

特色专题

欧盟发展电子燃料的逻辑及启示

吴金希¹, 支嘉旗²

摘要 近年来,随着能源自主和低碳转型成为全球关注的核心议题,欧盟国家,尤其是德国,提出了在交通领域发展电子燃料(E-Fuels)的战略构想。综述了 E-Fuels 的概念、物理特性及生产流程,详细分析了其生命周期的碳排放及生产成本。研究表明,E-Fuels 在欧盟能源转型中具有提升能源自主性、支持现有汽车产业、保持经济稳定以及参与碳市场交易的重要作用。然而,E-Fuels 也面临高昂的生产成本和较低的能源转换效率等挑战。通过总结欧盟当前 E-Fuels 产业的发展现状,分析了非政府企业联盟为推动该产业所采取的积极举措,同时介绍欧盟官方对 E-Fuels 的中立立场。进一步探讨了 E-Fuels 与混合动力汽车协同发展的潜在路径。最后,展望了中国在 E-Fuels 领域的未来发展机遇,提出了以创新为驱动、因地制宜发展、兼容多种技术路线的建议,以期为中国能源转型提供参考和借鉴。

关键词 低碳交通;电子燃料;欧盟产业

2023 年 3 月,政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布了第六次评估报告(AR6)综合报告《气候变化 2023》,强调了减少温室气体排放和推动低碳能源发展的紧迫性与重要性^[1]。能源作为国家安全与经济稳定的基石,不仅影响国计民生的方方面面,还关乎国家自主性和国际竞争力。在全球地缘政治环境日益复杂的背景下,各国越来越重视能源自主,以避免在关键领域陷入“卡脖子”困境。

在交通领域,德国等欧盟国家探索了一种间接电气化的新路径,即发展电子燃料(electrofuels, E-Fuels)产业,重点在于推广车用 E-Fuels。研究报告指出,随着技术进步,E-Fuels 的生产成本将逐步降低,并有望接近传统化石燃料成本,从而推动能源结构向低碳、清洁与安全转型^[2]。为实现这一目标,欧盟国家正在

加快 E-Fuels 工厂的建设,已取得初步成果,并计划通过规模化生产进一步降低成本,实现广泛应用。同时,美国和日本也在积极建设 E-Fuels 设施,然而中国在该领域的实践相对较少^[3]。

E-Fuels 究竟是什么?有哪些主要分类?这一概念经历了怎样的发展演变,目前研究和产业重点是什么?其生产过程如何,有哪些性能优势与技术挑战?欧盟各方对 E-Fuels 的态度如何?本文探讨以上问题,并在此基础上为中国的能源转型提出相关建议。

1 E-Fuels 的概念与应用特性

E-Fuels 是一种由电解水产生的氢气和捕集到的二氧化碳人工合成的碳氢化合物,能够直接替代传统内燃机燃料。其生产所需的电能既可以来源于传统化石能源,也可通过可再生电力获得;二氧化碳则可通过生物质、直接大气捕集(direct air capture, DAC)

1. 清华大学社会科学学院,北京 100084

2. 清华大学行健书院,北京 100084

收稿日期:2024-11-15;修回日期:2025-02-21

基金项目:清华·力拓能源资源可持续发展研究中心年度项目(2023-005);清华大学 SRT 研究项目(2411T0627)

作者简介:吴金希,教授,研究方向为创新政策、战略管理、产业竞争力,电子信箱:wujx02@tsinghua.edu.cn;支嘉旗(共同第一作者),研究方向为低碳能源汽车,电子信箱:zhijq21@mails.tsinghua.edu.cn

引用格式:吴金希,支嘉旗. 欧盟发展电子燃料的逻辑及启示[J]. 科技导报, 2025, 43(7): 54-66; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.11.01607

或工业废气捕集^[4]。本文重点探讨的是基于可再生电力和非生物质资源生产的 E-Fuels,这也是目前学术研究和工业项目中的主要对象。

E-Fuels 背后的核心思想,即将可再生能源转化为便于使用的形式,在 1980 年就被提出。例如, Lewis^[5]在当时的研究中认为,利用核电生产廉价氢气,再将氢气与化石能源结合制成液体燃料,具有一定的经济可行性。1996 年, Ellers^[6]提出 E-Fuel 一词,然而当时并未指代一种具体的燃料,而是将电能比作驱动车辆的能量来源进行探讨。直到 2010 年前后, E-Fuels 才逐渐演变为指代通过氢气和二氧化碳合成的燃料,并逐步被视为交通领域实现低碳化的潜在解决方案^[7]。

目前, E-Fuels 的生产途径多样,反应条件也各有不同,最终产物包括电子汽油(E-Gasoline)、电子柴油(E-Diesel)、电子煤油(E-Kerosene)、电子甲醇(E-Methanol)及电子燃气(E-Gas)等^[8]。其中, E-Gasoline 和 E-Diesel 是传统车用汽油与柴油的直接替代品,也是 E-Fuels 产业发展的重点,同时也最具争议; E-Kerosene 作为航空煤油的替代品,已逐渐应用于航空领域^[9]。相比之下, E-Methanol 和 E-Gas 不便直接应用于地面或航空交通工具,更多作为生产前述燃料的中间产品出现。本文的讨论主要集中在车用 E-Gasoline 和 E-Diesel,除非特别说明,提到的 E-Fuels 均指这 2 种燃料。作为车用发动机燃料, E-Fuels 具有以下优势。

1.1 燃烧性能较好

传统的汽油、柴油等燃料主要从天然石油中提炼而来,含有较多的杂质,且燃烧性能相对一般。而 E-Fuels 作为一种人工合成燃料,不含杂质,燃烧性能更为优越。具体而言,首先,传统炼油工艺难以彻底去除汽油中的硫杂质^[10],导致燃烧时会生成二氧化硫,增加酸雨发生的风险。而 E-Fuels 通过氢气和二氧化碳直接合成,其产物中不含硫,因此不会产生类似污染;其次,在燃料性能方面,汽油的抗爆性能和柴油的点火性能尤为重要,分别通过辛烷值和十六烷值进行评估。人工合成的 E-Gasoline 辛烷值可达 93^[11], E-Diesel 的十六烷值则高达 60^[12],均优于大多数传统燃料,展现出优良的燃烧特性。

1.2 应用技术与供应链体系成熟

目前,日本、韩国等热衷于发展氢能源。将氢气

作为汽车燃料的思路有 2 种:一是通过燃料电池电化学反应,将氢气中的化学能转化为电能,驱动车辆运行,丰田、现代等企业已推出了氢燃料电池车。这种技术路线对氢气纯度与工作环境的要求很高,对外界环境的适应能力较差,安全性一般,并且需要对燃料电池设备的设计、生产进行高昂的额外投资;二是通过发动机燃烧,将氢气中的化学能直接转化为机械能,驱动车辆运行。目前因为这种途径技术不成熟,此类车型尚未实现大规模市场推广^[13]。

E-Fuels 燃料可以沿用原有燃油发动机,因此避免了上述问题,整个产业可以沿用原有的燃料运输体系,无需像氢气、氨等新型能源一样大规模重新投资构建供应链体系,极大减少了能源体系颠覆性变化带来的高成本。

1.3 能量密度高,高速动力性强

E-Fuels 具有电力难以取代的 2 大应用优势。

1) 能量密度高,这意味着储能设备可以做得体积更小,重量更轻,在有限的整车体量下优化汽车的动力性和结构安排。从具体数据来看,目前动力电池的能量密度大多为 200~300 W·h·kg⁻¹^[14],根据《中国制造 2025》重点领域技术路线图,这一指标的近期发展目标是 500 W·h·kg⁻¹^[15]。而 E-Fuels 作为一种液体燃料,其能量密度很高,例如 E-Diesel 的能量密度可达 12000 W·h·kg⁻¹^[16]。从应用终端的角度,即使燃油车的有效效率只有电动汽车的 1/3,折算后的能量密度仍比其高出 1 个数量级(图 1^[14-15])。

