

不同蒸汽裂解原料评价及混合裂解研究

廖思航¹, 单书峰¹, 李平², 曾兴业^{1*}, 吴世逵¹

(1. 广东石油化工学院化学工程学院, 广东 茂名 525000;
2. 中国石油股份有限公司茂名分公司, 广东 茂名 525000)

摘要:对丙烷和丁烷进行模拟裂解;对典型的石脑油、煤油和柴油原料进行裂解评价,对比分析原料物性对裂解产物分布的影响;最后在石脑油中掺杂10 wt%和20 wt%柴油进行共裂解评价。结果表明,轻质原料裂解性能优于重质原料,轻烃原料混合裂解时异构烷烃含量不宜过高,正构烷烃含量高的石脑油原料和芳烃指数(BMCI)小,链烷烃含量越高的煤油和柴油原料裂解性能较好,石脑油中加入少量柴油混合裂解对高附加值产物收率影响较小。

关键词:蒸汽裂解;轻质烯烃;共裂解;裂解原料;高附加值产物

中图分类号:TQ221.21

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S1-0185-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.034

Evaluation of different steam cracking feedstocks and study on mixed feedstocks cracking

LIAO Si-hang¹, SHAN Shu-feng¹, LI Ping², ZENG Xing-ye^{1*}, WU Shi-kui¹

(1. Faculty of Chemical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;
2. Sinopec Maoming Petrochemical Company, Maoming 525000, China)

Abstract: Steam cracking is the most mature process for the production of light olefins, which is the core of the modern petrochemical industry. In this work, the cracking of propane and butane is simulated. Typical cracking feedstocks such as naphtha, kerosene, and diesel fuel are evaluated, and the influences of feedstocks physical properties on the distribution of the cracking products are comparatively analyzed. Co-cracking of naphtha blended with 10 wt. % and 20 wt. % of diesel fuel respectively is evaluated. Study results show that the cracking performance of light feedstocks is better than that of heavy feedstocks. The content of isomeric alkanes in light hydrocarbon feedstocks should not be too high in mixed cracking. Naphtha feedstocks with high content of n-alkanes, and kerosene and diesel feedstocks with small BMCI and higher chain alkane content exhibit better cracking performance. When a small amount of diesel fuel is added into naphtha for cracking, the yield of high value-added products is affected slightly.

Key words: steam cracking; light olefins; co-pyrolysis; feedstocks for cracking; high value-added products

近年来,随着全球经济增长及化工品消费需求激增,以乙烯、丙烯、丁二烯、环戊二烯为主的轻质烯烃的需求快速增长,生产轻质烯烃的主要工艺是蒸汽裂解^[1-3],目前大规模工业投产的蒸汽裂解传统原料有轻烃、石脑油、煤油、柴油、芳烃抽余油和加氢尾油等^[4]。有研究表明,裂解原料对轻质烯烃收率的影响较大^[5],优质裂解原料短缺问题开始显现,国内外学者开始寻找新的裂解原料,如废塑料热解油^[6-9]、植物油^[10-11]和费托合成副产重质蜡油^[12]等,或开发原料预处理技术,以提高轻质烯烃收率^[13-16]。

蒸汽裂解原料评价可以筛选出高附加值产物(氢气、乙烯、丙烯、1,3-丁二烯和苯)收率较高的原料^[17],研究操作参数和混合裂解^[18-21]对收率的影响,也可评估新原料的裂解性能,为工业放大生产提

供产品收率预测。本工作对炼厂典型裂解原料进行裂解性能评价,研究原料性质对裂解产物分布的影响,最后对石脑油和柴油进行共裂解性能评价。评价指标包括:①产物收率:以裂解单位原料为基准表示某产物的质量收率;②三烯收率:乙烯、丙烯和1,3-丁二烯质量收率;③双苯收率:苯和甲苯质量收率;④高附加值产物收率:氢气、乙烯、丙烯、丁二烯和苯质量收率;⑤裂解深度:丙烯、乙烯质量收率之比(P/E)。

