

# USC 裂解炉出口温度、炉管构型 对循环乙烷裂解性能的影响

许江\*, 马艳捷, 程中克, 景媛媛, 杨利斌, 王小强, 常桂祖  
(中国石油兰州化工研究中心, 甘肃 兰州 730060)

**摘要:**在 USC 裂解炉上进行了不同乙烯原料、裂解炉出口温度、炉管构型的工业裂解标定试验,结果表明,循环乙烷易脱氢生成大量的乙烯(56.35%),丙烯、丁二烯、裂解液相产物收率极低,液化气通过断链反应可生成乙烯、丙烯、丁二烯以及少量的裂解液相产物,石脑油 & 拔头油裂解乙烯收率低,但裂解液相产物(高附加值)收率较高;乙烷裂解炉出口温度宜控制在 858℃ 左右;与 U 型炉管相比,乙烷在 M 型炉管裂解乙烷转化率、乙烯收率、丙烯收率、三烯收率高。

**关键词:**裂解炉;工业裂解标定;出口温度;炉管构型;循环乙烷;裂解性能

**中图分类号:**TQ203.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2018)10-0209-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.10.047

## Influences of outlet temperature and furnace tube configuration to circulating pyrolysis property of ethane in USC cracker

XU Jiang\*, MA Yan-jie, CHENG Zhong-ke, JING Yuan-yuan, YANG Li-bin,  
WANG Xiao-qiang, CHANG Gui-zu

(Lanzhou Petrochemical Research Center, PetroChina, Lanzhou 730060, China)

**Abstract:** A series of industrial pyrolysis calibration tests with different raw materials for ethylene, outlet temperatures and furnace tube configurations are carried out in a USC cracker. It is found that circulated ethane is easily dehydrogenated to produce a large amount of ethylene (56.35%), while the yields of propylene, butadiene and pyrolysis liquid phase are very low. Liquefied petroleum gas can generate ethylene, propylene, butadiene and a small amount of pyrolysis liquid phase products through the chain scission reaction. The pyrolysis of naphtha mixed with Topped oil can give a low yield of ethylene through but a high yield of high-valuable liquid phase. The outlet temperature at ethane cracker is suggested to be controlled at around 858°C. Comparing with pyrolysis in a U-shape furnace tube, ethane pyrolysis in a M-shape furnace tube can obtain higher ethane conversion rate, ethylene yield, propylene yield and the total yield of ethylene, propylene and butadiene.

**Key words:** cracker; industrial pyrolysis calibration; outlet temperature; furnace tube configuration; circulating ethane; cracking property

乙烯装置生产的三烯(乙烯、丙烯、丁二烯)和三苯(苯、甲苯、二甲苯)是石油化工行业的重要基础原料,在石油化工中起着举足轻重的作用,大约 95% 的乙烯和 50% 以上的丙烯是通过热裂解生产,而热裂解的产物收率、能耗、物耗、经济效益与乙烯裂解装置的工艺流程设计、设备选型、装置规模、原料供应、操作水平等因素息息相关<sup>[1-3]</sup>。

裂解炉作为乙烯装置龙头,炉管内发生强吸热、高温、短停留时间的复杂裂解反应,包括脱氢、断链、开环等一次反应以及聚合、缩合、脱氢稠环化等二次反应。经过几十年的研究开发,裂解炉已具备技术成熟、结构合理、烯烃收率高、大型化等优点,以裂解

炉型可分为 SRT 型裂解炉、USC 型裂解炉、KTI GK 型裂解炉、毫秒裂解炉、Pyrocrack 型裂解炉、HSLR 型裂解炉、HQF 型裂解炉、CBL 型裂解炉等,其中斯通-韦伯斯特公司开发的 USC 型裂解炉原料适应性强(从乙烷到加氢尾油)、结构简单、超选择性裂解、副产品较少、操作周期长,依据辐射段炉管构型又将其分为 U 型、W 型、M 型 3 种<sup>[4-8]</sup>。