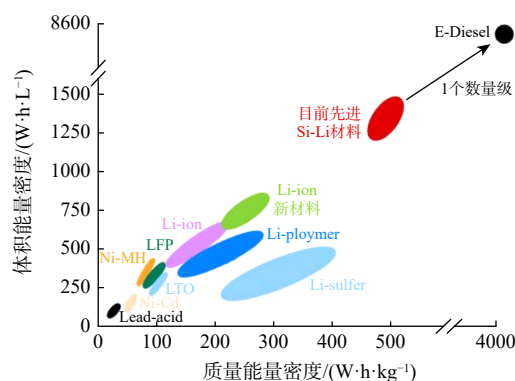


图 1 E-Fuels 与动力电池能量密度的坐标对比
(考虑终端有效效率)

其根本原因是 E-Fuels 既是能量本体,又是其物质载体,但电能需要额外的动力电池系统作为能量的

物质载体,所用的承载材料,目前多以固、液等形式存在,体积更大、重量更重。另外,由于电解质往往为稀有金属材料,其成本也比较昂贵。

2) 高速动力性更强,这是由发动机与电机的工作特性决定的。

从图 2^[17]可以发现,电机工作的主要领域分为低速恒转矩区与高速恒功率区。前者情况下电机输出最高转矩,功率与转速成正比,表现为低速动力性强,是电机的优势领域;但后者情况下电机输出最大功率,转矩与转速成反比,在超高速下输出转矩较小,表现为高速动力性弱,是电机的弱势领域。相比之下,发动机的转矩变化较小,始终保持较高水平,并且随转速增加而提升功率,即使在超高速情况下仍能输出较大转矩,对于快速路段与高负荷驾驶至关重要,是纯电动汽车所难以实现的。这是 E-Fuels 发动机的潜在优势所在。

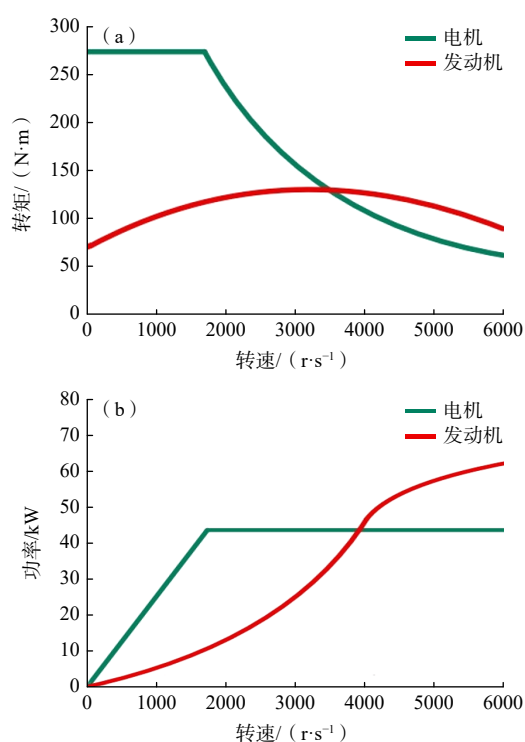


图 2 典型发动机与电机的转矩(a)与功率(b)特性

2 E-Fuels 的供应链特性

完善的供应链对于新兴能源的推广非常重要。目前, E-Fuels 在供应链方面的优势如下。

1) E-Fuels 可以完全适用现有成熟的汽油运输体

系。这一点与氨、氢、甲醇类的运输相比有很大的优势。从成本上说,对于长距离运输情景(>5000 km)而言, E-Fuels 的运输成本可低至 $0.07 \text{ 元} \cdot \text{L}^{-1}$ (约 $0.014 \text{ 美元} \cdot \text{L}^{-1}$)^[18],而氢气的运输成本较高,可取 $4 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为参考^[19]。考虑到 E-Fuels 的质量能量密度约为氢气的 $1/3$,发动机系统的整体效率约为燃料电池系统的 $2/3$,则车辆从氢气获得单位能量时,所需分担的运输成本可达 E-Fuels 的近 60 倍。

2) 相比于使用电网直接输送电能,利用 E-Fuels 这样的液体燃料作为能量载体有更好的场景适应性,这是因为电网在人口稀疏地区与欠发达地区的铺设成本较高,且作为战略基础设施也较为敏感。

此外, E-Fuels 的生产系统与传统的煤制油、煤制气系统有很大的共通性,必要时可以将储备的化石能源投入到合成燃料的生产中,提高特定情境下的供应能力。

3 E-Fuels 的生产特性:工艺流程、排放与成本计算

3.1 E-Fuels 的基本生产流程

一般来说, E-Fuels 的生产与使用流程如图 3 所示。在 E-Fuels 的生产流程中,主要有以下 4 个关键环节,其具体的实现方法也各有差异。

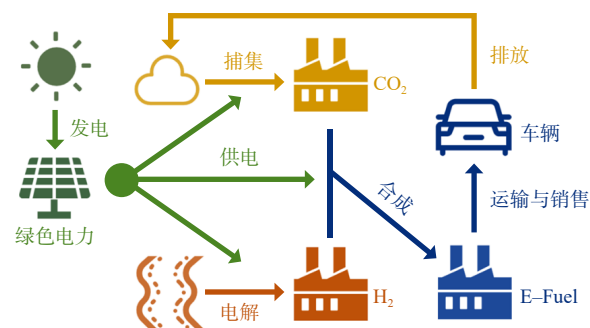


图 3 E-Fuels 的生产与使用流程示意

3.1.1 可再生能源发电环节

即通过风能、水能、光能等可再生能源进行发电。三者的共同点:一是在于受气候条件的影响较大,稳定性有限;二是发电过程本身所产生的碳排放与成本几乎为 0,占比很小,一般可以忽略^[20-21];三是建设与运维阶段产生的碳排放与成本不可忽略。

3.1.2 电解水制氢环节

目前较为成熟的主要有碱性溶液电解(alkaline water electrolysis, AWE)与质子交换膜电解(proton exchange membrane water electrolysis, PEMWE)2种途径。

1) AWE 指的是以碱性物质(如氢氧化钾等)作电解质,对溶液电解制氢的过程,是目前最为成熟与商用化的路线,适合大规模与长期制氢,但同时也存在维护复杂、对电力稳定性要求较高等缺点^[22],其中后者制约了对可再生电力的应用。

2) PEMWE 制氢指的是以质子交换膜及其上的催化剂等为核心部件,在固体环境下对纯净水进行电解的过程,反应过程可以视为是质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)的逆反应过程。相对来说,PEMWE 对环境要求比较严苛,技术成熟度较低且总成本较高,但对应过程启动较快、稳定可靠,最重要的是可以接受有一定波动的电力^[7],故比较适应可再生电力,是未来发展的重点。

此外,近年来还有一种新兴的固体氧化物电解(solid oxide electrolysis, SOE)技术,它指的是以高温(数百摄氏度)固体氧化物(如氧化锆等)作电解质,对水蒸气电解制氢的过程。这种技术可以有效利用较高温度下各种来源的热量(包括成本较低的核能、废热等),减少了对于电能(如成本较高的可再生电能)的需求,因此有很大的经济潜力。虽然目前这项技术由于电极不稳定,存在安全隐患,并未得到广泛应用,但或许也是未来的发展点之一^[23-24]。

3.1.3 二氧化碳捕集与封存环节

E-Fuels 最主要的价值在于利用二氧化碳作为生产原料,可以通过碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)及 DAC 2 种技术实现。

1) CCUS 是从二氧化碳浓度较高的气体(如工业废气等)中捕集二氧化碳,实现二氧化碳固定与浓缩,便于后期利用与储藏的技术。

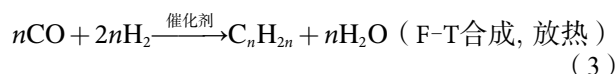
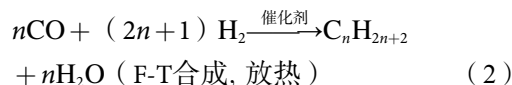
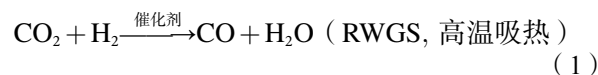
2) DAC 是从二氧化碳浓度较低的大气中直接捕集二氧化碳,实现二氧化碳固定与浓缩,便于后期利用的技术。目前 DAC 发展路线多样,有溶液吸收、固体吸附、胺类吸附等,但基本的原理类似,均是先使用负压设备与吸附材料对空气中的二氧化碳进行捕集与吸收,再通过特定的物理化学反应进行二氧化碳的

