

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.09.003

面向碳中和的新型电力系统氢储能调峰技术研究

Researches on hydrogen storage peak-shaving technology for new power systems to achieve carbon neutrality

韩世旺¹,赵颖²,张兴宇^{1*},玄承博¹,赵田田¹,侯绪凯¹,刘倩倩¹
HAN Shiwang¹, ZHAO Ying², ZHANG Xingyu^{1*}, XUAN Chengbo¹, ZHAO Tiantian¹,
HOU Xukai¹, LIU Qianqian¹

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)能源研究所, 济南 250014; 2. 杭州中能汽轮动力有限公司, 杭州 310018)

(1. Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology, Ji'nan 250014, China;

2. Hangzhou CHINEN Steam Turbine Power Company Limited, Hangzhou 310018, China)

摘要:我国经济发展地域性差别较大,西部地区资源丰富,但经济不如东部地区,所产生的可再生能源不能完全就地消耗,需远距离外输。利用可再生能源发电是能源转化的方式之一,受季节和天气影响波动较大,所以可再生能源发电的电量难以准确预测,电网系统急需利用相应的储能技术和设施进行调峰,既可降低可再生能源的浪费,又可对电网系统进行调峰。利用氢、氨等化学能源与电力相互转化,从而使电力系统平稳运行达到储能调峰的目的。在电力充足时,剩余电力利用水电解制氢技术和合成氨技术储存,如果输出不足,储存的能量通过燃料电池和氢气发电返回输电网络。在碳中和、碳达峰背景下,阐述了新型电力系统中用于储能的氢和氨合成、利用相关技术,论述了氨用于运输、燃烧和燃料电池的优势及原理,得出氢、氨等资源在新型电力储能调峰系统中的高效、环保、经济性及新型电力系统的实用性。

关键词:碳中和;新型电力系统;氢储能;调峰;绿氢;绿氨;氨燃烧;可再生能源;电解水制氢;燃料电池

中图分类号:TK 116.2;TQ 113

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2022)09-0020-07

Abstract: Economic development varies significantly in different regions of China. The resources reserves in western China superior to that in eastern China, but the economic situation is just the opposite. Renewable energy in the west cannot be totally consumed locally, and has to be transmitted to the east. Power generation is a common application way of renewable energy, but the operation is greatly affected by seasons and weather. Therefore, it is difficult to accurately predict the amount of electricity generated by renewable energy. The power grid system needs corresponding energy storage technologies and facilities to realize peak regulation, so as to reduce the waste of renewable energy and perform peak regulation. The mutual conversion between electricity and chemical energy of hydrogen and ammonia can achieve the purpose of energy storage and peak regulation. When the electricity is sufficient, the surplus electricity is stored by hydrogen production from water electrolysis and ammonia synthesis technology. On the contrary, the stored energy will be transmitted to the power grid from fuel cells and hydrogen power station when the power supply is insufficient. To achieve the "dual carbon" target, the ammonia synthesis and hydrogen storage technologies applied in the new power system are expounded, and the advantages of fuel cells and principles of ammonia transportation and combustion are discussed. Hydrogen and ammonia are proven to be practical, efficient, economic and environmental for the peak regulation of the new power system.

Keywords: carbon neutrality; new power system; hydrogen storage; peak shaving; green hydrogen; green ammonia; ammonia combustion; renewable energy; water electrolysis for hydrogen production; fuel cell

0 引言

随着我国工业化进程不断加快,由此产生的负面影响对生态环境造成严重破坏,使得人们对环境保护的担忧日益增加。在碳中和、碳达峰背景下,

收稿日期:2022-05-23;修回日期:2022-08-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51906130);山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE053;ZR2021QE066);山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(2020CXGC011401)

能源领域背负着节能减排的巨大压力,以可再生能源替代化石能源,实现可持续发展受到各国的重视,通过提高工艺水平以及研发新型设备等方式减少碳排放,着重发展清洁燃料技术和新能源领域^[1]。

事实上,化石燃料和可再生能源价格、社会和环境成本正朝着相反的方向发展,可再生能源系统、可持续市场得到持续发展,所需的经济和政策机制也在迅速演变,转向可再生能源将是大势所趋,有助于减少温室气体排放,限制未来极端天气和气候影响的同时确保可靠、及时、经济高效地提供能源^[2]。

