

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.12.006

“双碳”目标下传统火电面临的挑战与对策

Challenges and countermeasures of traditional thermal power under the goals of
carbon neutrality and carbon peaking

马双忱¹, 杨鹏威¹, 王放放², 樊帅军¹, 赵光金², 李琦¹, 袁文玺³, 卢锐¹, 邱明杰¹
MA Shuangchen¹, YANG Pengwei¹, WANG Fangfang², FAN Shuaijun¹, ZHAO Guangjin²,
LI Qi¹, YUAN Wenxi³, LU Rui^{1,2}, QIU Mingjie¹

(1. 华北电力大学 环境科学与工程系, 河北 保定 071003; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450000;
3. 成都城电电力工程设计有限公司, 成都 610041)

(1. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute of Henan Province, Zhengzhou 450000, China; 3. Chengdu Chengdian
Electric Power Engineering Design Company Limited, Chengdu 610041, China)

摘 要:“双碳”目标下, 电力行业的低碳发展面临严峻挑战。通过梳理国外碳中和目标及采取的路径和措施, 结合我国“双碳”目标及预期路径, 分析了传统火电企业面临的可再生能源消纳、传统火电退役困难等问题。传统火电结合储能技术可提升灵活性, 满足电力系统运行的稳定性; 传统火电可融合化工产业及碳捕获、利用与封存(CCUS)技术等构建火电新型产业链。传统火电转型发展关乎国家能源安全与民生保障, 在可再生能源快速发展过程中应克服新能源消纳和储能障碍, 同时, 火电的兜底作用和基荷作用不可忽视。

关键词:温室气体排放; “双碳”目标; 火电; 储能技术; CCUS; 新型电力系统; 多能耦合; 可再生能源

中图分类号:TK 01+9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)12-0036-10

Abstract: To achieve the goals of carbon neutrality and carbon peak, there are stern challenges confronted by power industry in its low-carbon transformation. Combing the goals and countermeasures taken by foreign countries and regions, the difficulties faced by traditional thermal power enterprises in renewable energy consumption and old unit decommissioning are analyzed. Combination traditional thermal power plants with energy storage technology can enhance their operation flexibility and stabilize the whole power system. Integrating traditional thermal power with chemical industry, CCUS and other new technologies can build a new thermal power industry chain. The transformation and development of traditional thermal power is related to national energy security and people's livelihood. Thus, in the rapid development of renewable energy, the obstacles of new energy consumption and energy storage should be overcome, and the role of thermal power as safeguard and base load is unignorable.

Keywords: greenhouse gas emission; the target of carbon neutrality and carbon peaking; thermal power; energy storage technology; CCUS; new power system; multi-energy coupling; renewable energy

0 引言

温室气体的过量排放会增强温室效应, 造成全球极端气候的出现, 严重影响人类的生存与发展^[1], 因此, 控制温室气体减排已成为当前环保的重点。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的统计, 全球因化石燃料的使用导致的CO₂排放量约为237亿 t/a^[2-3]。为应对全球气候问题, 2020年我国

提出了“双碳”目标, 即我国的CO₂排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和^[1]。“双碳”目标的确定, 为工业体系, 尤其是CO₂排放占比达40%的能源电力行业, 带来了深层次的影响, 也引导着产业结构的布局与发展。

我国印发的《2030年前碳达峰行动方案》中指出, 要大力发展新能源, 在保障能源安全的前提下, 推进煤炭消费替代和转型升级, 加快构建清洁、低碳、安全的能源体系。侯艳峰等^[4]指出, 我国“双碳”目标的实现需要发电部门完全脱碳, 尽可能实现全经济部门电气化, 并且需要氢能、生物质能以及碳

收稿日期: 2021-10-12; 修回日期: 2021-11-30

捕获、利用与封存(CCUS)等技术的大规模应用。Pollitt^[5]应用E3ME宏观经济模型分析并指出,中国要实现碳达峰,需要建立完备的碳市场以及避免新增煤电装机。我国是世界上最大的煤炭生产国与消费国,据国家统计局核算,2019年我国煤炭消费量占能源消费总量的57.7%^[6]。煤炭广泛应用于发电、钢铁行业、水泥生产、建筑材料、化学制品和建筑等领域。其中,电力行业的耗煤量占比较高。传统火电是电力行业煤耗的重心,火电机组的发展情况对电力行业的碳排放达峰具有重要影响。

本文将梳理国内外的碳中和目标及其实施情况,提出我国实现“双碳”目标的核心是优化电力行业结构、构建绿色低碳电力系统。通过分析“双碳”目标下我国传统火电所面临的挑战,为火电企业的发展提供新对策。

1 “双碳”目标及预期路径

1.1 国外的碳中和目标

IPCC发布的《全球升温1.5℃特别报告》指出^[7-8],实现1.5℃温控目标有望避免气候变化给人类社会和自然生态系统造成不可逆转的负面影响。达成该目标需要各国共同努力,到2030年实现全球净人为CO₂排放量较2010年减少约45%,并尽早达到近零碳排放^[8],各国承诺碳中和时间见表1。

表1 国外承诺碳中和时间

Tab. 1 Committed time for achieving carbon neutrality			
碳中和时间	正在立法	立法规定	承诺
2035年			芬兰
2040年			奥地利、冰岛
2045年		瑞典	
2050年	欧盟、加拿大、韩国、西班牙、智利、斐济	英国、法国、丹麦、新西兰、匈牙利	日本、德国、瑞士、挪威、爱尔兰、南非、葡萄牙、哥斯达黎加、斯洛文尼亚、马绍尔群岛、美国

由表1可知,目前已有许多国家和地区明确了碳中和措施。德国于2019年9月通过《气候行动计划2030》,明确具体行动,规定到2030年实现温室气体排放总量较1990年至少减少55%^[9-10]。法国在2015年提出《国家低碳战略》,建立碳预算制度,并在2020年正式通过相关法案,对2050年碳排放减量的目标进行调整^[11]。

1.2 国外碳中和的主要路径

国外各行业为实现碳中和目标采取的路径及措施对我国实现“双碳”目标有一定的参考意义。其中计划实现“双碳”目标的国家/地区主要采用碳市场、碳减排等措施^[12],主要包括《京都议定书》框

