

# 新能源制氢在传统炼化企业的应用

史倩<sup>1</sup>, 过良<sup>1</sup>, 张永亮<sup>2,✉</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司北京化工研究院, 北京 100013; 2. 南卡罗来纳大学机械工程学院, 美国 哥伦比亚 29201)

**摘要:** [目的] 化石燃料和新能源电力在使用和发展中面临着问题与挑战。为解决传统炼化企业依赖化石燃料制氢中的碳排放问题, 和新能源电力发展中的波动性问题提供建议, 有必要对氢气制备技术的应用与发展, 和传统炼化企业的氢气网络状况进行梳理。[方法] 调研了氢气制备技术的应用与发展, 尤其关注了关键技术电解水制氢技术的应用发展; 分氢制备、氢使用、氢纯化三部分对传统炼化企业的氢气网络进行了深入剖析。[结果] 通过总结, 提出通过电解水制氢技术将富余的新能源电力与传统炼化企业氢网络相结合的理想。在传统炼化企业附近布置新能源电给, 不但可以供炼厂日常用电, 还可将因波动性大而无法直接利用的弃电部分, 直接通过电解水制氢技术, 制氢供传统炼化企业使用, 有效降低传统炼化企业的碳排放强度。[结论] 要解决化石燃料使用中的碳排放问题与新能源电力使用中波动性高的问题, 实现新能源制氢在传统炼化企业的应用, 还面临着诸多挑战。

**关键词:** 清洁能源; 氢能; 电解水制氢; 氢气网络; 传统炼化企业

中图分类号: TK91; TE624

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0032-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Application of Water-Electrolytic Hydrogen Production Technology in Traditional Refinery and Chemical Enterprise

SHI Qian<sup>1</sup>, GUO Liang<sup>1</sup>, ZHANG Yongliang<sup>2,✉</sup>

(1. Sinopec Beijing Research Institute of the Chemical Industry, Beijing 100013, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Columbia 29201, the United States)

**Abstract:** [Introduction] Fossil fuels and new energy power are facing problems and challenges in utilization and development. In order to solve the problem of carbon emissions in hydrogen production from fossil fuels for traditional refining and chemical enterprises and provide suggestions on the volatility in the development of new energy power, it is necessary to review the application and development of hydrogen preparation technology and the hydrogen network status of traditional refining and chemical enterprises. [Method] The utilization and development of hydrogen power were summarized, and special attention was given to the development of fuel cell electrolysis for hydrogen production technology. The hydrogen network in refining and chemical enterprise was in-depth analyzed from hydrogen production, hydrogen utilization, and hydrogen purification points of view. [Result] Based on these, the research points out the idea of combining the waste renewable energy power with the hydrogen network in refining and chemical enterprises by the water-electrolytic hydrogen production technology. With the clean energy device settled near the traditional refinery and chemical enterprise, the daily electricity requirement is satisfied and the processes hydrogen need is met. [Conclusion] To reduce the CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel usage and the volatility of renewable energy power usage and to realize the idea of applying water-electrolytic hydrogen production technology in traditional refinery and chemical enterprises, there are still many challenges to overcome.

**Key words:** clean energy; hydrogen energy; water-electrolytic hydrogen production; hydrogen network; traditional refinery and chemical enterprise

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-04-08 修回日期: 2022-05-31

基金项目: 河北省自然科学基金项目“固体垃圾调质抑制化学链燃烧生成二噁英的作用机制”(E2020502007); 中央高校基金项目“铁基化学链燃烧抑制二噁英生成机制研究”(2020MS103).

## 0 引言

化石燃料(包括石油、煤炭和天然气等)作为工业发展的主要能源,仍然在人类生产、生活中发挥着巨大作用。然而,化石燃料的燃烧会释放大量的温室气体 $\text{CO}_2$ ,造成空气中 $\text{CO}_2$ 含量持续升高。不采取减排措施的情况下,到21世纪末全球将升温 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。改变能源消费结构,进行能源工业转型,降低碳排放,是全球化的共识与挑战<sup>[1]</sup>。我国工业能源消耗约占全国能源消耗的65%,工业用电占全国用电量约67%,化石燃料能源(煤、石油、天然气)约占能源消耗的85%<sup>[2]</sup>。2020年,我国工业碳排放量达到 $7.85\times 10^9\text{ t}$ ,石化化工行业碳排放约占工业碳排放的10%<sup>[3]</sup>。工业过程的碳减排预计在2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和。

