

柴油加氢装置节能降耗工艺措施的应用与效益分析

于梦竹（中国石化海南炼油化工有限公司，海南 洋浦 578001）

摘要：在当今能源日益紧张和环保要求不断提高的背景下，柴油加氢装置的节能降耗成为炼油企业关注的重点。本文主要探讨了柴油加氢装置节能降耗工艺措施的应用情况并对其产生的效益进行了分析。阐述了节能降耗对于提高装置运行效率、降低生产成本以及减少环境污染的重要意义，旨在为炼油企业在柴油加氢装置的节能改造和优化运行提供参考和借鉴。

关键词：柴油加氢装置；节能降耗工艺措施；应用；效益分析

中图分类号：TE624.4+3 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)021-0037-03

Application and benefit analysis of energy saving and consumption reduction process measures in diesel hydrotreating unit

Yu Mengzhu (Sinopec Hainan Refining & Chemical Co., LTD., Yangpu Hainan 578001, China)

Abstract: In the context of increasing energy scarcity and rising environmental protection requirements, energy conservation and emission reduction in diesel hydrotreating units have become a key focus for refining companies. This paper primarily examines the application of energy-saving and emission-reduction measures in diesel hydrotreating units and analyzes their benefits. It highlights the significant importance of these measures in improving unit operational efficiency, reducing production costs, and minimizing environmental pollution. The aim is to provide reference and guidance for refining companies in the energy-saving renovation and optimized operation of diesel hydrotreating units.

Key words: diesel hydrogenation device; energy saving and consumption reduction process measures; application; benefit analysis

全球经济的快速发展对能源需求持续增长，同时环境保护的压力也日益增大，柴油作为一种重要的石油产品广泛应用于交通运输、工业生产等领域。柴油加氢装置在柴油生产过程中起着关键作用，可以提高柴油的质量并减少硫、氮等杂质含量以满足日益严格的环保标准。但是，柴油加氢装置也是炼油企业的耗能大户，其能耗在生产成本中占据较大比重，所以采取有效的节能降耗工艺措施，对于提高企业的经济效益和环境效益具有重要意义。

1 柴油加氢装置节能降耗工艺措施

1.1 优化反应条件

1.1.1 调整反应压力

加氢反应本质上是一个体积缩小的过程，提高反应压力，在循环氢浓度恒定的情况下也就意味着提升了氢分压。基于化学反应原理来看氢分压的增加对加氢反应的热力学平衡极为有利，以芳烃加氢反应为例，其受到平衡的限制比较明显，提高压力可以进一步加快芳烃加氢反应的进行而使反应朝着生成更多加氢产物的方向移动以提高芳烃加氢转化率。对于加氢脱硫以及烯烃加氢饱和反应来说，在压力相对不太高时就可以达到较高转化深度，但加氢脱氮反应由于其机理的复杂性比加氢脱硫更为困难，往往需要更高的压力来促使反应进行，这是因为加氢脱氮反应需要先使氮

杂环加氢饱和，而提高压力能够加快芳烃的加氢饱和反应速度以提高加氢脱氮的速率^[1]。

1.1.2 控制反应温度

从化学反应动力学的角度来看，温度对反应速度有着非常明显的影响。一般情况下，随着温度升高之后分子的热运动加剧且碰撞频率和能量增加，从而使反应速度进一步加快，这一关系可以用阿伦尼乌斯方程来定量描述，即反应速率常数 k 与温度 T 呈指数函数关系： $k=A \times \exp(-E_a/RT)$ ，其中 A 为指前因子，E_a 为活化能以及 R 为气体常数。从方程中能够看出当温度 T 升高时指数部分 $\exp(-E_a/RT)$ 的值增大而导致反应速率常数 k 增大，反应速度加快。在柴油加氢反应中提高反应温度可以加快加氢反应的速度，让反应在更短时间内达到预期转化率。

1.2 改进换热系统

1.2.1 采用高效换热器

换热器作为柴油加氢装置中实现热量交换以及回收能量的关键设备，其性能的优劣在很大程度上决定着装置的能耗水平和运行效率。传统的单壳程换热器在传热效率、占地面积等方面存在一定问题，而双壳程高效换热器的应运而生为处理问题带来了途径。

双壳程高效换热器的独特结构设计赋予了它各种各样的优势，其采用的双壳程结构使流体在壳程内的

流动路径更为复杂的同时也增加了流体湍流程度。当热流体和冷流体在换热器内进行热量交换时双壳程结构可以加快流体间的温度梯度变得均匀，从而提高整体的传热效率。

与传统单壳程换热器相比，双壳程高效换热器的传热系数能够提高 15%–30%，这意味着在相同的换热任务下其可以用更小的传热面积进行相同的热量传递，最大限度节省设备占地范围。在空间有限的柴油加氢装置中这一优势十分突出，可以降低装置的建设成本支出以及空间占用。

