

连续重整装置余热锅炉产汽模拟优化与经济效益分析

郭子康 (中海石油宁波大榭石化有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 某石化公司连续重整装置设计年处理能力为 80 万 t, 为进一步高效回收四合一反应炉的工艺余热, 装置配套设置了余热锅炉系统。本文基于 ASPEN Hysys 流程模拟软件, 构建了余热锅炉系统的工艺模型, 结合实际运行数据对模型进行校验与优化分析。通过调整关键操作参数, 在保证蒸汽品质合格的前提下, 实现了中压蒸汽产量的有效提升。2023 年 7 月实际运行数据显示, 装置中压蒸汽产量月增加 1038t, 月经济效益达 6.11 万元, 验证了模拟优化的可行性与实效性。

关键词: 流程模拟; 余热锅炉; 中压蒸汽; 连续重整; 经济效益

中图分类号: TE966

文献标识码: B

文章编号: 1674-5167 (2025) 033-0085-03

Simulation Optimization and Economic Benefit Analysis of Steam Generation in the Waste Heat Boiler of Continuous Reforming Unit

Guo Zikang (CNOOC Ningbo Dexie Petrochemical Co., Ltd., Ningbo Zhejiang 315000, China)

Abstract: A petrochemical company's continuous reforming unit has a designed annual processing capacity of 800,000 tons. To further efficiently recover the process waste heat from the four-in-one reaction furnace, the unit is equipped with a waste heat boiler system. Based on ASPEN Hysys process simulation software, this paper constructs a process model of the waste heat boiler system and validates and optimizes the model using actual operational data. By adjusting key operating parameters, the medium-pressure steam production was effectively increased while ensuring the quality of the steam met standards. Actual operational data from July 2023 showed a monthly increase of 1,038 tons in medium-pressure steam production, with a monthly economic benefit of 61,100 yuan, verifying the feasibility and effectiveness of the simulation optimization.

Keywords: Process simulation; waste heat boiler; medium-pressure steam; continuous reforming; economic benefits

1 前言

1.1 装置介绍

某石化公司连续重整装置由北京设计院设计, 初始设计生产能力为 60 万 t/a; 2009 年进行扩能改造, 生产能力增加至 80 万 t/a, 以蒸馏石脑油、加氢精制石脑油、加氢改质石脑油和加氢裂化石脑油等低辛烷值石脑油为原料, 生产高辛烷值汽油 (RON 为 101)、C6 组份、液化气和燃料气, 并副产氢气^[1], 是石化企业中重要的二次加工与清洁生产单元。随着装置运行年限的增加以及全厂节能要求的提高, 原有能量系统存在进一步优化的空间, 尤其是反应炉高温烟气的余热回收环节。

1.2 余热锅炉流程介绍

余热锅炉系统是连续重整装置重要的能量回收单元, 其核心作用是将四合一反应炉产生的高温烟气余热转化为中压蒸汽, 供装置内使用或输出至全厂蒸汽管网。系统主要设备包括除氧器 (D-911)、中压锅炉给水泵 (P-901A/B)、锅炉热水循环泵 (P-902A/B)、省煤器、中压汽包 (D-206)、蒸发受热面、过热器及减温阀 (M-206) 等。

具体流程如下: 外来除盐水首先进入除氧器 (D-911), 在低压蒸汽加热作用下完成热力除氧, 去除

水中溶解氧, 防止设备腐蚀。除氧水经中压锅炉给水泵 (P-901A/B) 加压后分为两路: 一路回流至除氧器用于调节液位与温度, 另一路与来自锅炉热水循环泵 (P-902A/B) 的部分热水在混合器 (M-205) 中混合, 随后进入省煤器预热。预热后的水进入中压汽包 (D-206), 经循环泵加压后, 大部分热水流经蒸发受热面吸收烟气余热, 部分汽化后返回汽包进行汽水分离。饱和蒸汽进入过热器进一步加热, 最终通过减温阀调节温度后, 输出符合工艺要求的中压蒸汽^[2]。