富集与吸附材料的再生^[25-26]。相对来说,DAC 技术成熟性较低、成本与能耗水平较高,但适用场景更广泛,尤其是能够直接从大气中实现减碳,因此获得了不少关注,并应用在国外许多合成燃料的生产之中。

3.1.4 碳氢结合生成 E-Fuels 工艺路线

目前有多种从二氧化碳与氢气到碳氢混合物(如汽油、柴油)的化工合成路径,下面列举 2 种进行介绍。

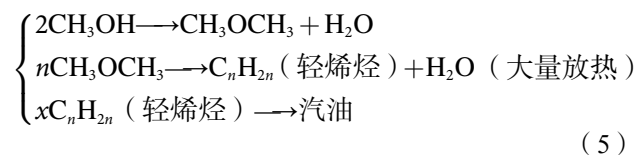
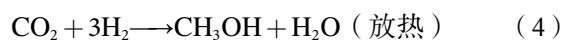
1) 通过逆水煤气反应(reverse water-gas shift reaction, RWGS)与费托合成(Fischer-Tropsch process, F-T)的 2 步组合反应。通过控制反应条件,可以得到合适碳氢比例与分子量的产物,反应方程式为:



式中, n 表示烃类产物分子中的碳原子数,该值越高,该烃越“重”。

通过该路径得到的有机化合物,汽油馏分品质不佳,辛烷值不到 70,但柴油馏分较为理想,十六烷值较高且杂质较少,故此路径多用于生产 E-Diesel 等。目前,这条转化路径广泛应用在许多合成燃料产业项目中,如神华宁煤 4000000 t·a⁻¹ 煤炭间接液化示范项目等^[27]。

2) 通过二氧化碳加氢制甲醇与甲醇制汽油(methanol-to-gasoline, MTG)反应的 2 步组合反应。与前者同理,通过控制反应条件,可以得到合适碳氢比例与分子量的产物,反应方程式为:



式中, x 表示目标产物分子中的碳原子数,该值越高,燃料越“重”。

通过该路径得到的有机化合物主要由 C₅~C₁₂ 的烃类物质组成,是杂质含量低、辛烷值大于等于 93 的优质汽油组分,既可直接作为车用汽油,也可通过调和变为优质汽油^[27],故此路径多用于生产 E-Gasoline。

目前,这条转化路径已经应用在一些国外 E-Fuels 项目,如位于智利 Haru Oni 地区的 HIF Global 公司 E-Fuels 先锋项目^[28]。

总的来说,目前与未来生产 E-Fuels 的方法与路径很多,不过,在具体环节上,使用 PEMWE 法电解制氢、使用 DAC 法捕集固定二氧化碳,以及使用 RWGS+F-T 合成生产 E-Diesel,或使用 MTG 生产 E-Gasoline 更符合未来的趋势。

3.2 E-Fuels 的碳排放估计

目前对于工业产品进行碳排放评估的方法主要有 2 种,一种是“自下而上”的生命周期分析(life cycle analysis, LCA)法,主要用于评估特定的微观产品在全

生命周期过程中的碳排放;另一种是“自上而下”的投入产出(input-output, IO)法,主要用于评估特定的宏观尺度上的系统碳排放^[29]。

下面以 Haru Oni 地区的 HIF Global 公司 E-Fuels 先锋项目为例,自下而上进行分析,以下是对应的 E-Fuels (实际是 E-Gasoline)生产流程(图 4)与研究边界(图 5)。

计算结果通过碳流图(图 6)表示。

3.2.1 各环节所用设备及参数

各环节所用到的参数与数据解释如下。

- 1) 风力发电设备:厂商为 Siemens,规模单台 3.4 MW,类型为陆上型^[30]。
- 2) 电解制氢设备:厂商为 Siemens,型号 Silyzer

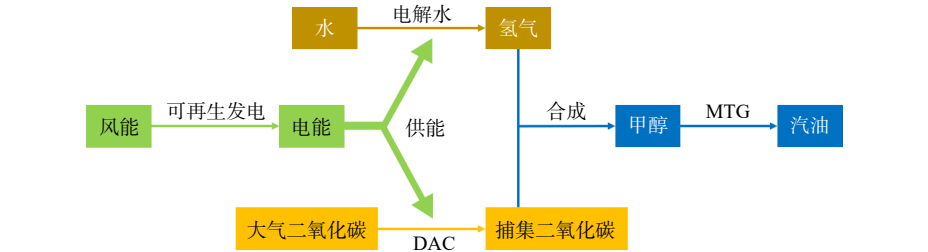
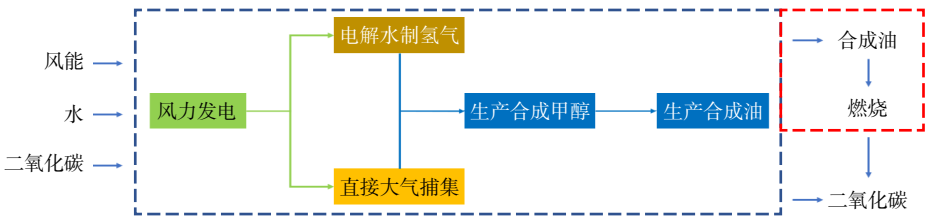
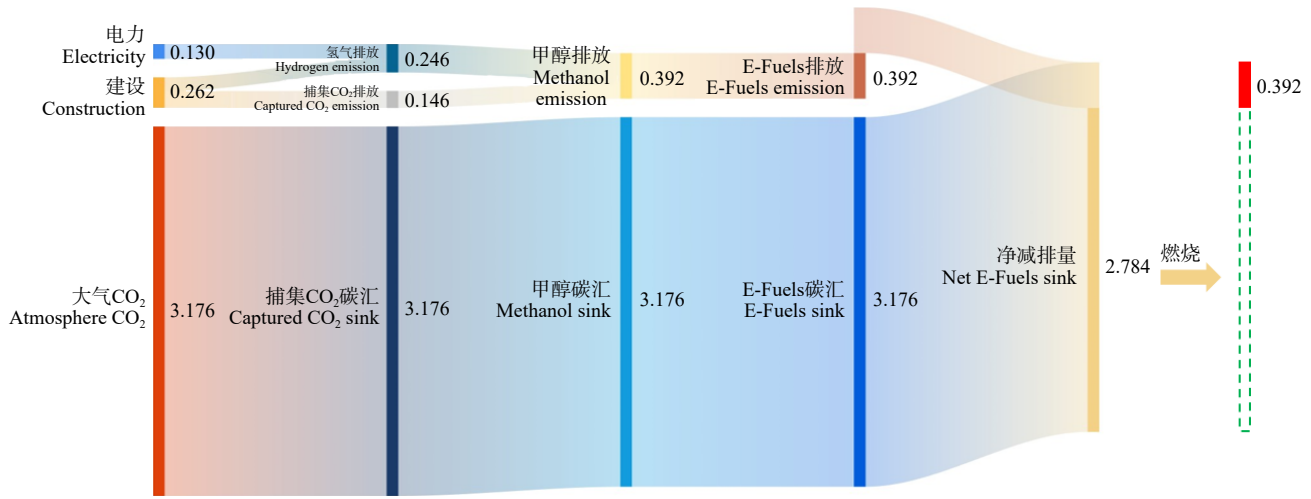


图 4 HIF Global 公司 E-Fuels 生产流程



蓝色框内是生产环节,红色框内是使用环节,二者相加为总环节

图 5 HIF Global 公司 E-Fuels 生产技术全流程碳足迹评价系统边界



上部分表示总排放,下部分表示总吸收

图 6 1 kg E-Fuels 的整体碳流图(单位: kgCO₂)

300, 规模 1.2 MW, 类型为 PEMWE^[31-32]。

3) 碳捕集设备: 厂商为 Global Thermostat, 规模 1~2 kt·a⁻¹^[31], 使用低温、固体胺类吸附剂, 类型为 DAC^[33-34]。