架下的国际排放交易机制(IET)、联合履约机制(JI)和清洁发展机制(CDM)三大碳交易机制,以及《京都议定书》框架之外的自愿减排机制(VER)等^[13-16]。澳大利亚构建了比较完整的碳市场执法监管体系,设立了碳排放信用机制和碳中和认证制度^[17-18]。英国通过了全国性碳交易法并建立了规范碳交易市场^[19-20]。《巴黎协定》于2016年生效,并于2021年11月13日在格拉斯哥气候大会上通过了《巴黎协定》的实施细则,明确了“将气温上升控制在1.5℃之内”的目标,承诺到2030年将全球CO₂排放量削减近一半,为最终碳中和目标的实现奠定基础^[21]。

近年来,世界各国采取多种策略促进本国碳中和目标的达成。例如,美国纽约提出在2050年之前实现碳中和^[22],主要策略是“碳减排+碳信用/碳补偿”,计划到2040年实现100%无碳能源发电;美国的希博伊根污水处理厂利用厂外高浓度食品废物与剩余污泥等生物质进行热电联产,大幅降低运行能耗,以实现厂内的碳中和^[23-24];丹麦首都哥本哈根早在2009年就确定了2025年成为世界上第1个零碳城市的目标,并于2012年通过了《哥本哈根2025气候规划》,计划从“碳中和”过渡到“气候中和”最终到“零石化”^[25]。这些计划与措施,对促进区域范围内的减碳工作发挥了较大的作用。

为实现碳中和目标,国外各城市大多采用“可再生能源+储能体系”的能源结构,并通过生物质发电、热电联产等技术路线,阶段性地向着零化石能源的方向发展^[26]。如纽约就采用“城外集中式可再生能源发电+城内分布式光伏发电+城市废水处理和有机垃圾产生的沼气发电+储能体系”的技术路线;澳大利亚的阿德莱德在实现100%可再生能源发电的目标时主要采用“分布式光伏+储能”的模式。总体看,国外采取的减碳策略主要为复合技术路线,在提高能源利用率的同时提高可再生能源消纳比重,该路线对于我国“双碳”目标的推进实施具有较强的借鉴和参考意义。

1.3 我国“双碳”目标及预期路径

1.3.1 我国“双碳”目标的路径

2021年10月12日,在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上:指出我国将构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系,并提出了2025年实现碳达峰、碳中和奠定坚实基础;2030年碳排放达峰后稳中有降;2060年碳中和目标顺利实现。在此基础上,清华大学王灿等^[27]将我国“双碳”目标的实现过程分为4个阶段,即2020—2030年的达峰期、2030—2035年的平台期、2035—2050年的下降期和2050—2060年的中和期。大部分发达国家/地

区从下降期到中和期需要 20 余年,个别国家/地区甚至持续约 60 年(如欧盟)。我国预计要用 30 年才能实现碳中和目标,时间上较为紧迫^[28]。这就意味着,我国需要加强碳排放的控制和相关技术研究的投入,从源头控制和末端治理 2 个方面推动“双碳”目标下相关策略的落地实施。

1.3.2 “双碳”目标下电力行业的发展路径

在我国,电力行业是当前碳排放的最主要来源,其碳排放占全部碳排放的 1/3 以上。因此,我国实现“双碳”目标的核心是构建以新能源发电为主体的新型电力系统,推进低碳、低能耗的电力系统设施建设,加强低碳、节能、清洁生产技术的推广应用,并配套相应的政策措施和市场化机制,实现能源结构的优化调整与能源供给的技术进步。

在此背景下,由火电企业参与的可再生能源发电装机将会迎来倍速增长,传统火电机组的角色和定位也会迎来新的转变。在现有技术水平下,可再生能源发电的不确定性及其对于电网所带来的冲击,也将会给电力系统的稳定运行带来较大冲击。因此,要完成“双碳”目标下新型电力系统的构建,火电企业在实现绿色低碳转型的道路上必将面临严峻的挑战。

2 “双碳”目标下火电企业面临的挑战

2.1 可再生能源发电的瓶颈

2.1.1 可再生能源发电的资源禀赋问题

近 10 年来,我国可再生能源发电装机规模已处于国际领先地位。2018 年我国可再生能源装机容量(包括光伏、风电、水电等)占全球 29.6%,已位居世界第一,预计至 2050 年,我国光伏和风电约占比全国总发电量的 72%(如图 1 所示)。但是,2018 年可再生能源的发电量在能源结构中占比相对较低,仅为 26.7%^[29-31],除了政策、技术和市场因素之外,更主要是受资源禀赋的影响。可再生能源发电能量密度低,其装机施工的用地需求较大,受到诸多因素限制^[32]。因此,较大比重的可再生能源设施主要集中在西北地区,其外送电成本也会相应提高。

2.1.2 可再生能源发电并网的障碍

现阶段,大规模、高比例的可再生能源发电并网尚存在一定的技术瓶颈,影响其消纳比例。仅在 2019 年上半年,弃风电量和弃光电量分别为 10.5 TW·h 和 2.6 TW·h^[29, 33-34]。风电与光易受气候及地域影响,发电出力一般具有随机性和波动性,这会影响到电网中电力平衡的维持。例如,2021 年 2 月在美国的得克萨斯州,因电力系统的过度低碳化

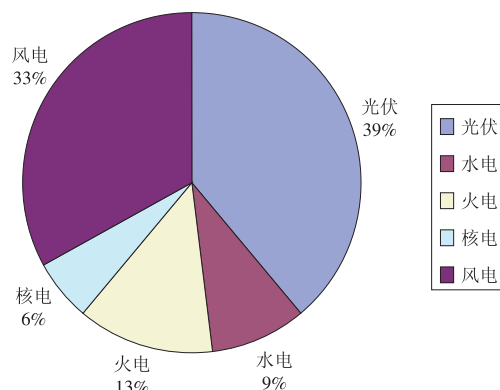


图 1 预测 2050 年各类发电形式的占比情况

Fig. 1 Predicted power generation composition in 2050

(风光发电占比较高),在极端天气来临时可再生能源出力不能满足需求,造成大面积停电现象^[35]。因此,解决可再生能源发电并网问题将是未来“双碳”目标能否得以顺利实现的关键。

