

炼油行业的减碳经济性分析研究

陈 敏（中海油惠州石化有限公司，广东 惠州 516086）

摘要：我国于2020年9月提出了“双碳”目标，并在“十四五”能源规划中，明确提出要进行“能源革命”，为了实现“双碳”目标，炼油行业作为碳减排的重点行业，也在响应国家号召，积极筹划，以减少碳排放，同时还需要保证自身经济效益。因此本文从我国炼油工业发展现状出发，对炼油行业的各项减碳措施的经济性进行了分析研究，为炼油行业的可持续发展提供思路。

关键词：炼油行业；减碳措施；经济性

0 引言

炼油行业作为石油化工工业的核心，不仅是能源消耗大户，也是二氧化碳排放的主要来源之一。目前，我国对环境保护以及可持续发展越来越重视，炼油行业面临着巨大的发展压力，需要在保证经济效益不受损的情况下，大幅减少碳排放，因此对炼油行业的减碳经济性进行分析研究，不仅是为了满足环保法规的要求，更是为了寻求行业长远发展的可行之路。

1 我国炼油工业发展现状

1.1 炼油能力

在2023年，我国的炼油能力已经增至每年9.36亿吨，已经成为世界上最大的炼油国，并且炼化一体化能力更是达到42610万吨/年，已经达到了国际一流水平。我国的炼油厂主要分为主营炼厂和独立炼厂两大类，在主营炼厂中，中石化的炼油能力和厂家数量仍居首位，其炼油能力占全国总产能的32.97%。中石油次之，所占比例为22.62%。我国独立炼厂的一次加工能力约为3.76亿吨/年。其中山东独立炼厂的炼油加工能力名列前茅，为15760万吨/年，占独立炼厂炼油总产能的53.43%。

1.2 能源消耗和碳排放

目前我国不同炼油厂的能耗水平受原油品质、加工的规模、工艺过程、产品的计划、能源介质、用能设施的选用等诸多问题，形成了很大的差异。在2023年，仍有约15%的产能达不到基本要求。例如，部分炼油厂中小装置规模占比较大，加热炉热效率偏低。部分早期建造的工艺设备、装置设计和设备工作性能等都相对一般，在强化反应、催化、节能等方面的空间很大，这些装备的使用时间长达十年左右，技术水平相对落后。并且受原油质量下降，加上国家减油增化的趋势越来越明朗，炼油流程日益复杂，能耗问题也在陆续增长。我国炼油行业每年的二氧化碳排放量

约230至280百万吨，是主要的碳排放源之一。

2 炼油行业减碳的必要性

2.1 应对气候变化

全球气候危机日益严重，炼油行业的碳排放规模正在日益增加，虽然目前仍不如电力、钢铁以及水泥行业，然而碳的排放量目前超出了行业的平均值，因此减碳势在必行。

2.2 满足政策要求

随着“双碳”目标的设定，我国目前对各个行业的碳排放量都有严格的要求，各省份要分解减排总量以后，再对各个企业进行分解减排，设置基准排放上限，并且还加大了对国企央企的碳排放考核力度，在该政策要求下，炼油行业必须寻求有效的简化减碳措施。

2.3 提升行业竞争力

从源头上减少化石能源的消耗以及二氧化碳的排放，是提升炼油行业竞争力，实现绿色低碳转型的有效途径。如利用节能降碳的优化以及设备设施的更换，相关的企业能提升自身的资源利用程度，生产出符合社会需求的新型产品，从而促进市场的竞争力度，推动整个行业的高质量发展。

2.4 适应能源结构调整

目前，我国能源生产以及消费结构发生了变化，炼油行业需要适应这种变化，在资源上逐步摆脱进口束缚，利用好绿电，并消纳绿电，以此来应对转型局势，实现高质量发展，满足高端产业链的需求。并且，在全国碳市场价格持续走高的情况下，减碳还可以降低企业的碳排放成本。

3 炼油行业减碳措施的经济性分析

3.1 原料燃料优化

3.1.1 原料低碳化路径

目前，我国的炼油行业的主要原材料是以原油、

煤以及天然气为主，同样这些化石碳基燃料的使用是碳排放的根本原因，因此从原料上控制碳排放切实可行。除了传统的绿色能源替代，生物质燃料以及废塑料化学循环成为炼油企业从原料上实现低碳化的主要技术。

其中生物质燃料主要是利用农作物残留、森林废弃物以及城市有机垃圾等来生产生物柴油以及生物航空燃料。这些生物质燃料在燃烧时产出的 CO_2 以及在生长中吸收的 CO_2 的量基本相同，实现了碳的循环利用，也就降低了碳排放。而废塑料化学循环则是通过废塑料低能耗热解与净化预处理技术，将废塑料转化成化工原料或燃料，不仅减少了对其他碳基燃料的依赖，还能解决废塑料污染问题，目前，一些先进的热解技术已经可以在较低温度下高效分解废塑料，与化石碳基燃料相比，碳排放更少。

