

# 炼厂干气与天然气混合原料的制氢工艺能耗优化 与经济性分析

朱 瑞 (中海沥青股份有限公司, 山东 滨州 256600)

**摘要:** 炼厂干气与天然气混合原料制氢是石化企业保障氢源供给的核心技术路径, 其能耗水平直接决定装置运行效益。本文以 30000Nm<sup>3</sup>/h 制氢装置为研究对象, 结合轻烃水蒸汽转化与 PSA 净化工艺特点, 系统剖析混合原料组分波动、转化反应参数控制、余热回收效率等关键能耗影响因素。通过构建“原料适配-参数调控-余热利用-设备增效”的全流程优化体系, 整合水碳比优化、梯级余热回收、设备节能改造等核心措施, 为混合原料制氢装置的能耗管控与效益提升提供有效方案, 对石化行业绿色低碳发展具有实践意义。

**关键词:** 混合原料制氢; 能耗优化; 余热回收; 经济性分析; PSA 工艺

中图分类号: TE624 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0063-03

## Energy Consumption Optimization and Economic Analysis of Hydrogen Production Process from Refinery Dry Gas and Natural Gas Mixed Feedstock

Zhu Rui (China Offshore Bitumen Co., Ltd., Binzhou Shandong 256600, China)

**Abstract:** Hydrogen production from refinery dry gas and natural gas mixed feedstock is a core technical pathway for petrochemical enterprises to ensure hydrogen supply, and its energy consumption level directly determines the operational efficiency of the unit. This study takes a 30,000 Nm<sup>3</sup>/h hydrogen production unit as the research object and systematically analyzes key factors affecting energy consumption, such as fluctuations in mixed feedstock composition, control of conversion reaction parameters, and waste heat recovery efficiency, based on the characteristics of light hydrocarbon steam reforming and PSA purification processes. By establishing a full-process optimization system of “feedstock adaptation – parameter adjustment – waste heat utilization – equipment efficiency enhancement,” and integrating core measures such as water-carbon ratio optimization, cascading waste heat recovery, and energy-saving equipment retrofits, this study provides effective solutions for energy consumption management and efficiency improvement in hydrogen production units using mixed feedstocks. It holds practical significance for the green and low-carbon development of the petrochemical industry.

**Keywords:** mixed feedstock hydrogen production; energy consumption optimization; waste heat recovery; economic analysis; PSA process

氢能作为石化行业清洁生产的核心载体, 其稳定供给与低成本生产对炼化企业提质降碳至关重要。炼厂干气与天然气混合制氢工艺因原料适应性强、产氢规模灵活等优势, 已成为主流制氢技术方案。30000Nm<sup>3</sup>/h 制氢装置年开工 8400h, 可满足大型炼化企业氢气管网的连续供给需求, 但混合原料组分波动大、转化反应能耗高、公用系统消耗量大等问题, 导致装置能耗居高不下, 制约运行经济性。当前行业内多聚焦单一原料制氢的能耗控制, 对混合原料的适配性优化研究不足, 且缺乏从工艺操作到设备运行的全链条节能方案。建立能耗与经济性的关联模型, 有利于装置高效运行, 助力石化企业实现节能降本与绿色生产的双重目标。