2.1.3 可再生能源发电成本问题

在可再生能源发电开发过程中,建设施工、研发运维、电力传输等过程中的成本是不可忽视的。

在发展初期,可再生能源发电成本相对较高,其发展主要依靠政策扶持。随着技术进步和市场机制的成熟,其发电成本开始逐步下降:2010 年我国风电的成本为 0.48 元/(kW·h),2020 年降至 0.29 元/(kW·h),下降了 40%;2010 年我国光伏发电的成本为 2.08 元/(kW·h),2020 年为 0.36 元/(kW·h),下降了 83%^[36]。

随着可再生能源发电并网比例的提高,灵活性电源改造、系统调节运行、电网建设等方面的系统性成本可能会增加。美国实施可再生能源配额制 12 年后,可再生能源电量比例提高 5%,电价提高了 17%;2019 年德国可再生能源发电占比突破 40%,电价较 2015 年增长约 8%^[36-37]。根据夏丽娟等^[38]的初步估算,我国风电和光伏发电量占比上升到 20% 时,发电成本约增加 0.03 元/(kW·h);占比上升到 30% 时,成本约增加 0.06 元/(kW·h);当占比达到 50% 时,总发电成本将会大幅增加。因此,随着“双碳”目标的逐步推进,可再生能源发电在成本方面的复杂性将会逐步凸显。

可再生能源发电的快速发展,是落实“双碳”目标和构建新型电力系统的重要途径之一,其在技术开发与应用环节存在或预期出现的问题须尽早引起重视。

2.2 传统火电机组的转型障碍

2.2.1 传统火电机组的运行压力持续

在“双碳”目标背景下,传统火电机组将持续承受一段时期的运行压力。目前,我国仍处于工业化

和城市化发展阶段的中后期,城市格局不断演变^[39]。2019年化石能源占一次能源消费的85.7%,燃煤发电和化石用能排放的CO₂占总排放量的88%^[1,40]。在钢铁、建材、化工、有色金属和制造业等高耗能行业,煤炭使用量占比约45%^[41]。约50%的煤炭消费量用于发电,其余煤炭的终端使用者将集中于供热、交通或其他民用领域等^[42]。因此,由于新能源发电对火力发电的高比例替代尚需一定的过渡期,未来一段时间内,能源供给的主力仍将来自传统火电机组,传统火电减排形势依然严峻。

2.2.2 传统火电机组使用年限较低

1995—2016年各量级煤电装机占比如图2所示。可以看出,近些年燃煤机组以大容量装机为主,我国拥有世界上数量最多的GW级超超临界燃煤发电机组。这些煤电机组存在着一定锁定效应,难以淘汰或转型。至2020年,我国现役的1TW煤电机组平均运行年龄才约13年,而发达国家的煤电机组平均运行年龄约为40年^[43]。从设计与成本角度考虑,我国煤电机组大多数还远未达到退役时期,针对这些煤电机组的减碳控碳任务依然较为繁重。

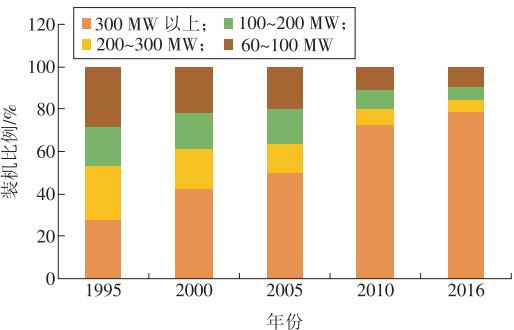


图2 各容量煤电装机占比

Fig. 2 Proportions of coal-fired units with different capacities

2.2.3 发电企业的环保问题

根据国家能源局发布《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》,2025年全国火电平均供电标准煤耗必须降至300g/(kW·h)以下。另外,对发电过程中产生的SO_x、NO_x、颗粒物等污染物的排放国家也有严格的排放限值。环保压力与减碳压力的叠加不可避免地会导致发电企业能耗及成本的增加。因此,如何提升发电的清洁化、提高发电效率、减少污染物排放,并尽力降低采取各种技术措施所产生的成本,将是未来传统火电企业需要面临的挑战。

2.2.4 网侧的安全稳定运行问题

在电网中,传统火电作为基荷电源,可再生能源的增加促使传统火电逐渐向调峰电源的方向发展。当可再生能源出力降低时,需要传统火电机组

高负荷运转,确保城市正常的运行。但因煤价高、煤电灵活性不足,导致其瞬时出力困难,影响电网的正常运行,严重时将导致电网出现负荷缺口。2021年9月,因风电出力骤减等原因,东北的电力供应缺口骤增。为防止全电网崩溃,东北电网调度部门依照有关预案,执行“电网事故拉闸限电”,直接影响居民和非实施有序用电措施企业^[44]。发电侧的稳定输出对于网侧的安全运行十分重要,火电与可再生能源发电的协调技术发展始终是多年来亟待解决的难题之一。

3 传统火电的技术发展对策

当前火电企业面临困难和挑战主要是如何综合各种技术实现“双碳”目标

3.1 传统火电耦合储能技术

按照目前技术发展的形势,预计到2030年可再生能源发电在总发电量中的占比仍会低于30%^[45-46]。除了推进并网技术的进步,大力发展储能产业将是促进可再生能源消纳的重要途径。储能技术包括物理储能技术、储热技术和电化学储能技术等^[47-50]。

3.1.1 物理储能技术

目前,常见的物理储能技术包括为抽水储能和压缩空气储能^[51],两者均是GW级储能技术,具体见表2。抽水储能是在电力负荷低谷期将水从下池水库抽到上池水库,将电能转化成重力势能储存起来。抽水储能技术成熟、容量大、储能周期长,但是对地形要求较大、施工难度较高、存在着地质安全隐患。压缩空气储能与抽水储能技术类似,通过电力驱动压缩机压缩空气,将电能转化为空气内能^[50,52]。目前压缩空气储能技术较为成熟,但是商业化进程相对较慢。

表2 物理储能技术的比较			
Tab. 2 Comparison of two physical energy storage technologies			
储能技术类型	成熟度	投资成本/(元·kW ⁻¹)	转化效率/%
抽水储能	商业化	5 000~6 000	71~80
压缩空气	示范项目	3 000~5 500	42~75

3.1.2 储热技术

储热技术包括熔盐储热、热水储热等。传统火电配储热系统的灵活性改造方案见表3。

熔融盐蓄热具有温区广、比热容高、换热好等优点,通过换热器等设备将存储的热能提供给热发电的设备使用,目前已在太阳能热发电厂中实现应用。从蒸汽生产流程来看,熔盐热储能适用于高温高压蒸汽的热能存储,可以在汽轮机高压旁路或者

