

核能小堆在石化生产过程中降碳效益分析

曹广玉（华鹏科技能源（广东）有限公司，广东 惠州 516200）

摘要：本文阐述了我国石油化工产业在经济发展与能源结构中的重要地位。梳理石化炼化环节的关键流程，分析各步骤对蒸汽的具体需求，进而重点探讨用核能替代传统能源供应蒸汽的效益。同时，结合国家各部委出台的法规政策，明确核能在石化领域应用的政策支持背景。通过对比大型压水堆与小型堆的技术特点，深入分析小型堆在石化生产降碳效益中的突出优势，以及实际应用中遇到的难题。最后基于这些分析，提出核能替代传统能源在未来发展中需要满足的要求，为推动石化行业绿色低碳提升效益转型提供参考思路。

关键词：核能；石化产业；降碳效益

中图分类号：TL49；TE65

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）028-0049-03

Benefit Analysis of Carbon Reduction of Small Nuclear Reactor in Petrochemical Production Process

Cao Guangyu (Huapeng Technology Energy (Guangdong) Co., Ltd., Huizhou Guangdong 516200, China)

Abstract: This article describes the important position of my country's petrochemical industry in economic development and energy structure. The key processes of petrochemical refining and chemical processes are sorted out, and the specific demand for steam in each step is analyzed, and then the benefits of using nuclear energy to replace traditional energy to supply steam are discussed. At the same time, combined with the laws and policies issued by various national ministries and commissions, the policy support background for the application of nuclear energy in the petrochemical field is clarified. By comparing the technical characteristics of large pressurized water reactor and small reactor, the outstanding advantages of small reactor in carbon reduction benefit of petrochemical production and the problems encountered in practical application are deeply analyzed. Finally, based on these analyses, the requirements that nuclear energy replaces traditional energy in the future development need to be met, and provide reference ideas for promoting the transformation of the petrochemical industry towards green and low-carbon development and improving efficiency.

Keywords: Nuclear Energy; Petrochemical Industry; Carbon Reduction benefits

1 石化产业的重要意义

石油化工是利用石油和天然气为原料生产石油产品和化工产品的加工业，它由石油炼制工业和石油化工两个部分组成。石油炼制是以原油为原料，经加工后制成汽油、柴油、煤油等燃料和化工原料的工业，石油化工是指从石油或天然气中提取石油馏分和碳氢化合物的加氢还原反应等一系列加工过程的工艺总称。石油化工是国民经济的支柱产业之一，涉及的产业链长，产品的覆盖面广，和人们的日常生活息息相关。

汽油、柴油、煤油等占世界能源比重非常重。据国际能源署（IEA）统计，2024年世界一次能源消费结构中，石油消费占比为31%，是发展现代工业和经济的主要动力，并且在农业、交通运输及国防工业中使用的柴油、汽油、煤油、航空煤油等燃料是其他能源所不能代替或很难大批替代的燃料。

烯烃和芳烃产业链是石化产品延伸出来的，大部分原料都应用于工业材料和民用材料等多个领域。合成树脂、合成纤维和合成橡胶等石油化工产品被广泛应用于各行各业。人们日常穿着的衣服，用于包装各种消费品塑料。汽车中使用合成树脂进行零件减重。

合成橡胶生产轮胎及橡胶密封制品等。建筑中使用的管子和防水卷材、医疗用的输液管子、各种包装材料。

2 石油炼化关键步骤及蒸汽需求

2.1 原油预处理

首先，按照一定比例将原油与淡水和破乳剂混合并加热到设定温度，送往一级脱盐罐主要溶解悬浮原油中的盐，将盐含量降至指标内。在进入二级脱盐罐之前再次添加淡水增加原油内的含水量来提高水的偶极聚结能力，加热过程以蒸汽为介质产生温度条件。

2.2 常压蒸馏和减压蒸馏

原油经过蒸汽预热至200–240℃后进入初馏塔，其中的轻组分从塔顶蒸出，经过冷却后在分离器中分离出水和未凝结的气体，分离器顶部排出拔顶气，塔顶则得到轻汽油。初馏塔底部的油料被输送到常压加热炉，通过蒸汽或燃料加热至360–370℃，然后进入常压塔，分离出轻汽油、煤油、轻柴油和重柴油等。常压塔底的常压渣油在减压加热炉中，经蒸汽辅助加热至380–400℃后进入减压塔，减压塔的第一侧线产出减压柴油，塔底则为减压渣油。蒸馏过程的原料预热、加热炉升温均需蒸汽提供热量支持。

2.3 催化裂化

在催化剂的作用下，常减压馏分油在大约 500℃ 的条件下进行反应，发生碳链断裂、脱氢、异构、环烷化以及芳构化等化学变化。反应所需温度通过加热炉加热维持，部分热量由蒸汽辅助补充。

