

# 甲烷氧化偶联制乙烯碳足迹核算与 减排分析

常大山<sup>1,2</sup>, 韦力<sup>2</sup>, 赵清锐<sup>2</sup>, 陈光进<sup>1\*</sup>

(1. 中国石油大学(北京) 化学工程与环境学院, 北京 102249;  
2. 中石化(北京) 化工研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:**为了对甲烷氧化偶联制乙烯工艺的碳足迹进行核算并分析减排措施, 采用过程生命周期评价方法, 以甲烷氧化偶联制 1 t/h 乙烯为功能单位, 构建了“从摇篮到大门”的乙烯产品碳足迹核算系统边界, 以调研数据和流程模拟计算数据为基础进行了乙烯产品的碳足迹核算与减排分析。结果表明, 甲烷氧化偶联工艺制备乙烯产品的碳足迹为 5.53 t/t, 其中原材料获取阶段引入的碳排放足迹占比最高, 占总碳排放的 54.1%。当同时使用光伏电解水制氢获取原料氢气及对 OCM 反应产生的二氧化碳进行回收再利用时, 可以大大降低乙烯产品的碳足迹, 与不采用减碳技术相比较, 共降低碳足迹 47.6%。

**关键词:** 甲烷氧化偶联; 乙烯; 过程生命周期评价; 碳足迹; 碳减排

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S1-0321-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.054

## Carbon footprint accounting and emission reduction of oxidative coupling of methane for ethylene production

CHANG Da-shan<sup>1,2</sup>, WEI Li<sup>2</sup>, ZHAO Qing-rui<sup>2</sup>, CHEN Guang-jin<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Sinopec (Beijing) Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** To account for the carbon footprint of the ethylene production process via methane oxidative coupling (OCM) and analyze emission reduction measures, this study adopted the process-based life cycle assessment (PLCA) method. Taking the production of 1 t/h ethylene via OCM as the functional unit, a “cradle-to-gate” system boundary for carbon footprint accounting of ethylene was established. The carbon footprint calculation and emission reduction analysis of ethylene were conducted based on survey data and process simulation data. The results show that the carbon footprint of ethylene produced by OCM is 5.53 tCO<sub>2</sub>/t. Among all stages, the raw material acquisition stage contributes the highest proportion of carbon emissions, accounting for 54.1% of the total. When both photovoltaic-powered electrolysis of water (to produce hydrogen as a raw material) and carbon dioxide recovery and reuse (from OCM reactions) are adopted, the carbon footprint of ethylene can be significantly reduced. Compared with the scenario without carbon reduction technologies, the total carbon footprint is decreased by 47.6%.

**Key words:** OCM; ethylene; PLCA; carbon footprint; carbon emission reduction

2020 年 9 月, 习近平总书记正式提出中国将力争于 2030 年前碳达峰, 努力争取 2060 年前实现碳中和<sup>[1]</sup>。国家已经从顶层设计上构建了“1+N”体系, 指导化工行业加快推动产业结构、能源结构等调整优化<sup>[2]</sup>, 从而实现化学工业转型发展, 助力碳达峰、碳中和。乙烯是重要的石油化工原料, 近年来, 我国乙烯需求量和产能增长量逐年上涨<sup>[3]</sup>。我国乙烯行业处于扩张周期, 2025—2028 年, 我国将新增产能 2 540 万 t/a, 届时产能将达到 8 379 万 t/a<sup>[4]</sup>。目前我国生产乙烯的主要原料是石脑油, 占比达到 73.07%, 其他工艺 CTO、轻烃裂解、MTO 分别占比 9.91%、9.11%、7.91%<sup>[5]</sup>。甲烷氧化偶联制乙烯 (oxidative coupling of methane, OCM) 是使用甲烷在

氧气环境中直接氧化转化形成乙烯, 于 1982 年由 Keller 等<sup>[6]</sup>首次提出, OCM 工艺对于拓宽乙烯原料来源, 降低石油依赖, 优化我国一次能源结构有重要作用。OCM 工艺热点温度高<sup>[7]</sup>, 反应会产生大量 CO<sub>2</sub>, 本工作以 SLB Symmetry™ 计算得到的 OCM 工艺物料平衡、能量平衡数据为基准, 结合调研数据, 采用生命周期评价方法, 建立了 OCM 碳足迹核算模型, 并研究了有效的降碳策略, 预测了相关策略的降碳潜力, 助力 OCM 工艺工业化投资决策。

