

二氧化碳捕集技术研究现状与发展综述*

唐 强^{1,2} 李金惠^{1,2} 邹建伟^{1,2} 胡员员³ 黄 何^{*,1,2}

(1. 广东省技术经济研究发展中心, 广州 510070;
2. 广东省未来预测研究会, 广州 510070; 3. 梦湖学校, 抚州 533300)

摘要:为应对全球气候变暖,减少 CO₂ 向大气排放, CO₂ 捕集成为全球重点研究的一项技术。本文基于国内外 CO₂ 捕集技术研究现状,将 CO₂ 捕集技术分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链燃烧 4 种技术路线,燃烧前捕集和燃烧后捕集技术又主要有吸收法、吸附法、膜分离法、低温分馏法等方法。首先,概述了这 4 种技术路线的不同方法的研究现状和应用进展,并提出了各技术方法的未来发展趋势。随后,对比了不同 CO₂ 捕集技术的优缺点,总结发现各技术方法各有利弊,尚未有一种技术能独立满足高效、低成本、低能耗和大规模要求。最后,提出未来应当针对 CO₂ 捕集技术存在的难题与挑战,重点开展研发攻关,突破现阶段瓶颈,推动 CO₂ 捕集经济、高效和规模化。

关键词:二氧化碳;捕集技术;研究与应用;双碳

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.07.003

Review on Research Status and Development of Carbon Dioxide Capture Technology*

TANG Qiang^{1,2} LI Jinhui^{1,2} ZOU Jianwei^{1,2} HU Yuanyuan³ HUANG He^{*,1,2}

(1. Guangdong R&D Center for Technological Economy, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Society of Futures Studies, Guangzhou 510070, China; 3. Menghu school, Fuzhou 533300, China)

Abstract: In order to cope with global warming and reduce CO₂ emissions to the atmosphere, CO₂ capture has become a key technology for global research. Based on the research status of CO₂ capture technology at home and abroad, this paper divides CO₂ capture technology into four technical routes: pre-combustion capture, post-combustion capture, oxy-fuel combustion and chemical looping combustion. Pre-combustion capture and post-combustion capture technology mainly include absorption method, adsorption method, membrane separation method, low temperature fractionation method and other methods. Firstly, the research status and application progress of different methods of these four technical routes are summarized, and the future development trend of each technical method is proposed. Subsequently, the advantages and disadvantages of different CO₂ capture technologies are compared. It is found that each technical method has its own advantages and disadvantages, and no technology can independently meet the requirements of high efficiency, low cost, low energy consumption and large scale. Finally, it is proposed that in the future, we should focus on the problems and challenges of CO₂ capture technology, focus on research and development, break through the bottleneck at this stage, and promote the economy, efficiency and scale of CO₂ capture.

Keywords: Carbon Dioxide; Capture Technology; Research and Application; Carbon Peaking and Carbon Neutrality

* 广东省“大专项+任务清单”项目“江门市‘双碳’、激光与增材、精密仪器设备等科技产业和市实验室体系战略研究”,广东省“大专项+任务清单”项目“湛江市科技支撑碳达峰碳中和行动方案研究”(2022A05018)

** E-mail: Heather_hh@163.com

CO₂是引起全球气候变暖的主要气体^[1],降低CO₂的排放已经成为各国共识。CO₂捕集利用与封存(Carbon Capture Utilization and Storage, CCUS)技术作为零碳负碳的一种技术,通过捕集、利用和封存减少CO₂向大气排放,是缓解气候变暖^[2],以及现阶段化石能源大规模低碳利用的主要技术手段,同时是协同推进经济社会发展、能源安全和“双碳”目标的重要支撑^[3],受到全球各国的高度重视。2021年党中央、国务院先后印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》,明确提出要加强低成本、规模化CCUS技术研发、示范和产业化应用。

然而当下CCUS成熟的技术规模化应用成本高,CO₂捕集技术作为CCUS技术链条中的前端,是CO₂利用与封存的基础,也是CCUS技术链条中成本最高的阶段^[4]。国内外学者根据捕集机理研究出众多不同的CO₂捕集技术,不同技术所处研究应用阶段不同,有些技术已开展商业化应用,有些则处于工业示范阶段,还有一些技术处于实验室研究或基础研究阶段。为清晰了解CO₂捕集技术研究与应用现状,本文对几种CO₂捕集技术的研究现状和应用进展进行了总结和对比分析,指出了不同CO₂捕集技术优缺点,并提出CO₂捕集技术的未来发展方向,旨在为低能耗、低成本、规模化的CO₂捕集技术开发提供一定的参考,推动碳捕集规模化产业应用。

1 CO₂捕集技术研究与应用进展

按照燃烧过程和燃烧方式划分,CO₂捕集技术主要有燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链燃烧四类^[5]。燃烧前捕集技术是在燃料燃烧前将CO₂从燃料或者燃料变换气中进行分

离的技术,所需处理气体压力高、CO₂浓度高、杂质少,主要应用于整体煤气化联合循环发电装置(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)^[6,7]。燃烧后捕集是从燃烧过程除尘和脱硫后的尾部烟气中分离和回收CO₂的技术,目前是全球应用最广泛、最成熟的CO₂捕集技术,广泛应用于工业和电厂等各种场景^[8,9]。富氧燃烧是在现有电站锅炉系统基础上,用O₂代替空气,同时结合大比例烟气循环(70%)调节炉膛内的燃烧和传热特性,直接获得富含高浓度CO₂的烟气(高达80%),一部分烟气再进入炉膛,其目的是用来抑制燃烧温度过高,剩余部分烟气则进行冷却、压缩及分离等过程,以收集CO₂,从而以较低成本实现CO₂捕集、封存或资源化利用的技术^[10,11]。化学链燃烧是利用固体载氧体(金属氧化物等)将空气中的氧传递给燃料进行燃烧,避免燃料与空气的直接接触,实现燃烧过程中CO₂内分离的技术^[12]。

1.1 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集方法主要有:溶液吸收法、固体吸附法、膜分离法、低温分馏法^[13]等。

1.1.1 溶液吸收法

溶液吸收法是利用溶液从混合气中分离CO₂,按吸收方式可分为物理和化学溶液吸收法^[14]。目前,在电厂、炼油、合成氨、天然气净化等工业场景中有相关应用(表1)。溶液吸收法的关键核心在于吸收剂的研发,现有低温甲醇、碳酸丙烯酯、聚乙二醇二甲醚^[15,16]和热钾碱、烷基醇胺等优质物理和化学吸收剂^[17],溶液吸收法具有吸收速率快、选择性高、捕集容量大等优点,捕集成本也有所下降。但低温甲醇、碳酸丙烯酯、聚乙二醇二甲醚等吸收剂的工艺成本仍高达35~50美元/吨^[18],远高于国际15美元/吨的可接受范围^[19]。因此,研发新型高效的吸收剂和相应的