表 3 传统火电机组配储能系统方案
Tab. 3 Integration of energy storage systems and traditional thermal power stations

方案	优点	缺点
热电联产机组配热水储热灵活调峰 ^[53]	技术相对成熟、改造范围较小、耦合情况好	空间使用较大、储热时运行负荷大、夜间和极端天气需辅助加热
纯凝机组配高温熔盐储热系统灵活性调峰 ^[34]	性能良好、系统运行压力小、温度范围较宽、储热量大、价格低、储热密度大	熔盐管路容易发生凝固或冻堵；熔盐对管道和储罐腐蚀性较强；极端天气下需要采取防冻措施

再热器出口设置熔盐储热系统^[54]。但熔融盐蓄热技术在选择与热量存储和输送关键的设备材料及工质等方面存在困难,该技术仍处在示范应用阶段,主要技术难点包括导热油和熔融盐之间的换热器设计、熔盐泵的制作、整个电站保温系统、预热系统以及故障监控的设计;传热介质在不同时刻的流态、传热和与蓄热系统的配合;整个电站的匹配和控制等。实际上,无论是高温高压的主蒸汽还是过热度很高的再热蒸汽,载热密度都比较低;且蒸汽高温潜热需要维持高压,熔盐换热需要采用换热面积较大的高压厚壁换热器,这导致换热效率低下,技术经济可行性低。

3.1.3 电池储能技术

电池储能技术,如液流电池、铅酸电池和锂电池等,应用较广泛。以锂电池为代表的电池储能技术已经初步进入商业化、规模化应用,且具有巨大的发展空间,是最具前景的电力储能技术。无论是作为手机、笔记本电脑的独立电池,还是作为电动工具和其他电子产品中的微型电池模块,锂离子电池在各种小型系统中均得到良好应用。但受自身循环寿命、成本和安全性等问题的限制,目前实现大规模的应用较为困难^[55]。

卡诺电池技术(即热泵式储电技术)不受地理和地质条件约束,能够实现高效、低成本的大规模储能^[55-57]。在卡诺电池中,通过使用高温热泵将多余的可再生电能转换为90~500℃的热量存储起来。当需要释放的时候,热能可转化为电能和热能,既可以供电,也可在采暖期进行供热,使用年限较长。随着熔盐储热的技术发展,熔盐卡诺电池的储电设备成本会逐渐降低。

3.1.4 化学燃料储能技术

化学燃料储能,即通过电化学反应将电能储为化学能,包括氢储能技术、氨储能技术、有机燃料储能技术等。

(1)氢储能技术。氢能作为清洁能源,也是目前新型燃料电池的首选燃料。氢储能技术可实现长周期调峰,随着技术进步和成本的大幅降低,是极具发展潜力的规模化储能技术。未来氢储能技术有望在可再生消纳、电网削峰填谷、用户冷热电

气联供等场合实现推广应用。但是受限于规模较小且成本略高,尚无法做到大规模使用^[58]。

氢能高效利用的过程中,制氢过程较为关键。制氢方式包括煤、天然气等化石能源重整制氢、工业副产氢、电解水制氢等。对于电力行业来说,电解水制氢适用性较好,其原理是在直流电的作用下,通过电化学过程将水分子解离为H₂与O₂,分别在阴、阳两极析出。对于传统火电企业,可在厂内电解水制氢,并结合储能技术进行储氢;副产物氧气还可以送进锅炉内满足富氧燃烧,以实现能源清洁高效利用。这样,通过“电-氢-电(或化工原料)”的方式将电力、交通、热力和化工等领域耦合起来,实现多产业融合。

(2)氨储能技术。作为氮氢化合物,氨较为稳定,便于储存、运输。与氢能类似,氨燃烧时不会产生CO₂,配备氨燃料动力的运输设备及发电厂可有效地减少碳化物和硫化物,实现真正意义上的“零”排放。电厂自己制备氨,还可以满足电厂污染物治理过程中对吸收剂的巨大需求,未来的脱硫、脱硝设备捕集到的物质都通过氨来解决。氨的体积能量密度高于氢,与汽油、柴油相当,是一种优质燃料。通过常温常压下,利用氮气和水为原料电解催化制备氨,对于电厂来说较为容易。且氨也可以作为供氢载体,为氢燃料汽车提供车载氢源^[59]。

(3)有机燃料储能技术。有机燃料储能技术,结合末端烟气中CO₂,经水中催化电解制备醇类等有机燃料后进行储存,如图3所示。醇类等有机燃料优势在于储存安全系数高、运输便捷、用户端配套的基础设施成熟。对于一些电气化较弱的应用场合,有机燃料比电能有着较高的利用价值。但其目前存在转换效率低等问题,尚处于研究阶段,大连化物所等单位正在进行科研攻关^[60-61]。

在过渡到以可再生能源为主体的新型电力系统期间,传统火电逐渐向着调峰电源发展。通过耦合储能技术,可提高火电的灵活性调峰能力,加强电力系统的调节能力,可满足高比例可再生能源的消纳。

3.2 传统火电机组耦合CCUS技术

CCUS是实现碳中和目标的关键技术,该技术

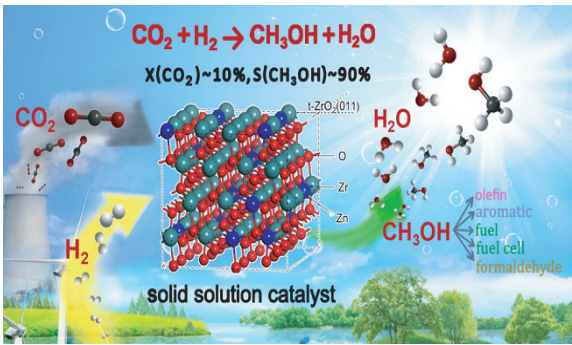


图3 电化学催化合成有机燃料

Fig. 3 Electrochemical catalytic synthesis of organic fuel

预计可以在 2050 年前提供 11 亿~27 亿 t 的碳减排量。美国较早地结合碳市场开展了 CCUS 技术应用,目前有 14 个正在运行的商业化 CCUS 项目^[16, 62]。CCUS 技术中 CO₂ 捕集方法主要有:吸收法、吸附法、膜法、低温冷冻法等^[63-64]。捕集到的 CO₂ 可以选择封存与利用 2 种路径^[63-65]:一种是地质封存和固化,或强化石油、天然气等资源的开采;另一种是合成有价值化工品等,如作为饮料、食品添加剂。碳利用和封存的技术路径如图 4 所示。

