

甲醇制烯烃反应器中积碳前驱体的在线监测技术

田聪聪

沧州中铁装备制造材料有限公司 河北沧州

【摘要】甲醇制烯烃过程中积碳前驱体的生成与积累是影响催化剂寿命与反应效率的关键因素。针对传统离线检测滞后、难以实现实时反馈的不足，研究基于光谱分析、质谱联用与在线红外成像等技术构建了多维度在线监测体系，实现对反应器内部积碳前驱体浓度、结构及分布的动态追踪。结果表明，该体系可在反应早期精准识别芳香族及多烯类前驱体的生成趋势，并结合数据建模实现积碳风险的提前预警。该方法不仅提升了甲醇制烯烃反应器运行的稳定性与经济性，还为工业化装置的智能运维提供了技术支撑，对延长催化剂寿命与优化反应条件具有重要意义。

【关键词】甲醇制烯烃；积碳前驱体；在线监测技术；催化剂寿命；反应器运行

【收稿日期】2025 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250196

On-line monitoring technology for coke precursor in methanol-to-olefins reactor

Congcong Tian

Cangzhou China Railway Equipment Manufacturing Materials Co., Ltd., Cangzhou, Hebei

【Abstract】 The formation and accumulation of coke precursors during the methanol-to-olefins process are key factors affecting catalyst life and reaction efficiency. To address the shortcomings of traditional offline detection, such as lag and difficulty in achieving real-time feedback, this study constructs a multi-dimensional on-line monitoring system based on technologies including spectral analysis, mass spectrometry, and on-line infrared imaging. This system enables dynamic tracking of the concentration, structure, and distribution of coke precursors inside the reactor. The results show that the system can accurately identify the formation trends of aromatic and polyene precursors in the early stage of the reaction, and realize early warning of coking risks by combining data modeling. This method not only improves the stability and economy of the operation of methanol-to-olefins reactors but also provides technical support for the intelligent operation and maintenance of industrial devices, which is of great significance for extending catalyst life and optimizing reaction conditions.

【Keywords】 Methanol-to-olefins; Coke precursor; On-line monitoring technology; Catalyst life; Reactor operation

引言

甲醇制烯烃技术作为煤化工与天然气化工的重要衔接环节，在满足烯烃需求增长方面发挥着战略作用。然而，反应器运行过程中催化剂表面不可避免地形成积碳，导致活性下降、反应条件波动甚至非计划停工。积碳的形成往往经历前驱体生成、结构转化与沉积等阶段，而前驱体的早期监测与精准识别是控制积碳的关键。近年来，在线监测技术的发展为积碳研究提供了新的手段，使研究者能够在反应运行过程中实时获取前驱体的化学信息和生成

趋势。本文将围绕甲醇制烯烃反应器中积碳前驱体的在线监测展开探讨，旨在构建高效、精准的监测体系，为工业化运行的催化剂保护与反应优化提供可行路径。

1 甲醇制烯烃反应器中积碳前驱体的形成机理与特征

在甲醇制烯烃反应过程中，积碳前驱体的生成与催化剂表面的酸性中心密切相关。甲醇分子在催化剂酸中心上经过一系列脱水、烯烃生成和烷基化等反应，会逐渐形成烯丙基、芳香族以及多烯类中

间体^[1]。这些中间体在高温、高转化率条件下极易发生缩合、聚合等反应,形成分子量更大的多环结构,这类结构是积碳的直接前驱物。不同反应路径下,前驱体的形成速率和结构特征会有所差异,如芳香族类前驱体具有较高的稳定性和疏水性,难以被反应气体清除,从而在催化剂微孔内逐渐沉积,为后续积碳打下基础。

在反应器的运行条件中,温度梯度、反应物浓度及催化剂孔径分布都会影响前驱体的生成机理。高温区的催化剂表面往往更容易生成多环芳香族结构,这与芳构化反应活化能较低以及热力学稳定性相关;而在较低温区,则更容易聚集轻质多烯类化合物,这类物质虽然稳定性不如芳香族,但在气相和表面传质受限条件下,也可能迅速转化为高分子碳质沉积物。反应物中微量杂质如硫化物、氮化物等也会促进前驱体生成,因其与催化剂表面活性中心的相互作用可能改变反应路径,使生成物偏向难以脱除的芳香族结构。

