

非并网风电制氢及其在绿色交通物流中的应用

周凌云¹,王超²

(1.中国铁道科学研究院运输及经济研究所,北京 100081; 2.淮阴工学院交通工程学院,江苏淮安,223003)

[摘要] 全球二氧化碳减排巨大压力给了氢能一次绝好的发展机遇,也加速了氢能技术的发展。水分解制氢是制氢技术的主要方向,但其依赖用电分解,能耗巨大,唯有与其他洁净能源如太阳能、风能等相匹配,才能降低成本。针对风电间歇波动、不可直接并网特点,探索开发利用我国黄海辐射沙洲丰富的风能资源,提出基于非并网风电技术制氢及其在绿色交通物流中应用模式和途径,对于综合开发风电资源、拓展氢能应用和绿色交通物流发展具有重要意义。

[关键词] 氢能;辐射沙洲;非并网风电;绿色交通物流;运输产业链

[中图分类号] U116 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1724(2015)03-0050-06

1 氢能特点与发展

在世界能源结构中,煤炭、石油和天然气等化石能源在自然界中的储量是有限的,加之目前日益加重的能源消耗、环境恶化和经济发展的压力,迫使清洁能源成为全世界开发和利用的研究热点。在人们探索的众多新能源中,氢能以其热值高、无污染、不产生温室气体等独特优点,成为可再生能源中最有发展前景的能源形式,正在引起人们越来越多的关注^[1]。

氢作为二次能源,愈来愈受到人们的重视,人们正在试验使用氢能给工厂和家庭供电、供热,驱动汽车、船舶、摩托车、自行车^[2]。氢是元素周期表中 1 号元素,相对原子质量为 1.008,是已知元素中最轻的一个,也是宇宙中普遍存在的元素。氢通常的单质形态是氢气(H₂),它是无色无味,极易燃烧的双原子的气体,氢气是密度最小的气体。在标准状况(0℃和一个大气压)下,每升氢气只有

0.089 9 g 重——仅相当于同体积空气质量的 2/29。氢能(hydrogen energy)具有高挥发性、高能量,是能源载体和燃料,有可能在世界能源舞台上成为一种举足轻重的二次能源。氢能是一种二次能源,因为它是通过一定的方法利用其他能源制取的,而不像煤、石油和天然气等可以直接从地下开采。相对于其他载体如汽油、乙烷和甲醇来讲,氢能具有来源丰富、质量轻、能量密度高、绿色环保、储存方式与利用形式多样等特点,因此氢作为电能这一洁净能源载体最有效的补充,可以满足几乎所有能源的需要,从而形成一个解决能源问题的永久性系统。氢能作为一种高效、清洁、可持续的“无碳”能源,被很多国内外专家誉为是 21 世纪的绿色能源,是人类未来的能源。其主要优点有以下几点^[3-4]。

1) 燃烧热值高,每千克氢燃烧后的热量,约为汽油的 3 倍,酒精的 3.9 倍,焦炭的 4.5 倍。

2) 氢是世界上最干净的能源,在燃烧或催化氧化后的产物为液态水或水蒸气,不会产生诸如一氧

[收稿日期] 2014-12-09

[基金项目] 国家自然科学基金青年基金项目“区域物流生态系统自组织演化机理及和谐性辨别研究”(7140309);国家自然科学基金项目“物流资源整合与调度优化研究”(71132008)

[作者简介] 周凌云,1980 年出生,男,湖南祁东县人,副教授,研究方向为综合运输、物流系统工程;E-mail: zlycsu@163.com

化碳、二氧化碳、碳氢化合物、铅化物和粉尘颗粒等对环境有害的污染物质,制氢、储氢、输运以及利用的各个环节中对环境几乎都可以实现“零排放”。

3) 资源丰富,氢气可以由水制取,而水是地球上最为丰富的资源。

4) 氢能利用形式多,可以灵活高效地转化为其他形式的能量,如既可以通过燃烧产生热能,在热力发动机中产生机械功,又可以作为能源材料用于燃料电池,应用领域包括航天动力、交通运输、燃烧发电、化工原料及民用等。

