

乙烷裂解制乙烯工艺技术的优化与经济性

孟祥祯 (连云港石化有限公司, 江苏 连云港 222000)

摘要: 本文深入探讨了乙烷裂解制乙烯工艺技术的优化及经济性。通过对乙烷裂解反应机理、工艺流程的剖析, 评估当前技术状态, 提出了工艺优化策略, 并从经济效益、环境影响等方面进行分析, 为该工艺的可持续发展提供参考。研究表明, 通过合理选择催化剂、优化过程条件和加强系统集成能量回收, 可显著提升工艺性能 and 经济效益, 同时降低环境影响。

关键词: 乙烷裂解; 乙烯; 工艺优化; 经济性; 环境影响

中图分类号: TQ221.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 014-0079-03

Optimization and economy of ethane cracking technology for ethylene production

Meng Xiangzhen (Lianyungang Petrochemical Co., LTD, Lianyungang Jiangsu 222000, China)

Abstract: In this paper, the optimization and economy of ethane cracking technology for ethylene production were discussed. Through analyzing the mechanism and process flow of ethane cracking reaction, evaluating the current technical status, putting forward the process optimization strategy, and analyzing the economic benefit and environmental impact, so as to provide reference for the sustainable development of the process. The results show that the process performance and economic benefit can be significantly improved and the environmental impact can be reduced by selecting the catalyst reasonably, optimizing the process conditions and strengthening the integrated energy recovery system.

Key words: ethane cracking; Ethylene; Process optimization; Economy; Environmental impact

乙烯作为重要的有机化工原料, 广泛应用于塑料、橡胶、纤维等众多领域。乙烷裂解制乙烯工艺凭借其乙烯收率高、生产成本低等优势, 在全球乙烯生产中占据重要地位。随着能源结构的调整和环保要求的日益严格, 对该工艺技术进行优化以提高其经济性和环境友好性具有重要意义。

1 乙烷裂解制乙烯工艺基础

1.1 乙烷裂解反应机理

乙烷裂解制乙烯的反应主要按照自由基链式反应机理进行。在高温条件下, 乙烷分子首先吸收能量, C-C 键断裂生成两个甲基自由基 ($\text{CH}_3\cdot$), 这是反应的引发阶段。随后, 甲基自由基与乙烷分子反应, 生成乙烯和氢自由基 ($\text{H}\cdot$), 氢自由基再与乙烷分子作用生成甲烷和甲基自由基, 如此循环, 构成链式反应。同时, 还存在一些副反应, 如乙烯进一步裂解生成乙炔、氢气等, 以及乙烷的脱氢反应生成乙烯和氢气。

反应温度对乙烷裂解反应影响显著。一般来说, 提高温度有利于加快反应速率, 促进乙烯的生成, 但过高的温度会加剧副反应, 导致乙烯选择性下降, 同时增加能源消耗和设备成本。压力对反应的影响较为复杂, 降低压力有利于反应向生成乙烯的方向进行, 因为该反应是分子数增加的反应, 但压力过低会影响反应效率和设备的生产能力。此外, 原料纯度、停留时间等因素也会对乙烷裂解反应产生影响。高纯度的乙烷原料可以减少杂质对反应的干扰, 提高反应的选

择性和收率; 而停留时间过长或过短都会影响反应的进行, 需要根据具体工艺条件进行优化。

1.2 工艺流程概述

典型的乙烷裂解装置主要由裂解炉、急冷系统、压缩系统和分离系统等部分组成。

裂解炉是乙烷裂解的核心设备, 其设计直接影响反应的进行和乙烯的收率。在裂解炉内, 乙烷与水蒸气按一定比例混合后, 在高温 (通常为 800 度左右) 下发生裂解反应。炉管采用耐高温、耐腐蚀的合金材料制成, 以承受高温和高压的工作环境。

急冷系统的作用是迅速冷却裂解产物, 终止反应, 防止副反应的进一步发生。同时, 回收裂解气中的热量, 产生高压蒸汽, 用于驱动透平压缩机等设备, 实现能量的回收利用。

