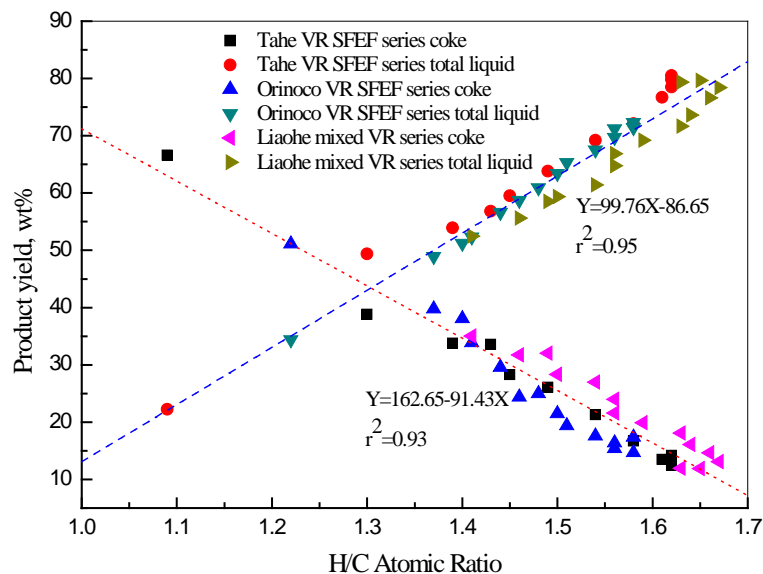


Figure 8. Coking product yield as function of H/C atomic ratio for SFEF series from three different VR

图 8. 三种减渣萃取窄馏分焦炭收率随氢碳原子比的变化图

性能, KH 与窄馏分的二次裂化性能之间一定存在良好的关联性。KH 与焦炭收率及总液收的关系见图 9。

从图中发现, 尽管它们之间存在一定的线性关系, 但仍然存在偏差。因此, 除了 CCR、H/C 原子比和 KH 影响馏分的焦化性能外, 也必须考虑窄馏分的四组分及杂原子含量的影响, 特别是 Ni、V 含量及硫含量的影响。三种减渣窄馏分的 Ni、V 及 S 含量分析影响结果如图 10 所示。

从图中可以看出, 随着窄馏分的变重, 杂原子含量增加, 相同累积收率时, 委内瑞拉减渣窄馏分的 Ni + V 和 S 含量最高。

3.4. 窄馏分四组分及杂原子含量对焦化性能的影响

为了更详细探究产生上述现象的原因, 对焦炭收率与 CCR、四组分含量及金属杂原子含量的关系进行了关联, 得到如下的关系式:

$$\begin{aligned} \text{焦炭收率}\% = & 0.5641 + 0.05251 \times \text{Sat}\% + 0.1518 \times \text{ar}\% + 0.1556 \times \text{re}\% + 0.9969 \times \text{As}\% \\ & + 0.6552 \times \text{CCR}\% + 0.0112 \times \text{Me}\% \end{aligned}$$

方程的相关系数为 0.9738。其中, Sat%、ar%、re% 和 As% 分别代表饱和分、芳香分、胶质及沥青质的质量百分数, CCR% 代表残炭的质量百分数, Me% 代表金属 Ni + V 含量, 以 $\mu\text{g/g}$ 表示。从关联式中可以看出, 饱和分、芳香分、胶质、沥青质、CCR 值及金属含量对生焦量的贡献分别为 5.25%、15.18%、15.56%、99.69%、65.52% 和 1.12%, 可以说明, 沥青质几乎全部转化为焦炭, 65.52% 的残炭转化为焦炭, 芳香分和胶质对生焦量的贡献也是很大的, 超过 15%, 说明焦炭收率不仅仅与 CCR 值有关, 而且与原料的化学组成有关。

图 11 列出了焦炭收率与金属 Ni 与 V 之和及硫含量的关系。

从图中可以看出, 随着 Ni + V 含量的增加, 焦炭收率增加。但在相同 Ni + V 含量的条件下, 委内瑞拉窄馏分的生焦量最低。这可能是因为金属特别是 Ni 的存在, 促进了焦炭的生产, 但较高的硫含量又抑制了生焦, 从而证明了硫的抑制作用。因此, 焦化过程中, 生焦率不仅受 CCR、SARA 的影响, 杂原子的存在也影响原料的焦化性能及产品收率。

