

乙烯裂解炉裂解深度控制与实时优化

徐娟娟

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃二分公司 宁夏 银川 750000

摘要: 在石油化工领域, 乙烯裂解炉的裂解深度控制与实时优化至关重要。本文聚焦乙烯裂解炉裂解深度控制与实时优化这一关键主题, 先是详细阐述了乙烯裂解炉的工作原理以及裂解深度的概念, 为后续探讨奠定基础。接着深入分析影响裂解深度的多方面因素, 包括裂解温度、原料停留时间、烃分压等及其具体影响机制。而后分别介绍了传统与先进的裂解深度控制策略, 最后论述乙烯裂解炉的实时优化方式, 涵盖基于模型的实时优化以及在线监测与反馈控制等内容, 旨在助力提升乙烯裂解炉的运行效率与生产效益。

关键词: 乙烯裂解炉; 裂解; 深度控制; 实时优化

引言: 乙烯作为重要的化工基础原料, 乙烯裂解炉在其生产过程中起着至关重要的作用, 而裂解深度的有效控制与实时优化更是影响着乙烯产量和产品质量的关键环节。随着化工行业不断发展, 对乙烯生产的精准性与高效性要求日益提高。鉴于此, 深入了解乙烯裂解炉的工作原理, 明晰裂解深度相关概念, 剖析影响因素, 进而探讨有效的控制策略与实时优化方法就显得尤为重要, 这也正是本文将要深入探讨的核心内容。

1 乙烯裂解炉的工作原理及裂解深度的概念

1.1 工作原理 乙烯裂解炉是乙烯生产装置的核心设备, 其工作原理基于烃类原料在高温、短停留时间和低烃分压的条件下发生裂解反应。首先, 原料(如石脑油、乙烷等)经预热后进入裂解炉炉管, 炉管由燃料燃烧提供高温热量, 通常温度可达800-900℃甚至更高。在炉管内, 烃类分子吸收大量热量, 化学键开始断裂, 发生复杂的热裂解反应, 生成乙烯、丙烯、丁二烯等小分子烯烃以及氢气、甲烷等其他产物。裂解过程是吸热反应, 需要持续的高温环境来维持反应的进行^[1]。反应后的产物和未反应的原料混合物迅速离开炉管进入急冷系统, 通过急冷操作终止反应, 防止二次反应的发生, 随后进入后续的分离和提纯工序, 以得到高纯度的乙烯等目标产品。

1.2 裂解深度的概念 裂解深度是衡量乙烯裂解过程进行程度的重要指标。它反映了烃类原料在裂解炉中转化为小分子产物的程度以及产物的分布情况。从化学角度看, 裂解深度与原料分子中碳-碳键断裂的程度相关。通常可以用一些特定的参数来表征, 例如乙烯收率、甲烷与乙烷的比值、液体产物的BMCI值(芳烃关联指数)等。如果裂解深度较浅, 意味着原料转化不完全, 乙烯等目标产物的收率较低, 而重质产物相对较多; 反之,

裂解深度过大时, 虽然乙烯收率可能会在一定程度上提高, 但会导致过度裂解, 产生过多的甲烷、氢气等副产物, 同时增加焦炭的生成量, 不仅降低了原料的利用率, 还会影响裂解炉的运行周期, 增加清焦等维护工作的频率和难度, 因此合理控制裂解深度对于乙烯生产的经济效益和装置稳定运行至为重要。

2 影响乙烯裂解深度的因素

2.1 裂解温度

2.1.1 温度对反应速率的影响

裂解温度是影响乙烯裂解深度极为关键的因素之一, 对反应速率有着显著的影响。一般而言, 温度升高时, 烃类分子所具有的能量增加, 分子运动加剧, 从而使反应物分子间的有效碰撞频率大幅提高。根据阿累尼乌斯定律, 反应速率常数随温度呈指数增长。在乙烯裂解反应中, 较高的温度能极大地加快碳-碳键断裂的速率, 促使反应快速进行。例如, 当裂解温度从800℃提升到850℃时, 反应速率可能会提升数倍, 使得原料能够在更短的时间内发生裂解转化, 这为在裂解炉中实现高效的裂解过程提供了重要的动力学基础, 是影响裂解深度的关键动力学因素。

2.1.2 温度对产品分布的影响 随着温度升高, 裂解反应朝着生成更多小分子产物的方向进行。高温有利于生成乙烯、丙烯等轻质烯烃, 因为较高的温度会使大分子烃类更易裂解成较小的烯烃分子。但同时, 过高的温度也会导致二次反应加剧, 如乙烯进一步裂解生成甲烷和氢气等副产物, 降低了乙烯的选择性。而且, 温度过高还会使芳烃等重质产物的生成量减少, 焦炭生成量增加。例如, 在较低温度下, 液体产物中可能含有较多的重质芳烃, 而当温度升高到一定程度后, 液体产物中的重质组分减少, 气态产物中乙烯、氢气等含量增加, 从