压缩系统对急冷后的裂解气进行压缩, 提高其压力, 以便后续的分离操作。通常采用多级压缩机, 逐步提高裂解气的压力, 同时通过冷却器控制压缩过程中的温度, 防止气体过热。

分离系统是将压缩后的裂解气中的乙烯、丙烯等目标产物与其他组分进行分离。一般采用精馏塔等设备, 利用各组分沸点的差异进行分离。首先分离出氢气、甲烷等轻组分, 然后依次分离出乙烯、丙烯等产品, 最后得到重组分。

1.3 当前技术状态评估

现代乙烷裂解工艺在乙烯收率、能耗、设备可靠

性等方面都有了显著提升。现有技术的优点在于乙烯收率较高,一般可达 70%–80% 左右,能够满足大规模工业化生产的需求;工艺相对成熟,设备运行稳定,操作经验丰富。然而,也存在一些不足之处。例如,裂解过程需要消耗大量的能源,对环境造成一定的压力;催化剂的性能还有提升空间,以进一步提高反应选择性和降低成本;装置的投资成本较高,对企业的资金实力要求较大。

2 工艺优化策略

2.1 高温直接裂解特点分析

在乙烷裂解制乙烯的复杂化学反应网络中,催化剂是调控反应进程、提升反应效率与产物选择性的核心要素。在现行乙烷裂解制乙烯工艺中,装置采用高温直接裂解方式,不依赖催化剂进行反应。高温直接裂解时,乙烷分子在高温环境下直接吸收能量,致使 C–C 键断裂,进而生成甲基自由基($\text{CH}_3\cdot$),引发后续的链式反应。

与使用催化剂的裂解方式相比,高温直接裂解的优势在于避免了催化剂成本、催化剂失活以及因催化剂选择性问题导致的复杂产物分离难题。然而,该方式也存在一些挑战。高温条件需要消耗大量的能源来维持,对能源供应和设备耐高温性能要求极高。例如,裂解炉需承受 800 度左右甚至更高的温度,这对炉管材料的耐高温、耐腐蚀性能提出了严苛标准,增加了设备成本和维护难度。另外,高温直接裂解难以像使用催化剂那样精准调控反应路径,副反应较难控制。乙烯在高温下可能进一步裂解生成乙炔、氢气等,使得产物中副产物比例相对较高,影响乙烯的收率和选择性。但通过优化反应温度、压力、原料气组成和停留时间等参数,能够在一定程度上缓解这些问题,提高高温直接裂解的工艺性能。

2.2 过程条件优化

乙烷裂解反应受到多种过程条件的综合影响,温度、压力、原料气组成以及停留时间等参数的变化都会对反应的速率、选择性和产物收率产生显著影响。因此,通过实验和模拟计算来精准确定最佳操作条件,对于优化乙烷裂解制乙烯工艺具有重要意义。

温度、压力及其他操作参数的最佳设置:温度是乙烷裂解反应中最为关键的影响因素之一。一般提高反应温度能够加快反应速率,这是因为温度的升高为反应分子提供了更多的能量,使其能够跨越更高的反应活化能壁垒,从而促进乙烷分子的裂解和乙烯的生成。然而,过高的温度会带来一系列负面效应,其中最突出的是副反应的加剧。当温度超过一定限度时,乙烯会进一步发生裂解反应,生成乙炔、氢气等副产物,导致乙烯的选择性下降。研究表明,在 800–850 度的

温度范围内,乙烷裂解反应能够在保证较高反应速率的同时,获得较高的乙烯收率和较好的选择性。在这个温度区间内,乙烯收率可以达到 75%–85%,同时副反应的发生相对较少,能够有效保证产物的质量。