1 实验部分

1.1 实验装置及方法

实验原料为丙烷、正丁烷、异丁烷、石脑油、煤油和柴油,来自于茂名石化公司。实验前先对原料物性进行分析,按照 GB/T 611—2021 测定密度、GB/T

收稿日期:2024-02-04;修回日期:2024-06-27

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515110729,2021A1515010278);青年创新人才项目(2018KQNCX158);广东石油化工学院博士启动项目(2020bs002);茂名绿色化工研究院“扬帆计划”2022年度科技创新项目(MMGCIIRI-2022YFJH-Y-052)

作者简介:廖思航(2000-),男,硕士生,研究方向为乙烯裂解原料评价,liaosihang2019@163.com;曾兴业(1982-),男,博士,正高级实验师,研究方向为油品清洁化利用与乙烯裂解原料评价,通讯联系人,zengxingye@gdpuet.edu.cn。

6536—2010 测定恩氏馏程、SH/T 0714—2002 测定族组成(PONA),芳烃指数(BMCI)和特性因数K通过以上数据计算。乙烯原料裂解试验装置来自广东石油化工学院,裂解炉为SRT-II炉管。蒸汽裂解试验装置流程如图1所示,分为进料系统、裂解反应系统和冷却高分系统。

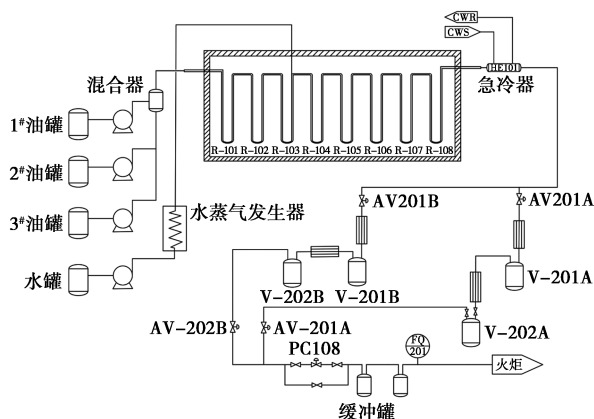


图1 蒸汽裂解试验装置流程图

实验前先通入氮气检查气密性,然后设置炉管与水蒸气发生器程序升温,调节油泵和水泵流量至设定值,产品在废液罐(V-201B、V-202B)收集,放出产品罐(V-201A、V-202A)残余液。待流量和炉管温度稳定时开始实验,裂解汽油在V-201A收集,轻馏分在V-202A深冷液化后收集,无法冷凝的裂解气通过产品罐,然后进行碱洗,经湿气流量计记录流量后去火炬。裂解气使用集气袋收集,一次取样3L,实验结束切换至废液罐,收集产品罐液相产物并油水分离。

1.2 分析方法

裂解原料使用安捷伦7890B型气相色谱仪分析PONA值,使用TS-5000硫测定仪测定原料中总硫含量。气相产物使用安捷伦7890B型气相色谱仪分析,采用5阀8柱系统,备有1个FID和2个TCD检测器,FID检测苯、甲苯和C₆以下烃类产物含量,1个TCD检测CO、CO₂和N₂,另1个TCD检测氢气,去除N₂归一化,取平均值为结果。液相产物蒸馏切割出小于180℃的馏分,使用安捷伦7890B型气相色谱仪分析苯和甲苯含量。

1.3 裂解模拟

裂解模拟软件COILSIM-CRAFT由华东理工大学与比利时根特大学联合开发,用于模拟乙烯原料裂解,该软件备有原料物性数据库,输入原料的物性数据,利用神经网络和最大熵原理将原料重构为虚拟组分。反应部分包含两个自由基反应网络,整个

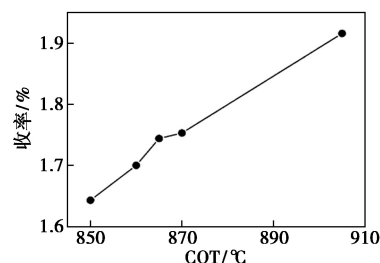
反应网络包含700种不同的分子和基团,最后规定出口条件计算产物分布,本文使用COILSIM-CRAFT在茂名石化公司HB102B轻烃炉上模拟计算丙烷和丁烷裂解,HB102B为6程变径管,几何结构为4-2-1-1-1-1。