而改变了整个产品的分布格局，对乙烯裂解的产物收率和质量产生直接影响。

2.2 原料在炉管内的停留时间

2.2.1 停留时间与反应程度的关系

原料在炉管内的停留时间与乙烯裂解反应程度紧密相连。停留时间越长，原料分子在高温环境下进行裂解反应的机会就越多，反应程度也就越深。在一定范围内，延长停留时间可使更多的烃类分子发生碳-碳键断裂，转化为小分子产物，乙烯等烯烃的收率会有所增加。然而，若停留时间过长，会引发过度裂解，导致副产物如甲烷、氢气的生成量大幅上升，乙烯选择性下降，还会加重焦炭的沉积。例如，当停留时间从0.3秒延长到0.5秒时，乙烯收率可能先上升后趋于平稳，而甲烷等副产物则持续增加，因此需精准控制停留时间以优化裂解深度^[2]。

2.2.2 影响停留时间的因素

影响原料在炉管内停留时间的因素众多。炉管的长度和直径是关键因素，较长的炉管或较小的直径会使原料在炉内的路径变长、流速加快，从而减少停留时间；反之则会延长。原料的进料速度也起着重要作用，进料速度快时，原料在炉管内停留时间短，反之则长。此外，炉管内的压力状况对停留时间有间接影响，压力变化会引起原料体积和流速改变，进而影响其在炉管内的停留时长。

2.3 烃分压

2.3.1 烃分压对反应平衡的影响

烃分压对乙烯裂解反应平衡有着显著的影响。在裂解反应中，降低烃分压有利于反应向生成更多小分子产物的方向进行，这是因为根据勒夏特列原理，减小压力会使反应体系朝着气体分子数增多的方向移动。对于乙烯裂解而言，较低的烃分压可促进大分子烃类裂解生成乙烯、丙烯等烯烃，提高烯烃的收率^[3]。例如，在较低烃分压下，乙烷裂解生成乙烯和氢气的反应更易向右进行，从而提高乙烯的产量。相反，较高的烃分压会抑制裂解反应，导致重质产物增多，不利于乙烯等目标产物的生成，对整个反应平衡及产物分布产生重要的调控作用。

2.3.2 调节烃分压的方法

调节烃分压主要有几种方法。一是通过稀释剂的加入来降低烃分压，常用的稀释剂如蒸汽。加入蒸汽后，反应体系中总的气体分子数增加，烃类物质所占比例相对降低，从而有效降低了烃分压。例如，在石脑油裂解过程中加入适量蒸汽，可使烃分压显著下降，促进裂解反应。二是改变系统压力，采用减压操作可直接降低烃

分压，但这种方法对设备要求较高，需要特殊的减压设备及密封装置。

3 乙烯裂解深度控制策略

3.1 传统控制策略

3.1.1 温度控制

在乙烯裂解炉运行时，通过精确调节燃料气的流量与燃烧状况来把控炉管温度。通常在炉管不同位置设置热电偶等温度监测装置，实时反馈温度数据，操作人员依据设定的目标温度，利用控制系统调整燃料气供应阀门开度，以维持稳定的裂解温度。例如，当检测到炉管温度低于设定值时，增加燃料气流量，使燃烧更剧烈从而提升温度；反之则减少燃料气流量。然而，该方法存在一定局限性，炉管内温度分布并非完全均匀，单点监测可能无法全面反映真实温度情况，且外界环境干扰、燃料气品质波动等因素都可能导致温度控制出现偏差，进而影响裂解深度的精准控制。

3.1.2 进料流量控制

通过调节原料进入裂解炉的流量来间接影响裂解深度。一般采用流量调节阀来精确控制进料量，当需要降低裂解深度时，减少进料流量，使得单位时间内进入炉管的原料减少，在炉管内的停留时间相对延长，反应程度降低；反之，增加进料流量则会使裂解深度有所提升。但这种控制方式也面临挑战，进料流量的改变会影响炉管内压力分布以及物料的停留时间分布，进而可能引发一系列复杂的连锁反应。

3.2 先进控制策略

3.2.1 串级控制策略

串级控制策略在乙烯裂解深度控制中具有显著优势。它主要由主控制器和副控制器构成。主控制器以乙烯裂解深度相关指标（如乙烯收率、产物分布等）作为控制目标，其输出作为副控制器的设定值。副控制器则针对影响裂解深度的直接因素，如裂解温度进行控制。例如，当主控制器根据乙烯收率偏差发出调整信号后，副控制器接收该信号并调节燃料气流量或其他加热手段来精准控制裂解温度，从而间接影响裂解深度。这种策略能够有效克服单一控制回路中干扰因素对控制精度的影响，因为副回路能快速对进入副回路的干扰进行调节，而主回路又能进一步校正副回路可能存在的余差，提高了系统的抗干扰能力和控制品质，使裂解深度的控制更加稳定、精确，适应复杂多变的生产工况。