5) 可采取气态、液态和固态(氢的固态化合物)的方式来存储,可以适应不同环境的不同需求。

美国著名学者里夫金(Rifkin)2002年指出,“全球化石能源经济向氢能经济的转型、氢能经济时代的到来将引发人类历史上下一次重大的技术革命、商业革命和社会革命”^[5]。氢能源已得到世界各国的普遍关注,发达国家和发展中国家对氢能领域的投入逐年增加,以便在未来氢能源的竞争中占据主动权。1996年,美国国会通过了“未来氢法案”,开展了氢能制备、储存、运输和应用示范研究;2002年日本推出了氢能和燃料电池示范项目 Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project (JHFC);加拿大也是发展氢能最为活跃的国家之一,加拿大负责氢能计划的官方机构为 National Hydrogen Association (NHA),该协会组织了加拿大工业部、自然资源部以及多家公司开展氢能计划^[6]。目前,氢能技术在美国、日本、欧盟等国家和地区已进入系统实施阶段。中国可以考虑把氢能的开发和推动氢经济列为国家发展战略,推进“氢经济”产业革命。率先成功启动氢经济是我国逐渐摆脱对海上石油供给线的依赖,摆脱潜在的海上封锁,成功取得全球长期战略优势的关键,也是我国实现新型工业化、实现中国和平发展的重要战略举措。在第18届世界氢能大会(WHEC 2010)上,中华人民共和国科学技术部万钢部长指出,“中国要制订国家氢能规划,加大对氢能的投入,扩大氢能示范和应用,加强氢能的国际合作”。

2 氢能的制取原理

到目前为止,在氢源的开发和制氢技术领域有3个方向,分别为化石燃料的裂解^[7]、生物制氢^[8]和水电解制氢三大类型。由于生物制氢技术目前存在的问题较多,所以目前全世界大约96%的氢来自化

石燃料的裂解,其余为水电解制氢。化石能源制氢受到本身资源和排放CO₂的制约,不是长远的方向。水资源丰富,是主要的氢矿,也是未来获取氢源的重要途径^[9]。在氢能经济的长期规划中,水分解制氢是未来制氢技术的主要方向。在自然界中,氢易和氧结合成水,必须用电分解的方法把氢从水中分离出来。如果用煤、石油和天然气等燃烧所产生的热转换成的电支分解水制氢,则较为昂贵。目前水分解制氢因耗电量大、电价高导致氢气成本高,推广使用受到限制。制氢技术中电解制氢唯有与其他洁净能源如太阳能、风能等相匹配,才能发挥各自优势而共促发展。这些洁净能源由于其能量与时间的关系具有波动性,所以在发电时系统给出的电能是间歇性的,通常不可直接进入电网,因此探索利用非并网风电技术制氢具有重要现实意义和理论价值。

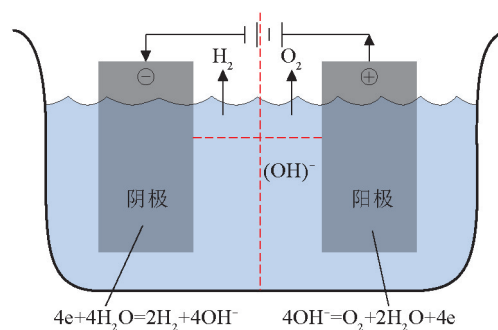


图1 氢能制取一般原理

Fig. 1 The general principle of hydrogen production

3 氢能制取新途径——黄海辐射沙洲非并网风电开发利用

3.1 黄海辐射沙洲风电综合开发利用背景

在人类跨入21世纪的时候,一个海岸与海洋环境资源开发与保护热潮正在全球范围兴起。黄海辐射沙洲作为我国海岸和海涂资源开发利用的重点区域备受人们的关注,而且黄海辐射沙洲风况资源丰富,在解决能源和环境问题方面具有重要的应用前景。黄海辐射沙洲及其沿岸地区蕴藏着极其丰富的土地、生物、航运、旅游资源,是我国海洋支柱产业开发的优选基地之一。然而,黄海辐射沙洲这一面积2.4万多平方千米,由70余条沙脊和几个主要通道组成的特殊巨型沉积地貌体系,在环境方