2 结果与讨论

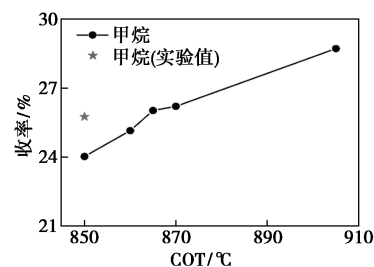
2.1 轻烃原料

烃类热裂解反应按自由基机理进行,最早由Rice和Korsakoff提出^[22],至今广受认同。烃类热裂解反应可分为链引发、链传递、链终止3个阶段,其中链引发是速率控制步骤,链传递是生成轻质烯烃的主要步骤,链终止受限于自由基浓度,较少发生。使用COILSIM-CRAFT软件对丙烷进行模拟裂解,模拟条件:水油质量比(W/O)为0.5,出口压力(COP)为0.8 atm,进料流量1 050 kg/h。使用实验装置对丙烷在出口温度(COT)为850℃时进行实验,实验条件:水油质量比(W/O)为0.5,出口压力(COP)为70 kPa,COT为850℃,进料压力6 MPa。

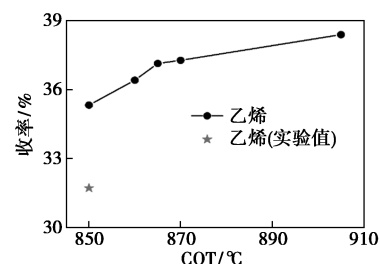
丙烷裂解COT与产物收率关系如图2所示。



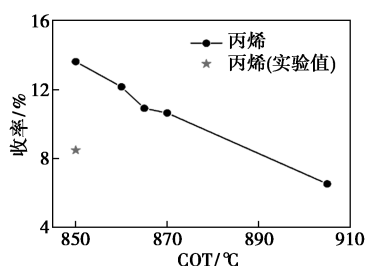
(a) 氢气



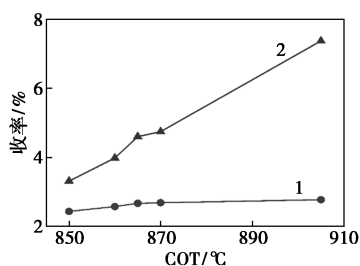
(b) 甲烷



(c) 乙烯

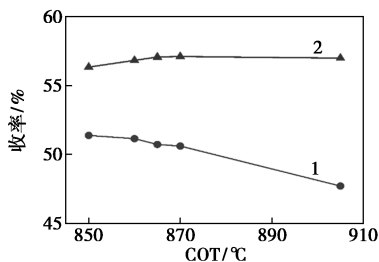


(d) 丙烯



1—1,3-丁二烯;2—苯

(e) 1,3-丁二烯和苯



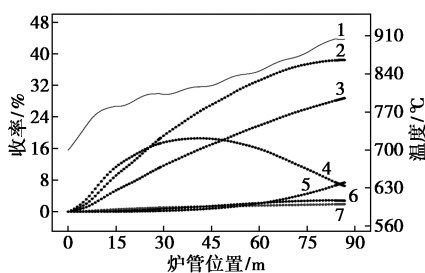
1—乙烯、丙烯、1,3-丁二烯;2—高附加值产物

(f) 乙烯、丙烯、1,3-丁二烯和高附加值产物

图2 丙烷裂解出口温度(COT)与不同产物收率的关系

可见,随着COT的升高,丙烷裂解甲烷、乙烯、1,3-丁二烯和苯收率快速升高,氢气收率缓慢升高,丙烯和三烯收率下降,高附加值产物收率在COT为870°C时有最大值。乙烯和丙烯实验值比模拟值低,甲烷实验值比模拟值高,因为模拟用的工业炉管更利于生成乙烯、丙烯^[23-24]。

