

绿电与绿氢耦合煤化工的系统建设方案

石志鹏[✉], 石祥建, 蔡丹, 冯康康, 娄清辉
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 210000)

摘要: [目的] 随着“双碳”进程的推进, 煤化工行业的减碳降排势在必行。煤化工过程用氢量大, 且目前多以化石燃料转化的灰氢为主, 造成了余碳排放。如果将零碳的绿电绿氢与煤化工耦合建设, 既有利于煤化工行业节能减排, 同时也能绿电与绿氢的发展提供巨大应用场景。[方法] 在此背景下, 以典型煤化工工艺煤制乙二醇为例, 详细阐述了绿电与绿氢耦合煤制乙二醇的系统建设方案。[结果] 分析表明绿氢的引入提高了煤制乙二醇的碳利用率, 从传统工艺的 21.1% 提高到 40.5%, 而生产每吨成品乙二醇的碳排放强度从 2.58 t CO₂ 降到了 0.93 t CO₂。同时通过一体化建设可以降低二次系统建设、运维成本。[结论] 绿电绿氢与煤化工耦合建设具有技术可行性, 发展前景广阔, 但还面临着诸多挑战。

关键词: 绿电; 绿氢; 煤化工; 耦合建设; 节能减排

中图分类号: TK91; TK01

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0143-07

开放科学(资源服务)二维码:



Construction Scheme for the System Coupling Coal Chemical Industry with Green Electricity and Green Hydrogen

SHI Zhipeng[✉], SHI Xiangjian, CAI Dan, FENG Kangkang, LOU Qinghui
(Nanjing Nanrui Jibao Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] With the advancement of the "carbon peak and neutrality" process, it is imperative to reduce carbon and emissions in the coal chemical industry. The coal chemical process uses a large amount of hydrogen, which mainly converted from fossil fuels, resulting in residual carbon emissions. If green electricity and green hydrogen are coupled with coal chemical construction, it will not only promote energy conservation and emission reduction in the coal chemical industry, but also facilitate the large-scale application of green electricity and green hydrogen. [Method] In this paper, taking the typical coal chemical process of coal to ethylene glycol as an example, the system construction scheme for coupling green electricity and green hydrogen to produce ethylene glycol from coal was elaborated in detail. [Result] Analysis shows that the introduction of green hydrogen has improved the carbon utilization rate of coal to ethylene glycol, from 21.1% in the conventional process to 40.5% in coupled system, while the carbon emission intensity per ton of finished ethylene glycol has decreased from 2.58 t CO₂ to 0.93 t CO₂. At the same time, integrated construction can reduce the cost of secondary system construction and operation and maintenance. [Conclusion] The coupling construction of green electricity, green hydrogen, and coal chemical industry is technically feasible with large development potential, but there are still many challenges to overcome.

Key words: green electricity; green hydrogen; coal chemical industry; coupling construction; energy conservation and emissions reduction

2095-8676 © 2023 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/>).

0 引言

我国“富煤、贫油、少气”的能源禀赋促进了煤化工行业的迅速发展^[1]。但煤化工产品碳氢比低,而煤中碳氢比高,这势必造成煤利用过程中大量的碳排放^[2]。随着“双碳”进程的推进,化工行业的减碳降排势在必行。利用新能源发绿电再制绿氢提供了一个化工行业减碳思路^[3]。绿电指的是发电过程中二氧化碳排放量趋零或者完全为零,相比于传统火力发电更加绿色环保^[4]。绿电主要来源于风能、太阳能等可再生能源。得益于地势地貌的天然优势,我国太阳能、风能储量丰富,近些年来风力发电和光伏发电也发展迅速,但同时也面临着弃风弃光等新的挑战^[5-6]。

