

# 汽柴油加氢技术研究进展

张学亮

中国石化塔河炼化有限责任公司 新疆 阿克苏 842000

**摘要:** 汽柴油加氢技术是实现油品清洁化、劣质油优质化的核心技术, 主要涵盖加氢脱硫、脱氮、脱芳及改质等反应。本文综述了该技术的基础理论、关键技术研究进展, 分析了工业化应用现状及催化剂成本高、能耗大等现存问题, 探讨了催化剂高效低耗化、工艺节能一体化、绿氢耦合及智能化等发展趋势, 指出未来需聚焦高效低成本催化剂研发、劣质原料适配技术突破及低碳路径探索, 为汽柴油加氢技术升级及炼化产业高质量发展提供参考。

**关键词:** 汽柴油; 加氢技术; 研究进展

引言: 随着环保标准持续升级及“双碳”政策推进, 成品油硫、氮、芳烃含量要求不断严苛, 劣质汽柴油资源化利用需求日益迫切。汽柴油加氢技术因能有效脱除油品杂质、改善产品性能, 成为炼化行业转型升级的关键支撑。目前该技术在催化剂、工艺、设备等方面已取得显著进展, 但仍面临成本、能耗及核心技术自主化等瓶颈。本文系统梳理其研究进展、应用现状及现存问题, 展望发展方向, 为相关研究与工业化应用提供借鉴。

## 1 汽柴油加氢技术基础理论

### 1.1 汽柴油加氢反应机理

(1) 加氢脱硫 (HDS) 反应机理及关键反应路径: 核心是在催化剂作用下, 氢气与汽柴油中硫化物反应, 断裂C-S键, 生成烃类和硫化氢。关键路径为含硫杂环(如噻吩)先加氢饱和, 再断裂C-S键, 简单硫化物(硫醇、硫醚)可直接加氢脱硫, 反应需适宜催化剂激活氢气参与反应。(2) 加氢脱氮 (HDN) 反应机理及影响因素: 机理是氮化物先加氢饱和杂环, 再断裂C-N键, 生成氨和烃类。影响因素主要有反应压力、温度, 以及催化剂活性, 高压高温可促进反应, 碱性氮化物会抑制催化剂活性, 降低脱氮效率。(3) 加氢脱芳 (HDA) 与加氢改质反应机理: HDA是芳烃在催化剂作用下加氢饱和, 降低芳烃含量; 加氢改质通过调整烃类结构, 改善汽柴油辛烷值、十六烷值, 反应需控制氢分压和温度, 避免过度裂化。

### 1.2 汽柴油加氢核心反应体系

(1) 反应热力学特征及关键参数影响规律: 加氢反应均为放热、体积减小反应, 低温高压利于反应正向进行。关键参数中, 温度升高加速反应但抑制平衡, 压力升高提升反应深度, 氢气比影响传质效率和催化剂寿命。(2) 反应动力学模型构建与优化: 基于反应速率方程构建模型, 结合实验数据优化参数, 重点考虑原料组

成、催化剂活性等因素, 提升模型对反应过程的预测精度, 为工艺优化提供支撑。(3) 不同原料的反应特性差异: 直馏油杂质含量低, 反应条件温和; 焦化柴油胶质多, 易导致催化剂结焦, 需预处理<sup>[1]</sup>。

### 1.3 汽柴油加氢技术核心影响因素

(1) 工艺参数的影响: 温度过高易结焦, 过低反应不完全; 压力过高增加能耗, 过低反应深度不足; 氢气比过高增加成本, 过低易导致催化剂失活, 需合理匹配各参数。(2) 原料性质的影响: 原料密度越大、硫氮及芳烃含量越高, 反应难度越大, 氢耗越高; 馏程过重会增加反应苛刻度, 需针对性调整工艺条件。(3) 杂质的干扰机制: 金属杂质会沉积在催化剂表面, 堵塞活性中心; 胶质易缩合结焦, 覆盖催化剂表面, 降低催化活性, 还会增加氢耗, 需提前脱除杂质。

