

燃烧后 CO₂ 捕集技术与工程进展

陆诗建*, 黄凤敏, 李清方, 张 建

(中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘要:当前主流 CO₂ 捕集技术有3种,分别是燃烧后、燃烧前和富氧燃烧 CO₂ 捕集技术。本文主要介绍了燃烧后脱碳技术的工艺流程以及优缺点,总结了国内外典型 CO₂ 捕集项目及其进展情况,最后结合目前 CO₂ 捕集发展状况提出了未来碳捕集技术发展建议。

关键词:燃烧后; CO₂ 捕集; CCS; 工艺流程; 工程进展

中图分类号: TQ413

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)06-0048-05

Advances in technology and project of post-combustion CO₂ capture

LU Shi-jian*, HUANG Feng-min, LI Qing-fang, ZHANG Jian

(Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026, China)

Abstract: There are three kinds of CO₂ capture method at present, including before burning decarburization, post-combustion decarburization and oxygen-enriched combustion technologies. The process of post-combustion decarburization technology as well as its advantages and disadvantages are introduced. The typical CO₂ capture projects and their progress at home and abroad are summarized. Some suggestions about the development of CO₂ capture are given at last.

Key words: post-combustion; CO₂ capture; CCS; technology process; project progress

联合国政府间气候变化专业委员会(IPCC)的第五次报告数据显示,由于人为因素导致的 CO₂ 等温室气体的排放量急剧增多,近130年来全球的平均气温上升了0.85℃左右。控制 CO₂ 的排放量,对排放的 CO₂ 进行回收、封存和资源化再利用已成为世界各国关注的焦点。日前联合国气候变化专业委员会(IPCC)已将燃煤电厂 CO₂ 捕集和封存(CCS)作为2050年温室气体减排最重要的技术方向。一方面,由于中国以煤为主的能源结构状况将会长期存在,以煤电为主的能源主格局在短期内难以发生重大改变;另一方面,中国煤电发展技术已经接近国际先进水平,节能减排空间较小^[1]。如果单独依靠调整电力结构和提高能效的方式降低 CO₂ 排放空间十分有限,不能从根本上实现国家提出的 CO₂ 减排目标。因此 CCS/CCUS 技术成为中国 CO₂ 减排的战略选择。

1 技术路线

1.1 技术简介

燃烧后脱碳技术是指从工业生产中尤其是化石能源燃烧排放的烟道气中分离、收集 CO₂, 并对其进行净化和压缩,目前该技术主要应用于大量排放 CO₂ 的燃煤热电厂、石化天然气处理厂、合成燃料

厂等。

燃烧脱碳技术一般有吸收法、物理吸附法、膜分离法、低温蒸馏法等,现主要侧重于化学吸收法(主要为醇胺法)、膜分离法以及低温蒸馏法。目前最成熟的工艺是化学溶剂吸收/再生法回收 CO₂, 已经在天然气处理、氢气和氨气生产等工业领域使用很多年,有很强的适用性和巨大的发展潜力。

醇胺法是指以气体净化的化学溶剂胺吸收法工艺为基础,选用合适的化学溶剂,对烟道排气管的末端冷却后的混合废气进行吸收处理,胺与二氧化碳发生化学反应,形成一种含 CO₂ 的介稳物^[2], 然后对溶剂加热,将 CO₂ 从溶剂中分离出来,从而达到捕集 CO₂ 的目的,而溶剂可实现循环再利用^[3]。对于化学吸收法的研究,目前最关键的部分是如何选取在吸收速率、再生能耗、吸收剂损失、容器腐蚀严重等方面都表现良好的吸收剂。

1.2 燃烧后捕集工艺优缺点

燃烧后捕集技术相对于其他碳捕集方式来说,具有烟气排放体积大、排放压力低、CO₂ 的分压小^[4]等特点,因而其脱碳能耗高、出口温度高、设备腐蚀严重^[5]、设备投资和运行成本高^[6]。但另一方面,燃烧后捕集工艺比较成熟^[7], 现役机组改造时对运行机组的改造量最小,适用于新建及已有电厂改造,