在COT为905°C时,丙烷裂解炉管内壁温度与产物沿炉管分布如图3所示。



1—炉管内壁温度;2—乙烯;3—甲烷;4—丙烯;5—苯;

6—1,3-丁二烯;7—氢气

图3 丙烷裂解炉管内壁温度与产物沿炉管分布

可以发现,裂解炉管温度较低时生成大量丙烯,最高可达18.58%,在裂解炉管中后段丙烯含量大幅度降低,在炉管出口段附近苯收率迅速增加。从自由基机理分析^[25],丙烷裂解链传递阶段位于中央的仲碳比两端的伯碳更容易被进攻,体系中 $2\text{-C}_3\text{H}_7\cdot$ 浓度较高,丙烯主要由 $2\text{-C}_3\text{H}_7\cdot$ 自由基生成,而乙烯主要由 $\text{C}_2\text{H}_5\cdot$ 和 $1\text{-C}_3\text{H}_7\cdot$ 自由基生成,因此在反应初期丙烯收率比乙烯高。炉管温度较高时,丙烯发生二次裂解或发生二次反应生成苯^[26],因此在反应中后期丙烯收率大幅度降低。丙烷单独裂解横跨温度和出口温度较高,易在裂解炉管出口附近生成大量双苯而增加结焦量,缩短炉管运行周期。因此,茂名石化公司轻烃炉采用液化石油气混合进料,COT在850°C左右。

对正丁烷、异丁烷进行裂解评价,实验条件:W/O为0.55、COP为70 kPa,正丁烷COT为830°C,异丁烷COT为845°C。实验结果如图4所示,与异丁烷裂解相比,正丁烷裂解乙烯收率高9.27%,丙烯收率高2.57%,三烯收率高11.53%。实验表明,正丁烷裂解生成较多乙烯和丙烯,异丁烷裂解生成较多甲烷,正丁烷裂解性能优于异丁烷。

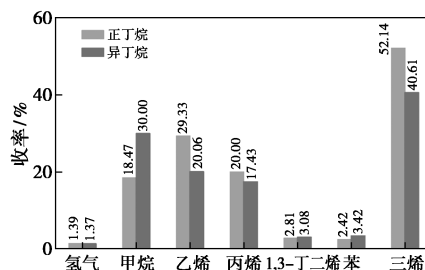


图4 正丁烷与异丁烷裂解产物收率

使用COILSIM-CRAFT软件模拟正丁烷与异丁烷在COT为850°C时混合裂解过程,结果如表1所示

表1 正丁烷与异丁烷混合裂解产物收率表

实验编号	1	2	3	4	5
正丁烷含量/wt%	50	60	70	80	90
异丁烷含量/wt%	50	40	30	20	10
产物收率/wt%					
H ₂	1.20	1.18	1.16	1.14	1.12
C ₂ H ₄	24.21	26.74	29.27	31.81	34.47
C ₃ H ₆	15.53	15.06	14.63	14.24	13.75
1,3-C ₄ H ₆	2.27	2.41	2.54	2.68	2.84
苯和甲苯	8.12	7.62	7.10	6.52	5.98
三烯	42.02	44.21	46.44	48.74	51.06
高附加值产物	49.18	51.15	53.11	55.06	57.04
裂解深度/(P/E)	0.64147	0.56320	0.49983	0.44766	0.39890
正丁烷单程转化率	0.97732	0.97603	0.97437	0.97208	0.97021

示,随着正丁烷质量分数的增加,乙烯、丁二烯、三烯和高附加值产物收率增加,甲烷、丙烯、苯和三苯收率下降。此外,随着体系中异丁烷质量分数的增加,正丁烷单程转化率和裂解深度也随之增加,说明正丁烷与异丁烷混合裂解时,异丁烷可以促进正丁烷裂解。

