

# 连续重整装置四合一炉运行优化

李小龙, 陈晓林, 石刘春, 王伟

**摘要:** 文章介绍了 3.3Mt/a 连续重整装置四合一加热炉在日常运行过程中出现的问题, 通过燃料气热值核算、加热炉实际热负荷核算, 分析燃烧器与加热炉的热负荷匹配性, 再通过燃烧器技术改造、优化操作等方法, 为加热炉节能降耗、长周期优化运行奠定了良好基础, 为同类装置加热炉的技术管理提供了较好的借鉴经验。

**关键词:** 连续重整; 四合一加热炉; 优化

某炼厂 3.3Mt/a 连续重整装置采用 UOP 工艺技术, 由中石化洛阳石化工程公司进行详细设计, 装置关键设备重整四合一炉采用 UOP 典型的正“U”型方箱炉, 采用自然通风侧壁安装燃烧器, 加热炉共有 184 个燃烧器, 单台燃烧器设计负荷为 2.12 MW。所有物料经辐射炉管加热, 烟气余热由设置在对流段的余热锅炉产中压蒸汽进行回收, 装置设计操作弹性为 60%~115%。

## 1 重整四合一炉运行概况

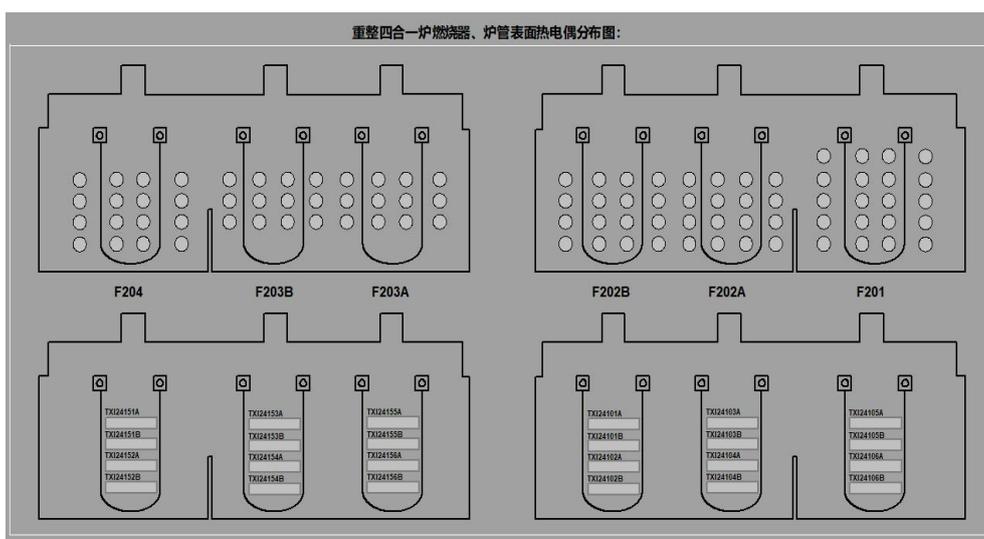


图 1: 重整四合一炉总貌

连续重整装置特点为: 较低氢油比, 较低反应压力, 较高反应温度, 为达到反应深度, 重整四合一炉的操作要求就较为苛刻。如图 1 所示重整四合一炉由进料加热炉 F201、第一中间加热炉 F202A/B、第二中间加热炉 F203A/B、第三中间加热炉 F204 组成, 重整处理负荷长期维持 105% 左右, 四合一炉设计热效率为 89.9%, 燃烧器设计总负荷为 390.08MW。日常运行过程中, 四合一炉燃料气炉前压力控制小于 0.08MPa, 火焰偏软刚度不够, 且极易受风向影响, 甚至会出现火焰舔烧炉管的现象, 为此操作中只能通过加大供风量牺牲热效率来调节燃烧器火焰, 氧含量一般控制 4~5% 左右, 排烟温度 172℃, 热效率长期维持 89.9%。

## 2 燃烧器实际热负荷与加热炉匹配性核算

### 2.1 热负荷与燃料消耗

以 F202AB 为例, 燃烧器改造前燃料气平均用量为 6249.8Kg/h, 燃料气组分见表 1, 根据公

式：
$$gv = \frac{BQ}{3600V}$$

gv—炉膛体积热强度 Kw/m<sup>3</sup>

B—燃料用量 Kg/h

Q—燃料低热值 KJ/Kg

V—炉膛（辐射室）体积 m<sup>3</sup>

燃料气热值计算			
单位低热值 MJ/m <sup>3</sup>	名称	组分(V/V%)	低热值 MJ/m <sup>3</sup>
10.786	氢气	35.0125	377.64
35.88	甲烷	6.8475	245.69
64.35	乙烷	29.3725	1890.12
64.35	乙烯	0.0975	6.27
93.18	丙烷	18.085	1685.16
93.18	丙烯	0.09	8.39
122.77	丁烷	6.775	831.77
123.56	丁烯	0.145	17.92
148.73	碳五	1.3125	195.21
155.66	C6	0.88	136.9808