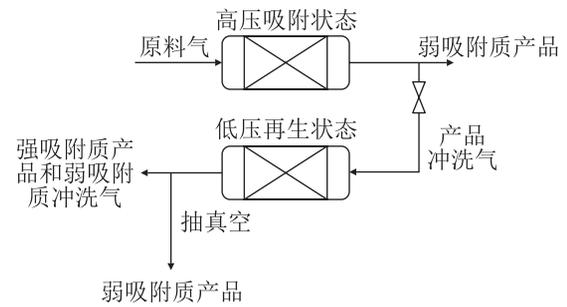
表1 燃烧前溶液吸收法捕集 CO₂ 应用情况Tab.1 Application of CO₂ Capture Pre-combustion by Solution Absorption Method

国家/地区	捕集项目	捕集方法	实施时间	捕集规模 (t/a)
挪威	SLEIPNERCO ₂ 封存项目 ^[20]	—	1996年	100万
加拿大	Quest 沥青提质尾气 CCS 项目 ^[21]	—	2015年	100万
国外	美国 得克萨斯州清洁能源项目 ^[22]	物理吸收法	2015年	240万
美国	Kemper County 碳捕集项目 ^[23]	物理吸收法	2016年	300万
澳大利亚	Gorgon 天然气 CO ₂ 捕集封存项目 ^[24]	—	2019年	340万~400万
国内	内蒙古 神华集团内蒙古煤制油 ^[14]	物理吸收法	2009年	115万
天津	整体煤气化联合循环发电系统 (IGCC) 电站 ^[25]	化学溶液吸收	2012年	10万
内蒙古	汇能煤制天然气捕集 CO ₂ ^[14]	物理吸收法	2014年	880万
新疆	克拉玛依驰放气 CO ₂ 捕集 ^[26]	化学吸收法	2015年	10万
宁夏	神华集团宁夏煤制油 CO ₂ 捕集 ^[14]	物理吸收法	2016年	2500万

工艺技术,将成本降至国际接受范围 15 美元/吨是该技术未来发展的重点^[13,19]。

1.1.2 固体吸附法

固体吸附法是利用固体吸附剂,通过范德华力或化学键吸附作用从混合气中分离 CO₂^[13]。变压吸附法 (Pressure Swing Adsorption, PSA) 是固体吸附 CO₂ 的主要技术方法,基于不同气体组分在固体吸附剂上吸附特性的差异,以及吸附量随压力变化的特性,通过加压实现混合气体分离,降压完成吸附剂再生,从而实现 CO₂ 分离或提纯 (图 1)^[27]。沸石分子筛、活性炭、硅基分子筛、活性氧化铝、水滑石和金属多孔类 (Metal Organic Framework, MOF) 材料等吸附剂,是目前最常用

图1 PSA 吸附流程示意图^[14]Fig.1 Schematic Diagram of PSA Adsorption Process^[14]

于 PSA 吸附技术的材料^[28]。

PSA 二氧化碳吸附分离技术与溶液吸收法相比,具有易操作、操作简单、再生能耗更低等优点,PSA 技术主要应用于合成氨等高压气源场景,全球已建成多个 PSA 二氧化碳吸附分离商业化项目 (表 2),但因高压气源条件的约束,应用场景有限,未来应当极力拓展新应用领域^[29]。

表2 燃烧前 PSA 法捕集 CO₂ 应用情况Tab.2 Application of CO₂ Capture Pre-combustion by PSA Method

国家/地区	捕集项目	实施时间	捕集规模 (t/a)
国外	英国 帝国化学工业集团公司 450 吨/天合成氨 ^[30]	20 世纪 80 年代末	20 万
澳大利亚	CO ₂ CRC Otway 站 ^[31]	2017 年	40 万
国内	浙江 宁波四明化工有限公司 45000 Nm ³ /h 装置 ^[14]	2010 年	20 万
河南	新乡河南心连心化肥有限公司 180000 Nm ³ /h 变换器脱硫 CO ₂ 装置 ^[14]	2015 年	71 万

1.1.3 膜分离法

膜分离法是利用不同气体组分在膜中的溶解、扩散速率不同性质,在膜两侧分压差的作用下,各气体相对渗透率不同,渗透率高的气体通过膜达到低压力侧,渗透率低的气体截留在高压侧

(图2),从而实现分离目标CO₂的技术^[32]。

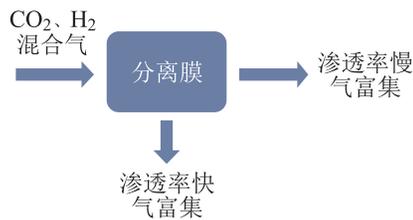


图2 膜分离技术原理示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Membrane Separation Technology Principle

由于燃烧前CO₂捕集技术,主要是对以CO₂和H₂组成的水煤气进行分离^[13],因此用于燃烧前CO₂和H₂分离的膜有两类,一是H₂优先渗透膜,二是CO₂优先渗透膜。其中,CO₂优先渗透膜相比H₂优先渗透膜更具优势,一是富氢气体中CO₂含量低于H₂,透过膜的气体较少,分离所需膜面积小,有利于降低成本;二是H₂处于高压,压力损失更小,有利于后续利用;三是H₂在膜的截留侧富集,获得高纯度H₂对膜的分离因子要求较低^[14]。

与吸收和吸附法捕集CO₂技术等相比,膜分离技术具有节能、高效、环保、投资少、操作简单等优点,但膜分离燃烧前CO₂捕集技术尚处于实验室研究阶段,捕集成本总体较高,尚不具备大规模应用条件^[13]。因此,该技术未来应在分离膜材料方面加强研发,提高膜的稳定性,解决分离膜材料的规模制备问题,推动实现规模化应用^[14]。

1.1.4 低温分馏法

低温分馏法是基于混合气体中不同组分具有不同气化和液化特性从而进行CO₂分离的方法^[33],适用于较高浓度气源(CO₂浓度>90%)、组分沸点差异较大混合气体的CO₂回收^[34]。对于高浓度CO₂驱采出气捕集,该方法具有经济性较好、成本较低等优点^[35]。目前,低温分馏法在国内外已有工业应用示范。如,美国Wasson油田、

Willard油田伴生气处理厂运用Rayn-Holmes法分离CO₂,美国Candidate井场利用Rayn-Holmes三塔流程处理含碳57.6%伴生气^[36]。埃克森美孚公司的商业化示范工厂,在2011-2013年测试了可控冷冻区(Controlled freezing zone, CFZ)技术,项目CO₂年处理量约为 18.5×10^4 t^[37]。国内胜利油田纯梁采油厂CO₂产量120 t/d,产品气纯度达到99.3%^[35]。

