

2套不同FCC汽油脱硫装置的工艺对比分析

孙守华*

(中化泉州石化有限公司,福建泉州362103)

摘要:明确国内某炼厂以CDTECH为代表的选择性加氢脱硫工艺和以S Zorb为代表的吸附脱硫工艺在2套催化裂化汽油脱硫装置应用过程中的优劣。从工艺原理及流程、原料及产品性质、物料平衡、能耗及技术经济性等方面进行了对比分析,明确2种催化裂化汽油脱硫工艺的适应性。通过对比分析可知,CDTECH工艺流程充分考虑催化裂化汽油中硫化物及烯烃的分布特点,催化蒸馏技术具有较高转化率及选择性的优势,但存在流程复杂、产品收率略低、能耗高等不利影响。基于催化蒸馏技术的高效能优势,CDTECH工艺的汽油产品品质(低烯烃、高醚化物)、辛烷值损失及利润均较S Zorb工艺优,具有较好的应用性。

关键词:催化裂化汽油;选择性加氢脱硫;吸附脱硫;工艺;技术经济分析

中图分类号:TE626.2;TE624.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)04-0251-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.04.043

Comparison of two FCC gasoline desulfurization units on process technology

SUN Shou-hua*

(Sinochem Quanzhou Petrochemical Co., Ltd., Quanzhou 362103, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of CDTECH as a representative of selective hydrodesulfurization process and S Zorb as a representative of adsorptive desulfurization process in the application process of FCC gasoline desulfurization units are clarified. The adaptability of these two FCC gasoline desulfurization processes is clarified through comparing the process principle and flow, the properties of feedstocks and products, material consumption, energy consumption and technical economy. Through comparative analysis, it can be concluded that CDTECH process flow fully considers the distribution characteristics of sulfides and olefins in FCC gasoline, and the catalytic distillation in the process has higher conversion and selectivity advantages, which also suffers adverse effects such as complex process, slightly low products yield and high energy consumption. Based on the advantages of high efficiency of catalytic distillation technology, CDTECH process is better than S Zorb process in gasoline product quality (containing less olefins but more etherates), octane number loss and profits, exhibiting better applicability.

Key words: FCC gasoline; selective hydrodesulfurization; adsorptive desulfurization; process; techno-economic analysis

近年来,随着人们对于化石燃料的需求和环保法规的日益严格,对于油品,特别是车用汽油中的质量指标要求也越来越严格。根据GB 17930—2016《车用汽油》标准要求,自2023年1月1日开始,执行国VI(A)汽油标准。从车用汽油质量标准情况看,从国V汽油标准开始,汽油产品的硫均为10 mg/kg,而烯烃体积分数大幅度降低,由国V汽油标准的24%降至国VI(A)汽油标准的18%。

为了满足企业生产低烯烃、低硫汽油产品的需求,国内外相继开发、完善辛烷值损失小的汽油脱硫工艺,其中以RSDS-III^[1]、OCT-ME^[2]、CDTECH^[3]、Prime-G⁺^[4]为代表的选择性加氢脱硫工艺,以及以S Zorb工艺^[5]及YD-CADS工艺^[6]为代表的吸附脱硫工艺均达到先进水平,工业效果良好。本文中选

取CDTECH技术与S Zorb技术为研究对象,对比分析了2种技术在国内炼厂相近规模A、B 2套FCC汽油脱硫装置的工业应用情况。

1 2套装置的生产工艺对比

1.1 A装置

A装置采用CDTECH技术,技术核心是根据FCC汽油中烯烃及硫化物分布特点(随着切割点温度的增加,汽油中烯烃的含量逐渐减少,硫含量逐渐增加),将FCC汽油切割成轻汽油、重汽油,其中轻汽油进行醚化、重汽油进行加氢脱硫,两者均采用催化蒸馏技术。A装置工艺流程主要包括选择性加氢单元^[7]、轻汽油醚化单元^[8]以及重汽油脱硫单元^[9]等,流程如图1所示:FCC汽油经选择性加氢反应器

