

二氧化碳捕集技术及适用场景分析

胡道成¹, 王睿², 赵瑞³, 孙楠楠⁴, 徐冬³, 刘丽影^{2*}

(1. 国家能源投资集团有限责任公司, 北京市 东城区 100011; 2. 国家环境保护与生态工业重点实验室(东北大学), 辽宁省 沈阳市 110819; 3. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209; 4. 中国科学院上海高等研究院, 上海市 浦东新区 201210)

Research on Carbon Dioxide Capture Technology and Suitable Scenarios

HU Daocheng¹, WANG Rui², ZHAO Rui³, SUN Nannan⁴, XU Dong³, LIU Liying^{2*}

(1. China Energy Corporation Group Co., Ltd., Dongcheng District, Beijing 100011, China; 2. SEP Key Laboratory of Eco-industry (Northeastern University), Shenyang 110819, Liaoning Province, China; 3. New Energy Technology Research Institute, China Energy, Changping District, Beijing 102209, China; 4. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Pudong New Area, Shanghai 201210, China)

摘要: 工业发展带来了CO₂的大量排放, 在实现碳达峰碳中和目标的过程中, 碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术是不可或缺的关键技术。现阶段技术成熟度较高且未来发展潜力大的碳捕集方法为燃烧后碳捕集技术, 主要有吸收法、吸附法、膜法以及深冷法等。对最常用的4种碳捕集方法的发展与工业应用情况进行介绍, 分析了几种方法的工业适用场景, 尤其是目前正在运行的大型碳捕集项目中应用最多的化学吸收法与物理吸附法。化学吸收法、吸附法以及膜法碳捕集技术的未来发展潜力巨大, 能够快速推进双碳目标的达成, 助力碳的近零排放。

关键词: 二氧化碳捕集; 吸附法; 膜法; 深冷法

ABSTRACT: The development of industry has brought a large amount of CO₂ emissions. In the process of achieving the goal of carbon peak and carbon neutralization, carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) technology is an indispensable key technology. The carbon capture method with high technology maturity at this stage and great development potential in the future is post combustion carbon capture technology, mainly including solvent absorption, adsorption, membrane method and cryogenic distillation. The development and industrial application of the four most commonly used carbon capture methods were briefly

introduced, and the industrial applicability of several methods was analyzed, especially the chemical absorption method and physical adsorption method, which are most widely used in large-scale carbon capture projects currently running. Chemical absorption method, adsorption method and membrane carbon capture technology have great development potential in the future, which can quickly promote the achievement of the goal of double carbon and help the near-zero emission of carbon.

KEY WORDS: carbon dioxide capture; adsorption method; membrane method; cryogenic distillation

0 引言

自工业革命以来, 化石燃料的使用量逐年增加, CO₂的大量排放引起的温室效应造成了气候变化、极端天气频发等一系列问题, 已经成为全球范围内亟待解决的重要问题。巴黎协定提出了将全球平均气温较工业化时期上升幅度控制在2℃以内, 并努力控制在1.5℃之内作为长期目标^[1]。根据《BP世界能源统计年鉴2021》, 2020年全球CO₂排放总量约322.84亿t, 我国2020年CO₂排放总量为102.43亿t^[2]。目前, 控制CO₂的排放主要依靠3种方法: 1) 提高能源使用效率, 实现用更少的能源消耗达到更好的效果; 2) 大力发展清洁可再生能源, 减轻传统化石能源消耗量大的压力, 调整能源结构, 以期未来取代

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0603305); 国家能源投资集团有限责任公司项目(GJNY-21-51)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0603305); China Energy Corporation Group Co., Ltd., Project (GJNY-21-51).

化石能源在能源消耗方面的主体地位；3) 布置碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)项目, 将CO₂从工业过程、能源利用过程中分离出来并加以利用^[3-5]。根据国际能源署的预测, 要达到巴黎协定2 °C的气候目标, 到2060年, 累计减排量的14%来自于CCUS, 且任何额外减排量的37%也来自于CCUS^[6]。我国能源消费结构以煤为主, 碳排放量居于世界第一, 在未来实现碳达峰和碳中和目标的进程中, CCUS至关重要, 不可或缺^[7-9]。

本文介绍了几种常用的碳捕集方法, 分析了这几种碳捕集技术的适用场景, 以期为我国二氧化碳减排提供参考。

1 碳捕集技术的发展

CCUS按照技术流程包括CO₂捕集、运输以及利用与封存过程, CO₂捕集指将CO₂从工业生产、能源利用以及大气中直接分离出来的过程^[10]。捕集方式包括燃烧前碳捕集、富氧燃烧、燃烧后碳捕集、化学链捕集、生物质能碳捕集、直接空气碳捕集等。其中, 研究较多的燃烧后碳捕集方式主要包括吸收法、吸附法、膜分离法以及深冷法。

1.1 吸收法

吸收法经过长时间的研究已经在CCUS工业示范工程以及商业化上得到了广泛的应用。全球正在运行的CCUS项目中, 大多数采用的CO₂分离方法为吸收法, 而吸收法又包括化学吸收法与物理吸收法。

1.1.1 化学吸收法

化学吸收法通过呈碱性的化学吸收剂或其水溶液在一定条件下与酸性的二氧化碳气体反应, 将CO₂从气源中分离出来, 反应后的溶液经过加热等再生方法将CO₂释放, 吸收剂得以循环使用。有机醇胺溶液、氨水、碳酸钾水溶液是应用最广泛的化学吸收剂。

1) 有机胺法

有机胺法经过长时间的研究, 已经形成了单一胺、混合胺、两相吸收剂、离子液体等多种体系。早期单一胺溶液典型的溶剂有一乙醇胺(MEA)、二乙醇胺(DEA)、N-甲基二乙醇胺

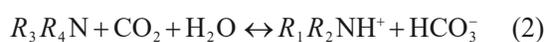
(MDEA)等。其中, 伯胺、仲胺的反应速率快, 吸收容量约0.5 mol CO₂/mol胺, 其反应原理为伯胺、仲胺先与CO₂反应生成两性离子, 后继续反应为氨基甲酸盐与质子化碱; 叔胺由于氨基上没有氢, 与CO₂反应生成碳酸氢盐, 反应速率慢但吸收容量大, 约1 mol CO₂/mol胺。其反应原理^[11]如下。

伯胺与仲胺:



式中R₁、R₂为烷基或氢。

叔胺:



式中R₃、R₄为烷基。

有机胺在低温的环境下吸收CO₂, 在高温下解吸释放CO₂。

2) 混合胺法

混合胺的概念于1985年提出, 旨在将单一胺的优势结合起来, 达到更好的综合吸收性能^[12]。此后, 将伯胺、仲胺和叔胺混合, 在开发更有效的胺吸收剂方面引起了广泛的关注^[13], MEA/MDEA^[14], DEA/MDEA^[15]等混合吸收剂相继提出。之后环胺哌嗪(PZ^[16])、多元胺(AEEA^[17], BDA, MAPA^[18])、空间位阻胺(AMP^[19])、烯胺^[20](DETA, TETA)、HMPD^[21]等新型有机胺被发现, 复合胺溶液得到充分的研究与广泛应用。例如, 挪威Snøhvit气田CO₂捕集项目、澳大利亚Gorgon Carbon Dioxide Injection项目使用活化的MDEA溶液(aMDEA)作为吸收剂, 目前全球最大的燃烧后碳捕集项目使用KS-1混合胺吸收剂; 我国锦界电厂15万t/a CCUS示范项目使用南化院的MA系列吸收剂进行燃烧后碳捕集。

混合胺吸收剂是目前有机胺法吸收CO₂的主要吸收剂, 它具有烟气适应性好、捕集效率高、工艺成熟的优点, 但存在氨逃逸问题。

3) 氨水法

氨水法是指在NH₃-CO₂-H₂O系统中, 氨水与CO₂发生反应生成碳酸铵和碳酸氢铵。氨水法吸收CO₂的吸收容量较大且再生能耗低, 但氨逃逸问题依然限制该方法的发展。后续提出了冷氨法, 即在0~20 °C的环境下对CO₂进行分离以限制氨逃

逸，但反应生成的碳酸氢铵与碳酸铵易变为沉浆，从而对设备造成腐蚀堵塞^[22]。

4) 热钾碱法

碳酸钾在低温下溶解度较低，作为吸收剂与CO₂反应时需要在50~80℃的环境下进行，因此又被称为热钾碱法。

解吸时高温加热富液，使碳酸氢钾释放CO₂，从而变为碳酸钾循环使用。热钾碱法的优势在于其成本较低、耐降解、再生能耗低，但其吸收容量不理想且吸收速率慢^[23]。目前，使用碳酸钾作

为吸收剂时，通常向其中添加活化剂，如二乙醇胺(DEA)、哌嗪(PZ)等醇胺有机物，以增大其吸收速率以及吸收容量^[24]。美国Enid Fertilizer化肥厂利用哌嗪作为活化剂的本菲尔法进行CO₂捕集，年捕集量约为70万t。

化学吸收法不同吸收剂的特点如表1所示。总的来说，化学吸收法的能耗较高，腐蚀降解问题较严重，但其CO₂捕集效率高，分离出的CO₂纯度高，适合应用于大规模的CCUS项目中，是现阶段布置CCUS项目中最具潜力的方法。

表1 化学吸收法不同吸收剂的特点

Tab. 1 Characteristics of different absorbents in chemical absorption method

方法	优点	不足
氨水法	吸收容量较大,再生能耗相对较低,协同脱除其他酸性气体	吸收速率极慢,氨逃逸损失大,难以控制
热钾碱法	吸收成本低,再生能耗相对较小,稳定性好	吸收速率慢,需要添加活化剂,吸收容量小
醇胺法	吸收容量大,吸收速率快,适合低浓度低分压二氧化碳气源的碳捕集	投资成本较大,再生能耗较高,腐蚀性问题不容忽视

1.1.2 物理吸收法

物理吸收法依靠CO₂与气源中其他组分的溶解度差异实现CO₂分离脱除。物理吸收剂对CO₂进行吸收分离的过程遵循亨利定律，即CO₂在气源中的平衡分压越高，其溶解度越大^[25]。低温高压是物理吸收法的最佳操作条件，在众多物理吸收剂中，发展较好、应用广泛的吸收剂包括甲醇(低温甲醇洗Restisol法)、聚乙二醇二甲醚(Seloxol法)、N-甲基吡咯烷酮(Purisol法)、碳酸丙烯酯(Flour法)^[26]。目前，全球正在运行的CCUS项目中使用的物理吸收方法主要是Restisol法与Seloxol法。Restisol法使用的甲醇吸收剂不易降解、黏度小且有较高的稳定性，但必须在低温的环境下操作运行，工艺较复杂。Seloxol法的CO₂分离能耗较低，化学性质稳定，不足之处在于黏度较大、传质速度较慢^[27]。物理吸收法目前主要应用于天然气开采以及处理加工领域。

1.2 吸附法

吸附法利用多孔固体材料在其表面选择性捕获CO₂，随后通过温度、压力的变化释放CO₂，吸附法包括物理吸附和化学吸附。物理吸附通过固体吸附剂与气体的分子间弱作用力以及范德华力表现出对CO₂的优先吸附，在低温或者高压的环境下进行吸附，在高温或者减压的环境下解吸。

化学吸附中CO₂与吸附剂之间发生化学反应，如在固体吸附剂的表面负载能与CO₂发生化学反应的化学剂，如胺基负载吸附剂、PEI等物质，或者直接使用金属氧化物进行吸附^[28]。

根据不同的解吸机理，吸附法工艺包括变压吸附(pressure swing adsorption, PSA)^[29]、真空变压吸附(vacuum pressure swing adsorption, VPSA)^[30]、变温吸附(temperature swing adsorption, TSA)、变温变压耦合吸附(pressure temperature swing adsorption, PTSA)以及变电吸附(electric swing adsorption, ESA)^[31]等。常用的吸附剂包括沸石、炭基材料^[32]、金属有机骨架(metal organic framework, MOFs)^[33]、活性氧化铝等材料，其中沸石是目前应用最广泛的固体吸附剂，常用的沸石吸附剂有5A沸石与13X沸石^[34]等。不同吸附工艺的特点如表2所示。

物理吸附法的优势在于解吸能耗较小，流程较简单，无腐蚀挥发等方面的顾虑，对环境友好^[36]，但限制吸附法发展的主要原因有：1) 目前常用吸附剂的吸附容量较小，在对气源中的CO₂进行分离时吸附解吸频繁，对吸附装置和解吸设备如真空泵的要求高，应用于规模较大的碳捕集项目的难度较高。2) 吸附容量高，功能调控方便的新型吸附剂造价成本高，尚不能量产^[37]。3) 当

