



油气处理加工与利用

基于程序驱动的常减压蒸馏-加氢裂化 全流程模拟与分析

杨阳 张桥

西安交通大学化学工程与技术学院

摘要: **目的** 石油作为传统的化石能源,其组成较为复杂,导致很难对炼油过程进行精确控制。在智能制造的要求下,建立合理可靠的炼油过程模型,并对炼油过程中来自上下游的影响进行准确的预测,有助于实现炼油过程的智能调控及优化。**方法** 基于 Aspen HYSYS 软件,依托集成了集总动力学模型的反应器模块,建立从原油到产品的常减压蒸馏-加氢裂化严格模拟流程,并在模拟的基础上探究含氢气体与油品的体积比对反应产物的流量及氢气用量的影响。在此基础上,利用 Matlab 驱动流程模拟的方式,在上游原油配比波动的情况下,获得下游加氢裂化装置产品产量的变化情况。**结果** 模拟结果准确度很高,平均相对误差为 0.41%。当国内原油占比从 20% 提升至 50% 时,柴油产品产量降低了 13.9%,石脑油产品产量提升了 6.1%,总产量降低了 8.7%。**结论** 基于程序驱动 Aspen HYSYS 软件建立的常减压-加氢裂化模型包括了从炼厂原油到产品的完整流程,并能对炼油过程进行分析与调优。该模型有助于智能炼化的实现及传统炼化企业向智能化、数字化方向转型。

关键词: 炼油;常减压蒸馏;加氢裂化;流程模拟;HYSYS

DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.04.001

引用格式: 杨阳,张桥.基于程序驱动的常减压蒸馏-加氢裂化全流程模拟与分析[J].石油与天然气化工,2024,53(4):1-7.

YANG Y, ZHANG Q. Process simulation and analysis of atmospheric and vacuum distillation and hydrocracking based on program driving[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(4): 1-7.

Process simulation and analysis of atmospheric and vacuum distillation and hydrocracking based on program driving

YANG Yang, ZHANG Qiao

School of Chemical Engineering & Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China

Abstract: **Objective** Being a kind of traditional fossil fuel, petroleum has complex compositions, which makes it difficult to accurately control in refineries. Under the requirements of intelligent manufacturing, establishing a reasonable and reliable refining process model and accurately predicting the impact from upstream and downstream during the refining process can help achieve intelligent regulation and optimization of the refining process. **Methods** Based on Aspen HYSYS software and the reactor module integrated with lumped kinetic model, a rigorous simulation process of atmospheric and vacuum distillation-hydrocracking from crude oil to product was established. Based on the simulation, the influence of the volume ratio of hydrogen-containing gas to oil on the reaction products flow rate and the amount of hydrogen was investigated. On this basis, the change of product output of downstream hydrocracking unit was obtained by using Matlab to drive process simulation under the condition of fluctuation of upstream crude oil ratio. **Results** The simulation had high accuracy, with an average relative error of 0.41%. When the proportion of domestic crude oil increased from 20% to 50%, the production of diesel products decreased by 13.9%, the production of naphtha products increased by 6.1%, and total production decreased by 8.7%. **Conclusions** Based on the program-driven Aspen HYSYS, an atmospheric and vacuum distillation and hydrocracking model have been established, which includes the complete process from petroleum to products, and can analyze and optimize refining process. This model contributes to the implementation of intelligent refining and the transformation of traditional refining enterprises towards intelligence and digitization.

Keywords: refinery; atmospheric and vacuum distillation; hydrocracking; process simulation; HYSYS

基金项目: 国家自然科学基金“反应-分离-传递网络递次联动机理与集成方法研究”(21736008)

作者简介: 杨阳, 1996 年生, 博士研究生, 毕业于西安交通大学化学工程与技术专业, 主要从事化工系统工程方面的研究。E-mail: yy9668@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 张桥, 1986 年生, 博士, 教授, 2014 年毕业于西安交通大学, 主要从事化工系统工程方面的研究, 已发表论文 40 余篇。E-mail: qzhang1986@xjtu.edu.cn