收稿日期:2024-07-01;修回日期:2025-01-26

作者简介:孙守华(1984-),男,硕士,高级工程师,主要从事炼化企业总流程规划及工艺技术管理工作,通讯联系人,sunshouhua@sinochem.com。

预处理后,经轻重汽油分馏塔切割成轻汽油与重汽油,其中轻汽油经三段醚化后,得到高辛烷值的醚化轻汽油;而重汽油经两段加氢脱硫反应后,得到超低硫的脱硫重汽油。

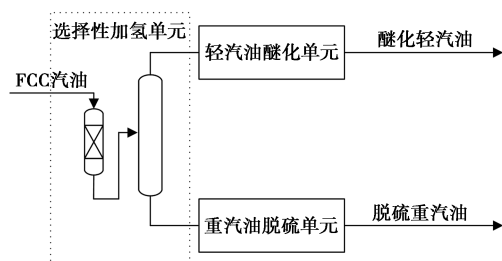


图 1 A 装置流程示意简图

1.2 B 装置

B 装置采用 S Zorb 技术,技术核心基于吸附作用原理对 FCC 汽油进行脱硫,即在吸附剂中 Ni 的催化作用下,FCC 汽油中硫化物和氢气反应生成硫化氢,硫化氢迅速被吸附剂中的氧化锌捕获存储在吸附剂上,达到了吸附强化脱硫的效果^[10]。B 装置工艺流程主要包括进料与脱硫反应、吸附剂再生、吸附剂循环和产品稳定等部分,流程如图 2 所示:FCC 汽油在流化床反应器,与吸附剂发生吸附脱硫反应,其中吸附了硫原子的吸附剂连续地输送到再生器中进行再生,而再生后吸附剂送往反应器;脱硫后的油气经分离后进入稳定系统,脱硫汽油从稳定塔塔底送出装置。

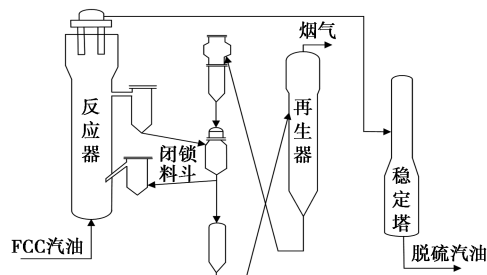


图 2 B 装置流程示意简图

2 2 套装置的工业应用对比

2.1 原料性质

A 装置及 B 装置的 FCC 汽油原料均为采用 MIP-CGP 技术的重油催化裂化装置稳定汽油,主要性质见表 1。A 装置 FCC 汽油原料的硫质量分数及烯烃体积分数分别为 101 mg/kg、20.35%;而 B 装置 FCC 汽油原料的硫含量及烯烃体积分数分别为 148 mg/kg、18.10%。2 套装置 FCC 汽油原料的密度基本一致。

表 1 原料性质

项目	A 装置	B 装置
进料量/(t·h ⁻¹)	190	190
w(硫)/(mg·kg ⁻¹)	101	148
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	735.2	735.1
馏程/℃		
初馏点	33.5	35.0
10%	43.9	46.5
50%	84.9	88.5
90%	169.7	178.1
终馏点	199.7	204.9
芳烃(体积分数)/%	28.47	26.9
烯烃(体积分数)/%	20.35	18.10
饱和烃(体积分数)/%	51.18	54.9
研究法辛烷值(RON)	93.3	92.9

