

现代煤化工与绿氢耦合发展的经济可行性路径探究

刘 智 (晋能控股煤业集团有限公司, 山西 大同 037000)

摘 要: 氢气作为合成氨、合成甲醇、石油炼化和煤化工行业的重要原料, 在整个氢气消耗量中占据较大比例。绿氢耦合煤化工是一种将太阳能和风能等绿色能源与煤炭技术结合利用的方式, 可以降低煤炭的能源消耗, 减少污染物的排放。从可行性、发展潜力和主要路径等方面来看, 绿氢耦合煤化工具有一定的前景。绿氢耦合煤化工的可行性取决于绿氢技术的成熟度和可靠性, 以及煤炭资源的可持续供应。在绿氢与煤化工耦合发展过程中, 成本是一个重要的考虑因素。本文通过研究分析绿氢与煤化工的成本, 评估其经济可行性, 接着探讨绿氢耦合煤化工发展潜力及主要路径, 以期能够为相关研究提供借鉴。

关键词: 现代煤化工; 绿氢耦合; 发展路径; 经济可行性

当前, 煤化工用煤主要分为气化煤和动力煤两部分。气化煤是通过煤气化将煤炭转化为 CO 、 H_2 和 CO_2 等气体, 然后经过 CO 变换反应将 CO 转化为 H_2 , 最终用于生产化工产品和油品。动力煤则是利用燃煤锅炉 / 发电产生蒸汽或电力, 供给到空气分离装置和化工生产过程中。在煤化工过程中, CO_2 是一个重要的副产物。根据数据, CO_2 在整个煤化工过程中所占比例约为 70%, 而在空气分离和整个流程中所占比例约为 30%。这意味着煤化工过程中会大量产生 CO_2 排放。对于煤化工行业来说, 减少 CO_2 排放具有重要意义。一方面, 煤化工企业可以采取技术手段, 如碳捕集、利用和储存 (CCUS) 技术, 将 CO_2 从煤化工过程中捕集出来, 并进行储存或利用。另一方面, 煤化工企业也可以通过改进工艺流程, 提高能源利用效率, 减少 CO_2 排放。此外, 政府和相关部门也可以制定政策和法规, 鼓励煤化工企业采取减排措施。例如, 通过建立碳排放交易市场, 对 CO_2 排放进行限额和交易, 激励企业降低碳排放。

1 绿氢耦合煤化工可行性分析

利用绿氢与煤化工实现耦合的最大优势在于, 通过电解水制氢的同时, 还能产生氧气。这样一来, 不仅可以省去合成气变换装置, 还可以省去空气分离装置。而这两个装置恰恰是煤化工企业高耗能、高排放的主要单元之一。传统的煤化工过程中, 为了获得所需的氢气来调整化工合成中的氢碳比, 通常会采用 CO 变换反应来制取氢气。然而, 这个过程会产生大量的 CO_2 排放, 对环境造成负面影响。相比之下, 绿氢技术通过电解水制取氢气, 不仅能够满足煤化工中所需的氢气, 还能同时产生氧气作为副产品。补充氢气直接注入甲醇合成装置可以有效减少变换及热回收

装置变换部分的负荷。在传统的甲醇合成过程中, 通过 CO 与 H_2O 反应生成 H_2 和 CO_2 , 以满足后续甲醇合成反应所需的 H_2/CO 比。然而, 通过直接补充氢气, 可以减少变换反应中产生的 CO_2 , 并降低变换装置的负荷。这样一来, 不仅可以提高甲醇合成装置的效率, 还可以减少对环境的影响。另外, 补充氧气作为气化用氧, 也能够减少空分装置的负荷。在甲醇合成过程中, 通常需要进行煤气化反应, 将煤转化为合成气 (主要是 CO 和 H_2)。而气化过程中需要大量的氧气供给, 传统方法是通过空分装置进行氧气的制备。然而, 通过直接补充氧气, 可以减少空分装置的负荷, 进而减少燃料煤的使用量。这不仅有助于节约资源, 还可以减少煤炭的燃烧排放, 降低环境污染。

这样就能够避免 CO 变换反应产生的 CO_2 排放, 并且省去了合成气变换和空气分离装置所需的能源消耗。通过绿氢与煤化工的耦合, 不仅可以减少二氧化碳排放, 降低对环境的影响, 还能够提高煤化工企业的能源利用效率。此外, 绿氢技术还具有可再生性和清洁性的特点, 有助于推动煤化工向低碳、环境友好方向转型。然而, 需要注意的是, 在实际应用中, 绿氢与煤化工的耦合还面临一些挑战, 如电解水制氢的能源消耗、设备投资成本等问题。因此, 未来的研究可以进一步探索改进绿氢技术的效率和经济性, 以促进其在煤化工领域的广泛应用。

2 绿氢耦合煤化工发展潜力及主要路径

2.1 绿氢耦合煤制甲醇

目前, 我国的甲醇产量约为 7800 万 t, 其中 6200 万 t 来自煤炭生产。这种依赖煤炭作为原料的甲醇生产方式会消耗大量的能源资源, 约 1 亿 t 标准煤, 并排放近 2 亿 t CO_2 。此外, 超过一半的甲醇用于生产聚丙烯

/ 聚乙烯 (PP/PE) 等产品。这种情况下, 需要思考如何减少甲醇生产对环境的负面影响, 并推动可持续发展的替代方案。以下是一些可能的对策: ①推广清洁能源利用: 加大清洁能源 (如风能、太阳能等) 在甲醇生产中的应用, 减少对煤炭等传统能源的依赖, 降低能源消耗和二氧化碳排放; ②优化生产工艺: 改进甲醇生产工艺, 提高能源利用效率和产能, 减少能源浪费和碳排放; ③发展新型原料和技术: 探索使用非化石能源作为甲醇生产的原料, 如生物质、废弃物等, 以减少对煤炭等传统能源的依赖; ④提高产品附加值: 推动甲醇在高附加值领域的应用, 减少对聚丙烯 / 聚乙烯等低附加值产品的需求, 从而减少甲醇生产的规模 and 环境影响。

2.2 绿氢合成氨

目前我国合成氨产量约为 6000 万 t/a, 其中 4500 万 t 来自煤炭, 消耗约 5000 万 t 标准煤, 生产过程会导致近 1.5 亿 t CO₂ 的排放。其中, 高纯 CO₂ 的排放中有 3.5% 用于侯德榜制碱法生产纯碱 Na₂CO₃, 22.5% 用于与氨反应生成尿素, 从而实现部分高纯 CO₂ 资源化利用。以上数据说明了我国合成氨生产过程中的能源消耗和环境排放情况。在当前全球对于减少温室气体排放和实现可持续发展的背景下, 需要采取措施来减少碳排放, 并提高 CO₂ 的资源化利用率。为了实现这一目标, 可以考虑以下对策: ①提高合成氨生产的能源效率: 通过技术改进和设备优化, 降低合成氨生产过程中的能源消耗, 减少标准煤的使用量, 从而减少碳排放; ②推广清洁能源替代: 鼓励使用清洁能源替代传统的煤炭, 如天然气、风能、太阳能等, 以减少碳排放和环境污染; ③提高 CO₂ 的资源化利用率: 进一步研发和推广利用高纯 CO₂ 的技术, 如碱法生产纯碱和尿素等, 以实现 CO₂ 的循环利用, 减少对大气的排放; ④加强环境监管和治理: 加强对合成氨生产过程中的环境排放的监管和治理, 确保符合环保标准, 减少对环境影响。

3 氢气作为化工原料和燃料在传统行业的应用

从消费端来看, 氢气有多种主要应用: 化工原料: 氢气被广泛用于合成氨、合成甲醇、石油炼化、煤制天然气、煤制油、煤制乙二醇、煤制乙醇等化工过程中作为重要原料。燃料: 焦炉煤气是一种由炼焦过程产生的混合气体, 其中含有大量的氢气。这些煤气可以用作燃料, 提供热能。此外, 液态氢被用作航空航天的燃料, 高压氢则用于氢燃料电池汽车提供动

力。反应气、还原气或保护气: 高纯度氢气在电子工业、浮法玻璃制造、冶金工业等领域被用作反应气、还原气或保护气, 用于控制气氛和保证反应过程的质量和效果。

根据研究背景和数据, 氢气在难以脱碳的工业领域具有广泛的应用场景。主要包括合成氨、合成甲醇、石油炼化、煤制油、煤制气、煤制乙二醇以及炼焦等传统行业。表 1 是氢气在传统行业中作为化工原料和燃料的应用规模。

4 绿氢耦合煤化工路径选择

综合分析来看, 氢能在煤基能源领域的应用, 从单条生产线补充氢量的角度分析, 可优先耦合煤制聚乙醇酸 (PGA)、煤制乙二醇和合成氨, 整体补充氢的规模不大, 可以形成较为独立的产业示范。其中, 绿氢耦合合成氨工艺是比较好的一个选择, 此时合成氨工艺只需要纯氮和纯氢, 也就是空分装置和电解槽装置, 工艺装置配置相对简单, 规模相对较小, 耦合系统可以做成模块化, 与风光制氢的匹配关系相对友好。因此在绿氢耦合煤化工路径的选择上, 可优先考虑合成氨工艺, 除了耦合系统更易配置外, 合成氨产品规模大, 市场及运销系统成熟, 带来的 CO₂ 减排优势明显, 从而使得绿氢能快速形成产业化 (表 2)。

