

# CCUS:碳中和目标下亟须“绿动”

■本报记者 秦志伟

日前,生态环境部提出未来10年我国将开展二氧化碳排放达峰行动,有关工作将纳入中央生态环境保护督查,并对各地进展开展考核评估。这是在我国提出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标后,所出台的一系列二氧化碳排放管控措施之一。

除了要严管外,二氧化碳“善用”也是需要考虑的问题。而碳捕集、利用与封存(以下简称CCUS)作为解决我国以煤为主能源体系低碳化发展的关键战略性技术之一,正成为当下的研究热点。

“煤基工业和燃煤发电行业减排二氧化碳是当前我国减排的关键,而CCUS是目前唯一能够实现大规模减排的技术手段。”北京师范大学中国绿色发展协同创新中心执行主任张九天在接受《中国科学报》采访时表示,我国在未来实现碳达峰和碳中和目标的进程中,CCUS技术不可或缺。而碳达峰和碳中和目标的提出,也给CCUS这一重大技术的发展提出了新的要求。

## CCUS 技术不可或缺

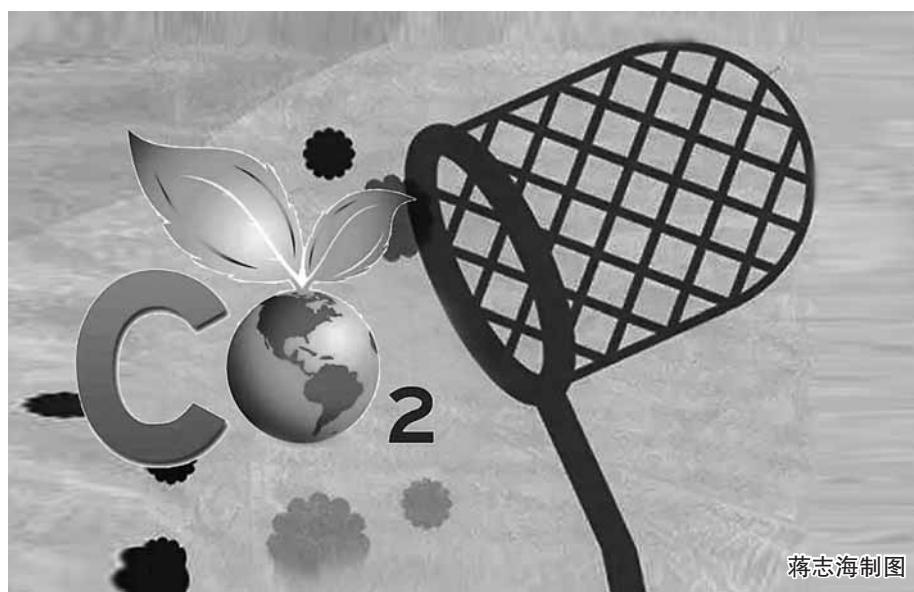
对于CCUS在应对气候变化方面的重要性,目前学界已达成共识。中国科学院武汉岩土力学研究所研究员李琦直接引用了政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告《综合评估》结论中的一句话:“如果没有CCUS,绝大多数气候模式都不能实现减排目标。更为关键的是,没有CCUS技术,减排成本将会成倍增加,估计增幅平均高达138%。”

在全球共同应对气候变暖之际,国际能源署近日发布的《CCUS在低碳发电系统中的作用》报告也指出,CCUS技术是化石燃料电厂降低排放的关键解决方案。“如果不用CCUS,要实现全球气候目标可能需要关闭所有化石燃料发电厂。”

“CCUS可捕集发电和工业过程中使用化石能源所产生的多达90%的CO<sub>2</sub>,防止其进入大气,而当前尚无其它成熟技术可达到如此高的脱碳水平。”张九天告诉《中国科学报》。