但该方法仍存在工艺流程复杂、分离设备多、压缩液化能耗高等技术难题,未来需加强研发高性能制冷剂,以及优化提纯塔结构,降低捕集能耗,提升分馏效益^[38]。

1.2 燃烧后捕集技术

适合燃烧后CO₂捕集的工艺包括化学溶液吸收法、化学吸附法、物理吸附法和膜分离法。

1.2.1 化学溶液吸收法

化学溶液吸收法是一种利用碱性吸收剂与烟气接触并与CO₂发生反应,形成不稳定的盐类,而盐类在加热或减压的条件下会逆向分解释放CO₂并再生吸收剂,从而将CO₂从烟气中分离的方法(图3)^[39]。碱性吸收剂是该方法的核心,目前常用吸收剂主要是有机胺,包括乙醇胺(Monoethanolamine, MEA)、甲基二乙醇胺(Methyldiethanolamine, MDEA)、混合胺、胺基两相、少水胺及离子液体^[40]等。

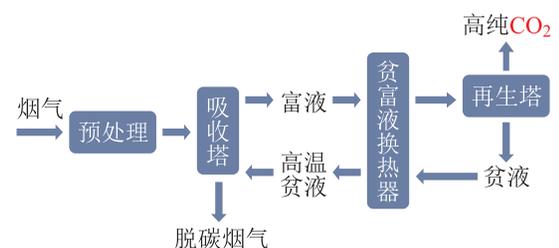


图3 化学溶液吸收法流程示意图

Fig. 3 Process Diagram of Chemical Solution Absorption Method

化学溶液吸收法是现阶段最具规模化应用的捕集技术,具有CO₂捕集率高(>90%)、捕获CO₂纯度高(>99%)、烟气适应性较好等优点。目前,该技术广泛适用于燃煤电厂、化工厂等大型固定碳排放源的工业项目^[14],全球多个国家/地区已建立商业运行项目(表3),每吨CO₂的平均捕集能耗和捕集成本分别为2.8 GJ和270元^[14],降低捕集能耗和成本依然是该技术方法的难题,未来应当加强兼具低损耗、低能耗、低成本、捕集效率高的新型吸收剂研发,降低技术的应用成本^[41]。

表3 燃烧后化学溶液吸收法捕集CO₂应用情况

Tab.3 Application of CO₂ Capture Post-combustion by Chemical Solution Absorption Method

国家/地区	捕集项目	实施时间	吸收剂	捕集规模(t/a)
澳大利亚	Targon 发电厂 ^[42]	2008年	MEA	0.7万
国外	加拿大 边界大坝电厂(燃煤)烟气 ^[43,44]	2014年	MEA	100万
美国	Petra Nova 燃煤电厂 ^[45]	2017年	KS-1	140万
英国	Peterhead 电厂 ^[46]	2020年	—	100万
国内	上海 华能上海石洞口第二电厂 ^[47]	2009年	混合胺	12万
陕西	国家能源集团国华电力锦能(燃煤)电厂 ^[48]	2019年	—	15万

1.2.2 化学吸附法

化学吸附法是利用CO₂分子与固体材料表面某些原子或基团形成化学键合而产生的被吸附作

用来实现CO₂捕集分离的技术^[49]。吸附剂对化学吸附法捕集CO₂的效果影响大,用于循环吸附CO₂的化学材料很多,如醇胺类吸附材料、固体胺、碱金属碳酸盐类低温吸附材料,以及氧化钙、正硅酸锂等高温吸附材料^[50](图4)。

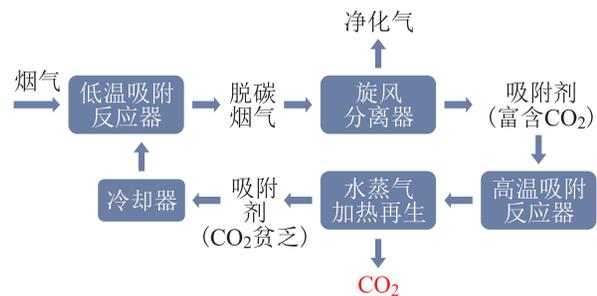


图4 化学吸附法流程示意图

Fig.4 Chemical Adsorption Process Diagram

该技术适用于火力发电、水泥、钢铁等行业^[14],但目前该技术基本处于中试阶段^[51],少量项目进入工业试验,具体应用情况如表4。相比化学溶液吸收法,化学吸附法无需溶剂,工艺过程简单、无设备腐蚀、节能降耗明显,但是吸附速率较慢、成本较高是制约化学吸附法发展的重要因素^[12],因此优化吸附材料的性能、降低吸附剂的制备成本,以及研发高效吸附/再生的反应床是未来亟需加强研究的方向^[14]。

1.2.3 物理吸附法

物理吸附法是基于气体与吸附剂表面活性点之间的分子引力,通过升温或加压方式对CO₂

表4 化学吸附法燃烧后CO₂捕集应用情况

Tab.4 Application of CO₂ Capture Post-combustion by Chemical Adsorption Method

国家/地区	捕集项目	吸附剂	规模	捕集率(%)	实施机构
西班牙	2009年双循环流化床 ^[52]	CaO	1.7 MW	>90	西班牙国家煤炭研究所
美国	2010年美国气流床+回转窑 ^[53]	CaO	120 KW	>90	俄亥俄州立大学
国外	韩国 2012年韩国输运床+鼓泡床 ^[54]	K ₂ CO ₃	10 MW	>80	韩国能源研究所
德国	2012年德国双循环流化床 ^[55]	CaO	1 MW	90 ~ 92	达姆施塔特工业大学
日本	2017年移动床 ^[56]	固体胺	1.26 kt/a	93	川崎重工
国内	北京 2009年清华大学双鼓泡流化床 ^[57]	CaO	20 KW	90 ~ 95	清华大学
南京	2012年东南大学双鼓泡流化床 ^[58]	K ₂ CO ₃	10 Nm ³ /h	>90	东南大学

进行吸附,减压或降温方式进行解吸的CO₂吸附分离技术。常见物理吸附剂有活性炭、沸石分子筛、硅胶、碳分子筛、活性炭纤维、多孔配位骨架材料(Porous Coordination Framework materials, PCFs)^[59,60]等。依照CO₂吸附、解吸方式,物理吸附法分为变压吸附法(Pressure Swing Adsorption, PSA)、变温吸附法(Thermal Swing Adsorption, TSA)以及变压与变温相结合的吸附方法(Pressure-Thermal Swing Adsorption, PTSA)。由于温度调节控制速度较慢,且TSA技术在吸附和脱附过程会造成大量能量损耗,因此PSA为最常用物理吸附方法^[61]。