4) 制甲醇设备: 厂商为 MAN Energy Solutions^[35], 甲醇选择性(指最终产物中甲醇的占比)90%(综合^[36-37]中的参考值选取)。

5) MTG 设备: 厂商为 ExxonMobil^[38], 甲醇转化率 100%, 汽油收率(指单位甲醇能够产出的汽油量)34.7%, 出产汽油辛烷值为 93^[39-40]。

3.2.2 各环节参量及计算公式

首先, 对各环节的单位中间产物进行碳排放计算。

1) 风力发电设备: 设备排放参考[41-42]中的案例数据(3.0 MW 设备 4.97 g·(kW·h)⁻¹, 3.2 MW 设备 5.0 g·(kW·h)⁻¹, 2.3 MW 设备 6.0 g·(kW·h)⁻¹)。对 3.4 MW 设备, 取 5.0 g·(kW·h)⁻¹。

2) 电解制氢设备: 电力排放参考[43]中的报告数据(17.5 MW 设备产氢 335 kg·h⁻¹), 设备排放参考[44]中的案例数据(1 MW 设备 0.2 kgCO₂·kg⁻¹)。对 1.2 MW 设备, 合计 0.5 kgCO₂·kg⁻¹。

$$\begin{aligned} CF_{\text{氢气}} &= CF_{\text{电解电力}} + CF_{\text{电解设备}} \\ &= \frac{17.5 \times 1000}{335} \times 0.005 + 1.2 \times 0.2 \\ &= 0.5 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, CF 表示对应部分的碳排放水平, 下同。

3) 碳捕集设备: 忽略热力排放, 电力排放参考^[45]中的案例数据(用能水平 0.2~0.3 kW·h·kg⁻¹, 取下限), 吸附剂与厂房(称设备)排放参考[46]中的案例数据(前者 0.010~0.046 kgCO₂·kg⁻¹, 取平均; 后者 ≤0.015 kgCO₂·kg⁻¹, 取上限 80%)。对本设备, 等效合计 0.041 kgCO₂·kg⁻¹。

$$\begin{aligned} CF_{\text{二氧化碳}} &= CF_{\text{捕集电力}} + CF_{\text{捕集设备}} \\ &= 0.2 \times 0.005 + \frac{0.010 + 0.046}{2} \\ &\quad + 0.015 \times 80\% = 0.041 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

4) 制甲醇设备: 忽略热力与电力排放^[47], 根据甲醇选择性与化学方程式配平, 生产 1 kg 甲醇需 0.213 kg 氢气与 1.53 kg 二氧化碳(认为产生的其他中间物作为废料燃烧供热供能, 考虑产率、选择性对排放的影响)。对本设备, 等效合计 0.17 kgCO₂·kg⁻¹。

$$\begin{aligned} CF_{\text{甲醇}} &= 0.213 \times CF_{\text{氢气}} + 1.53 \times CF_{\text{二氧化碳}} \\ &= 0.213 \times 0.5 + 1.53 \times 0.041 \\ &= 0.17 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

5) MTG 设备: 忽略热力与电力排放^[46], 根据汽油碳氢比(指碳氢原子数量比, 取 1.85^[48])与化学方程式配平, 生产 1 kg E-Gasoline 需 2.31 kg 甲醇(认为产生的其他产物作为副产品销售与使用, 不考虑产率、选择性对排放的影响)。对本设备, 等效合计 0.39 kgCO₂·kg⁻¹。

$$\begin{aligned} CF_{\text{E-Gasoline}} &= 2.31 \times CF_{\text{甲醇}} \\ &= 2.31 \times 0.17 = 0.39 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

根据各环节物质比例, 可以求出总排放情况的来源情况, 如图 6 所示。

通过使用 HIF Global 公司的 E-Fuels 方案, 生命周期净排放水平仅为 0.39 kgCO₂·kg⁻¹, 而普通炼制汽油的生命周期排放水平约为 95g CO₂·MJ⁻¹^[49], 即 4.37 kgCO₂·kg⁻¹。所以, 该 E-Fuels 的相对减排率超过 90%, 有不错的低碳潜力与竞争力。

从碳流图中可以看出, E-Fuels 的总排放主要来源于所用氢气, 其次是所用二氧化碳。具体而言, 总排放分别来自电解制氢设备的建设、二氧化碳捕集设备的建设以及电解过程所需电力的排放, 这 3 部分的占比基本相同。因此, 未来在这 3 方面的减排将对降低 E-Fuels 的总体排放水平至关重要。

3.3 E-Fuels 的成本计算

目前对于工业产品进行成本评估已有成熟方法体系与不少先例, 例如, 陈子瞻等^[50]、郭一凡等^[51]与 Grahn 等^[52]已对一些煤制油与氢基燃料项目进行了成本分析与计算。本文结合上述多种分析方式, 借鉴 LCA 法的实现思想, 对 HIF Global 公司的 E-Fuels 项目进行了“自下而上”的成本分析。计算结果通过成本流图(图 7)表示。各环节所用到的参数与数据解释如下。

首先, 对各环节的单位中间产物进行成本计算。

1) 风力发电设备: 设备寿命参考[43]中的报告数据(8.0 MW 设备 25 a), 容量系数(指有效发电时间所占的比例)参考[43,53]中的参考数据(8.0 MW 设备 48.5%, 一般陆上设备 30%~40%, 取 45%), 建设与运维成本参考[53]中的参考数据(前者 1300 美元·kW⁻¹, 后者 0.01~0.02 美元·(kW·h)⁻¹, 取平均)。对 3.4 MW

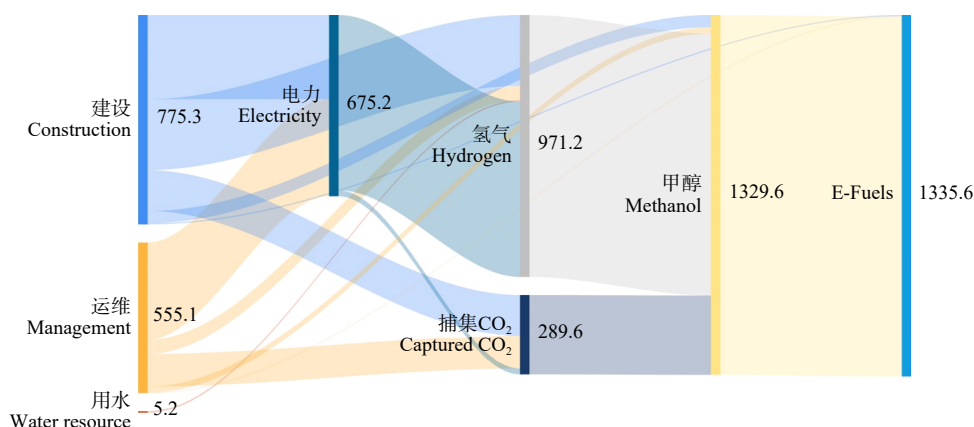


图7 1 t E-Fuels 的整体成本流(单位: 美元)

设备, 合计 $0.028 \text{ 美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

$$C_{\text{电}} = C_{\text{发电建设}} + C_{\text{发电运维}} = \frac{1300}{25 \times 8760 \times 45\%} + \frac{0.01 + 0.02}{2} = 0.028 \text{ 美元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1} \quad (10)$$

式中, C 指对应部分的成本水平, 下同。

2) 电解制氢设备: 设备寿命参考[32]中的报告数据(模组约 10 a), 设备总产量参考[54]中的报告数据(17.5 MW 设备产氢 $335 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$), 电力与水源成本参考[21]中的报告数据(电解效率 75%, 另有氢气能量密度 $33.3 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, 用水 $10 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 另取水费 $0.001 \text{ 美元} \cdot \text{L}^{-1}$), 建设与运维成本参考[55-56]中的参考数据(前者 $840 \text{ 美元} \cdot \text{kW}^{-1}$, 后者每年取初始建设成本的 2%)。对 1.2 MW 设备, 合计 $1.845 \text{ 美元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

$$C_{\text{氢气}} = C_{\text{电解用电}} + C_{\text{电解用水}} + C_{\text{电解建设}} + C_{\text{电解运维}} = \frac{33.3 \times 0.028}{75\%} + 10 \times 0.001 + \frac{840 \times 1200}{10 \times 8760 \times 23} \times (1 + 10 \times 2\%) = 1.845 \text{ 美元} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (11)$$