氢能是一种绿色低碳、清洁高效的二次能源,正逐步成为全球减碳降排、能源转型的重要载体^[7]。绿氢指的是以光伏、风力等可再生能源生产的绿电再电解水获取的氢气,同样整个过程中实现零碳或趋零排放^[8]。大力发展可再生能源发电制氢有望解决绿电消纳问题,减少弃风弃光现象^[9]。但当前绿氢也存在着生产效率低、存储运输难等难题^[10]。氢的存储运输难,而煤化工过程需要补入大量氢气。如果将绿氢与煤化工行业耦合起来,直接就地消纳,既解决了氢存储运输问题,又实现了煤化工过程中的补氢减碳^[11-12]。

因此文章阐述了绿电与绿氢耦合煤化工应用的一、二次系统建设方案以及技术优势,同时也指出其发展过程中还存在的一些问题与挑战,旨在为煤化工行业推动减碳降排提供一些新的思路。

1 绿电绿氢与煤化工发展现状

1.1 绿电绿氢

在中国,绿电主要来自于风力和光伏发电。据国家能源局统计,2022年我国风电、光伏总发电量已经达到1190 TWh,新增装机容量也突破了120 GW。但随着风光电的迅速发展扩张,绿电的消纳问题成为了新的挑战。弃风弃光指的是当风光电无法被电网消纳时人为调整风机或光伏板在低功率条件下运行所产生的弃发电量^[13]。我国整体弃风、弃光率从2016年的17.0%和10.3%分别下降至2021年的3.1%和2.0%。

近年来国内外试图通过绿氢解决绿电消纳问题,减少弃风弃光现象。绿氢的核心是电解水制氢技术,目前存在4种主流技术,分别是碱性(Alkaline, ALK)水电解、质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)水电解、阴离子交换膜(Anion Exchange Membrane, AEM)水电解和固体氧化物(Solid Oxide Electrolyzer Cells, SOEC)水电解。其中AEM和SOEC技术仍处于实验室、示范起步阶段,离成熟商业化、产业化的路还很长^[14-15]。而ALK和PEM技术在过去十几年内已经充分发展并产业化。因此在接下来一段时间内,ALK及PEM制氢仍将是电解水制氢的主流工艺路线。目前,国内已有新能源发电制绿氢项目示范落地。中石化新疆库车绿氢项目是全球在建的最大光伏绿氢项目,这是国内首次规模化利用光伏发电直接制氢的项目,贯通光伏发电、绿电输送、绿电制氢、氢气储存输送和绿氢炼化五大部分,建成之后能够实现年产2万t绿氢。此外,还有很多省市也在积极开展氢能试点示范,例如国网安徽六安制氢示范项目、河北建投张家口沽源风电制氢示范项目等等。

1.2 煤化工

中国现代煤化工产业发展迅速,一批批新型煤化工项目不断建成投产。“十三五”末,我国煤制油、煤制烯烃、煤制乙二醇的年产量分别达到8.23 Mt/a、16.72 Mt/a和5.97 Mt/a,并仍在持续增长中^[16]。煤中氢碳比约为4:5,而煤化工的下游产品例如烯烃、油、天然气中的氢碳比分别为2:1,2:1和4:1^[17]。煤化工过程中原料和产品氢碳比的不匹配导致整个工艺中存在碳冗余,尤其当产业达到一定规模时,氢碳比不匹配带来的高煤消耗以及高碳排放不可小觑。外源性补氢是调整煤化工工艺中氢碳比的重要手段,例如煤制氢或者天然气重整制氢。但采用煤或者天然气等制得的氢气属于灰氢,仍有很高的碳排放,并不能从源头上解决煤利用过程中的低碳^[18]。

总的来说,煤化工行业的氢气需求量大,但目前基本全部使用的是灰氢^[19]。使用绿氢不仅可以替代灰氢为煤化工过程中补充高纯氢气,还可以促进煤化工行业节能减排。但国内目前还没有绿电绿氢与煤化工耦合建设的成功工业化案例,还处于研发和试点示范阶段。

2 绿电与绿氢耦合煤化工一次系统

乙二醇是一种重要的有机化合物和化工生产中间体, 广泛应用于能源、塑料、汽车和化工等工业生产过程中, 中国也是全球最大的乙二醇消费市场^[20]。同样乙二醇的生产工艺过程中也需要大量补氢, 因