并且几乎可以用于任何燃煤电厂的改造和新电厂之中,所以,燃烧后 CO₂ 捕集技术将会是未来应用范围最为广泛的碳捕集技术。

1.3 工艺流程图

工艺流程比较成熟,煤首先在燃煤锅炉里燃烧,产生含有大量污染物(大部分为 N₂ 和 CO₂ 及部分 SO_x、NO_x 等)的烟气,从烟道排气道里出来的烟气再经过脱硫脱硝,CO₂ 经过吸收塔等设备脱除,余下的气体中几乎全为 N₂,可以直接排放到大气中,达到 CO₂ 减排的目的。工艺流程图如图 1 所示。

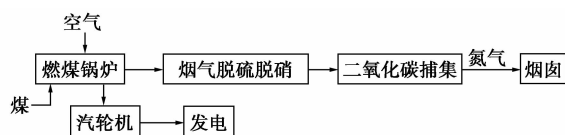


图 1 带 CO₂ 处理的常规燃煤电站 CCS 系统流程图示意图

2 世界大型 CCS/CCUS 工程进展

截至 2014 年 2 月^[8],全球 CCS/CCUS 项目有 12 个处于运行阶段,9 个处于建设阶段,其他 39 个

表 1 至 2014 年 2 月按资产生命周期和地区区分的大型一体化 CCS/CCUS 项目^[8]

| 地区 | 立项 | 评估 | 定义 | 建设 | 运行 |
|--------|----|----|----|----|----|
| 美国 | 0 | 4 | 6 | 2 | 7 |
| 欧洲 | 1 | 4 | 4 | 0 | 2 |
| 中国 | 6 | 2 | 4 | 0 | 0 |
| 加拿大 | 0 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| 澳大利亚 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| 中东 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 |
| 亚洲其他地区 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 南美 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 非洲 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

处于发展规划的不同阶段,其中的 6 个项目将在 2014 年做出最终投资决策。自 2011 年以来,处于运行或在建的 21 个项目增加了 50%,大大增加了 CCS 技术大规模应用的态势。全球总共 21 个大型 CCS 项目(处于运行和建设阶段的项目),每年捕集的 CO₂ 总量大约为 4 000 万 t。其中美国有 7 个 CCS/CCUS 项目处于运行阶段,2 个处于建设阶段;欧洲有 2 个 CCS 项目处于运行阶段;中国的大型 CCS/CCUS 项目尚处于定义阶段。如表 1 所示。

2.1 国内 CCS/CCUS 示范工程

近几年来,CCS 一直是国际领域应对气候变化的热点。结合本国实际,我国在 CCS 的基础上提出了 CCUS(二氧化碳的捕集、利用与封存技术)。随着我国的不断努力和实践,CCUS 逐渐成为国际社会的共识和行动,也对我国低碳发展具有越来越重要的战略意义。到目前为止,我国已经建成多个具有一定规模的 CO₂ 捕集工程示范项目,最具代表性的 CCS/CCUS 示范工程项目如下。

(1)中石化 4 万 t/a 烟气 CO₂ 捕集与驱油封存联用示范工程

2010 年胜利油田建设完成了 100 t/d 燃煤电厂烟气 CO₂ 捕集纯化示范装置,装置设计液态 CO₂ 产量为 100 t/d。该装置采用化学吸收工艺,将胜利电厂烟气中的 CO₂ 捕集、液化后输送至胜利油区用于 CO₂ 驱三次采油(EOR),这是世界上首套燃煤电厂 CO₂ 捕集与驱油联用的工业示范工程。开发的以 MEA 水溶液为主体的复合吸收剂,其降解率下降 90% 以上,CO₂ 吸收能力提高 30%,溶液对设备的腐蚀速率小于 0.1 mm/a。并且对 CO₂ 捕集纯化工艺及关键设备进行了优化,新工艺与传统工艺相比,能耗降低 35%,操作费用降低 30%,设备占地减少