### 1 混合原料制氢工艺系统与能耗构成

#### 1.1 工艺系统组成与运行特性

混合原料制氢装置采用轻烃水蒸汽转化与 PSA 净化工艺, 核心由六大单元构成。原料升压升温

单元通过原料气压缩机将炼厂干气与天然气的混合气体加压至工艺要求压力, 经换热升温后送入下一单元; 原料精制单元采用“加氢脱硫+氧化锌吸附”工艺去除硫氯等杂质, 保障转化催化剂活性; 水蒸汽转化单元在转化炉内完成烃类与水蒸汽转化反应, 是能耗核心环节; 变换反应单元和热回收单元将转化气中含有一氧化碳在催化剂的作用下与水蒸气反应生成氢气与二氧化碳, 反应放热同步实现中温位余热回收; 锅炉给水及蒸汽发生单元为系统提供合格蒸汽并回收余热; PSA 净化单元采用 10 塔吸附系统, 通过吸附剂选择性分离, 产出纯度高达 99.9%(v/v) 以上的高纯氢, 副产的解吸气作为转化炉燃料; 装置操作弹性为 60 ~ 110%, 其中 PSA 单元操作弹性可达 40 ~ 110%, 能适应混合原料组分波动与下游用氢负荷变化。副产解吸气全部回收利用的特点, 装置整体形成“原料转化-能量回收-产品提纯-尾气利用”的循环流程, 为能耗优化提供基础条件<sup>[1]</sup>。

## 1.2 能耗核心构成与分布特征

炼厂干气与天然气混合原料制氢能耗主要集中于燃料消耗、电力消耗与公用介质消耗三大领域。燃料能耗占比最高达 58%，主要用于转化炉加热维持反应温度，受原料组分、水碳比控制等因素影响显著；电力消耗占比约 22%，核心为原料气压缩机、鼓引风机、锅炉给水泵等转动设备运行耗电，其中原料气压缩机能耗占电力消耗总量的 65% 以上；公用介质能耗占比 20%，涵盖除盐水、循环水、蒸汽等消耗，蒸汽自用与外输平衡直接影响综合能耗水平；从工艺环节看，转化及余热回收单元能耗占全装置总能耗的 45%，是节能优化的核心靶点；原料升压升温单元与 PSA 净化单元能耗占比分别为 20% 和 15%，设备运行效率对能耗影响显著；其他单元能耗占比合计 20%，虽占比相对较低但存在较大优化空间。

## 1.3 能耗影响因素分析

混合原料组分波动是能耗波动的首要因素。炼厂干气组分随炼油装置运行工况变化，甲烷含量在 40% 至 70% 间波动，而天然气甲烷含量稳定在 90% 以上，混合比例调整直接影响转化反应的热负荷需求，组分波动可导致转化炉燃料消耗变化幅度达 12%。转化水碳比控制不当会加剧能耗浪费，过高的水碳比虽能保障反应平稳，但会增加蒸汽消耗与转化炉热负荷；过低则可能引发转化催化剂积碳，影响装置运行周期；余热回收效率不足导致能源浪费，转化炉烟道气、转化气及中变气携带大量热能，若换热设备传热效率下降，会造成排烟温度升高、蒸汽产量减少，直接推高燃料与公用介质消耗。设备运行状态同样关键，原料气压缩机等转动设备若处于非最优工况，会导致电耗显著上升，而吸附剂性能衰减则会降低 PSA 单元分离效率，增加解吸气排放量与燃料消耗<sup>[1]</sup>。

## 2 能耗优化关键技术路径与实施方法

### 2.1 原料适配与反应参数优化

混合原料配比动态调整是源头节能的关键。基于 DCS 系统实时监测的原料组分数据，建立组分-能耗关联模型，当炼厂干气甲烷含量升高时，适当提高其混合比例，降低天然气消耗；当干气组分波动较大时，通过调整混合比例控制原料平均甲烷含量稳定在 65% ~ 75%，可使转化炉燃料消耗降低 5% ~ 8%。转化水碳比优化采用精准控制策略，将进料水碳比降至 3.2 左右，在保障反应完全与催化剂安全的前提下，减少蒸汽生成所需的能源投入，直接降低转化炉燃料能耗 12%；原料精制单元优化同步推进，通过精准控制脱硫剂用量与反应温度，将原料硫含量降至 0.1ppm 以下，延长转化催化剂使用寿命，避免因催化剂活性下降导