**表 1：燃料气组成及热值**

由表 1 可得，燃料的体积低发热值为 53.951MJ/m<sup>3</sup>，查化验分析结果得燃料气相对空气密度为 0.856，由此可计算得 F202AB 实际热负荷为：80.17MW，F202AB 燃烧器数量为 64 台，平均每台燃烧器负荷为 1.25MW，而单台燃烧器设计负荷为 2.12MW，燃烧器总负荷为：135.68MW，加热炉设计负荷 83.14MW，燃烧器的总负荷是加热炉设计负荷的 163.19%。

重整进料量长期保持设计的 105%，根据加热炉设计负荷比设计处理量计算得出加热炉实际的理论负荷为 85.68MW，根据加热炉的设计要求允许的操作上限为设计热负荷的 120%，而这个理论值远远小于燃烧器的总负荷。

序号	设备位号	设计负荷 MW	设计处理量 t/h	实际负荷 MW	实际处理量 t/h
1	1050-F201	35.8	470.232	36.89	484.594
2	1050-F202A/B	83.14	470.232	85.68	484.594
3	1050-F203A/B	52.89	471.025	54.49	485.271
4	1050-F204	36.14	471.025	37.23	485.271

**表 2：加热炉热负荷核算**

## 2.2 燃烧器节能改造

燃烧器改造主要是对燃烧器枪头的孔径进行了优化，一级枪头孔径由 2.5mm 减小至 1.6mm，二级枪头孔径：中心孔由 5mm 减小至 2.95mm，辅助燃烧孔由 2\*2.5mm 减小至 2\*1.6mm，优化后单台燃烧器设计负荷为 1.63MW，加热炉出口温度满足工艺生产要求，燃料气炉前压力 0.16MPa，火焰刚劲有力，F202AB 燃料气平均用量 5950Kg/h。四合一炉燃烧器优化后，燃料气用量减少 0.385t/h，每年累计节省燃料气 3234 吨，氧含量稳定在 2.5%，加热炉热效率维持 90.4 以上%。

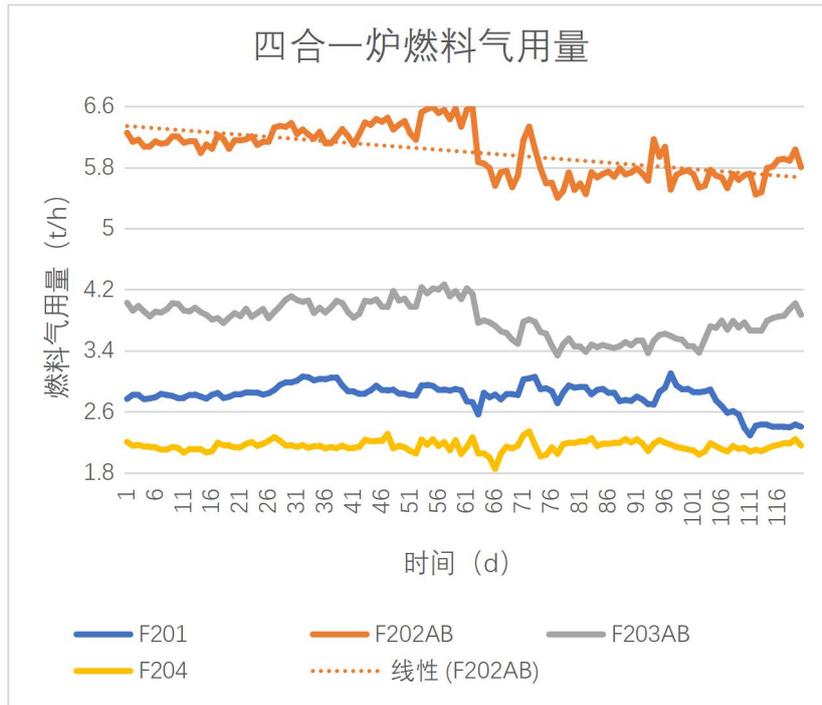


图 2：燃烧器改造前后燃料气用量

### 2.3 改造后加热炉热效率核算

根据反平衡法热效率计算公式

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_p}{Q_0}\right) \times 100\%$$

$\eta$  —— 加热炉综合热效率，%

$Q_0$  —— 总供给能量，KJ/Kg 燃料

$Q_1$  —— 排烟损失热量，KJ/Kg 燃料

$Q_2$  —— 不完全燃烧损失热量，KJ/Kg 燃料

$Q_3$  —— 表面散热损失热量，KJ/Kg 燃料

$Q_p$  —— 附属设备耗能，KJ/Kg 燃料

在排烟温度、不完全燃烧损失和外壁散热损失不变时，加热炉热效率随过剩空气系数加大而降低，降低过剩空气系数可以有效地提高加热炉的热效率。

燃烧器枪头更换完成后，四合一炉炉膛氧含量有了极大的改观，从更换前 3.5%-4% 下降到 2.5% 以下，加热炉在线分析及月度检测中 CO 均为 0。四合一炉炉膛氧含量的下降，使热效率从 89.9% 提高至 90.4%。