表2 不同吸附工艺的特点

Tab. 2 Characteristics of different adsorption processes

方法	优点	不足
PSA/VPSA	工艺成熟,应用场景广泛,吸附材料使用周期长	吸附剂需求量大,设备多,占地大
TSA	能够对低品位余热资源有效利用,再生程度高	升温慢,循环解吸时间长,能耗高,对吸附剂的损伤大
ESA	加热迅速,升温速率独立控制,吸附系统紧凑 ^[35]	吸附剂需要具有适宜的导电性
PTSA	再生程度彻底,解吸附快,循环周期短	能量消耗较高,对吸附剂要求较高

气源中的水含量较多时,会严重影响常规吸附剂(沸石、MOFs等)的吸附效果。水是强吸附组分,吸附剂会优先吸附水分子,从而导致吸附CO₂的能力下降,部分吸附剂在吸附水分子后自身结构会被破坏^[38]。

未来,吸附法分离CO₂的研究方向应着眼于开发吸附容量高、吸附动力学快、再生稳定性好并且能够量产的吸附剂^[39],以及研究在高湿烟气中吸附能力不受影响的吸附剂,或开发能够将进入吸附床的气源中的水分充分干燥的工艺。

1.3 膜分离法

膜分离法利用气源中各种气体组分的渗透速率的差异实现CO₂的分离,分离过程的推动力为膜两侧的压力差,分离效果取决于膜材料的结构、膜对不同气体的选择性(渗透系数、分离系数)、气源中的气体组成成分以及气体压力的大小等^[40]。

膜材料包括有机聚合物膜、无机膜、混合基质膜、促进传递膜和一些新型的膜材料^[41]。有机膜材料有聚砜醚、聚氧乙烯、聚苯醚等。有机膜的稳定性尤其是耐热性能较差,应用受到限制^[42]。无机膜的膜材料有沸石、MoS₂、MOFs、氧化石墨烯等。与有机膜相比,无机膜的化学稳定性好,但是成本较高并且柔软性欠缺。混合基质膜将无机颗粒分散到有机聚合物基质中,兼具良好渗透性、选择性以及稳定性能^[43]。但目前技术成熟度不高,需要进一步研究。

膜分离法的能耗较低、设备体积较小、易维护,与气源的接触面积大^[44],但是现有膜材料的分离结果较差,对气源的要求较高,热稳定性与机械稳定性不理想,难以适应工业上大规模连续运行。膜分离法发展除了要开发分离效果更好的膜材料之外,也需要探索与其他分离方法联合使用,如膜法与化学吸收法结合^[45]。

1.4 深冷法

深冷法又称低温分离法,利用原料气中各气体组分的沸点不同,在高压低温的条件下将气体冷却至液化温度,之后通过蒸馏工艺分离CO₂。Davy Mckee公司利用N₂/CO₂低温蒸馏-吸收法能够回收质量分数为90%的CO₂,产品气纯度达97%^[46]。深冷法分离CO₂的纯度高,工艺中没有化学试剂的参与,对环境友好、耗水少,但深冷法也存在其固有的缺陷,由于要将气源冷却到液化温度,因此需要较大的能源消耗,且设备一般较大,可见其适合应用于温度低、气源压力大且CO₂浓度高的情况^[47]。

不同碳捕集方法的特点如表3所示。

2 各碳捕集技术适用场景分析

2.1 化学吸收法

化学吸收法中最常用的是有机醇胺法,通过呈现弱碱性的醇胺溶液与CO₂反应,反应生成的物质稳定,适用于中低浓度、低CO₂分压的气源。此外,化学吸收法在低分压下对湿烟气中的CO₂具有高吸收率^[48]。因此,化学吸收法适合应用于燃烧后烟气的CO₂分离。燃烧后的烟气经历脱硫以及脱硝工序后,NO_x与SO₂的浓度达到排放要求值,使得进入吸收塔烟气中能够影响到CO₂吸收的杂质气体含量降低到最小。

N₂是天然气发电厂与燃煤电厂烟气中的主要成分,同时N₂会稀释CO₂使得CO₂所占的百分比比较低^[49]。天然气发电厂与燃煤电厂烟气中CO₂的体积分数分别为4%~8%与12%~15%,烟气温度在50~100℃,分压较低(一般≤15 198 Pa),属于低浓度与低分压的CO₂气源^[50],在低分压下,化学吸收法尤其是有机胺法能够很容易通过快速键合与CO₂反应^[51]。加拿大Boundary Dam 100万t/a

表3 不同碳捕集方法的特点

Tab. 3 Characteristics of different carbon capture methods

方法	优点	不足	发展方向
化学吸收法	烟气处理量大,分离效率高,产品气中CO ₂ 纯度高,工艺技术成熟度高	吸收剂成本较高,解吸过程能耗大,影响电厂的发电效率;胺损失与腐蚀情况严重	研究有效的节能工艺,优化工艺流程、降低成本,开发新型低能耗吸收剂并逐步实现其工业化应用
物理吸收法	吸收剂化学性质稳定,不易降解;对环境友好;能耗较低;技术成熟度高	CO ₂ 脱除效率低,吸收剂成本高,只有在低温高压环境下吸收效率高,产品气纯度易受H ₂ S的影响	对现有的几种物理吸收法工艺进行改进或综合目前的物理吸收法工艺的优点发展新工艺;寻找理化性能与稳定性更好、对CO ₂ 溶解度更大的吸收剂
吸附法	对环境友好,能耗低,工艺流程较简单,自动化程度高	对CO ₂ 的选择性较低,分离效率不高;不耐高湿气流;吸附剂在运输及使用过程中易损耗	开发高吸附选择性及性能更稳定的吸附剂;开发适用于高湿烟气的吸附剂及其配套工艺
膜分离法	运行过程能耗低,设备紧凑性好,工艺简单易维护	对气源要求大,不耐高温,尚不能连续作业,分离容量小,技术成熟度不高	寻找或合成适用的膜材料,主要是膜的选择透过性与耐热耐高温性能;研究与其他方法的耦合使用
深冷法	工艺耗水少,对环境无污染	冷凝过程能耗大,设备庞大	探寻效率更高、效果更好的制冷工艺