面存在波浪与潮流作用活跃、泥沙搬运、岸线冲淤不稳、生态脆弱等诸多不利因素^[10],其综合开发必须特别注重走环境与资源可持续发展的道路。

3.1.1 黄海辐射沙洲沉积和淤长机理研究

辐射沙洲海域具备潮流脊的形成机制和发育基本条件,丰富的泥沙和长期稳定的特殊辐射状潮流场是南黄海辐射状沙脊群形成和发育的充分和必要条件。丰富的泥沙主要受历史时期径流的影响,它是辐射沙洲的形成和演化的重要基础。从近代辐射沙洲发育阶段,可以看出径流的作用主要表现在大量泥沙的供应上,它为辐射沙洲的形成提供了物质基础。辐射沙脊群沉积物的主要成分是分选良好的细砂,表面洼地含有粉砂。辐射沙脊主体是长江系统的细砂物质,而细粒的粘土、粉砂物质明显受废黄河(北部)及现代长江(南部)的补给。

辐射沙洲群由东沙、竹根沙、蒋家沙、冷家沙、条子泥等大型沙洲组成,在这些沙洲之间分布着西洋、陈家坞槽、苦水洋、黄沙洋、烂沙洋等大型潮沟^[11]。辐射沙脊的分、合、消、长及岸滩的冲、淤变化主要受强潮控制。自黄河北移以来,沙洲区一直在进行物质的重新分配,水沙均很活跃,然而这一海域受两个潮波系统的控制。以南黄海无潮点(32°30'N,120°10'E附近)为中心的左旋潮波系统控制着北部海区,南部海区受自东海传入的前进潮波系统的控制。两者在东台市弼港镇蹲门村东海域辐合^[12]。近千年来,古长江、古黄河、淮河入海泥沙在此淤积,形成了世界上罕见的辐射状沙脊群,此辐射中心在弼港,由辐射点向东北和南东方向分布,有共10条形态完整的大型水下沙脊,物质组成主要是细沙,这就生成了这一海域广袤的淤长型滩涂资源^[13]。这一浅海辐射沙洲每年以100 m左右的速度向大海延伸,总面积达 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。总体而言,辐射沙洲的形成与发展取决于丰富的泥沙、东中国海流系与苏北海岸、山东半岛构成的特殊地形的相互作用。目前,沙脊群具有向西北方向迁移延伸、整体逐渐向南偏移的趋势,其中北部沙脊群存在向南移动的趋势,而南部沙脊群呈向岸的移动趋势,且整体表现为内淤外蚀及区域差异特征。

3.1.2 黄海辐射沙洲风能资源的影响研究

浅海辐射沙洲海上风能资源丰富,在全球的浅海沙洲中,中国东台和英国莫克姆海湾两处淤长型大型辐射沙洲非常适合发展大规模、超大规模海上风电场,其中位于江苏苏北沿海海域的较大,且每

年以100 m左右的速度向大海延伸。江苏苏北沿海浅海辐射沙洲风能资源优良,通过调查和仿真实验,测得70 m高平均风速达到8.0 m/s以上,其潮上沿岸滩涂60万亩(约400 km²),70 m高平均风速为7.2 m/s;潮间滩涂140万亩(约900 km²),70 m高平均风速为8.0 m/s;再向东延伸,近海还有大片辐射状浅水沙滩200万亩(约1300 km²),70 m高平均风速为8.4 m/s,是全球难得建设大型海上风电场的理想场区^[14]。

该区域地质条件好,据水利勘测设计部门资料,在江苏沿黄海一线,沿海滩涂全线地质成因一致,地层以海相沉积为主,处于南洋潮与北洋潮的交汇处,江河入海水流到达这里时已形成基本不含淤泥的细沙沉积地层,是典型的“铁板沙”。埋深1 m以下地层承载力达到10~14 t/m²,8 m以下达到18 t/m²,16 m以下达到23 t/m²,是发展海上风电理想的地质条件,可大大降低风电场地基工程的建设难度和造价。