积碳前驱体的物理化学特征不仅体现在分子结构上,还与其在催化剂表面的分布形态有关。微孔和中孔结构内部的前驱体沉积会显著降低催化剂的孔容和比表面积,从而抑制反应物的有效扩散;而表面外层沉积则可能在短时间内改变反应床层的压降特性,导致气固接触效率下降。在实际运行中,前驱体的生成与积累呈现出由表面到孔道内部逐渐推进的趋势,这种递进式沉积模式增加了催化剂再生的难度,并缩短了单周期运行时间。

2 积碳前驱体在线监测技术体系构建与原理

针对甲醇制烯烃反应中积碳前驱体难以实时识别的问题,在线监测技术体系的构建需兼顾反应工况的苛刻性与数据采集的高灵敏度。在该体系中,光谱类检测技术是核心组成部分,通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)、拉曼光谱以及紫外可见吸收光谱等手段,可以对反应气体和催化剂表面生成的有机中间体进行分子结构识别。红外光谱能够捕捉芳香环 C=C 伸缩振动、多烯 C-H 伸缩振动等特征吸收峰,从而判断前驱体的种类和浓度变化趋势,而拉曼光谱对于检测芳香族骨架的 D 带和 G 带信号尤为敏感,有助于追踪碳质结构的演变过程。

质谱联用技术在积碳前驱体在线监测体系中发挥着精确解析反应气体组分的重要作用。通过将质

谱仪直接与反应器出口气流连接,可以实现对多烯类、芳香族以及高分子有机碎片的实时检测与定性分析。采用软电离技术能够有效减少分子过度碎裂,最大限度保留原有分子结构信息,从而提高对前驱体种类判定的准确性与稳定性^[2]。气相色谱-质谱(GC-MS)联用能够在检测前对复杂混合物进行分离,大幅提升对低浓度前驱体的识别灵敏度。在高温、高压及复杂化学气氛条件下,该技术需配合耐腐蚀高强度采样探头及高效在线冷凝系统,确保气样在传输过程中的化学组成不发生显著变化,保证监测数据的完整性与可靠性。

在线红外成像与光纤传感技术的引入,使得监测体系能够实现反应床层内部温度场与化学反应热点的可视化。通过在反应器内部或出口处布设多点光纤探头,可同步采集不同位置的红外吸收信号和温度变化数据,建立前驱体生成与局部热效应的关联模型。这种多维度监测方式不仅提升了积碳前驱体识别的实时性,还为反应器运行提供了空间分布信息,使工程师能够针对性地调整进料分布、反应温度或催化剂装填结构,以降低积碳风险。

3 在线监测在积碳风险预测与反应优化中的应用效果

在积碳前驱体的在线监测工作基础上,开展风险预测已成为保障反应器长期稳定运行的重要技术环节。通过对连续采集的监测数据进行长期积累与深度分析,可以提取反映反应过程状态变化的关键特征参数,如前驱体浓度变化速率、特征峰面积比例以及初始生成时间等。利用这些参数构建的积碳风险预测模型,能够在前驱体生成速率出现异常加快时快速作出反应,并提前发出预警信号。这种预警为操作人员争取了宝贵的调整时间,能够在催化剂失活之前及时采取调整反应条件、优化进料组成或计划性更换催化剂等措施,从而有效减少非计划停车的发生,并显著提高装置的年运行负荷率与经济回报。

反应优化是在线监测数据价值实现的另一关键应用方向。借助实时采集的前驱体生成特征信息,可以在不降低烯烃产率的前提下,有针对性地调控反应条件,使前驱体的生成被抑制到最低水平。例如,当监测信号显示芳香族前驱体比例升高时,工程师可通过降低高温区的反应温度或引入一定比例

的氢气共进料来减缓芳构化反应的进行；而当多烯类化合物积累风险加大时，适度调整进料中水的比例可加快其裂解与排出速度^[3-7]。这种基于实时数据的工艺调控方式，不仅能延长催化剂的有效工作周期，还能减少能耗与副产物生成，实现生产过程的精细化管理。

将在线监测数据与反应器数字化模型相结合，可构建集检测、预测与调控于一体的闭环控制体系。通过将实时监测结果输入到先进过程控制（APC）系统中，系统能够自动完成工艺参数的动态优化，并依据运行状态的变化不断修正控制策略。这种以数据驱动与机理模型相融合的控制模式，使得甲醇制烯烃反应器的运行逐步摆脱传统经验依赖，转向智能化、自适应的决策管理。该模式不仅能显著提升装置的运行效率和经济效益，还能在减少资源浪费与碳排放方面发挥积极作用，为工业催化反应的绿色转型和可持续发展提供坚实的技术保障。

