

炼化行业零碳工厂建设思路

张连营 李美美 王金伟

(中国石油华北石化公司)

摘 要:在国家“双碳”战略与工信部等五部门联合印发的《关于开展零碳工厂建设工作的指导意见》指引下,炼化行业作为高载能、高排放流程工业,零碳工厂建设已成为绿色转型核心任务。当前我国零碳工厂标准呈现“通用多、行业专属少;评价多、建设指南少;制造覆盖多、流程工业覆盖少”特征,炼化领域零碳建设及评价标准存在显著空白,与2030年将零碳工厂拓展至石化化工行业的政策目标形成迫切供需缺口。本文立足炼化行业工艺特性、排放结构与能源消耗特点,结合现行政策与标准体系,从科学算碳、源头减碳、过程脱碳、协同降碳、智能控碳、碳抵消闭环六大维度,构建炼化企业零碳工厂全流程建设思路,并结合国内标杆企业实践案例,明确技术路径、管理体系与评价导向,为炼化企业零碳转型提供可落地、可评价、可推广的实施方案,助力行业探索传统高载能产业脱碳新路径。

关键词:炼化企业;零碳工厂;碳达峰碳中和;节能降碳;绿色低碳转型;标准体系

1 引 言

炼化行业是国民经济基础产业,也是工业碳排放重点领域,其生产流程长、工艺复杂、能源密集、排放环节多,碳排放覆盖范围广,强度高,脱碳难度大,减排难度显著高于其他行业。2026年1月,工信部等五部门联合《关于开展零碳工厂建设工作的指导意见》,明确提出,到2030年将零碳工厂建设逐步拓展至石化化工等高载能行业,探索传统高载能产业脱碳新路径。《指导意见》强调“因业施策、系统推进”原则,要求完善零碳工厂建设标准体系,强化标准供给与系统推进。截至目前,我国零碳工厂相关标准已形成“1项国家标准+41项团体标准+1项地方标准”的格局,但炼化行业无专项零碳工厂建设指南与评价规范,标准供给滞后于政策需求与行业实践。

零碳工厂并非绝对零排放,而是通过技术创新、结构优化、管理升级实现应减尽减、残余抵消,在自主减排基础上以碳信用完成残余排放100%抵消的持续改进过程。炼化企业建设零碳工厂,需突破“能源结构清洁化、生产工艺低碳化、全流程高效化、数智管理精准化、价值链协同化”五大关键环节,兼顾能源安全、生产稳定与减排实效,构建符合流程工业特性的零碳建设体系。本文基于政策要求、行业痛点、技术可行与标杆案例,系统提出炼化企业零碳工厂建设思路,为行业规范化、体系化零碳转型提供支撑。

2 炼化行业零碳工厂建设现状与痛点

2.1 政策导向明确,行业标准缺位

国家层面已构建了零碳工厂建设顶层设计,明确了梯度培育、因业施策、系统推进等基本原则,

要求分行业制定建设指南与评价导则。但现行零碳工厂标准体系中，通用标准占比高、行业细分不足，电工电子、锂电、钢铁等行业已有专项标准，炼化行业处于标准空白区，导致炼化企业在建设零碳工厂方面无专属依据、无对标标杆、无评价规范，转型方向模糊。

2.2 排放结构复杂，减排难度突出

炼化企业碳排放主要来源于三方面：一是外购电力、热力间接排放；二是化石燃料燃烧、工艺过程排放（催化裂化、制氢、加热炉等）；三是原材料采购、物流运输、产品使用等价值链排放。其中催化裂化、制氢、加热炉、蒸汽系统为核心排放源，工艺过程排放占比高，单纯节能改造减排空间有限，需耦合原料替代、能源转型、碳回收、负碳技术等多重路径。

2.3 能源结构偏重，清洁转型紧迫

炼化企业用能以煤炭、天然气、燃料油为主，自备锅炉、制氢装置碳排放强度高；电气化水平偏低，可再生能源利用不足，绿电、绿氢、生物质能等清洁能源占比低。同时，余热余压资源丰富但回收利用率有待提升，能源系统耦合效率不足，源头减碳潜力未充分释放。

2.4 管理基础薄弱，数智水平不足

多数炼化企业未建立全口径碳排放核算体系，计量监测覆盖不全、数据追溯性差；能碳管理碎片化，未实现能耗与碳排放一体化管控；产品碳足迹核算、绿色供应链管理处于起步阶段，数字化、智能化控碳能力薄弱，难以支撑精准减排与持续改进。