该区域气象条件好,历史上无台风正面登陆。根据气象观测资料显示,该区域台风既少、又比较集中,易于防范,对当地风电场并不构成危害,却能在这一时段内实现风机难得的“满发”。总体而言,该区域很少发生灾害性天气,经济条件、并网条件、运输安装条件、地形地质条件俱佳,环境影响评估良好,是布设单机容量2~5 MW的风电机组、占据海域面积数千平方千米的超大型海上风电场的理想之地。在这块 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 浅海辐射沙洲,如开发15%的风能资源,按照面积决定装机总容量算法(2D)计算,装机容量可达 $5.4 \times 10^7 \text{ kW}$ 左右,再按年有效发电系数0.25计算,即可兴建一个相当于年产 $4.25 \times 10^7 \text{ t}$ 标准煤(相当于年开采量 $2.98 \times 10^7 \text{ t}$ 原油)、每年减排 $1.12 \times 10^8 \text{ t CO}_2$ 的永续绿色能源基地,打造“海上绿色三峡”,而且不占用一亩耕地、不产生一个移民、也没有生态安全问题^[14]。

3.2 黄海辐射沙洲非并网风电技术及在制氢领域应用前景

海上风电由于其资源丰富、风速稳定、开发利益相关方较少、不与其他发展项目争地、可以大规模开发等优势,受到风电开发商关注。我国黄海辐射沙洲地带风况资源优越,是目前世界上最好、最具大规模开发价值的风电场之一。

由于风能的自身特性,导致风电的波动性、间歇性和不规则性,使电网难以承受海上大规模风电

场的巨大电能,风电对电网的贡献率难以超过10%已成为一个世界性难题。风电并网是目前世界上大规模风电场的唯一应用方式。而海上风电场由于施工难度和集中输变电等经济性问题,又必须大规模开发。针对这一世界性的难题,顾为东研究员领衔的项目组于1986年提出大规模非并网风电直接应用这一原创性思路,即风电系统的终端负荷不再是传统的单一电网,而是直接应用于一系列能适应风电特性的高耗能产业及其他特殊领域,主要适用于 $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ kW以上大规模风电场。风电的这种非并网运行方式与传统风电并网的优势体现在以下几方面。

1) 采用直流电,回避风电上网电压差(电流波动)、相位差、频率差难以控制的问题,绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈,也避免了大规模风电并网对电网系统的影响。

2) 突破终端负荷使用风电的局限,使大规模风电在非并网风电系统中的供电比例能达到100%,也拓展了产业化应用领域。

3) 风力机经专项适配后,结构得到优化,风能利用效率得到提高,还节省并网所需的大量辅助设备,大幅度降低风电场制造成本和风电价格。

采用非并网风电技术,可以在辐射沙洲地区建设若干“低碳型”绿色工业园区,利用风能替代化石能源,在园区内实现“高碳能源向无碳能源”的跨越。从而,建立起多元化的100%消耗掉风电的非并网应用系统,彻底解决海上“风电三峡”大规模风电的应用难题。

我国有全世界最大的风电装机容量,但大部分无法有效并网。将这部分能源转化为氢能储存利用,是一种有效的储能手段。现在看来,高效率的制氢的基本途径,是非并网利用风能。如果能用风能来制氢,那就等于把无穷无尽的、分散的风能转变成了高度集中的干净能源了,其意义十分重大。目前,大丰非并网风电制氢系统验证示范基地已经建设,具体如图2所示。

4 非并网风电制氢在绿色交通中的应用

4.1 氢能在绿色交通中应用前景

伴随着整个社会经济高速发展,在人类物质文明大大提高的同时,地球上的资源也在日益枯竭,我们的生态环境也正一步一步地面临威胁。然而整个人类社会经济生活中最重要的一环是交通运

输业。交通运输业的发展推动了整个社会的进步,



图2 大丰非并网风电制氢系统验证示范工程

Fig. 2 Demonstration project of hydrogen production system based on non-grid-connected wind power in Dafeng City

但是与此同时也给我们的生态环境带来巨大压力。

自20世纪70年代开始,环境越来越受到人们的重视,并逐渐深入到经济的各个领域,绿色运输、物流应运而生。绿色运输、物流是建立在可持续发展的基础上的,为了实现经济利益、社会利益和环境利益的统一。

用氢代替煤和石油,不需对现有的技术装备作重大的改造,现在的内燃机稍加改装即可使用。氢可以气态、液态或固态的氢化物出现,能适应贮运及各种应用环境的不同要求。加快氢能在运输物流中的利用,是一项重大战略举措,对优化交通能源结构、带动城市综合发展、促进城市群的形成,节约能源和保护环境等均有重大作用。