此文章以煤制乙二醇为例, 介绍了风能、光伏发电绿电再制绿氢耦合煤制乙二醇的工艺流程。

2.1 系统框架

一次工艺流程图如图1所示, 整个集成工艺流程由绿电子系统、绿氢子系统以及煤制乙二醇子系统3部分组成。

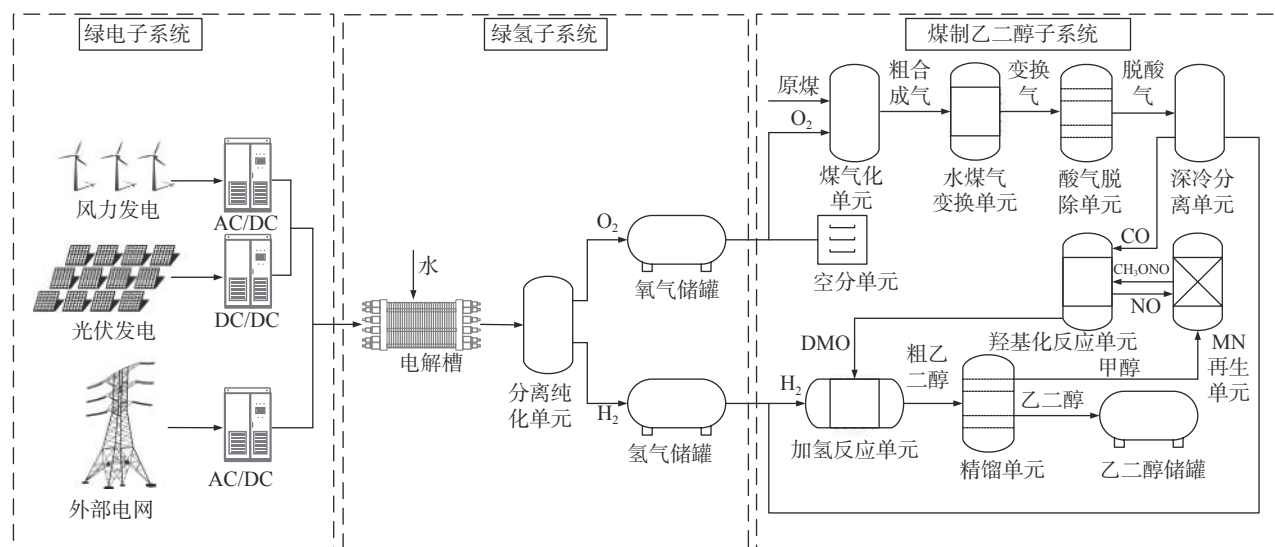


图1 绿电与绿氢耦合煤化工一次系统架构

Fig. 1 Primary system architecture of coal chemical industry coupling green electricity and green hydrogen

绿电子系统, 主要包括风力发电、光伏发电、外部电网、整流器、逆变器等。其中风机、光伏板分别将风能、光能转化为电能, 再通过电流逆变或者整流装置转换为电解水制氢所需要的直流电。同时接入外部电网, 不仅可以在满足制氢需求的情况下余电上网, 还能消除风、光电供电间歇性并降低失负荷现象。绿氢子系统, 主要包括电解槽、气体储罐等。其中电解槽采取现阶段相对成熟的碱性水电解槽技术或质子交换膜水电解槽技术, 在直流电的作用下水分子被解离生成氧气和氢气, 再进入气体储罐中缓冲从而实现稳定持续供给。煤制乙二醇子系统包括煤气化单元、水煤气变换单元、酸气脱除单元、乙二醇合成与精制单元。煤气化单元以原煤、水以及氧气为原料, 生产出粗合成气体。其中氧气来自于两部分, 一是电解水制氢过程中的副产, 二是空分装置分离空气所得。煤气化炉出口的粗合成气中的 H_2/CO 比只有0.46, 远不满足煤制乙二醇工艺过程中 H_2/CO 为2的需求, 因此需要水煤气变换单元进一步提高合成气中氢碳比^[21]。酸气脱除单元用于去除合成气中的 H_2S 和 CO_2 等酸性气体, 使其满足分