从自由基机理分析^[27],正丁烷裂解链引发可生成 $1-C_3H_7\cdot$ 和 $C_2H_5\cdot$ 自由基,这两种自由基可以直接生成乙烯,而异丁烷链引发只生成 $2-C_3H_7\cdot$ 自由基,缺少生成乙烯的途径,正丁烷与异丁烷混合裂解降低了反应体系中 $1-C_3H_7\cdot$ 和 $C_2H_5\cdot$ 自由基的浓度。此外,异丁烷裂解时反应体系中积累较多 $CH_3\cdot$ 自由基,大部分 $CH_3\cdot$ 通过链传递转化为甲烷,少部分通过烯烃加成生成丙烯。在轻烃原料裂解时,由于异构烷烃的异构化结构,小分子异构烷烃裂解期间更容易断裂分支生成氢气、甲烷,而正构烷烃更容易生成乙烯。

2.2 石脑油原料

石脑油原料是裂解用量最多的液态原料,用于裂解的石脑油馏程通常为 $40\sim 180^\circ\text{C}$ 之间。茂名石化公司提供 4 种石脑油原料:R040 为二号轻烃回收稳定汽油,R041 为二重整轻石脑油,R042 为三柴油加氢石脑油,R043 为二加裂轻石脑油。在 COP 为 70 kPa 、COT 为 835°C 、W/O 为 0.5 时进行裂解评价。

石脑油中正构烷烃含量与烯烃收率关系如图 5 所示。

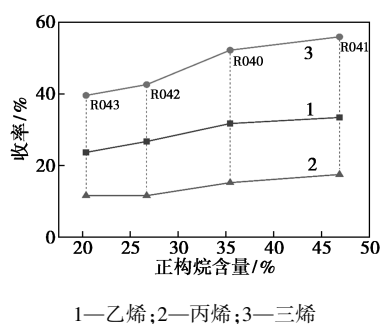


图 5 石脑油中正构烷烃含量与烯烃收率的关系

随着石脑油中正构烷烃含量的增加,裂解产物乙烯、丙烯和三烯收率也逐渐增加,说明正构烷烃含量较高的原料轻质烯烃收率高,其中 R041 石脑油裂解三烯收率最高,是较优质的裂解原料。因此,可以通过提高原料中正构烷烃的含量以增产三烯。

石脑油裂解深度与芳烃含量关系如图 6 所示。

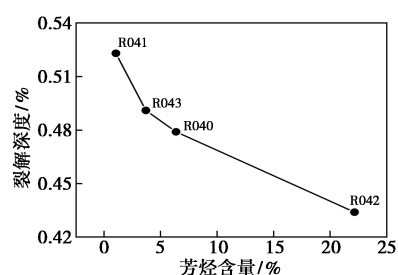


图 6 石脑油裂解深度与芳烃含量的关系

芳烃含量高的原料裂解深度较低,说明较少芳烃裂解为轻质烯烃,更多芳烃转化为液相产物,芳烃可能发生侧链断链、开环、缩合、生焦反应,在高温下缩合与生焦反应活性较高。炉管结焦动力学研究表明^[28-29], 600°C 左右时焦炭主要由 Diels-Alder 型反应生成,而在 700°C 以上,焦炭主要由芳烃缩聚反应生成,从提高轻质烯烃收率和延长炉管运行周期角度考虑,裂解原料中芳烃含量不宜过高。此外,石脑油中的环烷烃需要开环后才能继续裂解生成轻质烯烃,裂解反应活化能比链烷烃高^[30],且由于苯环结构稳定, C_6 及以上环烷烃易脱氢生成芳烃。因此,裂解原料中环烷烃和芳烃含量都不宜过高,环烷烃和芳烃含量高的原料适合用作催化重整原料。

2.3 煤油和柴油原料

R023 和 R025 为原油常减压装置常一线煤油,裂解实验条件设定 COT 为 790°C 、W/O 为 0.55、COP 为 70 kPa 。R028 为二号加裂柴油样品,R029 和 R030 分别为四号常减压装置常一线和常二线直馏柴油,裂解实验条件设定 COT 为 820°C 、W/O 为 0.6、COP 为 70 kPa 。煤油和柴油采用的 COT 比石脑油低,但 W/O 略有提高。