3) 碳捕集设备: 设备寿命参考[57]中的参考数据(模组约 20 a), 忽略热力成本, 电力成本参考[56]中的案例数据(用能水平 $0.2 \sim 0.3 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$, 取下限), 建设与运维成本参考[57]中的参考数据(前者共折合 $730 \text{ 欧元} \cdot \text{t}^{-1}$, 后者每年取初始建设成本的 4%), 统一折合为美元(汇率取 1 欧元=1.08 美元)。对本设备, 合计 $76.6 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

$$C_{\text{二氧化碳}} = C_{\text{捕集用电}} + C_{\text{捕集建设}} + C_{\text{捕集运维}} = 0.2 \times 1000 \times 0.028 + \frac{730}{20} \times 1.08 \times (1 + 20 \times 4\%) = 76.6 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (12)$$

4) 制甲醇设备: 设备寿命参考[58]中的报告数据

(模组约 10 a), 忽略热力与电力成本, 建设成本参考[59]中的案例数据(对于 $65 \text{ kt} \cdot \text{a}^{-1}$ 的项目, 共 11000000 欧元), 运维成本参考[58]中的参考数据(每年取初始建设成本的 5%), 统一折合为美元(汇率同前), 根据甲醇选择性与化学方程式配平, 生产 1 t 甲醇需 0.213 t 氢气与 1.53 t 二氧化碳(认为产生的其他中间物作为废料燃烧供热供能, 考虑产率、选择性对排放的影响)。对本设备, 合计 $538 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

$$C_{\text{甲醇}} = C_{\text{甲醇建设}} + C_{\text{甲醇运维}} + C_{\text{所用氢气}} + C_{\text{所用二氧化碳}} = \frac{11000000}{65 \times 10000} \times 1.08 \times (1 + 10 \times 5\%) + 0.213 \times 1000 \times 1.845 + 1.53 \times 76.6 = 538 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (13)$$

5) MTG 设备: 设备寿命参考[60, 54]中的案例数据(取模组约 25 a), 忽略热力与电力成本, 建设与运维成本参考[60, 54]中的案例数据(对于 $4200000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的项目, 其中汽油 $3700000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, LPG $436000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, LNG $64000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 的项目, 总建造成本 462000000 美元 , 运维成本 $7260000 \text{ 美元} \cdot \text{a}^{-1}$), 此处考虑副产物可能带来的经济价值, 按照相对价格, 将它们统一折合为汽油(单位液化石油气相当于 1.35 单位汽油, 单位液化天然气相当于 0.43 单位汽油), 最终折合产量 $4314492 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 原料消耗根据 34.7% 的汽油收率计算。对本设备, 合计 $1335.6 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1}$ (或 $0.96 \text{ 美元} \cdot \text{L}^{-1}$)。

$$C_{\text{E-Gasoline}} = C_{\text{MTG建设}} + C_{\text{MTG运维}} + C_{\text{所用甲醇}} = \frac{1}{4314492} \left(\frac{462000000}{25} + 7260000 + \frac{3700000}{34.7\%} \times 538 \right) = 1335.6 \text{ 美元} \cdot \text{t}^{-1} \quad (14)$$

根据各环节物质比例, 可以求出总成本情况的来

源情况,如图7所示。

通过使用 HIF Global 公司的 E-Fuels 方案,总成本水平达到 $0.96 \text{ 美元} \cdot \text{L}^{-1}$,由此可见, HIF Global 公司的 E-Fuels 方案生产成本很高。

E-Fuels 总体成本水平的降低主要依靠所用氢气成本水平的降低,其次是所用二氧化碳成本水平的降低,前者主要依靠所用可再生电力成本水平的降低,而后者主要依靠技术创新导致的设备成本水平的降低,二者都是未来 E-Fuels 总成本降低的研究重点。

可以说, E-Fuels 产业的未来发展重点在于制氢技术的成熟、更低的成本,以及可再生发电技术的进一步优化。E-Fuels 本质上就是氢能的一种载体,其未来发展与氢能(本质上是可再生电能)的未来发展有着不可分离的联系。

4 E-Fuels 在欧盟能源转型中的优势

4.1 提高欧盟的能源自主性

E-Fuels 的本质是可再生电力的载体。根据 Zappa 等^[61]的分析,即使是在最具挑战性的天气状况下,仅依赖欧盟内部的清洁能源(包括风能、光能与生物能等可再生能源),能够以当前电力系统的充足性水平运行 100% 的可再生的电力系统。由此可见,欧盟内部具备依靠自身可再生能源禀赋进行转型的潜力。若欧盟国家自身可再生能源禀赋得到充分发掘,能够给生产 E-Fuels 留有足够的空间,有望以足够的 E-Fuels 替代传统化石能源,摆脱对外能源依赖。

4.2 充分利用现有的产业基础

E-Fuels 可以使用现有发动机体系,因此,相关从业者受到的就业冲击较小,他们能够在原有或相近的岗位上继续创造价值。而对于汽车企业, E-Fuels 的应用能在现有发动机技术体系基础上进行探索,难度较低。一些企业如 Porsche 已在推进 E-Fuels 试点生产,并应用于高端车型与赛车上。

4.3 稳定欧盟的经济基础

以德国为例,汽车工业是其重要的经济支柱,贡献了相当比例的就业岗位和经济总量^[62-63]。然而,该国汽车工业长期以燃油车为主导,由于电动汽车的生产技术与燃油车有本质区别,需要大量投资和重新学习成本,过于激进的转型可能引发反对声音和失业率

上升,威胁社会稳定和执政党选情。

在德国汽车工业协会的强烈要求下,德国政府对欧盟在 2035 年停止销售燃油汽车的法案提出反对,最终达成妥协,允许搭载专用发动机且使用 E-Fuels 的燃油车进行销售^[64]。

E-Fuels 的推广能够很好地适配目前的发动机体系,包括生产技术、供应链技术、就业结构等方面,即通过给燃油汽车“续命”,缓解了上述几大问题的出现。

4.4 作为清洁燃料进入碳市场交易

目前,世界各地逐渐建立起各有特色的排放市场交易机制。例如,美国加州于 2009 年出台低碳燃料标准(low carbon fuel standard, LCFS)机制,蕴含的替代燃料包括电力、氢能、天然气、生物乙醇与柴油、可再生汽柴油等。在该市场中,清洁燃料汽车基础设施自愿向加州空气资源委员会申报燃料数据获取积分,然后卖给强制加入市场的需求侧(如石油生产与进口商等高排放单位)。政府以此实现对于清洁能源转型的激励,并对能源市场进行规范与引导^[65]。

对于欧盟而言,可以借鉴 LCFS 的机制,将 E-Fuels 作为清洁燃料引入碳市场,使 E-Fuels 的生产厂商获得碳交易收入,抵消部分高生产成本。这样能够在一定程度上解决外部性问题,激励 E-Fuels 等低碳能源产业的发展。

5 E-Fuels 的不足与短板

能源领域有“不可能三角”说法,即一种能源的清洁性、稳定性和经济性难以兼顾^[66]。作为新型能源, E-Fuels 虽然清洁性不错,但基于波动的可再生能源,稳定性一般。然而,其最大劣势在经济性,低能量利用率与高成本是其推广的主要障碍。

1) 与直接使用电能相比, E-Fuels 在生产到使用过程中浪费了大量优质能量,其总体效率很低。根据国际清洁交通委员会(International Council on Clean Transportation, ICCT)燃料项目组报告,用于生产 E-Fuels 的电力仅有 16% 最终用于汽车驱动,而电动汽车的总体能量效率可达 72%^[48],这是 E-Fuels 反对者的主要论据之一。E-Fuels 在生产与使用环节的低效率严重影响其经济性,并对欧盟内部可再生能源造成极大浪费。

