

# 大型重油催化裂化装置设计与 优化分析探讨

许日\*

(中海油惠州石化有限公司, 广东 惠州 516086)

**摘要:**通过对某特大型 RFCCU 设计及运行数据剖析发现,该装置的整体设计、平面布置、各部分加工负荷配置基本正常,运行平稳。但在再生形式、再生器主体附件布置、局部环节及一些共性设计问题上还可进一步优化,如可选富氧两段快速床再生形式、调整烟气线路平面布置等。分析和探讨结果为后续改进和完善 RFCCU 的设计提供了参考,特别是对现运行数量极少的特别大型装置,以达到最佳设计,实现 RFCCU 可操作性强、长周期、高液收、低能耗、低运行成本的安全运行状态。

**关键词:**重油催化裂化;设计;分析;优化

中图分类号:TE624

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)09-0209-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.09.044

## Design and optimization analysis on large RFCC unit

XU Ri\*

(CNOOC Huizhou Petrochemical Company Limited, Huizhou 516086, China)

**Abstract:**Through analyzing the design and operation data of a super large RFCC unit, it is found that the overall design, equipment layout and processing load configuration for each section of the unit are basically normal, and the unit runs smoothly. However, the unit can be further optimized in the aspects including the regeneration method, the main attachment arrangement of the regenerator, local links and some common design problems. This analysis and discussion results provide a reference for further improvement in designing RFCC unit, especially for few existing super large units in China. It aims to achieve optimal design, in order to help RFCC unit to achieve strong operability, long cycle, high liquid income, low energy consumption, low operating cost and safe operation state.

**Key words:**RFCC; design; analysis; optimization

流化催化裂化(FCC)工艺技术在不断发展,一直以来在炼厂中起着关键作用和核心地位。由于催化裂化装置(FCCU)投资和操作费用低,原料适应性广,转化率高,自FCCU工业化运转以来,已发展成炼厂中重油轻质化的核心工艺。

目前运输燃料主要来源于FCCU,在全球范围内,FCC汽油占高辛烷值汽油总量的25%~80%,FCC柴油占总量的10%~30%,同时是仅次于蒸汽裂解制丙烯的主要生产装置,并已逐步趋向于炼油与化工或重油烯烃化的桥梁技术,逐步发展成为重油烯烃化重要手段。例举某重油催化裂化装置(RFCCU)为该10Mt炼油项目核心装置,其在全厂物料平衡、经济性、能耗、燃料及蒸汽平衡起着重要的关键控制作用。其整体结构选型及各部细节等设计还需进一步优化以达到最佳,使该RFCCU及10Mt炼油生产经营稳定性、经济性达到最优。

## 1 设计采用先进工艺技术和设备

### 1.1 提升管出口采用VQS

粗旋采用带预汽提段密闭旋流式直连快分VQS,数据显示,目前80%负荷时VQS线速16m/s,油浆产率4%时固含量在2~3g/L运行状况良好。

该系统在冷模实验时,VQS系统在线速为8~21m/s的范围内操作。结果表明,该系统能较好地实现气固快速分离、高效快速预汽提及油气的快速引出,系统各部分压力分布合理,冷态下的气固分离效率高达98.5%以上,并具有较好的预汽提效果。工业试验在1Mt/aFCCU上进行,结果表明,VQS系统开工灵活,操作弹性大,气固分离效率高(油浆固含量小于4g/L)。使用该专有快分设备可达到快速分离、减少二次非理想反应、提高反应的选择性和目的产物的产率,提高轻收、改善产品分布<sup>[1]</sup>。更重要的是降低油气在沉降器停留时间,大幅降低结

收稿日期:2019-11-25;修回日期:2020-07-12

作者简介:许日(1965-),男,学士,高级工程师,从事炼化生产与技术管理工作,通讯联系人,xuri@enooc.com.cn。

焦,延长运行周期。

### 1.2 采用 MIP 技术方案

MIP(催化裂化家族系列——多产异构烷烃降低汽油烯烃两段反应)方案适合 10 Mt/a 燃料型炼油项目。MIP 工艺提出 2 个反应区的概念,即原料与热催化剂在提升管下部接触进入第一反应区,经高温、短接触进行第一阶段反应;第一反应区上部同轴串联扩径为第二反应区,在较低温度和较长停留时间继续反应。

