

废轮胎热解油在加氢领域应用前景

孙宏帅

安徽华东化工医药工程有限责任公司上海分公司 上海 200120

摘要: 废轮胎热解油作为废旧轮胎资源化利用的核心产物,应用前景广阔,正从“能源替代”向“高值化工原料”升级。加氢技术作为废轮胎热解油精制的核心路径,能够有效脱除杂质,改善烃类组成,拓展应用领域。本文从热解油加氢技术适配性、加氢转化核心技术路径、产品应用方向等多维度,系统阐述热解油在加氢领域的应用前景。

关键词: 废轮胎热解油; 加氢技术; 应用方向; 应用前景

引言: 随着废轮胎产生量持续增加,其处理成为环保难题。废轮胎热解油作为热解产物,其成分复杂,含大量杂质,直接利用受限。加氢技术能有效提升热解油品质,使其成为清洁燃料或化工原料。深入研究废轮胎热解油在加氢领域的应用前景,不仅有助于解决废轮胎处理问题,还能为能源和化工行业提供新的原料来源,推动相关产业可持续发展。

1 废轮胎热解油的基础特性与加氢适配性

1.1 废轮胎热解油的基础特性

废轮胎热解油是废轮胎在无氧或低氧环境下经热裂解反应生成的复杂液态混合物。密度为 $910\sim 950\text{kg/m}^3$,闪点小于 32°C ,氢碳比为 $1.3\sim 1.5$,热值为 $40\sim 43\text{MJ/kg}$,与柴油相近^[1]。其组分构成具有显著复杂性,主要包含烃类、含硫化合物、含氮化合物以及少量氧元素化合物。烃类以芳香烃和环烷烃为主,同时存在一定量不饱和烯烃,且这些烃类组分的相对含量会随废轮胎来源、热解工艺参数的差异呈现波动。芳香烃结构中苯环数量与连接方式多样,环烷烃则以单环和双环结构为主^[2]。这种复杂的烃类组成赋予热解油独特的化学性质,不同烃类分子在加氢反应中的活性差异显著,直接影响加氢工艺的选择性和转化效率。

1.2 热解油中关键杂质类型及对加氢反应的影响

热解油中的关键杂质主要包括硫化物和氮化物,此外还含有微量金属杂质,这些杂质共同制约着加氢反应效率与产物品质。含硫化合物以噻吩类、硫醇类为主,含氮化合物则以吡啶类、吡咯类为代表。这些杂质在加氢反应中具有双重作用。一方面,杂质分子会吸附在催化剂活性位点上,形成竞争吸附,降低催化剂对目标反应物的吸附能力,导致催化剂活性下降。另一方面,部分杂质在加氢条件下可能发生分解或转化,生成新的活性中间体,这些中间体可能参与副反应,影响产物分布。杂质的存在还会改变反应体系的热力学平衡,对加

氢反应的深度和方向产生调控作用。

1.3 热解油理化性质对加氢工艺的基础要求

热解油的理化性质包括密度、粘度、馏程分布和酸值等参数,这些参数的综合表现直接决定了加氢工艺方案的设计与关键参数的选取。

(1) 热解油密度通常在 $0.91\sim 0.95\text{g/cm}^3$,高于常规柴油和蜡油。高密度会增加反应氢耗、提高床层压降,这对反应器内件(如气液分配器、冷氢箱等)以及加氢催化剂提出更高要求;

(2) 高热值和低粘度的特性与柴油相近,所以可优先考虑其作为柴油原料油使用;

(3) 轮胎油馏程分布宽泛,重组分占比高,馏程一般为 $40\sim 525^\circ\text{C}$,决定了加氢反应器选型需满足聚焦抗结焦、高传质效率、适配宽馏分处理三大核心需求;

(4) 酸值通常在 $2\sim 5\text{mgKOH/g}$,酸值过高会加速催化剂失活,需在加氢前进行脱酸预处理,使酸值降低至 0.5mgKOH/g 以下;

(5) 由于胶质、沥青质和重金属存在,为保护加氢反应器,需采用“预处理+加氢反应器串联”方案。

这些理化性质共同决定了加氢工艺的温度、压力、氢油比等关键参数的选择范围,一般加氢温度为 $360\sim 420^\circ\text{C}$,压力为 $12\sim 18\text{MPa}$,氢油比为 $1000\sim 1800$ 。

1.4 加氢反应对热解油品质提升的核心方向

加氢反应通过选择性加氢和深度脱杂两个核心方向提升热解油品质,同时兼顾烃类组成优化与馏程调控,为其多元化应用奠定基础。选择性加氢主要针对不饱和和烃,通过加氢饱和反应降低烯烃含量,提高油品安定性。深度脱杂则聚焦于含硫、含氮化合物的转化,通过加氢脱硫和加氢脱氮反应将杂质转化为易分离的硫化氢和氨气,显著降低油品腐蚀性。加氢反应还能调整烃类组成,优化馏程分布,使热解油更符合清洁燃料或化工原料的质量标准。

