

氢制绿氨、绿色甲醇的燃料经济性分析

凌 骏 程 凯 唐 晓 王亚飞

(上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 067020)

摘要: 鉴于欧洲 FuelEU Maritime 计划对海运行业温室气体减排的要求, 国际航运业正积极转向绿色船用燃料。本文探讨了氨基绿色燃料——绿氨和绿色甲醇作为燃料的经济性比较。本文首先对比了柴油、天然气、氨和甲醇等典型燃料的经济性, 并分析了绿氨和绿色甲醇相较于传统灰氨和灰色甲醇的成本差异。结果显示, 绿氨和绿色甲醇具有显著的绿色溢价, 但需降低成本以提高市场竞争力。对于绿氨而言, 以当前绿电 0.185 元/kWh 成本计算, 其生产成本约为 3370 元/吨, 要与灰氨成本相匹敌, 绿电成本需降至 0.12 元/kWh 或碳价达到 198 元/吨。绿色甲醇的生产成本约为 3526 元/吨, 若要使其成本与灰色甲醇相当, 绿电成本需进一步降至 0.11 元/kWh 或碳价需达到 330 元/吨。此外, 虽然绿色甲醇在热值价格、储运便利性和燃烧特性方面优于绿氨, 但绿氨在热值价格下降潜力更大并且没有碳源障碍。综上所述, 随着绿电成本的持续下降和技术进步, 绿氨和绿色甲醇有望成为交通领域重要的绿色燃料选项。

关键词: 绿氨; 绿色甲醇; 氢; 燃料; 经济性

0 引言

欧洲的 FuelEU Maritime 计划是欧盟“Fit for 55”一揽子计划的一部分, 旨在通过立法减少海运行业的温室气体排放, 以支持欧盟到 2030 年减排至少 55% 的目标。自 2025 年起, 该计划将分阶段提高船舶燃料的温室气体排放标准, 以期在 2050 年前达到 80% 的减排目标。受此影响, 国际航运和物流公司正积极布局绿色船用燃料产业, 包括绿氨和绿色甲醇等。例如, 丹麦的马士基公司在 2022 年与 Seaspan 合作启动了氨燃料集装箱船的设计项目, 并于 2023 年与金风集团签署了绿色甲醇供应协议。

利用纯生物质生产绿氨和绿色甲醇在技术上是可行的, 但产量可能受限于生物质原料的供应。相比之下, 采用绿电制造的绿氢可以极大地缓解原料限制问题, 更适合作为大规模生产绿色燃料的原料方案, 这也是目前主要的绿氨、绿色甲醇生产方式。

文本首先对比了各种典型燃料的经济性, 随后深入分析了氢制绿氨和氢制绿色甲醇与传统煤制氨、煤制甲醇在经济性上的差异, 旨在明确这两种绿色燃料替代化石燃料的经济可行性。最后, 文本还对比了在不同绿电价格情况下氢制绿氨与氢制甲醇的燃料经济性, 为氨基燃料的发展方向提供了参考。

1 典型燃料的经济性比较

为了考察柴油、天然气、氨和甲醇这四种主流燃料的价格, 需要考虑通过不同途径生产的燃料类型,

包括传统柴油、灰氨、灰色甲醇以及生物柴油、绿氨和绿色甲醇。国际期货价格通常以美元计价, 统计时按同期人民币对美元的汇率进行调整。具体的价格趋势如图 1。

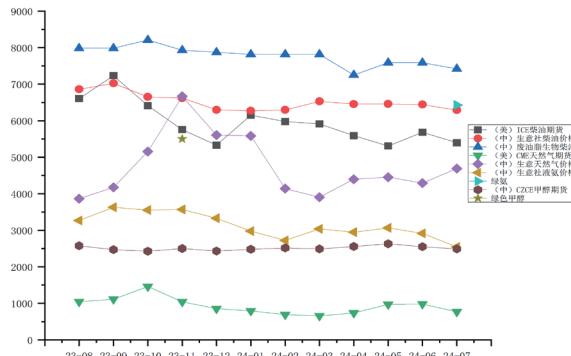


图 1 典型燃料 2023 年 8 月至 2024 年 7 月的价格趋势
(单位: 元/吨)

2023 年 11 月, 马士基与金风集团签订了全球首个大规模绿色甲醇供应协议, 年供应量为 50 万吨, 价格区间约为 5000 至 6000 元/吨, 而同期中国甲醇期货价格为 2501 元/吨; 2024 年 7 月, Fertiglobe 化肥集团 OCI 与阿布扎比国有石油公司 ADNOC 的合资企业 Fertiglobe 中标了德国氢衍生生物进口计划下的首个绿色氨合同, 中标价格为 811 欧元(约合 6428.8 元)每吨, 而同期中国液氨售价为 2543 元/吨。绿氨和绿色甲醇相对于传统的灰氨和灰色甲醇具有超过一倍的绿色溢价, 这是国内相关项目得以推进的原因之一。

参考表 1 中各燃料的单位质量热值, 计算各燃料的单位热值价格, 结果如图 2。

表 1 典型燃料的单位质量热值 (单位: MJ/kg)

柴油	液化天然气	甲醇	液氨
42.7	54.8	22.7	18.6

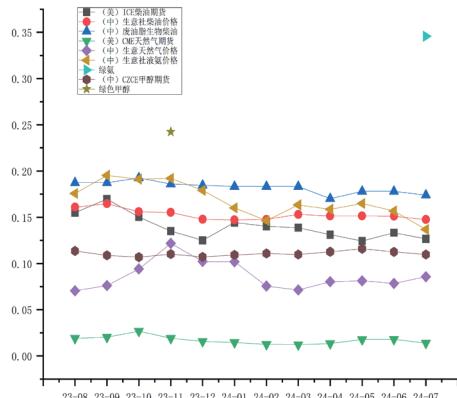


图 2 典型燃料 2023 年 8 月至 2024 年 7 月的热值价格趋势
(单位: 元 / MJ)

柴油因其高热值以及在常温下呈液态的特点, 在储存和运输方面较氨气和天然气更为便捷, 因此在市场上享有较高的热值价格比。生物柴油作为环保替代品, 可以直接用于现有的柴油发动机而无需重大改动, 并且与其它绿色能源相比具有成本优势。2021 年, 全球柴油消费量为 2693.6 万桶 / 天, 而生物柴油消费量为 90 万桶 / 天, 占总柴油消费量的 3.2%。尽管生物柴油产量受限于生物质原料供应, 但它仍是当前一种优秀的绿色燃料选择。然而, 氢制绿氨和氢制绿色甲醇因能够大规模生产, 成为更具潜力的大规模绿色燃料选项。

天然气拥有较低的热值价格比, 特别是在像美国这样的天然气丰富地区。从减少碳排放的角度来看, 与现有的船用石油燃料相比, 使用液化天然气 (LNG) 作为船舶燃料可以在整个船舶生命周期内实现高达 14% 至 21% 的温室气体减排。根据欧洲的 FuelEU Maritime 计划, 船用燃料的温室气体 (GHG) 强度将在 2020 年的基准值 (91.16 克二氧化碳每兆焦耳) 的基础上逐步降低: 2025 年降低 2%, 2030 年降低 6%, 2035 年降低 14.5%, 2040 年降低 31%, 2045 年降低 62%, 并在 2050 年达到降低 80% 的目标。因此, 在 2035 年之前, LNG 燃料在欧洲的船用燃料市场上具有显著的竞争优势。

拥有绿色溢价的绿氨、绿醇是美国天然气同期热值价格的 12 倍和 24 倍, 是中国天然气同期热值价格的 2 倍和 4 倍, 绿氨相对绿醇, 在作为燃料使用时更

不经济。目前, 这两种绿色燃料都需要降低成本以提高市场接受度。

2 绿氨经济性分析

我国合成氨原料技术路线与国际不同。国际上合成氨以天然气为主, 除了短期内的气价飙升带给绿氨发展机会, 碳价则是绿氨产业的主要推动力量。相比之下, 我国当前以煤为主的灰氨已经发展成熟, 工艺技术迭代至较高水平, 原料国内自主保障能力较强, 当前无碳价影响的情况下, 经济性主要取决于煤价。