4.2 氢能在绿色交通中应用措施

4.2.1 建设氢能运输走廊

以氢能运输走廊开发为契机,从产业低碳化、交通清洁化、主要污染物减量化、可再生能源利用规模化等方面全面开展节能减排综合示范,发挥示范带动作用,促进发展方式转变,推动节能减排目标实现,加快建设资源节约型、环境友好型社会。2011年6月15日,以“氢能科学与技术的发展与战略”为主题的第400次香山科学会议上,顾为东研究员首次提出了建设“中国沿海(京沪)氢能高速公路”的构想,得到与会依宝廉院士、马建新教授等专家的热烈响应和支持。江苏省宏观经济研究院牵头负责编写《中国·沿海(京沪)氢能高速公路可行性研究报告》。此外,《淮河生态经济带》规划:以淮河流域风电场为依托,建设沿淮氢能运输走廊示范区;以淮河干流、入海水道为中心,重点突破,带动淮河支流、京沪运河、公路等氢能运输走廊建设;循序渐进,依次推动,从淮河干流地区向东中部地区

扩散带动我国氢能运输走廊建设。

4.2.2 氢能汽车和机车的推广

氢能高速公路开通的前提条件是要有大量氢能车的出现和使用。据美国工程院预计,氢燃料电池车将在2015年批量进入发达国家市场,并在15年至20年之内取代现有燃油车及混合动力车,占据全球汽车市场主导地位。更有甚者,像宝马、通用、丰田等全球主要的汽车公司已提前作好了技术储备。日本采用液氢作燃料组装的燃料电池示范汽车,已进行了上百万公里的道路运行试验,其经济性、适应性和安全性均较好。此外,美国和加拿大计划在从加拿大西部到东部的大铁路上采用液氢和液氧为燃料的机车。这些对于中国氢能汽车及氢能机车的研发、推广具有重要意义。未来我国应在高端、长途、重载的交通工具领域,加快氢燃料电池及交通装备的研发和应用。其中,燃料电池电动机车用于铁路的各种工程作业车、地铁检修车、施工车、地铁调车、矿山用车及特殊用途的车辆是未来一个重要研究领域。

4.2.3 建设专门输氢管道

氢运输主要运输4种状态的氢:低压氢气、高压

氢气、液氢和固态氢。运输技术主要有管道运输、机动车运输、铁路运输。液氢运输的能量效率高,但是仅液化过程就消耗三分之一的氢能量,同时还存在氢气蒸发和运输设备绝缘的复杂技术要求。可见,液氢只适合于短途运输。

采用船运或卡车运输氢气目前最为常见,但运输的量非常有限:对于20 MPa压缩氢气,运输500 kg氢需要40 t的卡车。对于大规模集中制氢和长距离输氢来说,管道运输是最合适的。实际上,目前的天然气管道也可用来输送氢气(德国、法国、美国等)。

4.2.4 拓展氢能运输物流装备产业链

氢能系统涉及氢气生产、储存、运输、加注,以及燃料电池和相关专业运输工具等,是庞大的系统工程,如图3所示。目前,阻碍氢能应用的技术难点正在逐一被攻克,并且随着其在全世界范围内基础设施的不断完善,氢能将在未来可再生能源体系中处于非常重要的位置,可以同时满足资源、环境和经济持续发展的要求,无限期地为人类所用。未来要进一步深化对氢能源产业发展的研究,以先进氢能运输物流装备制造产业为契机。