2 建模优化

2.1 模型建立与校验

为准确分析系统运行特性并探索优化潜力, 选用 ASPEN Hysys V11 流程模拟软件建立余热锅炉系统的稳态模型。考虑到系统介质以水和水蒸气为主, 物性方法选取适用于水蒸气体系的 ASME Steam 方法, 系统中仅添加水 (H₂O) 作为组分。模型中采用加热器 (Heater) 模块模拟烟气与工质之间的换热过程, 包括省煤器、蒸发段与过热器; 采用减压阀 (Valve) 模拟中压蒸汽出装置前的压力调节过程^[3]。

利用 2023 年 6 月 9 日的实际运行数据对模型进行初始化与校验, 包括中压蒸汽压力、温度、除盐水量、低压蒸汽流量等关键参数。如表 1 所示, 模拟

结果与实际运行数据高度吻合，各参数误差均在合理范围内，验证了模型的准确性与可靠性，可用于后续的工况分析与优化研究。得到以下可以用于计算的模型，如图1所示。

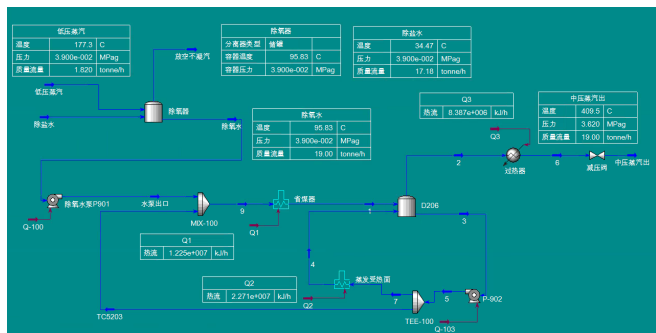


图1 连续重整装置余热锅炉模型
操作数据与模型数据对比如表1所示：

表1 连续重整装置余热锅炉模型数据与操作数据对比表

参数	操作数据	模拟数据	差值
中压蒸汽压力 (MPa)	3.62	3.62	0
中压蒸汽温度 (°C)	410	409.5	0.5
减压前中压蒸汽压力 (MPa)	3.69	3.69	0
除盐水流量 (t/h)	17.18	17.18	0
低压蒸汽流量 (t/h)	1.82	1.82	0
中压蒸汽流量 (t/h)	19	19	0

由表1可以看出模拟操作条件与实际工况条件基本一致，可以使用此模型进行流程模拟。

2.2 优化策略与模拟分析

由图1可以看出，产汽流程是由17.18t/h的除盐水经由1.82t/h低压蒸汽在除氧器进行加热、除氧后形成除氧水经过省煤器、蒸发受热面以及过热器加热最终生成19t/h、3.62MPa、410℃的中压蒸汽，中压蒸汽又称3.5MPa蒸汽，此前中压蒸汽压力控制较高，工艺卡范围为2.8~3.65MPa，已接近上限值，为提升产汽量、提高产汽效率，在余热回收热量(Q1+Q2+Q3)不变的情况下，尝试在模型中提高除氧水流量，进而提高中压蒸汽产汽量，在余热回收热量(Q1+Q2+Q3)不变的情况下，需加热的除氧水增多，将会降低产汽温度以及产汽压力。因此在保证产汽压力、温度合格的情况下合理提升除氧水流量是本次流程模拟的关键。模拟过程如下所示：

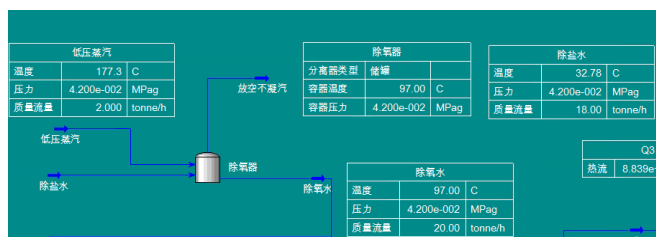


图2 除氧水、除盐水、低压蒸汽模拟

①提高除氧水流量至20t/h、将除盐水流量提高至18t/h、低压蒸汽流量提高至2t/h。

由图2所示除氧水调整至20t/h，除盐水调整至18t/h，低压蒸汽调整至2t/h，由此带来的变化为，除氧器D901操作压力由0.039MPa提升至0.042MPa，操作温度由96℃提升至97℃，均在操作调整范围内。

