

炼油厂催化裂化装置工艺优化方案与经济效果分析

张皓翔（中国石化扬子石化公司，江苏 南京 211500）

摘要：本文系统探讨炼油厂催化裂化（FCC）装置工艺优化路径及经济价值。通过构建“技术改进-能耗控制-产物增值”三维优化模型，结合某500万吨/年装置案例分析表明：采用原料预处理强化、催化剂活性提升、分馏系统智能化改造等综合措施，可使轻油收率提升3.2个百分点，装置能耗降低18.7%，年增经济效益超2.3亿元。研究为炼油企业装置升级提供量化决策依据。

关键词：催化裂化；工艺优化；能耗分析；经济效益；装置改造

中图分类号：TE624.4 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)012-0058-03

Optimization Scheme and Economic Effect Analysis of Catalytic Cracking Unit in Refinery

Zhang Haoxiang (Sinopec Yangzi Petrochemical Company, Nanjing Jiangsu 211500, China)

Abstract: This paper systematically explores the process optimization path and economic value of the catalytic cracking (FCC) unit in refineries. By constructing a three-dimensional optimization model of “technical improvement-energy consumption control-product value enhancement,” combined with a case analysis of a 5 million tons/year unit, the results show that comprehensive measures such as raw material pretreatment enhancement, catalyst activity improvement, and intelligent transformation of the fractionation system can increase light oil yield by 3.2 percentage points, reduce unit energy consumption by 18.7%, and generate an annual economic benefit of over 230 million yuan. This study provides a quantitative decision-making basis for the upgrading of refinery units.

Keywords: Catalytic cracking; Process optimization; Energy consumption analysis; Economic benefits; Unit renovation

催化裂化装置是现代炼厂的核心二次加工单元，其运行效率直接关系到企业的盈利水平。然而，当前行业面临着三重挑战。首先，原油重质化趋势日益明显，超过API度25的原料占比达到了65%。其次，环保法规趋势越来越严格，SO_x排放限值要求不超过35mg/m³。最后，成品油需求结构发生了变化，柴汽比降至1.1以下。

针对这些挑战，传统装置在原料适应性、产物选择性和能量利用效率等方面仍有优化的空间。为了解决这些问题，本文构建了一个技术经济评价模型，提出了系统性的优化方案，并验证了其经济价值^[1]。

1 催化裂化装置工艺现状分析

1.1 典型工艺流程瓶颈

以一家企业的UOP逆流式反应器为例，该反应器在处理原料时有以下问题需要解决（350摄氏度馏分）。

一是提升管内原料雾化作用差，雾化粒径80μm以上。由此带动焦炭产率上升，超出6.5%的基准值。考虑对雾化设备进行调整或对操作参数进行优化，以提高雾化效果，使之符合要求。

二是反应器中汽提段效能不足，要求待生剂含油率在3Wt%以上。这有可能是操作控制不当，也有可能是设备的性能出现了问题。优化运行温度、提高分离塔高度或优化分离器结构等提高汽提段的效率，可

以完善操作控制。最终在分馏塔顶部温度控制上出现了波动，波幅在±5℃。这对产品的分馏精度造成了影响。要解决这个问题，可以考虑对温控系统的参数进行调整，也可以增加让温控更稳定、更精准的反馈控制回路。

通过全面分析解决UOP逆流式反应器存在的问题，达到提高生产效率、降低能耗、提高产品品质的目的。

1.2 能耗结构特征

资料显示，主风机的耗电在该装置能耗构成中所占比例为38%，余热锅炉系统所占比例为25%，而烧焦热损失在再生器中所占比例为20%。

由此可见，在能耗构成中，主风机的耗电量所占比重是最大的，所以对主风机运行参数进行优化是关键举措，降低其能耗，提高其效率可以通过调整主风机的参数，定期清洗和保养来实现。

此外，在能源消耗构成中，余热锅炉系统也是重要一环，它的热效率的提高，可以减少能源浪费，通过对余热锅炉系统的改进，利用热交换器、再生回收装置等先进的余热利用技术，使余热得到最大限度的循环利用，为其他部分提供能源，从而减少整体能源消耗^[2]。再生器烧焦热损失是能耗构成中的另一个重要因素，通过改进再生器烧焦热损失，可以减少能源

的浪费。采用先进的烧焦技术，如采用高效燃烧器、优化气体分布系统等，以提高再生器的热效率，减少热能的损失。

通过上述改进措施，可以有效地降低能耗，提高装置的能源利用效率，从而达到节能减排的目标。

此外，还可以加强能源管理，定期进行能耗监测和分析，制定合理的能源利用计划，以及培训员工节能环保意识，共同促进可持续发展。

2 工艺优化方案设计

2.1 原料预处理系统升级

对于该装置中金属杂质（如镍、钒）的处理，除此前提及的措施外，还可加入超临界萃取单元进行处理。超临界萃取是将金属杂质降低到15ppm以下，使产品的纯度提高，是一种高效的分离技术。另外，超声雾化喷嘴可以达到更细小的颗粒粒径，利用超声波的作用，超声雾化技术产生微小的液滴，使颗粒变得细小。在此过程中，为了进一步提高颗粒的细度，还可以对原料进行预热到220℃。粒径较小的颗粒对反应速度的提高、物质传输的效率都是有好处的。

通过以上改进措施的运用，产品的品质和产品率都能得到明显的提高。如应用超临界萃取，有效去除了金属杂质，从而大大提高了产品的纯度。并采用超声波雾化喷头的方式，将原料预热，微细的颗粒粒径，让与反应物接触的粒子更多，转化更快，反应更高效。在实际操作中，根据这些技术指标的改进，剂油配比由原来的5.8增加到6.3，转化率提高了4%。这些改进措施既能改善产品的品质，又能降低杂质含量，还能改善产品的纯净度和连贯性。另外，转化率和产品率的提高也能降低生产成本，降低资源消耗，从而达到符合可持续发展要求的节能减排效果^[3]。

2.2 反应-再生系统改造

利用微球催化剂，可对催化剂的粒径分布进行调整，使催化剂的范围由原来的60~80μm，变为现在的40~60μm，这一改进能够有效地改善催化剂的反应活性和选择性，从而在生产过程中进一步提高效率，提高产出。微球催化剂具有较高的表面积和均匀的粒子尺寸，从而使反应效率和产率提高，使更多的反应物能够与催化剂接触。另外，CO焚烧炉的加入是再生器中的另一项重要改进举措，通过燃烧CO，可将CO排放量限制在100ppm以下，达到环保要求。

有效减轻了生产环境中空气污染物排放量，并起到了保护生产环境中工作人员劳动条件的作用。同时，装有智能式滑阀控制系统来保证系统平稳运行，该系统能使压差波动自动调节控制，使压差维持在1~50MPa以下的范围内，这种控制系统能使压强保持

在平稳状态，并使工艺波动减小，工艺可靠性及容量得到提高。采用这些改进手段，既能保证生产环境安全条件达到标准的要求，又能提高生产效率和产量，降低废气及能源的浪费。这将有助于提高生产效率、降低排放量和废气、能源废弃物，从而带来很多益处。通过技术和工艺的不断提高，使产品质量和企业竞争水平得到较好的提升，从而提升产品竞争力^[4]。

2.3 能量梯级利用方案

通过利用烟气余热（650℃），使废热转化为电能，可以采用有机朗肯循环发电系统（ORC）。在此体系中，通过热交换器将能量传递出去，从而产生额外的电力，可以带动有机工质的高温热量，这样既能提高能源的利用效率，使废热资源价值得到充分发挥，又能减少传统能源依赖。另外，胺液再生可利用分馏塔顶油气（120℃），胺液在工业生产过程中，一般采用气体吸收、净化工艺，胺液可以通过回收再利用分馏塔塔顶油气中的热能，使胺液再生，减少对额外能源的需要，从而达到降低能耗、降低生产成本的目的，同时也可达到循环利用废热的目的。这种回收利用废气的方式不仅可以增加生产的经济利益，而且对环境造成的影响也符合环境保护的要求。通过运用这些措施，使能源利用效率得到提高，能耗降低。利用废热发电、胺液再生等方法，使生产过程的可持续发展和环境保护要求得到提高，从而达到循环利用能源的目的。通过这些节能措施的实施，可以在15吨/小时的基础上降低蒸汽消耗，能源利用效率将进一步提高，达到节能的目的^[5]。

3 经济效果分析模型

3.1 评价指标体系构建

在指标类别中，投资指标包括改造总投资，其计算公式为设备购置费加上安装工程费。而运营指标中的具体参数是吨加工成本，其计算公式为能耗、催化剂和维护费用除以处理量。最后，效益指标中的具体参数是边际贡献率，其计算公式为产品收入减去变动成本，再除以总收入。这些指标的计算可以帮助评估投资项目的效益和可行性，从而做出更明智的决策，如表1。

表1 指标计算表

指标类别	具体参数	计算公式
投资指标	改造总投资	设备购置费 + 安装工程费
运营指标	吨加工成本	(能耗 + 催化剂 + 维护) / 处理量
效益指标	边际贡献率	(产品收入 - 变动成本) / 收入

3.2 动态经济评价方法

在动态经济评估中，对一个项目的经济效益综合采用NPV和IRR的双重评估方法。利用NPV，可以通过减去初始投资后的综合经济价值，将项目未来的

现金流按折扣率折现。而 IRR 则是用来衡量投资回报率的方法，计算净现值为零时的贴现率。通过对 NPV 和 IRR 两个指标的综合分析，对一个项目的可行性和经济潜力进行更全面的判断^[6]。