长期来看,使用新能源电力如光电、风电或核电等替代化石燃料,可有效地减少碳排放。然而,清洁能源的使用本身存在随机性与波动性。为满足新能源的利用,清洁能源电力储能是目前新能源发展的热点方向。电力存储主要技术包含有抽水储能、飞轮储能、电池储能等<sup>[4-5]</sup>。然而这些储能技术面临各种问题,如抽水储能受地质条件限制,电池储能受制于大容量电站的安全性,飞轮储能受限于能量密度等<sup>[6-7]</sup>。继续发展可靠高效的储能技术过程中,电解水制氢储能是研究的重点。电解水制氢技术不仅能实现富余新能源电力的储存,其产生的氢气或燃料还可以作为炼化企业的化工原料。该方法将扩大新能源的应用,同时减少化石能源使用中的碳排放。

## 1 氢气制备技术应用与发展

当今世界能源结构与产业生态正在重构,以化石能源为主的传统结构面临问题与挑战。由于氢氧化反应的产物只有水,对环境无污染,还能借此获取纯净水等副产物资源,因此“氢经济”备受推崇。氢能作为一种新的二次能源载体,具有来源广泛、能量密度高、清洁无污染等优点,在航天、军事、化工、能源、冶金、交通等领域应用广泛。随着氢能技术发展成熟和气候变化压力持续增大,氢能备受关注,人类社会将逐渐进入氢能时代。我国已将氢能产业纳入国家能源战略规划。到2050年,全球氢能可再

生能力将达到1 TW,占总装机量约18%<sup>[8]</sup>。氢能已经成为推动我国能源结构转型,构建低碳、高效现代能源体系和实现新能源汽车战略的重要手段,其开发和利用已成为科研及产业领域的热点问题。

目前氢气的制备方法主要有四种,即化石燃料制氢、工业副产品制氢、电解水制氢和其他新方法制氢(光解水制氢、生物质制氢等)。以化石燃料为原料制取氢气是当今氢气制备的主要方法,工业上非常成熟,并已经建有各种大型装置来生产工业中大量使用的氢气。大约92%的氢气由煤气化、天然气蒸汽重整等工艺生产,约7%来自工业副产气(如蒸汽裂解制乙烯副产氢气,氯碱化工副产氢气),1%来自电解水<sup>[9]</sup>。工业副产品制氢工艺也比较成熟,可以配合地域性发展提供氢气来源。化石燃料制氢工艺将在传统炼化企业氢气网络部分进行详细介绍。

电解水制氢工艺简单、氢气纯度高(可达99%以上),能作为产品直接使用,也可精制达到更高纯度。电解水制氢的前提是要有价格低廉的富余电力。将电解水制氢技术与富余的可再生能源电力相结合,具有广泛的应用前景。当前电解水制氢技术主要有碱性电解、固体聚合物电解和固体氧化物电解(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC),各电解水技术主要性能指标如表1所示。碱性电解技术最为成熟,成本最低结构简单,商业化程度高,但其效率较低,动态响应差。此外,当电解功率下降,电解效率会迅速下降。这一特性限制了其在可再生能源领域的应用。固体聚合物电解水制氢波动能源适应性强,技术也较为成熟,效率略高于碱性电解,但设备成本高,商业化程度低,功耗较高<sup>[10]</sup>。从热力学角度分析,随着温度升高,水的理论分解电压降低,电能消耗减少,热能消耗增加,能量转换效率升高,电效率一般可达99%以上。从动力学角度分析,高温条件可降低过电位和能量损失,提高能量利用率。与碱性电解和固体聚合物相比,SOEC在高温下运行,可有效降低电能消耗,提高系统能量转化效率。此外,SOEC电解电极不需要贵金属催化剂,还可以进一步降低成本,提高寿命。SOEC是全固态电池结构体系,具备高效率、低成本、长寿命的诸多优势<sup>[11]</sup>。

国外的固体氧化物电解技术兴起于20世纪70年代末。早期研究中,电解池长期运行稳定性不好,抗热循环能力差,制作和运行成本高(电能消耗占

表 1 电解水制氢技术对比

Tab. 1 Comparison of water-electrolysis hydrogen production technologies

电解水制氢技术	电耗/(kWh·m <sup>-3</sup> )	效率/%	温度/℃	纯度/%	工作压力/bar	电堆寿命/(×10 <sup>4</sup> h)
碱性电解	4.5 ~ 5.5 <sup>[8]</sup>	52 ~ 82 <sup>[8]</sup>	60 ~ 80 <sup>[8]</sup>	99.5 ~ 99.9 <sup>[8]</sup>	<30 <sup>[12]</sup>	5 <sup>[12]</sup>
固体聚合物电解 <sup>[12]</sup>	3.6 ~ 3.8	78 ~ 82	50 ~ 80	—	<70	6
固体氧化物电解 <sup>[12]</sup>	—	74 ~ 84	700 ~ 850	99.9999	1	2

80%)<sup>[13]</sup>。虽然当时高温电解水制氢技术在成本和效率方面还不具备优势,但因其具有分布灵活、清洁、副产物有价值等优点,SOEC 高温电解水制氢技术在早期就被确立为一条重要的氢能发展路线。SOEC 经历了三十多年的发展,产氢率由约 20L/h 增大到 200Nm<sup>3</sup>/h,电解池的衰减速率由前期的 21%/1000 h 降低到 < 0.5%/1000 h,电解池寿命也达到 2.5 年以上,即 23000 h,可满足工业化的应用需求<sup>[13-14]</sup>。德国 Sunfire 公司推出的 150 kW,产氢率为 40 Nm<sup>3</sup>/h,介质为 150 °C 蒸汽的固体氧化物电解水制氢装置,已在欧洲的可再生燃料厂进行了应用示范<sup>[13]</sup>。截至 2021 年,该公司建成了世界上规模最大的制氢用 SOEC 电解槽,功率达到 720 kW,并已在工业环境中投入使用,年产氢气达 1.75×10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup><sup>[15]</sup>。

此外,还有一些新型的制氢方法,例如各种分解水制氢方法,包括直接热解法、热化学循环法、光催化法及光电化学分解法等<sup>[16-17]</sup>。直接热解法即将水加热到 2000 °C 以上直接分解,但该方法受到高温下氢气、氧气分离及耐高温材料的限制。热化学循环法可将反应温度降低至 1000 °C,但系统较为复杂,总体效率较低,还没有商业化案例。光催化法与光电化学分解法是该领域的研究热点,但尚未开发出兼顾效率、成本和性能的催化剂材料,距离产业化还有较远距离。生物质制氢技术主要有热化学法和生物法两种,前者技术远未成熟,反应速率低,不易规模化;后者因较易实现大规模生产应用而更受关注,但能耗较高,需要使用贵金属催化剂,导致成本较高,同时会产生多种副产物和杂质,增加了氢气分离纯化难度<sup>[18]</sup>。

## 2 传统炼化企业氢气网络

传统炼化企业的氢气网络主要分三部分:氢制备、氢纯化、氢使用,如图 1 所示。本部分内容将以此为序分别进行讨论。

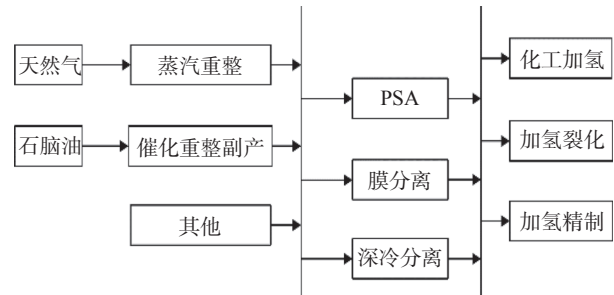


图 1 传统炼化企业氢气网络

Fig. 1 Hydrogen system of traditional refinery and chemical enterprise

### 2.1 氢制备

如前文所述,大约 92% 的氢气由煤气化、天然气蒸汽重整等工艺生产,约 7% 来自工业副产气,1% 来自电解水。烃类蒸汽转化制氢的主要技术路线如图 2 所示。原料经加氢脱硫后进行转化反应,转化气送入中温变换反应器将 CO 进一步转化为 CO<sub>2</sub>,中变气经精制及提纯手段(PSA 提纯技术)进行提纯得到氢气产品,并副产 CO<sub>2</sub> 产品<sup>[19]</sup>。研究指出,氢碳比越高,理论产氢量越大,轻质烃是更理想的原料,故传统炼化企业常以甲烷和天然气为原料制氢。石化燃料制氢工艺涉及主要反应如表 2 所示。传统制氢工艺中,通常会产生 CO<sub>2</sub>,化石燃料的使用中依然存在碳排放问题。以氨醇为原料制氢,需考虑氨的腐蚀性及其产物中 H<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 的分离难度等问题<sup>[9]</sup>。

煤气化制氢的主要工艺有 Sell 公司的干煤粉气化工工艺,GE 公司的水煤浆气化工工艺,KRUPP Uhde 公司的 Prenflo 工艺,Lurgi 公司的 Lurgi 碎煤加压气化工工艺等<sup>[20]</sup>。烃类水蒸气重整制氢工艺则主要来自于 Lurgi 公司,Linde 公司,和 Krupp Uhde 公司等<sup>[20]</sup>。