(上接第 47 页)

- [23] Mamoru Ai. Effect of the composition of vanadium-titanium binary phosphate on catalytic performance in vapor-phase aldol condensation[J]. Applied Catalysis, 1989, 54(1): 29-36.
- [24] Richard Tanner, Philip Gill, Richard Wells, et al. Aldol condensation reactions of acetone and formaldehyde over vanadium phosphate catalysts; Comments on the acid-base properties[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2002, (4): 688-695.
- [25] 王太海. 醋酸甲酯合成丙烯酸的研究[J]. 天然气化工: C1 化学与化工, 1980, (4): 11-19.
- [26] 王科, 谭平华. 醋酸下游产品新技术进展[J]. 精细化工原料及中间体, 2012, (11): 3-6.
- [27] 谭平华, 熊国炎, 赖崇伟, 等. 醋酸/甲酯合成丙烯酸及其酯研究进展[J]. 广西轻工业, 2011, (12): 24-25.

- [28] 荆涛, 田景芝, 郑永杰, 等. Cs-Sb₂O₅/SiO₂ 催化剂用于合成丙烯酸甲酯[J]. 化学工程, 2010, 38(5): 83-86.
- [29] Feng Xinzhen, Sun Bo, Yao Yao, et al. Renewable production of acrylic acid and its derivative: New insights into the aldol condensation route over the vanadium phosphorus oxides[J]. Journal of Catalysis, 2014, 314: 132-141.
- [30] Yan Jianbiao, Zhang Chunlei, Ning Chunli, et al. Vapor phase condensation of methyl acetate with formaldehyde to preparing methyl acrylate over cesium supported SBA-15 catalyst[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, in press.
- [31] 陈星雨, 田甜. 新型丙烯酸类浆料性能研究进展[J]. 轻纺工业与技术, 2013, (6): 54-57.
- [32] 柳泉润, 范桂利, 仇鹏, 等. 浅谈零 VOC 丙烯酸酯涂料的研究进展[J]. 广东化工, 2014, 3(41): 83-84. ■

60%，实现了低压烟道气 CO₂ 高效、经济、安全捕集。该装置投产后实现了年减排 CO₂ 4 万 t，同时有效提高胜利油田 CO₂ 驱先导试验区采收率 10% 以上。

截至目前，累注液态 CO₂ 16 万 t 以上，累增油 4.3 万 t 以上，CO₂ 动态封存率大于 86%，取得了良好的环境效益及经济效益，该项目荣获 2012 年度中石化科技进步一等奖。

(2) 华能北京热电厂 3 000 t/d CO₂ 捕集系统示范工程

作为我国第一台工业级的燃煤电厂燃烧后 CO₂ 捕集装置^[9]，电厂装配了 SCR 脱硝系统、电除尘系统和湿法脱硫系统，该系统还设有精制系统，将脱碳系统后的 CO₂ 气体精制为食品级气体，储存于 CO₂ 储罐，主要由华能集团及其西安热工研究院组织设计完成。首先烟气经过预处理，经风机加压将烟气输送至吸收塔，烟气中的 CO₂ 在吸收塔与胺液反应生成氨基甲酸盐，并被富液泵输送至再生塔加热分解还原为胺和 CO₂，脱出 CO₂ 的贫胺溶液经过贫液泵输送返回吸收塔进行再次吸附，而 CO₂ 气体则经加压、除杂、提纯、液化等一系列的后续工艺，体积分数达到 99.9% 的食品级，试验流程如图 2 所示。