1.2.2 优化换热流程

在柴油加氢装置中存在着多个具有不同温度和热量的物流，包括反应流出物、低分油以及精制柴油等，而优化换热流程的核心就是高效利用这些热源来实现热量的最大化回收。在传统换热流程中往往会出现热量利用不合理的情况以导致部分热量被浪费，但是优化后的换热流程会按照各物流的温度以及热量特点设计换热路径和换热设备的组合，让高温的反应流出物依次与原料油、低分油等进行换热并利用其高温热量把原料油和低分油加热到适宜温度。这样一来原料油在进入反应系统前得到了彻底预热，降低了反应进料加热炉的负荷；低分油在进入分馏塔前也得到了预热，从而减少分馏塔塔底再沸器的蒸汽消耗^[2]。

1.3 回收利用余热

1.3.1 加热炉余热回收

加热炉燃烧燃料之后产生的高温烟气会在余热回收系统中会与低温介质（如水或空气）进行热交换。以常见的空气预热器为例，其工作过程为高温烟气通过空气预热器的传热元件（如管式、回转式等不同形式的结构）把热量传递给从外界进入的冷空气。在这个热传递过程中热量从高温的烟气侧通过金属壁面传导到低温的空气侧使冷空气温度升高。依据傅里叶定律，热传导的热量 Q 与温度梯度成正比，即 $Q = -\lambda A (dT/dx)$ ，其中 λ 为导热系数， A 为传热面积且 dT/dx 为温度梯度。空气预热器通过扩大传热面积以及优化温度梯度达到了高效的热量传递。

经过热交换后的烟气温度明显下降且其携带的热能被有效地回收利用，而被加热的空气则可以当做助燃空气进入加热炉参与燃烧，不仅提高了燃料的燃烧效率，使燃料充分燃烧以释放出大量热量，还减少了加热炉对额外燃料的需求，从而降低了燃料气的消耗^[3]。

1.3.2 其他余热回收措施

利用蒸汽发生器回收多余热量是一种有效的余热回收方法，在柴油加氢装置的反应系统中反应流出物往往具有较高的温度和热量。设置蒸汽发生器能够把

反应流出物的余热传递给锅炉水使其汽化为蒸汽，这个过程中反应流出物的热量被最大限度利用并转化为蒸汽的热能。

蒸汽发生器的工作原理基于热交换原理，通过设计换热面积和换热流程以保证热量可以从反应流出物传递给锅炉水。所产生的蒸汽可用于驱动汽轮机并带动部分大型设备运转如循环氢压缩机等，从而减少了对电力的需求，实现了能源的梯级利用。

1.4 优化分馏系统

1.4.1 调整分馏塔操作参数

从产品质量角度来看提高分馏塔压力会使各组分的沸点升高，这意味着在相同的温度条件下轻组分更难挥发且重组分更难冷凝。在分离柴油和汽油组分时如果压力过高，汽油中的轻组分就会由于无法彻底分离出来而导致汽油干点升高，从而影响汽油的质量；同时柴油中的重组分被携带到汽油中使柴油闪点降低也会影响柴油的质量。而降低分馏塔压力则会使各组分沸点降低且轻组分更容易挥发，这导致柴油中轻组分含量增加，影响柴油的密度以及十六烷值等相关指标。

从能耗方面分析，分馏塔压力的变化会直接影响塔底再沸器和塔顶冷凝器的负荷。提高压力后各组分沸点升高，塔底再沸器通常要提供大量热量来使物料汽化以维持塔内的气液平衡以及精馏效果，这就会导致蒸汽消耗增加且能耗上升；压力升高还会使塔顶冷凝器的负荷增大，因为需要更多冷却介质来冷凝塔顶蒸汽，增加了冷却能耗。

降低压力尽管能够减少塔底再沸器的蒸汽消耗，但同时也会增加塔顶冷凝器的冷却负荷，因为轻组分更容易挥发要有足够的冷却量来使其冷凝。所以就要按照产品质量要求以及装置能耗情况来做好综合权衡以找到一个最佳的分馏塔压力。

1.4.2 回收塔顶气能量

脱丁烷塔顶气通常含有大量轻烃组分包括丁烷、丙烷等，同时还携带一定热量。为了回收这部分能量就可以采用以下方法：设置塔顶气压缩机把脱丁烷塔顶气增压后送入下游装置作为原料。在部分炼油厂中将脱丁烷塔顶气压缩后输送至气体分馏装置用来生产高附加值的化工产品如丙烯、丁烯等，这样不仅可以加快能量的回收利用，而且有效提高了资源的附加值。利用塔顶气与其他低温物流进行换热回收其热量，将脱丁烷塔顶气与原料油或低分油进行换热使塔顶气中的热量传递给这些低温物流以实现热量的回收，这种换热方式能够减少其他加热设备的能量消耗，最大限度增加装置的整体能量利用效率。