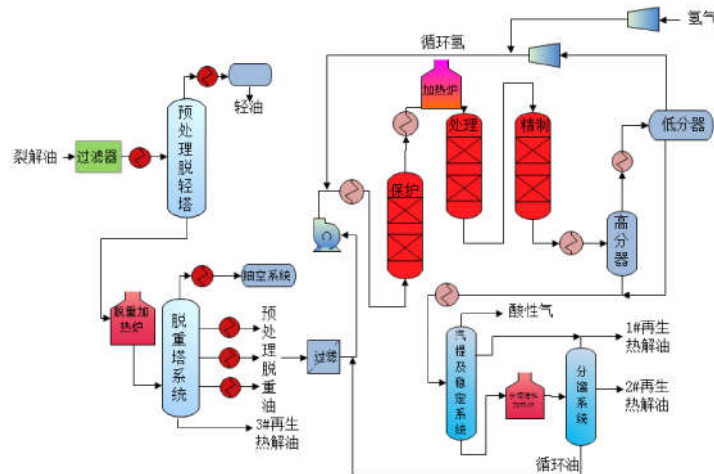


图1 轮胎热解油加氢工艺示意图

2 废轮胎热解油加氢转化的核心技术路径

2.1 加氢精制技术的核心原理与适用场景

加氢精制技术基于催化加氢反应原理，是热解油脱杂提质的基础技术，其核心在于通过催化剂介导实现杂质的高效脱除与油品安定性提升。通过特定催化剂作用，使热解油中的硫、氮、氧等杂质元素与氢气发生反应，转化为易于分离的硫化氢、氨气和水。该技术核心在于催化剂的选择性与活性，要求催化剂既能高效脱除杂质，又能抑制副反应发生。在反应过程中，不饱和和的加氢饱和反应同步进行，可降低油品不饱和度，提升安定性。加氢精制技术适用于热解油中杂质含量较高、以生产清洁燃料为导向的场景，能够有效降低油品腐蚀性，满足环保标准要求，为后续加工提供合格原料。

2.2 加氢裂化技术的反应机制与产品导向

加氢裂化技术通过强加氢作用与热裂解反应的协同，实现热解油重质组分的轻质化转化，是提升热解油经济价值的关键技术路径之一。将热解油中的大分子烃类断裂为小分子烃类。反应机制涉及碳-碳键的断裂与加氢饱和，催化剂的酸性中心促进裂解反应，金属中心则催化加氢反应^[3]。该技术可显著调整热解油的馏程分布，将重质组分转化为轻质组分，提高轻质油收率。产品导向以生产高附加值轻质燃料油和化工原料为主，如汽油、柴油和液化气等，能够满足市场对清洁轻质燃料的需求，提升热解油的经济价值。

2.3 加氢改质技术的核心目标与工艺要点

加氢改质技术核心目标在于优化热解油的烃类组成，精准提升油品关键性能指标，以适配高端燃料或特种化工原料的需求。通过选择性加氢和异构化反应，将直链烷烃转化为支链烷烃，提高油品辛烷值或十六烷

值，改善燃烧性能。可使汽油辛烷值提高8~15个单位，柴油十六烷值提高5~10个单位。工艺要点包括催化剂的精准调控与反应条件的优化，要求催化剂具备异构化活性和选择性。加氢改质技术适用于对油品性能有特定要求的场景，如生产高标号汽油或优质柴油，能够显著提升热解油的市场竞争力。

3 废轮胎热解油加氢产物的核心应用方向

3.1 加氢产物作为车用燃料的核心适配方向

废轮胎热解油经加氢处理后，其产物在车用燃料领域展现出显著适配性，尤其在环保标准日趋严格的背景下，成为传统化石燃料的优质补充资源。加氢过程有效脱除了热解油中的硫、氮等杂质元素，大幅降低燃料燃烧时硫氧化物、氮氧化物的排放，满足日益严格的环保法规要求。经过深度加氢，产物中不饱和和烃含量显著减少，油品安定性提升，可有效避免储存和运输过程中因氧化导致的胶质生成，延长燃料保质期。加氢产物馏程分布得到优化，轻质组分含量增加，能够适配不同类型发动机的燃烧需求，无论是汽油发动机还是柴油发动机，均可通过调整加氢工艺参数，生产出符合相应标准的燃料产品，为车用燃料市场提供稳定可靠的补充来源。

3.2 加氢产物作为化工原料的应用延伸方向

加氢产物在化工原料领域具备广阔应用延伸空间，其经精准分离提纯后，可对接多个化工产业链，实现资源的高值化循环利用。加氢处理后的产物中富含多种烃类组分，这些组分可作为基础原料用于生产各类化工产品。其中，饱和烃类可用于合成塑料、橡胶等高分子材料，通过聚合反应形成不同性能的聚合物，满足不同行业对材料性能的需求。芳烃组分则可作为生产染料、香料、医药中间体等精细化学品的关键原料，为精细化工