石油作为一种传统的化石能源,在人类社会的发展过程中占据重要的地位。到目前为止,石油化工行业仍然是世界上最大的能源消耗行业,约占世界工业总能源消耗量的30%^[1]。在中国,约15%的工业燃料油和10%的工业煤炭用于炼油行业^[2]。随着经济社会的快速发展,我国对原油的需求呈现长期快速增长趋势,进入21世纪以来,尽管需求增速有所下降,但仍保持在相对较高的水平^[3]。

由于原油及其馏分组成的复杂性,对石油炼制过程进行精确的控制及优化成为炼化行业的一大难题,这也是炼化行业高能耗、高污染的重要原因。在国家“双碳”目标的引领下,发展智能制造是石化工业转型升级的主要路径,不仅有助于石化企业全面提高生产效率、改善产品品质和提升经济效益,还可带动众多新技术、新产品及新装备的快速发展,催生新应用、新业态和新模式,推动石化工业实现质量变革、效率变革和动力变革^[4]。此外,由于我国炼油产能过剩,而化工原料需求量大,因此,炼油向化工转型已是大势所趋,如何更加精细、智能地对炼化过程进行分析、控制和优化至关重要。过程模拟技术能够将实际生产过程“再现”于计算机上,实施在线操作和动态调整,是实现智能制造、助力炼油向化工转型的重要途径。金学成等^[5]对柴油加氢精制过程进行了模拟与优化研究,并利用夹点技术对柴油加氢装置换热网络进行了节能分析。刘雪鹏等^[6]采用Symmetry软件对柴油加氢精制反应过程进行了建模,并验证了模型的准确性。Chang等^[7-9]利用Aspen HYSYS软件分别对加氢裂化装置、催化裂化装置和催化重整装置进行了模拟分析。Wang等^[10]利用Aspen HYSYS软件对渣油加氢过程进行了模拟,并验证了模拟的精度。王钧炎等^[11]利用HYSYS软件建立了催化重整过程的稳态模型,为该装置的优化和监控提供了指导。

加氢裂化是石油炼制过程中的一个重要加工过程,在高温、临氢和使用催化剂的条件下,使各种一次加工后的重油发生加氢和裂化反应并转化为燃料气、汽油、喷气燃料和柴油等各种优质清洁燃料和优质石油化工原料^[12-14]。周凌子等^[15]采用Aspen HYSYS软件模拟了加氢裂化反应器,并对该装置中补充氢含量对加氢裂化装置产品气体的流

量及组成的影响进行了分析,得到了其关联模型;熊伟庭^[16]着眼于加氢裂化装置的反应产品,采用流程模拟软件PRO/II对产品分馏塔进行了模拟,并对影响分离情况的操作参数进行了优化;马杰等^[17]利用夹点技术对加氢裂化装置的换热网络进行了分析,降低了过程能耗,实现了节能减排。

炼油过程具有高度复杂性,从原油到产品的过程通常需要经历多个加工单元,上游单元的工艺波动往往会对下游单元的生产情况产生显著的影响。传统的模拟方法局限于单一过程单元,未能全面考虑炼油过程的整体性,导致对生产情况的预测不足。为了解决这一问题,利用Aspen HYSYS软件建立了从原油至产品的整体模拟流程。从原油出发,建立了原油常减压蒸馏单元,得到了包括加氢裂化原料在内的多股中间油品;通过HYSYS内置的依托集总动力学模型的加氢裂化反应器对加氢裂化装置进行了严格的模拟,并探究了加氢裂化装置气相部分含氢气体与油品的体积比(以下简称气油比)的关系。在此基础上,改变原料油进料配比,通过Matlab驱动HYSYS软件进行了大量流程模拟,预测了上下游单元之间的复杂关系,使模拟更贴近实际生产情况,从而可对炼油过程进行更深入的分析,使得模拟结果具有较高的应用价值。

1 流程描述

模拟所用数据均来自国内某炼厂实际生产数据。原料油为某进口原油与国内某原油按4:1的质量比混合得到。进口原油的进料量为762.0 t/h,国内原油的进料量为190.5 t/h。两种原料油的化验数据见表1。全流程模拟共分为常减压模块模拟与加氢裂化模块模拟两部分。工艺流程图如图1所示。