第一反应区在较高苛刻度下以一次裂化反应为主,即高温(500~530℃)、高活性催化剂、短时间(1.5 s)和大剂油比(6~8)情况下反应,裂化较重原料生成较多烯烃;第二反应区采用低温(490~520℃)和长时间(4~6.4 s),增加氢转移和异构化反应,抑制二次反应。采用 MIP 工艺实现了在不降汽油辛烷值,而降低烯烃,使催化汽油清洁化,以适合车用汽油国 V/VI 标准要求,运行数据见表 1。

表 1 装置运行、设计与常规汽油组成对比

项目	常规 FCC 数据	运行数据	设计数据
芳烃质量分数/%	23.26	22.3	21
烯烃质量分数/%	36.87	21.8	24
饱和烃质量分数/%	40.43	55.9	55
RON	92.4	92.1	92.6
MON	81.7	81.4	81.6

### 1.3 采用预提升段

因装置规模大,提升管直径大(预提升内径 1 360 mm,一反内径 1 960 mm),会出现催化剂流态的不稳定性,使油气与催化剂接触不良,影响反应效果。因此,在大型 RFCCU 设计时,需经流体动力学核算以确定该段流速和流态,以便催化剂上升流化均匀稳定,与油气良好吸附、传热和反应。目前该装置预提升段运行正常,该段密度为 456~486 kg/m<sup>3</sup>,线速 3.78 m/s,密度波动范围小,流态稳定,预提升效果良好。

### 1.4 采用干气和蒸汽两用灵活预提升流程

本装置采用干气和蒸汽两用提升流程,在气体收率较低或加工负荷较低时,据富气压缩机实际负荷,可采用干气提升,以钝化和降低能耗,并大幅降低 100% 高温水蒸汽对催化剂的快速老化失活。

预提升段线速 3.78 m/s,长度 6.93 m,催化剂循环均在高温 680℃ 左右、蒸汽(100%)环境下有 2 s 运行时间,按满负荷时总藏量为 870 t,剂油比为

6.66,催化剂循环量为 3 800 t/h,循环速率为 4.37 次/h,则催化剂水热老化时间为 8.736 s/h,按单耗 0.8 kg/t 计,催化剂寿命为 1 948 h,即使用寿命内催化剂需经 100% 水热老化 4.73 h,催化剂失活约 5 个单位<sup>[2]</sup>,可见催化剂在此环境下老化失活严重。使用哪种介质需核算两者的能耗及催化剂失活的经济和环保状态。

### 1.5 采用高效雾化喷嘴 BWJ

无法与其他进料喷嘴进行同条件比较,不能评价该喷嘴雾化效果。但其他装置试用情况良好,由兰炼 3.0 Mt/a RFCCU 运行数据可知,原料较本装置重的情况下,检查发现提升管内部基本上没有结焦现象<sup>[3]</sup>,从这个角度讲也反映该喷嘴雾化效果良好。

### 1.6 采用 BSX 型大旋风式三旋

在压力 0.223 MPa、温度 643℃、烟气流 6 340 m<sup>3</sup>/min、设计负荷 90.3% 时,三旋入/出口浓度为 293/93.6 mg/m<sup>3</sup>;入口 20~40、0~20 μm 分别为 0%、100%;出口 10~20、5~10、0~5 μm 分别为 0.6%、11.1%、89.3%。在入口 0~20 μm 100% 时效率可达 68%;压降 14 kPa。上述运行数据可见,该三旋运行状态良好,10 μm 以上颗粒基本除净,出口浓度远小于 200 mg/m<sup>3</sup> 指标,对防止烟机叶片磨损和结垢能起到良好作用,减少或杜绝烟机结垢振动停机或装置停工等大幅度波动的事故隐患。