PSA技术具有工艺简单、自动化程度高、捕集纯度高优点^[62],应用于电厂烟气的碳捕集、水泥窑尾气的CO₂分离、合成氨等场景^[63,64],在国内外已有大型工业应用(表5)。目前吸附剂的吸附性

能和成本是该技术亟待解决的难题,未来需研发高性能、低成本的吸附剂,以及优化完善相应的吸附工艺^[14]。

1.2.4 膜分离法

膜分离法是利用CO₂与待分离气体组分由于尺寸、冷凝性及反应性不同,导致气体分子在膜内透过速率的差异实现分离的一种技术^[70]。目前常见的燃烧后CO₂捕集膜材料主要为聚合物材料,如Polaris膜、Polyactive膜、聚乙烯基胺(Polyvinylamine, PVAm)类分离复合膜、聚环氧乙烷类膜^[71,72]等。该技术适用于燃煤发电厂、水泥厂、液化天然气等场景。

膜分离法燃烧后CO₂捕集技术具有能耗低、无溶剂挥发、占地面积小等优点,应用前景广阔^[51],该技术在部分商业应用项目如表6所示。目前,该技术的主要瓶颈是研发低成本、高渗透透

表5 物理吸附法燃烧后CO₂捕集应用情况

Tab.5 Application of CO₂ Capture Post-combustion by Physical Adsorption Method

国家/地区	捕集装置	CO ₂ 捕集率/捕集纯度	捕集能耗	实施机构	实施时间
国外	日本 PTSA中试装置 ^[65]	90%/99%	2.02 MJ/kg	东京电力公司	1994年
	韩国 两段PSA烟气中CO ₂ 捕集装置 ^[66,67]	80%/99%	2.3 ~ 2.8 MJ/kg	韩国能源研究所	2004年
国内	广州 燃煤电厂烟气捕集CO ₂ 的中试规模真空变压吸附(Vacuum Pressure Swing Adsorption, VPSA)装置 ^[68]	90.2%/95.6%	2.44 MJ/kg	华东理工大学	2013年
	唐山 年产5万吨CO ₂ 生产线炼钢装置 ^[69]	—/99.8%	—	首钢京唐钢铁	2019年

表6 膜分离法燃烧后CO₂捕集应用情况

Tab.6 Application of CO₂ Capture Post-combustion by Membrane Separation Method

国家/地区	膜材料	试验机构	规模(Nm ³ /d)	烟道气来源	实施时间
国外	韩国 PES	韩国化学技术研究所 ^[14]	1000	液化天然气燃烧后气体	2012年
	美国 Polaris	麦特尔膜技术有限公司 ^[74]	86000	燃煤火力发电厂	2014年
	德国 Polyactive	亥姆霍兹吉斯卡赫特研究所 ^[75]	1200	燃煤火力发电厂	2015年
	挪威 PVAm类	挪威科技大学 ^[76]	960	水泥厂	2016年
国内	汕尾 Polaris	华润电力(海丰)有限公司 ^[12]	86000	燃煤火力发电厂	2019年
	南京 PVAm类	天津大学 ^[14]	50000	燃煤火力发电厂	2021年

率、耐杂质的膜。另外,技术成熟度不高、放大效应不明显是该技术的一大缺陷^[70]。因此,开发复杂组分的烟道气高性能膜,以及研制相应的分离捕集系统装置和工艺,突破美国能源局提出“捕集率 $\geq 90\%$ 、浓度 $\geq 95\%$ 、成本不高于40美元/吨”目标,推动技术实现大规模应用是未来该技术重点发展方向^[73]。

1.3 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术可应用于新建燃煤电厂的CO₂捕集,分为常压富氧燃烧(Atmospheric Oxygen-Combustion, AOC)和增压富氧燃烧(Pressurized Oxygen-Combustion, POC)^[10]。其中,POC是在AOC基础上将燃烧系统的压力提升到10~15 bar,充分回收烟气中水分的热焓,从而提高碳捕集系统效率的新型技术^[10]。

相比其他捕集技术,富氧燃烧主要是用富氧替代空气进行燃烧,无需对设备进行较大改造,改造难度和改造成本最低^[77];同时因为N₂含量较低,燃烧产生烟气主要为H₂O和CO₂等气体,NO_x气体较少,对环境较为友好,但容易富集SO₂、SO₃等气体^[77]。目前,AOC技术在全球范围内已经完成工业示范,POC技术处于实验室研究阶段或小试试验阶段(表7)。由于该技术要求制备纯度较高的氧气,导致附加投资成本高、单体规模小,制约了该技术的推广应用。未来,应当加强低能耗和低成本制氧、稳定放大富氧燃烧器、酸性气体共压缩、空分系统-锅炉系统-压缩纯化系统耦合优化、加压富氧燃烧技术等方面加强研发,降低捕集成本,推动规模化应用^[78]。

1.4 化学链燃烧技术

化学链燃烧是一种新型CO₂捕集技术,被认为是最有潜力降低CO₂捕集成本的选择之一^[83],分为原位气化化学链燃烧(In-situ Gasification

表7 富氧燃烧应用情况

Tab.7 Application of Oxygen-fuel Combustion

国家/地区	捕集项目	技术方法	示范阶段	规模	实施时间
意大利	FPOC 试验平台 ^[79]	POC	小试	5 MW	2006年
德国	Vattenfall-Shwartz Pumpe ^[80]	AOC	中试	10 MW	2008年
法国	TOTAL-Lacq ^[81]	AOC	中试	10 MW	2009年
国外	芬兰 Fortum-Meri-Pori ^[81]	AOC	商业应用	565 MW	2015年
美国	B&W-Campbell ^[12]	AOC	商业应用	100 MW	2016年
美国	POC 小试试验装置 ^[14]	POC	小试	100 KW	—
韩国	Youngdong ^[81]	AOC	商业应用	125 MW	2016年
国内	武汉 3MWth 全流程试验平台 ^[82]	AOC	中试	1×10 ⁴ t/a	2011年
	孝感 35MWth 中试电厂 ^[78]	AOC	中试	1×10 ⁵ t/a	2014年

Chemical Looping Combustion, iG-CLC)和氧解耦化学链燃烧(Chemical Looping with Oxygen Uncoupling, CLOU)两种类型。iG-CLC利用H₂O和CO₂将燃料首先转化为H₂、CO及其他可燃挥发分,随后与铁矿石等载氧体发生固氧化反应,生成以CO₂和H₂O为主要成分的烟气(图5)^[84]。CLOU采用能够释放气态氧的载氧体(如CuO),气态氧有利于强化固体燃料的燃烧,提高碳转化率和CO₂捕集率^[84]。