离装置的要求。通过深冷分离, 分离出高纯度CO和富氢气, 其中CO进入羰基化反应器, 与亚硝酸甲酯反应生成草酸二甲酯。而富氢气则通过变压吸附等方法将纯度提高到99.9%以上, 但此时的氢气量仍不能满足乙二醇合成需求, 因此将绿氢子系统中电解水制得的高纯氢气一并通过通入乙二醇合成单元与草酸二甲酯反应生成粗乙二醇, 再经过精馏进一步提纯为产品级乙二醇。

2.2 技术优势

2.2.1 缩小部分环节规模, 高效节能

(1) 缩小煤气化规模, 由于纯氢补入, 不再需要额外分离合成气获得, 进而提高了原煤的转化率, 降低了单位乙二醇生产的煤耗; (2) 缩小空分规模, 煤气化过程中需要通入大量纯氧, 一般需要另外配备空分装置, 而电解水产生氢气的同时可以副产高纯氧气, 可以满足煤气化过程中的氧气需求, 进而可以大幅降低高耗能空分装置的运行成本; (3) 缩小水煤气变换规模, 传统煤制乙二醇工艺通过水煤气变换单元调整合成气中的氢碳比, 而通过补入纯氢调整

氢碳比同样可以缩小甚至取消水煤气变换单元规模。

2.2.2 降低水煤气变换度,降碳减排

史晓斐^[17]使用 IDEAS 框架搭建了风光互补耦合煤制乙二醇的系统模型,参考整个工艺过程中各环节碳转化率,分别计算了煤制乙二醇传统工艺以及绿氢耦合工艺中碳元素的迁移转化,如图 2 和图 3 所示。

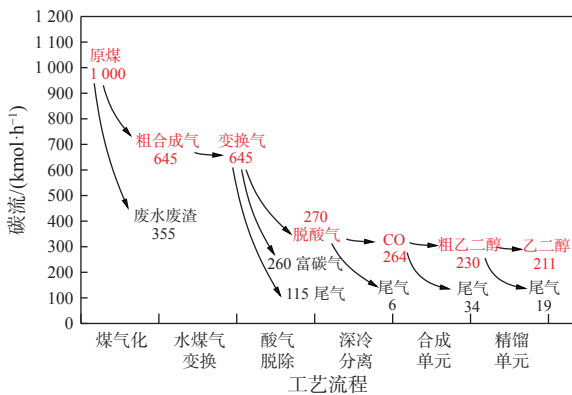


图 2 传统煤制乙二醇碳流

Fig. 2 Carbon flow of coal to ethylene glycol in conventional methods

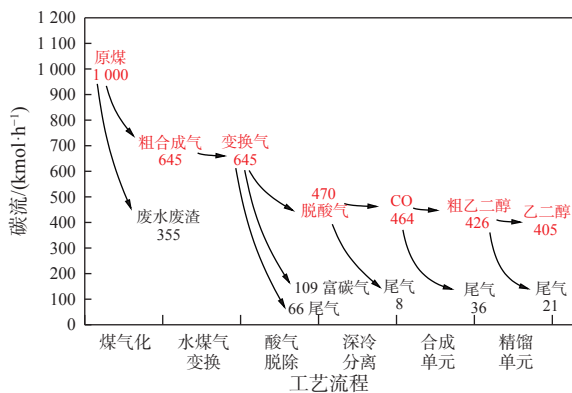


图 3 绿电与绿氢耦合煤制乙二醇碳流

Fig. 3 Carbon flow of coupled coal to ethylene glycol

假设单位时间内有 1 Mmol 碳元素从原料煤中进入煤气化单元。煤气化过程中,一部分碳元素进入到粗合成气中,约有 645 kmol/h,还有 355 kmol/h 以炉渣、废水的形式损耗掉。水煤气变换过程中,耦合绿氢工艺中由于变换度的降低,只有约 16.9% 的碳元素由于反应从 CO 转换为 CO₂,远低于传统工艺的 40.3%。酸气脱除过程,由于 CO₂ 生成的少,耦合绿氢工艺中排放的 CO₂ 废气也更少。剩下的碳元素