随着国际电能替代进程不断加快,电能终端的节能减排将成为重要一环。我们可以通过研究新型电力系统氢储能技术进行调峰的同时,响应碳中和的号召,减少新型电力系统中对碳的排放。风能、太阳能等可再生能源没有成本,不会排放污染物,但存在不确定性和波动性的能量输出问题,对电网优化调度提出了挑战。电网系统中,高峰时段的电网安全已成为电网调峰的主要矛盾,峰值负载不均衡将会导致能源供应中断,造成巨大损失,为保证电网各时段的安全运行,电网系统相关调峰技术和设备至关重要。由于风能和太阳能等可再生能源固有的间歇性、反调峰和波动特性,加剧了电力系统的管理风险,如何有效对可再生能源进行储能调峰控制,对于电力系统的调度和运行也是一个重要环节。利用可再生能源发电制氢、合成氨有助于控制电厂峰值的稳定性,实现规模化、长期、广域的储能,优化能源结构^[3-4]。

氢能作为我国能源体系中组成部分和新时代实现低碳转型的重要角色,具有绿色、清洁、可再生和来源广泛等特点,涉及多个应用领域,尤其是电解水制氢、储能领域,一直是相关研究人员关注的热点,并逐渐向储能、钢铁、工业、建材等多个行业扩展。我国发改委已出台《氢能产业发展中长期规划(2021—2035)》,作为国家碳达峰、碳中和“1+N”政策体系“N”项目之一,通过统筹规划、全面布局的氢能全价值链开发,既成为中国能源绿色低碳发展的关键抓手,又为碳达峰、碳中和任务的完成提供了强力保障^[5]。氢能全价值链开发体现在多个方面:作为能源供给端,氢能将成为未来能源体系中的重要组成部分^[6]。其次是能源消费端,氢能可以达到绿色、清洁、低碳的目标。最后是工业生产,氢能可在工业生产过程中替代化石能源以实现清洁生产^[7]。然而氢的低体积密度和高可燃性使其在储能和运输燃料方面效率较低,只能储存在高压气瓶中,限制了大规模氢基储能系统的建设。

氨作为氮和氢的化合物,具有较高的往返效率、较高的能量密度和较低的氮源成本,显示出其作为一种化学储存介质的潜力^[8],通过利用废弃的风能和太阳能发电^[9],进而以电解水所产氢气为原料气,再与空气中分离出来的氮气合成氨,进行储存和远距离运输,储存在氨中的能量可以在需要时以热能或电的形式释放出来。世界上偏远地区可再生能源丰富,将其能源转化后运输到人口密集和能源相对匮乏的区域一直是各国迫切需要解决的问题,使能源可远距离运输、无污染的合成氨技术一直受到各国广泛关注。氨不仅可作为含氮产物的原料,还可作用于燃烧和燃料电池等领域,使面向碳中和的新型电力系统在实现电厂电能调峰、新能源利用和“双碳”目标上意义非凡。

1 可再生能源发电制氢

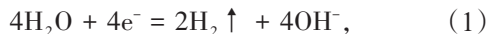
高效利用可再生能源,利用光解、风能等可再生能源电解,规模化生产绿色氢气,是发展清洁能源的重要方向。可再生能源发电制氢时可结合电厂非高峰电力,有效弥补利用时间有限的缺点,并提高电解槽的利用率,保证电网在非高峰时段安全稳定运行,为调峰合理分配电能提供了一种新策略^[10],并在实现碳中和方面起着至关重要的作用^[11]。

电解水制氢的原理是将直流电通过充满电解质的电解槽,水分子在电极上发生电化学反应分解成氢气和氧气,如图1所示^[12-15]。在技术层面,目前电解水制氢主要分为碱水制氢(AWE)、质子交换膜纯水电解制氢(PEM)、固体聚合物阴离子交换膜水电解(AEM)、固体氧化物水电解(SOE)4类^[16],碱水电解制氢最大的优势是阴阳电极板中不含有贵金属,因此电解槽的成本也相对较低,并且发展也较为成熟。