②提高中压蒸汽出装置流量至20t/h，降低减压前中压蒸汽压力至3.65MPa。

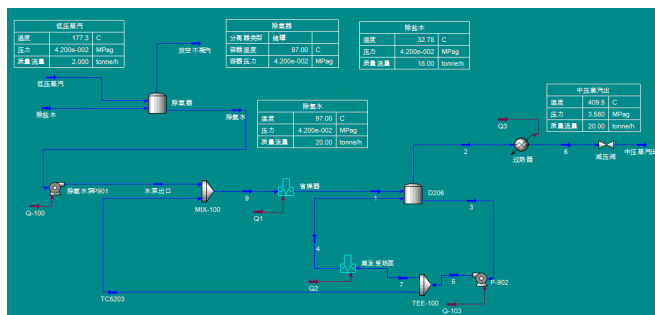


图3 中压蒸汽出装置压力、流量模拟

由图3所示中压蒸汽流量为20t/h，中压蒸汽减压前压力为3.65MPa，中压蒸汽减压后压力为3.58MPa，均满足操作条件。依此模型余热锅炉单元可以多产中压蒸汽1t/h，多消耗除盐水0.82t/h，多消耗低压蒸汽0.18t/h。利用本月公用工程单价计算为：1*150-0.82*9.62-0.18*177.31=110.2元/h，因此，模拟方案具备创造效益的潜质^[4]。

3 实施应用

通过流程模拟后，7月份将中压蒸汽压力由3.62MPa降低至3.58MPa，流量由19t/h提升至20t/h。与调整前的蒸汽产出量数据对比如表2所示。

表2 调整前后中压蒸汽操作条件对比表

	调整前 (6月)	调整后 (7月)
中压蒸汽总产出量 (t)	13941	14979
中压蒸汽每小时产出量 (t/h)	19.36	20.13
中压蒸汽压力 (MPa)	3.62	3.58
中压蒸汽温度 (°C)	410	407
燃料气消耗 (t)	3958	3959

由表2可以看出，在燃料气消耗未有较大变化的情况下，中压蒸汽产出一个月共增加1038t，每小时增加0.77t/h，中压蒸汽压力、温度均满足操作条件与外送条件，说明优化方案在工业实践中取得了预期效果。

4 效益分析

4.1 直接经济效益评估

经过操作参数优化调整后，2023年7月实际运行数据表明，连续重整装置余热锅炉系统中压蒸汽月产量增加1038t，小时平均产量提升0.77t。根据该石化

公司 2023 年 7 月公用工程结算单价（自产蒸汽 150 元/t、低压蒸汽 177.31 元/t、除盐水 9.62 元/t），可计算出每小时产生的直接经济效益为：

$$0.77 \times 150 - 0.82 \times 9.62 \times 0.77 - 0.18 \times 177.31 \times 0.77 \\ = 84.854 \text{ 元/h}$$

按月运行时间 720h（30 天 × 24h）计算，月直接经济效益为 $84.854 \times 720 = 6.11$ 万元。这一效益计算仅考虑了蒸汽产量的增加和辅助介质消耗的成本，尚未计入因系统优化带来的其他隐性收益。

从投资回报率角度看，本次优化属于运营优化技改，不涉及大型设备投资，主要成本为流程模拟软件使用费及技术人工工时费，总投资成本约为 5 万元。按此计算，该优化项目的投资回收期仅为 0.82 个月（5/6.11），展现出极佳的经济性。相较于传统设备改造类项目 2-5 年的投资回收期，运营参数优化具有投资小、见效快的显著优势。

4.2 全生命周期经济效益预测

考虑到余热锅炉系统的持续运行特性，有必要对优化措施的全生命周期经济效益进行评估。假设维持当前操作条件，按年平均运行时间 8000h 计算，年度直接经济效益可达 $84.854 \times 8000 = 67.88$ 万元。