2) E-Fuels 推广受阻的最主要原因是其高昂的成本。据上文估算,其生产成本约为 $0.95 \text{ 美元} \cdot \text{L}^{-1}$, 相当于 $7 \text{ 元} \cdot \text{L}^{-1}$, 远超传统汽油的生产成本, 市场竞争力很差。与直接使用电能相比, 由于能量转化损失和生产基建投资, E-Fuels 成本始终居高不下, 制约了其大规模的生产和销售, 即使它可以维持人们的用车习惯和偏好, 也难以形成规模效应降低成本。

此外, E-Fuels 主要依赖于风能、光能等自然资源, 而对于风力发电、光伏发电等产业的大规模发展也可能导致环境与生态问题, 包括鸟类碰撞、栖息地破坏、噪声影响等已知影响, 以及大气风速降低、热岛效应、对局部与全球气候的潜在影响。

6 E-Fuels 未来发展趋势

6.1 欧盟 E-Fuel Alliance 推动

欧盟已经形成 E-Fuel Alliance 非政府组织, 它由各相关行业的企业与机构组成, 包括 Bosch、Porsche、Exxonmobil、Siemens 等企业。该组织围绕 E-Fuels 发展, 提出的政治诉求包括: 对环保技术政策的开放度、氢基能源市场的发展与规范、公平的能源税制度、认可 E-Fuels 的减排贡献、加强国际合作和促进工业化生产等^[67-68], 即希望政府能认可 E-Fuels 的价值并大力促进其发展与推广。

E-Fuel Alliance 的目标是到 2050 年实现 E-Fuels 完全替代传统燃料。总体来看, 该组织提出了一些推广思路。

1) 从 2025 年开始, 将 4% 的 E-Fuels 与传统燃料混合销售, 并逐步增加比例, 直至 2050 年达到 100%。他们认为, 这样做可以实现 E-Fuels 市场价格的平滑过渡, 使每个终端用户都能够负担得起 E-Fuels 的消费^[69]。

2) Porsche E-Fuels 团队负责人 Karl Dums 表示, 借助 E-Fuels 的供应链优势, 通过在风、光资源丰富的地区生产 E-Fuels, 并将其运输到欧洲, 可以克服可再生能源的地域差异性。

3) Karl Dums 亦称, 未来 Porsche 所有现有车辆与特定应用中的新车将全面使用 E-Fuels, 并且考虑在难以电气化的航空、航运领域扩展 E-Fuels 的应用^[70]。

其中, 通过混用并逐渐增加比例的想法, 如能够得到政府的强制法规要求, 对于避免欺骗发生有一定

的积极意义; 借助供应链优势, 在资源丰富地区生产 E-Fuels, 运输到需求量大的地方, 反映了将 E-Fuels 作为储能手段的思想; 而在航空、航运领域, 使用 E-Fuels 的思路早已得到推广, 目前, 可持续航空燃料 (sustainable aviation fuel, SAF, 本质就是一种 E-Fuels) 已经得到广泛应用。

6.2 E-Fuels 的工厂布局

近年来, 世界多地已建设或正规划建设示范性的 E-Fuels 工厂, 它们主要集中在北大西洋东岸的西欧、北欧国家, 也有一些在美国德克萨斯州、澳大利亚塔斯马尼亚州、冰岛及西亚地区。大部分试点项目仍处于规划和建设阶段, 即使是已经投产的项目, 其年产量也远远不能满足欧盟汽车消费的需求, 例如, Haru Oni 工厂 2023 年的年产量仅为 $13.1 \text{ 万 L E-gasoline}$ 与 323 t E-Methanol ^[71]。因此, 欧盟的 E-Fuels 产业仍处于发展初期。

6.3 欧盟的政策倾向

尽管 E-Fuel Alliance 提出了许多目标与愿景, 并进行了大规模的投资与发展, 但欧盟官方对 E-Fuels 的观点并不与其一致。2023 年欧洲议会和理事会发布指令 (EU) 2023/2413, 即第三版可再生能源指令 (Renewable Energy Directive III, RED III), 从定性上说, 其承认 E-Fuels (原指令中称作非生物来源的可再生燃料, renewable fuels of non-biological origin, RFNBO, 与本文所指的 E-Fuels 一致) 的低碳性, 认为是一种有效的可再生能源, 且认为有必要提高可再生能源产量以生产更多的 E-Fuels, 但却认为 E-Fuels 更应该在难以脱碳的领域进行推广与应用, 如航运、工业应用与重型运输等, 而在公路交通领域, 由于电气化的推进较为容易, 且效率更高, 故应该将电气化作为首选^[72]; 从定量上说, 其制定了到 2030 年 E-Fuels 在交通运输中的目标占比为 1%, 并且将航空与海事领域所使用 E-Fuels 的计算乘数从 1.2 提高到 1.5, 这说明欧盟对发展 E-Fuels 提出了有约束的要求, 但该约束力并不强, 且更鼓励将 E-Fuels 用于非公路领域^[73]。

此外, 欧盟希望相关委员会在 2028 年 7 月 1 日前进行再次评估, 以确定用于生产 E-Fuels 的电力何时可以被视为完全可再生。这项评估将重点考虑额外性 (additionality, 衡量了相对于不采取任何举措而言, 采取某项举措所造成的额外有效影响量)、时间和

地域相关性对生产成本降低、温室气体减排及能源系统的影响,尤其是在工业和运输部门中可再生燃料的可用性和经济性,以及对欧盟实现 2030 年 E-Fuels 目标的影响。总之,欧盟官方仍持观望态度,希望尽快明确 E-Fuels 在特定领域的应用潜力及其影响,并为未来改革奠定基础。

当下,欧盟也对 E-Fuels 进行了一定的妥协,在德国的反对下,欧盟暂且同意未来对使用 E-Fuels 的燃油车进行一定的豁免。

6.4 可能的发展路径:与混合动力汽车配合

混合动力系统是由内燃机与电机协同工作,共同驱动车辆的系统,其类型多样,主要分为串联式、并联式以及混联式。通过充分发挥发动机与电机系统的优势,混合动力汽车能够提高燃油经济性,显著降低油耗,从“节流”角度缓解 E-Fuels 的高成本和全过程

能量浪费等问题。此外,推广混合动力汽车还具有以下优势。

1) 资源需求较低:由于电池容量较小(尤其是非插电的油电混动汽车),相较于纯电动汽车,其对关键金属资源的需求量较少。

2) 开发难度较低:混合动力汽车可以在现有内燃机基础上进行探索,企业的开发难度相对较低。同时,现有内燃机技术得以保留,继续发挥重要作用,因此从业者受到的就业冲击较小。

未来,混合动力汽车可以与“混用并逐渐提高比例”的思路结合,利用图 8 所示的 E-Fuels 发展路径,通过技术创新驱动市场扩展,利用规模效应反哺创新研发,形成良性循环,逐步推广在高效混合动力汽车上应用高度清洁的 E-Fuels 模式,从而实现公路交通碳中和的长期目标。

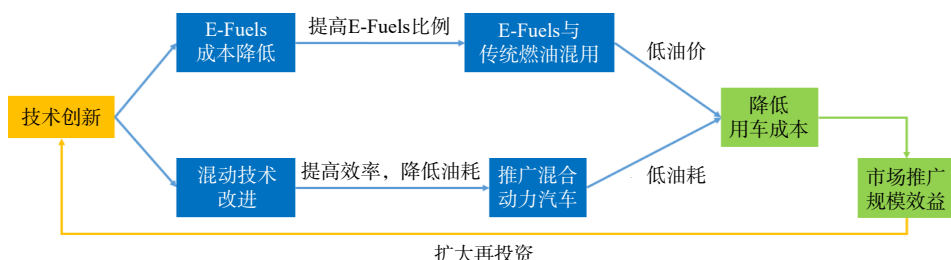


图 8 一种可能的公路 E-Fuels 应用推广路径

6.5 中国 E-Fuels 产业发展前景

虽然上述分析主要聚焦于欧盟 E-Fuels 产业的发展,但中国的国情与欧盟有显著不同,这将对 E-Fuels 的发展路径产生不同影响。

从体制角度看,中国拥有统一的全国大市场,市场空间广阔,中央与地方各级政府对产业发展的影响力较强,具备为 E-Fuels 产业提供政策支持和资源倾斜的能力。从市场现状来看,中国的电动汽车产业经过 10 余年的快速发展,已处于全球领先地位。国内各大品牌凭借低廉的能源成本、智能化使用体验及创新的商业模式等,建立了强大的市场竞争力^[74]。相比之下,E-Fuels 的生产成本居高不下,在高端赛车、跑车等特定市场以外,普通消费者在性价比和实际需求上难以找到使用 E-Fuels 的理由。因此,目前并不适合在中国的公路交通领域大规模推广 E-Fuels。