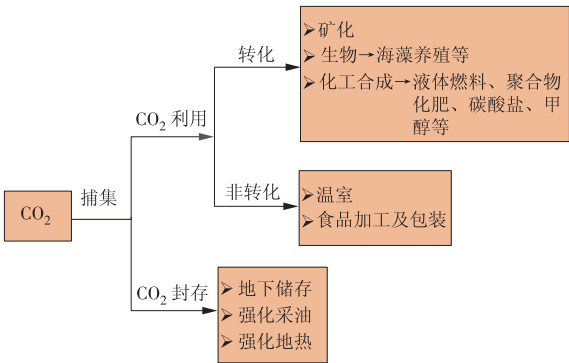


图4 CCUS 技术路径

Fig. 4 CCUS technical route

(1)从捕集技术看,电厂中烟气的 CO₂ 分压低,烟气量巨大且成分复杂,相比其他方法而言,化学溶剂吸收法是目前较为合适的选择^[50]。在化学溶剂吸收法中最受关注的溶剂是有机醇胺类,其中以一乙醇胺(MEA)为主。MEA 由油气脱碳工艺衍生而来,在烟气脱碳循环过程中具有可观的 CO₂ 吸收效率^[66];但是在复杂烟气环境中,MEA 容易发生氧化分解、热降解等不可逆过程而导致吸收剂损失。

在化学吸收法中,氨法吸收工艺近年来开始受到重视。氨水或液氨是选择性催化还原法(SCR)脱硝的还原剂以及氨法烟气脱硫(FGD)的吸收剂,大多数的电厂建有氨水储存系统。低温常压环境下,N₂ 和 H₂O 可电催化合成氨,该过程在电厂中可做到清洁无污染。通过氨法吸收尾端烟气,可实现酸性气体的一体化脱除。如 Alstom 公司开发的冷态氨

法^[67],就是利用(NH₄)₂CO₃ 和 NH₄HCO₃ 的混合浆液作为可循环利用的 CO₂ 吸收剂,有较高的脱碳率。氨法脱碳后的碳铵浆液经过制碱工艺、制尿素工艺、制碳酸氢铵工艺实现生产利用,如图 5 所示。

(2)从转化技术看,我国科学院天津工业生物技术研究所马延和团队^[68],不依赖于植物光合作用的合成过程,通过采用 11 步反应的非自然固碳与淀粉合成途径,在实验室中首次实现从 CO₂ 到淀粉分子的全合成。这项技术预示着工业废气中 CO₂ 有向高附加值化学品转化的可能,既有助于实现碳减排,又解决了粮食资源的问题,CO₂ 的利用性显著提升。

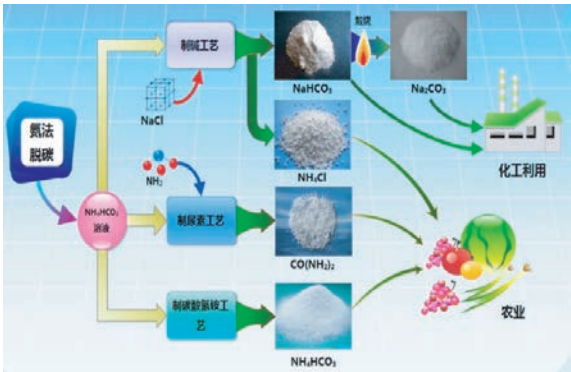


图5 CO₂ 转化路线

Fig. 5 CO₂ conversion route

(3)从技术发展的阻碍看,能耗与成本问题一直是 CCUS 技术路线的发展瓶颈^[69]。在 CCUS 捕集、输送、利用与封存环节中,捕集是耗能较高的环节。例如,为一家 MW 级的超超临界电厂增设碳捕集设备,其耗能可能直接把该电厂从超超临界降低到亚临界^[70]。目前 CCUS 技术的研发主要集中在实验室探索阶段,虽时有小型工业化装置出现,但若衡量全生命周期的能耗,进而折算为 CO₂ 排放量,就会发现现有技术无法完成负碳技术、实现碳中和目标。只有当超高效、成熟的催化技术涌现时,CCUS 的工业路线才有可能真正地实现大规模应用。

3.3 传统火电耦合多种技术

根据国家发展改革委、国家能源局发布《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》,要加快实施现有煤电机组的改造升级;对无法改造的机组逐步淘汰关停,并视情况将具备条件的转为应急备用电源。在未来,将储能技术、CCUS 技术等多种技术相互融合与应用,可为传统火电企业带来新的发展机遇。

3.3.1 火电-光伏-储能联动发展

可再生能源发电的波动性是影响其消纳的技术阻碍。借助储能技术,光伏与传统火电互补发

电,可利用燃煤电站出力调整范围大的优点,弥补太阳能的不稳定性和间歇性,降低单一太阳能热发电的成本,同时可减少燃煤电站煤耗,实现节能减排。例如,刑晨健等^[71]提出通过聚光光伏-余热辅助氨法脱碳的光伏光热综合利用方式,将传统火电与光伏发电相结合起来(如图6所示)。该技术是通过利用聚光光伏发电过程中产生的大量低品位废热辅助碳捕集,可以提高光伏系统效率。通过建立聚光砷化镓-余热辅助胺法脱碳的能量转化模型,验证了聚光光伏余热在质和量上都具有直接辅助胺法脱碳的潜力。