压力对乙烷裂解反应的影响较为复杂,从化学平衡的角度来看,降低压力有利于反应向生成乙烯的方向进行,这是因为乙烷裂解反应是一个分子数增加的反应,降低压力符合反应的热力学趋势。然而,在实际工业生产中,压力过低会导致设备的生产能力下降,同时增加气体输送和压缩的成本,降低经济效益。综合考虑各方面因素,通常将反应压力控制在 1–2MPa 之间较为合适。在这个压力范围内,既能保证反应有较高的转化率和选择性,又能确保设备的稳定运行和合理的生产成本。

除了温度和压力,原料气中乙烷与水蒸气的比例以及停留时间等参数也对反应结果有着重要影响。适当增加水蒸气的含量,可以起到稀释原料气、降低反应体系中乙烷分压的作用,从而促进反应向生成乙烯的方向进行,同时还能减少积碳的生成,延长催化剂的使用寿命。而停留时间则直接影响反应的进行程度,过短的停留时间会导致乙烷转化不完全,降低乙烯的收率;过长的停留时间则可能引发过度反应,增加副产物的生成,同样不利于提高乙烯的选择性和收率。因此,需要根据具体的反应条件和设备特性,对这些参数进行精细优化。

为了更深入了解操作参数对乙烷裂解反应的影响,科研人员进行了大量的对比实验。在一组典型的实验中,保持其他条件不变,分别改变反应温度和压力,对乙烯收率进行监测和分析。在不同压力条件下,乙烯收率随温度的变化呈现出不同的趋势。当压力为 1.5MPa 时,在 750–820 度的温度区间内,乙烯收率随着温度的升高而迅速增加,在 820 度时达到最高值,随后随着温度的继续升高,乙烯收率逐渐下降。这一结果与理论分析相符,验证了在适宜的温度和压力条件下,乙烷裂解反应能够获得最佳的乙烯收率。

此外,通过改变原料气中乙烷与水蒸气的比例以及停留时间进行对比实验,也得到了有价值的结论。实验数据表明,当乙烷与水蒸气的摩尔比为 1:0.5–1:1 时,乙烯收率较高;而停留时间控制在 0.1–0.5 秒之间时,能够在保证较高乙烷转化率的同时,获得较好的乙烯选择性。

2.3 系统集成与能量回收

在追求乙烷裂解制乙烯工艺高效化和经济化的过程中,系统集成与能量回收成为关键环节。通过优化裂解炉的设计与操作以及对整个装置的能量进行综合管理,能够显著提高能源利用率,降低生产成本,增

强工艺的竞争力。

能量管理策略：裂解炉作为乙烷裂解制乙烯装置的核心设备，其能量利用效率直接影响整个工艺的能耗水平。优化裂解炉的设计和操作是提高热效率、减少燃料消耗的重要途径。采用先进的燃烧技术，如预混燃烧、分级燃烧等，可以使燃料在炉内充分燃烧，提高燃烧效率，减少不完全燃烧产物的生成，从而降低燃料消耗。同时，配备高效的余热回收系统，能够将裂解炉排出的高温烟气中的热量充分回收利用。例如，通过安装余热锅炉，将高温烟气的热量传递给锅炉中的水，产生高压蒸汽，这些蒸汽可用于驱动透平压缩机、泵等设备，实现能量的回收和再利用。据统计，采用先进的余热回收系统后，可使裂解炉的热效率提高 10%–15%，显著降低了装置的能耗。

除了裂解炉，对整个装置的能量进行综合管理也是实现能量梯级利用的关键。在裂解气的压缩和冷却过程中，会释放出大量的热量，通过合理的设计和配置，可以将这些热量回收并用于其他需要热量的环节。比如，将压缩过程中产生的热量用于预热原料气，使原料气在进入裂解炉之前达到一定的温度，减少了裂解炉的加热负荷，从而降低了燃料消耗。此外，还可以将冷却过程中释放的热量用于精馏塔的再沸器，为精馏过程提供所需的热量，提高精馏效率。通过这些能量回收和梯级利用措施，可以使装置的综合能耗降低 20%–30%，有效提高了工艺的经济性。