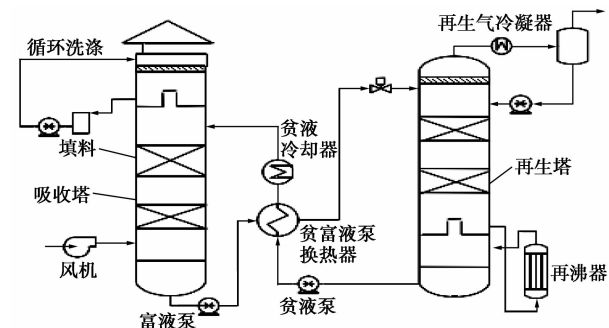


图 2 CO₂ 捕集实验流程图

系统设计正常处理约 2 400 m³/h 的烟道气量（湿基），回收 0.5 t/h 的 CO₂，系统在额定生产能力的 60% ~ 120% 范围内平稳运行，装置连续年操作时间为 6 000 h^[10]。系统经过 168 h 调试运行后，吸收塔出口 CO₂ 体积分数稳定在 2% ~ 3%，捕集效率稳定在 80% ~ 85%，捕集每吨 CO₂ 消耗蒸汽热 3.3 ~ 3.4 GJ，电耗约 100 kWh，捕集每吨 CO₂ 所需的消耗性费用约为 170 元。自 2008 年 7 月以来，CO₂ 捕集装置运行稳定，CO₂ 回收率大于 85%，分离提纯后的 CO₂ 体积分数达到 99.9%，日产最高达到 9 t，累计捕集 1 900 余吨 CO₂。

(3) 华能上海石洞口第二电厂 10 万 t/a CO₂ 捕

集示范项目

采用燃烧后捕集技术的化学吸收法，仍然沿用北京热电厂 CO₂ 捕集技术及模式，于 2009 年 12 月建成投运，年捕获 12 万 t CO₂。

碳捕集装置主要由烟气预处理系统、吸收再生系统、压缩制冷液化系统等部分组成。试验流程为：首先电厂锅炉烟气经过脱硝、除尘、脱硫等预处理，烟气中的 CO₂ 与复合胺溶液在吸收塔内反应，将 CO₂ 与烟气分离；其后吸收 CO₂ 后的复合胺溶液经过加热输送至再生塔分解再生输送至吸收塔顶；再生塔顶放出的 CO₂ 经过净化处理、压缩、液化等工序得到高纯度的液体 CO₂ 产品，之后再经过精制，最后得到体积分数为 99.9% 的标准食品级 CO₂ 产品。

(4) 神华集团 CCS 年捕集 10 万 t CO₂ 示范项目

该项目位于内蒙古鄂尔多斯，属于 2011 年国家科技支撑计划项目，于 2010 年 6 月开工建设，项目投资 2.1 亿元，2010 年 12 月，顺利中交，2011 年 1 月打通全流程，成功将超临界状态 CO₂ 注入 2 243.6 m 深的地层，预计在鄂尔多斯盆地封存的 CO₂ 可达几百亿吨^[11]。

(5) 延长石油煤化工 CCUS 项目

目前规模具有年捕获 50 万 t CO₂ 的能力^[12]，预计 2014—2020 年间，在现有 50 万 t 的 CO₂ 捕集基础上，建成 350 万 t 以上的煤化工 CO₂ 捕集装置，使捕集能力达到 400 万 t，建成多套创新型的煤化工装置，与单纯煤化工工艺相比，年减排 CO₂ 达 1 200 万 t 以上。

(6) 其他运行和拟建规划中的典型 CCS/CCUS 项目如表 2。

表 2 目前国内其他燃烧后捕集 CCS/CCUS 工业试点和示范工程

| 项目名称 | 规模/ (万 t·a ⁻¹) | 捕集及 利用类型 | 现状 |
|--|-------------------------------|---------------|--------------------|
| 中电投重庆双槐电厂 碳捕集示范项目 | 1 | 燃烧后捕集 | 2010 年投产 |
| 中石油 CCS 项目 | 2 | EOR | 2011 年投产 |
| 国电集团天津北塘热 电厂 | 2 | 燃烧后捕集 + 利用 | 2012 年投产 |
| 中石油吉林油田 CO ₂ - EOR 研究与示范 | 80 ~ 100 | CCS-EOR | 在建(预计 2015 年投产) |