利用工业标定设备从裂解装置在线连续取出裂解产物样品,进行快速深度急冷和气液分离,气相产物进行体积计量和全组分分析,液相产物进行油水分离、计量,结合裂解标定产物数据、装置进料数据、原料物性数据、裂解炉操作参数进行详细的烃平衡

收稿日期:2018-06-16;修回日期:2018-07-17

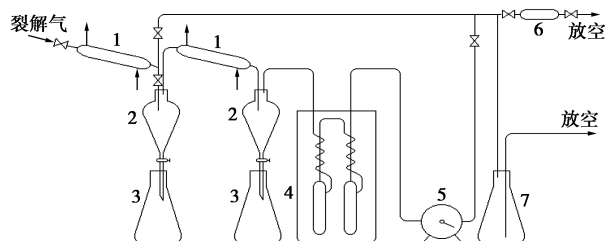
作者简介:许江(1984-),男,硕士,工程师,主要从事乙烯裂解技术方面的工作,通讯联系人,0931-7982689, xujiang2@petrochina.com.cn。

和水平衡等物料衡算,从而获得准确的工业裂解炉的气/液相产物分布及产物收率变化趋势<sup>[9]</sup>,对于工业裂解炉的操作和操作参数的优化具有科学的指导意义。

## 1 试验部分

### 1.1 试验设备与方法

工业裂解炉标定试验稳定时间为 2 h,试验装置流程如图 1 所示,从裂解炉第一急冷器之后、第二急冷器之前的连接管处(此处裂解产物温度已降至 500℃左右)引出裂解产物进入工业标定装置,经第一、二冷凝器(水冷却)将其中大部分液相冷凝收集后,再经冷阱进一步冷却分离出其中的轻油和水,未凝裂解气(即气相产物)经取样分析(全组分分析)、计量体积后放空<sup>[9]</sup>,将 2 个液相收集瓶和冷阱中的液相统一收集后进行水油分离,称重计量其中水相和油相质量。为保证液相组分完全冷凝,该冷阱应将温度控制在 -2~0℃,试验过程中用冰盐水作致冷剂。试验所用分析设备如表 1 所示。



1—冷凝器;2—分液漏斗;3—液相收集瓶;4—冷阱;  
5—湿式流量计;6—裂解气采样包;7—缓冲瓶

图 1 工业裂解炉标定试验装置流程

表 1 标定试验原料及裂解产物分析仪器

仪器名称	型号	使用标准	生产厂家	用途
密度仪	DMA4500	ASTM D4052	奥地利安东帕	测定原料密度
高速炼厂气分析仪	6890N	ASTM D2163	荷兰 AC 公司	测定循环乙烷、液化气原料组成以及其裂解气组分含量
PIONA 分析仪	6890N	ASTM D6839	荷兰 AC 公司	分析原料油品族组成
馏程测定仪	NDI440	ASTM D86	美国 Agilent	测定原料油品馏程
详细烃分析仪	7890	ASTM D6729	荷兰 AC 公司	分析油品单体烃

### 1.2 试验原料及其物性分析

工业标定试验所用的 3 种原料为循环乙烷、液

化气、石脑油 & 拔头油混合原料,物性分析数据如表 2 所示。可以看出,循环乙烷中乙烯、丙烷、丙烯质量分数合计低于 0.33%,即乙烷纯度较高;液化气主要由乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷、异戊烷组成,质量分数总计达到 86%以上,对裂解不利的甲烷、氢气仅为 2.42%、2.98%;石脑油 & 拔头油原料属于轻质原料,密度仅为 0.686 4 g/cm<sup>3</sup>,石脑油:拔头油质量比约为 1:1,芳烃质量分数为 8.92%,特性因素接近 12.76,初馏点为 26.1℃,终馏点高达 201.6℃,体积平均沸点为 95.0℃,从族组成来看,石脑油 & 拔头油原料由 C<sub>4</sub>~C<sub>11</sub>饱和烃组成,且单体组分主要分布在 C<sub>5</sub>~C<sub>6</sub>(约占 50%),直链烷烃质量分数达到 31%以上,链烷烃(直链烷烃+支链烷烃)质量分数达到 77%以上,环烷烃、芳烃质量分数较低仅为 1.55%、7.21%。