## 1 核算标准和范围

### 1.1 核算标准

碳足迹核算的基础方法是生命周期评价方法

收稿日期: 2025-12-10; 修回日期: 2026-03-18

作者简介: 常大山 (1992-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为化工新工艺开发, 010-59202474, changds.bjhy@sinopec.com; 陈光进 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向为高压流体相态和气体水合物方面的科学研究和技术开发, 通讯联系人, 010-89732126, gjchen@cup.edu.cn。

(life cycle assessment, LCA), 按照核心逻辑的不同, 又可细分为 3 类: 过程生命周期评价 (process-based, PLCA)、投入产出生命周期评价 (input-output LCA, I-OLCA)、混合生命周期评价 (hybrid-LCA, HLCA)。其中最广泛使用的过程生命周期评价方法, 主要基于标准 PAS 2050: 2011<sup>[8]</sup>、ISO 14067—2018<sup>[9]</sup>。2024 年, 为了统一产品碳足迹核算方法和开展产品碳足迹数据国际交流互认, 国家标准管理委员会基于 ISO 14067—2018 发布了更加符合我国国情的 GB/T 24067—2024<sup>[10]</sup>, 随后, 在应用于乙烯工业的碳足迹核算时, 中国石油化工信息学会发布了团体标准《温室气体产品碳足迹量化方法与要求 乙烯》(T/CSPCI 70011—2024)。本文中主要基于 T/CSPCI 70011—2024<sup>[11]</sup> 开展乙烯产品的碳足迹核算。

## 1.2 核算范围

OCM 工艺是甲烷和氧气发生催化反应, 生成乙烯以及乙烷、一氧化碳、二氧化碳、 $C_3+$  等物质的过程, 流程采用罗淑娟等<sup>[12-14]</sup> 研究的深冷顺序分离流程。由于乙烯产品是作为其他化工装置的原料, 因此系统边界选取为“从摇篮到大门”, 即覆盖了原料甲烷、氧气、氢气和过程使用的天然气、电力等能源的生产、运输过程及 OCM 工艺制备乙烯的生产过程, 且量化工作以生产乙烯 1 t/h 为功能单位, 以二氧化碳当量表示乙烯产品碳足迹 (carbon footprint of product, CFP)。

OCM 工艺的生命周期过程主要包括原料 (甲烷、氧气、氢气) 的获取、原料的运输、OCM 反应、产品分离 4 个阶段。OCM 工艺制备乙烯的碳足迹评价系统边界如图 1 所示。