(7) 近年来我国大力开展碳捕集国际间的项目

合作,已取得了不小的成就,现有中澳国际合作项目“先进能源系统中 CO₂ 捕获技术研究”及中澳“CO₂ 地质封存合作项目”、2007 年启动的中欧碳捕集与封存合作项目(COACH)、中英煤炭利用近零排放项目(NZEC)和中英 ZERO 项目^[13]。

2.2 国外 CCS/CCUS 示范工程

2.2.1 目前美国主要 CCS/CCUS 项目进展

(1)2010 年 3 月,美国能源部与美国电力服务公司(AEP)签署合作协议,启动 Mountaineer 商业化规模碳捕集与封存(CCS)项目,项目总投资约为 6.68 亿美元,是全球电力行业中第一个大型 CCS 项目,CO₂ 的排放量减少 90%,当完全运行时,每年可捕集 100 万 t CO₂。

(2)位于美国德克萨斯州的一个捕集 CO₂ 量每年达 100 万 t 的 CCS 项目已于 2013 年 1 月竣工,将捕集的 CO₂ 运至 Denbury,用于 EOR 作业。

(3)美国在 Salt Creek 油田注入 CO₂ 始于 2004 年,目前 Salt Creek 提高石油采收率(EOR)项目的 18 个阶段中的 5 个已经完成,整个油田开发预定到 2023 年完工。它被视为美国最大的 EOR 项目之一。

(4)Century 工厂捕集的 CO₂ 正在被注入 Kinder Morgan 公司运营的管网,预计到完全运行时,CO₂ 总捕集能力可达 850 万 t/a。

(5)伊利诺斯州工业 CCS 项目将其设备与已有的 1 000 t/d CO₂ 的设备整合以实现总 CO₂ 注入能力达到 3 000 t/d 或大约 100 万 t/a。地面设施和 2 个监测井的建设已经完成,预计在 2015 年上半年运行。

2.2.2 世界其他国家(除美国)

正在运行的较有代表性的 CCS 工程项目包括挪威国家石油公司在北海的 Sleipner 项目、北非阿尔及利亚的 In Salah 项目和加拿大 Weyburn 项目。

Sleipner 油田项目由挪威国家石油公司(Statoil)负责运营,可以被称为是所有 CCS 示范性项目的鼻祖,自 1996 年采用醇胺法(MDEA)脱碳工艺,目前该项目每年封存 CO₂ 约 100 万 t^[14]。

2.3 新型燃烧后 CO₂ 捕集方法——冷冻氨工艺(CAP)及工程

2.3.1 技术简介

CAP 工艺是由法国阿尔斯通公司为主开发的一种新型的燃烧后 CO₂ 捕集技术,工艺原理是利用碳酸铵和碳酸氢铵混合溶液作为循环溶剂,能实现 90% 的脱碳率,并可以有效脱除烟气中残留的 SO_x、

HF、PM_x 等^[15] 影响人们正常生活的污染物。经过实验探究,实验条件较缓和,适宜的操作温度范围为 0~20℃,最佳温度范围为 0~10℃^[16]。该法与目前工程上采用较多的燃烧后 CO₂ 捕集技术乙醇胺(MEA)法相比,具有吸收能力强、能耗低、成本低、不易降解等优点,具有很好的应用前景。

2.3.2 CAP 项目工程进展

阿尔斯通公司利用不断优化的冷氨、高级胺和富氧燃烧 3 种主要技术,共启动了 9 个 CCS 项目,部分项目已投入运行,部分项目仍在积极开发中,这些项目主要分布于欧洲和北美洲地区。