由于化学链燃烧不需要空分制氧,在燃烧中可直接产生不含氮气的高浓度CO₂烟气,降低了

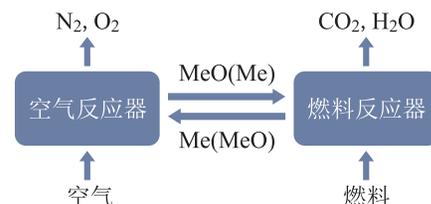


图5 化学链燃烧示意图

Fig.5 Chart of Chemical Looping Combustion

CO₂ 捕集能耗和成本,减小了系统净效率损失,因此与富氧燃烧技术相比,该技术不会富集 SO₂、SO₃ 等腐蚀性气体,不容易引起设备与管道腐蚀,也不容易发生燃烧不稳定,炉膛整体熄火等故障^[85,86]。该技术通常用于煤的低碳燃烧,也能用于生物质、石油焦、天然气等燃料,可用于新建燃煤发电厂项目^[84]。目前,国外对该技术的研究进入半工业化试验或小试期(表 8),国内尚处于实验室研究。因此,未来应着力开展稳定性强、活性高、低成本的载氧体研发,设计开发高效科学的化学链燃烧反应器等装置,并完善相应的全过程工艺设计、建造等技术,推动实现商业化应用^[87]。

2 CO₂ 捕集技术对比

在燃烧前 CO₂ 捕集、燃烧后 CO₂ 捕集、富氧燃烧和化学链燃烧等 4 类 CO₂ 捕集路线中,每种技术路线及其不同技术方法都有其优点和缺陷(表 9)。如燃烧前捕集技术路线捕集能耗相对较低,但所需处理气体压力高、CO₂ 浓度高导致应用范围较窄^[7];燃烧前捕集技术路线中的溶液吸收法、固体吸附法等技术方法虽技术较为成熟,商业化应用较多,但存在再生能耗高、捕集潜力有限^[18,29]。燃烧后捕集技术最为成熟,商业应用最广^[8],尤以化学溶液吸收法最为突出,但化学溶液

吸收法捕集能耗和成本较高^[14],化学吸附、物理吸附和膜分离等方法相比化学溶液吸收法,虽能降低能耗或成本,但存在放大效果不好、技术成熟度不高等难题^[51,70]。富氧燃烧通过在富氧条件下进行燃烧,相比燃烧前和燃烧后捕集技术改造难度和成本不高,但由于需制备高纯度氧气,技术附加投资成本较大,商业应用不多^[77,78]。化学链燃烧通过固体载氧体传送空气中氧气,无需制氧,成本相对富氧燃烧又有一定优势,但技术成熟度较低,目前仅处于半工业试验^[85,86]。

3 总结与展望

CO₂ 捕集技术作为 CCUS 链条的最前端,研发低成本、高效的捕集技术是全球科研人员的工作重点。CO₂ 捕集技术有燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧、化学链燃烧等 4 种技术路线,不同技术路线下又有吸收法、吸附法、膜捕集法等技术方法。通过梳理分析发现,不同的 CO₂ 捕集技术路线和方法均各有优缺点,未能有一种技术方法能独立实现高效、低成本、低能耗和大规模的捕集目标。未来若要开发高效、低能耗、低成本的 CO₂ 捕集技术,需重点针对技术存在的难题与挑战进行研发攻关,突破技术瓶颈,构建新型高效、低成本的捕集技术,推动 CO₂ 捕集实现经济、高效、规模化发展。

表 8 iG-CLC 应用情况

Tab. 8 Application of iG-CLC

国家/地区	燃料类型	装置规模	载氧体	试验阶段	实施机构	实施时间
美国	煤	3 MW	CaSO ₄	半工业化	美国阿尔斯通电力公司 ^[88]	2011 年
西班牙	煤	50 KW	铁矿石	小试	西班牙国家研究院 ^[84]	2012 年
国外	煤、生物质、冶金焦	25 KW	Fe ₂ O ₃	小试	美国俄亥俄州立大学 ^[89]	2012 年
德国	煤、生物质	1 MW	钛铁矿和铁矿石	半工业化	德国达姆施塔特工业大学 ^[90]	2012 年
瑞典	生物质	4 MW	钛铁矿和锰矿石	半工业化	瑞典查尔莫斯大学 ^[85]	2016 年
国内	煤、石油焦	10 KW	镍基载氧体	实验室试验	东南大学 ^[91]	2012 年
广州	生物质	10 KW	Fe ₂ O ₃ 和铁镍氧化物	实验室试验	中国科学院广州能源研究所 ^[92]	2014 年
武汉	煤	50 KW	铁矿石	实验室试验	华中科技大学 ^[93]	2016 年

表9 不同CO₂捕集技术比较Tab.9 Comparison of Different Types of CO₂ Capture Technologies

技术类别	技术方法	具体代表	技术特征		应用阶段
			优点	缺点	
燃烧前捕集	溶液吸收法	物理溶液吸收法	无腐蚀、捕集能耗低	对气源压力要求较高	商业应用
		化学溶液吸收法	捕集容量大、选择性高、工艺简单,对气压条件要求不高	再生能耗高、腐蚀性强	商业应用
	固体吸附法	PSA 技术	易操作、无吸附剂损失、无废气废水废液排放、环境影响小	易受捕集气源条件影响,捕集潜力有限	商业应用
	膜分离法	—	节能、高效、环保	捕集成本较高	实验室研究
	低温分馏法	—	高浓度 CO ₂ 驱采出气捕集经济性较好、成本较低	工艺流程复杂、分离设备多、压缩液化能耗高	工业示范
燃烧后捕集	化学溶液吸收法	—	CO ₂ 捕集率高、捕集纯度高、烟气适应性较好	吸收剂再生能耗较高、吸收剂损耗较大、运行成本较高	商业应用
	化学吸附法	—	无需溶剂,工艺过程简单、无设备腐蚀、节能降耗明显	捕集成本较高	中试
	物理吸附法	PSA、TSA 和 PTSA 等,主要以 PSA 为主	工艺简单、自动化程度高、捕集纯度高	吸附剂性能不够经济、高效	商业应用
	膜分离法	—	能耗低、无溶剂挥发、占地面积小	放大试验效果不理想	工业示范
富氧燃烧	常压富氧燃烧(AOC)	—	捕集能耗低,改造难度和成本低,NO _x 污染物少	附加投资成本高、单体规模小、易富集 SO ₂ 等酸性气体	部分国家/地区商业应用
	增压富氧燃烧(POC)	—			实验室基础研究
化学链燃烧	原位气化化学链燃烧	—	不会富集 SO ₂ 、SO ₃ 等腐蚀性气体,不容易引起设备与管道腐蚀,也不容易发生燃烧不稳定,炉膛整体熄火等故障	反应装置放大比较困难	半工业化试验
	氧解耦化学链燃烧	—			

参考文献

- [1] 刘书群,王龙龙,刘理华. 二氧化碳捕集技术研究进展[J]. 广州化工,2014,42(2):10-12.
- [2] MACDOWELL N, FENNEL P S, SHAH N, et al. The Role of CO₂ Capture and Utilization in Mitigating Climate Change [J]. Nature Climate Change, 2017,7(4):243-249.
- [3] 中国矿业报. 高端访谈 | 李阳:CCUS技术在“双碳”进程中的地位与作用[EB/OL]. (2022-03-03) [2022-08-10]. https://www.sohu.com/a/526924039_121123856
- [4] METZ B, DAVIDSON O, CONINCK H D, et al. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [J]. Economics & Politics of Climate Change, 2005.
- [5] 蔡博峰,李琦,张贤,等. 中国二氧化碳捕集、利用和封存(CCUS)年度报告(2021)[R]. 北京:生态环境部环境规划研究院,2021.
- [6] 樊强,许世森,刘沅,等. 基于IGCC的燃烧前CO₂捕集技术应用与示范[J]. 中国电力,2017,50(5):163-167,184.
- [7] 赵志强,张贺,焦畅,等. 全球CCUS技术和应用

- 现状分析[J]. 现代化工,2021,41(4):5-10.
- [8] MIKKELSEN M, JRGENSEN M, KREBS F C. The Teraton Challenge. A Review of Fixation and Transformation of Carbon Dioxide [J]. *Energy & Environmental Science*,2010,3.
- [9] MARKKEWITZ P, KUCKSHINRICHS W, LEITNER W, et al. Worldwide Innovations in the Development of Carbon Capture Technologies and the Utilization of CO₂ [J]. *Energy & environmental science*,2012(6).
- [10] BUHRE B J P, ELLIOTT L K, SHENG C D, et al. Oxy-fuel Combustion Technology for Coal-fired Power Generation [J]. *Progress in energy and combustion science*,2005(4):31.
- [11] TOFTEGAARD M B, BRIX J, JENSEN P A, et al. Oxy-fuel Combustion of Solid Fuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*,2010,36(5): 581-625.
- [12] 刘飞,关键,祁志福,等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(7):1-13.
- [13] 桂霞,王陈魏,云志,等. 燃烧前CO₂捕集技术研究进展[J]. 化工进展,2014,33(7):1895-1901.
- [14] 黄晶. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告[M]. 北京:科学出版社,2021:38-75.
- [15] 李蒙. 以低温甲醇与聚醇醚为溶剂的工业气净化工艺对比[J]. 能源化工,2016,37(5):71-76.
- [16] 童武元. NHD与低温甲醇洗净化工艺的比较与选择[J]. 化肥工业,2005(3):38-40.
- [17] 李新春,孙永斌. 二氧化碳捕集现状和展望[J]. 能源技术经济,2010,22(4):21-26.
- [18] LI Zhenshan, CAI Ningsheng, CROISSET E. Process Analysis of CO₂ Capture from Flue Gas Using Carbonation/Calcination Cycles [J]. *AIChE Journal*,2008,54(7):1912-1925.
- [19] EDWARD S. Summary of the IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [C]. Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), Japan,2006.
- [20] 郑晓鹏. 海上天然气田伴生CO₂的海上捕集及回注技术[C]. 2007年度海洋工程学术会议论文集. 2007:309-314.
- [21] 华北电力设计院有限公司. 全球碳捕集与封存(CCS)现状[EB/OL]. (2016-12-01) [2022-08-29]. https://mp.weixin.qq.com/s?src=3×tamp=1667815658&ver=1&signature=io9cAmu7T0sste1BuwhIH3jm4xG6in89q-mAGJo1wBV7I7kt5iuMkMpIR7QLZk8v1GG-gJ81UQRIWw1w2lhg63gwcKj0npJ3x8ez-Mwam2vtSx4Zj*HK-K-9mAfPepVMU7JM3yM92KWYX7JBemt6lCNAHZGYXbDvDnRBuYE1kDGg=.
- [22] Garrett Palmquist, Kassie Chanda, John Horne. 孟莫克SULFOX~技术在德克萨斯州清洁能源项目上的应用[C]. 第九届全国有色金属工业冶炼烟气治理专利技术推广及三废无害化处置研发技术研讨会论文集. 2012:51-54.
- [23] HERZOG H. Lessons Learned from CCS Demonstration and Large Pilot Projects [R]. Massachusetts:MIT Energy Initiative,2016.
- [24] Chevron Australia. Anonym. Gorgon Project-an Australian Icon [EB/OL]. [2022-09-17]. <https://australia.chevron.com/our-businesses/gorgon-project/>.
- [25] 柳康,许世森,李广宇,等. 基于整体煤气化联合循环的燃烧前CO₂捕集工艺及系统分析[J]. 化工进展,2018,37(12):4897-4907.
- [26] 道客巴巴. 克拉玛依石化甲醇厂PSA弛放气10万吨/年二氧化碳捕集项目开工[EB/OL]. (2016-04-16) [2022-09-17]. <https://www.doc88.com/p-7985217983180.html>.
- [27] 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.

