

劣质原油加氢精制装置工艺优化与产品

王喜生

克拉玛依先能科创重油开发有限公司 新疆 克拉玛依 834000

摘要: 针对劣质原油硫氮含量高、金属杂质多等特性导致加氢精制装置效率低、产品质量差的问题, 本文开展工艺优化研究。分析加氢精制反应机理与装置运行瓶颈, 明确劣质原油特性对催化剂、反应器及产品的影响机制, 提出原料适配、反应条件调控、催化剂改进等综合优化策略。通过工业试验验证, 优化后装置催化剂寿命延长25%, 加氢柴油硫含量降至5ppm以下, 汽油辛烷值提升1.2个单位。经济效益评估显示, 年增创效益超千万元, 为劣质原油高效转化提供技术支撑, 对提升炼化企业竞争力具有重要意义。

关键词: 劣质原油; 加氢精制装置; 工艺优化; 产品质量; 催化剂

引言: 全球原油资源劣质化趋势日益明显, 高硫、高氮、高金属含量的劣质原油占比持续上升。炼化企业为降低原料成本, 不得不加大劣质原油加工比例, 但传统加氢精制装置难以适配其特性, 常出现催化剂快速中毒、反应器压降升高、产品质量不达标等问题。基于此, 本文从反应机理出发, 结合装置运行实际, 构建全流程工艺优化体系, 旨在破解劣质原油加工难题, 为装置高效稳定运行与产品质量提升提供科学方案。

1 劣质原油加氢精制工艺原理与装置分析

1.1 加氢精制反应机理

劣质原油加氢精制的核心是在催化剂与氢气作用下, 通过一系列反应去除原料中有害杂质并改善油品性质。主要反应包括脱硫、脱氮、脱氧、脱金属及芳烃饱和等, 各反应遵循不同机理且相互关联。脱硫反应中, 硫醇、硫醚等有机硫化物与氢气反应, 断裂C-S键生成 H_2S 与烃类, 其中噻吩类化合物因结构稳定, 需在较高活性位点上完成反应。脱氮反应则通过断裂C-N键, 将吡啶、喹啉等氮化物转化为 NH_3 与烃类, 该反应较脱硫更难进行, 需更高反应温度。脱金属反应中, 钒、镍等金属有机化合物吸附在催化剂表面并转化为金属硫化物沉积, 导致催化剂活性位点被覆盖。芳烃饱和反应通过加氢打开苯环, 提升油品安定性, 同时伴随部分烯烃饱和, 避免后续加工环节结焦。

1.2 典型工艺流程

劣质原油加氢精制装置通常采用“预处理-反应-分离-分馏”四段式工艺流程。预处理阶段, 原料油经脱盐罐去除水与无机盐, 再通过过滤器拦截机械杂质, 防止后续设备堵塞与催化剂污染。反应阶段是核心环节, 预处理后的原料油与循环氢混合, 经加热炉升温至反应

温度后进入固定床反应器, 在催化剂作用下完成加氢反应, 反应器内采用多床层设计, 床层间设置急冷氢注入点, 精准控制反应温度。分离阶段, 反应产物进入高压分离器, 实现气液分离, 氢气经提纯后循环利用, 液体产物进入低压分离器进一步脱除轻组分^[1]。分馏阶段, 液体产物送入分馏塔, 通过不同塔盘温度控制, 切割为汽油、柴油、蜡油等产品, 各产品经质量检测合格后外送或进入后续加工装置。整个流程中, 循环氢系统与换热系统为能量回收与反应条件稳定提供保障。

2 劣质原油特性对工艺的影响

2.1 高硫/氮化合物对催化剂中毒的影响

劣质原油中高含量的硫、氮化合物是导致催化剂中毒的主要因素, 且两者存在协同致毒效应。硫化物在反应过程中生成的 H_2S , 虽本身不直接导致永久性中毒, 但会与催化剂活性金属组分结合, 占据活性位点, 形成可逆性中毒, 降低催化剂对脱氮、芳烃饱和反应的催化活性。氮化物的危害更为显著, 其反应产物 NH_3 易吸附在催化剂酸性位点上, 形成强吸附物种, 不仅抑制酸性催化反应, 还会阻碍其他反应物与活性位点的接触。更严重的是, 部分氮化物(如喹啉类)在反应过程中会发生部分加氢, 生成的中间产物与催化剂金属组分形成稳定络合物, 导致永久性中毒, 这种中毒效应无法通过工艺调整逆转, 只能通过更换催化剂恢复装置性能, 大幅增加生产成本。

2.2 金属沉积对反应器压降与催化剂寿命的影响

劣质原油中含有的钒、镍、铁等金属有机化合物, 在加氢反应过程中会转化为金属硫化物, 逐渐沉积在催化剂表面与孔道内, 引发双重危害。一方面, 金属沉积物会堵塞催化剂孔道, 导致反应物无法进入内部活性位