图1中上下虚框内分别为常减压蒸馏流程和加氢裂化流程。原料油换热至125℃后进入电脱盐罐进行脱盐脱水,再换热至185℃进入闪蒸塔进行闪蒸。闪蒸塔塔顶气直接进入常压塔,闪蒸塔塔底油经过换热后进入常压塔闪蒸段进行闪蒸。常压塔共设置3个中段回流以及3条侧线。其中,常一线作为航煤加氢精制原料出装置,常二线与常三线混合,作为柴油加氢精制原料出装置。一部分常底油作为催化重整原料出装置,另一部分进入减压塔。

表 1 原料油化验数据表

原油种类	API 重度	w(硫)/ %	w(氮)/ 10 ⁻⁶	倾点/ ℃	运动黏度/ (mm ² ·s ⁻¹)	馏出温度/℃							
						1%	10%	30%	50%	70%	90%	95%	98%
进口原油	33.5	1.04	1 137	-48.3	9.58	-96.6	97.3	230.9	351.0	470.9	644.5	728.1	942.7
国内原油	34.7	0.13	1 701	13.0	5.07	-93.7	90.4	192.8	272.3	352.7	499.2	577.9	1 145.2

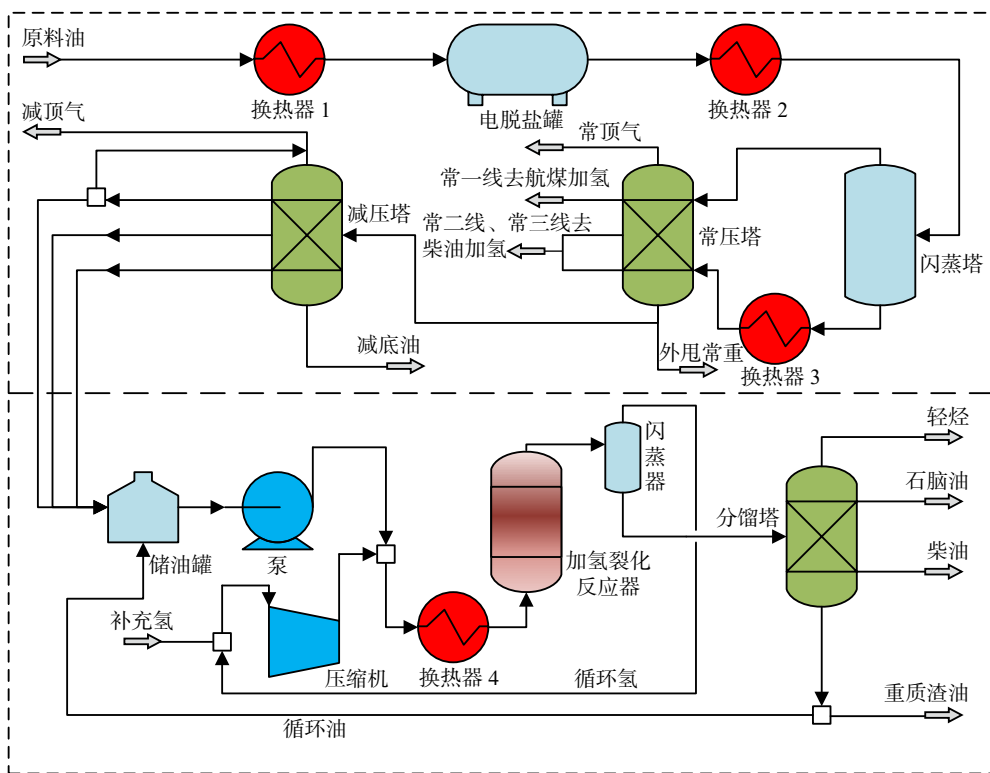


图 1 常减压蒸馏-加氢裂化流程图

减压塔共设置 3 条侧线。其中，减一线部分作为塔顶循环回流，另一部分与减二线和减三线混合，作为加氢裂化原料进入加氢裂化单元。减压塔塔底渣油作为催化重整原料出装置。

来自减压塔的原料与混合氢混合进入换热器，换热达到反应温度后进入加氢裂化反应器，在催化剂的作用下进行反应。反应产物经过分离后，得到的循环氢与补充新氢进行混合，换热后与原料油混合。产品分馏共得到部分轻烃、石脑油馏分和柴油产品。塔底重油一部分作为循环油至储油罐，剩余重质渣油出装置。