碳捕集项目、美国 Petra Nova 140 万 t/a 碳捕集项目、美国 Powerspan 20 t/d CO₂ 化学吸收工程;国内国能锦界公司 15 万 t/a 碳捕集示范项目、华能上海石洞口 12 万 t/a 碳捕集、封存(carbon capture storage, CCS)项目、中石化胜利燃煤电厂 4 万 t/a 碳捕集项目、中国电力投资集团 1 万 t/a 碳捕集工业示范项目、江苏华电句容 1 万 t/a 碳捕集示范工程、华能北京热电厂 3 000 t/a 碳捕集工程^[52]、大唐北京高井热电厂 1 500 t/a 碳捕集项目^[53]等均为燃烧后烟气碳捕集的工业应用。此外,同样适用于此法的还有水泥回转窑的烟气,其 CO₂ 的体积分数相对较高,为 14%~33%,且含有比重较高的水分(约 13%)^[54-55]。安徽海螺白山水泥厂通过胺法化学吸收对回转窑烟气进行粗分离,之后辅以精分离措施,可获得食品级 CO₂ 3 万 t/a,工业级 CO₂ 2 万 t/a^[56]。在垃圾焚烧领域,其排放的烟气中除占比最大的 N₂ 之外,还含有 7%~14% 的 CO₂ 与大于 10% 的水蒸气;钢铁厂高炉煤气余压透平发电装置(blast furnace top gas recovery turbine unit, TRT)后,石灰窑以及自备电厂的烟气温度较低,CO₂ 体积分数在 14%~20%^[57],阿联酋的 Abu Dhabi CCS 第一阶段碳捕集项目应用于钢铁工业的碳排放,通过有机胺化学吸收法对来自直接铁还原反应堆的 CO₂ 进行捕集,年捕集量可达 80 万 t^[58]。

除处理燃烧后烟气中 CO₂ 外,化学吸收法也适用于燃烧前碳捕集,如天然气精炼脱碳领域。

由于所处地域的不同,开采出的天然气中 CO₂ 的含量有较大差别,从 5% 到 70% 不等^[50]。当气源中的 CO₂ 浓度较低时,可使用化学吸收法对 CO₂ 进行分离。

综上,化学吸收法非常适合于燃烧后低浓度(一般≤20%)、低分压的碳捕集,如发电厂、燃煤电厂、水泥窑、垃圾焚烧、钢铁厂等烟气中的 CO₂ 分离,因为它们通常烟气流量大,烟气中 CO₂ 的浓度与分压较低。除此之外,可以应用于天然气的脱碳过程,此方面的应用包括阿尔及利亚 In Salah 气田、挪威 Sleipner CO₂ Storage 100 万 t/a、Snøhvit CO₂ Storage 70 万 t/a、Gorgon CO₂ Injection 340 万 t/a CCS 项目,沙特阿拉伯的 Uthmaniyah CO₂-EOR 80 万 t/a 项目以及我国吉林油田 CO₂-EOR 项目、东方气田等。

2.2 物理吸收法

物理吸收剂不与 CO₂ 发生化学反应,与 CO₂ 的结合能力弱,因此不适合应用于浓度较低的气源。吸收过程遵循亨利定律,因此物理吸收法适合应用于 CO₂ 在气源中浓度较大且气源中的其他气体与 CO₂ 相比溶解度差异较大的情况,理想的操作条件为低温高压^[59]。

天然气田开采出的原料气中含有 CO₂ 杂质,部分气田中 CO₂ 杂质含量极高,如印度尼西亚的纳土纳气田,估计可采储量为 1.3 万亿 m³,但其中 CO₂ 体积分数高达 71%^[60]。气田开采过程中会产生大量的 CO₂ 废气,物理溶剂吸收法的再生能耗低,

不会给开采过程增加高昂的成本,但它的净化程度不理想,很难满足高净化度的分离要求,因此该方法适合处理中、高CO₂分压原料气^[61]。已应用于工业化的项目有Shute Creek 700万t/a天然气处理碳捕集项目、Great Plains合成燃料厂300万t/a碳捕集项目、Century Plant 840万t/a碳捕集项目、Lost Cabin Gas Plant 90万t/a碳捕集项目等。

整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)电站的合成气的压力较高(2.5~5 MPa),可燃气体CO与H₂的体积分数高,约占75%,剩余成分中大部分为CO₂,小部分为甲烷与硫化物。物理吸收法(如低温甲醇洗)能够通过溶解度的不同吸收多种杂质气体,并通过条件的改变释放吸收的气体,有效去除多种杂质并分离CO₂。根据美国Wabash river煤气化发电项目以及Tampa electric IGCC项目,煤经过气化产生的合成气中CO₂体积分数不高(14%~17%)^[62],但不适合使用化学吸收法进行分离,因为除CO₂之外的酸性气体会对吸收剂造成损失,且气体夹带吸收剂与水会影响后续的清洁燃烧效果,进一步经过水气变换反应后,合成气中CO₂体积分数达到35%~40%^[63]。在化肥制造领域,如氮肥生产中也有成熟的工业应用:Coffeyville Gasification工厂100万t/a CCUS项目,美国PCS Nitrogen 36万t/a CCS项目。此外,生物质沼气和气源(如生活垃圾、污水处理厂污泥、农业废弃物以及农业食品工业的食物残渣等)产生的沼气中主要是高浓度的CH₄与CO₂,CH₄体积分数在50%~75%,CO₂体积分数普遍接近30%^[64],通过物理吸收法能够达到高效的CO₂去除效果。

总之,物理吸收法适用于气源压力大的燃烧前碳捕集过程,如中、高CO₂分压天然气原料气开采、天然气精炼及其延伸的煤化工行业,生物质气领域及其延伸的化肥制造工业、合成气中CO₂的捕集分离等。

2.3 吸附法

在吸附工艺中,变压吸附法是发展最成熟的方法,通过压力的改变进行吸附与解吸,对吸附剂友好且该法的自动化程度高,与变温吸附法相比能耗可节约1~2倍^[65]。通过增加吸附床的数量,