### 1.7 采用 VRDS-RFCC 双向组合技术

采用中石化石油化工科学研究院(RIPP)研发的 RFCC 重循环油去渣油加氢(VRDS)装置处理,与加氢渣油一起返回作 RFCC 原料的回炼组合工艺(RICP)。

在 RICP 组合技术中,实际应用表明,RICP 组合技术改善了 RFCC 进料性质,FCC 原料残炭减小 0.47%,氢含量增加 0.3%,饱和烃质量分数增加 4.26%,胶质和沥青质含量明显减少;改善了 RFCC 产品分布和性质,总转化率提高了 0.67%,总液收提高 1.42%,焦炭产率下降 0.63%,油浆产率下降 0.85%,柴油十六烷值有所提高<sup>[4]</sup>。

### 1.8 热量逐级回收

高温位热源设置取热产 3.5 MPa 中压蒸汽,如再生器、高温烟气和油浆;低温位热源产 0.45 MPa 低低压蒸汽或与热水换热等进行热联合,如分顶低温油气与热水取热,顶循和热水与气分热联合,做到热源逐级回收利用,整体运行正常,效果较好,降低

能耗。

### 1.9 采用低压降水封罐

FCCU中,烟气轮机是能量回收系统的核心设备,在提高效益方面占有重要地位。烟机出口管路采用低压降水封罐,比传统水封罐压降低80%左右,总烟机出口可降低压降5 kPa左右<sup>[5]</sup>。经计算,满负荷运行时烟机出口压力可由16.8 kPa降至11.8 kPa,提高回收功率1 224 kW。由此可见,降低烟机出口压力,即烟机后续设备、管道等压降减小,可大幅度提高烟机回收功率,降低装置能耗和运行成本。

## 2 反再结构和主参数的选择

### 2.1 再生结构形式的选择

本装置(图1)可选择两段富氧快速床再生工艺<sup>[6]</sup>,见图2,该再生形式可操作性强、稳定性好、能耗低、运行成本低,实现了快速烧焦和低藏量的FCCU所追求的目标,并减少了CO焚烧炉的复杂性和不安全性。采用该再生形式,改变系统压力选择大功率烟机,运行时机组应处于大功率发电状态。

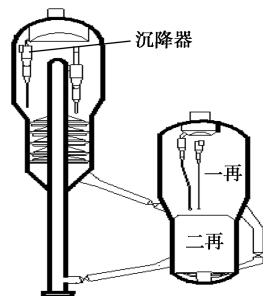


图1 两段重叠逆贫氧湍流常规再生

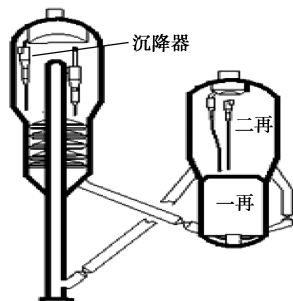


图2 两段重叠富氧快速床高效再生

### 2.2 提高系统压力可加大处理能力降低能耗

该装置采用两段贫氧湍流常规再生形式,耗风指标9.8左右,主风和烟气量低,在此应以烟机制造能力为界提高系统压力设计,以提高烟气回收功率、

增加再生能力或降低再生系统藏量和装置加工负荷<sup>[7]</sup>。

表2、表3<sup>[6]</sup>可见,若烟机功率设计37.5 WM,再生压力可升至0.304 4 MPa,主风机出口压力为0.394 MPa;反应压力由0.226 MPa升至0.260 MPa,富气压缩机入口压力由0.186 MPa增至0.220 MPa,增加回收功率2 325 kW,降低压缩机功耗520 kW,共节电2 845 kW/h,降能1.136 kg/t。因提高系统压力,会微量增加转化率和干气、焦炭产率,可适当调整反应温度和时间以改善产品分布<sup>[7]</sup>。