设备位号	燃料气用量 Kg		加热炉热效率 %		氧含量 %	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
F201	2788	2799	89.91	90.52	3.92	2.37
F202AB	6249.8	5950.2	90.0	90.3	2.85	2.32
F203AB	3902.7	3817.8	90	90.47	3.47	2.65
F204	2153.3	2145.1	90	90.47	3.59	2.68

表 3：燃烧器优化前后对比

## 3 四合一炉优化运行管理

### 3.1 操作优化

重整四合一炉辐射室炉管采用正“U”型排列，材质为 A335 P9 (1Cr9Mo)，1Cr9Mo 具有较好的抗氧化、高温强度和抗硫化物腐蚀性能。重整平均反应压力为 0.35MPa，氢分压较低，正常生产中，为钝化炉管和反应器内件，防止丝状碳的形成，大型重整需保持反应进料中硫含量 0.5~1ppm，因此炉管受到的氢腐蚀相对较小，重整反应温度为 535℃，由于操作温度较高，炉管高温氧化腐蚀较为严重，1Cr9Mo 的最高使用温度为 705℃，最高抗氧化腐蚀温度为 635℃。

重整四合一炉炉管设有表面热电偶用于正常生产过程中监测炉管温度，每个炉膛设置 4 组热电偶，均匀分布于工艺介质出口侧炉管上。2021 年 12 月，F204 调整操作，熄灭部分燃烧器，保证在用燃烧器炉前燃料气压力大于 0.1MPa，调整后，燃烧器火焰刚度得到改善，氧含量 3.5~4.5%。由于部分燃烧器停用，炉管受热不均，局部过热，部分炉管表面温度短时间超过炉管材质最高使用温度，瞬时温度达 670℃，造成炉管表面氧化爆皮。



图 3：炉管表面爆皮及燃烧器更换前后燃烧情况对比

燃烧器优化后，所有炉膛按多火嘴、齐火焰、短火苗标准进行调整，氧化爆皮处未见扩大、恶化，炉管表面最高温度稳定在 630℃，火焰刚度和火焰舔烧炉管现象得到改善。四合一炉烟气离开辐射室设计温度为 796℃，烟气全部热量由对流段余热锅炉产 3.5MPa 中压蒸汽进行回收，加热炉过剩空气系数过大时，大量废热随烟气被带出，饱和蒸汽温度超 450℃，饱和蒸汽管线选用材质为 20G，20G 在 450℃ 以下环境使用其抗氧化性、韧性、塑性等较好，当温度超过 450℃ 会产生石墨化。炉膛高温、高氧含量操作影响设备安全运行，燃烧器优化后，维持相对低的过剩空气系数操作，饱和蒸汽温度稳定在 440℃ 内。

### 3.2 维修检查

燃烧器火盆砖由 3 瓣拼接而成，拼接缝采用高温耐火胶泥填充粘结，加热炉长期运行过程中，火盆砖因固定螺栓松动而发生移位，导致拼接缝处胶泥开裂，火焰燃烧分叉。2023 年 3 月装置停工检修期间，更换损伤严重火盆砖 10 台，对所有燃烧器火盆砖固定螺栓紧固，修复火盆砖拼接缝。

四合一炉辐射室炉管有三种规格，F201：φ141.3\*6.55，F202AB：φ101.6\*5.74，F203AB：φ141.3\*6.55，F204：φ168.3\*7.11，炉管及管件设计腐蚀裕量为 1.6mm。2023 年 3 月装置停工检修期间，清理四合一炉辐射室炉管表面爆皮，对全部辐射室炉管进行硬度、厚度检测，氧化爆皮处炉管厚度在规定腐蚀范围内，硬度无超标。

编号	硬度 HB	测厚 mm	编号	硬度 HB	测厚 mm
1050-F202A-81-7	222	5.3	1050-F202A-84-5	214	5.2
1050-F202A-38-2	169	5.6	1050-F202A-9-3	115	5.4
1050-F202A-6-9	122	5.5	1050-F202A-14-2	138	5.3
1050-F202A-7-1	117	5	1050-F202A-44-4	170	5.1
1050-F202A-88-7	231	5.3	1050-F202A-47-4	116	5

表 4：炉管硬度及测厚数据

#### 4 结论

通过测算加热炉的实际热负荷需求、燃烧器实际热负荷能力、及燃料气的实际热值，发现了燃烧器与加热炉匹配性问题，通过燃烧器节能改造与优化操作运行，四合一炉炉膛负压问题未得到有效改善，辐射室内气流分布不均匀，容易受环境风向影响的问题得到了有效解决，为加热炉安稳长满优运行奠定了基础。

#### 参考文献

- [1] 郭正辉 . 连续重整四合一加热炉设计 [J] . 河南石油, 2003, 17( 6) 60—62

作者简介：李小龙，男，毕业于兰州石化职业技术学院高聚物生产技术专业，现任恒逸实业（文莱）有限公司炼油三部设备工程师，主要从事炼油装置设备管理工作。