2 流程模拟与分析

本研究所有模拟均在 Aspen HYSYS v12.1 软件上实现。常减压蒸馏部分选取的物性包为 Peng-Robinson 方程，加氢裂化部分选取的物性包为

HCRSRK。常减压部分的精馏塔均选取严格的精馏模型，加氢裂化反应部分采用了 Aspen HYSYS 软件内置的集成了集总动力学模型的加氢裂化反应器。

模拟得到的常减压蒸馏结果见表 2。与生产情况对比发现，所有产品的温度、压力均处于合理范围内。常压塔塔底油分为两部分，一部分进入减压塔，另一部分外甩(简称外甩常重)。根据减压塔进出口物料衡算，进入减压塔的油品总流量为 297.5 t/h，外甩流量为 214.9 t/h。结果显示：常压塔塔底总流量占原料油总流量的 53.7%，而其中进入减压塔流量占塔底油总流量的 58.1%。常减压蒸馏后原油的产品分布如图 2 所示。各种油品的生产误差情况见表 3。由表 3 可知，常减压蒸馏模拟得到的结果与实际生产情况的结果十分吻合，平均相对误差仅为 0.41%，这一结果说明了模拟的准确性。

减压塔一、二、三线混合蜡油进入加氢裂化单

表 2 常减压蒸馏物料平衡表

项目	温度/℃	压力/kPa	流量/(t·h ⁻¹)
入方			
闪蒸塔塔顶气	185.8	300.0	81.0
闪蒸塔塔底油	358.0	251.3	872.5
汽提蒸汽	150.0	350.0	15.0
出方			
常顶气	60.5	181.3	5.0
常顶油	60.5	181.3	137.1
常一线(航煤加氢原料)	214.1	208.5	117.6
常二线	218.3	228.9	78.1
常三线	285.1	245.9	102.7
外甩常重	354.1	401.3	214.9
减顶气	16.9	2.0	0.1
减顶油	16.9	2.0	1.6
减一线	159.6	5.6	27.7
减二线	227.3	9.2	52.5
减三线	298.0	14.6	63.7
减底油至催化裂化	363.5	20.0	151.9
常压塔废水	60.5	181.3	10.5
减压塔废水	16.9	2.0	5.1

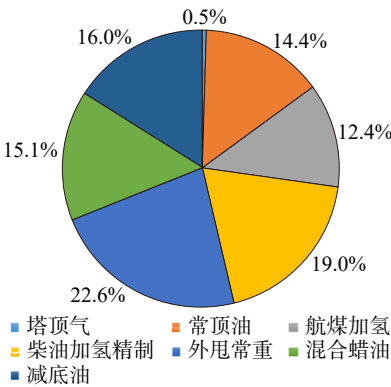


图 2 常减压蒸馏产品分布图

表 3 模拟结果与实际生产情况对比

项目	实际流量/(t·h ⁻¹)	模拟流量/(t·h ⁻¹)	相对误差/%
常顶石脑油	138.78	137.10	1.21
常一航煤加氢原料	117.59	117.60	0.01
混合柴油(常二、常三混合原油)	182.37	180.80	0.86
外甩常重	214.29	214.90	0.28
混合蜡油	143.87	143.90	0.02
减底油	152.00	151.90	0.07

元, 作为加氢裂化单元的原料。原料油流量由模拟得到。补充氢纯度(y)为 95%, 反应过程的气油比为 500。反应产物主要包括轻烃、石脑油、柴油及部分重质渣油。加氢裂化部分选用 Aspen HYSYS 内置动力学模型的加氢裂化反应器模块, 该模块包含 97 种组分和 177 个反应方程。其中, 97 种组分又分为 24 个动力学集总, 其集总动力学反应网络见图 3。各个集总的详细描述以及加氢裂化反应后的产品组成见表 4, 其中, 集总及其所包含组分的描述参照 HYSYS 用户手册中相关章节的描述^[18]。