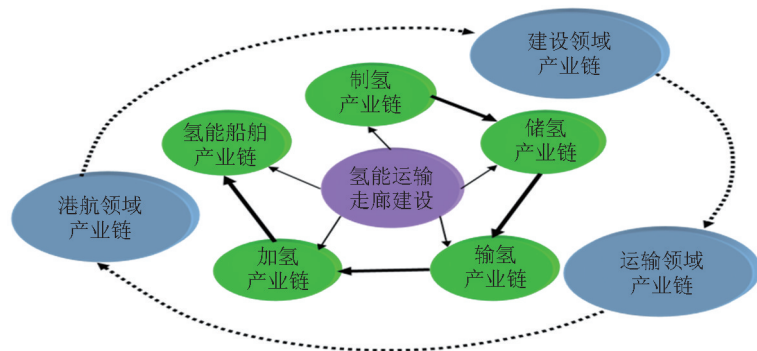


图3 氢能运输物流装备产业链

Fig. 3 The equipment industry chain of hydrogen transport and logistics

4.2.5 打造发展新型能源交通的先导区

氢能商业化进展仍然很慢,就发达国家而言,即使氢能技术已经成熟,但仍处于示范阶段。我国须将应对气候变化的新任务、新要求纳入交通运输行业节能减排工作的整体部署中统筹推进,把氢能交通、物流示范工程建设作为现代交通运输业发展的重要抓手,努力提高交通运输行业低碳转型的综合能力,形成若干发展新型能源交通的先导区。

5 未来研究展望

目前看来,我国氢能产业仍停留在示范阶段,

产业化问题还很多,例如,如何进一步降低氢气的精制成本和燃料电池发动机的成本?高压储存设备的轻量化方面没有突破,一些高压气瓶需要进口,如何解决国产化问题?由于氢气的长距离管道输送成本较高,在100 km的范围内输送比较合理,如何解决长距离氢气储存运输问题?

总体而言,氢能系统及其配套技术尚未成熟,且未成体系,还要靠产学研的联合攻关获得突破。此外,要加大对氢能的扶持力度,优化氢能政策,降低燃料电池成本、税收、碳税。同时,要鼓励通过技术创新大规模使用风能电、太阳能电,或用低谷的

水电来制取,降低氢能利用成本,推进氢能产业化发展。

参考文献

- [1] 顾忠茂. 氢能利用与核能制氢研究开发综述[J]. 原子能科学与技术, 2006, 40(1): 30-35.
- [2] 毛宗强. 氢能——21世纪的绿色能源[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [3] Sigfusson T I. Hydrogen energy-abundant, efficient, clean a debate over the energy system of change[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(10): 44-52.
- [4] 张 轲, 刘述丽, 刘明明, 等. 氢能的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(5): 116-119.
- [5] 张志强, 郑军卫. 氢经济社会发展前瞻及我国的对策[J]. 科学对社会的影响, 2006(3): 21-25.
- [6] 张 聪. 世界氢能技术研究和应用新进展[J]. 石油石化节能, 2014(8): 56-59.
- [7] O'Brien J E, McKellar M G, Harvego E A, et al. High-temperature electrolysis for large-scale hydrogen and syngas production from nuclear energy-summary of system simulation and economic analyses [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(10): 4808.
- [8] Balat E, Kirtay H. Hydrogen from biomass—Present scenario and future prospects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(14): 7416.
- [9] 毛宗强. 无限的氢能——未来的能源[J]. 自然杂志, 2006, 28(1): 14-18.
- [10] 任美镠. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [11] 黄海军. 南黄海辐射沙洲主要潮沟的变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 1-7.
- [12] 陈可锋, 陆培东, 王艳红, 等. 南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 267-272.
- [13] 王 颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] 顾为东, 周志莹, 邱 涛. 长三角浅海辐射沙洲风能资源开发与非并网风电产业发展研究[J]. 资源科学, 2009, 31(11): 1856-1861.

Research on hydrogen production and its application in green transportation and logistics based on non-grid-connected wind power system

Zhou Lingyun¹, Wang Chao²

(1. Transportation and Economy Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 2. School of Traffic Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian, Jiangsu 223003, China)

[Abstract] Global carbon dioxide emissions pressure gives a good development opportunity for hydrogen energy, and it also accelerates the development of hydrogen energy technology. The water decomposition is the main direction of hydrogen production technology, but it needs huge electricity energy consumption. In order to reduce the cost of hydrogen energy, the water decomposition should rely on other clean energy such as solar energy, wind energy. For the wind intermittent fluctuation and non-grid-connected features, the paper explores the development and utilization of rich wind energy resources in the Yellow Sea radial sand ridges, and proposes the hydrogen production technology based on non-grid-connected wind power. The application mode and ways of hydrogen energy in green traffic are analyzed for expanding the comprehensive development of wind power resources, hydrogen energy and green transportation.

[Key words] hydrogen energy; radiation shoal; non-grid-connected wind power; green transportation and logistics; transportation industry chain