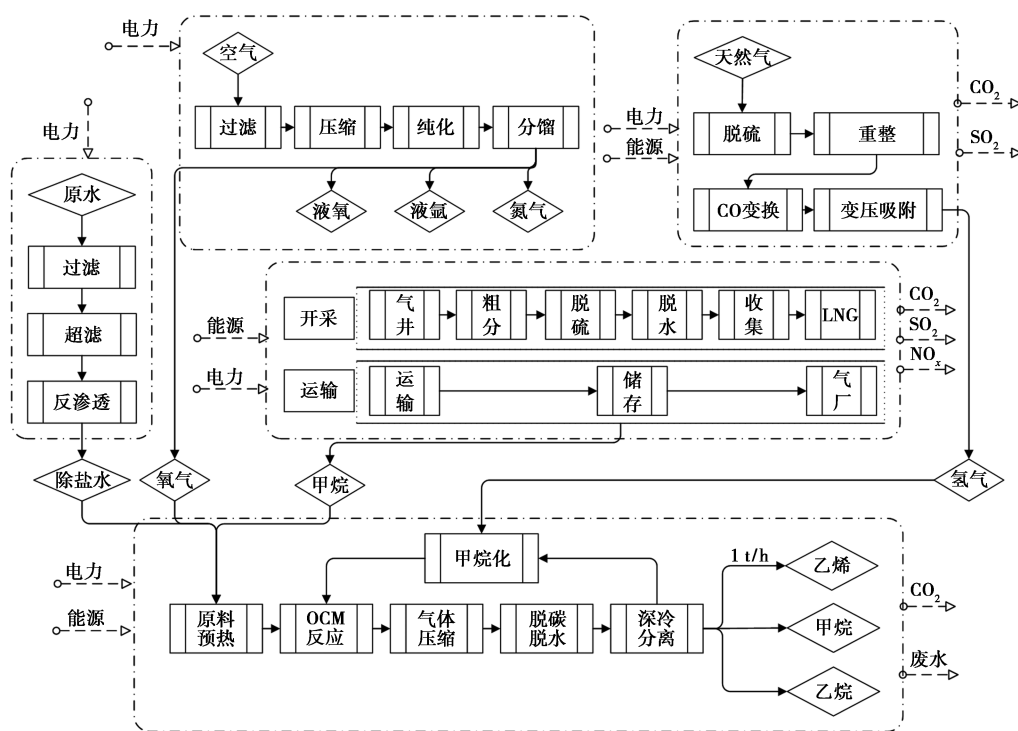


图 1 OCM 工艺制备乙烯的碳足迹评价系统边界

## 2 核算清单分析

清单分析的任务是为碳足迹核算收集数据, 并通过一些计算给出该系统的各类输入输出, 作为下一步影响评价的依据。输入的资源主要是原料甲烷、氧气、氢气、除盐水, 输入的能源主要是各类耗能工质, 包括各类水、电、气、风。输出的资源主要是乙烯等产品。

### 2.1 原料甲烷获取阶段碳足迹数据

根据《中国产品全生命周期温室气体排放系统库》2024 年数据, 涵盖天然气气体开发、气体加工、压缩步骤的甲烷产品“从摇篮到大门”的碳足迹<sup>[15]</sup> 为  $0.608 \text{ kg/m}^3$ , 即  $851.2 \text{ kg/t}$ 。

### 2.2 原料氧气获取阶段碳足迹数据

根据某空分装置的环境评价报告书, 该空分装置的物料平衡见表 1 所示; 能量消耗及二氧化碳排

放当量计算情况见表2所示,其中各种耗能工质的排放因子采用T/CSPCI 70011—2024中的推荐值。

表1 某空分装置物料平衡 t/h

输入物料			输出物料		
项目	物料名称	流率	项目	物料名称	流率
原料1	空气	121.56	产品1	液氧	4.29
			产品2	液氮	2.46
			产品3	氮气	51.26
			产品4	中低压氧气	59.43
			产品5	液氮	4.12
合计		121.56			121.56

表2 某空分装置能耗及二氧化碳排放当量

序号	耗能工质	消耗量/ (kWh·h <sup>-1</sup> )或 (t·h <sup>-1</sup> )	排放因子 <sup>[11]</sup> / (kg·kWh <sup>-1</sup> )或 (kg·t <sup>-1</sup> )	二氧化碳 排放量/ (kg·h <sup>-1</sup> )
1	电	7555.0	0.5366	4054.01
2	3.5 MPa 级蒸气	107.6	0.4052	43.60
3	1.0 MPa 级蒸气	3.0	0.3500	1.05
4	新鲜水	134.0	0.5280	70.75
5	循环水	8891.0	0.7030	6250.37
6	仪表空气	0.6	0.1330	0.08
合计				10419.87

按照式(1)计算氧气生产的二氧化碳排放当量:

$$CFP_{\text{氧气}} = \sum_i AD_i \times EF_i / G_{\text{空分,总}} \quad (1)$$

式中, $CFP_{\text{氧气}}$ 为氧气生产的二氧化碳排放当量,kg/t; $AD_i$ 为空分装置不同耗能工质的消耗量; $EF_i$ 为不同耗能工质排放因子; $G_{\text{空分,总}}$ 为总产品的质量。经计算 $CFP_{\text{氧气}}$ 为85.71 kg/t。

### 2.3 原料氢气获取阶段碳足迹数据

在石化行业中有多种不同的制备氢气工艺,包括天然气制氢、煤制氢、苯乙烯制氢、电解水制氢等8种,根据调研的结果,不同制氢过程的碳足迹如表3所示<sup>[16]</sup>。由于OCM工艺的原料之一为天然气,因此首选氢气来源工艺是天然气制氢,即 $CFP_{\text{氢气}}$ 为10 063 kgCO<sub>2</sub>/t。

表3 不同制氢工艺的碳足迹分析 t/t

制氢工艺	碳足迹	制氢工艺	碳足迹
天然气制氢	10.063	乙苯脱氢	1.634
煤制氢	24.328	丙烷脱氢	1.253
氯碱副产氢	1.775	(光伏)电解水制氢 <sup>[15]</sup>	1.970
重整副产氢	0.230	(电网)电解水制氢 <sup>[15]</sup>	6.460
乙烯副产氢	0.674		

### 2.4 原料除盐水获取阶段碳足迹数据

根据调研数据的结果<sup>[17]</sup>,使用自来水制备除盐水时,每制备1 t除盐水,需要消耗6.92 t水和4.67 kWh电能,因此制备除盐水的二氧化碳排放因子 $CFP_{\text{除盐水}}$ 为2.51 kg/t。