4 在线监测技术在工业化装置运行中的实践与改进路径

在大型工业化甲醇制烯烃装置运行中，在线监测技术的有效应用不仅依赖于检测精度与灵敏度的持续提升，还必须兼顾系统的长期稳定性和运维的经济可行性。装置在长周期、高负荷条件下运行，监测设备需要承受高温、高压以及含有多种反应副产物的复杂气氛环境，因此耐久性与抗干扰能力显得尤为重要。工程实践中常选用耐腐蚀、高强度的金属或合金采样探头，并辅以表面防积碳涂层以延缓沉积。同时，在采样管路设计中引入快速冷却与除杂单元，可有效避免气样在传输过程中发生二次反应或前驱体聚合沉积，从而保持检测信号的稳定性和分析结果的准确性。

为了进一步提升工业化应用中的可靠性，监测系统普遍采用模块化结构与冗余配置的组合方案。模块化设计便于在装置连续运行状态下，对局部单元进行快速更换、检修或功能升级，减少因监测设备维护而造成的生产中断。冗余配置则为系统提供了安全保障，当某一检测模块因故障失效时，备用模块可立即接管任务，维持监测连续性和数据完整性。在实际运行中，将光谱检测、质谱分析等多种技术协同布置，可实现不同信号来源的相互印证与补充，降低因单一技术局限性引发的误判风险，并为

工艺调整与优化提供多维度数据支持。

未来的发展应着力推动在线监测系统与工厂控制网络的深度融合，使其不仅是独立的检测工具，更成为生产决策的重要组成部分。借助高速数据采集与边缘计算技术，监测信息能够实时传输至控制中心，实现毫秒级响应。通过引入机器学习与模式识别算法，结合历史运行数据训练模型，可不断优化前驱体识别与积碳风险预测的准确性与提前量^[8]。依托工业物联网（IIoT）平台，将监测数据与生产管理、设备维护、能效评估系统互联互通，形成覆盖从前驱体生成、催化剂状态到反应器运行效率的全链条监控体系。这一基于数据驱动的智能化升级，将显著延长催化剂使用寿命，提升装置整体能效，并为甲醇制烯烃产业的绿色可持续发展提供坚实技术保障。

5 结语

甲醇制烯烃反应器中积碳前驱体的在线监测技术为积碳生成机理研究、风险预测及反应优化提供了可靠手段。通过多维度实时检测与数据建模，不仅能够提前识别前驱体生成趋势，降低非计划停车风险，还可结合数字化控制实现工艺的精准调节与持续优化。该技术体系的完善与工业化应用，将有效延长催化剂使用寿命，提高装置运行效率，并为甲醇制烯烃产业的高效、绿色与可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 中国科学院大连化学物理研究所. 甲醇和混合烃耦合制低碳烯烃的方法: CN120172799A[P/OL]. 2025-06-20[2025-08-08].
- [2] 中国科学院大连化学物理研究所. 高密度快速流化床反应器、甲醇制烯烃装置及方法: CN120169266A[P/OL]. 2025-06-20[2025-08-08].
- [3] 国能数智科技开发(北京)有限公司. 甲醇制烯烃系统及其控制方法: CN119499977A[P/OL]. 2025-02-25[2025-08-08].
- [4] 韩建翔, 崔喜雯, 孙剑. 二氧化碳催化加氢制烯烃的研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(06): 127-152.
- [5] 狄春雨, 任雅梅, 虎英俊, 等. 碳化糖类辅助合成多级孔 SAPO-34 分子筛及其催化性能[J]. 工业催化, 2025, 33(02):

- 70-75.
- [6] 润和催化剂股份有限公司.一种流化床甲醇制烯烃的方法、反应器和工艺系统:CN116217322B[P/OL].2025-04-29[2025-08-08].
- [7] 中国石油化工股份有限公司,中石化(上海)石油化工研究院有限公司.MTO 装置与甲醇制低碳烯烃的方法:CN120054396A[P/OL].2025-05-30[2025-08-08].

- [8] 天津渤化化工发展有限公司.一种用于甲醇制烯烃固定流化床微反装置的多段式反应器:CN222753230U[P/OL].2025-04-15[2025-08-08].

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS