

基于催化裂化装置的关键设备选型与优化设计研究

吴汉东

中海油能源发展股份有限公司渤海地区管理服务中心 工程建设中心, 天津 300452

DOI:10.61369/ERA.2025060021

摘要： 本文聚焦催化裂化装置，阐述其工艺及炼油厂应用。着重介绍关键设备选型与优化设计，如油浆泵、催化剂循环系统等设备，依据工况和性能，从材质、结构等多维度给出选型建议，并说明不同厂家设备特性与适用场景。在优化设计中，通过提升热效率等举措，运用材料创新等方法，实现装置在能效、稳定性、安全性及经济性上的提升，为炼油企业提供设备选型与优化参考。

关键词： 催化裂化装置；设备选型；优化设计

Research on Key Equipment Selection and Optimal Design of Catalytic Cracking Unit

Wu Handong

Engineering Construction Center, Bohai Region Management Service Center, CNOOC Energy Development Co., Ltd. Tianjin 300452

Abstract： This paper focuses on catalytic cracking units, expounding on their processes and applications in oil refineries. It emphasizes the selection and optimal design of key equipment, such as slurry pumps and catalyst circulation systems. Based on operating conditions and performance, equipment selection suggestions are provided from multiple dimensions, including material and structure. Additionally, the characteristics and applicable scenarios of equipment from different manufacturers are explained. In optimal design, measures such as improving thermal efficiency and utilizing material innovation are employed to enhance the energy efficiency, stability, safety, and economy of the unit. This provides references for equipment selection and optimization for oil refining enterprises.

Keywords： catalytic cracking unit; equipment selection; optimal design

引言

在石油炼制行业中，催化裂化工艺占据着至关重要的地位。它可将重质油品通过裂解反应转化为轻质油品，如汽油、柴油等，是实现重质油轻质化的关键途径。这不仅提高了石油原料的利用效率，还为市场提供了大量运输燃料调和组分。而且，通过催化裂化还能生产出高价值的化学品乙烯和丙烯等。随着全球石油资源日益紧张，催化裂化工艺在提升石油炼化效率、践行资源节约与节能环保等方面，发挥着愈发关键的作用，对缓解石油资源短缺意义重大。

一、催化裂化工艺概述

（一）催化裂化工艺相关概述

催化裂化装置是炼油企业中最常见的炼油装置，也是炼油生产中重要的加工装置。在催化裂化装置中，原油在高温与催化剂相互作用发生催化裂化反应，从而生产出汽油、柴油、液化气、油浆等油品，这些油品通过进一步加工后成为合格产品进入市场。催化裂化装置是炼化企业直接或间接获取经济效益的重要装置，它的重要性不仅体现在经济效益方面，也体现在整个生产流程中，它是整个生产流程中的核心装置^[1]。催化裂化具有诸多特点，它能显著提高轻质油的产率，得到的汽油辛烷值较高，柴油

安定性较好。同时，还能生成富含烯烃的液化气，是优质的有机化工原料。而催化裂化装置主要设备包括：反应器、再生器、分馏塔、油浆泵、催化剂循环系统（滑阀/塞阀）、旋风分离器、主风机、烟气余热锅炉、压缩机控制系统等。其中，油浆泵、催化剂循环系统、旋风分离器、主风机为关键设备，直接影响装置运行效率与稳定性。

（二）催化裂化工艺在炼油厂中的应用

在炼油厂中，催化裂化工艺的应用十分广泛且复杂。一般由反应—再生系统、分馏系统、吸收—稳定系统等组成。新鲜原料油经换热后与回炼油、循环油浆混合，进入提升管反应器，与高温再生催化剂接触反应，生成油气、焦炭等。反应后的油气进

入分馏塔进行分离，得到汽油、柴油等产品。焦炭则在再生器中与空气接触燃烧，使催化剂再生。再生烟气经能量回收系统后排放。整个流程环环相扣，各系统相互配合，共同完成重质油向轻质油品的转化，为炼油厂生产出大量市场所需的燃料和化工原料^[2]。

二、关键设备的选型原则与方法

（一）油浆泵

油浆泵的选型原则上，设备必须具备良好的耐磨损性能，能够适应油浆中每升含有5至25克催化剂颗粒的冲刷工况。同时，要具备抗腐蚀能力，由于面临硫化物腐蚀的情况，所以材质需选用CA6NM合金或者采用双层衬里结构。另外，还需拥有高吸入性能，以避免因油浆黏度较高而产生气蚀问题。选型方法方面，优先考虑全衬里双层泵壳结构，例如劳伦斯FLS-6000这种类型，其内部衬有CA6NM合金，外泵壳则起到承压的作用^[3]。为提升吸入能力，设备需配置诱导轮设计，并且叶轮要采用洛氏硬度在HRC34至38之间的高铬铁材质，从而满足在复杂工况下的使用需求，确保设备稳定、高效运行。

（二）催化剂循环系统（滑阀/塞阀）

催化剂循环系统在选型时，要求阀体必须具备耐高温耐磨特性，要能承受500℃以上的高温以及催化剂颗粒的持续冲刷。在调节精度方面，塞阀的灵敏度需达到 $\pm 2\%$ ，滑阀的压差调节范围应为0.02–0.1 MPa。选型方法上，根据装置类型不同进行选择。对于同轴式装置，由于塞阀阀杆直径小，灵敏度高，所以应选用塞阀；而高低并列式装置则应选择单动滑阀。在材质选用上，阀体需采用司太立合金（Stellite），并且密封面硬度要达到HRC60及以上，以此确保阀门在复杂工况下能够稳定、精准地运行，满足实际生产需求^[4]。

（三）旋风分离器

在旋风分离器的选型原则方面，分离效率务必不低于99%，同时将压降控制在3kPa以内，以保障设备的高效运行；考虑到设备工作环境的复杂性，为实现抗磨损目标，需在内壁铺设厚度处于10–15mm的陶瓷衬里，增强设备的耐用性。选型方法方面，需依据实际工况进行抉择。当面对大流量工况时，多管式设备是理想之选，比如直径达1500mm的多管组，能很好地满足大流量需求；而在布局紧凑的场景中，单管式设备凭借其小巧灵活的特性更为适用^[5]。此外，为优化设备性能，要将入口线速精准控制在8–12m/s的范围，并合理配备导流叶片，有效减少湍流冲击，确保设备稳定运行，充分发挥其最佳效能。

（四）主风机

主风机的选型原则要先实现风量匹配，需按照再生器的烧焦负荷来计算风量，具体公式为风量等于焦炭量乘以10.5，同时空气系数要控制在1.2至1.5之间。其次，为了防止喘振现象发生，设备需要配备变频器或旁路阀，并且要能适应流量 $\pm 30\%$ 的波动范围。选型方法方面，根据压力需求来选择不同类型的风机。对于中低压范围，即压力在0.2至0.5MPa之间的情况，应选择离心

式风机；而当压力大于0.5MPa时，则选择轴流式风机^[6]。在材质选择上，叶轮要采用1Cr18Ni9Ti不锈钢，轴承要能够耐受400至500℃的高温，以确保风机在相应的工作环境下能够稳定可靠地运行。

（五）重点关键设备选型建议

在设备选型落地时，有诸多要点需考量。优先选用国产化设备是明智之举，以油浆泵为例，国产化改造后成本降低30%，稳定性却与进口产品相当，对降本及保障生产稳定意义重大。智能化集成也至关重要，中控技术的MPS5000振动保护系统可实时监测压缩机异常，降低停机风险。材料选择上，上海禹轩阀门提供的CA6NM合金衬里耐磨又耐腐蚀，适用于易磨损、腐蚀的油浆泵与旋风分离器，能延长设备寿命。模块化设计优势明显，如上海岩征实验室反应装置便于快速安装，利于中小型装置改造，提升效率、降低成本和风险。

不同厂家设备各有特色与适用场景。劳伦斯的油浆泵FLS-6000全衬里双层结构，耐磨且运行周期长，国产化改造后能耗降低20%，适合大型炼厂重油催化装置，但初期投资与维护成本高。中控技术的催化剂循环阀（T5100控制系统）智能化与调节精度高，集成喘振保护，适用于高精度控制场景，不过依赖进口核心部件，备件采购周期长^[7]。上海岩征的旋风分离器模块化设计，安装便捷、陶瓷衬里抗磨损，适用于中小型催化裂化装置，大流量时压降略高。东方电气和上海电气的主风机，轴流式效率高、离心式结构紧凑，适用于高压再生系统，只是高压工况噪音大，需配套消音装置。中控技术的控制系统（DCS/SIS/MMS）支持API 670标准，集成振动监测，适用于新建或智能化改造装置，然而系统复杂，需专业维护团队。

三、关键设备的优化设计研究

（一）提升热效率的优化举措

热效率提升技术路径优化在催化裂化装置能效提升方面具有显著工程价值。研究发现，通过材料创新与结构优化协同作用可有效提升系统热效率。采用纳米复合热障涂层技术可将设备热传导系数降低40%以上，其梯度结构设计能有效抑制高温区热逸散现象，减少非生产性热损失。基于计算流体力学（CFD）优化的反应器流道设计，通过优化催化剂流化状态与油气接触动力学，使反应转化率提升2.3–3.5个百分点，热能利用率显著提高。集成余热锅炉与热管换热器构建的多级余热回收系统，可将再生器烟气余热回收效率提升至78%，回收的蒸汽既可用于原料预热又可驱动布雷顿循环发电，形成热功联产的能源闭环。工程实践表明，该技术体系可使装置综合能耗降低15%~20%，吨油加工能耗指标达到行业领先水平。

（二）降低能耗与磨损的结构优化

在催化裂化装置结构优化领域，运用多物理场耦合设计实现能耗与磨损协同控制，工程价值显著。以分馏塔系统为例，采用旋流导向型筛板与波纹填料复合结构，优化流道几何参数，相际传质效率能提升超25%，塔内压降低18%~22%，风机功率需求

减少15%^[8]。在催化剂输送系统,基于流体动力学优化管道弯头曲率半径($D/d \geq 5$),搭配自适应调节阀门,摩擦压降可降30%,年节约电费超200万元。针对磨损控制,利用多目标优化算法对反应器搅拌装置拓扑优化,动态匹配叶片曲率半径与转速,湍流强度分布均匀性提升40%,降低磨损速率。同时,通过激光熔覆技术在关键部件表面制备 WC-Co 基等梯度耐磨涂层,结合渗氮处理,部件耐磨性提升3倍-5倍,如旋风分离器入口衬里寿命从1800小时延至8000小时。经结构优化与材料创新协同,装置年维护成本降低25%~30%,MTBF提升45%,构建出“结构-材料-工艺”降本增效技术体系。

(三) 延长设备寿命的设计策略

在催化裂化装置寿命优化领域,协同运用结构强化、表面工程与热应力管理可显著提升设备耐久性。对于再生器等核心设备,借助变截面有限元分析,优化筒体壁厚分布,对应力集中部位进行圆角过渡,采用厚壁容器强化方案,能让其在高温高压下的疲劳寿命提升超30%。制造时,运用激光熔覆-渗氮复合技术,在关键部件表面形成0.3-0.5mm厚的 CrN-WC 复合涂层,耐磨蚀性比传统镀层提升5倍-8倍,像旋风分离器耐磨衬里寿命从1.2年延长至5年多。热应力管理上,利用多层膨胀节与自适应滑动支座组合结构,优化动态补偿系数,补偿效率达95%以上,消除热应力集中。结合数字孪生技术预测关键焊缝剩余寿命,精度达 $\pm 8\%$,优化维护周期^[9]。经工程验证,该技术体系使设备整体寿命延长40%~50%,年维护成本降低35%,还避免每年200万-300万元的非计划停工损失,形成全生命周期管理技术闭环。

(四) 提升工艺安全性的设计要点

在催化裂化装置安全设计领域,运用风险预控、智能监测与结构强化的三维策略,能显著提升本质安全水平。结构安全上,采用爆破片与先导式安全阀组合的复合泄压系统,泄压响应时间缩至50ms内,超压保护可靠性达99.99%。借助拓扑优化重构反应器承压部件应力,疲劳安全系数超1.8,符合API标准。智能安全系统构建多参数融合预警平台,集成12类传感器,裂解炉管壁温偏差超50℃时0.5秒内预警。ESD按SIL3等级设计,含双通道冗余模块,关键阀门3秒内全行程切断。经HAZOP-LOPA分析识别127个风险节点,增设18项本质安全设施。密封可靠性采取三级防护,基础密封用磁力驱动泵加双端面机械密封,辅助密封

