

# 基于炉管结焦形态的在线清焦技术优化与应用效益分析

马海彬 简凯纳 (中海油惠州石化有限公司运行四部, 广东 惠州 516086)

**摘要:** 焦化加热炉炉管结焦是制约延迟焦化装置生产能力, 影响加热炉长周期运行的一大难题。中海油惠州石化有限公司(惠州石化) 420Mt/a 延迟焦化装置通过对结焦过程分析, 经过十余年的实践总结, 成功应用在线清焦技术, 实现了加热炉的长周期运行, 大大提高了装置的经济效益。本文阐述了在线清焦技术在惠州石化的应用和相关的要点, 并对近期的在线清焦效果和产生的经济效益进行了分析。

**关键词:** 焦化加热炉; 结焦过程; 在线清焦技术; 经济效益

**中图分类号:** TE966 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 032-0052-03

## Optimization and Application Benefit Analysis of Online Coking Removal Technology Based on Furnace Tube Coking Morphology

Ma Haibin, Jian Kaina (Operation Department IV, CNOOC Huizhou Petrochemical Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516086, China)

**Abstract:** Furnace tube coking in coke ovens is a major challenge that restricts the production capacity of delayed coking units and affects long-term operation. Through over a decade of practical experience and analysis of coking processes, CNOOC Huizhou Petrochemical Co., Ltd.'s 420Mt/a delayed coking unit has successfully implemented online coking removal technology, achieving extended operational cycles for the furnace and significantly improving economic efficiency. This paper elaborates on the application of online coking removal technology at CNOOC Huizhou Petrochemical, key implementation points, and analyzes recent coking removal effectiveness and economic benefits.

**Keywords:** coke ovens; coking process; online coking removal technology; economic efficiency

延迟焦化工艺由于其技术成熟、渣油转化率高、原料适应性强、生产成本低, 是重油加工的重要手段。中海油惠州石化延迟焦化装置加工的原料为减压渣油和部分掺炼催化油浆, 其特点是密度大、黏度高、重金属含量高、临界反应温度低。在运行过程中, 加热炉炉管逐步结焦是不可避免的。加热炉是延迟焦化装置的核心设备, 炉管结焦一直是制约装置生产能力的一大难题, 影响加热炉长周期运行, 造成经济效益损失<sup>[1]</sup>。因此非常有必要对加热炉结焦过程进行分析, 并结合结焦过程采取措施清除炉管结焦以确保延迟焦化装置长周期高负荷运行。惠州石化 420Mt/a 延迟焦化装置采用的是美国 Foster Wheeler 公司(简称 FW 公司)的“两炉四塔”工艺包, 加热炉采用 FW 公司专有技术—双面辐射斜面阶梯炉。每台加热炉由 6 个辐射室和 1 个对流室组成<sup>[2]</sup>。每个辐射管程设置单独的炉膛, 适用于在线清焦技术, 设计最大管壁温度为 705℃, 最高连续使用温度 650℃。

### 1 炉管结焦过程与形态

根据现有理论<sup>[3-4]</sup>与多次机械清焦的焦样分析认为渣油在辐射室炉管的结焦过程主要分为三个过程。

#### 1.1 裂化反应过程

渣油从对流室以 370℃ 左右进入辐射室, 经过加热大分子烃类发生裂化成小分子烃。370℃~420℃ 时是以裂化反应为主导, 但裂化过程中也会发生缩合反

应。此段炉管内仍是渣油状态。

#### 1.2 初期缩合反应阶段

当加热温度达 420℃ 以上时, 缩合反应成为主导地位。此时芳烃、带长侧链环烷烃缩合成胶质, 胶质合成沥青质, 沥青质逐渐缩合成焦炭。此时渣油黏度增大, 流速减小, 在这个过程中会形成一种介于固液相之间的球状物质, 这种物质对管壁附着性强, 极容易附着沉积形成硬质焦炭。此时形成一层半固态的软焦层, 表面还会吸附部分焦粉。