3.1.2 经济性分析

在成本方面，原料燃料的优化需要购置和安装新的生产设备，或是改造现有的生产线，引入先进技术，例如，一套生物质燃料生产设备需要数千万美元的投资，并且根据规模以及技术复杂程度，投资可能会进一步增加。同时原材料的采购、人力维护成本也需要考虑进去。

原料燃料优化的收益来源主要来自政策补贴，在“双碳”背景下，我国大力支持炼油企业进行低碳转型，各种财政补贴比比皆是，这成为企业降低成本，提高收益的重要手段。并且通过减少碳排放，企业可以出售多余的碳排放配额，从而获得额外收入，因为目前我国已经建立了较为成熟的碳交易市场，机制较为完善，企业可以通过这种方式获利。原料燃料的优化使得生产出的燃料和化工产品往往能够获得更高的市场价格。在当前市场上，低碳环保的产品更受到青睐，例如，生物航空燃料相比传统航空煤油的价格更高，但航空公司更愿意选择生物航空燃料，利用价格差来抵消碳排放。

案例分析：一家炼油企业通过引进废弃油脂处理技术，成功生产出生物柴油。在该项目中，企业初期投资为 5000 万元人民币。在运营后，企业每年的生产成本约为 2000 万元，通过政府补贴和税收减免，实际支出减少了 30%，约为 1400 万元。而生物柴油的市场售价要比传统柴油高出 20%，每吨大概 6000 元。通过计算，该项目的年利润可达 1600 万元，投资回报期约为 3 年。此外，企业还通过碳交易市场出售减

碳额度，每年还额外获利 200 万元。

3.2 工艺优化与新技术

3.2.1 催化裂解的低碳性和经济性

在催化剂的作用下，对石油烃类开展高温裂解以后能生产出乙烯、丙烯、丁烯等低碳的烯烃，此过程是催化裂解工序。因此该工艺优化的低碳性与催化剂有关，不仅能提高反应速率，还能通过选择性的催化作用，增加低碳烯烃的产率，减少不必要的副反应，同时，高 H/C 比和低 BMCI 值的原料也有利于提高低碳烯烃的产率。在实际工艺中，提高操作流程以及设计合理有效的催化剂，可以减少焦炭的产生，从而降低单位产品的碳排放。如控制反应温度、剂油比、蒸汽用量和油气停留时间，可以达到最大的低碳烯烃产率，从而提高整体工艺流程的低碳性。

在成本收益上，催化裂解生产的低碳烯烃（如乙烯、丙烯等）作为化工行业中的主要原料，市场的需求量非常大，价格也高出很多。与传统的蒸汽裂解相比，催化裂解可以在较温和的条件下操作，高附加值产品的收率会提高，从而带来更高的经济效益。催化裂解装置还能提高原料转化率和能源利用效率，从而减少生产成本。虽然催化裂解工艺初期投资较高，不过高效的生产以及良好的价格，投资回报期相对较短。

3.2.2 碳捕集与封存技术

碳捕集以及封存技术把生产中的 CO_2 实施捕获、运输，并最终储存到地质构造中，使其长期与大气隔绝的方法。这一技术可以有效减少工业活动中二氧化碳的排放。在炼油流程中，需要将二氧化碳从排放气体中分离和捕获，一般采用燃烧后捕集的方法。然后将捕集的二氧化碳通过管道、罐车等方式进行运输。最后，将二氧化碳注入到合适的地质构造中进行长期封存，例如枯竭的油气田、深盐水层等。根据相关研究，碳捕集与封存技术可以在每个项目中每年减排数百万吨的二氧化碳。通过全生命期的评估，碳捕集与封存技术在捕集、运输、封存的各个环节中的减排效果显著，尽管会有少量二氧化碳泄漏，但相比没有该技术的情况下，二氧化碳的排放量大大减少。

在成本方面，捕集成本占整个项目成本的 50% ~ 70%，运输和封存成本相对较低，但取决于封存地点和距离以及地质条件。以中国石化的胜利油田百万吨级碳捕集与封存项目为例，该项目通过液化提纯技术回收煤气化装置尾气中的高浓度二氧化碳，然后通过长距离管道运送到胜利油田进行驱油与封存。具体

采用了高压混相驱技术和全密闭注入技术。据测算，该项目每年可减排二氧化碳约 100 万吨，相当于植树 900 万棵，预计在十五年内可封存 1000 万吨的二氧化碳。通过使用该技术，项目产生了显著的经济效益，同时为环境保护做出了巨大贡献。