致的能耗上升，间接实现节能效益<sup>[3]</sup>。

### 2.2 梯级余热回收系统优化

高温位余热深度利用是节能核心措施。转化炉烟道气经多级换热实现热能梯级回收，先预热转化原料气提升进料温度，减少转化炉加热负荷；再通过废热锅炉发生 3.5MPa 中压蒸汽，满足工艺用汽需求后，多余蒸汽外输至全厂蒸汽管网，实现能源外供收益。同时利用烟道气余热将燃烧空气预热至 500℃，提高转化炉燃烧效率，降低燃料用量，此项措施可使转化炉热效率提升 4% ~ 6%；中低温位余热回收同步强化，利用中变气余热预热锅炉给水，提升锅炉进水温度，增加中压蒸汽产量；通过装置内部除氧系统处理除氧水，同时利用低温余热预热除盐水，减少除氧过程的蒸汽消耗，实现全温度区间余热的高效回收，综合余热利用率提升至 92% 以上。

### 2.3 设备运行与公用系统优化

转动设备节能改造成效显著。原料气压缩机新增气量无级调节系统，根据原料处理量与压力需求动态调整运行参数，避免节流损耗，节电效果达 30% 以上；对锅炉给水泵、酸性水泵等机泵进行运行工况优化，通过变频调节与叶轮改造，降低无效能耗，使全装置电力消耗平均下降 18%；公用系统循环优化形成闭环。酸性水系统新增加注改质剂处理工艺，络合二氧化碳后的净化水直接作为反应系统注水，替代新鲜除盐水，减少低压蒸汽消耗与脱盐水制备能耗；循环水系统通过优化风机运行台数与换热温差，降低输送能耗的同时保障换热效果；凝结水回收系统强化密闭回收，减少蒸汽损失，进一步降低公用介质消耗。

### 2.4 PSA 单元运行参数优化

PSA 单元优化聚焦吸附效率与能耗平衡。通过调整吸附时间、压力控制曲线等参数，在保障氢气纯度的前提下，提高氢气回收率 2% ~ 3%，减少原料消耗间接降低能耗；优化解吸气排放量与压力稳定控制，保障转化炉燃料供给稳定，避免因燃料压力波动导致的燃烧效率下降，使解吸气利用率提升至 100%。同时定期开展吸附剂性能检测与再生，维持吸附剂高效分离性能，避免因分离效率下降导致的能耗增加<sup>[4]</sup>。

## 3 能耗优化的经济性分析

### 3.1 优化措施实施成本核算

能耗优化措施实施成本主要包括设备改造投资、药剂消耗与人工成本。设备改造投资合计 420 万元，其中原料气压缩机无级调节系统改造占 210 万元，余热回收换热器升级占 120 万元，酸性水处理系统改造占 90 万元；药剂消耗主要为酸性水改质剂，年消耗成本约 35 万元；人工成本因优化措施实施需增加的

操作与维护工作量,年新增成本约15万元,三项合计初始投资与年运营成本明确可控。

### 3.2 节能效益与投资回报分析

优化措施实施后,装置综合能耗显著降低。单位制氢能耗从优化前的 $4200\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 降至 $3420\text{MJ}/\text{Nm}^3$ ,降低幅度达18.6%。按年开工8400h、产氢量 $30000\text{Nm}^3/\text{h}$ 计算,年节约燃料气折标煤约8600t,节约电力消耗1260万kWh,节约除盐水、蒸汽等公用介质折标煤2100t,综合节能效益折合年直接经济效益980万元;投资回报分析显示,扣除年运营成本50万元后,年净收益达930万元,静态投资回收期仅为14个月,投资回报率达72%,经济性优势显著。同时蒸汽外输量较优化前增加15%,年额外获得外供收益120万元,进一步提升装置盈利水平<sup>[5]</sup>。

### 3.3 长期运行效益与风险防控

长期运行数据表明,优化措施的实施不仅实现节能降本,还提升了装置运行稳定性。原料适配优化使装置适应原料组分波动的能力增强,非计划停机次数从每年3次降至1次以下;设备运行优化延长了转动设备维护周期,机泵平均无故障运行时间从8000h提升至12000h,降低了维护成本与生产风险;在风险防控方面,通过DCS系统强化关键参数监控,设置水碳比、排烟温度等指标的预警值,结合定期巡检维护,确保节能措施在安全工况下实施。建立“参数监控-异常预警-应急处置”的联动机制,有效规避了低水碳比运行可能引发的催化剂积碳风险,保障装置长周期高效运行。