配氮气吹扫,应急密封设碳化硅硬质隔离阀。实验室测试显示,密封失效泄漏率控制在极低水平,满足API标准。工程应用表明,该体系使装置事故率下降76%,安全停机时间减少85%,形成全链条安全保障^[10]。

(五) 优化设计的方法和策略

在催化裂化装置关键设备的优化设计中,通过多维度技术融合实现性能提升已成为行业趋势。新材料的应用为设备耐高温、抗腐蚀性能带来突破,例如采用新型耐高温合金材料制造反应器和再生器核心部件,有效抵抗高温变形与腐蚀,延长设备使用寿命;复合材料在分馏塔塔板和填料中的应用,不仅减轻质量,更通过优化气液传质效率提升分馏效果。先进制造技术则贯穿设备全生命周期,智能化传感器与物联网系统实现运行状态实时监测与精准控制,数字孪生技术通过虚拟模型模拟运行场景,提前识别设计缺陷与潜在故障,增材制造技术则为复杂部件的快速定制提供可能。计算机仿真技术作为核心工具,通过三维建模与物理场分析,精确预测设备应力分布与温度场变化,为工艺参数优化(如反应温度、压力、进料速度等)提供科学依据,同时支持预防性维护策略制定,降低故障率。此外,通过动态调整催化剂量、空气流量等工艺参数,可在确保设备安全的前提下,进一步挖掘原料转化率与产品收率潜力。上述技术协同作用,最终实现催化裂化装置在稳定性、效率及经济性上的全面优化。

四、结束语

本研究聚焦催化裂化装置关键设备的选型与优化设计。从工艺剖析入手,明确设备功能、选型原则及方法,指出技术参数与经济成本主导设备选型,优化设计可提升设备性能、延长寿命。实际应用证明,合理选型与优化能带来显著效益,反之易引发工艺问题,本研究成果为相关工作提供理论与实践支撑。展望未来,该领域将迈向智能化、数字化。人工智能与大数据助力精准选型和性能预测,新材料、新制造技术广泛应用,有望大幅提升设备性能与效率。不过,面临的挑战也不容小觑。环保标准趋严,设备须满足更严苛的排放标准与能效要求;设备大型化、复杂化增加选型和优化难度,对技术人员提出更高要求。为此,需持续创新技术和方法,以应对这些挑战。

参考文献

- [1] 金星彤. 催化裂化装置工艺优化与长周期运行关键因素分析 [D]. 沈阳工业大学, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.000754.
- [2] 闫俊杰, 李弘扬, 杨玺, 等. 催化裂化催化剂生产装置高压喷雾设备的优化 [J]. 装备机械, 2023, (04): 74-78.
- [3] 陶金福, 王冠, 杨剑锋, 等. 典型催化裂化装置关键单元腐蚀分析与防护 [J]. 炼油与化工, 2023, 34(06): 57-61. DOI: 10.16049/j.cnki.lyyhg.2023.06.013.
- [4] 张旭亮, 莫力根. 关于石油化工催化裂化工艺技术的优化措施研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(17): 184-186.
- [5] 王峰, 钱贺明, 黄博. 催化裂化干气脱硫塔冲塔事件分析及处理 [J]. 石油技师, 2023, (02): 51-54.
- [6] 侯和乾. 催化裂化装置分馏塔结盐分析及对策 [J]. 中外能源, 2023, 28(09): 86-91.
- [7] 王裕振. 石油化工催化裂化工艺技术的优化措施 [J]. 化工管理, 2023, (26): 137-139. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2023.26.041.
- [8] 周广响. 催化裂化装置典型管道设计 [J]. 化工设计通讯, 2023, 49(08): 18-20.
- [9] 朱少伦, 卢俊文, 湛立宁, 等. 催化裂化装置换热器典型腐蚀分析与防护措施 [J]. 石油化工安全环保技术, 2023, 39(04): 39-42+7.
- [10] 杨轶男, 吴昊, 任晔, 等. 催化裂化装置碳排放影响因素分析 [J]. 当代石油石化, 2023, 31(07): 30-33+38.