## 2 汽柴油加氢关键技术及研究进展

### 2.1 加氢催化剂技术研究进展

(1) 催化剂活性组分的优化与改性: 核心活性组分为Mo基化合物, 通过添加Co、Ni作为助催化剂, 优化组分配比与分散度, 提升催化剂脱硫、脱氮活性。目前研究重点为活性组分的改性的, 采用掺杂贵金属、稀土元素等方式, 增强活性中心稳定性, 降低反应苛刻度, 同时减少活性组分用量, 降低成本。(2) 催化剂载体的研发与改进: 载体主要承担活性组分负载与传质作用, 传统Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>载体逐步向梯度孔道结构升级, 通过调控孔道尺寸与分布, 提升反应物与产物的扩散效率, 减少内扩散阻力。新型载体材料如SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、分子筛、碳材料等不断涌现, 可改善载体与活性组分的相互作用, 进一步提升催化剂性能。(3) 新型催化剂的研发与工业应用: 针对原料劣质化、环保要求提升, 高抗氧型催化剂可抵御原料中氧化物的干扰, 避免催化剂失活; 真硫化态催化剂无需现场预硫化, 缩短开工周期, 降低操作难度, 已

在多个炼厂实现工业应用，提升加氢效率的同时降低能耗<sup>[2]</sup>。（4）催化剂级配技术与失活机理及再生技术：催化剂级配通过不同活性、不同孔径的催化剂分层装填，实现反应深度与效率的协同提升；失活机理主要为积碳、金属沉积、活性组分烧结，据此研发出溶剂抽提、氧化烧炭、复活焙烧等再生技术，可恢复催化剂80%以上活性，延长使用寿命，降低生产成本。

## 2.2 汽柴油加氢工艺技术研究进展

（1）常规加氢工艺的优化升级：加氢精制重点优化反应参数，结合催化剂性能提升，实现深度脱硫脱氮，满足国Ⅵ等严苛排放标准；加氢改质通过调整工艺条件，优化烃类结构，在降低芳烃含量的同时，提升汽柴油辛烷值、十六烷值，实现劣质油的优质化转化。（2）新型加氢工艺的研发与应用：液相加氢工艺无需循环氢压缩机，简化流程、降低能耗，适合中小型炼厂；中压加氢改质以中压条件替代高压，在保证产品质量的前提下，大幅降低设备投资与操作成本，已成为劣质柴油改质的主流技术之一。（3）耦合工艺的研究与实践：加氢转化与催化裂化耦合可实现劣质原料的分级转化，加氢预处理脱除杂质后，催化裂化进一步提升产品收率与质量；此外，加氢与吸附、氧化等工艺耦合，可实现污染物的深度脱除，提升工艺环保性与经济性<sup>[3]</sup>。（4）工艺集成创新与智能化优化技术：通过工艺流程集成，减少设备冗余，提升能源利用率；引入智能化技术，实时监测反应参数、催化剂状态，通过大数据分析实现工艺参数动态优化，降低人工操作强度，提升生产稳定性与产品合格率。

## 2.3 加氢设备与辅助系统研究进展

（1）加氢反应器的结构优化与高效设计：针对加氢反应高压、高温、强腐蚀特点，优化反应器内壁结构，采用耐腐蚀合金材料，提升设备安全性与使用寿命；同时改进内件设计，强化反应物混合与传质，提升反应器空间利用率与反应效率。（2）节能型换热设备的应用：TPMS基高压换热器具有承压性强、换热效率高、能耗损失小等优势，替代传统换热器，可降低高压工况能耗，减少设备维护成本，广泛应用于加氢装置的热量回收系统，实现能源高效利用。（3）氢气提纯与循环利用技术的改进：重点研发变压吸附、膜分离等高效氢气提纯技术，提升氢气纯度，满足加氢反应需求；优化氢气循环系统，减少氢气损耗，通过尾气回收、弛放气提纯再利用，降低氢气消耗，提升工艺经济性，助力绿色低碳生产。