除去在乙二醇合成、精馏过程中的损耗,最终传统工艺和耦合绿氢工艺过程中分别有 211 kmol/h 和 405 kmol/h 的碳元素转化为最终成品乙二醇。

进一步计算出传统工艺和耦合绿氢工艺过程中的碳利用率和碳排放强度,结果显示绿氢的引入提高了煤制乙二醇的碳利用率,从传统工艺的 21.1% 提高到 40.5%,而生产每吨成品乙二醇的碳排放强度从 2.58 t CO₂ 降到了 0.93 t CO₂。这表明绿氢耦合煤制乙二醇可以充分发挥绿氢的低碳优势,通过调整合成气中的氢碳比,不仅减少了水煤气变换过程中消耗的碳元素进而降低了煤耗,还减少了整个工艺过程中的碳排放量,有利于煤化工减碳减排。

3 绿电与绿氢耦合煤化工二次系统

目前,化工行业工艺侧和电气侧都有自己的单独的控制系統,如果将绿电与绿氢耦合煤化工的话,二次系统的一体化建设更具优势。

3.1 系统架构

图 4 是二次系统一体化的整体架构,类似于现在的电力系统架构,采用分层分布式结构,分为调控层、站控层、间隔层和过程层。

调控层采用冗余以太网架构,包括一体化历史站、一体化工程师站、一体化操作员站,主要通过运动装置或规转装置实现不同子系统的数据汇总、数据监视、应用分析以及调控指令下发,形成整个系统的统一监视、管理平台。

站控层,同样采用冗余以太网架构,包括电气系统的工作站、厂站 AVC(Automatic Voltage Control, 自动电压控制)系统和厂站 AGC(Automatic Generation Control, 自动发电控制)系统,以及工艺侧 DCS(Distributed Control System, 分布式控制系统)的操作员站、工程师站和历史站。

间隔层,主要包括绿氢子系统的过程控制器、煤制乙二醇子系统的过程控制器以及绿电子系统的保护测控装置,负责执行一体化平台的各种指令并向一体化平台发送监控、监测信息。一体化平台既支持常规的 IEC 60870-5-103 标准,也支持统一的标准 IEC 61850,这保证了系统的接入开放性和包容性,可以看到所有子系统均处于一个网络中,不再相互独立,实现了系统间的信息交互和共享。过程层以现场总线或者串口形式接入智能电力监测设备或