尽管如此,E-Fuels 仍有潜力在其他领域为中国的能源转型提供助力。一方面,可以借鉴欧盟的经

验,探索 E-Fuels 在航空和海运等难以电气化领域的应用。另一方面,E-Fuels 也可以作为优质的储能手段,调节中国可再生能源在时空分布上的不均衡。由于中国幅员辽阔,各地区气候地形差异较大,不同季节的气象条件变化明显,导致可再生能源在地域和时节上的分布不均。E-Fuels 具有运输和储存的便利性,可以在水力、风力和光照充足的地区或季节集中生产,并在能源匮乏的区域或季节使用,减缓时空差异带来的影响。

7 结论与展望

作为一种新兴能源解决方案,E-Fuels 有利有弊,未来的发展面临着很大的不确定性。但是从欧盟发展 E-Fuels 过程,可以得到如下启示。

1) 创新驱动未来:当前,E-Fuels 产业仍处于发展的初期阶段。如果未来中国引入并发展 E-Fuels 产

业,保持持续创新将是关键。生产成本的降低、碳减排效果的提升以及动力装置效率的优化都离不开技术的快速迭代。为了增强 E-Fuels 的市场竞争力,应重点关注其与高效混合动力汽车的配合,以及降低发电、制氢等重点环节的成本。

2) 能源转型需平衡多维考量:中国的政治、经济、社会发展状况与欧盟国家有显著差异。在评估新能源产业的路径及绩效时,不能简单照搬其他国家的模式,而要综合考虑中国的体制特点、已有竞争产业和自然资源禀赋等因素,灵活制定适合中国国情的能源转型策略。

3) 包容多种技术路线:在新能源技术快速发展的当下,应保持对多种技术路线的包容和关注,既要持续关注欧盟 E-Fuels 产业的进展,也要兼顾其他可能的技术路径。E-Fuels 的优势值得我们重视,尤其是在非公路运输与储能等领域的潜在应用。同时,我们应扬长避短,推动中国新能源产业生态体系的健康、可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] 李蕴洁. IPCC综合报告: 减缓与适应方案需加速部署[J]. 世界环境, 2023(2): 47-48.
- [2] 气变之下, 燃油车退欧之势或已难挽——德意电力合成燃料“折中方案”任重道远[EB/OL]. [2024-01-23]. <http://www.stdaily.com/guojishiidian/202303/449e7c51a1d44ab581b4825f5fb61042.shtml>.
- [3] Yaguchi M. Japan's e-fuels policy[R]. Tokyo: Agency for Natural Resources and Energy, 2023.
- [4] Wikipedia. Electrofuel[EB/OL]. [2024-10-05]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrofuel>.
- [5] Lewis A. Future aviation fuels—the petroleum industry responds to the challenge[C]//Proceedings of SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 1980: 2333-2346.
- [6] Ellers C. Advanced electrofuel-batteries plus for electric vehicles[C]//Proceedings of IEEE Technical Applications Conference. Northcon/96. Conference Record. Piscataway, NJ: IEEE, 1996: 386-391.
- [7] Lipman T, Witt M, Williams B, et al. Electric-fuel scale-up in California: Policy and regulatory support[R]. Berkeley: California Institute for Energy and Environment(CIEE), 2011.
- [8] Efuel Alliance. What are efuels?[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/what-are-efuels>.
- [9] 財團法人台灣綜合研究院. 電子燃料發展概況分析[R]. 台北: 台灣綜合研究院, 2023.
- [10] Hoekstra G. Welcome to the future—High cost of gasoline sulfur specification tests refiners, analysts[EB/OL]. [2024-10-05]. <https://rbnenergy.com/welcome-to-the-future-high-cost-of-gasoline-sulfur-specification-tests-refiners-analysts>.
- [11] Efuel Alliance. eFuels in detail[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/efuels-in-detail>.
- [12] Enemed. Enemed launch new ePower Diesel with 60+cetane level[EB/OL]. [2024-10-05]. <https://enemed.com/mt/products/epower-diesel>.
- [13] 孟翔宇, 顾阿伦, 曾静, 等. 中国氢能交通产业的现状、挑战与展望[J]. 科技导报, 2024, 42(3): 6-26.
- [14] 秦艺道. 能量密度全球最高!这家公司锂电池能量密度比特斯拉高73%[EB/OL]. [2024-04-04]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_16743033.
- [15] 国家制造强国建设战略咨询委员会. 《中国制造2025》重点领域技术路线图[R]. 北京: 国家制造强国建设战略咨询委员会, 2015.
- [16] Gianluca P, Giovanni L, Lorenzo F. Renewable electricity for decarbonisation of road transport: Batteries or E-fuels?[J]. Batteries, 2023, 9(2): 135.
- [17] 余志生. 汽车理论[M]. 6版. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [18] 刘科. 院士报告厅| 刘科: 碳中和误区及其现实路径[EB/OL]. [2024-04-13]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13853860.
- [19] 能源发展与政策. 《全球氢能观察2021》系列研报之三: 全球氢储运与供应链发展趋势观察[EB/OL]. [2024-04-13]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_13640924.
- [20] 王彦哲, 周胜, 王宇, 等. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 377-384.
- [21] 孙启星, 张超, 李成仁, 等. “碳达峰、碳中和”目标下的电力系统成本及价格水平预测[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 9-16.
- [22] Cheng G S, Yang Y H, Xiu T C, et al. Analysis of hydrogen production potential from water electrolysis in China[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(13): 9220-9232.
- [23] Kumar D, Abraham J E, Varghese M, et al. Nanocarbon assisted green hydrogen production: Development and recent trends[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 118-141.
- [24] Bičáková O, Straka P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(16): 11563-11578.
- [25] 张杰, 郭伟, 张博, 等. 空气中直接捕集CO₂技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 57-68.
- [26] 王珺瑶, 何松, 严家辉, 等. 直接空气碳捕集技术生命周期评价的研究进展及挑战[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2748-2759.