表 2 3 种原料物性数据

项目	循环乙烷
原料组成(质量分数)/%	
循环乙烷	99.77
乙烯	0.01
丙烷	0.01
丙烯	0.21
项目	液化气
原料组成(摩尔分数)/%	
氢气	2.98
甲烷	2.42
乙烷	8.10
丙烷	28.23
异丁烷	25.55
正丁烷	18.47
异戊烷	6.06
正戊烷	2.84
C <sub>6</sub> +	3.09
项目	石脑油 & 拔头油
密度(20℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.6864
平均相对分子质量	89.56
氢碳比/mol·mol <sup>-1</sup>	2.20
体积平均沸点/℃	95.0
族组成(质量分数)/%	
nP	31.19
iP	46.39
N	12.31
O	1.55
A	7.21

### 1.3 工业标定试验期间裂解炉操作条件

本次工业裂解炉标定试验均在某石化公司乙烯厂的 USC 裂解炉上开展,不同乙烯原料裂解标定试验期间裂解炉操作条件如表 3 所示。从表 3 可知,循环乙烷裂解炉入口温度最高达到 711℃,就裂解炉入口温度而言轻质原料远高于重质原料;循环乙烷、液化气的裂解炉出口温度均在 860℃左右,比石脑油 & 拔头油混合原料的裂解炉出口温度高出 9℃;裂解炉入口压力在 0.27~0.38 MPa,裂解炉操作设置水油比大小顺序依次为液化气>石脑油 & 拔头油>循环乙烷,由于原料供应、操作参数调整、炉管结焦程度等因素,标定试验期间通过实际原料进料速率与水进料速率反算的裂解水油比略有变化。

表 3 不同原料裂解标定试验过程中裂解炉操作条件

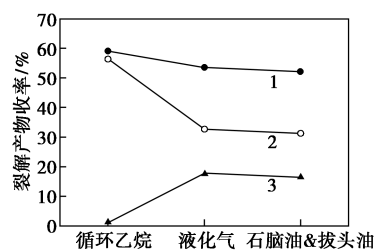
原料	循环乙烷	液化气	石脑油 & 拔头油
裂解炉入口温度/℃	711	623	592
裂解炉出口温度/℃	858	860	851
裂解炉入口压力/MPa	0.38	0.27	0.31
原料进料速率/(t·h <sup>-1</sup> )	19.00	26.00	30.70
水进料速率/(t·h <sup>-1</sup> )	7.00	15.00	13.40
操作设置水油比/(t·t <sup>-1</sup> )	0.37	0.58	0.50

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同乙烯原料在 USC 裂解炉裂解产物收率分析

为对比分析不同乙烯原料在工业裂解炉裂解的产物分布情况,在 USC-U 型裂解炉上分别进行了循环乙烷、液化气、石脑油 & 拔头油的工业裂解标定试验,工业裂解产物收率比较结果如图 2 所示。由图可知,循环乙烷裂解乙烯收率高达 56.35%,而丙烯、丁二烯收率仅为 0.92%、1.67%,三烯(乙烯+丙烯+丁二烯,下同)收率达到 58.94%;石脑油 & 拔头油裂解乙烯、丙烯收率为 31.28%、16.50%,三烯收率达到 52.16%;与石脑油 & 拔头油裂解相比,液化气裂解乙烯、丙烯收率分别提高 1.3%~1.5%,丁二烯收率低 1.4%。结合物性分析数据可知,循环乙烷发生脱氢反应生成大量的乙烯,丙烯、丁二烯、裂解液相产物收率极低;液化气中的 C<sub>3</sub>~C<sub>5</sub> 烷烃可发生断链、脱氢、合成、芳构化、歧化等复杂反应,其中断链反应优势较大,断链可生成乙烯、丙烯、丁二烯以及少量的裂解液相产物;石脑油 & 拔头油中包含