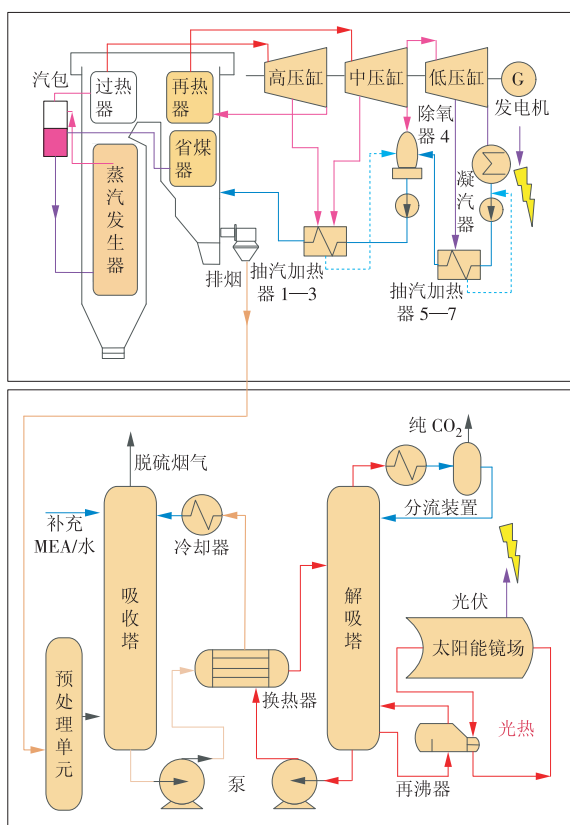


图6 聚光光伏-余热辅助氨法脱碳系统示意^[71]

Fig. 6 Schematic of concentrated photovoltaic waste heat assisted amine decarbonization system^[71]

3.3.2 耦合城市生物质进行发电

生物质是指通过光合作用而形成的各种有机体,储存有大量的能量,污水处理过程中形成污泥就是其中一种。在煤电技术发展中,通过煤炭与污泥、生活垃圾等生物质的混合混烧,可显著降低原有燃煤电厂的 CO_2 排放量,同时可利用大容量高参数燃煤发电机组发电效率高的优势,提高生物质的发电效率。为实现生物质的掺烧,需要对燃料制备系统和锅炉燃烧设备进行改造,发挥不同技术路线的优势,不断降低生物质发电的投资成本^[72]。

3.3.3 传统火电多产业转型升级

传统火电可以通过耦合多种产业进行转型升级,实现与上下游的产业链融合,如图7所示。

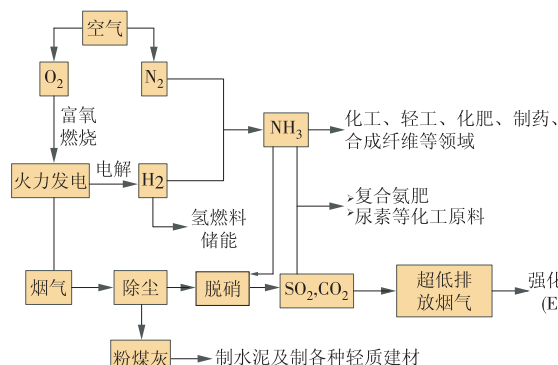


图7 传统火电转型产业链

Fig. 7 Transformation of tradition thermal energy industry chain

传统火电通过电解制氢,产生的氢气可作为氢燃料,应用于用户终端。电解制得的 H_2 与空气分离得到的 N_2 进行催化反应制 NH_3 ,可应用于化工、轻工、化肥、制药、合成纤维等领域,也可用于电厂的脱硝过程,结合CCUS技术, NH_3 吸收烟气中的 CO_2 和 SO_2 ,制得复合氨肥和尿素等原料,可应用于农业、化工领域。空气分离剩余的 O_2 可进入锅炉用于富氧燃烧。碳中和中后期,传统火电通过转型,可实现低成本、低能耗、高效产出各种所需化工资源。根据不同煤电机组的实际情况,探索多种技术并行的改造方案,来实现传统火电企业的新发展。

为促进可再生能源消纳的消纳,可通过发展火电-光伏-储能技术、火电-生物质联合发电技术等路线,发挥多技术耦合的优势,并不断降低成本与能耗,提高设备利用效率;为解决环保问题,可通过发展多路线CCUS技术,实现负碳技术利用;为解决发电侧与网侧的技术衔接与关联问题,提高电网运行稳定性,可通过发展不同路线的储能技术,促进可再生能源消纳的同时,提高火电机组灵活性与调峰能力。这样,传统火电企业才能更好适应国家“双碳”战略目标的要求,高质量实现转型发展。

4 结束语

随着“双碳”目标的提出,各行业都将迎来新的发展,其中推进低碳、低能耗的电力系统设施建设及构建新型电力系统是实现“双碳”目标的关键。在构建新型电力系统过程中,传统火电企业将面临严峻的挑战,其中可再生能源发电的发展瓶颈及传统火电的转型障碍最为引人注目。但能源行业清洁低碳是大势所趋,对于传统火电企业来说,“双

碳”目标也是实现转型升级,走向低碳之路的机遇。传统火电应加大适应“双碳”需要的多种新技术开发,根据电厂的情况进行技术耦合应用。传统火电可结合储能、化工、CCUS等新技术构建火电新型产业链。值得注意的是,传统火电转型发展关乎国家能源安全与民生保障,在减煤降碳的过程中,火电逐步从主体电源向基荷电源过渡,为保障清洁能源的顺利消纳和极端情况下的能源安全,火电的兜底作用也不可忽视。

参考文献:

- [1]屈博,刘畅,李德智,等. “碳中和”目标下的电能替代发展战略研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 1-3, 9.
QU Bo, LIU Chang, LI Dezhi, et al. Research on the development strategy of electricity substitution under the target of "carbon neutral" [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 1-3, 9.
- [2]国家统计局. 中华人民共和国2019年国民经济和社会发展统计公报[J]. 今日工程机械, 2020(1): 16-18.
- [3]国际能源署. 2019年全球碳排放报告[R]. 2020.
- [4]侯艳峰. 燃煤-捕碳机组热力系统优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [5]POLLITTH Hector. 分析: 在2060年实现“碳中和”可使我国“更富足”[R/OL]. (2020-09-29) [2021-10-29]. [https://www. carbonbrief. org/https-www-carbonbrief-org-2060-tan-zhong-he-ke-shi-zhong-guo-geng-fu-zu](https://www.carbonbrief.org/https-www-carbonbrief-org-2060-tan-zhong-he-ke-shi-zhong-guo-geng-fu-zu).
- [6]刘继生. 基于综合物探的矿井采空区探测技术研究[J]. 中国化工贸易, 2020, 12(30): 101, 103.
- [7]姜克隽. IPCC 1.5℃特别报告发布, 温室气体减排新时代的标志[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 640-642.
JIANG Kejuan. IPCC special report on 1.5℃ warming: A starting of new era of global mitigation[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 640-642.
- [8]IPCC special report global warming of 1.5℃[J]. Energy focus, 2018, 35(3): 10-11.
- [9]Special report on global warming[J]. Fuel Oil News, 2018, 83(11): 36-37.
- [10]王涵宇, 吴思萱, 张扬清, 等. 德国推进碳中和的路径及对我国的启示[J]. 可持续发展经济导刊, 2021(3): 27-30.
WANG Hanyu, WU Sixuan, ZHANG Yangqing, et al. The path of carbon neutral in Germany and its enlightenment to China[J]. Carbon Neutral, 2021(03): 27-30.
- [11]龙云. 法国低碳能源转型战略研究[J]. 海峡科技与产业, 2020(10): 10-13.
- [12]杜群, 李子擎. 国外碳中和的法律政策和实施行动[N]. 中国环境报, 2021-04-16(6).
- [13]段晓男, 曲建升, 曾静静, 等. 《京都议定书》缔约国履约相关状况及其驱动因素初步分析[J]. 世界地理研究, 2016, 25(4): 8-16.
DUAN Xiaonan, QU Jiansheng, ZENG Jingjing, et al. Preliminary analysis on the carbon reduction performance and its driving factors based on the Kyoto protocol goals for annex I countries [J]. World Regional Studies, 2016, 25(4): 8-16.
- [14]曾文革, 周钰颖. 论《京都议定书》第二期承诺对国家发展权的保障及其局限性[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2013, 15(3): 42-48.
- [15]李威. 从《京都议定书》到《巴黎协定》: 气候国际法的改革与发展[J]. 上海对外经贸大学学报, 2016(5): 62-73, 84.
LI Wei. From "Kyoto Protocol" to "Paris Agreement": The reform and development of international climate law [J]. Journal of Shanghai University of International Business and Economics, 2016(5): 62-73, 84.
- [16]SANTOS S, DIXON T. CCS in CDM mechanisms. IEA Greenhouse Gas R&D Programme [C]. Indonesia: CCOP-EPPM Workshop, 2012.
- [17]许明珠. 澳大利亚碳市场机制设计[J]. 世界环境, 2012(2): 56-57.
XU Mingzhu. The design of Australian carbon market mechanism[J]. World Environment, 2012(2): 56-57.
- [18]樊威. 澳大利亚碳市场执法监管体系对我国的启示[J]. 科技管理研究, 2020, 40(8): 267-274.
FAN Wei. The enlightenment of Australian carbon market law enforcement supervision system to China [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(8): 267-274.
- [19]栾晶. 英国《气候变化法案》研究及其启示[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.
- [20]郑爽. 全国碳交易体系监管制度研究[J]. 中国能源, 2018, 40(11): 17-20.
- [21]王志峰, 何雅玲, 康重庆, 等. 明确太阳能热发电战略定位促进技术发展[J]. 华电技术, 2021, 43(11): 1-4.
WANG Zhifeng, HE Yaling, KANG Chongqing, et al. Strategic positioning of solar thermal power generation to promote technological progress [J]. Huadian Technology, 2021, 43(11): 1-4.
- [22]One NYC 2050 building a strong and fair city. New York City's green new deal [EB/OL]. (2019-05-01) [2021-10-07]. <http://onenyc.cityofnewyork.us/strategies/onenyc-2050>.
- [23]郝晓地, 魏静, 曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例——Sheboygan污水处理厂[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 1-6.
HAO Xiaodi, WEI Jing, CAO Yali. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 1-6.

- [24] FORCE J. Encouraging energy efficiency in US wastewater treatment[J]. Water, 2009(6): 32-34.
- [25] 洪志超, 苏利阳. 国外城市碳中和策略及对我国的启示[J]. 环境保护, 2021, 49(16): 68-71.
HONG Zhichao, SU Liyang. The carbon neutral strategy of city in international and its implication to China [J]. Environmental Protection, 2021, 49(16): 68-71.
- [26] City of Adelaide. 2020—2024 Strategic Plan: The most liveable city in the world [EB/OL]. (2020-11-05) [2021-11-05]. <https://www.cityofadelaide.com.au/about-adelaide/research-statistics/wellbeing-indicators/>.
- [27] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.
WANG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [28] 郭伟, 唐人虎. 2060碳中和目标下的电力行业[J]. 能源, 2020(11): 19-26.
- [29] 电力规划设计总院. 我国能源发展报告 2019 [R]. 2020.
- [30] 李芸. 含大规模可再生能源的电力系统可靠性评估[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [31] 郭琦, 郭海平, 朱益华, 等. 可再生能源灵活消纳的数字物理智能决策平台研发及应用[Z]. 南方电网科学研究院有限责任公司, 2019.
- [32] MELLO G, DIAS M F, ROBAINA M. Wind farms life cycle assessment review: CO₂ emissions and climate change[J]. Energy Reports, 2020, 6(S8): 214-219.
- [33] 陈伟, 陈健. 消纳弃风电的风电供热系统经济性与设计[J]. 煤气与热力, 2020, 40(8): 1-3.
CHEN Wei, CHEN Jian. Heat source and cold source economy and design of wind power heating system for consuming abandoned wind power [J]. Gas & Heat, 2020, 40(8): 1-3.
- [34] 魏海蛟, 鹿院卫, 张灿灿, 等. 燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 57-63.
WEI Haijiao, LU Yuanwei, ZHANG Cancan, et al. Status and prospect of flexibility regulation technology for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 57-63.
- [35] 吴厦成, 官思发, 吴洲钊, 等. 低碳背景下能源系统安全不容忽视——美国德州、英国伦敦停电事故反思[J]. 产业与科技论坛, 2021, 20(9): 67-69.
- [36] 朱法华, 王玉山, 徐振, 等. 我国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J]. 电力科技与环保, 2021, 37(3): 9-16.
ZHU Fahua, WANG Yushan, XU Zhen, et al. Research on the development path of carbon peak and carbon neutrality in China's Power Industry [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2021, 37(3): 9-16.
- [37] HEPTONSTALL P J, GROSS R J K. A systematic review of the costs and impacts of integrating variable renewables into power grids [J]. Nature Energy, 2020, 6(1): 72-83.
- [38] 夏丽娟, 苏艳萍, 王垂涨. 碳达峰碳中和背景下可再生能源发电环境保护问题探析[J]. 低碳世界, 2021, 11(6): 125-126.
- [39] 胡鞍钢. 我国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [40] 高虎. 2019 年我国非化石能源发展形势分析及未来发展前景展望[J]. 中国能源, 2020, 42(3): 4-8.
- [41] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6.
SUN Xudong, ZHANG Leixin, ZHANG Bo. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(2): 1-6.
- [42] 李政, 陈思源, 董文娟, 等. 现实可行且成本可负担的我国电力低碳转型路径[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 1-7.
LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG wenjuan, et al. Feasible and affordable pathways to low-carbon power transition in China [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(2): 1-7.
- [43] Climate action tracker. China going carbon neutral before 2060 would lower warming projections by around 0.2 to 0.3 degrees C [EB/OL]. (2020-09-23) [2021-11-05]. <https://climateanalytics.org/latest/china-going-carbon-neutral-before-2060-would-lower-warming-projections-by-around-02-to-03-degrees-c/>.
- [44] 孙韶华, 王璐, 白涌泉, 等. 拉闸限电的背后: 煤炭价格高企火电企业发电意愿低迷[N]. 企业家日报, 2021-09-29(3).
- [45] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源发展报告 2020 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017(3), 2021.
- [46] 康重庆, 姚良忠, 朱凌志, 等. 如何规划和运行含高比例可再生能源的未来电力系统[J]. 科技纵横, 2020(6): 56-64.
- [47] 孙玉树, 杨敏, 师长立, 等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89.
- [48] 张文建, 崔青汝, 李志强, 等. 电化学储能发电侧的应用[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 287-295.
ZHANG Wenjian, CUI Qingru, LI Zhiqiang, et al. Application of electrochemical energy storage in power generation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 287-295.