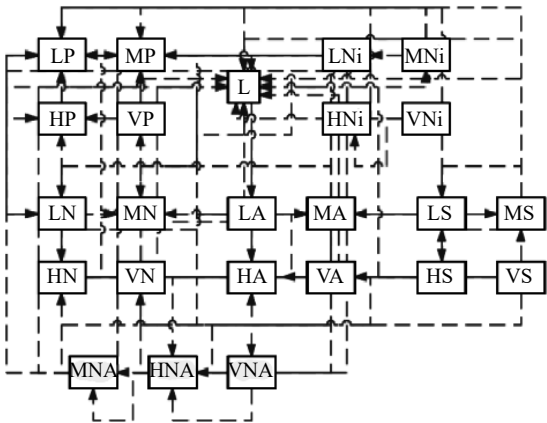


图 3 集总动力学反应网络

加氢裂化的产品数据见表 5。由表 5 可知, 柴油馏分是加氢裂化产品中最重要的一部分, 占总产品比例的 62.4%。加氢裂化反应主要包括了脱硫脱氮以及大分子断链和开环变成小分子的反应, 这些反应过程需要氢气的参与。因此, 油气比是影响加氢裂化装置反应结果的重要影响因素。

在模拟的基础上, 选取油气比作为变量, 对加氢裂化单元进行了灵敏度分析, 考查了油气比在 400~800 的范围内变化时, 各产品流量的变化情况, 见图 4。图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)分别为加氢裂化产品流量与油气比的关系, 图 4(d)为补充氢及循环氢流量与油气比的关系。由图 4 可知, 提高油气比有利于提升产品流量, 其中: 石脑油产品产量的绝对增速最快, 当油气比从 400 提升至 800 时, 石脑油产品流量增加 3.3 t/h。石脑油产品与轻烃的流量增长情况较为稳定, 柴油产品的流量增长趋势先较快后逐渐变缓。这是由于在加氢炼化过程中, 氢气的增加更有利于大分子断链, 从而生成更多的轻质组分。油气比的增大主要是由于循环氢的流量增加,

表 4 反应集总详细描述及产物组成

集总	描述	组分	摩尔分数/%
L	轻组分	N ₂ 、NH ₃ 、H ₂ S、H ₂ 、C ₁ 、C ₂ 、C ₃ 、C ₄ 、C ₅	4.25
LP	轻质蜡油	C6P、C7P、C8P、C9P、C10P	5.34
MP	中质蜡油	C14P、C18P	10.17
HP	重质蜡油	C26P	26.04
VP	减压渣油	C47P	0.05
LN	轻质环烷烃	C6N、C7N、C8N、C9N、C10N	0.87
MN	中质环烷烃	MN1Lo、MN2Lo、MN3Lo、MN1Hi、MN2Hi、MN3Hi	8.85
HN	重质环烷烃	HN1、HN2、HN3、HN4	29.35
VN	减压环烷烃	VN1、VN2、VN3、VN4	1.83
LA	轻质芳烃	C6A、C7A、C8A、C9A、C10A	1.77
MA	中质芳烃	MA1Lo、MA2Lo、MA1Hi、MA2Hi	0.67
HA	重质芳烃	HA1、HA2、HA3、HA4	0.44
VA	减压芳烃	VA1、VA2、VA3、VA4	0.02
LS	轻质硫化物	LThA、LTh、LS8	0
MS	中质硫化物	MThN、MThA、MS12、MThAN、MThA2	0
HS	重质硫化物	HThAN、HS28、HThA2	0
VS	减压硫化物	VThA2N、VThA3	0
LNi	轻质氮化物	LBNit、LNNit	0
MNi	中质氮化物	MBNitN、MBNitA、MNNitA	0
HNi	重质氮化物	HBNitAN、HBNitA2、HNNitA2	0
VNi	减压氮化物	VNNitA3、VBNitA2N	0
MNA	中质芳香烃	MANLo、MAN2Lo、MA2NLo、MANALo、MANHi、MAN2Hi、MA2NHi、MANAHi	1.88
HNA	重质芳香烃	HAN、HAN2、HAN3、HA2N、HANA、HA2N2	8.44
VNA	真空芳香烃	VAN、VAN2、VAN3、VA2N、VANA、VA2N2	0.03