(1)阿尔斯通公司在瑞典 E-ON 公司的 Karlshamn 电厂和美国 We Energies 公司的 Pleasant Prairie 电厂建设 1 套每年捕集 1.5 万 t CO₂ 的中试装置^[17],2008 年完成调试。

(2)从 2007 年开始,阿尔斯通公司与美国电力服务公司(AEP)和挪威 Statoil 公司合作,在 Mountaineer 电厂和 Mongstad 炼油厂开始筹建每年捕集 10 万 t CO₂ 的商业示范装置^[18]。计划用实验验证 CAP 工艺能耗是否低于 MEA 工艺,反应剂性能是否稳定,氨逃逸率是否足够低,是否只需很低的补给率等。2011 年 5 月,美国 AEP 公司 Mountaineer 电厂的冷氨碳捕集与封存验证项目成功运行,该项目是世界上首个从燃煤电厂同时捕集并存储 CO₂ 的项目,标志冷冻氨技术在规模上比此前现场示范项目扩大了 10 倍

(3)依据阿尔斯通公司计划于 2011 年前在 AEP 公司所属的 Northeastern 电厂的 1 台 450 MW 机组上,建设 1 套相当于 200 MW 的 CO₂ 捕集装置,每年捕集 CO₂ 150 万 t,真正实现商业化运行。

(4)在 2008 年,阿尔斯通公司与加拿大 Trans Alta 公司签署协议^[19],计划 2012 年前在 Trans Alta 公司的 Alberta 电厂建设 1 套每年捕集 100 万 t CO₂ 的商业运行装置,计划于 2014 年底完成调试。

(5)欧洲 Mongstad/Norway CO₂ 技术中心项目建有总容量 10 万 t/d 的冷冻氨合成装置^[15]。Mongstad 技术中心采用冷冻氨工艺技术验证 CCS 技术的绩效和深化工业规模装置运营的技术经济诀窍,不过 Mongstad 技术中心全套 CCS 技术试验的决定已被多次延迟,预计最早在 2020 年进行。

3 关于我国 CCS/CCUS 发展的几点建议

结合目前发展现状,关于我国 CCS/CCUS 未来发展方向,总结提出以下几点建议。

(1)我国应抓住历史机遇,积极加强国际合作与交流。据不完全统计,我国开展和参与的国际 CCUS 合作项目已经超过 20 个。目前支持中国 CCUS 项目的国际援助主要来自欧盟、英国、亚洲发展银行、世界银行和全球 CCS 研究所。随着 CCUS 的大规模应用,经济技术数据和工程经验的不断积累,在经过初期的示范阶段之后,CCUS 产能规模每翻 1 番,成本有望下降 10% ~ 20%,这无疑为我国发展 CCUS 提供了良好的机遇。

(2)政府加大科研投入力度,提供资金技术保障,在现有的氧化碳减排示范系统基础上,努力建设国家级实验研究平台,培养一支核心的技术研发团队,走低成本、低能耗的科研道路,实现零排放的国家级目标。

(3)政府协调燃煤电站和石油化工行业之间的合作,处理好 CO₂ 捕集和石油增产之间的关系,加快 CO₂ 减排的步伐。

(4)我国陆地和海洋油气田相当丰富,要充分利用我国沉积盆地等地理优势,借助国家 973 项目、“863”计划以及海洋公益性项目等基础研究成果,跟踪和研究国外先进 CO₂ 地质储存关键技术,利用相关资源推进 CCUS 技术研发、工程示范和能力建设^[11]。

(5)加快制定 CCUS 相应的法律法规,应建立健全促进企业循环经济发展的相关配套制度。明确各职能部门具体职责和要求,项目审批等一系列的法规应尽快出台,制定相应的技术规范。未来 CO₂ 捕获技术遇到的最大的挑战可能是高成本封存的合法性,目前仍缺乏鼓励机制,尤其是缺乏鼓励开采者从增强油回收中采用 CO₂ 技术的相关政策^[20]。