3.3 数字化技术与智能控制

3.3.1 全流程碳足迹建模和优化

全流程碳足迹是指在原油提炼过程中产生的所有温室气体的排放总和，不仅涉及到化石燃料燃烧的直接排放，还包括电力使用等间接排放。准确测量和理解炼油厂的碳足迹可以详细解析每个生产步骤的碳排放情况，并采取有效的减排措施。首先，数据收集是建模的基础，需要收集生产数据（各种生产装置的输入输出数据）、能源消耗数据（不同工序的能源类型和消耗量）、排放因子。然后利用自下而上法建立物质流—能量流—碳流集成模型，从而实现对碳排放环节的追溯与衡量，定位高排放源头。

以某千万吨全加氢燃料型炼油企业为例，该企业全厂碳排放总量为 2885 千吨/年，其中燃烧排放占 30%，催化裂化装置烧焦排放占 32%，制氢过程排放占 18%，外购电力排放占 18%，其余占 2%。通过构建和分析数据驱动的全流程碳足迹模型，企业决定改进加热炉的设计和操作，以提高其热效率，经过测量，改造后企业每年可减少碳排放 38.3 千吨。同时也对生产工艺进行改进与优化，经济效益也有了一定提高。

3.3.2 数智化改造

目前，大部分炼油企业都已经建立了智能化技术中心，对各个装备流程进行整体的监测，从而进行全面精准的优化布局。下属的自动化控制系统能显著降低碳排放，精确控制资源的使用，最小化无效能源的使用，优化碳性能。以公用系统和用能设备的优化为例，通过数字化能源管理，可以聚焦能量集成，全面运用能源优化以及装置热集成的方法，从整体上降低燃料、电力和蒸汽的消耗，减少碳排放。

“炼油化工工业能源智能管控技术与应用”的项目是中国石油研究设计的，该项目通过引入先进的智能管控技术，提高了能源的利用效率，同时建立了全面的能效对标指标体系，帮助企业在行业内进行横向比较，明确自身能源管理水平和改进方向。同时实现了用能侧与供能侧的协同优化，确保整个生产过程的能源流动和使用达到最佳状态，提高整体能源利用效率。

3.4 跨行业合作与能源综合利用

3.4.1 清洁能源的替代与整合

炼油行业作为能源密集型产业，为了降低碳排放，不仅需要进行内部技术升级，还需要与其他行业展开广泛合作，以实现更高效的利用和更低的碳排放。首先，可以与电力行业合作，接入公共电网获取更多的绿色电力，从而减少自备燃煤机组的使用。或是与新能源行业合作，特别是在绿氢的生产和利用上，通过电解水产生的绿色氢气作为炼油过程中的还原剂，代替传统的制氢，以此降低碳排放量。

以电驱系统替代蒸汽透平驱动为例，电动机可以直接连接到泵、压缩机和其他设备上，从而省去复杂的蒸汽生成和传输系统。电动机的效率通常可以达到 90% 以上，同时能耗更低，可以节省大量的燃料费用。

3.4.2 能源与资源的梯级利用

通过与钢铁、水泥等高温工艺行业合作，炼油厂可以实现热力资源的梯级利用，例如，利用热泵和蒸汽再压缩技术将炼油过程中产生的低温热与工业余热进行再利用，提升热力品位，并将其应用到其他温度热能需求较低的工业过程中，以此可以提高整体能源利用效率，还能大幅减少碳排放。

余热回收技术的应用不仅可以减少能源消耗，还能带来显著的经济效益。例如，通过 ORC 系统发电，不仅可以满足炼油厂自身的部分电力需求，还可以将多余的电力出售获利。此外，减少燃料气的消耗也就意味着减少直接的燃料费用，可以提高整体盈利能力。

4 结论

综上所述，经过对炼油行业各项减碳措施的经济性分析，在当前的技术和经济条件下，通过一系列的节能降碳措施，不仅可以大幅减少碳排放，还能带来显著的经济效益，并且在实际运营过程中，炼油企业还要利用好国家、地区的补贴政策以及碳交易机制，解决低成本碳排放的难题，实现环保与经济共赢。

参考文献：

- [1] 漆偲劼. 绿氢在化工行业减碳方面的经济性分析 [J]. 中国战略新兴产业, 2024(23):34-35.
- [2] 杨国锐. 中国经济发展中的碳排放波动及减碳路径研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022(08):23-25.
- [3] 宋铁君. 中国石油石化行业碳排放波动与低碳策略研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2024(23):3-5.
- [4] 张真, 张凡, 云祉婷. 绿氢在石化和化工行业的减碳经济性分析 [J]. 化工进展, 2024(6):45-46.