2.2 产品性质

按照国 VI(A) 标准汽油调和配方,FCC 汽油产品占调和汽油产品总量的 60%~65%,此时 FCC 汽油产品中硫含量、烯烃体积分数的内控指标分别约为 12 mg/kg、20%。结合 A 装置及 B 装置的 FCC 汽油原料性质情况,2 套装置主要任务是:在低烯烃饱和情况下(尽可能减少汽油辛烷值损失),脱除 FCC 汽油中硫化物(A 装置的轻汽油中硫醇与二烯烃反应生成重质硫醚,重汽油中重质硫醚、噻吩及少量苯并噻吩通过加氢反应脱除;B 装置通过吸附剂选择性地吸附含硫化合物中的硫原子而达到脱硫)。

A 装置及 B 装置 FCC 汽油中间产品及汽油产品的主要指标见表 2。由表 2 可以看出,A 装置及 B 装置催化汽油产品的硫含量分别为 10.5、10.7 mg/kg,均满足企业汽油调和需要。

表 2 产品性质

项目	A 装置		B 装置			
	轻汽油	醚化轻汽油	重汽油	汽油产品	汽油产品	
w(硫)/(mg·kg ⁻¹)	19.7		189.0	2.9	10.5	10.7
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	655.9		735.1	816.4		737.47
馏程/℃						
初馏点	32.2		94.6	95.1		35.08
10%	35.7		112.4	112.9		48.48
50%	43.6		140.4	141.1		90.44
90%	66.6		184.1	184.1		178.96
终馏点	89.2		204.7	204.6		205.64

项目	续表					
	A 装置		B 装置			
	轻汽油	醚化 轻汽油	重汽油 脱硫 重汽油	汽油 产品	汽油 产品	
$v(\text{烯烃})/\%$			10.8	9.4	14.68	
$v(\text{异戊烯})/\%$	12.89	1.40				
$w(\text{TAME})/\%$		16.31				
RON			93.0	92.2	93.2	92.2
RON 损失					0.1	0.7

2套装置脱硫前后烯烃含量变化的原因如下。

A装置降低FCC汽油的烯烃含量主要通过轻汽油醚化和重汽油加氢脱硫的副反应2个途径实现,其中轻汽油中质量分数约12%的活性烯烃与低附加值的甲醇反应生成高附加值的甲基仲丁基醚(TAME),提升汽油产品辛烷值;重汽油在加氢脱硫过程中,单烯烃与氢气在催化剂作用下,转化成烷烃。实际生产过程中,A装置根据汽油产品硫含量,动态调整轻汽油抽出率,重汽油一段、二段加氢脱硫深度,避免汽油辛烷值损失。B装置降低催化汽油的烯烃含量主要措施就是通过调整反应温度及氢油比来促进烯烃加氢饱和反应,但烯烃加氢饱和生成烷烃越多,汽油辛烷值损失越大,因此B装置在要求的烯烃含量和期望的辛烷值损失中寻找平衡。

A装置重汽油脱硫单元辛烷值损失约0.8个单位,与B装置辛烷值损失(约0.7个单位)相当;但A装置总辛烷值损失约0.1个单位,明显低于B装置辛烷值损失,这是因为A公司轻汽油中烯烃与甲醇反应生成TAME,其质量分数高达16.31%,进而提升汽油产品辛烷值。

2.3 物料平衡

表3列出了A、B2套装置的物料平衡数据。由表3的原料构成可以看出,A装置氢耗略低于B装置,这是因为A装置:①轻重汽油分馏塔尾气中氢气含量较高,通过实施技改项目,将轻重汽油分馏塔大部分尾气返回至选择加氢反应器,循环使用;②重汽油采用催化蒸馏加氢脱硫,可使重汽油中轻组分、重组分在合适条件下处理,选择性地促进脱硫反应而抑制烯烃饱和反应^[11],同时原料中硫含量较低,加氢脱硫深度低,进而装置实际氢耗偏低。

由表3产品分布可知,A装置汽油产品收率约为98.77%,较B装置汽油产品收率低约0.6%,这是因为:①FCC汽油原料初馏点较低,实际操作中,轻重汽油分馏塔尾气收率较大;②循环氢压缩机采