2 柴油加氢装置节能降耗的效益

2.1 能耗降低带来的成本节约

柴油加氢装置节能降耗后在电、燃料气以及蒸汽等能源消耗方面实现了显著的成本节约。以电力消耗为例，在实施节能措施前装置内各类机泵如加氢进料泵、循环氢压缩机等总耗电量较大。循环氢压缩机的电机功率通常可达数千千瓦，其耗电量在装置总电耗中占比约为20%–30%。通过优化反应条件调整氢油比和空速以及采用变频调速技术对机泵进行节能改造能够进一步降低机泵的能耗。在优化氢油比后循环氢压缩机的负荷降低且电机功率相应减小，从而实现了电力消耗的降低。经实际测算，实施节能措施后装置的电力消耗可降低10%–15%。如果装置原本的年电力消耗成本为1000万元，那么节能后每年可节约电力成本100–150万元^[4]。

在燃料气消耗方面反应进料加热炉是主要的消耗设备，其燃料气消耗约占装置总能耗的30%–40%。通过改进换热系统采用高效换热器和优化换热流程提高原料油的预热温度，从而降低了加热炉负荷以及燃料气的消耗。采用双壳程高效换热器后反应流出物与原料油的换热效率提高，原料油进入加热炉时的温度升高，使得加热炉只需提供一点热量来达到反应所需温度。据统计，采用这些节能措施后燃料气消耗能够下降8%–12%。如果装置每年的燃料气消耗成本为2000万元，那么节能后每年可节约燃料气成本160–240万元。

除此之外，蒸汽消耗在装置能耗中的占比是10%–20%，主要用于柴油汽提塔塔底的汽提操作和驱动汽轮机。通过回收利用余热，如利用蒸汽发生器回收反应流出物的余热产生蒸汽以及优化分馏塔的操作参数降低塔底再沸器的蒸汽消耗，就能够减少蒸汽的用量。利用蒸汽发生器回收余热产生的蒸汽可以达到装置内部分动力需求并使装置的蒸汽消耗降低15%–20%。如果装置每年蒸汽消耗成本为500万元，节能后每年能够节约蒸汽成本75–100万元。

2.2 产品质量提升带来的收益上升

在硫含量方面，环保要求的日益严格使得对柴油中硫含量的限制越来越低，通过优化反应条件来提高反应压力、温度以及调整氢油比等参数可以脱除柴油中的硫杂质。在优化反应条件前柴油产品的硫含量在几百ppm甚至更高，而经过节能降耗措施的优化后硫含量能够下降到了50ppm甚至10ppm以下，更符合环保标准。低硫柴油在市场上的价格往往比普通柴油高出50–100元/吨，如果装置每年的柴油产量为50万吨，硫含量降低后每年能够提高收益2500–5000万元。

十六烷值是衡量柴油燃烧性能的关键指标，十六烷值越高柴油的燃烧性能越好，发动机启动性能和动力性能也更佳，而改进催化剂性能和优化反应工艺可以提高柴油的十六烷值。在实施节能降耗措施前柴油的十六烷值可能在45–50之间，而经过优化后十六烷值能够提高到55以上。高十六烷值的柴油在市场上更受消费者青睐，价格比普通柴油高出30–80元/吨，按每年50万吨的柴油产量计算可以得知十六烷值提高后每年能够增加收益3000万元左右。

2.3 设备维护成本的变化

节能措施的实施对柴油加氢装置设备运行状况产生了积极影响，进而使设备维护成本发生了相应变化。在反应系统中优化反应条件，如精准控制反应压力、温度、空速和氢油比等参数使反应过程更加稳定可以减少设备存在的操作波动。稳定的反应条件有助于降低设备受到的压力冲击和温度变化的影响，从而减少了设备密封件、管件等部件的磨损和损坏。在以往反应条件不稳定时设备密封件每3–6个月就需要更换一次，而优化反应条件后密封件的更换周期能够延长至6–12个月，大大降低了密封件的更换成本^[5]。

综上所述，柴油加氢装置的节能降耗工艺措施具有不可或缺的应用价值以及明显的效益。通过优化反应条件、采用高效换热设备以及实施低温热利用和优化氢气系统等工艺措施，能够进一步降低装置的能耗，提高能源利用效率并减少环境破坏。在具体应用中，炼油企业应基于自身具体情况科学应用节能降耗工艺措施，并进行技术创新和优化以实现装置的可持续发展。同时，政府和相关部门也应加强对节能降耗工作的支持和引导，加快整个炼油行业朝着绿色、低碳方向发展。

参考文献：

- [1] 何晓钟. 柴油加氢装置节能降耗工艺措施 [J]. 石化技术, 2024, 31(09):309–310.
- [2] 邓建政. 柴油加氢改质装置高分能量透平机封泄漏技改分析 [J]. 山东化工, 2024, 53(11):218–220.
- [3] 娄刚. 柴油加氢装置不同生产工况下能耗对比分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(20):35–36+39.
- [4] 郭雅静, 徐善君. 基于 Aspen Plus 的柴油加氢装置燃料气能耗优化 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(05):43–48.
- [5] 于洪胜. 柴油加氢装置能耗现状分析与改进措施 [J]. 化学工程与装备, 2023(05):35–36.

作者简介：

于梦竹（1994-），女，汉族，黑龙江大庆人，本科，助理工程师，研究方向：加氢装置工艺。