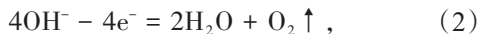
碱水制氢系统由电解槽及辅助系统组成,在整个系统中电解槽是电解反应的核心,其余包括气体分离、水循环、电力转换、气体提纯等辅助模块^[17-18]。电解槽成为整个碱性水溶液制氢设备核心的主要原因有2部分:首先,电解槽的性能直接影响整个制氢系统的制氢效率,不容忽视;其次,生产一个电解槽的成本占整个设备成本的大部分,产氢量越高,电解槽所占整个设备成本的比例越高^[19]。碱性水制氢电解槽由端压板、极板、绝缘套管、密封垫等部件组成,包括几十个或上百个电解小室,其中以两极板为界限,分为正极、氧气产生电极、隔膜、密封垫圈、氢气产生电极、负极等。在电解过程中,负极

发生还原反应生成氢气,正极发生氧化反应生成氧气。化学反应公式为

阴极:



阳极:



总反应式^[18]

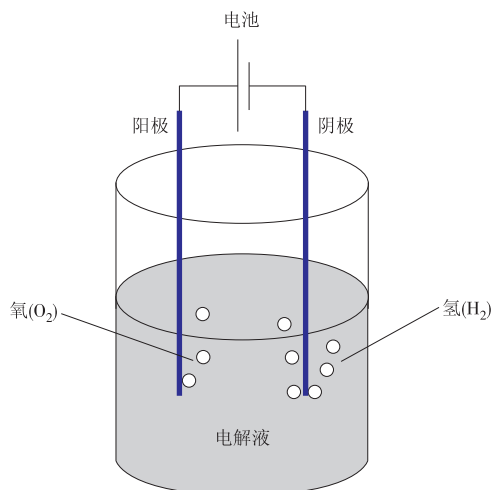


图 1 电解水制氢装置^[12]

Fig. 1 Hydrogen production by water electrolysis device^[12]

隔膜的存在使氢气和氧气不能轻易通过隔膜混合到另一侧,而电解液则可以通过隔膜进入另一侧,随后气体和溶液被气水分离,KOH溶液返回电解池,处理后的氧气直接排出,氢气进一步处理并进行存储和利用^[19]。

2 提取氮气

氮是空气的主要成分,在自然界以双原子形式存在,约占空气的78%(按体积计算)。这使得它成为一个免费的,容易获得的氮来源,但其通常与空气中的其他成分气体混合,这些成分气体可能对工业生产产生不良影响,为此,可采用以下2种标准方法从空气中提取氮,而所需电能可利用电厂非高峰和可再生能源发电提供。

2.1 低温蒸馏

通常使用低温蒸馏的方法生产高纯度氮气,整个过程包括使用压缩装置将周围的空气拉入蒸馏装置,压缩空气然后被冷却到大约10℃,随后通过一系列过滤器,消除水分、油、水蒸气和其他污染物。空气被净化后,会通过热交换器进入膨胀发动机,发动机内压缩气体的迅速膨胀会使其温度降至凝固点以下(在1个大气压下约为-195.8℃)并液化。液化后,高纯度的氮气会从空气中蒸馏出来,

输送到存储单元。

过程中采用了变压吸附技术,从空气中提取氮气是在2个吸附-脱附塔内的碳分子筛优先吸附和脱附氧气和其他气体污染物的基础上进行的。这一过程包括2个同时协调的阶段:(1)吸附从加压气流中去除氧气、蒸汽和其他杂质,使氮气通过收集/存储单元。这个过程将继续进行,直到吸附塔内的分子筛完全饱和为止。(2)脱附是吸附过程的一个逆转,从脱附塔内的分子筛材料中释放捕获的氧气。这一过程将使分子筛再生,为新的吸附循环做好准备。

2.2 机械分离

氮分离的机械方法是利用空气中组分气体的不同物理性质来实现氮的提取。与分馏相比,机械氮气分离从空气中获得氮气相对简单。

机械分离方法主要依靠膜分离技术,膜氮生成利用中空纤维膜分离空气中的组成气体。膜表面是独特的中空纤维形状,增加了表面积,使得气体更加快速渗透^[20]。这一过程包括将空气吸入发生器,压缩空气并在气体分离前通过一系列过滤器。空气被压缩后,通过一个高效过滤器去除水蒸气和其他微粒杂质,然后暴露在活性炭洗涤器中,去除剩余的颗粒或气体污染物。在暴露于膜后,富氮气体可被收集用于工业用途。