表3 物料平衡(质量分数)

项目	A 装置	B 装置
FCC 汽油	96.95	99.84
氢气	0.12	0.16
甲醇	2.93	
合计	100.00	100.00
汽油产品	98.77	99.45
废气+损失	1.23	0.54
合计	100.00	100.00

用对称平衡型往复式,两列两缸两级压缩,自装置开工至今,循环氢压缩机级间分液罐一直带液严重,进而污油收率过高^[9];③重汽油在加氢脱硫过程,少量轻烃发生加氢裂化反应。而B装置为降低汽油产品辛烷值损失,在确保汽油产品饱和蒸气压合格基础上,尽可能降低干气排放量。

2.4 能耗

与A装置相比,B装置采用全馏程一次通过工艺,不需要对组分进行分割,大幅度减少分馏塔部分的能耗。A装置及B装置的能耗见表4。从表4可以看出,B装置实际能耗仅为258.49 MJ/t,明显低于A装置的1087.64 MJ/t。

表4 装置能耗

项目	A 装置	B 装置
电力	122.89	65.31
燃料气	361.99	109.69
3.5 MPa 蒸气	473.18	
1.0 MPa 蒸气	90.71	82.9
0.45 MPa 蒸气	187.68	
循环水	19.23	10.05
除氧水	31.77	0.17
除盐水	16.30	
净化风	4.18	2.93
氮气	0	31.82
热量输出	-220.29	-44.38
合计	1087.64	258.49

A、B2套装置的能耗主要体现在电力、燃料气以及蒸气等消耗上。电力消耗主要用于动设备的电力消耗,由于A装置流程较B装置复杂,相应动设备较多,进而电力消耗增加。A公司燃料气量较大,这是因为A装置加热炉为加氢脱硫塔、硫化氢汽提塔及汽油稳定塔共用的重沸炉,燃料气消耗较大;B

装置加热炉仅为进料加热炉,且进加热炉前,进料已经过换热,一定程度上降低了加热炉负荷。A 装置蒸气主要用于馏分分离,其中 3.5 MPa 蒸气为轻重汽油分馏塔提供热源,用于轻汽油与重汽油的分离;1.0 MPa 蒸气为醚化分馏塔提供热源,用于醚化汽油与甲醇及 C₅ 馏分的分离;0.4 MPa 蒸气为甲醇回收塔提供热源,用于甲醇和水的分离。B 装置 1.0 MPa 蒸气为汽油稳定塔提供热源,蒸气消耗较低。另外,对于 B 装置的氮气消耗,由于 FCC 汽油硫含量较低,实际再生烧焦风量较低,为确保再生器内吸附剂正常流化吸附剂粉尘顺利带出,通过补充氮气的方式提高线速,进而增加了氮气消耗。

3 2 套装置的技术经济性对比分析

FCC 汽油脱硫装置加工路线选择决定企业生产清洁汽油的投入和成本,进而影响和同业竞争实力。借鉴汽油吸附脱硫装置的技术经济特性分析^[12],从装置原料成本、化工三剂、燃料动力、加工成本、产品收入等角度对比分析 2 套装置的技术经济性,主要指标见表 5。其中主要产品价格采用 2020—2022 年市场均价;公用工程价格采用公司生产成本;化工三剂等参考市场价格;催化裂化汽油与汽油产品差价按 200 元/t 计^[12];辛烷值增益 78 元/t。

表 5 技术经济指标对比 元/t

项目	A 装置	B 装置
原料成本	基准	基准-86.12
化工三剂	基准	基准-0.85
燃料动力	基准	基准-23.86
加工成本 ^①	基准	基准-23.63
产品收入	基准	基准-134.15
利润	基准	基准-24.40