清华大学低碳经济研究院院长何建坤介绍,从实现二氧化碳排放达峰到实现碳中和,欧洲有70年左右的时间,美国约50年的时间,而我国只有30年的时间。“所以我国每年碳排放下降的速度和减排的力度要发达国家大得多,任务也更加艰巨。”

因此,在新目标下,发展CCUS技术就成为当下业界热议的话题和研究方向。



蒋志海制图

自2006年以来,CCUS就被列为中国中长期技术发展规划的前沿技术,并得到国家科研资金的大力支持。张九天发现,2006年至今,中国给予CCUS的研发资金支持从未中断,支持资金面向自由探索、基础研究、技术开发和工程示范等多个阶段,覆盖包括捕集、运输、利用和封存在内的全流程技术链条,形成了比较广泛和稳定的CCUS研究队伍。

然而,虽然CCUS在我国已有近20年的发展,并初步形成CCUS发展的技术体系,但在新目标下,CCUS技术在不同领域的结合还将产生新的技术组合。

## “善用”更为关键

“人人都知道二氧化碳资源化利用,关键是要找到好的切入口。”中国科学院院士、上海交通大学常务副校长丁奎岭在接受《中国科学报》采访时表示,二氧化碳是惰性分子,惰性到可以用来灭火,“在温和条件下让它发生化学反应太难了”。正是在国家科研资金的支持下,丁奎岭带领中国科学院上海有机化学所研究团队从2001年开始便在二氧化碳的世界里不断探索。

直到去年,丁奎岭团队历经近20年的基础研究,开发了二氧化碳催化转化合成二甲基甲酰胺(DMF)的新催化体系、成套新技术,建成了全球首套千吨级中试装置。

据丁奎岭介绍,与过去以一氧化碳为原料的工业化技术相比,新工艺原料成本更低且来源丰富,“三废”排放大幅减少。由

于新工艺使用二氧化碳和氢气为原料,对于富含氢气和二氧化碳的行业与企业,不仅可以产生显著的经济效益,还将同时减少二氧化碳排放,是一种延长产业链和提高竞争力的选项。

纵观全球,关于CCUS技术的相关研究也是从2000年左右开始。科技部中国21世纪议程管理中心研究员张贤等学者系统统计与分析了2000至2020年来自Web of Science数据库中CCUS相关科学文献,结果发现,全球主要机构中,美国能源部、中国科学院和伦敦帝国理工学院对CCUS技术的研究实力和投入远远高于其他机构,其出版总量占全球出版总量的10.01%。

张贤介绍,中国学者于2004年发表了第一篇CCUS相关文章,发文量自2009年迅速增加,并于2016年超越美国成为年发文量最多的国家。遗憾的是,中国发文篇均被引频次较低,中国相关文章总体影响力有待提升。

他同时指出,2016年以后,二氧化碳利用途径和利用方式的相关研究逐渐增加,“CO<sub>2</sub>利用”成为热点研究领域。其间,生物能源、负排放、生物质能结合碳捕集与封存技术等关键词热度迅速上升,CCUS技术经济性研究热度也不断攀升。

“在现阶段气候变化影响逐渐加剧、二氧化碳减排日益紧迫的情况下,CCUS技术结合生物能源的负排放技术将成为未来研究重点。”张贤说。

目前关于CCUS技术尤其是二氧化碳资源化利用的论文铺天盖地,但丁奎岭希望涌现更多让企业感兴趣、用得上

但这几种技术路线各有优劣。机械泵的介入会对系统的安全可靠方面,如防爆降噪性能提出极高的要求;多级喷射泵并联和新型集成式多喷管喷射泵也在系统的优化控制策略上面面临较大挑战;多喷管喷射泵的内部结构精细复杂,结构设计和优化往往牵一发而动全身,也存在不少需要重点突破的难题。