表 5 加氢裂化产品数据表

产品	温度/ ℃	压力/ kPa	流量/(t·h ⁻¹)	馏出温度/℃							
				1%	10%	30%	50%	70%	90%	95%	98%
轻烃	38.0	1 000.0	3.2								
石脑油馏分	307.3	1 000.0	14.6	34.4	117.1	202.9	225.1	262.7	278.3	281.7	285.5
柴油馏分	498.1	1 000.0	90.8	252.3	313.2	371.0	374.8	378.5	393.1	396.9	403.5
塔底渣油	562.9	1 000.0	36.8	366.4	400.7	411.4	414.5	417.6	438.6	575.5	593.8

补充氢的消耗量有所增加，但并不显著。

通过以上研究发现，加氢裂化过程的塔底渣油流量较大，严重影响了产品的收率。为了尽可能提高产品收率，通过调整加氢裂化过程的循环量降低塔底渣油的流量，使得产品收率得到提升。优化后的石脑油产量可以从 14.6 t/h 提升至 36.2 t/h，柴油馏分的产量可以从 90.8 t/h 提升至 102.1 t/h。相比于

优化前，产品总产量提升 31.2%。

值得注意的是，本炼厂的原料油是进口原油和国内原油的混合原油，其中，对进口原油的依赖度较高，其进料占比为 80%。进口原油的供应量受到多种因素的影响，要保证长期稳定大量的供应面临很大的挑战。因此，当其供应量产生波动时，就需要增加国内原油的供应量，以保证装置的稳定运行。