在设备剩余寿命周期内（通常为 10-15 年），以保守的 10 年计算，不考虑蒸汽价格波动因素，累计经济效益可达 678.8 万元。若考虑蒸汽价格年均 3% 的上涨趋势，净现值计算显示，该优化措施在 10 年内的折现累计效益将超过 500 万元。

全生命周期经济效益评估不仅关注收益，还需考虑潜在的维护成本增加。本次优化调整在设备设计允许范围内进行，对系统关键设备如锅炉管束、泵体等无负面影响，不会导致维护成本显著增加，这进一步保证了全生命周期经济效益的可靠性。

4.3 节能与减排效益量化

从能源转换效率角度看，优化后系统在不增加燃料消耗的情况下，每月多产出 1038t 中压蒸汽，相当于节约标准煤约 124.6t（按每吨蒸汽耗标煤 0.12t 计算）。年节约标准煤约 1495t，节能效果显著。

在减排方面，根据标准煤碳排放系数（2.6t CO₂/吨标煤）计算，该项优化措施可实现年二氧化碳减排约 3887t，相当于 215 辆普通家用轿车一年的碳排放量。这一减排量在碳交易市场逐步成熟的背景下，可转化为直接的碳资产收益。按当前全国碳市场 60 元/t 的碳交易均价计算，年碳收益约为 2.33 万元，随着碳价长期看涨趋势，这一收益将进一步提升^[5]。

此外，优化后系统提高了能源利用效率，相应减少了硫化物、氮氧化物等污染物的排放，环境效益显

著。

4.4 综合价值评估

除直接经济效益外，本项目还带来了多方面的附加价值：一方面，通过流程模拟优化，企业积累了宝贵的技术经验，培养了一批掌握先进模拟工具的技术人才，为后续其他装置的优化奠定了基础；另一方面，项目实施的示范效应显著，为企业内部推广流程模拟技术提供了成功案例。

从管理角度看，本项目实现了精细化管理的升级，通过数据驱动决策，改变了传统依赖经验调整的操作模式，提升了生产管理的科学化水平。此外，项目的成功实施还增强了企业的绿色发展形象，为企业在碳约束时代赢得了竞争优势。

综合评估，连续重整装置余热锅炉产汽优化项目不仅创造了直接经济效益，还在节能降耗、减排环保、技术积累和管理提升等方面产生了广泛价值，是多赢的技改典范。这种“软技改”模式投资小、风险低、回报高，特别适合在当前资金压力较大的工业环境中推广应用。

5 结论

本文基于 ASPEN Hysys 流程模拟软件，对连续重整装置余热锅炉系统进行了建模与优化分析。研究表明，在烟气余热总量不变的条件下，通过适度提高除盐水流量、微调中压蒸汽输出压力，可在保证蒸汽品质的前提下有效提升中压蒸汽产量。2023 年 7 月的工业实践表明，优化后中压蒸汽月增产 1038t，小时产量提升 0.77t，月经济效益达 6.11 万元，验证了模拟优化的可行性与实效性。

未来，可进一步考虑以下方向以深化系统节能潜力：一是多变量协同优化，结合烟气温度、汽包液位、循环水量等参数，构建多目标优化模型；二是动态模拟分析，研究负荷波动条件下的系统响应特性，提高操作弹性；三是设备改进潜力评估，如采用高效换热元件或优化受热面布置，进一步提升余热回收效率。

参考文献：

- [1] 李成栋. 催化重整装置技术问答 [M]. 北京：中国石化出版社，2007:390-391.
- [2] 张雯清. 新型余热锅炉控制系统 [J]. 电子世界，2021(01): 116-117+120.
- [3] 严梦月，康英伟. BHDB-M701F4-Q1 余热锅炉动态建模与仿真 [J]. 现代制造技术与装备，2024,60(03):38-43.
- [4] 王曦宏. 连续重整反应加热炉烟气余热回收方案对比分析 [J]. 石油化工设备技术，2022,43(03):56-62+7.
- [5] 韩永青. 连续重整装置节能优化分析 [J]. 中外能源，2025,30(05):101-108.