数十年来,贾磊团队致力于喷射泵理论及相关技术的研究,建有喷射理论与应用实验室和喷射泵仿真、研发、测试等软硬件平台,在喷射泵内部流场分析和结构优化方面取得了诸多成果。该团队针对燃料电池取得了诸多成果。该团队针对燃料电池取得了诸多成果。该团队针对燃料电池取得了诸多成果。

与此同时,唐浩林还提到涡旋式氢气循环泵和爪式氢气循环泵两种技术路线,其中爪式氢气循环泵具有无油、可靠、效率高、输出压力高等优点。当前,占据国内约90%的市场份额的德国普旭公司在中国推广应用的就是爪式氢气循环泵产品。

近年来,虽然国内相关科研单位、氢气循环泵企业、相关企业等,纷纷开展前期研究,以期研发高质量的设备产品,但都尚未成熟,面临市场占有率低、知名度不足的窘境。

“一方面在于设计能力不足,另一方面缺乏具有高精度加工能力的机床,难以达到加工的技术精度要求。同时,转子与转子腔表面处理工艺仍未过关,耐磨性和耐腐蚀性均待提升。”唐浩林坦言。

## 未来可期

氢是连接可再生能源与传统化石能源的桥梁,是重要的清洁能源之一。世界主要发达国家日益重视氢能的发展,而发达国家在氢气循环泵的先发展经验值得我国借鉴。

贾磊表示,诸如德国普旭、日本丰田织机、韩国现代等企业的产品,无论是爪式、

的技术方案。

## 急需构建新技术体系

在当下,张九天认为,我国应该考虑构建面向碳中和目标的CCUS技术体系。

“过去学者定义CCUS技术时,往往因为减排目标难以定量,而大多从科学角度进行分类,且分类的角度也比较多元化。”张九天表示,随着控制温室气体排放目标逐渐提高,CCUS的内涵和外延也在不断发展,CCUS技术在不同领域的结合会产生新的技术组合,且主要是在捕集端有所不同。他提出,面向碳中和目标按捕集的二氧化碳源进行分类。

张九天进一步解释,具体分类包括:一是将化石能源燃烧过程产生的二氧化碳排放作为捕集的碳源,面向人类活动特别是能源活动产生的二氧化碳排放,可称之为FECCS;二是将生物质能源使用产生的排放作为捕集的碳源,这个碳源的捕集开始介入自然界的碳循环过程,即生物质吸收大气中的二氧化碳,称为BECCS;三是直接将大气作为捕集的碳源,是典型的负排放技术,可称之为DACCS。

但就全球而言,国际能源署发布的上述报告显示,碳捕集在发电领域的进展并未达到预期。报告指出,在运行的2个大型CCUS项目和在建的20个项目,预计总碳捕集能力将达到5000万吨/年,但国际能源署可持续发展情景中到2030年电力碳捕集能力须达到3.1亿吨/年,CCUS的发展尚未步入正轨。

张九天表示,当前很多国家都提出了碳中和目标,CCUS与相关能源系统的结合有可能培育出CCUS发展的新的技术经济范式,如集成CCUS技术与氢能生产技术系统,CCUS与可再生能源和储能系统集成可行性与发展潜力等。

但由于CCUS技术链条比较长,应用的领域范围比较宽,技术路径应如何配置,是学界关注的焦点。同时,紧密结合碳中和目标下我国煤炭、电力、工业等领域能源结构的变化,还需要考虑非二氧化碳温室气体排放中和的问题。

在碳中和目标提出之后,另一个问题不容忽视,即国内顺应国际社会应对气候变化而禁煤的呼声和趋势渐长,国内控煤措施趋紧,电力和工业部门为此提出大力发展可再生能源以替代煤炭的目标。在这种情况下,张九天提醒,不要误认为CCUS技术可以发挥作用的空间随着煤炭的逐步替代而减少,CCUS在难脱碳的工业部门和负排放领域将发挥不可替代的关键作用。

