

# 深度脱氮柴油加氢裂化工艺中多环芳烃选择性转化路径探究

宋克岩

山东裕龙石化有限公司 山东 烟台 265715

**【摘要】：**深度脱氮柴油加氢裂化工艺是实现清洁燃料生产的重要技术环节，而多环芳烃的选择性转化行为直接影响脱氮效果与产物分布。本文围绕多环芳烃在加氢裂化反应中的反应机理与转化路径展开研究，通过对催化剂表面活性位、氢气分压及反应温度等条件的系统分析，揭示了多环芳烃在氢化裂化过程中优先经历加氢饱和、开环及逐步裂解的转化特征。研究表明，调控芳烃分子的加氢开环路径可有效降低含氮化合物的稳定性，促进深度脱氮反应的进行，从而实现高品质柴油产物的制备。本研究为优化加氢裂化催化剂设计与工艺参数提供了理论依据，并为实现低氮清洁燃料生产提供了新的思路。

**【关键词】：**深度脱氮；柴油加氢裂化；多环芳烃；选择性转化；反应机理

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.022

## 引言

随着环保标准的日益严格，柴油中氮化物的去除已成为炼油工业的重要研究方向。多环芳烃因其结构稳定、反应活性低，在加氢裂化过程中常与含氮化合物发生竞争吸附，影响脱氮效率。研究多环芳烃的选择性转化路径，不仅有助于理解深度脱氮过程中的反应本质，还能为催化剂性能提升和工艺优化提供科学依据。本研究以深度脱氮柴油加氢裂化工艺为背景，聚焦多环芳烃的反应特征与转化路径，探讨其在不同反应条件下的选择性行为及对脱氮效率的影响，旨在为清洁柴油生产提供理论支持与技术参考。

## 1 深度脱氮柴油加氢裂化中多环芳烃反应特征的研究进展

深度脱氮柴油加氢裂化过程中，多环芳烃的反应特征是影响产品品质与脱氮效率的重要因素。多环芳烃通常由稠环结构组成，具有高芳香性和热力学稳定性，其在加氢裂化反应中表现出较低的反应活性。研究表明，多环芳烃的加氢转化主要经历芳环饱和、环系开裂和部分异构化等路径，这些反应受到催化剂表面金属活性位分布、酸性强度及反应条件的显著影响。在深度脱氮过程中，多环芳烃与含氮化合物之间存在竞争吸附效应，使得催化剂表面可用活性位被占据，进而降低了氮化合物的加氢脱除速率。因此，解析多环芳烃的反应行为是提升脱氮反应效率的关键前提。

在加氢裂化催化体系中，金属组分承担氢化功能，分布在载体表面的酸性中心则负责裂化与异构反应。多环芳烃分子的 $\pi$ 电子结构使其易与金属中心发生强吸附，导致氢化步骤受限。当反应体系中氢分压不足或反应温度过高时，多环芳烃倾向于发生聚合与缩合反应，生成高分子烃或焦炭沉积，进而引发催化剂失活。研究发现，通过优化金属-酸性协同效应，可以增强芳环的逐步加氢能力，使其更容易断裂为单环或少环化合物，这种转化有利于提高后续含氮物种的脱除效率。

催化剂微观结构对多环芳烃转化路径具有决定性作用。分

散良好的 Ni-Mo 或 Ni-W 金属相能够提供丰富的氢化活性位点，而适度的载体酸性则有助于抑制二次缩合反应。对于深度脱氮体系而言，催化剂应兼具高氢化活性和抗积碳能力，以实现芳烃的选择性开环与稳定转化。此外，反应条件对多环芳烃行为的调控也不容忽视。高氢分压促进芳环饱和反应，温度控制可防止过度裂化，从而实现对目标产物分布的优化。从整体反应动力学角度分析，多环芳烃的加氢裂化过程呈现出多步串联特征，反应速率受限于初始氢化步骤的速率常数。通过构建合理的反应动力学模型，可以更准确地描述芳烃分子在催化剂表面的吸附、氢化和断键行为，为工艺优化提供理论依据。深度研究多环芳烃的反应特征，不仅能揭示加氢裂化的本质机理，也为催化剂的精准设计与高效脱氮工艺开发提供了坚实的理论支撑。

## 2 加氢裂化过程中多环芳烃转化受限的关键因素分析

加氢裂化过程中多环芳烃的转化受到多种复杂因素的制约，这些因素共同决定了反应活性、产物分布以及脱氮效率。多环芳烃结构的稳定性是影响转化的核心障碍，其稠环共轭体系使芳香环电子云密度高，分子间存在强 $\pi-\pi$ 作用力，导致氢分子的活化及加成反应难以进行。这类化合物在催化剂表面的吸附能较高，脱附速率较慢，限制了活性位点的有效利用。同时，其较大的分子体积和复杂的空间构型造成扩散阻力增加，使得反应过程中氢气及反应中间体的传质效率下降，从而导致转化速率受限。

催化剂表面特性对多环芳烃的转化具有显著影响。金属组分类型、分散度和载体酸性分布共同决定了氢化与裂化反应的平衡关系。当金属颗粒分散不均或表面电子性质不理想时，氢化反应的选择性下降，难以有效断裂芳环结构。同时，载体酸中心过强或分布不合理会诱导过度裂化或焦炭生成，使催化剂逐渐失活。积碳层的形成阻碍反应物分子接触活性位，进一步降低加氢效率。此外，氮、硫等杂原子的存在会与金属位发生竞争吸附，削弱金属的氢化能力，加剧多环芳烃的转化受限现

象。反应条件的控制也是影响转化效果的关键因素。温度升高有助于芳环的活化，但同时会促进缩合与副反应，导致生成不稳定的重质烃类物质。氢分压过低时，氢源供应不足，芳环饱和反应无法顺利进行，易产生未完全氢化的中间体；而氢分压过高又会降低裂化反应活性，使反应路径向饱和方向偏移，减少轻质产物的生成。适宜的反应压力、氢油比及空速是维持多环芳烃稳定转化的基础条件。

此外，反应体系中分子间的竞争吸附效应同样显著。含氮化合物和芳香烃在催化剂表面共享活性中心，强吸附分子的存在抑制了多环芳烃的氢化开环过程，使脱氮反应效率降低。由此可见，催化剂设计应兼顾金属与酸性的协同优化，并通过结构调控和反应参数匹配，缓解芳烃吸附过强、扩散受限及积碳失活等问题。深入分析这些限制因素，对于实现深度脱氮和高效芳烃转化具有重要的指导意义。

### 3 催化剂结构调控在多环芳烃选择性转化中的作用机制

催化剂结构的精细调控在多环芳烃选择性转化过程中发挥着决定性作用。多环芳烃的反应路径高度依赖于催化剂表面活性位的性质、分布以及金属与载体之间的协同效应。氢化裂化反应通常由双功能催化剂实现，其中金属组分承担氢化脱芳与加氢饱和功能，酸性载体负责碳链断裂和异构化过程。通过对催化剂结构的精准调控，可以在分子层面上实现对芳环开环方向与速率的调节，从而提升选择性转化效率。

金属组分的分散度与电子结构是影响反应选择性的关键。高分散度的 Ni-Mo、Ni-W 或 Co-Mo 金属相可提供更多可及的氢化活性位，促进芳香环的逐步加氢过程，使多环芳烃在不破坏骨架的情况下发生可控开环反应。金属粒径过大则导致氢化能力下降，同时削弱对芳环中间体的吸附调控，易造成过度裂化或生成不稳定副产物。通过调节金属前驱体类型与焙烧条件，可实现金属-载体间的电子迁移优化，增强氢化活性与抗硫中毒性能，为芳烃的高效转化提供结构基础。载体的酸性结构同样决定了多环芳烃转化的方向性。适度的弱酸中心有助于促进环系开裂并抑制缩合反应，而强酸中心过多则会引发分子重组与焦炭沉积，导致催化剂失活。通过引入介孔结构或掺杂稀土元素，可改善酸性分布与孔径结构，增强反应物分子的扩散性，使多环芳烃更易接近活性位点。载体孔径大小与形貌也影响芳香分子的吸附取向和反应选择性，具有层状或蠕虫状孔结构的材料往往能显著提升大分子芳烃的转化效率。

金属与酸性载体之间的相互作用是催化剂性能稳定性根本保障。强金属-载体相互作用可防止金属颗粒迁移与团聚，同时通过电子调控作用提高氢化能力。合理的双功能协同能有效平衡氢化与裂化反应速率，使芳烃开环过程趋于温和可控，从而实现对目标产物的高选择性生成。通过调控催化剂结构实现反应路径的精准控制，不仅能够提升多环芳烃的选择性转化

效率，还为深度脱氮体系提供了可持续的催化设计思路，为柴油加氢裂化过程的工业化优化奠定了理论基础。

### 4 多环芳烃选择性转化路径优化的工艺实践与应用成果

多环芳烃选择性转化路径的优化是深度脱氮柴油加氢裂化工艺能否高效运行的核心环节。通过系统调控反应条件、催化剂性能及工艺参数，可以显著改善芳烃转化效率与产物分布，实现脱氮与加氢裂化过程的协同强化。工业实践表明，在深度加氢裂化条件下，多环芳烃的反应路径可通过精准控制氢分压、反应温度及空速进行优化，使其优先经历加氢饱和、环系开裂和异构化等阶段，从而实现芳香结构的选择性断裂，减少重组与焦炭生成。

在工艺参数优化方面，较高的氢分压能够有效提高氢化速率，促进芳环逐步饱和，抑制缩合副反应的发生。同时，反应温度的控制直接影响裂化与氢化反应的平衡，适中的温度范围可确保芳环开裂充分而不过度裂化，维持产物分布的稳定性。空速的调节则决定了反应物在催化剂床层中的停留时间，延长接触时间有助于实现芳烃分子的深度转化，但过长的停留又会引发副反应积累，因此需要通过动态优化建立平衡点。多变量的综合调控使多环芳烃的选择性转化路径得以在宏观反应条件与微观结构层面实现统一优化。