3 炼化企业零碳工厂建设总体思路

零碳工厂建设，炼化企业应遵循“科学算碳为基础、源头减碳为核心、过程脱碳为关键、协同降碳为支撑、智能控碳为手段、碳抵消为闭环”的总体逻辑，按照“合规打底、能效领跑、能源清洁、工艺低碳、数智赋能、闭环管理”实施路径，分阶段推进零碳工厂建设：

基础达标阶段：健全碳排放核算与监测体系，完成节能降碳改造，满足合规与能效标杆要求；

深度减排阶段：实现能源结构清洁化转型，推广低碳工艺与负碳技术，大幅降低自主排放；

零碳闭环阶段：残余排放 100% 抵消，建立全生命周期碳管理体系，实现持续净零运行。

建设过程坚守四大原则：因业施策，贴合炼化流程工业特性；系统推进，覆盖生产、能源、管理、供应链全环节；创新驱动，融合清洁能源、低碳工艺、数字技术；应减尽减，优先自主减排，严控碳抵消比例。

4 炼化企业零碳工厂核心建设路径与典型案例

4.1 健全碳排放核算管理体系，实现科学算碳

科学算碳是零碳工厂建设的前提，需构建全边界、全口径、可追溯、可验证的核算体系。

明确核算边界与范围：覆盖范围包括以下三个方面：1、外购电力、热力；2、燃料燃烧、工业过程、火炬排放、VOCs 泄漏等；3、原材料、物流、固废处置、产品碳足迹，贴合炼化生产实际界定厂区边界与工艺单元边界。

碳排放核算要执行 GB/T 32150《工业企业温室气体排放核算和报告通则》、GB/T 32151 温室气体排放核算系列标准，纳入碳市场企业采用行业技术规范，确保核算结果合规可比。

完善计量监测配置：按照 GB 17167 配备能源计量器具，对加热炉、制氢装置、催化裂化、蒸汽系统等重点排放单元安装在线监测设备，实现碳排放数据实时采集、自动核算、全程留痕。

建立碳台账与信息披露机制：定期编制碳排放清单、碳减排报告，按要求披露碳排放数据、减排措施、碳抵消情况，对接绿色金融与绿色供应链要求。

中石化九江石化建立覆盖全流程的碳排放核算与监测体系，采用低温精馏技术建成高浓度 CO₂ 回收利用装置，累计回收 CO₂ 29 万吨，实现“核算—监测—回收—利用”闭环管理。同时对灰渣、碱渣、废催化剂等固废 100% 合规处置、综合利用率超 98%，在原油加工量增长 50.5% 的情况下，污染物总量减排 71.2%，为炼化企业“算碳 + 降碳 + 用碳”提供了一套可复制模板。

4.2 加快用能结构绿色低碳转型，实现源头减碳

以清洁能源替代、可再生能源倍增、电气化提升为核心，重构工厂用能体系，从源头降低碳排放强度。

大力发展可再生能源：利用厂区屋顶、闲置场地建设分布式光伏，推进分散式风电、生物质能利用，提高可再生能源自发自用比例；参与绿电交易、绿证认购，提升绿电消费占比，力争核心工艺绿电全覆盖。

推进化石能源清洁替代：淘汰燃煤自备锅炉，以天然气、电加热、工业热泵替代；降低煤炭消费比例，优先使用集中供热、公用电网清洁电力；探索太阳能供热、地热利用在炼化低温供热环节应用。

构建工业绿色微电网：整合光伏、风电、余热回收、新型储能、高效热泵，实现多能互补、智能调度；推进源网荷储一体化，提升可再生能源消纳能力与供能稳定性。

推广绿色氢能应用：发展可再生能源制氢，以绿氢替代煤制氢、天然气制氢，应用于加氢装置、制氢系统，降低制氢环节碳排放；推进氢燃料电池在厂区作业车辆、机械中应用，提升交通环节电气化水平。

中石油华北石化与华北油田公司在减碳方面加强合作：华北油田建设 150MW 的风、光电项目，生产绿电资源生产绿氢供华北石化氢能装置生产燃料电池氢 2000Nm³/h，实现氢能装置全链条绿色化；华北油田 120t/h 的地下热水送至气分装置做为塔底热源，节约 0.4MPa 蒸汽用量 4.1t/h；华北石化建设 20 万吨 / 年 CCUS 装置，利用制氢装置中变气生产二氧化碳供油田，形成 CCUS-EOR，形成二氧化碳完整产业链，开辟了炼化行业绿电—绿氢—绿色油品的新工艺路线，CCUS-EPR 的深度耦合，也在降低碳排放方面进行了有益探索。2026 年，华北石化还将建设一套 10 万吨 / 年可持续航空燃料（SAF）装置，设计碳减排率达到 84.4%，推动航空燃料的绿色低碳转型，助力“双碳”目标的实现。