4 结语

现已表明,CCS/CCUS 技术有足够的潜力实现燃煤电厂大规模减排的宏伟目标,碳捕集和利用技术虽然在燃煤电厂取得了长足的发展,然而目前仍然没有一种能大规模商业化运行的成熟技术方案,中国需要进一步加大对 CCS/CCUS 核心技术尤其是低能耗吸收剂的研发,在积极探索 CO₂ 减排的新途径的同时,着重提高 CO₂ 产品再利用的新价值,弥补 CO₂ 捕集的高成本;再者,中国要调整能源结构、优化产业管理,切实减少温室气体排放、加强保护和恢复生态植被才是节能减排、改善温室效应的最终办法。

参考文献

- [1] 林永明. 中国燃煤电厂 CO₂ 捕集技术开发及应用[J]. 广西电力, 2013, 36(3): 16 - 19, 27.
- [2] 艾莹莹, 张永春, 陈绍云. 二氧化碳回收与封存技术简介[C]. 2009 年二氧化碳减排控制技术与资源化利用研讨会论文集, 2010: 1 - 6.
- [3] 吴昊. 应对二氧化碳浓度上升问题的研究: CO₂ 的捕获、储存与利用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(8): 5 - 10.
- [4] 纪龙, 曾鸣. 燃煤电厂 CO₂ 捕集与利用技术综述[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 90 - 92.
- [5] 张东明, 杨晨, 周海滨. 二氧化碳捕集技术的最新研究进展[J]. 环境保护学, 2010, 36(5): 7 - 9, 35.
- [6] 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.
- [7] 晏水平, 方梦祥, 张卫风, 等. 烟气中 CO₂ 化学吸收法脱除技术分析与发展[J]. 化工进展, 2006, 25(9): 1018 - 1024.
- [8] Global CCS Institute. 全球碳捕集与封存现状[EB/OL]. [2014 - 02 - 17]. <http://cn.globalccsinstitute.com/publications>.
- [9] 黄斌, 许世森, 鄧时旺, 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.
- [10] Eimer D. Post-combustion CO₂ separation technology[C]. Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations-Result from the CO₂ Capture Project I, Netherlands, 2005: 91 - 97.
- [11] 张振冬, 杨正先, 张永华, 等. CO₂ 捕集与封存研究进展及其在我国的发展前景[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 456 - 459.
- [12] 延长石油煤化工 CCUS 一体化工作进展与规划[C]. 中国石油石化科技成果展示暨转化对接大会科技成果汇编, 2014: 94 - 99.
- [13] 赵雪, 芮久后, 王宇, 等. 探讨适合中国的 CO₂ 捕集技术[J]. 科技导报, 2010, 28(4): 97 - 100.
- [14] 于强. CO₂ 捕集与封存(CCS)技术现状与发展展望[J]. 能源与环境, 2010, (1): 64 - 65, 79.
- [15] 任德刚. 冷冻氨法捕集 CO₂ 技术及工程应用[J]. 电力建设, 2009, 30(11): 55 - 59.
- [16] Victor Darde, Kaj Thomsen, Willy J M, et al. Chilled ammonia process for CO₂ capture[A]. Greenhouse Gas Control Technologies 9, Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9), Energy Procedia[C]. 2009: 1035 - 1042.
- [17] Hilton R G. Chilled ammonia carbon capture process update[R]. Alstom Power Systems, 2009.
- [18] Robert Peltier. Alstom's chilled ammonia CO₂-capture process advances toward commercialization[J]. Power, 2008, 152(2): 38 - 41.
- [19] Press Centre. Teans Alta signs agreement with technology partner Alstom to develop carbon capture and storage project in Alberta [EB/OL]. [2013 - 03 - 01]. [Http://www.alstom.com](http://www.alstom.com).
- [20] 郭韵, 黄志强. 碳捕集与封存技术的发展前景与挑战[J]. 化工进展, 2012, 31(s1): 145 - 148. ■