



# 氢能、碳减排与可持续发展

张春晖<sup>1</sup>,肖楠<sup>2</sup>,苏佩东<sup>1</sup>,唐元晖<sup>1</sup>,吴盟盟<sup>2</sup>,刘新民<sup>2</sup>,刘建军<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京),北京 100083; 2. 中关村至臻环保股份有限公司,北京 100070)

**摘要:**氢能是全球公认的二次清洁能源,具有储量丰富、燃烧高效、产物清洁、运输方便等优点。“双碳”背景下,我国将初步建设氢能供给体系,以工业副产氢和可再生能源制氢并就近利用为主线,推进氢能产业健康、有序、可持续发展。首先,系统地梳理了氢能的发展历史与现状,明晰了氢能在我国能源绿色低碳转型和高质量发展中的重要战略定位;然后,分别从制氢、储氢运氢以及氢能应用3个方面阐述了相关技术的升级与换代,深度分析了我国氢能产业发展面临的主要问题,并结合我国的“双碳政策”给氢能的可持续发展提供了建议。

**关键词:**氢能;碳减排;氢燃料发动机;电解;可持续发展

中图分类号:TK91 文献标志码:A 文章编号:1003-0506(2023)07-0001-09

## Hydrogen energy, carbon emission reduction and sustainable development

Zhang Chunhui<sup>1</sup>, Xiao Nan<sup>2</sup>, Su Peidong<sup>1</sup>, Tang Yuanhui<sup>1</sup>,  
Wu Mengmeng<sup>2</sup>, Liu Xinmin<sup>2</sup>, Liu Jianjun<sup>2</sup>

(1. China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Zhongguancun Zhizhen Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** Hydrogen energy is recognized as a secondary clean energy owing to its extensive sources, high combustion efficiency, clean products, convenient transportation and so on. Under the background of "dual carbon", China will initially establish a hydrogen energy supply system, focusing on hydrogen production from industrial by-products and renewable energy and its utilization nearby, and to promote the healthy, orderly, and sustainable development of hydrogen energy industry. In this paper, we systematically combed the development history and current situation of hydrogen energy, and clarified the important strategic positioning of hydrogen energy in China's green and low-carbon transformation and high-quality development. In addition, the potential problems for hydrogen energy development and upgrading of relevant technologies were discussed from hydrogen production, hydrogen storage and transportation and hydrogen energy application, respectively. The main problems faced by the development of China's hydrogen energy industry was deeply analyzed, and finally, we pointed out some advices for hydrogen energy development in combination with China's "dual carbon" policy.

**Keywords:** hydrogen energy; carbon emission reduction; hydrogen fuel engine; electrolysis; sustainable development

化石能源是决定当今文明的本源,然而,自从18世纪工业革命以来,人类消耗煤炭等化石燃料向大气中排放二氧化碳和气态污染物的数量不断增加,导致生态破坏、环境污染以及地球的大气层充满过多的二氧化碳气体,使太阳照射到地球的热量无法得到有效扩散,地球产生“温室效应”。温室效应导致了全球气候变暖、土地沙漠化、病虫害增加和极

端气候的加剧等自然危害,温室效应还会导致气候变暖使南北极冰川融化,从而导致海平面上升、农作物减产和冰川融化等社会危害<sup>[1]</sup>。因此,近几十年来,各主要工业发达国家都在积极地采用太阳能、水能、风能、氢能、生物能、核能、地热能、潮汐能等新能源替代传统化石燃料方面的研发和实际应用。其中,由于氢是宇宙中分布最广泛的物质(在地球上

收稿日期:2023-01-31;责任编辑:郭海霞 DOI:10.19389/j.cnki.1003-0506.2023.07.001

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52170096)

作者简介:张春晖(1973—),男,河北衡水人,教授,博士,博导,2009年毕业于中国矿业大学(北京),主要研究方向为环境材料、环境工程与环境模拟。

引用格式:张春晖,肖楠,苏佩东,等.氢能、碳减排与可持续发展[J].能源与环保,2023,45(7):1-9.

Zhang Chunhui, Xiao Nan, Su Peidong, et al. Hydrogen energy, carbon emission reduction and sustainable development[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(7): 1-9.

主要以化合态的形式出现,它构成了宇宙质量的 75%),氢气在世界能源(以及经济)中完全取代所有化石燃料的问题现在具有战略意义<sup>[2]</sup>。氢能作为替代能源,具有诸多优势,如氢具有燃烧热值高的特点,是汽油的 3 倍、酒精的 3.9 倍、焦炭的 4.5 倍;氢燃烧的产物是水,是最干净的能源;氢能具有储量大、转化效率高、没有温室气体排放、便于贮存和运输且安全性高等优势。氢能在 21 世纪有可能成为一种举足轻重的能源。随着氢气“产、储、运”相关技术的逐步成熟,氢能的各项成本快速下降,其应用

到各个领域的潜力日益显现。到 2030 年,氢能将为炼油、化肥、汽车燃料等 22 种终端应用市场提供强有力的碳减排解决方案,也将成为最具有竞争力的能源替代品(图 1)<sup>[3]</sup>。当前,氢能已成为国际议程的热点话题。中国氢能联盟的统计数据指出,在全球 GDP 占比近 44% 的 20 多个国家中,具有完整国家级氢能战略的国家有 9 个,同时还有 11 个国家正在规划国家级别的氢能战略。国际氢能理事会预测,到 2050 年,氢能将占世界能源总量的 18%<sup>[4]</sup>。

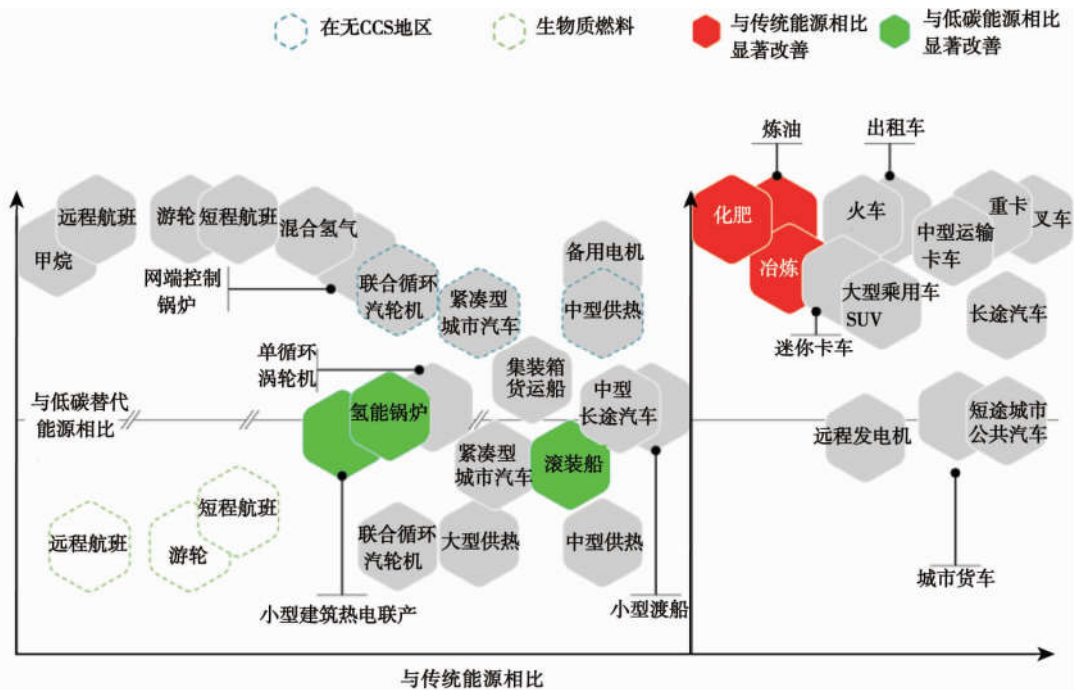


图 1 氢能作为替代能源的优势

Fig. 1 The advantage of hydrogen energy as an alternative energy source

自从 2020 年 9 月我国承诺 2030 年前实现“碳达峰”、2060 年前实现“碳中和”目标后,作为世界最大的能源消费国和碳排放国,实现“碳中和”目标对我国能源和经济可持续发展提出了更高要求。根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书 2020》,氢能将为 2060 年“碳中和”目标的实现做出重大贡献,在重工业、运输及供暖等高碳排放行业中发挥至关重要的作用,届时氢气的年需求量将从目前 3 300 多万 t 增加到 1.3 亿 t 左右,能源结构向可再生能源占主体方向转型(图 2)<sup>[5]</sup>。然而,目前我国能源消费结构中化石能源占比仍高达 80% 以上,我国要在经济、环境可持续发展的前提下实现“碳达峰”和“碳中和”仍然任重道远。因此,氢能作为完全零排放的清洁能源,其大规模应用可帮助人们在工农业活动和生活中实现脱碳、固碳甚至负碳,并有可能使我国在可持续发展的前提下,提前实现“碳达峰”和

“碳中和”目标<sup>[6]</sup>。

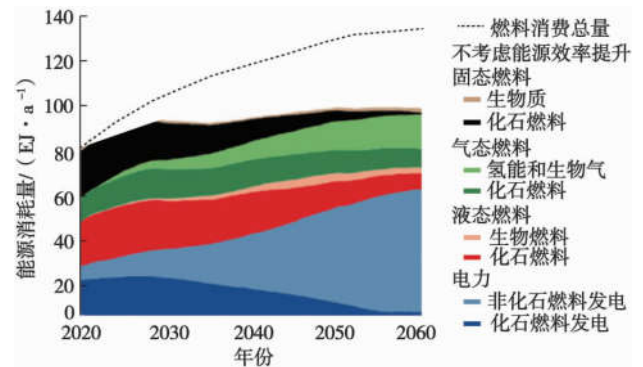


图 2 中国能源体系的转型<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Transformation of China's energy system

我国“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要中将氢能和储能列为前瞻谋划的六大未来产业之一。截至 2021 年底,全国已有 16 个省(或市、自治区)

制定了氢能发展规划,北京、山东、河北、天津、四川、浙江和宁夏等省市发布了氢能相关政策或规划,明确了氢能产业的发展目标,其余省市则颁布了包括氢燃料汽车在内的一系列政策规划,确立了氢能产业的建设目标。目前,北京市把氢能产业主要聚集在大兴氢能示范区、中关村(房山)氢能产业园、中关村延庆园氢能产业园和昌平区能源谷4个集中区域,在投资、优惠政策和产业孵化等方面给予相关企业和研发机构大力支持。据中国氢能联盟的测算,到2030年,中国氢能需求将由目前的2000多万t提高到3500万t,在终端能源占比中占比由不到3%提升至5%;到2050年,氢能的需求量将进一步提升至6000万t,其在终端能源中的占比也将提升至10%以上,产业链年产值可达12万亿元。

然而,对于氢能的大规模应用,还急需解决制氢成本的经济性、储氢和氢能使用过程中的安全性以及氢能应用中的高效性(即储氢密度与储氢速率)等现实问题<sup>[7]</sup>。本文将重点从制氢、储氢和氢能应用等方面介绍氢能发展的历史、现状与未来发展趋势,并探讨氢能发展与碳减排和可持续发展之间的内在联系,力求为后续研究提供方向性参考。

## 1 氢能发展历史与现状

### 1.1 氢能发展历史

1970年,氢经济(Hydrogen Economy)概念由John Bockris在美国通用汽车公司技术中心演讲时首次提出。氢经济是将氢作为一种低碳燃料使用,如用于供暖、氢能汽车、季节性能源储存和远距离能

源运输等。为了逐步淘汰化石燃料并限制全球变暖,氢开始被用作燃烧燃料,只向大气释放干净的水,而不向大气释放二氧化碳。早在20世纪90年代中期,氢就作为环保的可持续能源而得到重视,但此后至今几十年的发展进程却与人们的期望相差甚远。截至目前,氢气主要用作生产氨、甲醇和炼油过程等的工业原料。氢能作为一个“产业”在各国都处于初步发展阶段<sup>[8]</sup>。

氢能的相关环节与涉及领域逐渐细化,产业链也日益完善,主要可分为上游制氢、中游储运和下游应用。目前,我国的氢能产业发展,无论从制氢、储氢和运氢,还是在氢能利用方面都还尚属萌芽阶段。氢能的主要应用领域包括电力、供暖、交通运输、军事、建筑供热、氢能冶金和氢能化工等。其中,交通运输领域中氢燃料电池汽车产业的热度最高。迄今为止,具有相关氢能产业政策的省市几乎都以燃料电池汽车及其产业链作为氢能发展的重点与主导方向<sup>[9]</sup>。今后一段时间,我国将以交通运输领域作为应用市场发展的突破口,逐步向储能、工业和建筑领域氢能应用等方向发展<sup>[10]</sup>。

### 1.2 氢能发展现状

#### 1.2.1 制氢

氢作为二次能源,又称能源载体,获取渠道多种多样,按照所需原料和资源(天然气、石油、煤炭、生物质、水等)以及相关的温室气体排放情况,依照惯例通常按照低二氧化碳、无二氧化碳和无碳生产工艺路线,可把制氢过程大体分为灰氢、蓝氢、蓝绿氢和绿氢<sup>[11]</sup>,如图3所示。

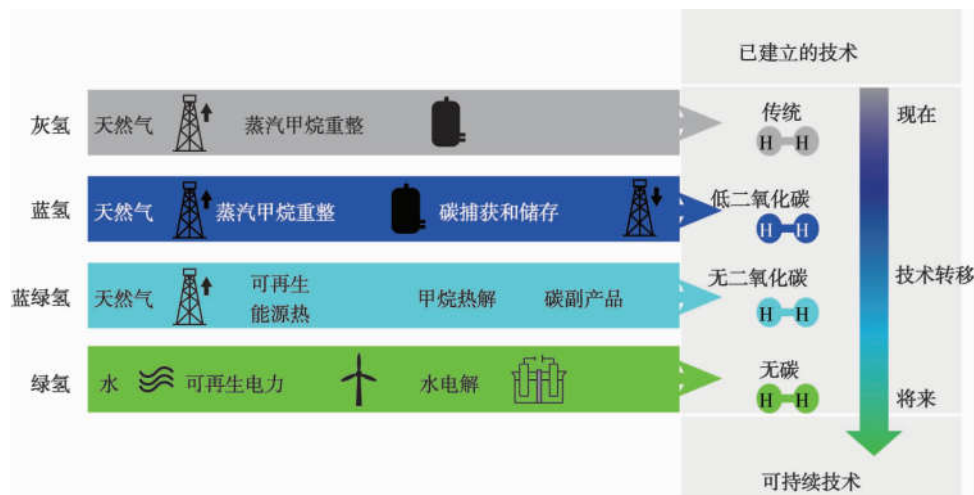


图3 不同的制氢工艺路线

Fig. 3 Different hydrogen production process routes

在未来的氢经济中,要求最大限度地减少氢气生产对生态环境的影响。基于产氢过程对外在环境

的影响程度,一般把传统的通过煤、石油或天然气等化石能源重整或冶金、焦化等过程的工业副产品提

取得到的氢称为“灰氢”,虽然上述技术已相对成熟,成本也已得到有效控制,但在生产过程中依旧会带来二氧化碳排放。将“灰氢”与碳捕获和封存技术相结合所制备出的氢气称为“蓝氢”,“蓝氢”过程具有低二氧化碳排放的特征。“蓝绿氢”过程则在“蓝氢”的基础上,实现了碳的转化利用并制成含碳副产品。“绿氢”指通过水电解产生的氢,这一过程属于清洁、绿色的可再生制氢,但成本是限制其进一步发展的最大阻力。“蓝绿氢”和“绿氢”过程都没有二氧化碳气体排放<sup>[11]</sup>。

目前,在我国的氢能产业链成本组成中,制氢所需成本占比超过50%,占比最高。因此,上游制氢环节的经济市场布局将对氢能产业的规模化发展起到重要支撑作用。如今,中国已经是世界制氢第一大国,2021年,中国氢气产量约为3300万t,位居全球第一。从制氢方式上来分,制氢可分为化石燃料制氢(如石油和煤制氢)、工业副产品制氢(如氯碱副产品制氢、焦炉气制氢、丙烷脱氢和乙烷裂解制氢等)、高温分解制氢(如甲醇裂解和氨分解等)、电解法制氢(如水电解、光解水、风能和核能制氢等)和其他方式制氢(如生物质制氢和微生物制氢等)。中国地大物博,化石能源丰富,若能将其与碳捕获、利用和封存技术相结合,将为我国带来稳定、经济的规模化氢能供应。目前,我国氢能供给结构中99%以上的氢能来自化石能源制氢。然而,化石燃料制得的氢毕竟属于“灰氢”,有二氧化碳排放,不是最环保的。工业副产品制氢占比小,难以形成规模。对于生物质和微生物制氢,由于制氢速率慢,距离规模化应用还有很大一段距离。

近年来,作为“绿氢”的电解水制氢,越来越受到人们重视,虽然目前我国电解水制氢占比不足1%<sup>[12]</sup>。由于电解水制氢过程无二氧化碳排放,因此,电解水制氢是我国氢能真正实现清洁生产的工艺路线。但制氢的昂贵成本导致电解水制氢目前还难以得到大规模推广。目前,电解水制氢成本接近30元/kg,主要是电耗(按目前工业用电价格0.4元/kWh计),远高于天然气制氢或煤制氢10~15元/kg的制氢成本,毫无竞争优势。我国的电力系统主要由火电驱动,若将其运用于电解制氢,火电过程的碳排放强度不仅高于煤制氢与天然气制氢,更会与“双碳”政策背道而驰<sup>[13]</sup>。目前,中国是世界上最大的可再生能源发电国,若能将每年废弃的风能、光能和水能转换成电能用于电解水制氢,可产氢气约200万t。随着国家、地方政策的推进与科技的进步,中国可再生能源格局不断壮大,若能将电解水与

光伏、风电等可再生电力耦合,则可实现绿色制氢的规模化推广。

### 1.2.2 储氢运氢

储氢方式类型较多,其中以压缩气态储氢、低温液态储氢、吸附储氢和液氨/甲醇储氢等较为常见。目前,压缩气态储氢以其初始投资成本低、技术难度低等优势应用最为广泛。低温液态储氢主要用于航空领域,民用领域有待进一步推广。液氨/甲醇储氢和吸附储氢目前主要处在研发阶段。储氢的关键问题是能效和安全。目前普遍采用的高压气态储氢方式存在储氢密度低、压缩能耗高和储氢罐体体积小、成本高等缺点。

氢的运输按照氢的形态可分为气态运输、液态运输和固体运输。按运输方式可分为陆运、海运和管道运输。其中,气态和液态运输是目前主流的运氢方式。高压气态运输主要有拖车汽运和管道运输2种方式。韩国主要采用“高压气态+管道”的运输方式,日本正在探索通过液氢船将澳大利亚褐煤制氢通过海运运回日本国内。我国现阶段氢的运输方式主要以20MPa高压气态拖车为主。在加氢站日需求量500kg以下及短距离运输的情况下,氢气拖车是比较经济的。但对于长距离运输来讲,则应该考虑管道输氢<sup>[14]</sup>。鉴于成本以及技术制约,固态氢气运输目前还处于实验室阶段。近年来,在我国和西方发达国家,氢燃料电池新能源汽车的增长很快。燃料电池汽车行业的发展离不开加氢站的建设,加氢站能够为燃料汽车以及用氢装置的重要供氢气场所。我国在氢能加注方面,累计已建成加氢站超过250座,约占全球总数的40%,加氢站数量居于世界第一。35MPa智能快速加氢机和70MPa一体式移动加氢站技术也取得了较大进展<sup>[15]</sup>。

### 1.2.3 氢能应用

氢能主要以燃烧和通过燃料电池发电的形式在工业和民用中得到应用,如汽车、飞机的发动机燃料,以及以氢作燃料的叉车、有轨电车、电船等<sup>[16]</sup>。其中,氢燃料电池汽车备受瞩目,氢燃料电池可以将化学能转化成为电能,是目前氢能的重要应用领域。氢燃料电池汽车与传统燃油汽车相比污染更低,与电动汽车相比,则有续航长、加注时间短等优点。因此,其在未来有望得到极大发展<sup>[17]</sup>。我国氢燃料电池汽车产业发展迅速。截至2021年,全球主要国家氢燃料电池汽车保有量为49562辆,中国占18%,保有量约为8922辆。

氢能源在工业方面的应用有:航天火箭的燃料供给、集成电路板的批量生产、作集体管和显像管的

保护气,以及采用燃料油、粗柴油和重油来制造氢气等。在冶金行业中,还原剂常选用氢气,一方面可作金属加工过程的高温保护气体,另一方面则可以在精细有机物加工过程中作原料合成氨气。近年来,对于工业领域氢能应用,我国也有了长足进展。例如,山西某钢铁集团凭借其在钢铁、化工、焦化行业的能源互补优势,在国内带头设下了“钢—焦—化—氢”的全闭环低碳产业布局,以高炉、转炉和焦炉煤气合成乙二醇、液化天然气、氢气等产物,在降低污染、减少碳排放之余,还可在高炉中实现氢能冶炼。我国公司正在和德国公司合作,开展煤化工副产品制氢及应用方面的前期工作。

## 2 氢能未来的发展趋势

### 2.1 制氢

鉴于采用化石燃料产氢的“灰氢”路线具有不环保、运行成本高且排放二氧化碳总量高等问题,通过资料和实地调研、专家咨询等方法,笔者认为未来制氢产业最有发展前景的有:褐煤等低阶煤制氢、电解水制氢和微生物制氢等几种形式。

褐煤是煤化程度最低的矿产煤,化学反应性强,在空气中容易风化,不易储存和运输,燃烧时对空气污染严重。因此,如何高效利用褐煤是近年来煤炭科研工作者的一个重要任务之一。太原理工大学刘静雅<sup>[18]</sup>采用褐煤和造纸黑液制备成水煤浆作为煤制氢的反应介质,以水煤浆为原料,采用超临界方法,可在同一反应体系中完成煤的热解、气化、净化、转化以及分离过程,缩短工艺流程,反应介质为水,成本低,可以免去煤的干燥过程,且无环境污染问题。昆明理工大学王奕雪等<sup>[19]</sup>采用间歇式超临界水反应装置,以滇池疏浚底泥和褐煤为原料进行超临界水气化制氢实验,得到较高的碳气化率和产氢率,并同时可达到处置底泥的目的。对于以化石燃料为原料的“灰氢”路线,褐煤制氢,尤其是褐煤矿坑口制氢,可望成为未来规模制氢的技术路线之一。

目前工业上常用的制氢方式中,电解水制氢所占比例很小,约 4%,远低于工业副产品和工业废气制氢、煤制氢和天然气制氢的规模。目前新能源电解水制氢的发展瓶颈主要是电解水制氢设备成本和电耗成本较高,随着电解槽、电极、双极板成本的下降和光能、风能等新能源发电成本的降低,以新能源作为能源供给的电解水为主流工艺的“绿氢”路线将会越来越普及,这种方法也被称为“多能互补制氢”<sup>[20]</sup>。据国家发改委在《中国 2050 年光伏发展展望(2019)》中的预测,未来一段时间内光伏发电成

本将有大幅下降,预计到 2035 年光伏发电成本可下调至当前成本的 50%,达到 0.2 元/kWh,到 2050 年更是可下调至当前的 30%,达到 0.13 元/kWh。电力成本的变动会对氢气成本带来一定影响,前者每下调 0.1 元/kWh,后者便会随之下调 0.5 元/m<sup>3</sup>。按上述预测基准,到 2035 年和 2050 年,制氢成本将会有较大变化,分别为 1.67 元/m<sup>3</sup> 和 1.32 元/m<sup>3</sup>,从而接近和低于当前成本最低的煤制氢。若届时有关政策的支持,电解制氢成本将有望与化石能源制氢成本相接近<sup>[21]</sup>。采用风能、光能等新能源电解水制氢的工艺路线如图 4 所示。

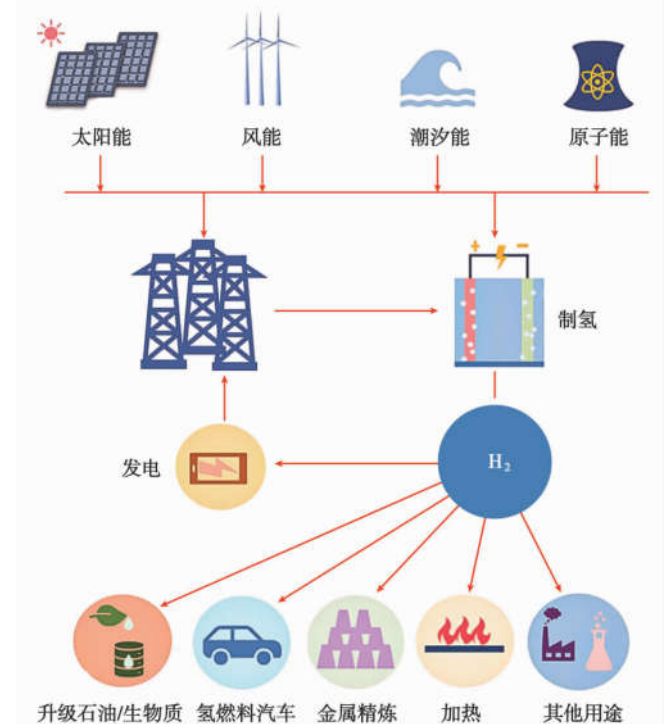


图 4 新能源制氢工艺路线<sup>[19]</sup>

Fig. 4 New energy hydrogen production process routes

除上述降成本方式外,还可以通过提升电解槽效率的办法来实现,即通过材料创新、技术融合等形式研发高性能的电极材料,对槽体结构进行优化设计,在提升转化效率的同时降低成本与功耗。其中,电极材料的提升对电解水制氢的效能提升和成本降低最为有效。近年来,我国公司开发出孔隙率高、孔径均匀的多孔金属电极用于电解水制氢,极大地降低了电解水制氢的成本,是一种积极的尝试。预计到 21 世纪中叶,电解水制氢占比将达到 64%,灰氢占比将达到 21%。

氢气还可以利用工农业废料通过微生物发酵制取,即微生物制氢。微生物产氢最大的优点是低能耗,最大的缺点是产率慢。煤炭地下生物气化是利用微生物在地下将煤中有机组分进行多级降解后将

固态资源转化为气态资源的一种开采方法。近年来,中国矿业大学肖栋研究团队在煤炭高效制氢菌的筛选与富集方面取得了一定的研究进展。迄今为止,微生物产氢工艺还刚刚起步,且均处实验室阶段,难以实现工业化应用,无论是技术成熟度还是技术经济性,都无法与工业产氢相比。微生物产氢技术在工业化应用的路上还需有一段时间成长,但其潜力无疑是巨大的<sup>[22]</sup>。

## 2.2 储氢运氢

氢气能否得到安全、高效利用,能否得到大规模发展,其关键就在储运。目前,氢气的储存已较为成熟,常规途径主要有物理类固态储氢(如多孔材料及金属合金等)、高压气态储氢及深冷液化储氢等。常规的压缩气体罐无法提供较高的储存效率,而液氢的贮存则需能提供 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件的深度制冷技术,该技术尚无法实现大规模应用。对于气态和液态储氢和输运,若未来能够使用现有的石油和天然气运输管道及远洋运输石油或天然气的海运方式,则会大大降低氢气的运输成本,是一种非常值得研究的运氢方式。

在上述3种储氢方式中,固态储氢的优势明显、便于管理,也最具有发展潜力。在未来,储氢合金技术的发展与普及有望使固态储氢方式成为主流。此外,无机物储氢和有机物储氢2种形式随着对固态储氢的研究深入而出现。其中,无机物储氢是利用化学键和离子型非金属氢化物之间的交互作用对氢气进行储存,释放氢气的原理则和储氢合金类似,在加热后储存的氢气便会被释放;有机物储氢是一种备受瞩目的储氢技术,是以苯或甲苯等液态试剂为反应物,通过与氢生成环乙烷来实现氢的储存,这种方式不需要耐高压装置,但在释放时需要催化剂进行脱氢反应<sup>[23]</sup>。同时,对于使用终端,尽快增大加氢站的数量也至关重要。

## 2.3 氢能应用

在我国,氢燃料汽车电池的发展最为迅速。如今,内燃机已不再能满足日益严格的环保要求,被其他绿色能源替代是其难以逃避的命运。燃料电池的高转化效率、极致的碳减排能力使其成为最有潜力的替代品。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》指出,到2025年将初步建立较为完整的氢能供应链和产业体系,氢燃料电池汽车保有量约为5万辆。有学者认为,如果燃料电池以目前的速度继续发展,最后一家汽车发动机制造厂可能会在21世纪中叶关闭<sup>[24]</sup>。但目前氢燃料电池还有很多问题尚未解决,比如氢燃料电池的能量密度不高。

以 $1\text{ m}^3$ 容积的油箱为基准,目前铅酸电池的能量密度约为 $90\text{ kWh/m}^3$ ,燃料电池的能量密度约为 $260\text{ kWh/m}^3$ 。而汽油的能量密度约为 $8\ 600\text{ kWh/m}^3$ ,柴油的能量密度约为 $9\ 600\text{ kWh/m}^3$ 。因此,如何提高氢燃料的能量密度,是摆在科研工作者面前最艰巨的任务<sup>[25]</sup>。另外,一定要解决好氢的安全性。氢气是最轻的气体,它的扩散性极强,在密闭有限空间如何防止和处置火灾和爆炸等风险,也是亟待解决的课题<sup>[26]</sup>。目前,我国氢燃料电池和氢能汽车的发展与西方发达国家还相差甚远,其原因可归结于氢燃料电池汽车的技术与成本问题。相比于主流的电动汽车,氢燃料电池汽车需要有更复杂的技术体系支撑,这也就意味着其需要大量的资金投入,然而我国目前在该方面尚处劣势,难以实现全面追赶。在国内,只有上汽对氢燃料电池汽车进行了部署规划,而其他汽车企业均未有实质性研发落地。受技术限制,催化剂、双极板等核心材料以及高压储氢罐、空压机等重要零部件基本无法实现产业化,产业链更是无从谈起。即便如此,随着我国“双碳”政策推进,我国氢能源车产量销量增长迅速。2021年销量达1 586辆,同比2020年增长35%左右,近5年整体呈产销量上升趋势。实际上,氢能源汽车有电池和内燃机2种发展路径。若要细分,在氢内燃机方面,还可根据氢的占比分为纯氢内燃机和氢与天然气混合内燃机。氢燃料电池动力系统是将氢和氧进行催化反应而为电动机提供电能,驱动汽车行驶;而氢燃料内燃机则是把汽油换成氢,直接在发动机缸体中燃烧并转化为机械能,从而驱动汽车行驶。在氢燃料电池中氢和氧经催化后直接产生电能,过程中不发生燃烧,是一种低温反应,效率高、无污染,其燃料利用效率可以达到氢内燃机的1.5倍<sup>[27]</sup>。此外,由于其无需燃烧的特性,尾气中也不会存在氮氧化物,能够有效解决现有汽车尾气的环境污染难题。因此,氢燃料电池被业界公认为是新能源汽车的最佳解决方案。然而,高成本、低能量密度、可靠性差的标签还未从氢燃料电池上摘下,氢燃料电池汽车的规模化普及还有待时日,为其提供氢能保障的社会基础设施建设也就难以得到重视,此时便需要一种能暂时替代氢燃料电池的过渡性产品。氢内燃机与目前市面上的传统产品较为相似,在技术上也容易解决,因此用其作为过渡较为容易实现。目前,我国公司正在和德国公司合作,开展氢内燃机的合作研究并利用工业副产品制氢,预计市场应用前景较为广阔。

除氢能源汽车外,氢冶金和氢化工也是氢能应

用非常重要的领域。氢冶金是指以氢气作为还原冶炼过程中的还原剂,可分为高炉富氢冶炼和氢直接还原2种。在我国,高炉富氢冶炼主要是将焦炉煤气、天然气等富氢气体吹入高炉内完成,而氢直接还原则是以焦炉煤气为主要原料,通过氢基竖炉直接还原。如今,我国宝武集团、鞍钢集团和山西晋南钢铁等单位都在开展氢冶金方面的科研与中试应用等工作<sup>[28]</sup>。

将绿氢和煤、石油化工等相结合,能够有效弥补煤炭和石油在化工过程中富碳缺氢的不足,是值得重视的一大发展方向。若能可将可再生能源制氢技术与煤化工生产过程相耦合,既能弥补煤化工过程中的碳氢不平衡,又能够取消水煤气变换工艺以削减碳排放源头,在提高煤炭利用能效的同时大幅减少碳排放,可谓是一举多得。近年来,有学者提出基于“光伏治沙—光伏制氢—氢化工”的氢工业路线,如中石化库车绿氢项目。在国际上,部分国家也有所行动,如沙特、澳大利亚、非洲和中亚等地出现的沙漠光伏制氢项目。澳大利亚公 Aqua Aerem 和日本大阪燃气(Osaka Gas)已就 Desert Bloom Hydrogen 项目达成联合开发协议,致力于在位于澳大利亚北领地的特南特克里克研发绿氢,协议价值达107.5亿美元。这种工农产业融为一体的沙产业创新发展模式,也是一种有益的探索<sup>[29]</sup>。

### 3 氢能、碳减排与可持续发展

#### 3.1 氢能与碳减排

我国提出二氧化碳排放量力争于2030年前达到峰值,同时奋力争取在2060年前实现“碳中和”。在此背景下,“碳达峰”“碳中和”战略下脱碳成为全球氢能发展的第一驱动力,低碳清洁的氢能源成为实现“碳中和”路径的重要抓手。在政策的推动下,未来我国氢能源行业将进一步扩大市场。我国已颁布的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》中指出,我国可再生能源制氢量要达到10万~20万t/a,实现二氧化碳减排100万~200万t/a。同时,加强生产源头管控、严格要求制氢形式等政策,都为氢能赋予了清洁低碳的关键属性。

一般而言,减少二氧化碳排放的途径主要有以下5个方面:①调整能源结构,增加可再生能源的比重;②开发经济环保型技术;③节约能源、提高能源转换和利用效率;④推广应用环境友好型能源;⑤利用现有化石能源的同时,实现二氧化碳的捕集与储存<sup>[30]</sup>。氢能在这几方面都发挥着不可替代的作用。在应对全球气候变化和“碳中和”的压力下,推广氢

能源运输、氢冶金和氢化工等技术是我国重工业和交通运输业等降低碳排放的有效途径。总的来说,我国氢能源车辆应着重于重型卡车、水陆远距离运输及冬季低温运输3个领域来发展,填写现有领域与政策空白。将氢能用于公路货运获得的碳减排效果最显著,1000万t氢用于替代现有燃油货运汽车可望产生近1亿t的降碳效果<sup>[31]</sup>。各国钢铁行业正在积极探索从碳冶金向氢冶金转变。为实现“双碳”目标,钢铁行业必须在能源结构与工艺结构上革新。作为21世纪备受瞩目的清洁能源,氢能将为钢铁行业实现零碳排放提供解决方案。氢冶金技术则身负重任,将钢铁行业的高碳排放转变为零碳排放。目前,氢冶金主要有2个研究方向,即高炉富氢冶炼和氢基直接还原,其中大部分氢冶金试验的氢气都来自化石能源,但随着技术的深入,可再生清洁能源有望替代化石能源,向绿色氢冶金方向发展,钢铁行业也将随之挣脱对化石能源的依赖,碳排放问题将迎刃而解<sup>[32]</sup>。

氢主要在石化行业得到应用,在全球生产的氢中,每年有33%的氢会被用于石油炼化,27%的氢用于制备合成氨,11%的氢用于制备甲醇。在石油炼化过程中,加氢反应可分为加氢裂化、临氢降凝、加氢处理/加氢精制和润滑油加氢等类型。我国石化行业副产气排放量大,在对环境造成污染的同时,副产气中氢气、一氧化碳等有效成分随排放而浪费。氢气既是重要的化工原料,也是无碳、高效的能源,用工业副产气制备或分离提纯氢气,既减少资源浪费,又可减少二氧化碳排放。考虑二氧化碳排放和碳交易成本等因素,与煤制氢、天然气制氢、甲醇制氢和电解水制氢相比,现阶段下工业副产气制氢的综合成本优势更加明显。在“碳中和”背景下,工业副产气制氢是获取低碳氢气的有效和经济的途径,研究和开发工业副产气制氢技术,将为碳减排提供一条高效路径<sup>[33]</sup>。

#### 3.2 氢能与可持续发展

氢能作为未来最具发展前途的可再生清洁能源之一,是我国社会全面实现可持续发展的具有可操作性的主要手段。同时,氢能也已被纳入我国未来的国家能源体系。在“十四五”期间,我国将首次建设以工业副产氢、可再生能源制氢并就近利用为主线的氢能供给体系。

为加速氢能发展、尽快实现可持续发展目标,笔者认为今后一段时间,我国应在政策引导、氢能科技研发、普及推广和区域合作等方面加大支持和投入。①在政策导向上,建议各级政府行政主管部门进一

步制定有利于氢能可再生能源发展的倾斜政策,对于使用氢能的企业和个人,适当给予补贴或税收优惠等政策措施。②要把氢能技术创新摆在氢能产业发展的核心位置,突破关键核心技术,以产学研深度融合开展核心技术攻关,在基础研究和工程应用等方面提升氢能关键技术水平。加快制定氢能制、储、输、用各环节的技术和产业标准,建设氢能产品质量认证体系,创新商业模式,不断提升产业链现代化水平。促进氢能技术加速升级,推进氢能产业健康、有序、可持续发展。③加大宣传力度,对氢能进行推广普及工作,使企事业单位和个人都能了解到氢能的优势,并打消大家对于氢能安全性等方面的疑虑。④氢能的发展离不开国内和国际的区域合作。比如,我国西北部地区地广人稀,光能和风能产业发达,产生的弃电完全可以发展电解水制氢,用于我国东部和中部发达地区的能源供应。国际层面,比如我国可以和相毗邻的蒙古和俄罗斯进行氢能的深入合作,我国提供氢能相关的技术和产业投资,蒙古和俄罗斯提供场地等。以上措施,必将加快我国氢能产业快速、稳健发展,从而使我国在可持续发展之路上走得更快,进一步缩小与发达国家之间的差距。

#### 4 结论与展望

总而言之,氢能之所以作为新型替代能源,受到全球范围的关注,即可归因于科学技术的发展,又可归结于全球生态环境恶化背景下对绿色科技与清洁能源的迫切需求。氢能的发展将不仅是能源技术的一次飞跃,更会是低碳经济的制胜法宝,在我国“双碳”的强力战略扶持下,氢能势必将发挥出其巨大潜力。分析我国的氢能发展现状可知,目前我国氢能产业仍然存在理论基础和技术储备等方面的种种问题。因此,我国在今后一段时期内,应重点从政策引导、氢能科技研发、普及推广和区域合作等方面加大对氢能事业的支持力度。展望未来,在我国政府、科研院所、企事业单位和个人的共同努力下,我国的氢能产业必将实现快速、健康发展,为我国实现“双碳”战略和可持续发展奠定良好的基础。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘志逊,刘珍奇,黄文辉. 中国化石燃料环境污染治理重点及措施[J]. 资源·产业,2005,7(5):53-56.  
Liu Zhixun, Liu Zhenqi, Huang Wenhui. The key countermeasures of controlling fossil fuel environment pollution in China[J]. Resources & Industries, 2005, 7(5): 53-56.
- [2] 周健,邓一荣,李晓源. 中国氢能发展的现状、挑战与建议[J]. 环境科学与管理,2022,47(3):15-19.
- [3] 国际氢能委员会. 全球氢能观察 2021[R/OL]. (2021-07-15) <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021>.
- [4] 张永生,董舵,肖逸,等. 我国能源生产、消费、储能现状及碳中和条件下变化趋势[J]. 科学通报,2021,66(34):4466-4476.  
Zhang Yongsheng, Dong Duo, Xiao Yi, et al. Current status and trends in energy production, consumption, and storage under carbon neutrality conditions in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(34): 4466-4476.
- [5] 中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书:碳中和战略下的低碳清洁供氢体系[M]. 北京:人民日报出版社,2021.
- [6] 苏健,梁英波,丁麟,等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊,2021,36(9):1001-1009.  
Su Jian, Liang Yingbo, Ding Lin, et al. Discussion on my country's energy development strategy under the carbon neutrality target[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009.
- [7] 姚若军,高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展望[J]. 南方能源建设,2021,8(4):9-15.  
Yao Ruojun, Gao Xiaotian. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(4): 9-15.
- [8] 毛宗强,毛志明,余皓. 制氢工艺与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2018.
- [9] 陈若石. 氢能产业发展现状及建议[J]. 化学工业,2022,40(1):62-65.  
Chen Ruoshi. Development status and suggestions of hydrogen energy industry[J]. Chemical Industry, 2022, 40(1): 62-65.
- [10] 黄群慧. “十四五”时期深化中国工业化进程的重大挑战与战略选择[J]. 中共中央党校(国家行政学院)学报,2020,24(2):5-16.  
Huang Qunhui. Major challenges and strategic choices in deepening China's industrialization process during the "Fourteenth Five-Year" period[J]. Journal of the Party School of the Central Committee of the Communist Party of China (National School of Administration), 2020, 24(2): 5-16.
- [11] Hermesmann M, Müller T E. Green, turquoise, blue, or grey? Environmentally friendly hydrogen production in transforming energy systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022(90):100996.
- [12] 杜泽学,黄顺贤,曹东学. 石化低碳转型发展绿氢的挑战与建议[J]. 石油学报(石油化工),2021,37(6):1452-1459.  
Du Zexue, Huang Shunxian, Cao Dongxue. Challenges and suggestions for low-carbon transformation and development of green hydrogen in petrochemicals[J]. Chinese Journal of Petroleum (Petrochemical Engineering), 2021, 37(6): 1452-1459.
- [13] 张轩,王凯,樊昕晔,等. 电解水制氢成本分析[J]. 现代化工,2021,41(12):7-11.  
Zhang Xuan, Wang Kai, Fan Xinye, et al. Cost analysis of hydrogen