表2 该装置不同再生压力时相关数据

项目	0.396 MPa	0.366 MPa	0.336 MPa	0.306 MPa	0.276 MPa	0.246 MPa
主风机出口压力/MPa	0.486	0.456	0.426	0.396	0.366	0.336
烟机入口压力/MPa	0.366	0.336	0.306	0.276	0.246	0.216
烟气量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	7146	7146	7146	7146	7146	7146
主风机功耗/kW	35306	33947	32537	31071	29544	27948
烟机功率/kW	44026	42343	40659	38484	36246	33746
电机功耗/kW	-8721	-8396	-7968	-7413	-6702	-5798

注:主风机机械效率97.5%,传动效率95.5%,生焦率按7.4%,风烟线路压降按120 kPa计。

表3 该RFCCU富气压缩机反应压力变化时消耗功率

项目	0.280 MPa	0.260 MPa	0.240 MPa	0.230 MPa	0.220 MPa
气压机富气流量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	1440	1440	1440	1440(设计)	1440
气压机入口压力/MPa	0.240	0.220	0.200	0.190(设计)	0.180
气压机功耗/kW	5308	5564	5864	6196(设计)	6234

注:按油气压降40 kPa,气压机出口压力1.50 MPa计。

## 3 优化设计分析与探讨

### 3.1 调整两器标高

因采用两段贫氧湍流再生工艺,见图2,再生器催化剂接口为“上进下出”,使再生和待生循环回路线路短、标高落差小、再生与待生斜管蓄压低至22~45 kPa,运行时推力分别为16.1~17.5、16.5~24.3 kPa,影响催化剂循环和抗事故能力。

为催化剂循环更安全、提高抗事故能力,加大各自推力,可适当改变提升管长径比。提高提升管流速,为保持反应时间,将提高沉降器总体标高;同理可适当调整两段再生器高径比<sup>[7]</sup>。

适度增高再生斜管入口料斗标高(本装置已增加标高 3.296 m),提高斜管蓄压,有利催化剂循环,也增加再生烧焦时间和改善两器差压。

该装置两器压降、滑阀压降、滑阀开度均在合理范围,催化剂循环稳定,见表 4。

表 4 该 RFCCU 不同加工负荷运行数据

项目	72%	80%	86%
主风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	5051	6096	6191
加工量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	412	457	491
生焦率/%	6.4	7.9	7.1
烧焦负荷/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	30.37	36.1	34.86
总藏量/t	872	880	860
两器差压/kPa	26	40.3	32.6
待生滑阀压降/kPa	43.6	32.6	30.1
再生滑阀压降/kPa	53.7	70.2	57.2
待生滑阀开度/%	36.4	37.2	39.4
再生滑阀开度/%	32.0	31.9	34.2

### 3.2 2 台外取热器平面布置

在设计中可将半再生斜管布置于 2 台外取热器中间,形成再生斜管—外取热器 A—半再生斜管—外取热器 B 按 90° 布置,使二再底部冷热催化剂混合均匀有利烧焦,且再生斜管温度相比现布置(外取热器 A/B 在同一侧)稍低,利于提高剂油比。

### 3.3 分馏脱过热段优化设计

#### 3.3.1 增设人字挡板数

在 81% 负荷时,分馏塔底压降 19.8 kPa, 分馏塔总压降 28.6 kPa 的 69.2%, 且油浆与回炼油流程重叠 30%, 传热、传质效率低, 压降大。

该装置分馏塔径 9 m, 设计挡板宽 1 050 mm, 断面挡板数 4 块, 逆流气、液接触面小, 传质、传热效果差, 上升油气流动不畅、压降高。

油浆上返塔分布管只设计 2 根横穿分馏塔直管, 没有分支, 不利于液体分配, 会造成溢流槽液面形成梯度, 溢流不均, 影响传质、传热。

设计时应改变大塔径大挡板宽度的设计思想, 这会造成单位逆流接触面积减少, 严重影响传质、传热效率。挡板宽度与设计规模和塔径没有直接关系, 断面挡板数应与装置规模同比例增加, 以达到同样的单位接触面积。所以本装置应设计原宽度的 1/3 为 350 mm, 使断面上升油气流通通畅; 油浆与上升油气接触面积增至 3 倍, 大幅提高传热、传质的总体效果, 改善脱过热和分离效率, 降低压降, 增大

富气压缩机入口压力, 进而降低机组能耗, 并改善分馏塔取热分布。

#### 3.3.2 采用填料

早在 1999 年吉化炼厂 0.6 Mt/a RFCCU 采用填料, 将挡板更换为规整填料, 沉降器至分馏塔顶压降由 48 kPa 降至 39 kPa, 降低了 9 kPa, 塔底及填料上部气相温度降低 17/24℃, 油浆循环量由 180 t/h 提高至 200 t/h 时, 返塔温度反而由 290℃ 降低至 264℃, 总轻液收提高 1%<sup>[8]</sup>。

采用填料将降低压降 9 kPa, 降低压缩机功耗 135 kW/h 和能耗 0.054 kg/t。数据表明, 传热传质效率高、改善分馏塔的取热分布、提高轻液收, 且可提高富气压缩能力或装置加工能力。

### 3.4 烟机、余锅、脱硫平面布置优化

该平面布置设计原则为减少烟机前、后线路的弯道和系统压降, 特别是烟机后路压降最低为设计原则, 即烟机→余锅脱销→脱硫烟囱线路局部阻力最少。而烟机后部因机组设计规模、标高、余锅数量和脱硫脱销设施等较复杂, 是降压的重点。

经勘察, 烟机、CO 锅炉和脱硫系统有重新优化平面布置的空间。经重新布置, 烟机出口至脱硫洗涤塔烟气线路可减少 3 个 90° 弯头, 由式(1)计算, 烟机后可降压 0.6 kPa, 由 11.8 kPa 降至 11.2 kPa, 烟机满负荷运行时, 可提高烟机回收功率 153 kW/h, 降能耗 0.061 kg/t。

弯头阻力:

$$H = \zeta(1.2u^{2/2})$$

$$\zeta = 0.008(\alpha^{75}/n^{0.6})$$

$$n = R/D \quad (1)$$

式中,  $\zeta$  为阻力系数;  $U$  为风速, m/s;  $\alpha$  为弯头角度, (°);  $R$  为弯头转弯半径, m;  $D$  为弯头直径, m。

### 3.5 外取热器汽包可改为自然循环

该装置外取热器采用强制循环方式, 因再生取热负荷大, 在相同取热面积提高取热负荷, 需加大水汽循环比, 以提高传热效率。强制循环需机泵和热水循环回路系统, 投资、占地、维护成本和能耗增加。

为安全、可靠且降低投资、占地和能耗, 可改为自然循环的方式。

### 3.6 取消油浆回炼系统

油浆回炼已是原 RFCC 装置设计的一贯做法, 但目前 RFCCU 都不投用油浆回炼系统。实际上, 油浆密度大, 胶质、沥青质含量高, 其回炼会恶化产品分布, 增加焦炭产率, 增加能耗也降低装置加工能

力,形成恶性循环。同时,增设进料喷嘴,无论是否投用,均需雾化蒸汽增加能耗,也会增加喷嘴部位结焦,影响提升管正常流态。

### 3.7 调整油气大管入分馏塔盲板

油气大管道盲板是为了停工期间切断沉降反应器与分馏塔的连接。按正常操作条件和介质设计,使盲板厚度和重量大,拆、装难度大,特别是开工拆盲板时,延误时间,严重影响开工进程,是装置开工的重要节点也是难点。

为此可考虑降低设计条件(温度、压力、介质)的苛刻度,按开工工况条件,温度 200℃ 左右;压力为两器升温期压力,介质为空气或蒸汽。经设计计算,可较大幅度减少大盲板的厚度和重量,改善拆盲板难度和时间。

### 3.8 同介质机、泵合并减少配置

粗汽油送吸收稳定与冷回流各自 2 台泵、外取热热水循环、回炼油泵与重循环油泵、稳定塔液化气外送与顶回流泵及 2 台 CO 焚烧炉鼓风机各一开一备等,均可改为 3 台,两开一备,如此设计对装置正常运行是安全的,并可减少投资、占地,维护量、维护费用未变而提高利用率。

### 3.9 自保联锁

#### 3.9.1 主风流量低低自保

采用一、二再主风分别各自 3 取 2,一再、二再 2 取 2 触发联锁,这种双保险绝对安全,但设置过剩,将增加一次性投资并增加维护量及自保联锁的复杂性。因现自控仪表故障率低、准确度高,可简化为一再、二再主风干线、主风总线 3 条线路之一加装 1 套 3 取 2 触发联锁即可,是安全可靠的。

#### 3.9.2 两器差压自保

两器差压与滑阀压降低选(超驰控制)联锁均为防止两器倒流的恶性事故,是 FCC 最重要的联锁。当出现两器极短时间(瞬间)大幅度压力波动时,两器差压联锁反应更迅速,更快触动联锁关闭两器循环滑阀,防止油气、空气倒流互串。

### 3.10 化学工程核算

#### 3.10.1 脱吸塔和稳定塔

脱吸塔和稳定塔提馏段采用 4 溢流,因塔径 5.2/5.4 m 较小,4 溢流使塔盘气相流通面积及气液接触面积减少至 2 溢流的 1/3,增大了塔盘气相线速或增大塔径以维持线速。可改为 2 溢流并降低液相循环量设计,气液接触面将增大 1/3,分馏效率更高,可降低实际塔板数。

#### 3.10.2 分馏塔板间距

分馏塔板间距大,共有 18 层 900 mm 和 14 层 1 100 mm,大于正常板间距 600~800 mm。

### 3.11 提高汽提段温度和汽提效果

再生器内取热过热低压蒸汽,为汽提段提供汽提蒸汽,过热蒸汽出口增设降温喷水控制应取消,并应提高过热温度,可考虑将过热温度设计更高达到 500℃ 以上,将汽提段温度提高,改善汽提效果。

### 3.12 改善 CO 焚烧炉压缩空气与烟气混合

负荷 75% 时 CO 焚烧炉排烟中有体积分数  $16 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$  CO,满负荷生产时烟量增大,经炉流速快停留时间短,此时排烟中 CO 含量会更高。

设计时需考虑将压缩空气与烟气混合均匀,及燃烧段停留时间,使 CO 完全燃烧,提高 CO 潜热回收,降低能耗,减少大气污染。

## 4 结语

经对我国某大型 FCCU 设计、运行和优化设计的分析探讨,装置整体设计良好,运行平稳,能耗相对较低,设计中引用了一些新技术新设备,效果良好。但有具体部分可进一步优化设计,如再生结构形式、系统压力、烟机后线路布置及分馏脱过热段改进等。提出设计参考方案,为未来设计提供参考,以便装置整体、各细节最优、各操作弹性科学合理、经济技术几方面总体设计考虑,设计一套可操作性强、操作简单、低能耗、经济高效的 RFCCU。

### 参考文献

- [1] 卢春喜,蔡智,时铭显.FCC 提升管出口旋流式快分(VQS)系统的实验研究与工业应用[J].油学报:石油加工,2004,20(3):24-25.
- [2] 张晨曦,孙艳波,廖翼涛,等.催化裂化催化剂水热老化装置影响因素研究[J].石化技术与应用,2014,32(1):23-24.
- [3] 吴雷,杨启业,王韶华,等.3.0 Mta 重油 FCC 装置设计及工业运行[J].石油炼制与化工,2005,36(10):14-15.
- [4] 张杨,彭国峰,黄富.FCC 装置实施 RICP 组合技术的工业应用[J].石油炼制与化工,2017,48(1):19-20.
- [5] 程高峰,王伟,曹俊,等.低压降水封阀的开发与应用[J].石油化工设备技术,2011,32(4):17-24.
- [6] 许日.大型化 FCC 装置的反-再结构型式选择[J].炼油技术与工程,2017,47(8):45-46.
- [7] 许日.大型 FCC 装置系统设计压力分析与探讨[J].石油炼制与化工,2019,50(6):29-31.
- [8] 张士博,刘金明.规整填料技术在 RFCCU 分馏塔中的应用[C].南京:2001 年石油炼制技术大会论文集,2001:952-956. ■