3.2.2 Smith预估控制策略

Smith预估控制策略旨在解决纯滞后对乙烯裂解深度控制的不良影响。在乙烯裂解过程中，由于炉管传热、

物料传输等环节存在时间滞后, 常规控制方法难以实现理想的控制效果。Smith预估器通过建立被控对象的数学模型来预估滞后环节对控制作用的影响, 并将预估结果提前反馈到控制器中。例如, 在控制裂解温度时, 它可以根据当前的控制输入预估出未来一段时间后温度的变化情况, 控制器依据预估结果提前进行调整, 使控制作用能够及时补偿滞后带来的影响, 从而有效减小超调量, 缩短调节时间, 提高系统的稳定性和响应速度, 实现对乙烯裂解深度更精准、更及时的控制, 减少因滞后导致的裂解深度波动, 提升乙烯生产过程的经济效益 and 产品质量稳定性。

4 乙烯裂解炉的实时优化

4.1 基于模型的实时优化

4.1.1 建立裂解炉模型

通常采用机理模型与经验模型相结合的方式。机理模型基于乙烯裂解的化学反应动力学、传热传质原理等科学理论构建, 描述原料在炉管内的裂解反应过程、热量传递以及物质转化规律, 例如通过一系列复杂的微分方程来表征烃类分子的裂解反应速率与温度、压力、浓度等因素的关系。经验模型则是依据大量实际生产数据, 利用数据拟合方法得到各变量之间的统计关系, 弥补机理模型在某些复杂实际工况下的不足。在建立模型过程中, 需要对裂解炉的结构参数(如炉管尺寸、材质)、操作条件(温度、压力、进料流量等)以及原料特性(组成、性质)等进行详细测定与分析, 将这些数据输入模型进行参数估计与校准, 以确保模型能够准确反映裂解炉的实际运行特性, 为后续实时优化提供可靠依据。

4.1.2 实时优化算法

常见的有基于梯度的优化算法和智能优化算法。基于梯度的优化算法如序列二次规划(SQP), 通过计算目标函数(如乙烯收率最大化、能耗最小化等)的梯度信息, 沿着梯度方向搜索最优解。它在处理具有连续可微特性的优化问题时具有较高的计算效率。智能优化算法如遗传算法, 模拟生物进化过程, 通过对种群个体(代表不同的裂解炉操作方案)的选择、交叉、变异操作, 逐步搜索最优解^[4]。它不需要目标函数的梯度信息, 能在复杂的、多峰的搜索空间中找到全局最优或近似最优解。在乙烯裂解炉实时优化中, 算法根据建立的裂解炉模型, 以当前的生产数据为基础, 实时计算并调整操作参数(如裂解温度、进料流量等), 以达到提高乙烯产量、降低能耗、减少副产物等优化目标, 适应生产过程中的动态变化。

4.2 在线监测与反馈控制

4.2.1 在线监测技术

采用多种先进传感器对关键参数进行实时监测, 如利用高温热电偶精准测量炉管温度, 其能承受裂解炉内的高温环境并快速准确地反馈温度变化。通过质谱仪分析裂解产物的组成与含量, 可及时掌握产品分布情况。还有压力传感器对炉内压力进行实时监控, 以及流量传感器监测原料和蒸汽等的进料流量。这些传感器将采集到的数据传输至控制系统, 形成庞大的实时数据信息流。借助先进的数据采集与处理系统, 对数据进行整合、分析与可视化展示, 为操作人员和控制系统提供全面、准确且及时的裂解炉运行状态信息, 以便做出合理决策。

4.2.2 反馈控制机制

当在线监测系统获取到各类参数数据后, 控制系统依据预设的目标值与实际监测值进行对比分析。例如, 若乙烯收率未达目标, 而监测到裂解温度偏低, 反馈控制机制会根据算法计算出需要调整的幅度, 通过调节燃料气流量控制阀来增加燃料供应, 提升裂解温度, 对于原料进料流量、蒸汽添加量等其他影响因素也进行协同调整。该机制能快速响应生产过程中的各种变化与扰动, 持续修正操作参数, 确保裂解炉始终在接近最优的工况下运行, 实现对裂解深度的精准控制以及整体生产效益的最大化。

结束语

在乙烯生产的核心环节中, 裂解炉的裂解深度控制与实时优化意义非凡。通过深入剖析裂解深度相关概念、探究影响因素, 并全面阐述传统与先进的控制策略以及实时优化方案, 我们能清晰地认识到精准把控裂解深度对提升乙烯产量、优化产品分布和降低能耗至关重要。持续发展和完善先进的控制技术与优化算法, 结合可靠的在线监测与高效反馈控制机制, 将进一步推动乙烯裂解工艺的高效化与智能化。

参考文献

- [1]智茂轩.乙烯裂解气组成在线分析方法的研究及应用进展[J].石油化工.2021.50(06):622-626.
- [2]黄一烽.浅谈乙烯裂解炉的配管设计[J].石油化工设计.2021.38(02):54-58+6-7.
- [3]王长军.乙烯裂解炉裂解深度控制与实时优化[J].石化技术.2021.28(05):33-34+60.
- [4]黄子坤.乙烯裂解炉工艺概述与节能措施[J].山东化工.2021.50(07):146-147.