2.4 催化重整

通过加氢精制除去原料油中有机硫、有机氮等杂质，在加氢精制过程中使用蒸汽来加热调整反应温度。精制处理后的原料进到由若干个串联设置的反应器组成重整系统中进行反应，反应温度为 500℃ 左右，反应压力为 2MPa 左右。其间设有加热炉进行反应过程中吸热的补偿。最终从最后一个反应器中出来的产物冷却后进入分离器，分离出大量氢气的循环气体和液体。后者流入稳定塔来除去轻组分后，得到重整汽油。

2.5 加氢裂化

重质馏分油在催化剂存在下，于 10–20MPa 和 430–450℃ 条件下进行反应，反应系统的升温及温度维持需蒸汽加热支持，发生烷烃加氢裂化等反应。产物分离及后续精制过程中，需蒸汽进行加热、保温等，最终得到优质的汽、煤、柴油等产品，加氢减压柴油可作乙烯裂解原料，低级烷烃也成为有用化工原料。

蒸汽用量大是石化生产的特点，原油脱盐脱水预处理过程需要用蒸汽来给混合后的原油加热以获得预热温度，满足脱盐脱水温度要求；常压、减压蒸馏过程要靠蒸汽给原料预热，对常压、减压加热炉进行加热升温；催化裂化过程，蒸汽辅助加热炉，补热、维持反应温度；催化重整过程，蒸汽补加热精制温度、补反应吸热；加氢裂化过程，蒸汽辅助反应系统升温并维持温度，产物分离及精制，蒸汽加热及保温。

3 石化生产降碳效益分析

2020 年 9 月，在第 75 届联合国大会期间，中国提出双碳目标，计划到 2030 年前，实现 CO₂ 排放达峰，2060 年实现碳中和。其中石化行业是我国碳排放的高碳排放行业之一，碳排放的实现是化解全球气候升温和关键。

3.1 碳资产交易收益

随着全球碳市场体系的发展，碳排放权已经成了一种能交易的资产。企业可以把减少的碳排放量去交易从而获取收益。目前，像欧盟碳交易体系、英国碳市场这些国际上成熟的碳市场，都能让企业把碳资产变成现金。以欧盟碳市场，2024 年前 11 个月，碳价均价约为 66 欧元/t。如果一个中小型石化园区，通过换用清洁能源的降碳手段，一年能减少 10 万 t 二氧化碳排放，按上述价格，每年交易核证减排量就能拿到 660 万欧元。

3.2 绿色产品溢价

现在全球消费者越来越重视环保，各国绿色政策也在推进，低碳石化产品在市场上更有竞争力，能卖出更高的价钱，也就“绿色溢价”。这类产品包括低碳烯烃、生物基聚酯、可降解塑料等，它们全生命周期的碳排放量比传统产品低很多，符合欧盟“碳足迹标签”、美国“清洁能源法案”这些国际标准。从市场上看，低碳石化产品的溢价一般在 5%–15%，这明显能看出低碳属性能提高产品的附加值。

3.3 贸易合规成本节约

欧盟碳边境调节机制政策渐次出台后，产品的碳足迹将成为国际市场贸易的重要门槛，降碳能够为企业节约一笔贸易合规成本。欧盟 CBAM 从 2023 年开始试点，已经将化工、钢铁、水泥等行业纳入了监管，对进口产品含有碳的含量，征收碳关税，在 2024 年，欧盟碳市场配额均价约 85 欧元/t。出口贸易的石化企业，其产品碳足迹不符合标准的，就将额外付出这笔碳关税的代价。而降碳使得产品碳足迹符合标准的企业，就能直接节约这笔钱。此外，符合国际低碳标准的产品，其海关查验、认证审核等方面所花的时间和管理费用也会少一些，通关更快，也能够提升企业参加国际市场竞争的整体效率。这种成本节约不仅是暂时的收益，还能为稳住自己在出口市场中的份额、不至于轻易失去重要客户，为长远发展储备力量。

4 核能与石化耦合降碳的分析

石化的减碳路径有很多，比如从源头上优化生产工艺，通过改进自身生产工艺，实现提质增效，减少碳的需求量，从生产源头降低碳输入。另外后端碳捕集与应用：在生产流程的后端环节，对产生的碳进行捕集并予以利用，来减少整个生产环节的碳排放。本文主要探讨的是核能替代传统能源供应蒸汽：即在生产工艺的各环节中，用核能替代原有的传统能源来供应所需蒸汽，从而降低碳的消耗比例达到降碳目的。

4.1 政策支持

国家发布了一系列要求，对石化行业降碳提出了要求，也提出了核能替代传统能源为石化生产供能的一些建议。2022 年，国家发改委和国家能源局发布了《“十四五”现代能源体系规划》，提出要在清洁供暖、工业热能供应、海水淡化等方面推动核能的综合应用，为大型园区实施核能供热提供了政策支持。2024 年，国务院发布《2024—2025 年节能降碳行动方案》，提出有序推进蒸汽驱动改电力驱动，鼓励大型石化园区探索利用核能供汽供热。