采用 NPV(净现值)和 IRR(内部收益率)双维度考核。

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0$$

在上述公式中， CF_t 代表第 t 年的净现金流量， i 代表贴现率（本例中选取为 8%）， I_0 代表初始投资。通过这个公式，我们可以对项目的现金流进行折现。这样可以考虑到时间价值和风险因素，使得不同时期的现金流能够进行比较。选择适当的贴现率可以确保项目评估的准确性，并帮助我们在风险和回报之间作出明智的决策。

4 案例应用分析

综合加工厂按照一体化改造计划进行设备更新，总量为 2.1 亿元人民币。先进的生产设备可以通过设备的更新来引入，从而提高自动化控制水平和生产效率。新的设备将为进一步提高生产效率和生产资源利用率提供更高的生产能力和较高的运行稳定性以及较好的产品质量。同时仪表方面的改革也将陆续开展，总投资将达到 0.6 亿元。仪表改造涉及仪器仪表更新换代、监控精度提升等方面的工作，高精度的仪表控制，使生产过程更加稳定、可控，降低产品质量波动，从而对各种工艺参数进行精确监测和控制。这些投入，使工艺技术水平有了很大的提高，能耗和生产成本也有了很大的降低。先进设备和高精度仪表的应用，使生产效率、资源利用效率更高，减少能源浪费和物质损失，从而降低生产成本。另外，新设备、仪表系统的稳定性和可靠性，为降低事故发生的危险性，提供了更加安全的工作环境。

这些改造措施奠定了炼厂可持续发展的基础。提高工艺技术水平和能源效益，将使炼厂在行业内适应市场需求、提高产品品质、增强竞争力，从而达到产品化的目的提高技术及效率。

表 2 运行数据对比

参数	改造前	改造后	变化率
处理量 (万吨/a)	480	510	+6.3%
轻油收率	78.5%	81.7%	+3.2%
催化剂单耗 (kg/t)	1.2	0.9	-25%
综合能耗 (GJ/t)	2.11	71	-18.75%

经济核算资料表明，经过改造，企业经营成本每年下降 1.8 亿元人民币。企业在生产过程中能够更高效的利用资源，减少能源消耗和原料浪费，从而通过设备更新、仪器仪表改造和技术水平的提高，经营成本明显降低。这意味着，可以有效降低企业生产的成

本，从而使企业的竞争力得到增加。同时，增值产品增加了 0.5 亿元的收益。企业可以通过设备更新和技术改进来满足市场对高附加值产品的需求，从而提高产品的质量和技术含量，这将给企业带来更多的销售收入，促进企业盈利水平的提高^[7]。

综合改造方案按照动态投资回收期计算，回收期为 4.2 年，与 6 年的行业基准值相比，回收期大大降低。这意味着企业可以将投资成本更快地收回，并开始有所斩获。企业在短期内收回投资，就能较快地达到盈亏平衡，就能做到永续经营。

另外，内部回报率 (IRR) 也达到了 22.3%。内在回报率是考核投资项目经济性的指标，内在回报率高则意味着更有潜力获得投资回报。在这种情况下，22.3% 的 IRR 显示综合改造计划具有更高回报潜力，经济上具有可行性。

综合来看，全面转型方案的经济核算数据将给企业带来真正的经济实惠，带来持续发展的机遇。运营成本降低，收入增加，投资回收快，内部回报率高，这些都预示着这一计划不仅具有经济可行性，还将为企业带来长远的利润和竞争力的增强。

5 结语

通过多环节协同改造，实现技术经济指标显著提升，提出了催化裂化装置优化方案。实践表明，在 6000 万元/年的重建费用下，能够创造 2.3 亿元/年的净收益，投资收益率达到 283%。未来研究应以促进炼化装置向智能化、低碳化方向发展的分子筛催化剂定向设计和数字化孪生技术的深度应用为重点。

参考文献：

- [1] 庞新迎, 王业华, 张香玲. 催化裂化工艺方案对新建炼油厂总加工流程的影响 [J]. 炼油技术与工程, 2018(21):10-11.
- [2] 李嘉骊. 优化炼油厂催化裂化装置的策略分析 [J]. 化工设计通讯, 2017(4):80-81.
- [3] 刘家海, 陈清林, 王伟, 等. 重油催化裂化装置节能措施与效果分析 [C]// 中国工程院化工、冶金与材料工学部第七届学术会议, 2019.
- [4] 田涛, 王北星, 杨帆. 催化裂化装置吸收稳定系统节能优化改进方案对比研究 [J]. 石油炼制与化工, 2021(10):37-39.
- [5] 刘成军, 张洪笙, 叶剑云. 某催化裂化装置吸收稳定系统工艺优化总结 [J]. 炼油技术与工程, 2024(15):22-24.
- [6] 何群, 顾长春. 炼油厂催化裂化装置的优化控制 [J]. 工程技术 (全文版), 2018(22):167-168.
- [7] 杨淳英, 郑嘉惠. 重油催化裂化装置原料构成优化技术方案探讨 [J]. 炼油技术与工程, 2019(18):231-232.