工业副产氢也是氢气的主要来源之一。催化重整装置在提高石脑油辛烷值的同时可副产大量氢气,提纯后纯度达 85% ~ 95%。高温条件下乙烯的蒸汽裂解也副产大量氢气,乙烯装置的深冷系统可生产出纯度为 95% 的氢气<sup>[21]</sup>。丙烷在 600 °C, 50 kPa 下



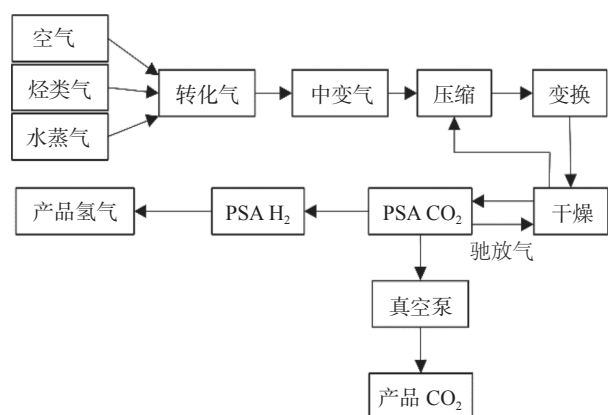


图2 烃类蒸汽转化制氢技术路线

Fig. 2 Technical route of hydrogen production from steam reforming

表2 化石燃料制氢工艺主要反应

Tab. 2 Main reactions of hydrogen production processes from fossil fuels

制氢工艺	主要反应
煤气化制氢	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
甲烷水蒸汽重整制氢	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
甲烷部分氧化制氢	$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$
甲醇裂解制氢	$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$
甲醇水蒸汽重整制氢	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
氨裂解制氢	$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$

发生脱氢反应生产丙烯的同时副产大量氢气,经PSA技术精制后,纯度可达99.99%<sup>[22]</sup>。

## 2.2 氢使用

在炼油端,对产品精制的要求越来越高。蜡油加氢、渣油加氢、柴油加氢、石脑油加氢等工艺,通过加氢精制过程去除油品中的硫、氮、氧等元素,并使烃类饱和,提升产品质量,满足各种环保要求。典型的加氢精制工艺流程如图3所示。加氢后的气体,经高低压分离器分离,高分气循环,低分气进一步提纯。

加氢裂化主要是在较高的温度(340~440℃)和压力(6.5 MPa~15 MPa)下将重质油深度加工转化为轻质油的过程。该反应降低了烃类的饱和度,减少了焦炭的产生,在炼化一体化过程中,加氢裂化技术将发挥重要作用。

在新型的千万吨级的炼化一体化炼化企业中,50%~70%的原油将加工成高附加值的石化产品,如三苯三烯及以此为原料的高分子材料产品<sup>[23]</sup>。随

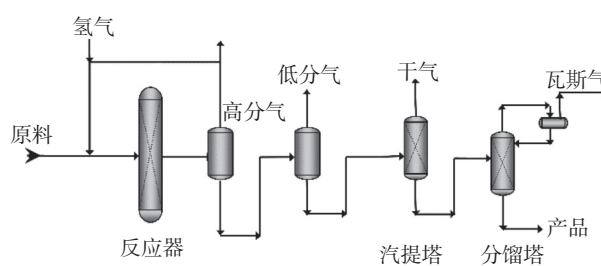


图3 加氢精制工艺流程图

Fig. 3 Flow diagram of hydrofining process

着炼化一体化的发展,炼油及石脑油裂解油品,与化学化工产品生产相贯通。化工行业主要氢化产品如表3所示,下游的化工生产也成为炼化企业中重要的用氢单元。加氢精制、加氢裂化、化工加氢生产共同构成了炼油企业的氢气使用系统。

## 2.3 氢纯化

炼厂氢纯化主要依靠PSA、膜分离、深冷分离等技术。1962年,变压吸附技术首次实现工业应用,后经UOP公司进行技术改进,开发出多床变压吸附。在国内石化行业,PSA提纯氢气技术的应用始于1972年,并于1996年后几乎全部国产化<sup>[20]</sup>。气体的膜分离研究最早开始于19世纪40年代,Permea公司于1978年首先建成一套工业化提氢膜分离装置<sup>[20]</sup>。我国膜分离技术最早应用于炼化企业回收氢领域是在齐鲁石化胜利炼油厂。