4.2 核能小堆的优势

依据 GB6249–2025 核动力厂环境辐射防护规定，

我国把单堆热功率不大于300MW，采用模块化设计并充分利用固有安全特性的先进水冷反应堆核动力厂，定义为小型堆。小型堆相对于大型压水堆在规划限制区的设置上，国标也给出了明确要求，大型压水堆规划限制区外边界与反应堆距离不得小于5km；小型堆规划限制区可缩减到1km，相比大型堆，能更贴近石化园区布置。这种贴近园区布置的优势，结合小型堆自身安全特性，从空间布局和安全保障两方面，支撑其在石化园区替代蒸汽源的可行性，与石化生产对蒸汽稳定供应、近距离保障的需求相适配。

5 工业推广的挑战与应对

5.1 工艺的兼容性

工艺兼容性主要有蒸汽参数匹配、生产负荷调节和项目生命周期三个方面。

在蒸汽参数和品质方面，不同的石化生产环节对蒸汽的需求截然不同，比如脱盐脱水、常减压蒸馏等环节需要不同压力和温度的蒸汽，传统的供热方式可以灵活地供给高中低压蒸汽，适应石化生产多样化的使用要求，但当前的核能供热小堆主要是压水堆，蒸汽温度一般都限制在300℃左右，压力也只能达到中压，比如催化重整、加氢裂化等环节所需的高温高压蒸汽无法直接供给，需要对相对供应的蒸汽加以提升，提升工程建设的复杂性和成本，如果要满足其需要，一方面需要开发中小型堆的蒸汽参数提升技术，开发先进反应堆技术，另一方面可以通过提高蒸汽提质的办法，减少蒸汽提质带来的能耗和成本的增加；负荷调节方面，原有能源供应和石化的生产工艺已形成稳定匹配模式。换成核能后，会带来不确定性。核能负荷调节能力较弱，如果石化的负荷变动超出核能调节范围，或可能对反应堆安全造成影响，这种情况下，核能就只能部分替代，作为基本负荷运行。这需要进行小堆负荷调节能力的技术研究，提高小堆负荷调节能力和幅度；项目生命周期匹配方面，核设施设计寿命通常60年甚至80年，而石化园区寿命一般20-30年左右，园区退役后核能设施仍可运行，存在市场适配问题。解决这一问题，项目规划阶段需要统筹布局，探索园区产业的持续发展，园区内石化设施退役后需要其他热用户建成投产，确保核设施生产周期可持续。

5.2 安全性

小型压水堆面临核能自身安全要求与石化园区相互影响的风险。例如在核动力厂发生事故时对非居住区边界公众受照剂量有明确限值，而且对环境应急监测有一系列要求。这些标准是核安全的底线，必须严格遵守。石化园区生产过程产生的废气、废固、噪声

等可能会对小堆运行造成影响。同时，核能与石化均属高危工业，一旦一方发生事故都可能引发连锁反应，造成危害扩大化。应对这一问题，在选址布局上要科学的规划安全距离和防护设施，开展相应的专题研究，同时建立应急联动机制，提高应对事故的响应能力。

5.3 经济性

经济性是项目推广的关键。在成本方面，小堆贴近用户布置可减少输气管道的布置，避免传长距离输气的高成本和安全风险。这一定程度上减小了成本和安全投入。但目前小堆体量小，单位造价尚不具备优势。需在保证安全的前提下简化安全系统配置，优化设计减少不必要的设备；通过规模化效应、标准化设计、模块化设计和工厂预制实现批量生产，降低制造成本。

蒸汽价格直接影响核能对传统能源替代的竞争力。用户受蒸汽价格影响较大，核能供汽价格要和煤炭、天然气等传统能源供应价格相当才具有竞争力。或者是略高于煤炭、天然气的价格，通过政策支持，如税收优惠、补贴等降低初期投入和运营成本。碳排放权交易市场是降碳的重要市场机制，若核能为石化降碳的减碳效应能否纳入碳排放权交易市场，将为项目带来额外收益，提升经济性和吸引力。

6 总结

石化产业作为国民经济的支柱，其各个环节对蒸汽需求巨大，能源供应过程中碳排放问题突出。如果实现核能小堆替代传统热源，收益是巨大的。对于核能小堆+化工企业耦合发展的工业推广应用，在工艺匹配、安全性和经济性方面存在诸多挑战。针对这些困难，通过核能技术发展提升核能蒸汽参数和负荷调节能力，科学规划园区核电热源建设位置、园区与核能相关政策支持等举措，从而推进核能+石化产业绿色耦合。

参考文献：

- [1] 国际能源署. 全球能源消费报告 [R].2024.
- [2] 工业和信息化部. 石化化工重点行业严格能效约束推动节能降碳行动方案(2021-2025年)[Z].2021.
- [3] 国务院. 2024—2025年节能降碳行动方案 [Z].2024.
- [4] 国家核安全局. 小型压水堆核动力厂安全审评原则 [Z].[2016].
- [5] 邹长军. 石油化工工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

作者简介：

曹广玉（1986-），男，汉族，山东德州人，本科，工程师，研究方向：核能供热与石化耦合相关技术管理工作。