## 视点

“碳中和”目标的提出,给新能源行业发展定了调。近日,国网能源研究院新能源与统计研究所所长李琼慧在第五届中国光伏产业论坛上表示,“十四五”期间,新能源行业不仅要做大规模,更要谋求高质量发展。

从全球发展趋势来看,国际能源署研究认为,2035年前后,光伏发电装机容量将超过煤电和风电,成为第一大电源。彼时,预计全球新能源发电量占比将超过20%。

对于我国新能源发展面临的形势,李琼慧表示,目前,风光装机加起来已经超过水电,到2030年前后,我国新能源累计装机容量有望超过煤电,发电量占比将达20%,甚至超过30%。

过去十年,新能源发电成本快速下降。据统计,2010~2019年间,全球光伏发电、光伏发电、海上风电的平准化度电成本(LCOE)分别下降了82%、47%、39%和29%。

“新能源发电成本仍然有比较大的下降空间,特别是光伏发电,未来10年还有58%的下降空间。同时,到2025年,除东三省和内蒙古外,其他省份光伏发电平均度电成本普遍低于本省陆上风电平均度电成本。”李琼慧说。

虽然新能源形势持续好转,但“十四五”仍面临挑战。李琼慧指出六大关键性问题。一是平衡发展速度和质量。新能源发展过程中,一直在好与坏之间寻找平衡。而“十四五”期间,更需要实现速度和质量的平衡。

二是总体与局部的差异性给政策制定带来挑战。目前,青海新能源发电量占比已经达到31.4%,宁夏、甘肃、内蒙古、新疆都已超过20%,有些地区的消纳,尤其是系统性的问题仍然存在。

三是集中与分散开发并举。“过去我们老在讲东中部分散式开发能否满足未来地区能源发展需要,而现在,从2030、2060年的目标提出可以看到,新能源的发展空间是非常大的。”李琼慧认为,集中能干就干,分散能干就干,不存在集中好或分散好的问题,而是各有

## 资讯

### 生态环境部发布碳排放权交易系统性规则

本报近日,生态环境部发布《全国碳排放权交易管理办法(试行)》和《全国碳排放权登记交易结算管理办法(试行)》,就两项文件公开征求意见。这是自2017年全国碳排放权交易市场启动以来,我国首次在国家层面发布的系统性规则。

按照文件,全国碳市场覆盖范围包括年度温室气体排放量达到2.6万吨二氧化碳当量,即综合能源消费量约1万吨标准煤及以上的企业或其他经济组织。生态环境部应对气候变化司司长李高表示,目前,全国共有2837家重点排放单位、1082家非履约机构和11169个自然人参与试点碳市

### 国家发展改革委启动冬季保供日调度机制

本报在近日召开的国家发展改革委例行新闻发布会上,北方地区冬季保供供应保障情况成为媒体关注的重点。国家发展改革委新闻发言人孟玮回应称,受部分地区提前启动供暖影响,今年供暖季初期,我国天然气消费出现较快增长,11月1日~11日,全国天然气日均供应8.6亿立方米,同比增长14.6%。同时,发电供暖用煤需求也比较旺盛。

对此,国家发展改革委同各地区、有关部门及主要保供企业,启动冬季保供日调度机制,针对今冬以来供需形势变化,进一步加强协调,突出重点,扎实做好保供工作。一方面,通过协调国内气田安全高

负荷生产,有序采购进口资源,优化储气动用安排,组织“南气北送”,多措并举增加北方地区冬季资源供应。特别是,可动用储气量比去年增加约50亿立方米,在高峰期可更好发挥调峰保供作用。另一方面,提前落实供暖煤源,重点做好东北地区取暖用煤供应保障。当前,重点电厂存煤保持在20天以上水平。

孟玮指出,下一步,国家发展改革委还将继续推动国内煤炭企业增产增供,指导督促东北三省多渠道加大煤炭采购力度,加强铁路和港口运力保障,调节电力外送,将电厂存煤保持在合理水平,确保东北地区取暖用煤需要。(盛夏)