3 合成氨

随着经济快速发展,人民生活水平不断提高,社会用电需求也在增大,用电结构正在发生重大变化,各大电网的高峰期和非高峰期用电差异进一步扩大,使得调峰能力与客观调峰需求之间的矛盾十分尖锐^[21],采用新的储能方式可有效解决其存在的矛盾。

新型储能方式是构建可持续发展电力系统的重要部分,现有的气、液和固态储氢方法仍面临一些技术挑战,如高能量损耗和不成熟的储氢材料^[22]。为了高效、安全地储存氢气,最近有人提出将氨作为储氢介质,因为氨分子含有3个氢原子,并且与其他储氢介质相比氢含量更高。此外,它具有较高的体积密度和更稳定的物理特性,可以在环境温度和中等压力下以液体形式储存^[23]。传统的氨合成是使用化石燃料进行的,主要是天然气和煤炭,它们是能源密集型的,碳排放水平很高。相比之下,绿色哈伯法和电化学氮气还原合成氨更加符合可持续发展的策略。

3.1 哈伯法合成氨

绿色氨生产(原料来自可再生能源驱动的水电

解和空气分离)被视为清洁的氨生产路线。氨合成反应在合成塔内高压环境下完成,氮气和氢气混合后,经压缩从塔顶进入合成塔。通过合成塔底部的换热器后,混合后的气体温度有所提高,进入催化剂所在的接触室。在接触室中,部分氢气与氮气反应合成氨气,氨气与氮气混合通过换热器离开合成塔,混合气体必须通过冷凝器将氨液化从而分离出氨。另一方面,氢气与氮气的混合气体被压缩后继续通入合成塔,形成循环利用,以节约生产成本,如图2所示。

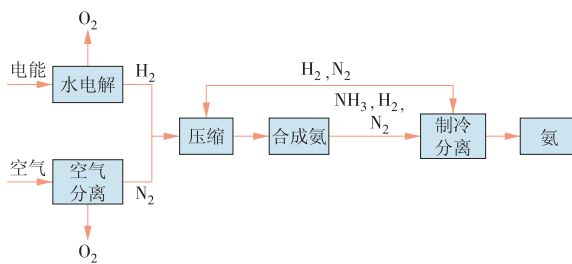


图2 合成氨流程

Fig. 2 Ammonia synthesis process

合成氨的机理一般是以氮气和氢气向催化剂表面靠近,而且有气固相催化反应,大部分气体通过催化剂外表面的毛细孔向催化剂的内表面扩散,并且被催化剂的活性位点所吸附,在外加能量的条件下活化氮分子和氢分子,然后活化的气体分子进行反应,从而产生氨分子。随后氨分子或氨分子簇从催化剂的表观结构中脱落下来,形成自由移动的氨气气相状态。而且在这个过程中氮分子的活性吸附步骤是进行最慢的步骤,也是决定这个催化过程快慢的关键步骤。

哈伯法在制备过程中有高温和高压的条件限制,更加适合集中化生产,并且合成氨的过程需要很多电,而这正与电厂调峰的特性相契合。氨的碳排放主要存在于合成氨过程中原料气的获取,使用碱水制氢的方法,过程中无碳产生,再与氮气合成氨将大大降低制氨过程碳排放。

3.2 电化学氮气合成氨

与哈伯法相比,电化学氮气合成氨技术对于能量的消耗更少^[24],合成氨过程中的 N_2 均从空气中获取,以 H_2O 作为质子源,使用风能、太阳能等非化石能源作为电力源进行电催化 N_2 还原反应,电力成本低,是一种清洁、绿色的合成氨过程,减少了传统氨合成过程中的碳排放^[25]。