绿氨由电解水制取的绿氢与空分装置捕获的氮气经合成工艺而得, 绿氨的成本主要取决于绿氢的成本, 而绿氢的主要成本又取决于绿电。

绿氨成本测算以哈伯法为基础, 假定项目装置规模^[2]: 8.4 万 Nm³/h 电解水、2.5 万 Nm³/h 空气分离、4.2 万 m³ 氢气储罐、40t/h 合成氨; 产品产品: 合成氨产量 28 万 t/a, 氧气产量 3.4 亿 m³/a, 蒸汽 20 万 t/a; 未考虑副产品氧气收益。每吨绿氨的非电成本约为 873 元, 包含水、催化剂、试剂、工资、修理费、管理费、折旧、摊销、利息等。参考化工产品的增值税 13%, 对比不同电价下的绿氨含税成本结果如图 3。

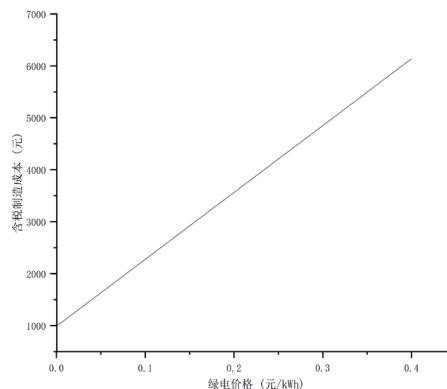


图 3 绿氨价格随绿电价格变化

当前光伏电力的度电成本已降至 0.18 元 / kWh, 而陆上风电的成本为 0.19 元 / kWh。以 0.185 元 / kWh 的绿电成本计算, 自备绿色电力供应下生产的绿氨成本大约为 3370 元 / 吨, 其中约 70% 的成本与绿电相关。

根据当前的市场行情, 无烟煤的价格为 1173.5 元 / 吨, 相应的灰氨生产成本为 2541 元 / 吨。为了使绿氨的成本与当前灰氨成本相匹配, 绿电成本需要进一步降低到 0.12 元 / kWh, 或者按照 4.190 kgCO₂/kgNH₃ 的碳排放数据计算^[3], 碳价需达到 198 元 / 吨。

3 绿色甲醇经济性分析

国内外甲醇生产工艺存在差异, 这主要由各自的资源禀赋决定。中国因为煤炭资源丰富, 甲醇生产主

要依赖煤制甲醇，此外还包括天然气和焦炉煤气为原料的方法。相比之下，国际市场由于天然气资源充足，几乎所有的甲醇生产都采用天然气作为原料。这一生产原料情况和氨相似，国内灰色甲醇的生产成本与煤价相关。

绿色甲醇含有碳元素，其生产依赖可再生碳源。2021年，欧盟发布了全球首个绿色甲醇认证标准，规定可再生二氧化碳必须来源于生物质或直接空气捕获。由于直接空气捕获二氧化碳成本高昂，采用生物质原料制备甲醇成为一种经济选择。具体途径包括利用生物质气化或重整产生的合成气，以及结合绿氢生产甲醇。本分析专注于使用可再生二氧化碳与绿氢制备绿色甲醇的技术路径。在这种方法中，绿色甲醇的成本主要受到绿电价格和可再生二氧化碳来源的影响。

以年产10万t的绿色甲醇项目为对象^[4]，原料气CO₂的单程转化率为30%，甲醇选择性为80%，年产10万t甲醇理论上需消耗H₂1.875万t、CO₂13.750万t，但因存在副反应，实际消耗的H₂约1.910万t、CO₂14.600万t，制氢电耗5.47kWh/m³。每吨绿氨的非电成本约为490元，包含催化剂、除盐水、循环水、仪用空气、氮气、工资、维修、折旧、管理等。参考化工产品的增值税13%，对比不同电价及不同二氧化碳价格下的绿色甲醇含税成本及不同煤（无烟煤）价下的灰色甲醇含税成本，结果如图4。