#### 1.3 后期缩合反应阶段

管壁温度越高, 结焦速率越快。当温度上涨较快或局部温度过高时, 附着在管壁上的中间相小球体快速增加, 并发生无规律的堆叠, 导致小球体还未长大融并就固化了。此过程会形成一层已经固化的焦层。由于最底层的焦层受到热辐射的强度更强, 所以还会形成一层更硬的焦层, 这层焦极难清除, 以片状附在管壁上。随着时间的推移反应深度增大, 前期的软焦层也会继续固化, 导致炉管结焦加剧, 如图 1 所示。



图 1 炉管结焦形态示意图

## 2 在线清焦技术的优化与改良

### 2.1 在线清焦技术首次应用

常规的空气-蒸汽烧焦法和机械清焦法需停炉处理, 缩减了延迟焦化装置的开工周期, 也影响了装置的经济效益。在线清焦技术可以不停炉完成清焦, 延长加热炉的连续运行时间, 避免因炉管结焦需停炉处理造成损失。惠州石化采用的 FW 公司变温法在线清焦程序, 其原理是根据炉管金属与管内焦垢层热膨胀系数不同的特性, 通过改变炉管温度以及提高蒸汽的质量流量, 使得炉管内的焦被击碎, 从炉管上去除, 并进入焦炭塔, 通过正确控制炉温和清焦介质可以提高清焦效果, 如表 1 所示。

表 1 FW 公司提供的在线清焦程序

序号	步骤	注水流量 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	加热炉出口温度 / $^{\circ}\text{C}$
1	清焦准备	700	496
2	提高注水	930	496
3	降温切断进料	3200	496-454
4	升温清焦	3500	454-593
5	高温适应	5500	593
6	高温清焦	7100	593-621
7	快速清焦	7100	621-566-621
8	降温准备恢复进料	8000	621-454
9	投用进料	930	454
10	正常运行	700	496

### 2.2 在线清焦技术的程序优化

惠州石化总结首次清焦经验并结合炉管结焦过程, 通过多年的在线清焦实践和优化总结出一套完善的清焦程序。

①降温降量: 在清焦支路进料降至 30t/h 后, 通过分批次间隔掐灭主火嘴进行降温至炉出口温度为 426 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

②切除进料, 蒸汽吹扫: 切除进料操作必须快速并配合中压蒸汽吹扫, 尽快把炉管内的渣油退至焦炭塔内, 同时清除图 1 第一层中的粘油和附着焦粉, 还有部分第二层焦层。

③正常注水改清焦注水: 以在线清焦注水替换原正常注水, 直至正常注水阀全关, 控制在线清焦注水量 3200kg/h。

④升温: 先以 60 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的温升将分支出口温度升至 482 $^{\circ}\text{C}$ , 并恒温 1h; 再以 32 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的温升将分支出口温度升至 676 $^{\circ}\text{C}$ , 并恒温 1h。

⑤小幅变温操作: 将分支出口温度快速降至 593 $^{\circ}\text{C}$  后恒温 1h; 一切正常后将清焦注水量提至 5000kg/h。以 60 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的温升将分支出口温度升至 621 $^{\circ}\text{C}$  后恒温 1h。小幅度变温主要清除的是图 1 中第二层的部分固

化焦层, 避免清焦速率过快导致大量焦块剥落堵塞炉管。

⑥快速大幅变温操作: 将注水量提至 7400kg/h, 快速提温降温, 记录炉管表面温度与炉管出口温度之间的温差  $\Delta T$ , 最后重复 “676 $^{\circ}\text{C}$  -426 $^{\circ}\text{C}$  -676 $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 1h” 5-6 次, 直至确认  $\Delta T$  不再改变。更大幅度的变温可以提高清焦速率, 让紧密附着在管壁的第三层硬焦破裂脱落。

⑦切至进料: 确认炉管清焦完成, 将清焦注水逐步改为正常注水并配合吹扫蒸汽对进料线进行暖管。

### 2.3 在线清焦技术的精细操作

为平衡装置加工量, 罐存不大幅上涨, 在清焦分支切断进料后, 应及时均匀提高其余 5 路进料量至 50T/h, 分支注水 750kg/h, 出口温度控制在 500 $^{\circ}\text{C}$ 。清焦期间应保持其余支路平稳生产, 避免生产波动。