PSA技术即利用固体吸附剂在不同压力下对杂质分子的吸附能力差异来实现分离。PSA可根据进料浓度情况调整工艺,保持产品品质<sup>[24]</sup>。膜分离技术以膜两侧压力为推动力,通过各气体分子因大小结构不同而在膜中有不同的渗透速率来实现提纯,典型的渗透速率如下: $\text{CH}_4 < \text{N}_2 < \text{CO} < \text{Ar} < \text{O}_2 < \text{CO}_2 < \text{H}_2\text{S} < \text{He} < \text{H}_2 < \text{H}_2\text{O}$ 。膜分离技术装置小,流程简单,可在常温下操作,但以压差为推动力也会造成较大的压力损失,且所产氢气产品纯度有限,常需与其他工艺耦合以取得较高纯度产品。深冷分离是依据各气体分子高压(2 MPa~4 MPa)下相对挥发度的差异来实现分离。深冷分离技术原料要求高,在回收氢的过程中也对其他组分分别进行了回收,但工艺多级压缩,需要较大的冷量,能耗和设备投资均较高,且对沸点差小的混合物效果不佳,故常用于轻烃组分回收<sup>[25]</sup>。

氢纯化技术有不同的选用标准。从渣油加氢,蜡油加氢装置出来的低分气,膜分离装置出来的产

表3 化工行业氢化产品  
Tab.3 Hydrogenated products in chemical industry

分类	加氢工艺	用途
硝基加氢制胺	苯胺	用于染料, 医药, 橡胶等工业
	2,4-二氨基甲苯	有机化工原料
	环己烷	用于化工原料及溶剂
	环己胺	用于橡胶硫化促进剂, 也用于合成纤维, 染料, 气相缓蚀剂的原料
	四氢呋喃	用于溶剂, 有机合成的原料
	γ-丁内酯	是一种良好的溶剂, 也是一种重要的化学中间体
	环己醇	用于制备己二酸, 己二胺, 环己酮, 环己胺, 己内酰胺
	丁二醇	用于溶剂和增湿剂, 也用于制药和合成树脂, 在电镀行业中作增亮剂
	己二胺	用于尼龙66, 聚氨酯泡沫塑料的原料和环氧树脂固化剂
	己二酸	用于合成高聚物的原料, 也用于制增塑剂及润滑剂
芳香族及不饱和脂环族加氢为饱和脂环族及杂环化合物	山梨醇	用于维生素C的中间体
	糠醇	用于合成各种呋喃型树脂的原料, 防腐材料, 亦是良好的溶剂
	丁辛醇	用作有机合成的原料, 并广泛用于各塑料和橡胶制品中
	丙醇	有机化工原料
	醛酮羧加氢制醇	

品氢, 及连续重整装置出来的副产氢等, 氢纯度达到80%以上, 通常送去PSA氢气提纯装置, 产出纯度大于99.9%的高纯氢气。各加氢装置出来的净化瓦斯气, 氢气纯度在50%~60%之间, 可送入膜分离装置进行初步提纯, 产出纯度约90%的氢气产品。氢气浓度更低(约30%)的不含烯烃的尾气可作为制氢原料。对于加氢装置密集的厂区, 氢气不能有效回收而排入管网则会导致管网氢含量偏高, 压力不稳, 影响加热炉燃烧, 亦可对这部分氢气进行进一步回收<sup>[26]</sup>。催化干气, 焦化干气等氢含量少, 含不饱和烃较多, 含有大量有机硫的气体, 可做燃料用。

### 3 新能源制氢在传统炼化企业的应用

随着炼化一体化的发展, 许多炼化企业围绕原油转化工这个趋势, 产能向终端化工品转移, 以使价值链最大化。各企业也提出了关于未来炼化企业的各种规划, 如智能互联化炼厂, 利用数字化技术优化装置、流程及运行, 以实现低投入高收率; 从过程、设备、人员、信息互联等全面综合分析炼厂状况, 挖掘炼化企业运营潜力<sup>[27]</sup>。Honeywell 公司对未来炼化企业树立了“碳、氢、能耗、排放、水、资本”六大关键能耗分析理念<sup>[23]</sup>。该理念的核心为“碳”, 即减少分子改变及重排以提高分子转化率; “氢”, 即提高氢的利用效率; “能耗”, 即引进高效工艺消除中

间转化步骤; “排放”, 即降低净排放足迹, 将原油转化为更有价值的产品; “水”, 即减少整个设施新鲜水用量; “资本”, 即评估客户运行业务目的及当前技术资产以选择方案。

化石燃料的使用(含化石燃料制氢)面临着碳减排的问题, 且随着精制需求的提高, 炼化企业氢需求量也逐渐增大。炼化企业作为传统能源行业和碳排放大户, 在走向未来炼厂的转型中, 应如何实现碳减排的目标? 此外, 近年来我国风电、水电等可再生能源电力本身存在随机性与波动性, 导致可再生能源弃电问题日益凸显。寻找新的电量消纳途径日益紧迫。文章综合考虑了化石燃料与新能源电力在使用和发展中遇到的问题。为同时解决化石燃料和新能源电力使用及发展中所面临的问题, 文章提出了以电解水制氢技术将富余的可再生能源电力与传统炼化企业氢气网络相结合的设计, 如图4所示。通过在炼化企业附近布置新能源电给, 不但可以供炼厂日常用电, 还可以将因波动性大而无法直接利用的弃电部分, 直接通过电解水制氢, 供给炼厂使用。相比传统新能源电力-蓄电池储能技术, 此技术路线与炼化企业实际需求结合更紧密。与传统炼化企业采用的化石燃料制氢方法相比, 电解水制氢技术清洁无污染, 可以缓解其所面临的碳减排的压力, 在当前能源结构调整的大背景下具有很好的应用前景。

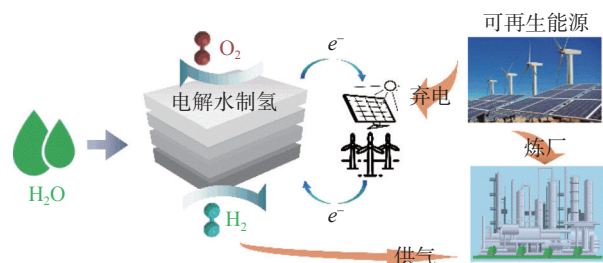


图4 新能源制氢在传统炼化企业的应用

Fig. 4 Application of water-electrolytic hydrogen production technology in traditional refinery and chemical enterprise

在氢能产业链中,包括制氢、储存、运输、应用四大环节。氢燃料的安全、低廉、便捷、规模化供应是目前氢能产业发展的重要部分,也是制约氢能利用的重要因素。以电解水制氢技术将富余的可再生能源电力与传统炼化企业氢气网络相结合,可有效利用清洁能源电力,就地应用也避免了氢气的大量长途运输问题。

通过电解水制氢技术将新能源电力与传统炼化企业氢气网络相结合,可以达到资源优化及碳减排的效果。但是这一设想在实现过程中面临着诸多挑战,尚需攻克的技术难点包括:(1)提高清洁能源电力储存效率;(2)燃料电池研发中的电极材料与电解质材料问题,高温条件下电堆的组装和密封问题及高温高湿条件下的衰减速率问题等;(3)围绕炼化企业氢制备、氢纯化、氢使用三部分,进行炼化企业氢气网络的优化;(4)成本控制。在技术的研发和推广过程中,在设法提高效率 and 耐久性的同时,还需要时刻关注材料以及系统研制的成本是否能被市场所接受。

#### 4 结论

传统炼化企业在生产过程中会产生大量碳排放,同时为满足自身工艺需求需消耗大量的氢气,而制氢的过程依赖化石燃料亦会造成大量碳排放。另一方面,光电、风电、水电等可再生能源电力可大幅降低碳排放,但其本身存在的波动性问题对实际应用造成一定的难度。文章围绕化石燃料与新能源电力使用和发展中所面临的问题与挑战,梳理了氢气制备技术的应用与发展,尤其关注了电解水制氢技术的应用发展,并分氢制备、氢使用、氢纯化三部分详细综述了传统炼化企业的氢气网络状况。通过总结,

文章提出了以电解水制氢技术为媒介,将富余的新能源电力与传统炼化企业的氢网络相结合的设计。在当前能源结构调整的大背景下,该设想具有很好的应用前景。新能源制氢在传统炼化企业的应用还面临着诸多挑战。最后,文章针对新能源制氢在传统炼化企业的应用进行展望,并进一步剖析了实现该设想仍需攻克的技术难点。