### 2.5 原料运输阶段碳足迹数据

按照新建装置考虑,原料生产装置举例OCM工艺装置使用短距离密闭管输系统考虑,不产生碳排放。

### 2.6 OCM工艺碳足迹数据

使用Symmetry作为流程模拟工具,计算1 t/h乙烯产品的OCM深冷分离工艺流程。分离流程计算得到的物料平衡如表4所示,计算得到的能量消耗如表5所示。

表4 OCM工艺物料平衡表 t/h

输入物料			输出物料		
项目	物料名称	流率	项目	物料名称	流率
原料1	甲烷	2.48	产品1	乙烯气	1.00
原料2	氧气	6.13	产品2	碳二以上气体	0.36
原料3	氢气	0.22	产品3	废甲烷气	0.07
原料4	除盐水	0.81	废料1	汽提后含油污水	5.66
			废料2	汽提废气	0.01
			废料3	二氧化碳气	2.53
合计		9.64			9.64

表5 OCM工艺能量消耗表

项目	消耗量
电/(kWh·h <sup>-1</sup> )	4817.39
燃料/kW	11616.72
10 MPa 级蒸气/(t·h <sup>-1</sup> )	-9.10 <sup>注</sup>
0.3 MPa 级蒸气/(t·h <sup>-1</sup> )	5.33
循环水/(t·h <sup>-1</sup> )	2036.70
压缩空气/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	300.96
氮气/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	136.80

注:OCM反应和甲烷化反应都是强放热反应,为了降低装置能耗,使用反应器放热量副产高压蒸气。

当不考虑OCM反应中产生的二氧化碳的回收利用时,OCM工艺制备乙烯的二氧化碳总排放当量 $E_{\text{CHG}}$ 按照式(2)计算。若将OCM反应产生的二氧化碳进行回收利用时, $E_{\text{CHG}}$ 采用式(3)计算。

$$E_{\text{CHG}} = E_{\text{原料}} + E_{\text{燃烧}} + E_{\text{过程}} + E_{\text{烧焦}} + E_{\text{净电}} + E_{\text{蒸气}} + E_{\text{水}} + E_{\text{其他}} \quad (2)$$

$$E_{\text{CHG}} = E_{\text{原料}} + E_{\text{燃烧}} + E_{\text{过程}} + E_{\text{烧焦}} + E_{\text{净电}} +$$

$$E_{\text{蒸气}} + E_{\text{水}} + E_{\text{其他}} - E_{\text{回收}} \quad (3)$$

式中,各参数单位均为 kg/h,其中, $E_{\text{CHG}}$  为乙烯生产阶段的碳排放总量; $E_{\text{原料}}$  为原材料获取的排放; $E_{\text{燃烧}}$  为燃料燃烧的排放; $E_{\text{过程}}$  为生产阶段的排放; $E_{\text{烧焦}}$  为炉管的烧焦排放; $E_{\text{净电}}$  为消耗净电产生的排放; $E_{\text{蒸气}}$  为消耗蒸气产生的排放; $E_{\text{水}}$  为消耗水产生的排放; $E_{\text{其他}}$  为消耗其他气体(压缩空气、氮气等)产生的排放; $E_{\text{回收}}$  为二氧化碳回收的碳减排量。

OCM 工艺制备乙烯的碳足迹  $CFP_{\text{乙烯}}$  按照式

(4) 计算。

$$CFP_{\text{乙烯}} = E_{\text{CHG}}/G_{\text{OCM,总}} \quad (4)$$

式中, $CFP_{\text{乙烯}}$ , kg/t; $G_{\text{OCM,总}}$  为 OCM 工艺产品的总质量,即表 2 中产品 1、产品 2、产品 3 的质量之和, kg/h。