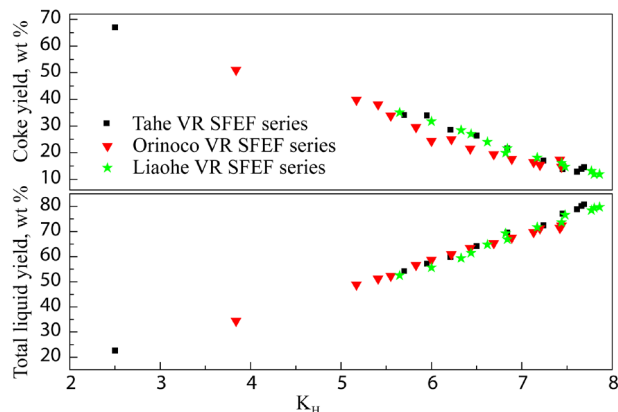


Figure 9. Coke and total liquid yield as function of KH for SFEF series from three different VR

图 9. 三种减渣萃取窄馏分焦炭收率及总液收随 KH 的变化图

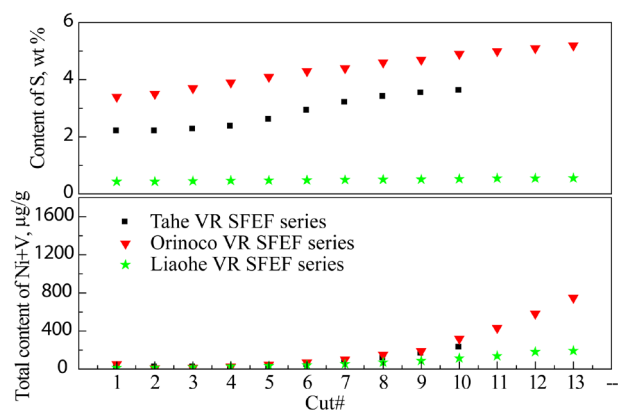


Figure 10. Ni plus V and S content of SFEF subfractions for Tahe VR and Orinoco VR and Liaohe VR

图 10. 三种减渣萃取窄馏分的镍钒之和与硫含量变化图

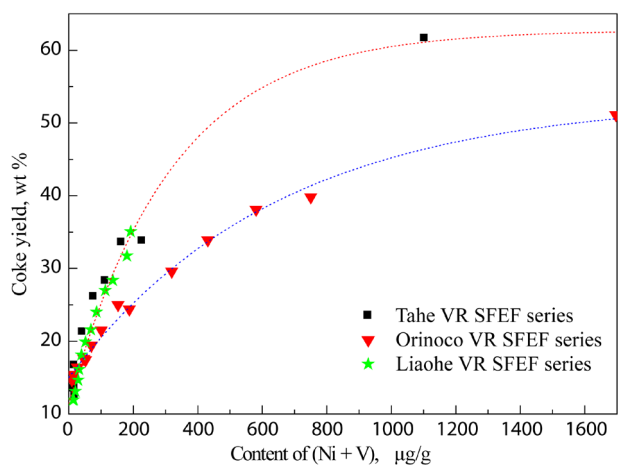


Figure 11. Coking product yield as function of Ni plus V for SFEF series from three different VR

图 11. 三种减渣萃取窄馏分焦炭收率随 Ni 与 V 之和含量的变化图

4. 结论

- 1) 随着窄馏分的变重, 其密度、分子质量及 CCR 值增加, H/C 原子比降低;
- 2) 随着窄馏分变重, 其焦炭收率增加, 轻油收率降低, 焦炭收率与 CCR 值之间的传统线性关系不适用于窄馏分;
- 3) 焦化产品收率与原料的特性因数 K_H 之间存在良好的线性关系, 仅根据原料的 CCR 值预测焦炭收率是不够的, 必须考虑原料的四组分及杂原子对生焦率的影响。
- 4) 焦炭收率不仅仅与 CCR 值有关, 而且与原料的化学组成有关。焦化反应过程中, 沥青质几乎全部转化为焦炭, 65.52%的残炭转化为焦炭, 芳香分和胶质对生焦量的贡献超过 15%。