#### 参考文献:

- [1] 王新平,苏畅,文虎,等. 双碳战略下中国能源工业转型路径研究 [J]. *技术与创新管理*, 2022, 43(2): 141-150. DOI: 10.14090/j.cnki.jscx.2022.0202.  
WANG X P, SU C, WEN H, et al. Research on China's energy industry transformation path under double carbon strategy [J]. *Technology and Innovation Management*, 2022, 43(2): 141-150. DOI: 10.14090/j.cnki.jscx.2022.0202.
- [2] 赵卫东,赵越. 工业领域实现“双碳”目标常见误区分析及对策建议 [J]. *工业技术创新*, 2022, 9(1): 63-69. DOI: 10.14103/j.issn.2095-8412.2022.01.010.  
ZHAO W D, ZHAO Y. Analysis of common misunderstandings in realizing the "Double Carbon" goal in industry and countermeasures [J]. *Industrial Technology Innovation*, 2022, 9(1): 63-69. DOI: 10.14103/j.issn.2095-8412.2022.01.010.
- [3] 庞凌云,翁慧,常靖,等. 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 356-367. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.26.  
PANG L Y, WENG H, CHANG J, et al. Pathway of carbon emission peak for China's petrochemical and chemical industries [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 356-367. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.26.
- [4] ZHAO H, WU Q, HU S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support [J]. *Applied Energy*, 2015(137): 545-553. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.103.
- [5] DÍAZ-GONZÁLEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(4): 2154-2171. DOI: 10.1016/j.rser.2012.01.02.
- [6] SUNDARARAGAVAN S, BAKER E. Evaluating energy storage technologies for wind power integration [J]. *Solar Energy*, 2012, 86(9): 2707-2717. DOI: 10.1016/j.solener.2012.06.013.
- [7] FOLEY A M, LEAHY P G, MARVUGLIA A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation [J]. *Renewable Energy*, 2012, 37(1): 1-8. DOI: 10.1016/j.renene.2011.05.033.
- [8] 陈彬,谢和平,刘涛,等. 碳中和背景下先进制氢原理与技术研究进展 [J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 106-116. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100686.

- CHEN B, XIE H P, LIU T, et al. Principles and progress of advanced hydrogen production technologies in the context of carbon neutrality [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54 (1): 106-116. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100686.
- [9] 聂家波, 邓建悦. 燃料电池用氢气的制备工艺探讨 [J]. *化工技术与开发*, 2021, 327(8): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9905.2021.08.013.
- NIE J B, DENG J Y. Discussion on preparation technology of hydrogen for fuel cell [J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2021, 327(8): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9905.2021.08.013.
- [10] 何泽兴, 史成香, 陈志超, 等. 质子交换膜电解水制氢技术的发展现状及展望 [J]. *化工进展*, 2021, 40(9): 4762-4773. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0429.
- HE Z X, SHI C X, CHEN Z C, et al. Development status and prospects of proton exchange membrane water electrolysis [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(9): 4762-4773. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-0429.
- [11] 孟凡, 张惠铃, 姬姗姗, 等. 高效电解水制氢发展现状与技术优化策略 [J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2021, 38(6): 702-713. DOI: 10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180.
- MENG F, ZHANG H L, JI S S, et al. Progress and technology strategies of hydrogen evolution reaction by high efficiency water electrolysis [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2021, 38(6): 702-713. DOI: 10.13482/j.issn1001-7011.2021.10.180.
- [12] 李星国. 氢气制备和储运的状况与发展 [J]. *科学通报*, 2022, 67(增刊1): 425-436. DOI: 10.1360/TB-2021-0715.
- LI X G. Status and development of hydrogen preparation, storage and transportation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67 (Supp. 1): 425-436. DOI: 10.1360/TB-2021-0715.
- [13] 位召祥, 张淑兴, 刘世学. 固体氧化物电解制氢技术现状及面临问题分析 [J]. *科技创新与应用*, 2021, 11(35): 36-39. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2021.35.009.
- WEI Z X, ZHANG S X, LIU S X. Development status and problems of hydrogen production by IGH temperature solid oxide electrolysis [J]. *Technology Innovation and Application*, 2021, 11(35): 36-39. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2021.35.009.
- [14] SCHEFOLD J, BRISSE A, POEPKE H. 23,000 h steam electrolysis with an electrolyte supported solid oxide cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 13415-13426. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.072.
- [15] 曹军文, 张文强, 李一枫, 等. 中国制氢技术的发展现状 [J]. *化学进展*, 2021, 33(12): 2215-2244. DOI: 10.7536/PC201128.
- CAO J W, ZHANG W Q, LI Y F, et al. Development status of hydrogen production technology in China [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 33(12): 2215-2244. DOI: 10.7536/PC201128.
- [16] 李方园, 侯永江, 国洁, 等. 非贵金属光电催化材料分解水制氢研究进展 [J]. *应用化工*, 2021, 50(11): 3206-3209. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20211011.001.
- LI F Y, HOU Y J, GUO J, et al. Research progress of non-precious metal photoelectrocatalytic materials splitting water to produce hydrogen [J]. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(11): 3206-3209. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20211011.001.
- [17] 杨玉蓉, 张坤. 光催化剂分解水制氢性能研究 [J]. *黑河学院学报*, 2021, 12(5): 180-181. DOI: 10.3969/j.issn.16749499.2021.05.058.
- YANG Y R, ZHANG K. On the performance of photocatalytic water splitting [J]. *Journal of Heihe University*, 2021, 12(5): 180-181. DOI: 10.3969/j.issn.16749499.2021.05.058.
- [18] LIU W, LIU C, GOGOI P, et al. Overview of biomass conversion to electricity and hydrogen and recent developments in low-temperature electrochemical approaches [J]. *Engineering*, 2020, 6(12): 1351-1363. DOI: 10.1016/j.eng.2020.02.021.
- [19] 高宠明. 耦合制氢装置的炼厂氢气网络综合优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.003410.
- GAO C M. Comprehensive optimization of refinery hydrogen network for coupling hydrogen production unit [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.003410.
- [20] 孙雪婷, 林堂茂. 炼厂制氢技术发展现状 [J]. *当代化工*, 2022, 51(2): 451-455. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.02.007.
- SUN X T, LIN T M. Development status of hydrogen production technology in refinery [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022, 51(2): 451-455. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.02.007.
- [21] 瞿国华. 炼厂用氢的低成本战略探讨 [J]. *石油化工技术经济*, 2007, 109(2): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1099.2007.02.005.
- QU G H. Study on cost leadership strategy of hydrogen utilization in petroleum refining plants [J]. *Techno-Economics in Petrochemicals*, 2007, 109(2): 19-22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1099.2007.02.005.
- [22] 王首宝, 莫力根. 丙烷脱氢尾气精制氢气过程中PSA技术的应用研究 [J]. *石化技术*, 2020, 27(1): 253-256. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0235.2020.01.160.
- WANG S B, MO L G. Application of PSA technology in the process of hydrogen production from propane dehydrogenation tail gas [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2020, 27(1): 253-256. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0235.2020.01.160.