研究证明,通过施加还原电位,可以使 N_2 还原为 NH_3 ^[26],其还原化学方程式为



电化学固氮首先要保证催化剂对 N_2 有较好的

吸附和活化性能,多数催化剂在常温常压下的催化活性较低,电化学氮气合成氨领域研究相对成熟,可以通过采用多相催化剂提高催化剂活性。具有较大比表面积的催化剂可以增加 N_2 分子与催化剂表面的接触几率,提高催化剂催化活性,过程中 N_2 与电子及质子发生耦合反应,将其通过还原反应转化为 NH_3 ^[27]。虽然近些年电化学氮气合成氨领域进展迅速,但距离替代哈伯法合成氨还有一段距离,要想提高合成氨的性能,研究出高效的催化剂是目前较直接的方法。

4 氨燃烧

4.1 分解为氢气燃烧

氢在确保可再生电力在能源结构中可靠、高效地渗透方面起着决定性作用,可储存过剩风能等并在短时间内弥补能源短缺。尽管如此,建立可持续的氢经济在整个价值链中仍面临诸多挑战,其中大规模生产和储存是有待解决的问题。一个很有希望的解决方案是以绿色氨的形式储存可再生氢,在这个过程中,氢通常被称为氨的动力,从而解锁所有可用的氨基础设施,以有效地储存和出口大量氢气^[28]。

氨作为氮和氢的化合物,可将其分解为氢气和氮气,来弥补氢气的不足。将氨用作可再生能源存储解决方案的关键挑战是 NH_3 的分解以及随后氢产品的分离和纯化,氨分解以液氨为原料,将液氨气化,通入装有催化剂的分解炉中^[29],在特定的温度、压力和催化作用下分解,产生含有75%氢气和25%氮气(体积分数)的混合气体^[30],气体经过换热器和冷却器后,进入填有以UOP沸石分子筛作为吸附剂的干燥器,随后通过吸附、分离、纯化等工艺后,有效去除混合气体中残留的氨和水^[31]。氨分解的相关化学方程式为



生成的氢气,可作为燃烧燃料或作用于燃料电池进行利用,还可对电厂峰谷电进行调节。

4.2 直接燃烧

自工业革命以来,燃烧一直是人类活动的主要能量转换方式,包括发电和运输。迄今为止,这些部门严重依赖碳氢化合物燃料,因此,排放的很大一部分 CO_2 是通过这些部门产生的,这是导致全球变暖的罪魁祸首,对气候变化造成严重影响^[32],为此我国大力推进各种清洁能源技术发展,希望在增加国内电力供应的同时降低二氧化碳排放量^[33],中国的主要电力供应仍然是大量的火力发电厂,这些发电厂通过燃烧煤或天然气来加热水以产生蒸汽

并驱动涡轮机来发电,技术非常成熟,输出功率也很稳定,但是会产生大量的二氧化碳排放。然而传统发电在中国电力供应中的占比非常巨大,在近几十年的时间里都不可能完全淘汰,如果中国想降低自身的二氧化碳排放水平,最有效的办法就是对现有的火力发电技术进行改良。氨作为燃料具有成本低、可获得范围广、容易挥发、便储存、低污染、高燃烧值、高辛烷值,在日常操作的过程中相对安全、兼容性好等特性^[34],常见燃料的可燃性参数见表 1^[35]。前不久中国研发的氨煤混燃技术取得重大突破,氨混燃比例达到了 35%,远远领先于西方国家。

表 1 常见燃料的可燃性参数^[35]Table 1 Flammability parameters of common fuels^[35]

名称	爆炸极限/%	闪点/ $^{\circ}\text{C}$	着火点/ $^{\circ}\text{C}$
氨	16.0~25.0	132	651
氢	4.0~74.0	-157	530
甲烷	5.0~15.0	-188	537
汽油	1.4~7.6	-40	300

氨混燃技术是将氨气加入煤炭或天然气中和它们一起燃烧,氨气燃烧后不会生成二氧化碳,只会生成水和氮气,氨气的热值也较高,不会影响火电站的正常发电功率,因此只需要普通燃料中添加一定的氨气,就能大幅降低火力发电站发电时的二氧化碳排放量,并且这一技术的使用非常简单,只需要对现有的火电站锅炉进行少量改造就能实现,因此近几年得到了各国的广泛关注。氨混燃技术虽然可以降低火力发电二氧化碳排放,但是这一技术的实现本身面临着一些问题,比如氨气本身有毒,意味着发电站必须保证被加入的氨气能被全部燃烧掉,绝不能让氨气泄漏到外界,而且氨气的燃烧性质和普通煤炭不同,加入氨气后的燃料燃烧参数会发生变化,需要对现有火电站的控制系统进行改进才能使用。