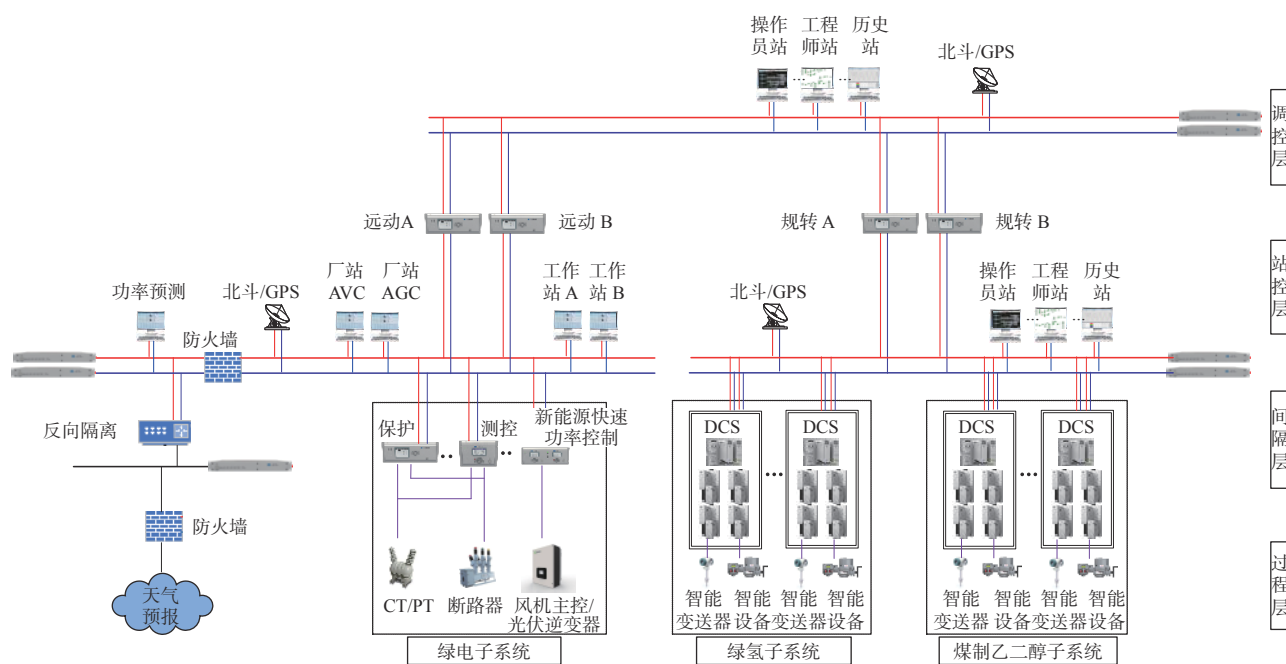


图4 绿电与绿氢耦合煤化工二次系统架构

Fig. 4 Secondary system architecture of coal chemical industry coupling green electricity and green hydrogen

者化工阀门仪表。

此外,为了提高整个系统的可靠性,历史站、工程师站、操作员站、过程控制器、交直流电源、对时装置均采用冗余配置,冗余单元主备模式运行,备用单元均处于热备用状态,主单元故障后自动完成冗余切换。

3.2 技术优势

3.2.1 横向专业融合,降低运维成本

不同子系统建设风格不统一,往往是不同的运维班组分别运维,这大大提高了运维成本。而通过一体化监控平台,打破现有化工工艺过程控制和电气保护控制之间的壁垒,实现横向专业融合。同时各子系统集成于一体化后台系统,保证了所有系统的监控画面风格统一、操作流程一致,进一步减少了后台工作站数量,也方便了运维人员开展全能盘查,大幅减少调试运维人员工作量,提高运维效率。

3.2.2 过程层资源共享,降低建设成本

在化工DCS系统与电气控制系统单独设置的常规厂站中,仅仅将电气控制系统中的重要测量、保护动作等少量信息以硬接线的方式接入DCS进行协同监控,这造成了重复性接线,增加了初期建设成本。而一体化系统中各子系统直接接入同一网络,减少规约转换装置以及重复接线带来的建设成本。

3.2.3 采集信息更完善,拓展高级应用

基于信息共享可以实现更多高级应用,例如可以搭建智慧化工平台,通过大数据、智慧化、物联网、先进控制、知识自动化等先进技术手段,使能源系统的管理和调控涵盖全流程,与生产、设备、环保、用能过程深度融合,建设集散型、知识型、决策型、精益型、智慧型的化工能源管控中心。

4 问题与挑战

4.1 绿电与绿氢行业

从绿电与绿氢行业看,由于风力发电和光伏发电天然具有波动性、间歇性等特点。实现风电光电大规模稳定制氢仍面临很多技术难题和挑战。目前,还没有完全意义上绿电直接制氢项目,大多是风电光电上网后再利用网电电解水制氢。此外,虽然绿氢的碳排放明显小于化石燃料转化成的灰氢,但目前绿氢的生产成本却是灰氢的4~6倍。

4.2 煤化工行业

从煤化工行业看:(1)绿氢价格相比于灰氢完全没有价格优势,企业考虑经济效益放弃灰氢而去使用绿氢的意愿不强。绿电制氢的波动性也有悖于煤化工工艺流程稳定用氢需求;(2)煤化工行业初期投资巨大,改造起来难度高,而大规模绿电制氢耦合煤