3 经济性分析与环境保护

3.1 经济效益评估

乙烷裂解制乙烯的成本结构主要包括原料成本、设备投资成本、能源消耗成本、人工成本等。其中，原料成本占比较大，约为 60%–70%。随着乙烷价格的波动，原料成本对总成本的影响较为显著。设备投资成本主要包括裂解炉、压缩机、分离设备等的购置和安装费用，投资规模较大。能源消耗成本也是成本的重要组成部分，包括燃料消耗和电力消耗等。

通过对不同规模装置的投资回报预测分析可知，大规模装置具有规模经济效应，单位产品的投资成本和生产成本相对较低，投资回报率较高。例如，一套 150 万吨/年的乙烷裂解装置，在原料价格合理、市场需求稳定的情况下，投资回收期约为 5–7 年，内部收益率可达 15%–20%。

3.2 环境影响评价

乙烷裂解制乙烯过程中的排放物主要包括二氧化碳、一氧化碳、氮氧化物、甲烷等温室气体，以及少量的硫化氢、烃类等污染物。这些排放物对环境造成一定的影响，尤其是二氧化碳的排放，是导致全球气候变化的重要因素之一。

为减少排放，可采取一系列减排措施。在裂解炉方面，采用先进的燃烧技术，如低氮燃烧器，可降低氮氧化物的排放；安装烟气脱硝装置，进一步减少氮氧化物的排放。在能量回收和利用方面，提高能源利用率，减少燃料消耗，从而降低二氧化碳的排放。此外，对废气进行处理，采用吸附、吸收等方法去除其中的硫化氢等污染物，实现达标排放。通过这些措施，可有效降低乙烷裂解制乙烯过程对环境的影响。

3.3 可持续发展战略建议

面向未来，乙烷裂解制乙烯工艺应朝着更加高效、环保、可持续的方向发展。在技术研发方面，继续加大对新型催化剂、先进工艺技术的研究投入，提高乙烯收率和选择性，降低能耗和排放。例如，研发更加高效的催化剂，使反应在更低的温度和压力下进行，减少能源消耗和设备成本。

在政策支持方面，政府应制定相关政策，鼓励企业采用先进的工艺技术和设备，推动产业升级。对环保达标的企业给予一定的税收优惠或补贴，引导企业加大环保投入。同时，加强对乙烷资源的合理开发和利用，确保原料的稳定供应。

从市场趋势来看，随着全球对乙烯需求的不断增长，乙烷裂解制乙烯工艺具有广阔的市场前景。但同时，市场竞争也日益激烈，企业需要不断提高自身的竞争力，优化产品结构，提高产品质量，以满足市场的需求。

4 结论

乙烷裂解制乙烯工艺技术在乙烯生产中具有重要地位。通过对反应机理、工艺流程的深入了解，以及对当前技术状态的评估，提出一系列工艺优化策略，这些策略能有效提高工艺的性能和经济效益，降低环境影响。同时，通过对经济性的分析和环境保护措施的探讨，为该工艺的可持续发展提供了方向。未来，应继续加强技术研发，积极响应政策支持，顺应市场趋势，推动乙烷裂解制乙烯工艺不断发展和完善，为乙烯产业的可持续发展做出贡献。

参考文献：

- [1] 赵文明. 对我国乙烯原料路线多元化发展现状及趋势探讨 [J]. 化学工业, 2018, 36(02): 1-13.
- [2] 黄格省, 师晓玉, 张彦, 等. 国内外乙烷裂解制乙烯发展现状及思考 [J]. 现代化工, 2018, 38(10): 1-5.
- [3] 李振宇, 王红秋, 黄格省, 等. 我国乙烯生产工艺现状与发展趋势分析 [J]. 化工进展, 2017, 36(3): 767-773.

作者简介：

孟祥祯 (1993—)，男，满族，辽宁省鞍山市岫岩满族自治县人，硕士研究生，石油化工—中级工程师，研究方向：乙烯装置相关。