4.3 用于燃料电池

燃料电池是一种电化学发电的装置,氨在燃料电池中的使用可以是直接的,也可以是间接的,在后者中,氨首先裂解成氢气和氮气,然后将氢气送入燃料电池。在这里,我们只考虑直接的情况,因为间接的方法实际上是氢驱动燃料电池^[36]。直接使用氨作为高温固体氧化物燃料电池(SOFC)的燃料,用氨和水作为副产品发电,这样做的效率更高,可以得到更多的能量输入。

SOFC 燃料电池可分为 2 种类型:氨在阳极上开裂(SOFC-O),基于氧阴离子传导电解质的固体氧

化物燃料电池;SOFC-H,基于 SOFC-O 质子导电电解质的固体氧化物燃料电池。阳极负责 2 个反应:氨裂解和氨氧化。由于水、氧阴离子和氨在高温下都存在于阳极侧,因此氮氧化物的形成途径成为可能。在 SOFC-O 阳极上使用进一步的催化作用来减少 NO_x ,以获得 N_2 ,这将稀释氢流量,并降低电池的可逆电位^[37]。总之,考虑到 SOFC-O 的挑战,SOFC-H 可能是燃料电池中氨利用的更好选择。事实上,由于氨在 SOFC-H 的阳极处被氧化,水在通过电解质的质子介导的阴极位置产生,避免了 NO_x 的形成。此外,氢气没有被氮气稀释,可以实现更高的理论效率^[38]。

燃料电池相较于燃油发电机,具有清洁无污染的特征,并且燃料电池内部的机械零部件较少,保养更加方便。研究表明^[32],氨燃料电池最长可运行时间长达 1 年,在续航方面具有优势,但在燃料电池体积方面还需进一步优化。

5 结论

可持续发展和不同资源的有效整合是未来能源系统发展的当务之急,其中绿氢、绿氨等资源与电厂调峰相结合更是清洁燃料转型的关键部分。面向碳中和的新型电力系统,利用可再生资源发电与电厂非高峰值电能进行储氢、合成氨,反作用于电厂提供电能,对电网系统进行调峰使其保持一个合适的范围,维持电厂峰值的稳定,有效降低调峰压力的同时降低氢、氨等能源的生产成本,并且所生产的绿色氢和氨可以分别用作短期和长期的储能介质,在化工、冶炼等领域应用广泛。总体来说,利用风、光等可再生资源发电参与合成绿氢、绿氨能源与电厂调峰互补的面向碳中和的新型电力系统储能发展模式,满足清洁生产氢、氨要求的同时实现了较大的经济价值,其中氨用于燃料电池目前还处于早期应用阶段,可降低对化石等不可再生能源的依赖性,发展潜力巨大。

参考文献:

- [1] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J].Huadian Technology, 2021, 43(6):21-32.
- [2] 谷峻战.英国可再生能源产业发展现状[J].全球科技经济瞭望,2010,25(4):18-23.