能够增大CO₂处理能力,此外,多层变压吸附可以达到处理气源中水分的效果^[66]。根据吸附法的反应原理与特点,工业中吸附法适合于压强大、低流量、高CO₂浓度、其他杂质气体组分少且水分含量低的气源。变压吸附法技术在我国化肥制造、制氢工业、合成氨等领域发展较成熟。在天然气净化领域,吸附法表现出其优良的性能,吉林油田CO₂摩尔分数为26%的黑79区块天然气气田采用12塔操作、3塔进料、12次均压降、12次均压升的PSA工艺,吸附压力为2.8 MPa,解吸压力0.1 MPa,回收的CO₂纯度≥95%^[67]。美国Tideland石油公司以及Xebec公司开发了能够应用于海上平台小规模天然气净化的变压吸附工艺^[68]。吸附法同样适用于制氢工业,美国的Port Arthur项目、Air Products Steam Methane Reformer项目采用真空变压吸附工艺对制氢过程合成气中的CO₂进行捕集,年CO₂捕集量能够达到100万t。此外,荷兰KTI、英国ICI公司在合成氨以及尿素生产领域使用变压吸附法进行碳捕集。前面所述IGCC煤气化后的合成气中水含量极低,H₂与CO的含量高,合成气的压强很大,经过水煤气变换单元的合成气中H₂与CO₂占90%以上,适宜应用吸附法进行CO₂的分离。

在燃烧后烟气碳捕集方面,日本建成了一套移动床固体胺吸附装置,CO₂处理量可达千吨级^[69];我国山西瑞光热电公司3000 t/a CO₂捕集项目通过变压/变温吸附进行碳捕集;国能锦界公司建成千吨级吸附工业示范装置。

2.4 膜法

膜分离法适用于气源中CO₂的分压高、杂质少且与CO₂的渗透速率差异较大的情况,由此可见,膜分离法不适合应用于燃烧后烟气的CO₂分离。根据膜法的原理与特性,膜分离法适用于低温、高压的操作环境。

对于燃烧前碳捕集,在IGCC工艺中,水煤气变换单元后合成气主要为H₂与CO₂的混合气,两者的分子动力学直径相差小,致使分离选择性较低,加之变换反应是在高温下进行的,现今的膜材料在高温的环境下稳定性差,不能做到长时间连续工作^[40]。另一种情况为天然气以及油田伴生气的脱

碳, 目前报道的有机膜材料(如聚酰亚胺)能够达到42.8的 CO_2/CH_4 分离系数^[70]。而一些沸石膜, 如SAPO-34沸石膜、疏水性DDR型沸石膜的选择性也很可观^[71]。目前商业化的膜法脱碳材料仍以有机膜为主, 包括W. R. Grace公司、Cynara公司生产的各向异性膜, Separex公司生产的膜材料应用于年 CO_2 捕集量为460万t的巴西Petrobras Santos Basin Pre-Salt油田CCS项目中, 对于高 CO_2 浓度和中低气量的天然气脱碳过程, 与有机化学吸收法相比, 气体分离膜技术具有更明显的优势^[72]。因此, 膜分离法适用于中高 CO_2 浓度的中低气体总量的天然气脱碳以及油田伴生气的脱碳过程中。

目前在燃烧后烟气碳捕集领域, 膜法尚处于起步阶段, 进行过相关研究的包括美国MTR公司的Polaris膜、挪威NUST的PVAm膜、德国HZG的PolyActive膜、俄亥俄州立大学的含胺徐进传质膜, 它们的 CO_2 处理量小, 膜面积小($<10\text{ m}^2$), 烟

气进入膜组件之前需经过脱硝、脱硫以及烟气干燥的过程, 保证最后进入膜组件的气体为 CO_2 与 N_2 的混合气^[73]。膜法应用于燃烧后碳捕集技术成熟度低, 还需要进行进一步的实验研究。

2.5 深冷法

深冷法是利用气源中各组分的沸点不同, 在低温下将气体中各组分按工艺要求冷凝下来, 然后依照各类物质蒸发温度的不同, 用蒸馏法逐一加以分离。深冷法适用于气源中 CO_2 的浓度含量高、分压大的情况, 以降低制冷压缩过程的能量消耗。如富氧燃烧后烟气的 CO_2 分离, CO_2 体积分数很大(70%~80%)的天然气气井开采^[74]的脱碳以及油田伴生气中的 CO_2 回收^[61]。代表性的工艺有美国KPS公司研发的Ryan Holmes三塔和四塔工艺、Cool Energy公司的CryoCell工艺以及埃克森美孚公司的Controlled Freeze Zone示范工厂。各种方法适用场景如表4所示。

表4 各方法适用场景

Tab. 4 Applicable scenario of each method

方法	适用气源	适用场景
化学吸收法	中低 CO_2 浓度气源; 低 CO_2 分压湿气源	燃烧前: 低 CO_2 浓度天然气脱碳 燃烧后烟气(一般 CO_2 体积分数 $<20\%$): 燃煤电厂烟气; 天然气发电厂烟气; 水泥窑烟气; 垃圾焚烧厂烟气; 钢铁厂直接铁还原烟气
物理吸收法	适合于压强大, 气源中其他气体与 CO_2 的溶解度差异大的气源	燃烧前: 1) 中高 CO_2 浓度天然气脱碳(CO_2 体积分数 $>30\%$); 2) 生物质沼气、化肥厂(生活垃圾、污泥、农业废弃物、食物残渣)(CO_2 体积分数30%~40%); 3) IGCC合成气(煤气化后的合成气, CO_2 体积分数15%; 水煤气变换单元后的合成气, CO_2 体积分数 $>35\%$)
吸附法	压强大、低流量、杂质气体组分少的低湿气源	燃烧前: 1) 小规模中等浓度天然气气田开采(CO_2 体积分数 $>30\%$); 2) IGCC合成气(煤气化后的合成气(CO_2 体积分数约15%); 水煤气变换单元后的合成气(CO_2 体积分数 $>35\%$)) 燃烧后: 干燥后的燃烧后烟气(CO_2 体积分数为15%~20%)
膜法	压强大、 CO_2 分压高、气源杂质气体少且与 CO_2 的渗透速率差异较大的气源	燃烧前: 1) 中高 CO_2 浓度和中低气量的天然气脱碳(CO_2 体积分数 $>30\%$); 2) 油田伴生气脱碳 燃烧后: 经过脱硫脱硝以及干燥的燃烧后烟气
深冷法	压强大、 CO_2 浓度很高的气源(CO_2 体积分数 $>60\%$)	1) 富氧燃烧后烟气中 CO_2 分离; 2) CO_2 含量很大的天然气井开采

3 结论

1) 化学吸收法吸收剂与 CO_2 的结合能力强, 适用于中低 CO_2 浓度、低 CO_2 分压的气源。化学吸收法的核心是吸收剂, 混合有机胺溶液是目前

应用最广泛的吸收剂, 具有 CO_2 吸收能力强、处理量大、产品气纯度高的优势, 但其腐蚀与氨逃逸问题较严重, 加之高再生能耗导致经济性较差, 限制了进一步大规模应用。未来化学吸收法