注:考虑固定成本。

由表 5 可以看出,A 装置加工成本明显高于 B 装置,主要是由于①A 装置燃料动力消耗较高;②A 装置采用进口催化剂,催化剂采购成本较高。目前,A 装置催化剂已实现国产化,一次性采购成本大幅度降低。A 装置产品收入低于 B 装置产品收入,但 A 装置利润高于 B 装置利润,这是因为:A 装置产品收率略低于 B 装置产品收率,但 A 装置轻汽油醚化单元可将活性烯烃与甲醇反应转化醚化物,不仅将低附加值甲醇转化为高附加值汽油,同时可提高汽油产品的辛烷值,经济效益增加。

4 结论

综上,在工业应用过程中,2 种 FCC 汽油脱硫工艺均能满足企业汽油调和需要,但在实际运行过程中各有优缺点。

(1) CDTECH 工艺的技术核心是根据 FCC 汽油中烯烃及硫化物分布特点将 FCC 汽油切割成轻、重汽油,然后分别进行三段醚化、两段脱硫处理;S Zorb 工艺的技术核心基于吸附作用原理对汽油进行脱硫。

(2) CDTECH 工艺的关键操作轻、重汽油切割,重汽油一段、二段脱硫深度;S Zorb 工艺的关键操作调整反应温度及氢油比,控制烯烃加氢饱和副反应。

(3) 与 CDTECH 工艺比,S Zorb 工艺采用全馏程一次通过工艺,不需要对组分进行分割,大幅度减少分馏塔部分的能耗,进而装置能耗较低。

(4) 与 S Zorb 工艺比,CDTECH 工艺基于催化蒸馏技术的高效能优势,汽油产品的品质优、辛烷值损失小及利润高,具有较好的应用性方法。

参考文献

- [1] 高晓冬,张登前,李明丰,等.满足国 V 汽油标准的 RSDS-III 技术的开发及应用[J].石油学报:石油加工,2015,31(2):482-486.
- [2] 赵乐平,关明华,刘继华,等.OCT-ME 催化裂化汽油超深度加氢脱硫技术的开发[J].石油炼制与化工,2012,43(8):13-16.
- [3] 杜三旺,刘文凤.选择性加氢及醚化工艺处理催化汽油的应用[J].炼油技术与工程,2015,45(2):43-46.
- [4] Delphine Largeteau, Jay Ross, Marc Laborde, et al. The challenges & opportunities of 10 ppm sulfur gasoline (A): "2011 NPRA annual meeting" [C]. San Antonio, Texas: AM, 2011.
- [5] 王军强,阚宝训,蒋红斌.S Zorb 装置生产国 V 汽油的实践[J].炼油技术与工程,2015,45(4):1-4.
- [6] 王军峰,陈兵,罗万明,等.YD-CADS 汽油超深度催化吸附脱硫技术中试研究[J].工业催化,2014,22(10):801-803.
- [7] 张强,周洪涛,孙守华,等.FCC 汽油选择性加氢脱硫单元产品辛烷值的影响因素分析[J].炼油技术与工程,2014,44(10):46-49.
- [8] 张强,孟祥东,孙守华,等.Amberlyst35 树脂催化剂在催化裂化轻汽油醚化装置的工业应用[J].石油炼制与化工,2015,46(1):28-33.
- [9] 孙守华,孟祥东,宋寿康,等.催化蒸馏技术在催化裂化重汽油加氢脱硫装置中的应用[J].石油炼制与化工,2015,46(5):48-52.
- [10] 龙军,林伟,代振宇.从反应化学原理到工业应用 I.S Zorb 技术特点及优势[J].石油学报:石油加工,2015,31(1):1-6.
- [11] 张星,孙方宪,尹恩杰,等.CDHydro/CDHDS FCC 汽油选择性加氢脱硫工艺设计[J].炼油技术与工程,2010,40(1):6-9.
- [12] 赵文忠,孙丽丽,吴德飞,等.汽油吸附脱硫装置技术经济特性分析[J].石油炼制与化工,2020,51(10):118-122. ■