原料 BMCI 值与高附加值产物收率关系如图 7 所示,原料链烷烃含量与三烯收率关系如图 8 所示。

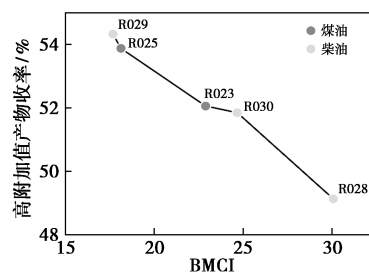


图 7 原料 BMCI 值与高附加值产物收率的关系

重质原料 BMCI 值越小高附加值产物收率越高,链烷烃含量越高三烯收率越高,说明重质原料中链烷烃组分有利于生成轻质烯烃,芳烃组分不利于生成轻质烯烃,重质原料应优先选择 BMCI 较小和

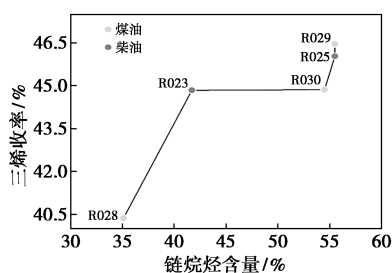


图 8 原料链烷烃含量与三烯收率的关系

链烷烃含量较高的用于蒸汽裂解。此外,煤油和柴油裂解三烯和高附加值产物收率远低于石脑油,说明轻质液态原料裂解性能优于重质液态原料,液态裂解原料应优先选择石脑油,其次为煤油和柴油。

2.4 石脑油与柴油混合裂解

近年来实验室评价了大量乙烯原料裂解性能,通过汇总分析后发现,高附加值产物收率:石脑油>煤油>柴油和加裂尾油,裂解温度:石脑油>煤油>柴油和加裂尾油。近期有学者在裂解体系中加入少量自由基引发剂,如联苳和超支化聚酰胺等^[31-32],在横跨温度(起始裂解温度)以下时自由基引发剂进行链引发反应产生自由基,产生的自由基进攻难裂解原料发生夺氢反应使其跳过链引发阶段,从而降低横跨温度。有研究表明,重质原料与轻质原料混合裂解时,重质原料对轻质原料裂解也有促进作用^[20,33]。

不同种类的原料混合裂解时存在共裂解效应,表现为裂解产物收率、操作条件等发生变化,操作条件差异较大的原料混合进料裂解炉运行不稳定^[34],因此,本工作在 R027 石脑油中掺杂 10 wt% 与 20 wt% 的 R028 柴油混合裂解,实验条件: COP 为 70 kPa, COT 为 830℃, W/O 为 0.6。石脑油与柴油混合裂解评价结果见图 9。

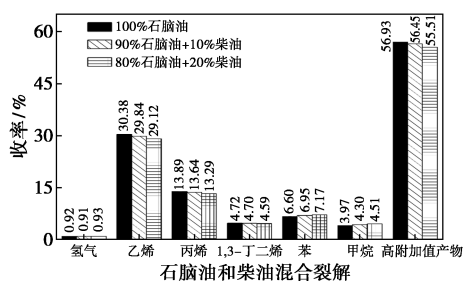


图 9 石脑油与柴油混合裂解产物收率

R027 石脑油中掺杂 10 wt% 和 20 wt% 的 R028 柴油进行裂解,使乙烯收率分别降低 1.04% 和 1.26%,苯收率提高 0.35% 和 0.57%,甲苯收率提高 0.33% 和 0.54%,高附加值产物收率分别降低

0.48% 和 1.42%。实验表明,在石脑油中掺杂部分重质油作为裂解原料,使乙烯收率明显降低,双苯收率明显提高,丙烯、1,3-丁二烯和氢气收率变化较小,高附加值产物收率随着柴油掺入量的增加而逐渐降低,且降低幅度较小。