化工目前还没有完善的标准规范以及相对成熟的经验可以借鉴。此外,虽然绿氢替代水煤气变换制氢会简化现有煤化工工艺流程,降低整个生产过程煤耗、能耗、排放,但目前也没有系统性的研究及可行性分析。

5 结论

1)绿电与绿氢耦合煤化工系统可减少灰氢的使用,提高原煤到化工成品的碳转换率。这既有利于煤化工行业节能减排,同时也能为绿电与绿氢的发展提供巨大应用场景。具有技术可行性,发展前景广阔。

2)绿电与绿氢耦合煤化工系统可以建设二次一体化平台,采用统一开放的软、硬件平台及通信标准,通过数据共享及融合,提升各系统互联互通能力,实现跨专业控制、保护及各类高级应用,提高煤化工企业运行管理的水平及效率。

3)目前绿电与绿氢耦合煤化工还面临着绿氢成本高、不稳定,缺少成熟经验等挑战。建议国家有关部门、新能源企业、煤化工企业等需要联合攻关,合作解决绿电与绿氢耦合煤化工发展中的关键性技术,探索一种技术和经济可行的绿电与绿氢耦合煤化工的发展路径。

参考文献:

- [1] 田崑墙,屈桂洋,李斌,等.碳减排趋势下的煤化工新发展的思考[J].*广州化工*,2022,50(16):17-19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2022.16.006.
TIAN Y Q, QU G Y, LI B, et al. Thoughts on new development trend of coal chemical industry under trend of carbon emission reduction [J]. *Guangzhou chemical industry*, 2022, 50(16): 17-19. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2022.16.006.
- [2] 王强,徐向阳.“双碳”背景下现代煤化工发展路径研究[J].*现代化工*,2021,41(11):1-3,8. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.11.001.
WANG Q, XU X Y. Research on development path of modern coal chemical industry under background of "emission peak" and "carbon neutrality" [J]. *Modern chemical industry*, 2021, 41(11): 1-3,8. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.11.001.
- [3] 李智,刘涛,张志伟,等.煤化工低碳技术及其与新能源耦合发展的研究进展[J].*中国煤炭*,2022,48(8):66-81. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2022.08.011.
LI Z, LIU T, ZHANG Z W, et al. Research progress on low-carbon technology of coal chemical industry and its coupling development with new energy [J]. *China coal*, 2022, 48(8): 66-81. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2022.08.011.
- [4] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].*中国电机工程学报*,2021,41(增刊1):28-51. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211016.
HUANG Y H, DING T, LI Y T, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(Suppl. 1): 28-51. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211016.
- [5] 王进君,郭建华.风煤富集区域的风-氢-煤化工多能耦合系统碳排放核算与低碳效益评估[J].*高电压技术*,2023,49(1):94-104. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211557.
WANG J J, GUO J H. Carbon emission accounting and carbon benefit evaluation of wind-hydrogen-coal chemical multi-functional coupling system in wind coal enriched areas [J]. *High voltage engineering*, 2023, 49(1): 94-104. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211557.
- [6] 潘英.能源战略下的能源电力发展方向和碳排放问题[J].*南方能源建设*,2019,6(3):32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.006.
PAN Y. Energy power development direction and low carbon emission under energy strategy [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.006.
- [7] 张灿,张明震,申升,等.中国氢能高质量发展的路径建议与政策探讨[J].*南方能源建设*,2022,9(4):11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
ZHANG C, ZHANG M Z, SHEN S, et al. Path suggestion and policy discussion for China's high-quality development of hydrogen energy [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 11-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.002.
- [8] 罗志斌,孙潇,孙翔,等.氢能与储能耦合发展的机遇与挑战[J].*南方能源建设*,2022,9(4):24-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
LUO Z B, SUN X, SUN X, et al. The coupling development of hydrogen and energy storage technology: opportunities and challenges [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(4): 24-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
- [9] 许传博,刘建国.氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J].*中国工程科学*,2022,24(3):89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.010.
XU C B, LIU J G. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: application value, challenges, and prospects [J]. *Strategic study of CAE*, 2022, 24(3): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2022.03.010.
- [10] 刘尚泽,于青,管健.氢能利用与产业发展现状及展望[J].*能源与节能*,2022(11):18-21. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2022.11.038.
LIU S Z, YU Q, GUAN J. Current situation and prospects of hydrogen energy utilization and industrial development [J].