参考文献

- [1] Sawarkar, A.N., Pandit, A.B., Samant, S.D. and Joshi, J.B. (2007) Petroleum Residue Upgrading via Delayed Coking: A Review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **85**, 1-24. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450850101>
- [2] Gary, J.H. and Handwerk, G.E. (1993) Petroleum Refining: Technology and Economics. 3rd Edition, M. Dekker, New York.
- [3] Maples, R.E. (2000) Petroleum Refinery Process Economics. 2nd Edition, PennWell Corporation, Tulsa OK.
- [4] 陈俊武. 石油炼制过程碳氢组成的变化及其合理利用[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 90-102.
- [5] Schabron, J.F. and Speight, J.G. (1997) An Evaluation of the Delayed-Coking Product Yield of Heavy Feedstocks Using Asphaltene Content and Carbon Residue. *Oil & Gas Science and Technology*, **52**, 73-85. <https://doi.org/10.2516/ogst:1997006>
- [6] Schabron, J.F., Pauli, A.T., Rovani Jr., J.F. and Miknis, F.P. (2001) Predicting Coke Formation Tendencies. *Fuel*, **80**, 1435-1446. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00012-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00012-6)
- [7] Schabron, J.F., Pauli, A.T. and Rovani Jr., J.F. (2002) Residua Coke Formation Predictability Maps. *Fuel*, **81**, 2227-2240. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00153-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00153-9)
- [8] 范启明, 杨继涛, 李军, 等. 减压渣油焦化温度对产品分布的影响 I. 产品分布与适宜焦化温度[J]. 石油学报(石油加工), 2000, 16(5): 61-65.
- [9] 陈俊武, 曹汉昌. 重质油在加工过程中的化学结构变化及其轻质化[J]. 炼油设计, 1994, 24(6): 1-15.
- [10] Gray, M.R. (2003) Consistency of Asphaltene Chemical Structures with Pyrolysis and Coking Behavior. *Energy Fuel*, **17**, 1566-1569. <https://doi.org/10.1021/ef030015t>
- [11] Rahmani, S., McCaffrey, W.C., Dettman, H.D. and Gray, M.R. (2003) Coking Kinetics of Asphaltenes as a Function of Chemical Structure. *Energy Fuels*, **17**, 1048-1056. <https://doi.org/10.1021/ef030007c>
- [12] 郭爱军, 张宏玉, 于道永, 等. 热重法考察渣油及其亚组分的焦化性能[J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(7): 49-53.
- [13] 郭爱军, 王宗贤, 阙国和. 饱和烃促进渣油热反应初期生焦的考察[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(5): 408-412.
- [14] Favre, A., Boulet, R. and Behar, F. (1985) Etude par simulation en laboratoire de l'operation de viscoréduction. *Oil & Gas Science and Technology*, **40**, 609-623.
- [15] Long, R.B. and Speight, J.G. (2006) Studies in Petroleum Composition Development of a Compositional Map for Various Feedstocks études concernant la composition du pétrole. Mise au point d'une carte de types de constituants appliquée à différentes charges. *Oil & Gas Science and Technology*, **44**, 205-217.
- [16] Roberts, I. (1989) The Chemical Significance of Carbon Residue Data. *ACS Division of Petroleum Chemistry*, **34**, 251-254
- [17] Shi, T.P., Hu, Y.X., Xu, Z.M., Su, T. and Wang, R.A. (1997) Characterizing Petroleum Vacuum Residue by Supercritical Fluid Extraction and Fractionation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **36**, 3988-3992. <https://doi.org/10.1021/ie970152b>
- [18] Yang, G. and Wang, R.A. (1999) The Supercritical Fluid Extractive Fractionation and the Characterization of Heavy Oils and Petroleum Residua. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **22**, 47-52. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(98\)00056-4](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(98)00056-4)
- [19] Zhao, S., Sparks, B.D., Kotlyar, L.S. and Chung, K.H. (2002) Reactivity of Sulphur Species in Bitumen Pitch and Residua During Fluid Coking and Hydrocracking. *Petroleum Science and Technology*, **20**, 1071-1085. <https://doi.org/10.1081/LFT-120003698>

- [20] Xu, C., Gao, J., Zhao, S. and Lin, S. (2005) Correlation between Feedstock SARA Components and FCC Product Yields. *Fuel*, **84**, 669-674. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.08.009>
- [21] Yang, C., Du, F., Zheng, H. and Chung, K.H. (2005) Hydroconversion Characteristics and Kinetics of Residue Narrow Fractions. *Fuel*, **84**, 675-684. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.03.018>
- [22] Zhao, S., Xu, C., Sun, X., Chung, K.H. and Xiang, Y. (2010) China Refinery Tests Asphaltenes Extraction Process. *Oil & Gas Journal*, **108**, 52-59.
- [23] 徐春明, 杨朝合. 石油炼制工程[M]. 第4版. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [24] 梁文杰. 重质油化学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2003.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8844, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: hjctet@hanspub.org