4.3 大幅提升能源利用效率，实现过程脱碳

实现过程脱碳，炼化企业应做好以下几个方面工作：

实施极致能效改造：单位产品、工序能耗达到行业强制性能耗限额 1 级与能效标杆水平；电机、变压器、风机、泵、空压机等通用设备达到国家标准的 1 级能效，推广磁悬浮、永磁直驱、变频调速等高效技术；开展加热炉、换热器、反应器等专用设备升级，提高热效率与传热效率。

强化余热余压资源化利用：回收催化裂化烟气、蒸馏塔顶余热、循环水余热、蒸汽压差等低品位余能，用于发电、供热、制冷，提升余热综合利用率；优化蒸汽系统，实现梯级利用、冷凝水回收，降低蒸汽损耗。

推进低碳工艺与流程再造：推广短流程、反应过程强化、高效催化等低碳工艺，降低工艺固有排放；优化原油加工路线，提高轻质油收率与化工品比例，降低单位产值排放；实施能量系统优化，推进装置间热联合、物料循环，减少能源消耗。

深化资源循环利用：推进废塑料、废润滑油、废弃油脂与原油耦合加工，发展生物柴油、生物航煤等生物质燃料；实现工业固废、废水、废气资源化利用，提高水资源循环利用率与关键原料回收利用率，从资源端降低碳排放。

中石化镇海炼化应用热联合、低温热回收、窄点集成等先进节能技术，全面升级高效设备，实现能源系统极致高效。同时建成 10 万吨 / 年生物航煤装置，以废弃油脂为原料生产生物航煤，全生命周期碳排放较石油基航煤降低 75% 以上，获评浙江省减污降碳协同示范工程，形成能效领跑 + 低碳工艺 + 绿色产品三位一体过程脱碳模式。

4.4 开展全产业链协同降碳，实现联动减碳

以产品碳足迹、绿色供应链、循环经济为抓手，带动上下游协同减排，构建零碳产业生态。

开展产品碳足迹核算：炼化企业依据 GB/T24067 开展汽油、柴油、乙烯、合成树脂等重点产品碳足迹量化，识别全生命周期减排环节，优化产品设计与生产方案，降低产品碳强度。2025 年，华北石化对 2000Nm³/h 氢能装置进行碳足迹核算工作，核算的燃料电池氢产品的总碳足迹为 2.912tCO₂e/t，在碳足迹核算方面迈出了坚实一步。

构建绿色低碳供应链：落实中央企业绿色低碳供应链建设指引，建立供应商绿色评价体系，优先采购低碳原料、节能设备、绿色产品；将碳管理要求传导至上游，推动供应商节能降碳，实现全链条协同。

推行绿色物流与包装：提高新能源运输车辆、铁路运输比例，采用绿色包装材料；优化物流路线，降低运输环节碳排放；建立产品回收体系，推进包装物、废旧产品循环利用。

盛虹石化构建“源头清洁替代—过程智能降碳—末端资源化利用”的全链条模式，成为国内首家接收核电蒸汽的石化企业，从源头降低供热碳排放。建成全球首条 CO₂ 捕集利用—绿色甲醇—新能源材料”产业链，年回收 CO₂15 万吨；同步搭建再生纤维循环体系，实现瓶片资源化高效利用，形成覆盖原料、生产、产品、回收的全产业链零碳协同范式。

4.5 提升数字化智能化水平，实现智能控碳

以数字化能碳管理中心、工业互联网、数字孪生为支撑，实现碳排放精准管控、智能决策。

建设一体化能碳管理平台：对接生产系统、能源系统、计量监测系统，集成能耗监测、碳排放核算、能效分析、减排优化、碳资产管理功能，实现数据可视化、管控精细化、决策智能化。

应用数字孪生与 AI 优化：对蒸馏、催化裂化、制氢等核心装置建立数字孪生模型，模拟工艺参数对碳排放的影响，优化操作条件；利用 AI 算法实现设备负荷动态调度、能源系统智能匹配，降低无效能耗与排放。

推进全流程数智化升级：实现生产、安全、环保、能碳数据互联互通，推广智能传感器、边缘计算、区块链技术，确保碳数据真实可追溯，支撑碳核查、碳交易与零碳认证。

中石化润滑油北京公司建成数智能化能碳管理系统，实现能耗与碳排放实时监测、智能分析、自动优化。同步实施光伏发电（绿电占比 50%）、双级热泵供暖（减排 61%）、包装轻量化等措施，2024 年碳排放强度同比下降 14.38%，通过 I 型五星级零碳工厂认证，成为炼化细分行业数智化零碳管控标杆。