- [28] WIHEEB A D, HELWANI Z, KIM, J, et al. Pressure Swing Adsorption Technologies for Carbon Dioxide Capture [J]. Separation and Purification Reviews, 2016, 45(2):150806072547005.
- [29] SUBRAVETIS 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.
- [30] 官知义. ICI (英帝国化学公司)开发AMV合成氨新流程[J]. 化肥工业, 1986(4):41-45.
- [31] TAO L, XIAO P, QADER A, et al. CO₂ Capture from High Concentration CO₂ Natural Gas by Pressure Swing Adsorption at the CO₂CRC Otway Site, Australia [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 83:1-10.
- [32] JEFFREY R, BARTELS A, MICHAEL B P B, et al. . An Economic Survey of Hydrogen Production from Conventional and Alternative Energy Sources [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(16):8371-8384.
- [33] 王田军, 李军, 崔凤霞, 等. 二氧化碳捕集低温吸附剂研究进展[J]. 精细石油化工, 2015, 32(4):70-76.
- [34] 周德彪. EOR采出气CO₂分离工艺模拟研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2014.
- [35] 彭一宪. 精馏与低温提馏耦合——一种油田二氧化碳驱产气回收新工艺[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(3):42-47.
- [36] 侯强. 二氧化碳驱伴生气分离技术综述[J]. 广东化工, 2014, 41(6):112-113, 108.
- [37] VALENCIA J A, DENTON R, NORTHROP P, et al. Controlled Freeze Zone Technology for the Commercialisation of Australian High CO₂ Natural Gas [C]. Spe Asia Pacific Oil & Gas Conference & Exhibition. Australia, 2014:1-10.
- [38] BOOT-HANDFORD M, ABANADES J, ANTHONY E, et al. Carbon Capture and Storage Update [J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(1):130-189.
- [39] 方梦祥, 周旭萍, 王涛, 等. CO₂ 化学吸收剂[J]. 化学进展, 2015, 27(12):1808-1814.
- [40] ZENG Shaojuan, ZHANG Xianping, BAI Lu, et al. Ionic-liquid-based CO₂ Capture Systems: Structure, Interaction and Process [J]. Chemical Reviews, 2017.
- [41] 汪明喜, 方梦祥, 汪桢, 等. 相变吸收剂对CO₂吸收与再生特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(4):662-668.
- [42] COUSINS A, COTTRELL A, LAWSON A, et al. Model Verification and Evaluation of the Rich-split Process Modification at an Australian-based Post Combustion CO₂ Capture Pilot Plant [J]. Greenhouse Gases-Science and Technology, 2012, 2(5):329-345.
- [43] 中国大气网. 全球首个大型燃煤电厂烟气碳捕集项目[EB/OL]. (2021-08-16) [2022-10-11]. https://mp.weixin.qq.com/s?src=11×tamp=1667873595&ver=4153&signature=2nVTMp1lmiPVdFV3PGpU1kdvbi17p6k6cwpzuC*QzL7cpENO9F400kYb6SEpngjPyt*KBCwr4kxpcSfmWEIc2bb3JAqAUjjEw8HzgJjNVAh6T1Ms34sSPnZhrAB9uy&new=1.
- [44] MANTRIPRAGADA H, ZHAI H, RUBIN E S. Boundary Dam or Petra Nova-Which Is a Better Model for CCS Energy Supply? [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2019, 82:59-68.
- [45] Nrg. Petra Nova Status Update [EB/OL]. (2020-08-26) [2022-11-02]. <https://www.nrg.com/about/newsroom/2020/petranova-status-update.html>.
- [46] 道客巴巴. Peterhead电厂的碳捕获项目[EB/OL]. (2016-04-14) [2022-11-02]. <https://www.doc88.com/p-8788931670939.html>.
- [47] 科学技术部社会发展科技司, 科学技术部国际合作司, 中国 21 世纪议程管理中心. 中国碳捕集、利用与封存(CCUS)技术进展报告[R].

- 北京:科学技术部社会发展科技司,科学技术部国际合作司,中国21世纪议程管理中心,2011.
- [48] 神木市人民政府. 第九十一期 国华锦能CO₂捕集封存示范项目成行业标杆[EB/OL]. (2022-03-25) [2022-11-02]. <http://www.sxsm.gov.cn/xwzx/zwx/36105.htm>.
- [49] 岳晨午,冯坚,姜勇刚,等. 低浓度CO₂吸附材料研究现状[J]. 材料导报,2013,27(23):18-22.
- [50] 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.
- [51] 温嵩,韩伟,车春霞,等. 燃烧后二氧化碳捕集技术与应用进展[J]. 精细化工,2022,39(8):1584-1595,1632.
- [52] ABANADES J C, ARIAS B, LYNDFELT A, et al. Emerging CO₂ Capture Systems [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2015,40:126-166.
- [53] SJOSTROM S, SENIOR C. Pilot Testing of CO₂ Capture from a Coal-fired Power Plant-Part 2:Results from 1-MWe Pilot Tests [J]. Clean Energy,2020,4(1):12-25.
- [54] PARK Y C, JO S-H, KYUNG D-H, et al. Test Operation Results of the 10 MWe-scale Dry-sorbent CO₂ Capture Process Integrated with a Real Coal-fired Power Plant in Korea [J]. ENERGY PROCED,2014,63:2261-2265.
- [55] KREMER J, GALLOY A, STRÖHLE J, EPPLE B. Continuous CO₂ Capture in a 1-MWth Carbonate Looping Pilot Plant [J]. Chemical Engineering Technology,2013,36(9):1518-1524.
- [56] 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]. Melbourne: [s. n.],2018:1-6.
- [57] FAN F, LI Zhenshan, CAI N S. Continuous CO₂ Capture from Flue Gases Using a Dual Fluidized Bed Reactor with Calcium-based Sorbent [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2009,48(24):11140-11147.
- [58] WU Ye, CHEN Xiaoping, DONG Wei, et al. K₂CO₃/Al₂O₃ for Capturing CO₂ in Flue Gas from Power Plants. Part 5:Carbonation and Failure Behavior of K₂CO₃/Al₂O₃ in the Continuous CO₂ Sorption-Desorption System [J]. Energy & Fuels,2013,27(8):4804-4809.
- [59] XU Xiaochun, SONG Chunshan, MILLER B G, et al. Adsorption Separation of Carbon Dioxide from Flue Gas of Natural Gas-fired Red Boiler by a Novel Nanoporous “Molecular Basket” Adsorbent [J]. Flue Processing Technology,2005,86(14-15):1457-1472.
- [60] 王海文,朱锴锴,张俊杰,等. 燃煤烟气CO₂捕集技术的发展与应用[J]. 环境保护前沿,2016,6(2):22-28.
- [61] AGARWAL A, BIEGLER L T, ZITNEY S E. A Superstructure-based Optimal Synthesis of PSA Cycles for Post-combustion CO₂ Capture [J]. AIChE Journal,2010,56(7).
- [62] 黄家鹄,王斌,雍思昊,等. 热钾碱法与变压吸附法脱碳工艺比较[J]. 氮肥技术,2015,36(5):10-12,20.
- [63] 张国亮,邓华林,黄岚. 水泥窑尾烟气CO₂变压吸附技术工程化应用和探索[J]. 中国水泥,2016(8):81-83.
- [64] 毛薛刚,张玉迅,周洪富,等. 变压吸附技术在合成氨厂的应用[J]. 低温与特气,2007(5):39-43.
- [65] ISHIBASHI M, OTA H, KUSU N A, et al. 1996. Technology for Removing Carbon Dioxide from Power Plant Flue Gas by the Physical Adsorption Method [J]. Energy Conversion&Management,37:6-8.
- [66] CHO S, PARK J H, BEUM H T, et al. A 2-stage