- [49]李先锋,张洪章,郑琼.能源革命中的电化学储能技术[J].我国科学院院刊,2019,34(4):443-449.
LI Xianfeng, ZHANG Hongzhang, ZHENG Qiong. Electrochemical energy storage technology in energy revolution[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 443-449.
- [50]黄博文.储能应用领域与场景综述[J].大众用电,2020,35(10):19-20.
- [51]丁玉龙,来小康,陈海生,等.储能技术及应用[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [52]魏书洲,李兵发,孙晨阳,等.压缩空气储能技术及其耦合发电机组研究进展[J].华电技术,2021,43(7):9-16.
WEI Shuzhou, LI Bingfa, SUN Chenyang, et al. Research progress of compressed air energy storage and its coupling power generation[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 9-16.
- [53]张婷.分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [54]华电电力科学研究院.一种利用熔融盐蓄热实现电站调峰的装置:CN201720780491.5[P].2018-02-23.
- [55]赵长颖,闫君,赵耀.如何实现媲美化石能源的大规模储能技术?[J].上海交通大学学报,2021,55(z1):91-92.
ZHAO Changying, YAN Jun, ZHAO Yao. How to develop Large-scale energy storage technologies comparable to fossil fuels?[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(z1): 91-92.
- [56]ZHAO Y, ZHAO C Y, MARKIDES C N, et al. Medium- and high-temperature latent and thermochemical heat storage using metals and metallic compounds as heat storage media: A technical review[J]. Applied Energy, 2020, 280: 115950.
- [57]DUMONT O, FRATE G F, PILLAI A, et al. Carnot battery technology: A state-of-the-art review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32.
- [58]刘金朋,侯焱.氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望[J].电力与能源,2020,41(2):230-233,247.
LIU Jinpeng, HOU Xi. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry[J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230-233, 247.
- [59]SURYANTO B H R, DU H L, WANG D, et al. Challenges and prospects in the catalysis of electroreduction of nitrogen to ammonia[J]. Nature Catalysis, 2019, 2(4): 290-296.
- [60]葛睿,胡旭,董灵玉,等.电化学耦合阴极二氧化碳还原与阳极氧化合成[J].化工进展,2021,40(9):5132-5144.
GE Ruin, HU Xu, DONG Lingyu, et al. Electrochemical coupling between cathodic carbon dioxide reduction and anodic oxidation synthesis[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 5132-5144.
- [61]张丹彤.光/电催化二氧化碳还原的过渡金属纳米材料制备及构效关系研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [62]JIANG K, ASHWORTH P. The development of carbon capture utilization and storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138.
- [63]宋微,张永春,陈绍云.化学溶剂法吸收二氧化碳试剂综述[C]//二氧化碳减排与捕集、封存及绿色化利用研讨会论文集.2009:114-119.
- [64]申硕,樊静丽,陈其针,等.碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的文献计量分析[J].热力发电,2021,50(1):47-53.
SHEN Shuo, FAN Jingli, CHEN Qizhen, et al. Bibliometric analysis of carbon capture, utilization and storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 47-53.
- [65]The global status of CCS 2019[R]. Australia: Globe CCS Institute, 2019.
- [66]张瑞.有机胺溶剂化学结构与二氧化碳吸收-解吸性能构效关系的探究[D].长沙:湖南大学,2018.
- [67]DIAO Y F, ZHENG X Y, HE B S, et al. Experimental study on capturing CO₂ greenhouse gas by ammonia scrubbing[J]. Energy Conversion and Management, 2003, 45(13-14):2283-2296.
- [68]CAI T, SUN H B, QIAO J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. Science, 2021, 373(6562):1523-1527.
- [69]刘牧心,梁希,林千果,等.碳中和驱动下CCUS项目衔接碳交易市场的关键问题 and 对策分析[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4731-4739.
LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo, et al. Key issues and countermeasures of CCUS projects linking carbon emission trading market under the target of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4731-4739.
- [70]岳良.烧结烟气脱硫系统流场数值分析与实验研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [71]邢晨健,钱煜,周燃,等.太阳能聚光光伏-余热碳捕集利用方式分析[J].华电技术,2020,42(4):84-88.
XING Chenjian, QIAN Yu, ZHOU Ran, et al. Analysis of utilization modes combining concentrating photovoltaic power generation and photovoltaic residual heat driving carbon capture[J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 84-88.
- [72]毛健雄.燃煤耦合生物质发电[J].分布式能源,2017,2(5):47-54.
MAO Jianxiong. Co-firing biomass with coal for power generation[J]. Distributed Energy, 2017, 2(5): 47-54.

(本文责编:陆华)

作者简介:

马双忱(1968—),男(满族),辽宁大连人,教授,博士生导师,工学博士,从事燃煤电厂污染控制和电厂化学研究等(E-mail:msc1225@163.com)。