技术需向着新型的两相吸收剂、离子液体复配吸收剂等低能耗吸收剂方向发展。在工艺流程方面,优化集成控制技术、研究节能工艺、降低因布置CCUS设备而造成的能量损失和能耗成本。通过“边做边学”的方法,积攒目前的工程经验,为以后布置更大规模的碳捕集工程打基础、做准备。

2) 物理吸收法适用于压强大、中高CO₂浓度、气源中其他气体与CO₂的溶解度差异较大的情况。在全球正在运行的CCUS项目中,通过物理吸收法进行碳捕集的项目占比最高,常用的方法为Restisol法与Seloxol法。

3) 与吸收法相比,吸附法具有对环境友好、能耗低、投资少的优点,吸附法适用于压强大、流量低、CO₂浓度高、杂质组分少且水分含量低的情况。吸附剂是决定吸附工艺运行与其经济性的关键,目前传统吸附剂的吸附选择性较差,分离效果不理想,不适用于高湿烟气(烟气中的水质量分数>5%)。吸附法需要开发更高性能的吸附材料以及耐湿吸附剂,增大吸附容量、提高选择性,开发耐湿吸附剂能够节省掉处理高湿烟气之前的干燥工艺,降低投入与工艺复杂程度。目前,高性能吸附剂的生产成本高,技术成熟度不高,停留在实验室以及小试阶段,限制了其规模化的应用。

4) 膜法适用于压强大、CO₂浓度高、气源中其他气体成分与CO₂的渗透差异率较大的情况。膜法未来的发展应集中于膜材料优化,与其他方法(如化学吸收法)的耦合使用以及膜法CO₂捕集的完整技术链的研究。膜法工业应用的实例较少,在未来发展的过程中需要借助结构调控、微观模拟等方法开发分离性能优良的膜材料与结构,以期能够实现规模化制备并能够工业化应用的膜材料,在工程方面要研究其配套的工艺包,获得相应的工艺参数,并逐渐扩大规模。

5) 深冷法适合于压强大、CO₂浓度很高的气源,目前的工业应用少,制冷过程的能耗问题是其主要问题,未来制冷法的发展须着眼于效率更高的制冷工艺,以减小制冷过程中的能量消耗并缩小设备体积。

参考文献

- [1] 联合国. 巴黎气候变化协定[EB/OL]. (2016-11-04)[2022-03-04]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/files/FCCC-CP-2015-L.9-Rev.1.shtml>.
The United Nations. Paris climate change agreement-climate change agreement[EB/OL]. (2016-11-04)[2022-03-04]. <https://www.un.org/zh/documents/treaty/files/FCCC-CP-2015-L.9-Rev.1.shtml>.
- [2] BP. BP statistical review of world energy[M]. London: British Petroleum, 2021.
- [3] 王丹. 二氧化碳捕集、利用与封存技术全链分析与集成优化研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2020.
WANG D. Full chain analysis, integration and optimization of CO₂ capture, utilization and storage technology[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [4] 吴何来, 李汪繁, 丁先. “双碳”目标下我国碳捕集、利用与封存政策分析及建议[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 28-37.
WU H L, LI W F, DING X. Policy analysis and suggestion for carbon capture, utilization and storage under double carbon target in China[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 28-37.
- [5] 董瑞, 高林, 何松, 等. CCUS技术对我国电力行业低碳转型的意义与挑战[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 523-532.
DONG R, GAO L, HE S, et al. Significance and challenges of CCUS technology for low-carbon transformation of China's power industry[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 523-532.
- [6] IEA. Energy technology perspectives 2017[EB/OL]. (2017-06-30) [2022-03-04]. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>.
- [7] 张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 1-6.
ZHANG J T, ZHANG L. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [8] 负保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN B J, ZHANG E S, ZHANG G, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. Power System Protection and Control,

- 2022, 50(22): 11-19.
- [9] 童光毅. 基于双碳目标的智慧能源体系构建[J]. 智慧电力, 2021, 49(5): 1-6.
TONG G Y. Construction of smart energy system based on dual carbon goal[J]. Smart Power, 2021, 49(5): 1-6.
- [10] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 中国二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021): 中国 CCUS 路径研究[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2021.
CAI B F, LI Q, ZHANG X, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021): China CCUS path study[R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2021.
- [11] KANG M K, JEON S B, CHO J H, et al. Characterization and comparison of the CO₂ absorption performance into aqueous, quasi-aqueous and non-aqueous MEA solutions[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 63: 281-288.
- [12] CHAKRAVARTY T, PHUKAN U K, WEILUND R H. Reaction of acid gases with mixtures of amines[J]. Chemical Engineering Progress, 1985, 81(4):32-39.
- [13] OH S Y, BINNS M, CHO H, et al. Energy minimization of MEA-based CO₂ capture process[J]. Applied Energy, 2016, 169: 353-362.
- [14] IDEM R, WILSON M, TONTIWACHWUTHIKUL P, et al. Pilot plant studies of the CO₂ capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO₂ capture technology development plant and the boundary dam CO₂ capture demonstration plant[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006, 45(8): 2414-2420.
- [15] LIN C Y, SORIANO A N, LI M H. Kinetics study of carbon dioxide absorption into aqueous solutions containing N-methyldiethanolamine+diethanolamine[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2009, 40(4): 403-412.
- [16] ZHANG R, ZHANG X, YANG Q, et al. Analysis of the reduction of energy cost by using MEA-MDEA-PZ solvent for post-combustion carbon dioxide capture (PCC)[J]. Applied Energy, 2017, 205: 1002-1011.
- [17] WANG T, LIU F, GE K, et al. Reaction kinetics of carbon dioxide absorption in aqueous solutions of piperazine, N-(2-aminoethyl) ethanolamine and their blends[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 314: 123-131.
- [18] GARCIA M, KNUUTILA H K, GU S. Determination of kinetics of CO₂ absorption in unloaded and loaded DEEA+MAPA blend[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 1772-1784.
- [19] HÜSER N, SCHMITZ O, KENIG E Y. A comparative study of different amine-based solvents for CO₂-capture using the rate-based approach[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 157: 221-231.
- [20] 李誉. 三乙烯四胺/有机溶剂吸收剂捕集CO₂基础性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
LI Y. Basic performance study on CO₂ capture by triethylenetetra mine/organic solvent absorbers[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [21] YANG D, WANG Y, ROCHELLE G T. Piperazine/4-Hydroxy-1-methylpiperidine for CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 307: 158-169.
- [22] DARDE V, THOMSEN K, VAN WELL W J M, et al. Chilled ammonia process for CO₂ capture[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1035-1042.
- [23] 徐志明, 王颖聪, 郜时旺, 等. 碳酸钾溶液捕集CO₂的吸收热研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2254-2260.
XU Z M, WANG Y C, GAO S W, et al. Heat of CO₂ absorption in aqueous potassium carbonate solutions [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2254-2260.
- [24] 张艺峰, 王茹洁, 邱明英, 等. CO₂捕集技术的研究现状[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 1082-1086.
ZHANG Y F, WANG R J, QIU M Y, et al. CO₂ capture technology research status[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 1082-1086.
- [25] YU C H, HUANG C H, TAN C S. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(5): 745-769.
- [26] WILBERFORCE T, BAROUTAJI A, SOUDAN B, et al. Outlook of carbon capture technology and challenges[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 56-72.
- [27] 王泽平, 周涛, 张记刚, 等. 电厂二氧化碳捕捉技术对比研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 83-87.
WANG Z P, ZHOU T, ZHANG J G, et al. Comparison of carbon dioxide capture technology in power plant[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 83-87.
- [28] 王霏. 金属氧化物负载型吸附剂的制备及其CO₂吸附性能的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
WANG F. Preparation and CO₂ adsorption properties of supported metal oxide adsorbents[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2021.
- [29] SUBRAVETI S G, PAI K N, RAJAGOPALAN A K,