切断进料与打开吹扫蒸汽操作须快速同步进行, 如果执行太慢, 容易造成高低压互串致炉管结焦, 严重时造成炉管堵塞。蒸汽吹扫时, 对流室炉管内的介质较正常运行时取热降低, 容易造成对流室超温, 所以炉管吹汽初期可适当补充在线清焦注水 1500kg/h 左右, 防止对流管壁温度偏高, 以温度指示不超过 550 $^{\circ}\text{C}$  为宜。

提前注入清焦注水可以提高炉膛的热负荷, 使其完全汽化, 避免不能迅速汽化引起炉膛压力降低导致高温渣油从出口倒流回炉管造成结焦, 甚至炉管堵塞。

蒸汽吹扫时间要保障最低 2h, 以确保能尽量把渣油退干净, 同时将图 1 所示的软焦和部分焦块吹扫出来。若不吹扫干净, 外层的软焦层的强附着性会阻碍变温时底层硬质焦的脱落。

根据在线清焦原理, 温度变化幅度越大, 清焦效果越好, 惠州石化快速变温清焦操作炉分支出口最低温度为 426 $^{\circ}\text{C}$ , 最高温度为 676 $^{\circ}\text{C}$ , 温差达 250 $^{\circ}\text{C}$ 。所以要升温到 676 $^{\circ}\text{C}$  并保持一段时间, 目的是为了让炉管适应该温度。炉分支出口最高温度设置为 676 $^{\circ}\text{C}$ , 此时管壁温度已临近极限温度 705 $^{\circ}\text{C}$ , 所以变温操作时需仔细配合点熄主火嘴, 恒温阶段要保持温度稳定<sup>[5]</sup>。

本在线清焦程序变温过程采用清焦注水汽化的蒸汽作为吹扫, 保持注水流量恒定和点熄火嘴的方式变温降低了操作复杂性。理论上, 吹扫介质流量与效果成正比, 所以应在工况要求下尽可能采取最大吹扫介质流量。

清焦工况下对流室出口压力为 1.4MPa 左右, 对流室出口温度为 230 $^{\circ}\text{C}$  左右, 该工况下, 过热蒸汽的流速  $v=32\text{m/s}$ , 蒸汽密度  $\rho=6.4288\text{kg/m}^3$ , 辐射室炉管参数为 127mm  $\times$  12.7mm  $\times$  26000mm, 故  $D=127-$



12.7=114.3mm。将数据代入下式计算可得质量流量  $Q_M=7599\text{kg/h}$ 。考虑到炉管由于结焦通流截面并非全通径,且需要留出一定余量,所以快速变温操作时注水流量选择保持为  $7400\text{kg/h}$ 。

$$Q_V=S_V$$

$$S=\pi R^2=\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$Q_M=\rho Q_V$$

式中:

$Q_V$ ——体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$S$ ——炉管通流横截面积,  $\text{m}^2$ ;

$v$ ——介质流速,  $\text{m/s}$ ;

$D$ ——炉管通流直径,  $\text{mm}$ ;

$Q_M$ ——质量流量,  $\text{kg/h}$ ;

$\rho$ ——介质密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

恢复进料前正常注水代替清焦注水,并配合吹扫蒸汽,目的是对进料线进行暖管将冷态的清焦介质退出去,防止辐射室炉管温度下降过快,造成分支出口法兰冒烟、泄漏。

在线清焦全程要密切观察、测量炉管表面温度变化情况,以判断炉管内焦层脱落情况,是否存在堵塞现象。如遇炉管表面温度急剧升高,说明炉管存在被脱落焦块部分堵塞的现象,应立即降低炉管出口温度,并减少清焦注水流量,加以缓解;若调整后炉管表面温度仍持续上升且长时间无下降趋势,则表明炉管堵塞严重,则需将加热炉分炉,机械清焦处理。