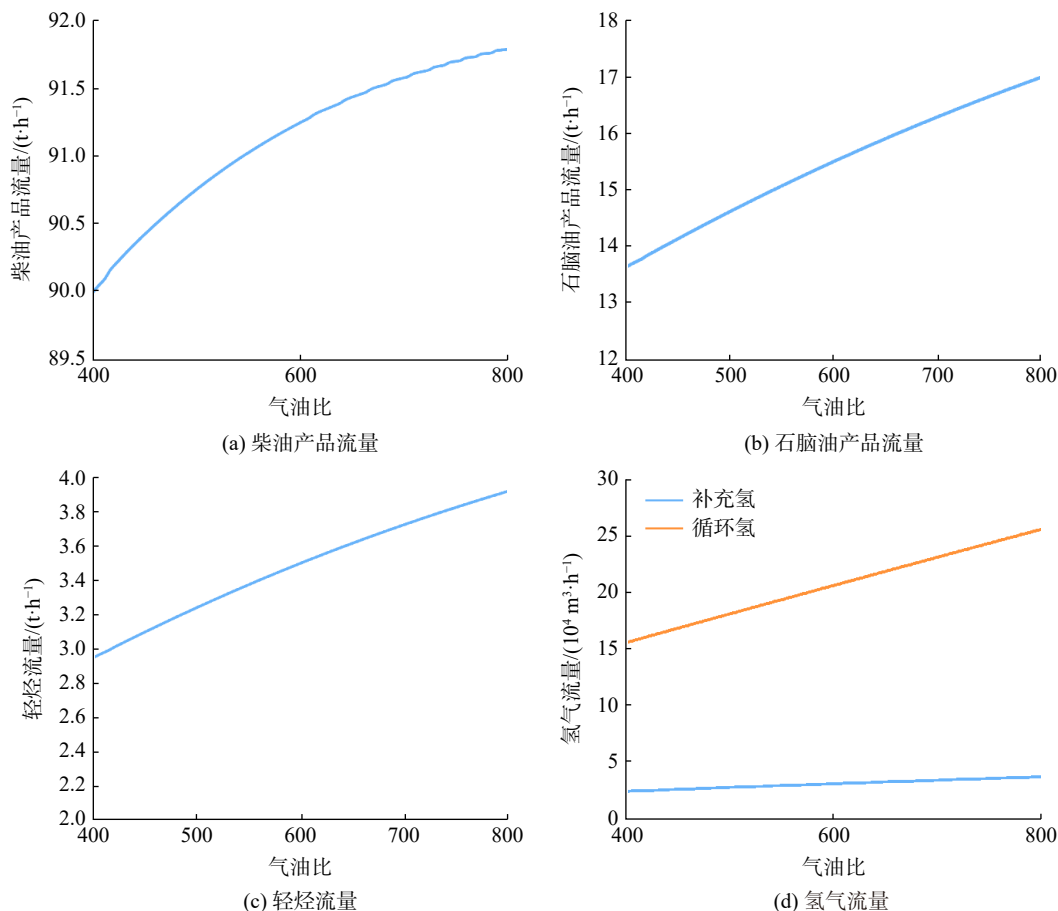


图4 灵敏度分析

然而,油品品质波动会对下游生产单元造成较大的影响。由于炼油过程的高度复杂性,这样的影响很难通过理论分析直接预测。为了探究原油进料组成波动对下游单元生产情况的影响,以加氢裂化单元为例,通过 Matlab 驱动 HYSYS 软件,依托流程模拟技术得到不同情况下的模拟结果,从而得到在不同的进料配比情况下产品产量的变化情况。

原料油的总进料量与实际生产流程保持一致,固定为 $952.5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 。国内原油的初始用量为 $190.5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,设置增量为 $7.2 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,相应的进口原油用量依次减少,直至国内原油用量超过进口原油,依次设置了 41 组案例,按国内原油用量从少到多的顺序进行编号。最终的结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,随着国内原油进料量的增加,柴油馏分的产量整体呈下降趋势,而石脑油馏分的产量整体略有提升。这与不同原油的品质具有较大的关系。当国内原油的进料占比从 20% 提升至 30% 时,柴油馏分产量降低 4.4%,石脑油馏分产量提升 3.6%,总产量降低 2.3%;当国内原油进料占比

提升至 40% 时,柴油馏分产量降低 8.6%,石脑油馏分产量提升 5.7%,总产量降低 4.8%;而当国内原油进料占比达到 50% 时,柴油馏分产量降低 13.9%,

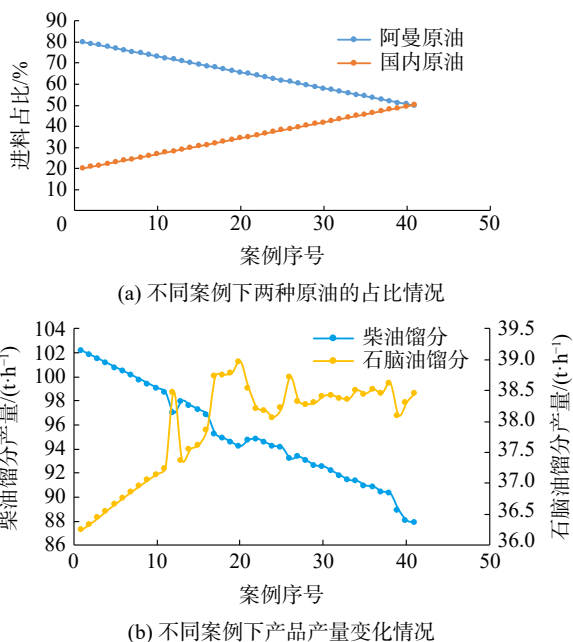


图5 产品产量与原油组成的关系

石脑油馏分产量提升 6.1%，总产量降低 8.7%。这些数据展示了原油组成的改变对于产品产量影响情况的定量结果，对于炼厂生产规划与调控具有重要的意义。由于原油的成分复杂，从原油至产品的过程又经历了多个转化单元，因此，产品的产量情况并不是一条稳定的直线，在部分情况下会产生一定的波动，这是其受到多个单元、多种操作条件影响的结果，也证明了炼厂整体建模的必要性。因此，从整体出发探究各个单元的操作条件变化对炼厂整体生产情况的影响是十分必要的。