- GU Junzhan. Development status of UK renewable energy industry [J]. Global Technological Economy Outlook, 2010, 25(4): 18-23.
- [3] 李娜, 李志远, 王楠, 等. 氢储能调峰站发展路径探索研究 [J]. 中国能源, 2021, 43(1): 55-59.
- LI Na, LI Zhiyuan, WANG Nan, et al. Research on the development path of hydrogen energy storage peak shaving stations [J]. China Energy, 2021, 43(1): 55-59.
- [4] 王杭婧, 孙国正, 周颖. “双碳”目标下零碳氢储能市场推广研究——以安徽六安兆瓦级氢能源储能电站为例 [J]. 商业经济, 2022(3): 110-112.
- WANG Hangjing, SUN Guozheng, ZHOU Ying. Research on the marketing promotion of zero-carbon hydrogen energy storage under the “double-carbon” goal: A case study of lu'an mw hydrogen energy storage power station in anhui [J]. Business Economics, 2022(3): 110-112.
- [5] 张佳兴. 国家发改委: 统筹谋划氢能全产业链发展 [J]. 中国设备工程, 2022(8): 1.
- ZHANG Jiaying. National development and reform commission: Overall planning for the development of the entire hydrogen energy industry chain [J]. China Equipment Engineering, 2022(8): 1.
- [6] 陆娅楠. 推进氢能产业健康有序可持续发展 [N]. 人民日报, 2022-03-24(11).
- [7] 舟丹. 能源转型过程中的关键因素 [J]. 中外能源, 2022, 27(4): 82.
- ZHOU Dan. Key factors in the process of energy transformation [J]. China and Foreign Energy, 2022, 27(4): 82.
- [8] PATIL A, LAUMANS L, VRIJENHOEF H. Solar to ammonia—Via proton's nfuel units [J]. Procedia Engineering, 2014, 83: 322-327.
- [9] JALALKAMALI N, ABBAS M Y. Sustainable aspects of electricity consumption in Klang valley [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 153: 395-401.
- [10] 赵学良. 发展谷电制氢提高可再生能源部署能力的探讨 [J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(6): 117-120.
- ZHAO Xueliang. Discussion on developing hydrogen production from valley electricity to improve the deployment capability of renewable energy [J]. Petroleum Refining and Chemical Industry, 2021, 52(6): 117-120.
- [11] CHEN Z, WEI W, SONG L, et al. Hybrid water electrolysis: A new sustainable avenue for energy-saving hydrogen production [J]. Sustainable Horizons, 2022, 1: 100002.
- [12] 罗承先. 世界可再生能源电力制氢现状 [J]. 中外能源, 2017, 22(8): 25-32.
- LUO Chengxian. Status quo of hydrogen production from renewable energy electric power in the world [J]. China and Foreign Energy, 2017, 22(8): 25-32.
- [13] 王红霞, 徐婉怡, 张早校. 可再生电力电解制绿色氢能的发
- 发展现状与建议 [J/OL]. 化工进展: 1-19 [2022-08-19]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0159.
- WANG Hongxia, XU Wanyi, ZHANG Zaoxiao. Development status and suggestions of renewable electricity electrolysis to produce green hydrogen energy [J/OL]. Progress in Chemical Industry: 1-19 [2022-05-19]. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0159.
- [14] 葛磊蛟, 崔庆雪, 李明玮, 等. 风光波动性电源电解水制氢技术综述 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(5): 1-14.
- GE Leijiao, CUI Qingxue, LI Mingwei et al. Review on water electrolysis for hydrogen production powered by fluctuating wind power and PV [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(5): 1-14.
- [15] 姚芳, 杨晓娜, 葛磊蛟, 等. 风-光-氢能源系统容量优化配置研究 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(5): 56-63.
- YAO Fang, YANG Xiaona, GE Leijiao, et al. Optimization of capacity allocation scheme for wind-solar-hydrogen energy system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(5): 56-63.
- [16] 李子烨, 劳力云, 王谦. 制氢技术发展现状及新技术的应用进展 [J]. 现代化工, 2021, 41(7): 86-89.
- LI Ziyue, LAO Liyun, WANG Qian. Development status of hydrogen production technology and application progress of new technologies [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(7): 86-89.
- [17] GONG Y, YAO J, WANG P, et al. Perspective of hydrogen energy and recent progress in electrocatalytic water splitting [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 43: 282-296.
- [18] 丛琳, 王楠, 李志远, 等. 电解水制氢储能技术现状与展望 [J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 1-7.
- CONG Lin, WANG Nan, LI Zhiyuan, et al. Status and prospect of hydrogen energy storage technology for electrolysis of water [J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2021(7): 1-7.
- [19] 郭育菁, 慕秀松, 周俊波, 等. 中小型工业化碱性水溶液制氢电解槽设计 [J]. 化学工程, 2020, 48(9): 70-73.
- GUO Yujing, MU Xiusong, ZHOU Junbo, et al. Design of small and medium-sized industrialized alkaline aqueous solution hydrogen production electrolyzer [J]. Chemical Engineering, 2020, 48(9): 70-73.
- [20] PAYMOONI K, DOROODCHI E, MOTUZAS J, et al. Feasibility study of LSCF5582 membrane integration into a nitrogen based chemical looping air separation process [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 125: 96-107.
- [21] 苏承国. 大规模清洁能源接入下电网调峰问题研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [22] TARHAN C, ÇIL M A. A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods [J]. Journal