- [27] 王泽洋, 王龙延. 煤基燃料油品特性与煤制油产业发展分析[J]. 化工进展, 2019, 38(7): 3079–3087.
- [28] HIF Global. HIF Haru Oni demonstration plant[EB/OL]. [2024-01-24]. <https://hifglobal.com/haru-oni>.
- [29] 张贤, 许毛, 徐冬, 等. 中国煤制氢CCUS技术改造的碳足迹评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(12): 1–11.
- [30] Djunisić S. HIF Global, partners draw first litres of e-fuels at Haru Oni demo plant in Chile[EB/OL]. [2024-01-29]. <https://renewablesnow.com/news/hif-global-partners-draw-first-litres-of-e-fuels-at-haru-oni-demo-plant-in-chile-809024>.
- [31] Mandel E. HIF Haru Oni project receives Siemens electrolyser[EB/OL]. [2024-01-29]. <https://www.h2bulletin.com/hif-haru-oni-project-receives-siemens-electrolyser>.
- [32] Bisotti F, Hoff K A, Mathisen A, et al. Direct air capture (DAC) deployment: A review of the industrial deployment[J]. Chemical Engineering Science, 2024, 283: 119416.
- [33] Global Thermostat. Solution[EB/OL]. [2024-01-30]. <https://www.globalthermostat.com/solutions>.
- [34] Gambhir A, Tavoni M. Direct air carbon capture and sequestration: How it works and how it could contribute to climate-change mitigation[J]. One Earth, 2019, 1(4): 405–409.
- [35] Siemens-energy. Silyzer 300 The next paradigm of PEM electrolysis[EB/OL]. [2024-10-04]. https://p3.aprimocdn.net/siemensenergy/3baa4ffa-f1f1-422f-a770-b08300c0f2b0/Datasheet-Silyzer300-pdf_Original%20file.
- [36] Gothe M L, Pérez-Sanz F J, Braga A H, et al. Selective CO₂ hydrogenation into methanol in a supercritical flow process[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2020, 40: 101195.
- [37] Ren M H, Zhang Y M, Wang X, et al. Catalytic hydrogenation of CO₂ to methanol: A review[J]. Catalysts, 2022, 12(4): 403.
- [38] 埃克森美孚化工. 甲醇制汽油技术 (MTG)[EB/OL]. [2024-02-09]. <https://www.exxonmobilchemical.com.cn/zh-cn/catalysts-and-technology-licensing/methanol-to-gasoline-technology>.
- [39] Chakraborty J P, Singh S, Maity S K. Advances in the conversion of methanol to gasoline[M]//Hydrocarbon Biorefinery. Amsterdam: Elsevier, 2022: 177–200.
- [40] 祁嘉昕. 甲醇制汽油工艺分析及产业化进展[J]. 山西化工, 2018, 38(1): 35–37.
- [41] Wang Y X, Sun T Y. Life cycle assessment of CO₂ emissions from wind power plants: Methodology and case studies[J]. Renewable Energy, 2012, 43: 30–36.
- [42] Bonou A, Laurent A, Olsen S I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy—from theory to application[J]. Applied Energy, 2016, 180: 327–337.
- [43] Siemens Gamesa. Environmental product declaration[R]. Vizcaya: Mercantile Registry of Bizkaia.
- [44] Knop V. Life cycle analysis of hydrogen production with PEM electrolyzers[EB/OL]. [2024-01-29]. <http://www.awoe.net/Water-Electrolysis-PEM-LCA.html>.
- [45] Wang J Y, Li S J, Deng S, et al. Energetic and life cycle assessment of direct air capture: A review[J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 36: 1–16.
- [46] Deutz S, Bardow A. Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption[J]. Nature Energy, 2021, 6: 203–213.
- [47] Takunju R T. Life cycle assessment of the production of a solar MTG fuel based on electrochemical hydrogen production with energy supply by a PV/CSP hybrid solar power plant[D]. Bochum: Ruhr-Universität Bochum, 2021.
- [48] Baldino C. EU renewable energy directive II: Supporting low-carbon fuels[R]. ICCT, 2021.
- [49] Wang M. The life-cycle analysis of petroleum fuels and biofuels with GREET[R]. California: Argonne National Laboratory, 2016.
- [50] 陈子瞻, 王高尚. 煤制油成本案例分析及产业前景[J]. 地球学报, 2017, 38(1): 109–114.
- [51] 郭一凡, 蒲强, 霍堃, 等. 石油化工行业2017年日常报告[R]. 国金证券, 2017.
- [52] Grahn M, Malmgren E, Korberg A D, et al. Review of electrofuel feasibility—Cost and environmental impact[J]. Progress in Energy, 2022, 4(3): 032010.
- [53] Blewett D. Wind turbine cost: How much? Are they worth it in 2023?[EB/OL]. (2023-06-08) [2024-02-28]. <https://weathereguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it>.
- [54] Al-Sobhi S A, AlNouss A, Alhamad M. Techno-economic and environmental assessment of gasoline produced from GTL and MTG processes[M]//Computer Aided Chemical Engineering. Amsterdam: Elsevier, 2021: 1827–1832.
- [55] Taibi E, Miranda M, Vanhoudt W, et al. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition[J/OL]. [2024-10-25]. <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1306>.
- [56] Kuehn M. Role of hydrogen in the energy transition[C]//OAPEC symposium session 2: Establishing a hydrogen economy. Kuwait: Organization of Arab Petroleum Exporting Countries, 2023.
- [57] Fasihi M, Efimova O, Breyer C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 224: 957–980.
- [58] Borisut P, Nuchitprasittichai A. Methanol production via CO₂ hydrogenation: Sensitivity analysis and simulation—Based optimization[J]. Frontiers in Energy Research, 2019, 7: 81.
- [59] Bos M J, Kersten S R A, Brilman D W F. Wind power to methanol: Renewable methanol production using electricity,

- electrolysis of water and CO₂ air capture[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114672.
- [60] Jones S, Zhu Y. Techno-economic analysis for the conversion of lignocellulosic biomass to gasoline *via* the methanol-to-gasoline (MTG) process[M]//*Industrial Chemistry*. Richmond, Washington: Apple Academic Press, 2011: 242-262.
- [61] Zappa W, Junginger M, van den Broek M. Is a 100% renewable European power system feasible by 2050?[J]. *Applied Energy*, 2019, 233: 1027-1050.
- [62] Author: Jaroslaw Kamiński. German automotive industry at a crossroads[EB/OL]. (2023-12-14)[2024-04-16]. <https://www.obserwatorfinansowy.pl/in-english/german-automotive-industry-at-a-crossroads>.
- [63] Backhaus R. Is electric mobility a job killer?[J]. *ATZ Worldwide*, 2023, 125(5): 10-15.
- [64] 古野志健男. 35年以降エンジン搭載車を容認も、欧州委員会の方針変わらず[EB/OL]. [2024-04-16]. <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02340/042100004>.
- [65] 李越, 秦兰芝, 安锋. 加州低碳燃料标准解读及中国可行性研究报告[R]. 北京: 能源与交通创新中心, 2021.
- [66] 王永中. 碳达峰碳中和与能源“不可能三角”困境[J]. *煤炭经济研究*, 2021, 41(10): 1.
- [67] Efuel Alliance. Members[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://www.efuel-alliance.eu/initiative/members>.
- [68] Efuel Alliance. Our political demands[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://www.efuel-alliance.eu/political-demands>.
- [69] Efuel Alliance. Costs & outlook[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://www.efuel-alliance.eu/efuels/costs-outlook>.
- [70] Steiner M. eFuels: Synthetic fuel from renewable energy sources[EB/OL]. [2024-04-22]. <https://newsroom.porsche.com/en/2023/sustainability/porsche-perspectives-sustainability-interview-karl-dums-31632.html>.
- [71] HIF Global. Fueling our world with renewable energy, Our sustainability journey 2023[EB/OL]. [2024-12-31]. <https://hifglobal.com/our-sustainability-journey-2023>.
- [72] Official Journal of the European Union. Directive (EU) 2023/2413 of the European parliament and of the council of 18 October 2023[EB/OL]. (2023-10-18) [2024-04-25]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>.
- [73] Decock G. First binding target to supply green H₂ and E-fuels to the transport sector[EB/OL]. [2024-10-05]. https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2023_07_REDIII_fact_sheet_hydrogen_efuels_RFNBO.
- [74] 管鸣宇, 彭波, 方寅亮, 等. 2023麦肯锡中国汽车消费者洞察[R]. 北京: 麦肯锡, 2022.

The logic behind EU's development of E-Fuels and revelations for China

WU Jinxi¹, ZHI Jiaqi²

1. School of Social Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Xingjian College, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract In recent years, energy independence and low-carbon transitions have become key global concerns, and countries in the European Union, particularly Germany, are advocating for the development of E-Fuels in the transportation sector. This paper provides a comprehensive review of the concept, properties, and production process of E-Fuels, while analyzing their lifecycle emissions and production costs. The paper highlights the significant role that E-Fuels play in the EU's energy transition by enhancing energy independence, supporting the existing automotive industry, stabilizing the economic foundation, and participating in carbon market trading. However, challenges such as high production costs and low efficiency are also identified. Additionally, the paper outlines the current development status of the E-Fuels industry in the EU, examines the proactive efforts made by non-governmental industry alliances, and discusses the EU's official neutral stance on E-Fuels. It further explores the potential pathway for the integration of E-Fuels with hybrid vehicles. Finally, the paper looks ahead to the opportunities for E-Fuels in China, offering recommendations for innovation-driven development, tailored strategies, and adoption of a flexible and inclusive approach to technological advancement, with the aim of supporting China's energy transition.

Keywords low-carbon transportation; E-Fuels; EU industry ●



(责任编辑 徐丽娇)