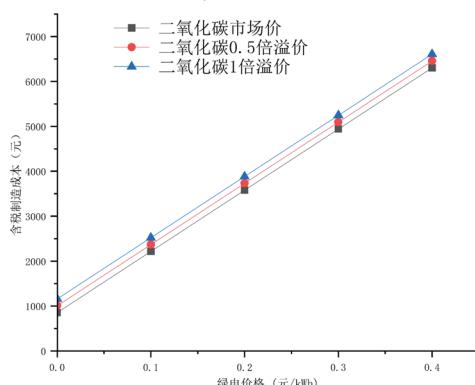


图4 绿色甲醇价格随绿电价格变化

当前光伏电力的度电成本已降至0.18元/kWh，而陆上风电的成本为0.19元/kWh。以0.185元/kWh的绿电成本计算，绿色二氧化碳315元/吨（1.5倍市场价），自备绿色电力供应下生产的绿色甲醇成本大约为3526元/吨，其中约71.5%的成本与绿电相关，绿色二氧化碳成本占比13%。

根据当前市场情况，无烟煤的价格为1173.5元/吨，这导致灰色甲醇的生产成本上升至3605元/吨，这一成本水平与绿色甲醇相当。尽管煤制甲醇过程中

还会产生硫磺、硫酸铵、焦油和粗苯等副产品（成本测算暂未考虑其收益），但由于煤价持续高位运行，煤制甲醇企业目前仍普遍处于亏损状态。目前甲醇现货的市场价格约为2500元/吨，为了使绿色甲醇的成本与当前灰色甲醇售价相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.11元/kWh，或者按照3.11kg CO₂/kg CH₃OH的碳排放数据计算^[5]，碳价需达到330元/吨。

4 结论

①在绿色燃料中，目前生物柴油具有价格优势，但绿氨、绿色甲醇更适合大规模生产。

②拥有绿色溢价的绿氨、绿醇是美国天然气同期热值价格的12倍和24倍，是中国天然气同期热值价格的2倍和4倍。相比之下，基于当前市场价格，绿氨作为燃料使用时比绿醇更不经济。

③以0.185元/kWh的绿电成本计算，自备绿色电力供应下生产的绿氨成本大约为3370元/吨，其中约70%的成本与绿电相关。为了使绿氨的成本与当前灰氨成本相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.12元/kWh，或者碳价需达到198元/吨。

④以0.185元/kWh的绿电成本计算，绿色二氧化碳315元/吨（1.5倍市场价），自备绿色电力供应下生产的绿色甲醇成本大约为3526元/吨，其中约71.5%的成本与绿电相关，绿色二氧化碳成本占比13%。为了使绿色甲醇的成本与当前灰色甲醇售价相匹配，绿电成本需要进一步降低到0.11元/kWh，或者按照3.11kg CO₂/kg CH₃OH的碳排放数据计算，碳价需达到330元/吨。

参考文献：

- [1] 苏思元, 顾芷玉. 中国生物柴油市场概述及未来发展前景分析 [J]. 生物化工, 2023, 9(4):220-222.
- [2] 王明华. 不同应用场景下新能源制氢合成绿氨经济性分析 [J]. 现代化工, 2023, 43(11):1-49.
- [3] 刘梦华, 黄逍, 李爽, 等. 基于全生命周期评价的中国制氨路线碳排放、能源效率研究及展望 [J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(07):1329-1346.
- [4] 舒斌, 范茂琳, 熊健. CO₂ 加氢制绿色甲醇的成本测算及预测 [J]. 电力科技与环保, 2024, 40(2):191-197.
- [5] 孟文亮, 李贵贤, 周怀荣, 等. 绿氢重构的粉煤气化煤制甲醇近零碳排放工艺研究 [J]. 化工学报, 2022, 73(04):1714-1723.
- [6] 郑可昕, 高啸天, 范永春, 等. 支撑绿氢大规模发展的氨、甲醇技术对比及应用发展研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(03):63-73.