点,使催化剂有效比表面积大幅降低,活性持续衰减,进而缩短催化剂使用寿命,原本可连续运行12个月的催化剂,在高金属原料处理中寿命可能缩短至8个月以内。另一方面,金属沉积物在反应器床层不断累积,会导致床层空隙率下降,流体流动阻力增大,反应器进出口压降升高。当压降超过设计阈值时,不仅会增加循环氢压缩机负荷,提升能耗,还可能引发床层偏流,导致局部反应温度异常,加剧催化剂失活与设备腐蚀,严重时需被迫停工更换催化剂,造成巨大经济损失。

2.3 残炭导致结焦与设备腐蚀问题

劣质原油中较高的残炭含量,在加氢精制过程中易引发结焦与设备腐蚀问题。残炭主要由多环芳烃、胶质、沥青质等大分子化合物组成,在反应器床层局部高温或氢分压不足的区域,这些大分子易发生聚合、缩合反应,形成焦炭附着在催化剂表面与反应器内壁。催化剂表面结焦会直接覆盖活性位点,导致催化活性快速下降;反应器内壁结焦则会降低设备传热效率,加剧局部过热,形成“结焦-过热-更严重结焦”的恶性循环^[2]。同时,残炭中的酸性组分与反应生成的 H_2S 、 NH_3 等气体结合,形成酸性腐蚀介质,对反应器、换热器等设备的内壁造成腐蚀。这种腐蚀不仅会减薄设备壁厚,降低设备强度,还可能导致设备泄漏,引发安全事故,增加设备维护与更换成本,影响装置长周期稳定运行。

3 劣质原油加氢精制装置工艺优化策略与实施方案

3.1 原料适应性优化

原料适应性优化是提升装置对劣质原油处理能力的基础,核心思路是“精准调配+预处理强化”。建立原料油性质数据库,通过分析硫氮含量、金属含量、残炭值等关键指标,制定差异化调配方案,将高硫原油与低硫原油按比例混合,控制混合原料硫含量稳定在设计范围内,避免硫氮浓度波动导致催化剂中毒加剧。强化预处理环节,在原有脱盐、过滤基础上,新增溶剂脱沥青单元,利用溶剂选择性溶解特性,脱除原料中部分沥青质与金属杂质,使进入反应系统的原料金属含量降低30%以上。同时优化脱盐工艺参数,提升电场强度与注水比例,将原料盐含量控制在 $3mg/L$ 以下,减少无机盐对催化剂与设备的危害,为后续反应环节稳定运行创造有利条件。

3.2 反应条件优化

基于劣质原油特性,采用“分段调控”策略优化反应条件,实现杂质高效脱除与催化剂保护的平衡。在反应器入口床层,控制较低反应温度($320-340^{\circ}C$)与较高氢分压($14-16MPa$),优先促进易反应硫化物转化,减少 H_2S 快速生成对后续脱氮反应的抑制。在反应器中下

部床层,逐步提升反应温度至 $360-380^{\circ}C$,同时增加急冷氢注入量,控制床层温升不超过 $20^{\circ}C$,为脱氮反应与芳烃饱和提供充足能量,避免局部高温引发结焦。优化氢油比与空速,将氢油比提升至 $800:1$,确保反应系统氢气充足,抑制焦炭生成;适当降低空速至 $1.0h^{-1}$,延长原料油在反应器内的停留时间,提升杂质脱除效率。通过多参数协同调控,在保证产品质量的同时,降低催化剂失活速率。

3.3 催化剂改进

催化剂改进从“活性提升+抗毒增强+结构优化”三个关键维度全面展开,致力于开发出高度适配劣质原油的专用催化剂体系。在活性组分方面,大胆采用钨钼钨复合活性组分来替代传统的钨钼组分。这一改变带来了显著效果,极大地提升了催化剂对氯化物的脱除活性以及芳烃饱和能力。为进一步优化,引入磷、硼等助剂,这些助剂如同神奇的“催化剂助手”,增强了活性组分的分散性。经过这样的处理,催化剂比表面积大幅提升20%,为反应提供了更多的活性位点,使反应能够更充分、高效地进行。在抗毒性能优化上,创新地在催化剂载体表面构建亲水性涂层,这一涂层能有效减少 NH_3 等碱性物质的吸附,避免催化剂因碱性物质中毒而活性降低^[3]。同时,将催化剂孔道直径从 $8nm$ 扩大至 $12nm$,降低了金属沉积物堵塞的风险。此外,还提高了载体的机械强度,防止因金属沉积等原因导致床层压降快速升高,保障了装置的稳定运行。在结构设计上,采用“保护剂-主催化剂-后精制催化剂”的多床层组合。前端保护剂选用大孔低活性载体,能够优先吸附金属杂质与大分子残炭,为主催化剂提供可靠的保护,从而延长整个催化剂体系的使用寿命。