### 3 碳足迹核算

根据各阶段的核算数据可以得到 OCM 工艺制备乙烯的碳足迹评价生命周期清单,如表 6 所示。

表 6 碳足迹评价生命周期清单

生产阶段	序号	物料名称	流率/(t·h <sup>-1</sup> )	碳足迹/(kg·t <sup>-1</sup> )	碳排放/(kg·h <sup>-1</sup> )
原材料获取	1	甲烷	2.48	851.20	2114.39
	2	氧气	6.13	85.72	525.23
	3	除盐水	0.81	2.51	2.02
	4	氢气	0.22	10063.00	2247.41
单项合计					4889.06
燃料燃烧	序号	物料名称	流率/(t·h <sup>-1</sup> )	燃料含碳量/%	碳排放/(kgCO <sub>2</sub> /h)
	1	天然气	0.01 <sup>注</sup>	64	18.88
消耗蒸气	序号	物料名称	流率/(t·h <sup>-1</sup> )	蒸气热焓/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	碳排放/(kg·h <sup>-1</sup> )
	1	0.3 MPa 蒸气	5.33	2725.5	1548.62
	2	10 MPa 蒸气	-9.10	2724.4	-2642.46
单项合计					-1093.83
消耗净电	序号	工质名称	耗量/kWh	排放因子/(kg·t <sup>-1</sup> ) <sup>[18]</sup>	碳排放/(kg·h <sup>-1</sup> )
	1	电力	4817.39	0.5366	2585.01
消耗水	序号	物料名称	流率/(t·h <sup>-1</sup> )	排放因子/(kg·t <sup>-1</sup> )	碳排放/(kgCO <sub>2</sub> /h)
	1	循环水	2036.70	0.703	1431.80
消耗气体	序号	物料名称	流率/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	排放因子/(kg·m <sup>-3</sup> )	碳排放/(kg·h <sup>-1</sup> )
	1	压缩空气	300.96	0.133	40.03
	2	氮气	136.80	0.529	72.37
单项合计					112.39

注:燃料燃烧仅用于反应器预热,按照每 90 d 运行 1 d 折算。

根据式(2)计算得到 OCM 工艺制备乙烯的二氧化碳总排放当量  $E_{\text{CHG}}$  为 7 943.31 kg/h,按照式(4)计算的 OCM 工艺制备乙烯的碳足迹  $CFP_{\text{乙烯}}$  为 5 526 kg/t,即 5.53 t/t。根据表 4 可以看出,OCM 工艺中的反应器为强放热反应,当回收利用这一部分热量并制备 10 MPa 蒸气后,可以实现碳减排 1 093.8 kg/h。在其余生产阶段的碳排放贡献中,原材料获取阶段引入的碳排放足迹占比最高,占总碳排放的 54.1%,其中又以甲烷的获取和氢气的获取引入的碳排放最高。主要原因有 2 点,一是甲烷的获取需要经历地下开采、脱碳精制、分离等环节,过程中涉及大量的水、电、蒸气等耗能工质的使

用;二是不同氢气来源的工艺碳足迹相差较大,石化行业获取的灰氢碳足迹要显著高于绿氢的碳足迹,使用绿氢代替灰氢也是降低工艺碳足迹的首选措施。

### 4 减排措施与效果

当前的碳减排技术主要集中在提升能源效率和采用负碳技术<sup>[19]</sup>,根据图 1 的系统边界图,OCM 工艺制备乙烯的负碳技术主要有电解水制原料氢气减碳技术和碳回收利用技术。

#### 4.1 电解水制原料氢气减碳

在 OCM 工艺中,由于制备原料氢气带入的碳足

迹占比最高,从表1可以看出,当使用电解水尤其是光伏电解水制氢技术,引入的碳足迹最低。光伏电解水制氢工艺一般由光伏板阵列、光伏汇流箱、模块化DC/DC变换器、直流制氢电源、制氢电解槽、气体分离系统、控制系统等组成。

#### 4.2 碳回收利用技术

OCM反应会形成二氧化碳产物,在低碳烷烃的分离流程中,可以在原料气第三段压缩机后使用醇胺吸收法分离二氧化碳,按照表2计算,本工艺中使用醇胺吸收法可以得到2.53 t/h的二氧化碳气体,合计1471.85 m<sup>3</sup>/h,将这部分二氧化碳进行分离再利用,可以大大减少二氧化碳的直接排放,降低本工艺的碳足迹水平。

#### 4.3 碳减排效果

使用光伏电解水制氢技术可以将氢气碳足迹从10.086 t/t降低到1.97 t/t。当采用碳回收再利用技术时,按照产物2.53 t/h、二氧化碳摩尔分数68.2%计算,回收二氧化碳并作其他用途可以降低碳足迹1.98 t/h。同时采用上述2种碳减排技术,可以进一步增加碳减排效益。如表7所示,当使用光伏电解水制氢获取原料氢气后,会将总碳排放从7943.31 kg/h降低到6135.86 kg/h,OCM工艺制备乙烯的碳足迹 $CFP_{\text{乙烯}}$ 从5.53 t/t下降到4.27 t/t;当进一步回收利用OCM反应中产生的二氧化碳时,总碳排放则进一步降低到4158.38 kg/h,此时OCM工艺制备乙烯的碳足迹 $CFP_{\text{乙烯}}$ 下降到2.89 t/t,相比于不使用减排技术,碳足迹下降47.6%。