## 3 汽柴油加氢技术工业化应用及存在的问题

### 3.1 汽柴油加氢技术工业化应用现状

（1）国内主要加氢装置的规模与分布：目前国内汽柴油加氢装置已实现规模化布局，主力装置规模集中在100-300万吨/年，主要分布在东部炼化基地、环渤海及长三角地区，中西部炼化企业也逐步配套加氢装置，形成覆盖全国的工业化体系，满足各地成品油质量升级需求。（2）典型工业化应用案例分析：柴油超深度加氢装置可将硫含量降至10ppm以下，满足国Ⅵb排放标准，已在多家大型炼厂落地；航煤加氢装置通过深度脱芳、脱硫，生产符合航空标准的清洁航煤，提升航煤质量与安全性，实现规模化稳定生产。（3）工业化应用中的技术优势与经济效益：技术上可实现劣质汽柴油的优质化转化，大幅降低硫、氮、芳烃含量，契合环保要求；经济效益显著，既能提升成品油附加值，又能减少环保处罚成本，同时延长后续加工设备使用寿命，提升炼化企业整体竞争力。

### 3.2 工业化应用中存在的关键问题

（1）催化剂成本高、活性衰减快的问题：核心催化剂依赖贵金属或高性能活性组分，生产成本偏高；原料劣质化导致催化剂易积碳、金属沉积，活性衰减加快，更换频率高，进一步增加运营成本。（2）工艺能耗高、氢耗量大及设备腐蚀泄露问题：加氢反应需高压高温条件，设备运转能耗较高；高压换热器易受腐蚀出现泄露隐患，且处理劣质原料时氢耗大幅增加，氢气制备与提纯成本偏高，制约工艺经济性<sup>[4]</sup>。（3）劣质原料适应性差及产品质量稳定性问题：部分装置对高硫、高氮、高胶质的劣质原料处理能力不足，易出现反应不完全、催化剂失活加快等问题；同时原料组分波动易导致产品辛烷值、十六烷值等指标不稳定。（4）高端技术与核心设备的“卡脖子”问题：高端加氢催化剂、高效反应器内件等核心技术仍部分依赖进口；大型加氢反应器、精密换热设备等核心装备的高端制造能力不足，制约技术自主化升级。

### 3.3 问题产生的原因分析

（1）技术层面：催化剂性能与工艺匹配度不足，部分催化剂活性、稳定性难以适配劣质原料和严苛工艺要求，工艺参数优化不够精准，且缺乏针对性防腐技术，导致反应效率偏低、催化剂损耗加快、设备腐蚀加剧。（2）经济层面：加氢装置初始投资规模大，催化剂、氢气等耗材成本高；运营过程中能耗、设备维护及防腐处理费用居高不下，加之原料价格波动，导致投资与运营成本管控难度加大。（3）政策层面：环保标准持续升级，对成品油硫含量、芳烃含量等指标要求不断提高，现有部分装置技术升级滞后，适配劣质原料和防

腐蚀的改造资金投入不足,面临较大的技术适配压力。

#### 4 汽柴油加氢技术发展趋势与展望

##### 4.1 技术发展趋势

(1) 催化剂向高效、低耗、长寿命、环境友好方向发展:未来催化剂研发将聚焦提升活性与稳定性,通过组分改性、载体优化,降低贵金属用量,减少催化剂成本与损耗;同时开发无重金属、易再生的环保型催化剂,减少废弃催化剂对环境的污染,适配绿色炼化发展需求。(2) 工艺向节能化、一体化、分子精准管理方向升级:通过工艺优化、设备改进,采用防腐涂层、耐蚀材料等技术应对原料劣质化腐蚀,降低加氢装置能耗与氢耗,提升能源利用率;推动加氢与其他炼化工艺一体化整合,实现原料高效转化与资源循环利用;依托分子水平研究,精准调控反应过程,提升产品质量与收率。