在催化体系的应用成果中，新型双功能催化剂展现出显著优势。通过引入高分散性金属组分与优化载体孔结构，催化剂能够在较低温度下实现芳烃的高效开环与脱氮反应。添加少量调变助剂，如磷、硼或镧系元素，可有效调节金属电子密度与酸性分布，从而强化氢化裂化的协同效应。实验结果显示，经结构调控后的催化剂在含多环芳烃原料处理过程中，芳烃转化率显著提升，氮含量降低幅度大，柴油馏分的十六烷值和稳定性均得到明显改善。在工业装置应用中，分段加氢裂化与双床串联反应的操作模式被证明能进一步提升选择性转化效果。通过前段高氢化床层实现芳香环的饱和与结构松弛，再在后段酸性裂化床层中进行控制性开环与脱氮反应，可以显著减少焦炭生成并提高催化剂寿命。该工艺的推广应用不仅提升了深度脱氮柴油的品质，还实现了氢耗的合理分配与能源利用效率的提升，为清洁燃料生产提供了可靠的技术支持与工业化验证基础。

### 5 面向高效脱氮与清洁燃料的未来发展趋势

面向高效脱氮与清洁燃料生产的未来发展趋势，深度脱氮柴油加氢裂化工艺将朝着高选择性、高稳定性和低能耗方向演进。随着原油资源的重质化和燃料标准的持续提升，传统的加氢裂化工艺难以同时兼顾脱氮效率与产物质量。未来研究的重点将集中于催化剂的精准设计与反应体系的智能化调控，通过分子层级的结构优化，实现多环芳烃及含氮化合物的协同转

化，以更低的能耗获得更高的脱氮深度和燃料纯度。

在催化剂研发方面，具有多尺度调控能力的复合型催化材料将成为关键方向。纳米限域效应和电子结构工程的引入，使金属组分与载体之间的相互作用更具可控性。通过构建具有梯度酸性分布和多孔结构的催化体系，可实现对反应物扩散路径与中间体生成速率的精准调节。新型金属-有机框架材料、碳基复合载体及单原子催化剂的应用，为加氢裂化催化体系的高效化提供了新的理论支撑。这类催化剂在保持高活性金属利用率的同时，具备优异的抗中毒与抗积碳性能，为长期稳定运行创造了条件。工艺过程的智能化与绿色化是未来发展的另一重要方向。借助反应动力学建模与过程模拟技术，可以实现对多环芳烃转化路径的预测与在线调控，使加氢裂化过程更加精确与可视化。结合人工智能算法与反应网络分析，可通过实时监测反应参数，动态优化温度、压力及氢油比，实现能耗最小化与选择性最大化。与此相配合的循环氢利用与低压加氢系统将减少氢气损耗，提高能源利用率。

从应用层面看，未来的深度脱氮柴油生产将与绿色炼化理

念深度融合，推动加氢裂化技术向可持续与清洁方向升级。通过生物质氢源替代、废气回收利用及碳排放闭环控制，可进一步降低工艺的环境负荷。高效脱氮与多环芳烃转化的耦合优化，将使燃料产品具备更高的清洁度与稳定性，为低碳能源体系建设提供技术支撑。随着催化科学、材料化学与过程工程的持续融合，加氢裂化工艺必将在清洁燃料领域展现更广阔的发展前景。

## 6 结语

深度脱氮柴油加氢裂化过程中，多环芳烃的选择性转化研究为提高燃料品质与降低氮含量提供了重要的理论与实践基础。通过对反应特征、影响因素及催化剂结构调控的系统探讨，可以发现多环芳烃的加氢开环与脱氮反应存在紧密的协同关系。合理设计催化剂结构与工艺条件，是实现高效脱氮和芳烃转化的关键路径。随着催化科学与过程工程的持续进步，绿色高效的加氢裂化技术将不断完善，为清洁柴油的稳定生产和能源利用效率的提升提供有力支撑，并为未来低碳燃料体系的构建奠定坚实的技术基础。

## 参考文献：

- [1] 刘志宏.多环芳烃加氢转化机理研究进展[J].石油炼制与化工,2022,53(7):45-52.
- [2] 陈嘉宁.柴油加氢脱氮催化剂性能及反应路径探讨[J].化工新型材料,2021,49(10):87-94.
- [3] 孙晓峰.加氢裂化工艺中芳烃选择性转化的动力学分析[J].石油学报(石油加工版),2020,36(4):612-620.
- [4] 郑颖涵.深度脱氮柴油制备技术与催化机理研究[J].现代化工,2023,43(9):101-108.
- [5] 周立晨.加氢裂化反应中多环芳烃转化路径的调控方法[J].催化学报,2024,45(3):256-264.