此外,与石脑油单独裂解相比,混合裂解时裂解气收率较低,裂解油收率较高,说明原料重质化会增产裂解汽油,降低裂解气产量。值得注意的是,石脑油中掺杂部分重质油进行裂解存在两方面缺点,其一是轻质烯烃收率的降低导致经济效益降低,其二是双苯收率的提高,会增大炉管的结焦量,缩短运行周期。需要结合炉管周期调度研究结果优化混合裂解过程。

3 结论

通过对丙烷、正丁烷和异丁烷进行模拟裂解,对 4 种石脑油、6 种重质原料以及石脑油与柴油混合裂解评价,对比分析不同原料对产物分布的影响,可以得出以下结论:

(1) 小分子异构烷烃裂解生成较多氢气和甲烷,因此轻烃原料混合进料时异构烷烃含量不宜过高;石脑油裂解原料优先选择正构烷烃含量高、环烷烃和芳烃含量低的种类;柴油和煤油裂解原料优先选择 BCI 值小、链烷烃含量高的种类。

(2) 轻质原料裂解产物分布优于重质原料,裂解原料应优先选择轻质原料,液态裂解原料优先选择轻石脑油,其次为煤油和柴油。

(3) 液态原料中芳烃组分易生焦导致炉管运行周期缩短,且芳烃组分较少发生裂解,因此,原料中芳烃含量不宜过高,芳烃含量高的重质原料裂解前可以进行脱芳预处理。

(4) 石脑油与柴油混合裂解主要影响三烯和双苯收率,且随着柴油掺入量的增加,三烯收率降低、双苯收率增加,且对高附加值产物影响较小。未设置重质原料裂解炉的企业,在石脑油原料缺乏时可以考虑掺杂重质油进行混合裂解,但需要考虑炉管结焦量的增加。

参考文献

- [1] Gholami Z, Gholami F, Tišler Z, et al. A review on the production of light olefins using steam cracking of hydrocarbons [J]. *Energies*, 2021, 14(23): 8190.
- [2] Ye Z, Han X, Hu G, et al. Comparative life cycle environmental, energetic, and economic assessment of three hydrocarbon-based ethylene production routes [J]. *Fuel*, 2023, 333: 126359.