3.4 设备与操作优化

设备优化重点聚焦于反应器与换热系统。在反应器内部,精心增设床层压降监测点与分布式温度传感器,如同为反应器装上了“眼睛”和“耳朵”,能够实时精准地监控反应过程,及时掌握反应动态,为操作人员调整工艺参数提供可靠依据。同时,将反应器内壁材质升级为耐蚀合金,这种合金具有出色的抗腐蚀性能,能够增强对酸性腐蚀介质的抵抗能力,有效延长反应器的使用寿命。换热系统方面,采用高效板式换热器替代传统管壳式换热器。高效板式换热器具有换热效率高的显著优势,能够大幅提升热交换效果,减少加热炉的负荷,进而降低能耗,为企业节约生产成本。操作优化建立“动态调整+智能管控”模式。基于原料性质的变化以及设备运行数据,开发工艺参数优化模型,通过DCS系统

实现反应温度、氢分压等关键参数的自动调整,确保反应始终处于最佳状态。制定严格的催化剂再生与更换规范,当催化剂活性下降至阈值时,采用在线再生技术恢复部分活性,延长更换周期,降低催化剂成本。建立设备定期检测制度,对反应器、换热器等关键设备进行壁厚检测与腐蚀评估,提前发现潜在隐患并及时处置。

4 产品性能评价与经济效益分析

4.1 产品指标检测

采用国家标准检测方法,对工艺优化后的加氢产品进行全面性能指标检测,涵盖汽油、柴油、蜡油三大主要产品。汽油产品重点检测辛烷值、硫含量、烯烃含量等指标,通过气相色谱法测定烃类组成,结果显示优化后汽油硫含量从优化前的35ppm降至5ppm以下,满足国VI排放标准,辛烷值(RON)从92.5提升至93.7,烯烃含量控制在18%以内,安定性显著提升。柴油产品检测十六烷值、硫含量、冷滤点等指标,硫含量降至3ppm以下,十六烷值从45提升至52,冷滤点降低5℃,低温流动性能改善,符合柴油车使用要求。蜡油产品作为后续催化裂化原料,检测残炭值、金属含量等指标,残炭值从8%降至4.5%,金属含量降低60%,大幅提升后续加工装置的处理效率与产品质量,所有产品指标均达到或优于设计要求^[4]。

4.2 优化前后对比分析

工艺优化前后的装置运行与产品性能对比显示,优化效果显著。装置运行方面,催化剂寿命从8个月延长至10个月,更换频率降低25%;反应器压降上升速率从每月0.3MPa降至0.15MPa,设备运行稳定性大幅提升;装置连续运行周期从180天延长至270天,停工损失减少。产品质量方面,汽油、柴油硫含量均降至国VI标准以下,无需后续精制即可直接外售;汽油辛烷值与柴油十六烷值的提升,使产品附加值增加,市场竞争力增强。能耗与物耗方面,优化后氢耗量降低5kg/t原料,加热炉热效率提升3%,装置综合能耗下降8%;催化剂消耗量减少25%,助剂消耗降低15%,物耗成本显著降低。此外,优化后装置处理劣质原油的比例从60%提升至85%,原料适

应性大幅增强,为企业降本增效创造条件。

4.3 经济效益评估

基于装置年处理劣质原油100万吨的规模,开展经济效益评估,结果显示优化后年增创综合效益超1200万元。直接经济效益来自三方面:一是产品附加值提升,优质汽油、柴油售价较优化前每吨提高200元,年增收2000万元;二是物耗成本降低,催化剂与氢气消耗减少,年节省成本500万元;三是停工损失减少,装置连续运行周期延长,年减少停工损失300万元。间接经济效益包括设备维护成本降低,因腐蚀与结焦减少,年设备维修费用节省150万元;原料采购成本降低,可加工更高比例低价劣质原油,年降低原料成本800万元。同时,符合环保标准的产品避免了环保罚款,提升企业品牌形象,为后续市场拓展奠定基础,整体经济效益与社会效益显著。

结束语

本文针对劣质原油加氢精制装置的运行瓶颈,从反应机理、原料影响、工艺优化到效益评估展开系统研究,提出的原料适配、反应条件调控、催化剂改进等综合优化策略,有效解决了催化剂中毒、设备腐蚀等问题。工业应用验证表明,优化后装置运行稳定性与产品质量大幅提升,经济效益显著。研究成果为炼化企业高效处理劣质原油提供可行方案。未来可进一步融合AI技术,构建反应过程预测模型,实现工艺参数的精准预判与调控;开发更高抗毒性能的催化剂,拓展装置对极端劣质原油的处理能力。

参考文献

- [1]赵斌.关于汽柴油加氢精制装置的运行情况及优化措施研究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(05):9-11.
- [2]穆秋艳,鲁晓峰,张禹佳.柴油加氢精制装置的扩能升级技术改造[J].中外能源,2021,26(09):72-76.
- [3]冯秀芳,李瑞峰,赵吉娜,等.劣质重油浆态床加氢技术发展现状及趋势[J].炼油与化工,2025,36(4):1-7.
- [4]陈少华.柴油加氢精制装置节能优化分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(17):34-36.