5 绿氢、绿氨绿醇成本分析

5.1 绿氢成本分析

绿氢的成本主要包括电解水设备的投资成本、电力消耗成本和维护管理成本等。目前, 绿氢的生产成本较高, 主要是由于电力价格、电解设备成本以及水资源成本等因素造成的。随着绿氢技术的不断发展和成熟, 预计其成本将逐渐下降。

5.2 绿氨成本分析

绿氨的成本主要包括氢气生产成本、氮气生产成本和合成过程中的能耗成本等。与传统的氨生产相比, 绿氨的生产成本较高, 主要是由于绿氢生产成本的增加和合成过程中的额外能耗造成的。随着绿氢技术的成熟和绿氨产业的规模化发展, 预计绿氨的成本将逐渐降低。

5.3 绿醇成本分析

绿醇是由生物质或绿色氢气 (绿氢) 和二氧化碳合成转变生成, 在化学性质上与化石燃料来源生产的甲醇相同, 其用途与普通甲醇类似, 绿色甲醇生产成本高于普通甲醇, 其产量相对较低。未来绿醇生产的成本取决于能否进一步降低可再生能源发电和电解槽

的成本：可再生能源发电成本包括太阳能、风能等可再生能源的发电成本，这些能源被用来提供绿色氢气的制备所需的电力。电解槽成本则是指将绿色氢气和二氧化碳转化为绿醇所需的电解槽设备的成本。

需要注意的是，绿氢、绿醇和绿氨的成本分析受到多种因素的影响，如能源价格、设备技术水平、原材料成本等。随着相关技术的不断进步和市场需求的不断增长，绿氢和绿氨的成本有望逐步降低，并逐渐实现商业化和规模化应用。

6 总结

随着全球对环境保护和可持续发展的关注日益增加，绿色能源的需求也逐渐上升。开展“绿电绿氢”耦合发展的研究和实践对于推动中国煤化工产业向绿色低碳转型具有重要意义。通过加大绿电和绿氢的发展力度，促进两者之间的协同发展，可以实现能源结构的优化和碳排放的减少，为可持续发展提供重要支撑。虽然绿氢目前面临着成本挑战和技术难题，但随着科技进步和政策支持的不推动，绿氢产业有望实现成本的降低和规模化生产，进一步提高其经济优势。同时，加强国际合作和技术创新也是推动绿氢发展的重要因素，有助于加快绿氢技术的商业化进程，

将直接推动煤化工产业向绿色低碳高质量发展。

参考文献：

- [1] 王明华. 绿氢耦合现代煤化工发展路径研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(05): 102-107.
- [2] 石志鹏, 石祥建, 蔡丹, 冯康康, 姜清辉. 绿电与绿氢耦合煤化工的系统建设方案 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(03): 143-149.
- [3] 周君, 罗橙, 张舜祯. 现代能源体系耦合绿氢化工应用的研究进展 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(04): 46-54.
- [4] 刘仁科, 李永清. 现代煤化工企业的发展现状与调度运行管理 [J]. 化工管理, 2022(19): 3.
- [5] 阳国军, 刘会友. 现代煤化工与绿电和绿氢耦合发展现状及展望 [J]. 石油学报 (石油加工), 2022, 38(04): 995-1000.
- [6] 王明华. 绿氢耦合煤化工系统的性能分析及发展建议 [J]. 现代化工, 2021, 41(11): 4-8.

作者简介：

刘智 (1986-)，男，汉族，河北阜平人，本科双学位，工程师、经济师、注册安全工程师，研究方向：煤化工。

表 1 氢气作为化工原料和燃料在传统行业的应用规模

项目	2021 年产量 / 万 t	2021 年产量 / 亿 m ³	理论耗氢量 / kg * kg ⁻¹	氢气消耗量 / 万 t
合成氨	5909		0.1760	1043
合成甲醇	7816		0.1250	977
石油炼化	70360		0.0146	1027
煤制油	823		0.1250	103
煤制天然气		44.53		119
煤制乙二醇	323		0.1290	42
炼焦	46446		0.0103 (50% 回炉, 55% 氢)	479

表 2 不同煤化工路线不同规模的理论补氢量

类型	反应方程式	单位产品理论耗氢量	单条线生产规模 / 万 t	氢碳比	理论补氢量 / 万 t
煤制甲醇	$\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$	0.125	100	2	7.5
煤制乙醇	$2\text{CO} + 4\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	0.174	60	2	6.2
煤制乙二醇	$2\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 4\text{H}_2 = (\text{CH}_2\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$	0.129	20	2	16
煤制烯烃	$2\text{CO} + 4\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	0.286	60	2	10.3
煤制 PGA	$2\text{CO} + \text{H}_2 = \text{C}_2\text{O}_2\text{H}_2$	0.034	10	0.5	—
合成氨	$\text{N}_2 + 3\text{H}_2 = 2\text{NH}_3$	0.176	100	—	176