- [3] Zhao Z, Chong K, Jiang J, *et al.* Low-carbon roadmap of chemical production: A case study of ethylene in China [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 580–591.
- [4] 孔令健, 龚朝兵. 基于分子层级的石脑油优化利用及经济性分析[J]. *中外能源*, 2022, 27(2): 65–72.
- [5] 许江, 程亮亮, 田亮, 等. 乙烯原料裂解产物收率的影响因素分析[J]. *现代化工*, 2014, 34(12): 131–134.
- [6] 王璐璐, 王吉林. 混合废塑料裂解油作乙烯生产原料的可行性分析[J]. *石化技术与应用*, 2014, 32(1): 17–21.
- [7] Forero-Franco R, Cañete-Vela I, Berdugo-Vilches T, *et al.* Correlations between product distribution and feedstock composition in thermal cracking processes for mixed plastic waste [J]. *Fuel*, 2023, 341: 127660.
- [8] Kusenberg M, Zayoud A, Roosen M, *et al.* A comprehensive experimental investigation of plastic waste pyrolysis oil quality and its dependence on the plastic waste composition [J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 227: 107090.
- [9] Kusenberg M, Eschenbacher A, Djokic M R, *et al.* Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks: To decontaminate or not to decontaminate? [J]. *Waste Management*, 2022, 138: 83–115.
- [10] Karaba A, Patera J, Ruskayova P D, *et al.* Experimental evaluation of hydrotreated vegetable oils as novel feedstocks for steam-cracking process [J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1504.
- [11] Zámostný P, Bělohlav Z, Šmidrkal J. Production of olefins via steam cracking of vegetable oils [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 59: 47–51.
- [12] Karaba A, Rozhon J, Patera J, *et al.* Fischer-tropsch wax from renewable resources as an excellent feedstock for the steam-cracking process [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2021, 44(2): 329–338.
- [13] Karimzadeh R, Ghashghaee M, Nouri M. Effect of solvent dearomatization and operating conditions in steam pyrolysis of a heavy feedstock [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(3): 1899–1907.
- [14] 朱宏林, 郭岩锋. 直馏柴油预处理及其蒸汽裂解性能优化研究 [J]. *石油炼制与化工*, 2023, 54(4): 48–53.
- [15] 何琨, 王宇石, 王江义. 油品抽提脱芳烃优化乙烯裂解原料的研究 [J]. *化工设计*, 2022, 32(4): 3–6, 50, 1.
- [16] 郭莹, 杨晓红, 田勇, 等. 裂解原料芳烃抽提预处理技术的研究 [J]. *石油化工*, 2014, 43(3): 249–254.
- [17] 曾兴业, 陈婵, 林海, 等. 石脑油裂解性能评价及含硫化化合物的转化 [J]. *石油化工*, 2022, 51(3): 270–278.
- [18] 刘剑, 马立莉, 朱丽娜, 等. 裂解 C5 加氢作乙烯原料的研究及经济分析 [J]. *现代化工*, 2020, 40(10): 226–229.
- [19] Petrů J, Herink T, Patera J, *et al.* Co-pyrolysis of unsaturated C₄ and saturated C₆⁺ hydrocarbons—An experimental study to evaluate steam-cracking performance [J]. *Materials*, 2023, 16(4): 1418.
- [20] Karaba A, Dvořáková V, Patera J, *et al.* Improving the steam-cracking efficiency of naphtha feedstocks by mixed/separate processing [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020, 146: 104768.
- [21] 潘宇, 侯建峰, 李晓鹏, 等. 混合 C₄ 作乙烯原料的研究及经济性分析 [J]. *现代化工*, 2023, 43(2): 219–222.
- [22] Kossiakoff A, Rice F O. Thermal decomposition of hydrocarbons, resonance stabilization and isomerization of free radicals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1943, 65(4): 590–595.
- [23] Van Geem K M, Žajdlík R, Reyniers M F, *et al.* Dimensional analysis for scaling up and down steam cracking coils [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2007, 134(1/2/3): 3–10.
- [24] Rebordinos J G, Herce C, Gonzalez-Espinosa A, *et al.* Evaluation of retrofitting of an industrial steam cracking furnace by means of CFD simulations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114206.
- [25] 张红梅, 李青月, 李金莲, 等. 乙烷丙烷单独及混合裂解相互作用机理的模拟研究 [J]. *化工科技*, 2015, 23(1): 9–13.
- [26] 马辽, 张红梅, 李臻, 等. 丙烯生成苯和甲苯反应机理的数值模拟 [J]. *化工科技*, 2020, 28(3): 59–67.
- [27] 郝玉兰, 张红梅, 张哈伟, 等. 丁烷热裂解反应机理的分子模拟 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2013, 29(5): 824–829.
- [28] Nohara D, Sakai T. Kinetic study of model reactions in the gas phase at the early stage of coke formation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1992, 31(1): 14–19.
- [29] Rebordinos J G, Herce C, Gonzalez-Espinosa A, *et al.* Evaluation of retrofitting of an industrial steam cracking furnace by means of CFD simulations [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 162: 114206.
- [30] 陈柏冲. 正构烷烃和环烷烃热裂解制低碳烯烃的过程模拟研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2023.
- [31] Zhang X, Chen Z, Liu Z, *et al.* Radical induced cracking of naphtha model compound: Using bibenzyl as a novel radical initiator [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2021, 156: 105101.
- [32] Guo G, Ren Y, Yu Y, *et al.* Hyperbranched poly(amidoamine) as an efficient macroinitiator for steam cracking of naphtha [J]. *Fuel*, 2021, 299: 120907.
- [33] 王小强, 景媛媛, 蔡小霞, 等. 乙烷-丙烷共裂解技术优化研究与工业应用 [J]. *石油与天然气化工*, 2022, 51(5): 65–70.
- [34] 杨利斌, 孔祥冰, 宋帮勇, 等. 不同形态乙烯原料混合裂解技术分析 [J]. *当代化工*, 2012, 41(5): 519–521. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。