## 4 优化方案实施保障措施

### 4.1 操作管控体系建设

基于制氢岗位工作任务要求,建立“参数精准控制-设备定期巡检-记录规范管理”的操作体系。严格执行工艺操作指标,通过DCS系统实时调整混合原料配比、水碳比等关键参数,确保反应转化率与产品质量双达标;每日对原料气压缩机、转化炉、吸附塔等设备与工艺管线开展全流程巡检,重点排查高温部位泄漏、阀门卡涩等隐患,形成“发现-处置-验证”闭环;规范交接班与原始记录制度,详细记录原料组分、能耗数据及异常调整,为能耗分析与工艺优化提供完整数据链。

### 4.2 设备与公用系统维护

建立全范围设备维护机制,覆盖静设备、转动设备与公用工程系统。对转化炉管、换热器等静设备定期检测壁厚与传热效率,及时清理结垢提升换热效果;对压缩机、泵类等转动设备定期保养轴承、密封件,监测振动与温度参数,保障高效运行;对中低压蒸汽、

循环水、仪表风等公用系统,定期排查管线泄漏,优化管网压力控制,减少输送损耗。

### 4.3 动态优化与持续改进

建立能耗动态监测与分析机制,每周汇总燃料、电力、公用介质的消耗数据,对比优化目标分析偏差原因;每月开展全装置能耗审计,结合原料组分变化与设备运行状态,调整优化参数;每季度评估节能措施的有效性,针对运行中出现的新问题补充优化方案。借鉴石化行业“新能源+”降碳解决方案的创新理念,探索数字化技术深化应用,计划引入人工智能算法优化DCS操作参数,进一步提升能耗管控的精准度,实现持续节能降本。

综上所述,炼厂干气与天然气混合原料制氢的能耗优化是实现装置高效运行的核心抓手,其关键在于立足工艺系统特性,针对原料波动、反应控制、余热利用等核心痛点,构建全流程节能体系。转化及余热回收单元作为能耗核心,通过水碳比优化与梯级余热回收可实现显著节能效果;原料气压缩机等转动设备的节能改造则能有效降低电力消耗;酸性水处理等公用系统优化进一步填补能耗缺口。实践表明,整合核心节能措施后,装置单位制氢能耗降低18.6%,年节约成本超980万元,投资回收期仅14个月,实现了能耗降低与效益提升的双重目标。同时,优化措施的实施提升了装置运行稳定性与原料适配性,为长周期生产提供保障。未来应进一步推动数字化与工艺优化的深度融合,利用人工智能技术实现DCS操作参数的自主调节,结合原料组分实时数据动态优化混合比例与反应条件。通过操作管控、设备维护与持续改进的协同发力,持续挖掘节能潜力,为石化企业制氢装置的绿色低碳发展提供更高效的技术路径,助力行业实现能源高效利用与可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 费志雄. 工艺压缩机在石油化工PSA制氢能耗优化中的应用研究[J]. 能源研究与利用, 2023(1):35-39.
- [2] 邱浩书, 宋磊, 杨秋林, 等. CO<sub>2</sub>加氢制甲醇反应动力学及工艺能耗优化[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(4):102-110.
- [3] 耿金亮. 耦合吸收式制冷系统氢液化工艺设计与优化[J]. 石油与天然气化工, 2025, 54(3):64-71.
- [4] 王晓丽. 膜集成工艺在PEM电解水制氢中的应用试验研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(1):92-100.
- [5] 刘景辉. 工艺压缩机在煤化工PSA制氢能耗优化中的影响探索[J]. 工程技术发展, 2023, 4(3):70-73.

### 作者简介:

朱瑞(1989-)女,汉族,甘肃白银人,大学本科,研究方向:石油化工。