- et al. Cycle design and optimization of pressure swing adsorption cycles for pre-combustion CO₂ capture[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113624.
- [30] MARING B J, WEBLEY P A. A new simplified pressure/vacuum swing adsorption model for rapid adsorbent screening for CO₂ capture applications[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 15: 16-31.
- [31] ZHAO Q, WU F, XIE K, et al. Synthesis of a novel hybrid adsorbent which combines activated carbon and zeolite NaUSY for CO₂ capture by electric swing adsorption (ESA) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 336: 659-668.
- [32] ZHAO H, LUO X, ZHANG H, et al. Carbon-based adsorbents for post-combustion capture: a review[J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2018, 8(1): 11-36.
- [33] ADHIKARI A K, LIN K S. Improving CO₂ adsorption capacities and CO₂/N₂ separation efficiencies of MOF-74 (Ni, Co) by doping palladium-containing activated carbon[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 1348-1360.
- [34] BOYCHEVA S, ZGUREVA D, LAZAROVA H, et al. Comparative studies of carbon capture onto coal fly ash zeolites Na-X and Na-Ca-X[J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129505.
- [35] RIBEIRO R, GRANDE C A, RODRIGUES A E. Electric swing adsorption for gas separation and purification: a review[J]. *Separation Science and Technology*, 2014, 49(13): 1985-2002.
- [36] MACDOWELL N, FLORIN N, BUCHARD A, et al. An overview of CO₂ capture technologies[J]. *Energy & Environmental Science*, 2010, 3(11): 1645-1669.
- [37] 陈旭, 杜涛, 李刚, 等. 吸附工艺在碳捕集中的应用现状[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(S1): 155-163.
- CHEN X, DU T, LI G, et al. Application of adsorption technology on carbon capture[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(S1): 155-163.
- [38] 刘丽影, 宫赫, 王哲, 等. 捕集高湿烟气中CO₂的变压吸附技术[J]. *化学进展*, 2018, 30(6): 872-878.
- LIU L Y, GONG H, WANG Z, et al. Application of pressure swing adsorption technology to capture CO₂ in highly humid flue gas[J]. *Progress in Chemistry*, 2018, 30(6): 872-878.
- [39] 朱炫灿, 葛天舒, 吴俊晔, 等. 吸附法碳捕集技术的规模化应用和挑战[J]. *科学通报*, 2021, 66(22): 2861-2877.
- ZHU X C, GE T S, WU J Y, et al. Large-scale applications and challenges of adsorption-based carbon capture technologies[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(22): 2861-2877.
- [40] 罗双江, 白璐, 单玲珑, 等. 膜法二氧化碳分离技术研究进展及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1209-1216.
- LUO S J, BAI L, SHAN L L, et al. Research progress and prospect in membrane-mediated CO₂ separation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1209-1216.
- [41] LUIS P, GERNEN T V, BRUGGEN B V D. Recent developments in membrane-based technologies for CO₂ capture[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2012, 38(3): 419-448.
- [42] ZOU X, ZHU G. Microporous organic materials for membrane based gas separation[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(3): 1700750.
- [43] 孙亚伟, 谢美连, 刘庆岭, 等. 膜法分离燃煤电厂烟气中CO₂的研究现状及进展[J]. *化工进展*, 2017, 36(5): 1880-1889.
- SUN Y W, XIE M L, LIU Q L, et al. Membrane-based carbon dioxide separation from flue gases of coal-fired power plant: current status and developments[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(5): 1880-1889.
- [44] KOROS W J, ZHANG C. Materials for next-generation molecularly selective synthetic membranes [J]. *Nature materials*, 2017, 16(3): 289-297.
- [45] ZHANG Z. Comparisons of various absorbent effects on carbon dioxide capture in membrane gas absorption (MGA) process[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 31: 589-595.
- [46] 李小森, 鲁涛. 二氧化碳分离技术在烟气分离中的发展现状[J]. *现代化工*, 2009, 29(4): 25-30.
- LI X S, LU T. Present development situation of techniques separating carbon dioxide separation techniques infrom flue gas separation[J]. *Modern Chemical Industry*, 2009, 29(4): 25-30.
- [47] 张书勤, 胡耀强, 张春威, 等. 油井采收气中CO₂分离技术[J]. *应用化工*, 2018, 47(6): 1241-1245.
- ZHAG S Q, HU Y Q, ZHANG C W, et al. CO₂ separation technology from oil well gas[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(6): 1241-1245.
- [48] VERRECCHIA G, CAFIERO L, DE CAPRARIIS B, et al. Study of the parameters of zeolites synthesis from coal fly ash in order to optimize their CO₂ adsorption[J]. *Fuel*, 2020, 276: 118041.