(3) 绿氢耦合加氢技术的研发与应用推广:绿氢作为清洁可再生能源,其与加氢技术的耦合是实现炼化低碳化的关键方向,目前正加快绿氢制备、储运及与加氢装置的适配技术研发,未来将逐步替代化石氢,降低加氢过程碳排放,助力“双碳”目标实现<sup>[5]</sup>。(4) 数字化、智能化技术在加氢装置中的深度融合:借助大数据、人工智能、物联网等技术,实现加氢装置参数实时监测、反应过程精准调控、催化剂状态预测,减少人工干预,提升生产稳定性与效率,降低运营成本与安全风险。

##### 4.2 未来研究重点方向

(1) 高效低成本催化剂的研发与产业化:重点突破活性组分优化、载体改性等关键技术,开发高活性、长寿命且成本可控的催化剂,解决当前催化剂成本高、活性衰减快的痛点,推动新型催化剂从实验室研发走向规模化工业应用。(2) 劣质原料加氢技术的突破与优化:针对高硫、高氮、高胶质、高沥青质的劣质原料,研发专用加氢催化剂与适配工艺,优化反应条件,提升装置对劣质原料的处理能力,实现劣质原料的高效转化与优质化利用,拓宽原料来源。(3) 低碳加氢技术路径的探索与实践:聚焦低碳化发展需求,探索绿氢耦合加氢、碳捕获利用与封存(CCUS)结合加氢等技术路径;进一步优化氢气循环利用技术,降低氢耗,推动加氢技术向

清洁、低碳方向转型。

##### 4.3 行业发展展望

(1) 政策导向下加氢技术的的市场需求预测:随着环保标准持续升级、“双碳”政策深入推进,成品油质量要求不断提高,现有加氢装置升级改造、劣质油加工配套加氢装置新建需求将持续释放,加氢技术市场发展潜力巨大。(2) 技术升级对汽柴油产业高质量发展的支撑作用:加氢技术的持续升级,将推动汽柴油产品向清洁化、高端化转型,提升成品油附加值,助力炼化企业优化产品结构、降低环保成本,增强产业核心竞争力,为汽柴油产业高质量发展提供有力支撑。(3) 国内外技术竞争与合作发展前景:国内将加快高端催化剂、核心设备等关键技术自主化研发,打破国外技术垄断;同时加强国际技术交流与合作,引进先进技术经验,推动加氢技术协同创新,形成国内外良性竞争、互利共赢的行业格局。

##### 结束语

汽柴油加氢技术的发展与炼化产业清洁化、低碳化转型深度绑定,经过多年研究与实践,已形成较为完善的技术体系,在工业化应用中彰显出显著的技术优势与经济效益。尽管当前仍存在催化剂、能耗及核心技术等方面的不足,但随着高效催化剂研发、节能工艺优化及绿氢、智能化技术的融合应用,该技术将持续升级。未来通过技术创新突破瓶颈,可进一步推动汽柴油产业高质量发展,助力“双碳”目标实现。

##### 参考文献

- [1]杨怀宇.柴油加氢脱硫技术的现状及发展[J].中国石油和化工标准与质量.2021,7(8):64-66.
- [2]许小菊.柴油加氢脱硫装置工艺技术选择[J].江西化工.2022,16(5):112-115.
- [3]胡俊利,王高杰.柴油加氢技术研究现状[J].能源化工.2023,20(1):155-157.
- [4]赖全昌,张琰彬.灵活加氢改质MHUG-II工艺在柴油加氢装置的应用[J].炼油技术与工程.2024,24(6):96-98.
- [5]葛泮珠.催化裂化柴油综合利用技术及其发展[J].化工进展.2022,6(1):204-206.