- production from electrolyzed water[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(12):7-11.
- [14] 罗佐县,杨国丰. “双碳”目标下我国氢能产业发展路线研判[J]. *当代石油化工*, 2022, 30(1):1-8, 37.  
Luo Zuoxian, Yang Guofeng. Research and judgment on the development route of my country's hydrogen energy industry under the "two-carbon" goal [J]. *Contemporary Petrochemical Industry*, 2022, 30(1):1-8, 37.
- [15] 王雨新,杨静. 我国管道输氢发展 SWOT 分析[J]. *当代化工*, 2022(3):727-731.  
Wang Yuxin, Yang Jing. SWOT analysis of pipeline hydrogen transportation development in my country [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2022(3):727-731.
- [16] 于全虎. 氢能和燃料电池及其船舶应用进展[J]. *船舶*, 2020, 31(5):69-76.  
Yu Quanhu. Advances in hydrogen energy and fuel cells and their marine applications[J]. *Ships*, 2020, 31(5):69-76.
- [17] 孙培锋,吴守城,卢海勇,等. 新能源制氢及氢能应用浅述[J]. *能源研究与信息*, 2021, 37(4):207-213.  
Sun Peifeng, Wu Shoucheng, Lu Haiyong, et al. A brief introduction to hydrogen production from new energy sources and its application[J]. *Energy Research and Information*, 2021, 37(4):207-213.
- [18] 刘静雅. 黑液煤浆的制备及其在连续式超临界水反应器中制氢[J]. 太原:太原理工大学, 2011.
- [19] 王奕雪,宁平,谷俊杰,等. 滇池底泥—褐煤超临界水共气化制氢实验研究[J]. *化工进展*, 2013, 32(8):1960-1966, 1993.  
Wang Yixue, Ning Ping, Gu Junjie, et al. Experimental study on co-gasification of Dianchi Lake sediment and lignite supercritical water for hydrogen production[J]. *Progress in Chemical Industry*, 2013, 32(8):1960-1966, 1993.
- [20] 田江南,安源,蒋晶,等. 碳中和背景下的脱碳方案[J]. *分布式能源*, 2021, 6(3):63-69.  
Tian Jiangnan, An Yuan, Jiang Jing, et al. Decarbonization scheme in the context of carbon neutrality[J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(3):63-69.
- [21] Gong Yixuan, Yao Jiasai, Wang Ping, et al. Perspective of hydrogen energy and recent progress in electrocatalytic water splitting[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022(43):282-296.
- [22] 梁建光,吴永强. 生物产氢研究进展[J]. *微生物学通报*, 2002, 29(6):81-85.  
Liang Jianguang, Wu Yongqiang. Research progress of biological hydrogen production[J]. *Bulletin of Microbiology*, 2002, 29(6):81-85.
- [23] 李争,张蕊,孙鹤旭,等. 可再生能源多能互补制—储—运氢关键技术综述[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3):446-462.  
Li Zheng, Zhang Rui, Sun Hexu, et al. A review of key technologies for renewable energy multi-energy complementary production-storage-hydrogen transport [J]. *Chinese Journal of Electrotechnical Technology*, 2021, 36(3):446-462.
- [24] 李佳琪,徐潇源,严正. 大规模新能源汽车接入背景下的电能能源与交通系统耦合研究综述[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(3):253-266.  
Li Jiaqi, Xu Xiaoyuan, Yan Zheng. A review on the coupling of electric hydrogen energy and transportation system under the background of large-scale new energy vehicle access [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2022, 56(3):253-266.
- [25] Yao Jing, Wu Zhen, Wang Huan, et al. Application-oriented hydrolysis reaction system of solid-state hydrogen storage materials for high energy density target: A review [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2022, 74(11):218-238.
- [26] Wei Ruichao, Lan Jiamei, Lian Liping, et al. A bibliometric study on research trends in hydrogen safety [J]. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Process Safety and Environmental Protection, Part B*, 2022, 159:1064-1081.
- [27] Li Xiangyu, Sun Baigang, Zhang Dongsheng, et al. Experimental study on the cycle variation characteristics of direct injection hydrogen engine [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022 (X15):100260.
- [28] 潘聪超,庞建明. 氢冶金技术的发展溯源与应用前景[J]. *中国冶金*, 2021, 31(9):73-77, 129.  
Pan Congchao, Pang Jianming. Development traceability and application prospect of hydrogen metallurgy technology [J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(9):73-77, 129.
- [29] 李彦斐,谭建生. 中蒙日韩绿氢战略合作构想[J]. *中外能源*, 2021, 26(8):1-10.  
Li Yanfei, Tan Jiansheng. Conception of China-Mongolia-Japan-Korea green hydrogen strategic cooperation [J]. *China and Foreign Energy*, 2021, 26(8):1-10.
- [30] Lebrouhi B E, Djoupo J J, Lamrani B, et al. Global hydrogen development: a technological and geopolitical overview [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(11):7016-7048.
- [31] 吕指臣,胡鞍钢. 中国建设绿色低碳循环发展的现代化经济体系:实现路径与现实意义[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 21(6):35-43.  
Lü Zhichen, Hu Angang. China's construction of a modern economic system with green, low-carbon and circular development: realization path and practical significance [J]. *Journal of Beijing University of Technology (Social Science Edition)*, 2021, 21(6):35-43.
- [32] 董金池,汪旭颖,蔡博峰,等. 中国钢铁行业 CO<sub>2</sub> 减排技术及成本研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(10):23-31, 40.  
Dong Jinchi, Wang Xuying, Cai Bofeng, et al. Research on CO<sub>2</sub> reduction technology and cost in China's iron and steel industry [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(10):23-31, 40.
- [33] 陈健,姬存民,卜令兵. 碳中和背景下工业副产气制氢技术研究与应用[J]. *化工进展*, 2022, 41(3):1479-1486.  
Chen Jian, Ji Cunmin, Bu Lingbing. Research and application of hydrogen production technology from industrial by-product gas under the background of carbon neutrality [J]. *Progress in Chemical Industry*, 2022, 41(3):1479-1486.