- [49] 陆诗建, 黄凤敏, 李清方, 等. 燃烧后 CO₂ 捕集技术与工程进展[J]. 现代化工, 2015, 35(6): 48-52.
LU S J, HUANG F M, LI Q F, et al. Advances in technology and project of post-combustion CO₂ capture[J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(6): 48-52.
- [50] WANG S, LI X, WU H, et al. Advances in high permeability polymer-based membrane materials for CO₂ separations[J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(6): 1863-1890.
- [51] DE AQUINO T F, ESTEVAM S T, VIOLA V O, et al. CO₂ adsorption capacity of zeolites synthesized from coal fly ashes[J]. Fuel, 2020, 276: 118143.
- [52] 黄斌, 许世森, 郜时旺, 等. 华能北京热电厂 CO₂ 捕集工业试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(17): 14-20.
HUANG B, XU S S, GAO S W, et al. Industrial test of CO₂ capture in Huaneng Beijing coal-fired power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(17): 14-20.
- [53] 刘飞. 胺基两相吸收剂捕集二氧化碳机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
LIU F. Study on mechanism of amine based biphasic solvents for CO₂ capture[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [54] National Energy Technology Laboratory (U.S). Cement kiln flue gas recovery scrubber project[R]. Pennsylvania: National Energy Technology Laboratory, 2001.
- [55] 刘仁越. 产业发展仍具韧性 碳中和目标实现之路径[J]. 水泥工程, 2021(2): 1-7.
LIU R Y. Cement industrial development still remains resilient and the path to achieve the goal of carbon neutrality[J]. Cement Engineering, 2021(2): 1-7.
- [56] 吴涛, 桑圣欢, 祁亚军, 等. 水泥厂碳捕集工艺技术[J]. 水泥技术, 2020(4): 90-95.
WU T, SANG S H, QI Y J, et al. Carbon capture technology in cement plant[J]. Cement Technology, 2020(4): 90-95.
- [57] 王尧. 基于钢铁厂碳捕集的 CCUS-EOR 全流程项目技术经济评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
WANG Y. Techno-economic assessment of a full-chain CCUS-EOR project based on carbon capture of iron/steel industry[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [58] SAINI D. Simultaneous CO₂-EOR and storage projects [M]. Berlin: Springer, 2017: 11-19.
- [59] 梁嘉能. 工业碳捕集与封存(CCS)和人工林固碳的对比分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LIANG J N. The Comparison between carbon capture and storage (CCS) and artificial forest carbon sequestration[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [60] TAN L S, SHARIFF A M, LAU K K, et al. Impact of high pressure on high concentration carbon dioxide capture from natural gas by monoethanolamine/N-methyl-2-pyrrolidone solvent in absorption packed column[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 34: 25-30.
- [61] 洪宗平, 叶楚梅, 吴洪, 等. 天然气脱碳技术研究进展[J]. 化工学报, 2021, 72(12): 6030-6048.
HONG Z P, YE C M, WU H, et al. Research progress in CO₂ removal technology of natural gas[J]. CIESC Journal, 2021, 72(12): 6030-6048.
- [62] U.S. Department of Energy. Tampa electric integrated gasification combined-cycle project[EB/OL]. (2000-07-31) [2022-03-04]. <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/tampa>.
- [63] 闫振宇. 吸收水合法回收 IGCC 合成气中 CO₂ 的基础研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
YAN Z Y. Fundamental research on absorption-hydration method to separate and recover CO₂ from IGCC syngas[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [64] LASHAKI M J, KHIAMI S, SAYARI A. Stability of amine-functionalized CO₂ adsorbents: a multifaceted puzzle[J]. Chemical Society Reviews, 2019, 48(12): 3320-3405.
- [65] RUFFORD T E, SMART S, WATSON G C Y, et al. The removal of CO₂ and N₂ from natural gas: a review of conventional and emerging process technologies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 94: 123-154.
- [66] LI G, XIAO P, ZHANG J, et al. The role of water on postcombustion CO₂ capture by vacuum swing adsorption: bed layering and purge to feed ratio[J]. AIChE Journal, 2014, 60(2): 673-689.
- [67] 任德庆, 高洪波, 纪文明. 变压吸附脱碳技术在高含二氧化碳天然气开发应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(16): 146-147.
REN D Q, GAO H B, JI W M. Application of pressure swing adsorption decarbonization technology in the development of natural gas with high carbon dioxide content[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 33(16): 146-147.
- [68] 黄绍兰, 童华, 王京刚, 等. CO₂ 捕集回收技术研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 77-82.

- HUANG S L, TONG H, WANG J G, et al. Review of CO₂ trapping and recycling methods[J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(12): 77-82.
- [69] OKUMURA T, YOSHIZAWA K, NUMAGUCHI R, et al. Demonstration plant of the Kawasaki CO₂ capture (KCC) system with solid sorbent for coal-fired power station[C]//14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference, Melbourne, Australia. 2018: 21-26.
- [70] TAGLIABUE M, FARRUSSENG D, VALENCIA S, et al. Natural gas treating by selective adsorption: material science and chemical engineering interplay[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3): 553-566.
- [71] CARREON M A, LI S, FALCONER J L, et al. Alumina-supported SAPO-34 membranes for CO₂/CH₄ separation[J]. Journal of the American Chemical Society, 2008, 130(16): 5412-5413.
- [72] BAKER R W, LOKHANDWALA K. Natural gas processing with membranes: an overview[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(7): 2109-2121.
- [73] HAN Y, SALIM W, CHEN K K, et al. Field trial of spiral-wound facilitated transport membrane module for CO₂ capture from flue gas[J]. Journal of Membrane Science, 2019, 575: 242-251.
- [74] MAQSOOD K, MULLICK A, ALI A, et al. Cryogenic carbon dioxide separation from natural gas: a review based on conventional and novel emerging technologies[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2014, 30(5): 453-477.

收稿日期: 2023-01-20。

作者简介:



胡道成

胡道成(1976), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力环保研究与电力科技管理工作, daocheng.hu@chnenergy.com.cn;



王睿

王睿(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为二氧化碳捕集, 1310751904@qq.com;



赵瑞

赵瑞(1984), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为碳捕集与利用技术, ruizhao.z@chnenergy.com.cn;



孙楠楠

孙楠楠(1983), 男, 博士, 研究员, 研究方向为碳捕集利用与封存技术与战略, sunn@scri.ac.cn;



徐冬

徐冬(1982), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事电力环保、清洁能源与CCUS研发工作, dong.xu@chnenergy.com.cn;



刘丽影

刘丽影(1982), 女, 博士、副教授, 长期从事CCUS、气体吸附分离研究, 本文通信作者, liuly@smm.neu.edu.cn。

(责任编辑 辛培裕)