### 3 应用效果与经济效益分析

#### 3.1 清焦效果对比

惠州石化在 2022 年加热炉 F-102 的所有辐射室炉管进行了全面在线清焦,该加热炉距上次清焦已运行 12 个月,期间受原料性质及加工量频繁调整的影响,此次清焦前六路分支炉管辐射管壁最高温度都超过  $600^\circ\text{C}$ ,最高达到  $619.3^\circ\text{C}$ 。其中 F-102 辐射段管壁最高温度点平均温降  $48.9^\circ\text{C}$ ,其中最大温降  $57.7^\circ\text{C}$ ,最小温降  $36.6^\circ\text{C}$ 。整体而言最高温度点均大幅下降,说明此次清焦对分支辐射管壁最高温度点的“削峰”效果明显。对流段管壁温度平均温降  $6.9^\circ\text{C}$ ,分支入炉压力平均压降为  $0.029\text{MPa}$ ,排烟温度温降  $8^\circ\text{C}$ ,说明在线清焦对加热炉对流段有一定清焦效果但不明显。在线清焦后 F102 清焦分支平均燃料气耗量下降  $10.6\%$ ,有一定节能降耗的效果。

#### 3.2 经济效益测算

机械清焦的频率为 9 月 / 次,一个生产周期 4 年需机械清焦 6 次,两台加热炉机械清焦一次需 14d,清焦期间装置负荷降低至  $50\%$ ,延迟焦化装置的吨油利润按 540 元计算,则再加上每次清焦需维修费用

160 万元。则一个生产周期机械清焦停炉损耗和维修花销总计:

$$[540 \times (500 \times 50\%) \times 24 \times 14 + 1600000] \times 6 = 281760000 \text{ 元}$$

在线清焦只需要停一条支路进行清焦,其他五路可以提量  $20\%$ ,即从原来的  $50\text{t/h}$  提至  $55\text{t/h}$ ,每小时处理量只降低了  $25\text{t}$ ,其他消耗主要为注水和燃料气,其中注水来自本装置透平凝结水无需额外花销,燃料气单次花销折合约 420000 元。一个生产周期内需要在线清焦 6 次。则一个生产周期在线清焦损耗和花销总计:

$$(540 \times 25 \times 30 \times 6 \times 2 + 420000) \times 6 = 31680000 \text{ 元}$$

通过对比可算出一个生产周期内,采用在线清焦技术可以为装置增加约 2.5 亿元的收益。

### 4 结语

焦化加热炉的平稳高效工作是延迟焦化装置长周期运行的关键,在线清焦技术的成功应用克服了炉管结焦制约装置生产的这一难题。惠州石化自 2009 年首次使用在线清焦技术,在过后的十余年不断从实践中总结经验规律并结合对结焦过程,对在线清焦程序不断优化、调整操作,目前已具备成熟的操作标准。通过对 2022 年 F-102 清焦前后关键参数的对比,可以看到该在线清焦程序清焦效果显著,最大温降达  $57.7^\circ\text{C}$ ,最小温降  $36.6^\circ\text{C}$ ,各辐射段炉管管壁最高温度点均大幅下降。在线清焦技术的成熟应用为加热炉长周期运行有重大意义,保障了装置的每四年一大修的生产周期,避免了因停炉造成的巨大损失,使装置经济效益最大化,每年可增加效益 2.5 亿元。随着先进焦化操作理念的传播和推广,在线清焦技术逐步会得到更多炼厂的应用。

#### 参考文献:

- [1] 丁书文,周雨泽,王大寿,马海彬.影响延迟焦化加热炉长周期运行的因素与对策[J].炼油技术与工程,2018,48(09):28-32.
- [2] 梁文彬.新型双辐射斜面阶梯炉应用[J].石油化工设备,2010,39(04):64-68.
- [3] 张力,张政伟.延迟焦化加热炉炉管结焦原因分析及对策[J].石油炼制与化工,2010,41(01):21-25.
- [4] 郑战利,孙志钦,霍鲁光,孟庆凯.一种提高延迟焦化加热炉能力及延长运转周期的技术[J].炼油设计,1999(12):23-26.
- [5] 师彦俊.延迟焦化装置加热炉在线蒸汽清焦技术工业应用总结[J].炼油技术与工程,2023,53(01):17-21.

#### 作者简介:

马海彬(1974-),男,汉族,辽宁葫芦岛人,大专,集团公司技能专家,研究方向:石油炼制。