- PSA Process for the Recovery of CO₂ From Flue Gas and Its Power Consumption [J]. *Studies in Surface Science & Catalysis*, 2004, 153(4):405-410.
- [67] YI C, JO S H, SEO Y, et al. Continuous Operation of the Potassium-based Dry Sorbent CO₂ Capture Process with Two Fluidized-bed Reactors [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2007, 1(1):31-36.
- [68] WANG Lu, YANG Ying, SHEN Wenlong, et al. CO₂ Capture from Flue Gas in An Existing Coal-Fired Power Plant by Two Successive Pilot-Scale VPSA Units [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(23):7947-7955.
- [69] 吉立鹏, 张丙龙, 曾卫民. 基于石灰窑回收CO₂用于炼钢的关键技术分析[J]. *中国冶金*, 2019, 29(3):49-52.
- [70] 曹映玉, 杨恩翠, 王文举. 二氧化碳膜分离技术[J]. *精细石油化工*, 2015, 32(1):53-60.
- [71] 郭智, 张新妙, 章晨林, 等. 膜分离法分离烟气中CO₂材料及应用研究进展[J]. *现代化工*, 2016, 36(6):42-45, 47.
- [72] DENG L, KIM T, HAGG M. Facilitated Transport of CO₂ in Novel PVAm/PVA Blend Membrane [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, 340(1/2):154-163.
- [73] MAJUMDAR A, DEUTCH J. Research Opportunities for CO₂ Utilization and Negative Emissions at the Gigatonne Scale [J]. *Joule*, 2018, 2(5):805-809.
- [74] WHITE L, WEI X, PANDE S, et al. Extended Flue Gas Trials with a Membrane-based Pilot Plant at a One-ton-per-day Carbon Capture Rate [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 496:48-57.
- [75] POHLMANN J, BRAM M, WILKNER K, et al. Pilot Scale Separation of CO₂ from Power Plant Flue Gases by Membrane Technology [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 53:56-64.
- [76] WU Hongyu, LI Qinghua, SHENG Menglong, et al. Membrane Technology for CO₂ Capture: From Pilot-scale Investigation of Two-stage Plant to Actual System Design [J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, 624:119137.
- [77] CHEN Lei, YONG S Z, GHONIEM A F. Oxy-fuel Combustion of Pulverized Coal: Characterization, Fundamentals, Stabilization and CFD Modeling [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2012, 38(2):156-214.
- [78] ZHENG Chuguang, LIU Zhaohui, XIANG Jun, et al. Fundamental and Technical Challenges for a Compatible Design Scheme of Oxyfuel Combustion [J]. *Engineering*, 2015, 1(1):139-149.
- [79] ROHAN S, TERRY W, MANOJ P, et al. Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture in Power Plants [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40:55-125.
- [80] WALL T, STANGER R, SANTOS S. Demonstrations of Coal-fired Oxy-fuel Technology for Carbon Capture and Storage and Issues with Commercial Deployment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(S1):S5-S15.
- [81] 郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(23):3856-3864.
- [82] STANGER R, WALL T SPORL, et al. Oxyfuel Combustion for CO₂ Capture in Power Plants [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40:55-125.
- [83] Carbon Capture Journal Group. Accelerating Breakthrough Innovation in CCUS-mission Innovation Report [J]. *Carbon capture journal*, 2018(TN. 66).
- [84] ADANEZ J, ABAD A, MENDIARA T, et al. Chemical Looping Combustion of Solid Fuels [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, 65.

- [85] FAN Junming, ZHU Lin, HONG Hui, et al. A Thermodynamic and Environmental Performance of In-situ Gasification of Chemical Looping Combustion for Power Generation Using Ilmenite with Different Coals and Comparison with Other Coal-driven Power Technologies for CO₂ Capture [J]. *Energy*, 2017, 119:1171-1180.
- [86] SIENGCHUM T, VELAZQUEZ-VARGAS L G, DEVAULT D J, et al. Techno-economic Analysis of Coal-Direct Chemical Looping for power production [C]. 31st Annual International Pittsburgh Coal Conference: Coal-Energy. Environment and Sustainable Development, PCC 2014. Pittsburgh International Pittsburgh Coal Conference, 2014:1.
- [87] GAO Wanlin, LIANG Shuyu, WANG Ruijie, et al. Industrial Carbon Dioxide Capture and Utilization: State of the Art and Future challenges [J]. *Chemical Society Review* 2020, 49:8584-8686
- [88] ABDULALLY I, ANDRUS H E, EDBERG C, et al. Alstom's Chemical Looping Combustion Prototype for CO₂ Capture from Existing Pulverized Coal Fired Power Plants [R]. Windsor, CT, USA: Alstom Power Inc, 2012.
- [89] TONG A, BAYHAM S, KATHE M V, et al. Iron-based Syngas Chemical Looping Process and Coal-direct Chemical Looping Process Development at Ohio State University [J]. *Applied Energy*, 2014, 113:1836-1845.
- [90] STROHLE J, ORTH M, EPPLE B. Design and Operation of a 1 MWth Chemical Looping Plant [J]. *Applied Energy*, 2014, 113:1490-1495.
- [91] WANG Xiaojia, JIN Baosheng, ZHU Xiaoming, et al. Experimental Evaluation of a Novel 20 kWth in Situ Gasification Chemical Looping Combustion Unit with an Iron Ore as the Oxygen Carrier [J]. *Industrial Engineering & Chemistry Research*, 2016, 55(45):11775-11784.
- [92] 刘帅, 黄振, 何方, 等. NiFe₂O₄ 为载氧体的生物质半焦化学链燃烧热力学模拟研究 [J]. *新能源进展*, 2016, 4(3):172-178.
- [93] MA Jinchen, TIAN Xin, WANG Chaoquan, et al. Performance of a 50 kWth Coal-fuelled Chemical Looping Combustor [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 75:98-106.

作者贡献说明

唐 强: 撰写文章初稿, 修改定稿;

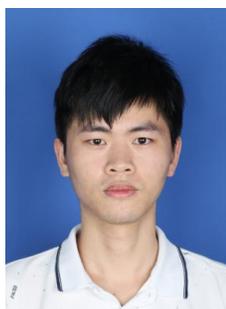
李金惠: 提供研究思路, 指导论文修改;

邹建伟: 搜集资料, 撰写论文引言部分;

胡员员: 搜集外文资料, 并负责相关资料翻译;

黄 何: 设计文章框架, 提出修改意见。

作者简介



唐 强: 助理研究员; 主要研究方向: 低碳科技管理、科技政策。



黄 何: 政策法规部部长, 研究员; 主要研究方向: 低碳科技战略、能源规划、科技政策与管理。