3 结语

采用 Aspen HYSYS 软件实现了炼厂从原油经常减压装置至加氢裂化装置的全流程模拟，并对加氢裂化装置气油比与氢气消耗及产品产量之间的关系进行了探究。模拟得到了完整的常减压产品分布和严格的分离结果。加氢裂化单元利用集成了集总反应动力学的反应器模型得到加氢裂化装置的原料及产品分布，研究表明，提升气油比可提高多种产品的收率，但也会增加新氢循环量。在此基础上，还通过程序驱动 HYSYS 软件进行模拟，考查了原料油品的进料情况波动对加氢裂化装置产品产量的影响情况。结果表明，当国内原油进料占比从 20% 提升至 50% 时，柴油产品产量降低 13.9%，石脑油产品产量提升 6.1%，总产量降低 8.7%。这一结果证明了炼厂上游的波动会对下游产生显著的影响，也证明了建立完整炼厂模型进行优化的必要性。

本研究建立的常减压-加氢裂化模型包括了炼厂原油至产品的完整流程，并能够基于完整的流程模拟对炼化过程进行分析与调优，有助于实现炼化过程的智能化调控与优化，助力传统炼化企业向智能化、数字化转型。

参考文献

- [1] SAYGIN D, PATEL M K, WORRELL E, et al. Potential of best practice technology to improve energy efficiency in the global chemical and petrochemical sector[J]. *Energy*, 2011, 36(9): 5779-5790.
- [2] LIU X Y, CHEN D J, ZHANG W J, et al. An assessment of the energy-saving potential in China's petroleum refining industry from a technical perspective[J]. *Energy*,

2013, 59: 38-49.

- [3] 经济网. 2022 年石油行业研究报告 [EB/OL]. (2022-06-24) [2023-11-02]. <http://www.21jingji.com/article/20220624/herald/7e7b2eb535bcae6635fe5c7fb2df2b3e.html>.
- [4] 王子宗, 高立兵, 索寒生. 未来石化智能工厂顶层设计: 现状、对比及展望[J]. *化工进展*, 2022, 41(7): 3387-3401.
- [5] 金学成, 项曙光. 柴油加氢装置过程模拟与节能研究[J]. *当代化工*, 2017, 46(12): 2538-2542.
- [6] 刘雪鹏, 吴盛文, 邓春, 等. 柴油加氢精制过程反应-分离系统建模和模拟[J]. *化学反应工程与工艺*, 2021, 37(6): 548-554.
- [7] CHANG A F, LIU Y A. Predictive modeling of large-scale integrated refinery reaction and fractionation systems from plant data. Part 1: hydrocracking processes[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(11): 5264-5297.
- [8] PASHIKANTI K, LIU Y A. Predictive modeling of large-scale integrated refinery reaction and fractionation systems from plant data. Part 2: fluid catalytic cracking (FCC) process[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(11): 5298-5319.
- [9] PASHIKANTI K, LIU Y A. Predictive modeling of large-scale integrated refinery reaction and fractionation systems from plant data. Part 3: continuous catalyst regeneration (CCR) reforming process[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(11): 5320-5344.
- [10] WANG Y L, SHANG D D, YUAN X F, et al. Modeling and simulation of reaction and fractionation systems for the industrial residue hydrotreating process[J]. *Processes*, 2019, 8(1): 32.
- [11] 王钧炎, 黄德先. 基于 HYSYS 的催化重整流程模拟及其应用[J]. *计算机与应用化学*, 2007, 24(10): 1302-1306.
- [12] 孙守华. 大型炼化一体化项目炼油加工方案的优化研究[J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(2): 15-19.
- [13] 张超, 方友, 金海刚, 等. 加氢裂化装置生产工业白油的技术开发与工业应用[J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(2): 25-30.
- [14] 范思强, 王仲义, 曹正凯, 等. 直馏蜡油掺炼劣质原料全循环加氢裂化工艺研究[J]. *石油与天然气化工*, 2021, 50(5): 17-22.
- [15] 周凌子, 邓春, 冯霄. 加氢裂化装置氢源氢阱关联模型[J]. *计算机与应用化学*, 2017, 34(1): 69-74.
- [16] 熊伟庭. 加氢裂化装置产品分馏过程模拟及优化[J]. *广东石油化工学院学报*, 2023, 33(1): 18-23.
- [17] 马杰, 马云雷. 加氢裂化装置的能量回收及利用[J]. *石化技术与应用*, 2023, 41(1): 32-36.
- [18] ASPENTech. Aspen HYSYS user guide [EB/OL]. (2011-05-23) [2024-04-18]. <http://www.aspentech.com>.