4.6 实施碳抵消与闭环管理，实现零碳闭环

在应减尽减基础上，规范碳抵消管理，形成零碳闭环，确保排放趋零且持续改进。

严控碳抵消前提：优先实施技术、经济可行的自主减排，仅对残余排放进行抵消，杜绝“以抵消代减排”。

规范碳抵消来源与管理：采用国家核证自愿减排量（CCER）、绿电绿证、碳配额等合规碳信用，确保碳信用可追溯、不重复使用、按时注销；建立碳抵消台账，明确抵消量、来源、注销凭证。

建立持续改进机制：定期评估减排效果，动态优化零碳路线图，逐年降低碳抵消比例，最终实现深度自主减排 + 少量负碳技术抵消的净零状态。

中石化青岛炼化海河路加氢站配套 5.5MW 水上分布式光伏，实现用电 100% 绿电自给，创新应用“柔性虚拟储氢”节能技术降低加注能耗。通过“绿电替代 + 节能降耗 + 碳抵消”闭环，经第三方认证成为我国首座碳中和加氢站，年碳减排量完全抵消运营全口径排放，为炼化终端环节零碳闭环提供了示范。

5 炼化企业零碳工厂保障体系

5.1 完善组织与制度保障

成立零碳工厂专项工作组，明确职责分工；制定零碳战略规划、年度减排计划、碳管理制度，将零碳目标纳入绩效考核；开展全员低碳培训，提升员工零碳意识与专业能力。

5.2 强化技术与标准支撑

对接《节能装备高质量发展实施方案（2026-2028 年）》，推广高效电机、工业热泵、水电解制氢等节能装备；加强低碳工艺、CCUS、绿氢炼化等技术研发与示范；参与制定炼化行业零碳工厂建设指南与评价规范，填补行业标准空白。

5.3 优化政策与资金支持

统筹利用节能降碳补贴、绿色金融、税收优惠等政策，争取专项债券、中长期信贷支持；发行绿色债券，引导金融资源投向零碳项目；建立内部激励机制，对零碳建设成效突出的单位与个人予以奖励。

5.4 严格评价与监督管理

参照 GB/T 46737-2025《电工电子行业零碳工厂评价导则》、T/CECA-G 0171-2025《零碳工厂评价规范》，构建炼化企业零碳工厂评价指标体系，从管理体系、能源结构、能效水平、减排成效、碳抵消等维度开展自评与第三方评价；建立监督机制，确保零碳建设落地见效。

6 结论与展望

炼化企业零碳工厂建设是践行“双碳”战略、推动行业高质量发展的必然选择，也是破解高载能产业脱碳难题的关键路径。当前行业面临标准缺位、排放复杂、能源偏重、管理薄弱等挑战，需以政策为引领、标准为支撑、技术为核心、案例为参照、管理为保障，构建科学算碳、源头减碳、过程脱碳、协同降碳、智能控碳、碳抵消闭环的全流程建设体系，实现能源清洁化、工艺低碳化、管理数智化、价值链绿色化。

上述石化企业的生产实践表明，炼化零碳工厂已从理念走向现实，形成绿电绿氢替代、能效极致提升、工艺低碳再造、资源循环利用、数智智能管控、闭环碳抵消六大成熟路径。未来，随着炼

化行业零碳工厂建设指南与评价规范出台、低碳技术突破、绿色金融完善，零碳工厂将从试点示范走向规模化推广。炼化企业应抢抓政策机遇，先行先试、系统推进，打造一批零碳标杆工厂，形成可复制、可推广的炼化零碳模式，为 2030 年行业全面推进零碳工厂建设、实现碳达峰目标提供坚实支撑，助力我国工业绿色低碳转型与“双碳”战略落地。

参考文献

- [1] 工业和信息化部，国家发展改革委，生态环境部，等。关于开展零碳工厂建设工作的指导意见 [Z]. 2026.
- [2] 工业和信息化部，国家发展改革委，国务院国资委，等。节能装备高质量发展实施方案（2026-2028 年）[Z]. 2026.
- [3] 国务院国资委办公厅。中央企业绿色低碳供应链建设指引（试行）[Z]. 2025.
- [4] 国家发展改革委，工业和信息化部，国家能源局。关于开展零碳园区建设的通知 [Z]. 2025.
- [5] GB/T 46737-2025，电工电子行业零碳工厂评价导则 [S]. 2025.
- [6] T/CECA-G 0171-2025，零碳工厂评价规范 [S]. 2025.
- [7] 国家发展改革委等。关于促进炼油行业绿色创新高质量发展的指导意见 [Z]. 2023.