表7 碳减排措施及效果

减排措施项目	$E_{\text{原料}}/$ (kg·h <sup>-1</sup> )	$E_{\text{CHC}}/$ (kg·h <sup>-1</sup> )	$CFP_{\text{乙烯}}/$ (t·t <sup>-1</sup> )
未减碳	4889.05	7943.31	5.53
光伏电解水制氢	3081.61	6135.86	4.27
制氢减碳+碳回用	3081.61	4158.38	2.89

## 5 结论

(1)根据调研的数据及流程模拟软件的计算数据,基于T/CSPCI 70011—2024开展乙烯产品的碳足迹核算,经过计算得到OCM工艺制备乙烯产品的碳足迹为5.53 t/t,其中原材料获取阶段引入的碳排放足迹占比最高,占总碳排放的54.1%,其中又以甲烷的获取和氢气的获取引入的碳排放最高。

(2)OCM工艺中的反应器为强放热反应,当回收利用这一部分热量并制备高压蒸气后,可以实现

碳减排1093.8 kg/h,占总碳排放的13.8%。

(3)同时使用光伏电解水制氢获取原料氢气及对OCM反应产生的二氧化碳进行回收再利用,可以大大降低乙烯产品的碳足迹,与不采用减碳技术相比较,共降低碳足迹47.6%。

#### 参考文献

- [1] 本刊.为力争二氧化碳排放于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和而奋斗[J].中国能源,2020,42(10):1.
- [2] 韩燕,周媛丽,王十慧.工业主导型城市碳排放情景模拟及减排路径:以兰州市为例[J/OL].环境科学,1-17.[2026-03-18].<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202506302>.
- [3] 赵翔宇,徐东宇,陈政宇,等.甲醇制烯烃反应-再生过程分子级模型构建及优化[J].化工进展,2025,44(8):4785-4794.
- [4] 罗靖.中国应在炼厂“减油增化”转型中走在前列[J].中国石化,2025,(8):48-51.
- [5] 肖仕辉,王丽,易广坤,等.乙烯工业发展现状及分析[J].生物化工,2023,9(3):190-197.
- [6] Keller G,Bhasin M.Synthesis of ethylene via oxidative coupling of methane: I.Determination of active catalysts[J].Journal of Catalysis,1982,73(1):9-19.
- [7] 丁晨哲,武洁花,李蔚,等.甲烷氧化偶联床层控温与撤热的研究进展[J].石油化工,2025,54(5):686-693.
- [8] BSI,CarbonTrust,Defra.PAS 2050—2011:商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范[S].英国:英国标准协会,2011.
- [9] ISO 14067—2018.Greenhouse gases carbon footprint of products requirements and guidelines for quantification[S].Geneva:International Organization for Standardization,2018.
- [10] 全国碳排放管理标准化技术委员会.GB/T 24067—2024.温室气体产品碳足迹 量化要求和指南[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [11] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会石油燃料和润滑剂分技术委员会.T/CSPCI 70011—2024.温室气体产品碳足迹量化方法与要求 乙烯[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [12] 罗淑娟,李东风,张明森,等.一种甲烷氧化偶联制乙烯反应气体的分离方法及装置:CN 111004079B[P].2023-07-21.
- [13] 罗淑娟,李东风,张明森,等.一种甲烷氧化偶联制乙烯反应气体的分离方法及装置:CN 111004081B[P].2023-07-21.
- [14] 罗淑娟,李东风,张明森,等.一种甲烷氧化偶联制乙烯反应气体的分离方法和装置:CN 109678636A[P].2019-04-26.
- [15] CCG 中国城市温室气体工作组.中国产品全生命周期温室气体排放系数库[EB/OL].<http://lca.cityghg.com/>.
- [16] 田涛,曹东学,黄顺贤,等.石化行业不同制氢过程碳足迹核算[J].油气与新能源,2021,33(6):39-45.
- [17] 陈可青.工业锅炉用除盐水与软化水的能耗与经济比较[J].节能技术,2017,35(2):180-182.
- [18] 林水静.我国电力平均碳排放因子逐步下降[N].中国能源报,2025-01-06(014).
- [19] 李淳,孙志辉,黄湘琦,等.煤制合成氨碳足迹核算与减排分析[J].化工环保,2024,44(4):559-564.■