- Energy and energy conservation, 2022(11): 18-21. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2022.11.038.
- [11] 史倩, 过良, 张永亮. 新能源制氢在传统炼化企业的应用 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
- SHI Q, GUO L, ZHANG Y L. Application of water-electrolytic hydrogen production technology in traditional refinery and chemical enterprise [J]. Southern energy construction, 2022, 9(4): 32-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.004.
- [12] 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. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.11.002.
- WANG M H. Performance analysis and suggestions on hydrogen energy coupling coal chemical system [J]. Modern chemical industry, 2021, 41(11): 4-8. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.11.002.
- [13] 李启峰, 邓长虹, 徐泰山, 等. 计及电压随机性的风光消纳能力评估方法 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(1): 71-79. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-01-009.
- LI Q F, DENG C H, XU T S, et al. An evaluation method of wind-solar consumption capacity considering voltage randomness [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2023, 56(1): 71-79. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-01-009.
- [14] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. “双碳”目标下中国氢能发展战略 [J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 156-179. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.04.015.
- MENG X Y, CHEN M Y, GU A L, et al. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets [J]. Natural gas industry, 2022, 42(4): 156-179. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.04.015.
- [15] 李鹏, 肖建群. 电解水制氢在电厂和氢能项目的设计应用 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
- LI P, XIAO J Q. Design and application of hydrogen production by electrolysis water in power plants and hydrogen energy projects [J]. Southern energy construction, 2020, 7(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.006.
- [16] 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(4): 995-1000. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8719.2022.04.026.
- YANG G J, LIU H Y. Status and prospect for the coupling development of modern coal chemical industry with green electricity and green hydrogen [J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section), 2022, 38(4): 995-1000. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8719.2022.04.026.
- [17] 史晓斐. 风能光能互补耦合大规模制备低碳氢源集成化工系统 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2021.001485.
- SHI X F. Wind-solar energy coupling for large-scale stable hydrogen supply to chemical process [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2021.001485.
- [18] 杨学萍. 碳中和背景下现代煤化工技术路径探索 [J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3402-3412. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0475.
- YANG X P. Exploration on technical path of modern coal chemical industry under the background of carbon neutralization [J]. Chemical industry and engineering progress, 2022, 41(7): 3402-3412. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0475.
- [19] 黄文章, 袁建军, 石国峰, 等. 风电制氢与煤化工集成系统可行性分析 [J]. 现代化工, 2021, 41(7): 5-8. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.07.002.
- HUANG W Z, YUAN J J, SHI G F, et al. Feasibility discussion about an integration system between hydrogen production by wind power and coal chemical industry [J]. Modern chemical industry, 2021, 41(7): 5-8. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.07.002.
- [20] 刘欣. 乙二醇合成工艺的研究 [J]. 山东化工, 2023, 52(2): 11-12,16. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2023.02.046.
- LIU X. Study on synthesis process of ethylene glycol [J]. Shandong chemical industry, 2023, 52(2): 11-12,16. DOI: 10.19319/j.cnki.issn.1008-021x.2023.02.046.
- [21] 储根云, 范英杰, 张大伟, 等. 煤制乙二醇关键单元技术与低碳集成工艺的研究进展 [J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1654-1666. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2147.
- CHU G Y, FAN Y J, ZHANG D W, et al. Progress in key unit technologies and low-carbon integrated processes of coal to ethylene glycol process [J]. Chemical industry and engineering progress, 2022, 41(3): 1654-1666. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-2147.

作者简介:



石志鹏

石志鹏(通信作者)

1995-, 男, 江苏南京人, 工程师, 东南大学动力工程硕士, 主要从事工业过程控制方向工作(e-mail)shizp@nrec.com。

(编辑 叶筠英)