多种 C<sub>4</sub>~C<sub>11</sub> 链烷烃,裂解反应较为复杂,且裂解产物会分布在气/液两相中,与循环乙烷、天然气裂解相比,裂解乙烯收率低,但裂解液相产物中包含一系列高附加值且市场需求大的副产品(如苯、甲苯、二甲苯、裂解汽油等),对其进行有效利用可使乙烯成本显著降低<sup>[10-11]</sup>。

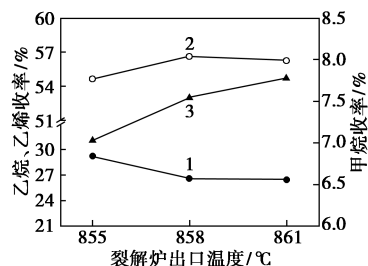


1—三烯收率;2—乙烯收率;3—丙烯收率

图 2 循环乙烷、液化气、石脑油 & 拔头油的工业裂解产物收率比较

### 2.2 不同裂解炉出口温度 (COT) 对乙烷在 USC 裂解炉裂解产物收率影响分析

为了考察不同裂解炉出口温度对工业裂解炉裂解产物收率影响,以循环乙烷为例进行了裂解炉出口温度为 855、858、861℃ 的工业裂解标定试验,裂解工况为 USC-M 型裂解炉,裂解炉入口温度为 712℃,操作设置水油比为 0.35,主要产物收率比较结果如图 3 所示。可以看出,当温度在 855~861℃ 时,乙烷裂解气相中甲烷收率 (<8%) 远低于石脑油裂解甲烷收率 (约 22%),而且裂解氢气收率高达 4%,这是由于乙烷分子结构特点导致裂解易发生脱氢反应生成乙烯和氢,不易发生断链反应生成甲烷<sup>[12-14]</sup>;当温度从 855℃ 提高到 861℃ 时,乙烯收率略有降低,乙烷转化率从 70.81% 升至 73.50%,而且从 855℃ 提高到 858℃ 时产物收率变化幅度比 858℃ 提高到 861℃ 的更为明显,这是由于脱氢反应属于强吸热反应,高温更有利于乙烷脱氢;综合考虑



1—乙烷收率;2—乙烯收率;3—甲烷收率

图 3 不同裂解炉出口温度下乙烷裂解主要产物收率比较

能耗、乙烷转化率、乙烯产率等方面得出,在 USC-M 型裂解炉上进行乙烷裂解其出口温度宜控制在 858℃ 左右。

### 2.3 不同裂解炉管构型对乙烷在 USC 裂解炉裂解产物收率影响分析

为了探索裂解炉管构型对乙烷在 USC 裂解炉裂解产物收率影响,以循环乙烷为例,分别在炉管构型为 U 型和 M 型工业裂解炉进行标定试验,裂解工况为裂解炉入口温度 712℃、出口温度 858℃、入口压力 0.34~0.38 MPa、操作设置水油比 0.35,工业裂解主要产物收率比较结果如表 4 所示。可以看出,相同裂解试验条件下乙烷在 M 型炉管中裂解与在 U 型炉管裂解相比,裂解气相中乙烯、三烯、甲烷收率分别高约 0.3%、0.8%、4.0%,乙烷收率低约 3.5%,即乙烷在 M 型裂解炉管中裂解乙烷转化率、乙烯收率、丙烯收率、三烯收率更高,这与 U 型两程裂解炉管处理能力小、管径小、管长小,缩短了乙烷在炉管里的停留时间,裂解深度降低,导致乙烷转化不完全有关,而 M 型炉管采用较大口径炉管且多为六程管,导致其处理量大、停留时间长,更有利于乙烷、液化气、轻烃等轻质原料的裂解<sup>[7-8,15]</sup>。