## 李琼慧:「十四五」新能源消纳仍面临挑战

■本报记者 李惠钰

# 燃料电池的“咽喉”攻坚战

■本报见习记者 韩扬眉

氢燃料电池具有燃料能量转化率高、噪声低、零排放等优点,可广泛应用于汽车、飞机、火车等交通工具。氢气循环泵则是氢燃料电池发动机的关键部件之一。

然而,如此关键的核心部件,我国却要依赖进口,国产化迫在眉睫。

瞄准这一重大需求,近日,山东大学联合天津大学、武汉理工大学、中船重工第七一二研究所、潍柴动力等7家科研院所和企业单位正式启动国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项“车用燃料电池喷射式氢气再循环泵研发”项目。

“整体而言,燃料电池氢气循环泵目前仍处于初期阶段,亟须加大研发力度,争取走上完全自主知识产权的产业化发展道路。”该项目首席科学家、山东大学控制科学与工程学院教授贾磊在接受《中国科学报》采访时说。

## 公认的难题

“如果说电堆是燃料电池的‘心脏’,那氢气循环泵就是‘咽喉’,其主要功能是将燃料电池电堆内未反应氢气循环再次利用,同时实现‘吹扫’产物水,防止‘水淹’,以提高氢气利用效率和系统安全。”贾磊形象地说。

不仅如此,作为燃料电池的核心部件之一,氢气循环泵对保证氢气安全、改善严寒启动性能、延长燃料电池寿命等,都起着重要作用。

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室教授唐浩林向《中国科学报》介绍,氢气循环泵的主要功能是通过连接电堆氢气端的入口与出口,在电堆内部建立一个较为稳定的氢气流量。这个循环流相对于独立于电堆的氢气消耗量,藉此改善电堆内氢气的流量与压力分布的均匀性,避免发生局部缺氧的情况。同时,其还有辅助排水或加湿的功能,减少氢气吹扫排放量。

“然而,我国目前主要使用进口机型。”

唐浩林指出,由于起步较早,国外在氢气循环泵的设计、密封、带液操作和防爆等方面都进行了深入的研究,储备了较为全面的技术,对具体研发技术指标也严格保密。

贾磊也表示,从技术角度,氢气循环泵的设计和研发是一个公认难题,涉及大量激波、湍流和非线性系统控制等科学问题,急需科技力量推动相关行业的应用。

而从经济角度,国内采购的机械泵单套设备价格就可能超过4万元,配套整车生命周期一般需要两套设备系统。“这就意味着,一辆汽车仅在供氢循环这个子系统中,就要采购8万元以上的进口产品。如果实现技术完全自主化,成本就能降低60%以上,同时有助于解决燃料电池氢气循环密封难、能耗高、寿命短等痛点。”贾磊说。

## 多种路线并行

当前,氢能及燃料电池行业发展势头正猛,氢气循环泵也呈现出多种路线并行的局面。

贾磊表示,当前其技术方向分机械式循环泵和喷射泵两种。机械式循环泵由于具有高速运转部件,因此存在故障率高、密封差,难以实现无油防爆等问题,并且价格昂贵。相对而言,喷射泵的优势则更为显著,其主要原理是采用储氢压力势能,通过射流负压引射未反应氢气,实现氢气循环、无运转部件,可靠性高、密封良好,是燃料电池氢气循环泵的发展趋势。

“现在,国内有很多厂家仍在研发机械式循环泵,但受限于加工技术等问题,现阶段并不成熟,达不到产业化推广应用的程度。喷射泵的研发就更少,只有少数几家研究机构和企业在做。”贾磊说。

为解决喷射泵在燃料电池应用中遇到的问题,贾磊表示,目前采取的技术路线主要有喷射泵与机械泵结合方案、多级喷射泵引射并联合方案,以及新型多喷管集成式喷射泵方案。