- of Energy Storage, 2021, 40: 102676.
- [23] PALYS M J, DAOUTIDIS P. Using hydrogen and ammonia for renewable energy storage: A geographically comprehensive techno-economic study [J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 136: 106785.
- [24] 于忠军. 电化学合成氨催化剂界面结构和催化特性调控研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [25] 于丽平. 电化学绿色合成氨技术的探索与研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.
- [26] SKÚLASON E, BLIGAARD T, GUDMUNDSDÓTTIR S, et al. A theoretical evaluation of possible transition metal electro-catalysts for N_2 reduction [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2012, 14(3): 1235–1245.
- [27] 姚佳欣. 高效氮气/硝酸盐电还原合成氨催化材料的制备与性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [28] MAKHLOUFI C, KEZIBRI N. Large-scale decomposition of green ammonia for pure hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(70): 34777–34787.
- [29] LI G, ZHANG H, YU X, et al. Highly efficient Co/NC catalyst derived from ZIF-67 for hydrogen generation through ammonia decomposition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(26): 12882–12892.
- [30] 修凯. 阳离子交换膜在水电解制氢中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [31] 杨文良. 氨分解制氢装置的 HAZOP 分析[J]. 化工管理, 2021(21): 66–67.
- YANG Wenliang. HAZOP analysis of ammonia decomposition hydrogen production plant [J]. Chemical Management, 2021(21): 66–67.
- [32] ELBAZ A M, WANG S, GUIBERTI T F, et al. Review on the recent advances on ammonia combustion from the fundamentals to the applications [J]. Fuel Communications, 2022, 10: 100053.
- [33] 赵国涛, 钱国明, 王盛, 等. “双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J]. 华电技术, 2021, 43(10): 11–21.
- ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng, et al. Analysis on solution for green and low-carbon transformation of thermal power enterprises to achieve carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(10): 11–21.
- [34] 胡剑全, 谢珊, 吴一纯, 等. 低碳氨发动机的研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(10): 1505–1509.
- HU Jianquan, XIE Shan, WU Yichun, et al. Research on low-carbon ammonia engine [J]. Renewable Energy, 2014, 32(10): 1505–1509.
- [35] 郝学殷, 徐荣琦, 吕涵, 等. 氨燃料电池用于电力应急发电工作的前景探讨[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(8): 63–71.
- HAO Xueyin, XU Rongqi, LV Han, et al. Prospects of ammonia fuel cells for emergency power generation [J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(8): 63–71.
- [36] HERBINET O, BARTOCCI P, GRINBERG D. On the use of ammonia as a fuel—A perspective [J]. Fuel Communications, 2022, 11: 100064.
- [37] AFIF A, RADENAHMAD N, CHEOK Q, et al. Ammonia-fed fuel cells: A comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 822–835.
- [38] NI M, LEUNG D, LEUNG M. Thermodynamic analysis of ammonia fed solid oxide fuel cells: Comparison between proton-conducting electrolyte and oxygen ion-conducting electrolyte [J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(2): 682–686.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

韩世旺(1996), 男, 在读硕士研究生, 从事 VOCs 与 NO_x 治理方面的研究, hsw550012621@163.com;

张兴宇*(1987), 男, 讲师, 博士, 从事大气污染控制方面的研究, xyzh@qlu.edu.cn。

*为通信作者。

广告索引

公益广告(降碳节能) (后插 1)

郑州科润机电工程有限公司 (后插 2)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插 3, 4)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插 5, 6)

中国华电科工集团有限公司新能源
技术开发公司 (后插 7)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
研发(实验)中心 (后插 8)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插 9)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插 10)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插 11, 12)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插 13, 14)

中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版) (后插 15, 16)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插 17)

山东华电节能技术有限公司 (后插 18)

《华电技术》更名启事 (后插 19)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)