表 4 不同裂解炉管构型下乙烷裂解主要产物收率比较 %

裂解产物收率	甲烷	乙烷	乙烯	三烯
USC-U 型炉管	4.56	30.04	56.35	58.94
USC-M 型炉管	7.55	26.59	56.64	59.77

## 3 结论

(1) 在 USC-U 型裂解炉上进行热裂解,循环乙烷易进行脱氢反应生成大量的乙烯(56.35%),丙烯、丁二烯、裂解液相产物收率极低;液化气中的 C<sub>3</sub>~C<sub>5</sub> 烷烃易发生断链反应,乙烯、丙烯收率为 32.73%、17.86%,三烯收率达到 53.49%;石脑油 & 拔头油中裂解反应更复杂,且裂解产物分布在气/液两相中,其裂解乙烯收率低,但裂解液相产物中包含一系列高附加值且市场需求大的副产品。

(2) 乙烷在 USC-M 型裂解炉、855~861℃ 下裂解,乙烷转化率高达 70.81%~73.50%,裂解气相中甲烷收率仅为 7.55%,氢气收率高达 4% 左右,其裂

解易发生脱氢反应、不易进行断链反应,综合考虑能耗、乙烷转化率、乙烯产率等方面得出,在 USC 裂解炉上进行乙烷裂解其出口温度宜控制在 858℃ 左右。

(3) 与 U 型裂解炉管相比, M 型炉管具有口径大、管程多、处理量大、停留时间长等特点,乙烷在 USC 裂解炉 M 型炉管中裂解乙烯、三烯、甲烷收率分别提高约 0.3%、0.8%、4.0%,乙烷转化率提高 3.5%, M 型裂解炉管构型更有利于乙烷、液化气、轻烃等轻质原料的裂解。

## 参考文献

- [1] 郭莹. 乙烯原料优化途径的分析与展望[J]. 石油化工, 2008, 37(1): 91-93.
- [2] 周丛, 茅文星. 拓展乙烯原料来源的研究现状[J]. 化工进展, 2009, 28(8): 1313-1318.
- [3] 崔静怡. 乙烯原料发展趋势及优化建议[J]. 石油化工技术经济, 2001, 8(6): 13-15.
- [4] 王国清, 周先锋, 石莹, 等. 乙烯裂解炉辐射段技术的研究进展及工业应用[J]. 中国科学: 化学, 2014, 44(11): 1714-1722.
- [5] 王宏全, 薛峰. USC 型管式裂解炉在乙烷装置中的应用[J]. 石油与化工设备, 2010, 13(7): 32-39.
- [6] 何细藕. 烃类整齐裂解制乙烯技术发展回顾[J]. 乙烯工业, 2008, 20(2): 59-64.
- [7] 杨光生, 徐永国, 邓克林. USC-80 U 型裂解炉的主要特点及运行分析[J]. 石化技术与应用, 2008, 26(4): 353-356.
- [8] 胡杰, 王松汉. 乙烯工艺与原料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018, 242-311.
- [9] 杨利斌. 一种工业裂解炉裂解气在线取样装置: CN, 201021019000.2[P]. 2010-02-05.
- [10] 王强. 关于乙烯原料优化的几点思考[J]. 石油化工, 2002, 31(1): 58-61.
- [11] 郭莹, 周丛, 杜志国, 等. 丙烷用作乙烯原料研究[J]. 石油化工, 2018, 47(1): 8-13.
- [12] 邹仁黎. 石油化工裂解原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1981: 19-38.
- [13] 刘丰合, 魏月娥, 高传宝, 等. 裂解原料分析及裂解条件优化探讨[J]. 乙烯工业, 2017, 29(4): 1-5.
- [14] 王松汉. 乙烯装置技术与运行[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 22-32.
- [15] 郑万军. 2 种炉管结构的 USC 裂解炉比较[J]. 石油化工设备, 2008, 37(2): 87-89. ■