产业提供重要支撑。加氢产物中的轻质组分还可用于生产溶剂油、涂料等产品，拓展了热解油加氢产物的应用范畴，提升了其附加值。

3.3 加氢产物在高端润滑基础油领域的应用潜力

加氢产物在高端润滑基础油领域展现出巨大应用潜力。凭借其优异的粘温性能、抗氧化性和润滑性，有望打破高端润滑基础油对进口原料的依赖。加氢处理能够显著改善热解油的粘温性能，使产物在不同温度条件下保持稳定的粘度，满足高端润滑油对粘温性能的严苛要求。加氢过程中脱除了导致油品氧化变质的杂质，提高了油品的抗氧化性能，延长了润滑油的使用寿命。加氢产物中饱和烃含量高，具有良好的润滑性和抗磨损性能，能够有效减少机械部件的磨损，提升设备运行效率。通过进一步精制和调合，可生产出符合高端润滑基础油标准的产品，广泛应用于航空航天、精密仪器、高端装备制造等领域，推动润滑油产业向高端化方向发展。

4 废轮胎热解油加氢领域的未来发展趋势

4.1 加氢工艺的高效化与轻量化发展方向

未来废轮胎热解油加氢工艺将朝着高效化与轻量化方向持续演进，以应对产业规模化发展与成本控制的核心需求，提升工艺的市场竞争力^[4]。高效化体现在反应效率的提升上，通过优化反应器结构与传质传热性能，增强反应物与催化剂的接触效果，缩短反应时间，提高单位时间内原料的转化率。同时，精准控制反应条件，如温度、压力、氢油比等参数，使反应在最佳状态下进行，减少副反应发生，提升目标产物选择性。轻量化则聚焦于设备小型化与集成化，采用新型材料制造反应器与配套装置，降低设备重量与占地面积，减少建设成本与运行能耗，提升工艺的经济性与灵活性，适应不同规模的生产需求。

4.2 催化剂技术的升级迭代趋势

催化剂技术是废轮胎热解油加氢领域的核心驱动力，未来将呈现升级迭代趋势，核心围绕高活性、高稳定性、高选择性及低成本四大核心目标展开创新。催化剂活性组分将向多元化与高活性方向发展，通过引入新型金属或非金属元素，构建复合活性中心，增强催化剂对不同反应的催化能力，提升脱硫、脱氮、加氢饱和等反应的效率。催化剂载体将注重高比表面积与良好孔结构的设计，为活性组分提供稳定的支撑与分散环境，提高催化剂的稳定性与使用寿命。此外，催化剂制备工艺将不断创新，采用先进的纳米技术、溶胶-凝胶技术等，实现催化剂的精准合成与性能调控，满足不同热解油原料与加氢工艺的需求。

4.3 加氢产物高值化利用的拓展方向

加氢产物高值化利用将成为未来发展的重要拓展方向，依托精细分离与精准转化技术，推动加氢产物从通用产品向高端特种产品升级。随着市场对高品质燃料与化工原料需求的增长，加氢产物将不再局限于传统应用领域，而是向高端化、精细化方向延伸。在燃料领域，通过深度加氢与调合技术，生产符合国六及以上标准的清洁汽油、柴油，以及航空煤油等高端燃料，满足交通运输领域对清洁能源的需求。在化工原料领域，利用加氢产物中特定烃类组分的特性，开发高附加值的精细化学品，如高性能聚合物、特种溶剂、电子化学品等，提升加氢产物的经济价值。

4.4 加氢技术与其他转化技术的耦合发展潜力

加氢技术与其他转化技术的耦合发展具备巨大潜力，通过多技术协同实现热解油全链条高效转化，推动产业向绿色化、集约化方向转型。将加氢技术与热解技术深度融合，通过优化热解条件与加氢工艺参数，实现热解油品质的源头提升，减少后续加氢处理的难度与成本。加氢技术与催化裂化、异构化等技术的耦合，可进一步调整加氢产物的烃类组成与结构，生产更多符合市场需求的高品质产品。此外，加氢技术与生物转化技术的结合，为废轮胎热解油的绿色利用开辟新途径，通过生物酶催化与加氢反应的协同作用，实现热解油的高效转化与资源化利用，推动废轮胎热解油加氢领域向绿色、可持续方向发展。

结束语

废轮胎热解油加氢领域应用前景广阔。高效化、轻量化的加氢工艺，升级迭代的催化剂技术，拓展了加氢产物的高值化利用方向。同时，加氢技术与其他转化技术的耦合，为热解油全链条高效转化提供了新思路。这一系列发展将有力推动废轮胎资源化利用进程，提升产业经济效益与环境效益，促进相关产业迈向新的发展阶段。

参考文献

- [1] 孙冬雪, 邹滢, 王慧, 等. 废轮胎热解油的研究现状及应用方案分析[J]. 精细石油化工, 2009, 26(4): 59-63.
- [2] 李伟, 杨程, 刘亚青, 等. 反应温度对废轮胎热解油催化加氢反应性能的影响[J]. 石化技术与应用, 2025, 43(3): 187-191.
- [3] 李志. 废旧轮胎裂解油加氢装置的汽提工艺方案比较[J]. 石化技术与应用, 2024, 42(6): 460-464.
- [4] 李志. 轮胎裂解油加氢装置中脱丁烷塔的操作优化分析[J]. 化肥设计, 2025, 63(1): 74-76.