- [23] COUCH K. 未来炼厂白皮书六大关键能效分析 [R]. 厦门: 霍尼韦尔, 2021.  
COUCH K. White paper on the future refinery-analysis of 6 critical efficiencies [R]. Xiamen: Honeywell, 2021.
- [24] 孙建怀. 利用PSA技术回收炼油厂干气中氢气的实践 [J]. *炼油技术与工程*, 2018, 48(5): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1002-106X.2018.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-106X.2018.05.002).  
SUN J H. Commercial application of PSA process to recover hydrogen from refinery dry gas [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2018, 48(5): 6-11. DOI: [10.3969/j.issn.1002-106X.2018.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-106X.2018.05.002).
- [25] 王永锋, 张雷. 氢气提纯工艺及技术选择 [J]. *化工设计*, 2015, 25(2): 14-17. DOI: [10.15910/j.cnki.1007-6247.2015.02.004](https://doi.org/10.15910/j.cnki.1007-6247.2015.02.004).  
WANG Y F, ZHANG L. Hydrogen purification process and technology selection [J]. *Chemical Engineering Design*, 2015, 25(2): 14-17. DOI: [10.15910/j.cnki.1007-6247.2015.02.004](https://doi.org/10.15910/j.cnki.1007-6247.2015.02.004).
- [26] 白尚奎, 周伟民, 田婷婷, 等. 膜分离与变压吸附耦合技术在炼厂氢气回收中的应用 [J]. *天然气化工 (C1 化学与化工)*, 2021, 46(增刊1): 113-117. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2021.zl.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9219.2021.zl.018).  
BAI S K, ZHOU W M, TIAN T T, et al. Application of membrane separation and PSA coupling technology in hydrogen recovery in refineries [J]. *Natural Gas Chemical Industry*, 2021, 46(Supp. 1): 113-117. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9219.2021.zl.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9219.2021.zl.018).
- [27] 周麓波. 构建“未来炼厂”正当时 [J]. *流程工业*, 2021(3): 10-13.  
ZHOU L B. Time to build the "Refinery of the Future" [J]. *Process*, 2021(3): 10-13.

## 作者简介:



史倩

史倩 (第一作者)

1990-, 女, 河北邢台人, 工程师, 工学博士, 主要从事化工成套工艺技术开发 (e-mail) shiq.bjhy@sinopec.com。

## 过良

1980-, 男, 河南长葛人, 研究员, 工学博士, 主要从事化工成套工艺技术开发 (e-mail) guol.bjhy@sinopec.com。



张永亮

张永亮 (通信作者)

1989-, 男, 河北邢台人, 研究员, 工学博士, 博士后, 主要从事固体氧化物燃料电池/电解池研究 (e-mail) zylthu15@163.com。

(编辑 叶筠英)