



探讨适合中国的 CO₂ 捕集技术

赵雪^{1,2}, 芮久后¹, 王宇¹, 刘雅文¹

1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081

2. 马德里理工大学矿学院, 马德里 28003, 西班牙

摘要 论述了当前中国捕集 CO₂ 的必要性, 探讨了适合中国的 CO₂ 捕集技术。CO₂ 捕集技术主要分为燃烧前捕集、氧化燃料燃烧捕集、燃烧后捕集 3 类。由于中国短期内没有能力建设大规模的包含 CO₂ 捕集及储存系统的电厂, 重点探讨现有电厂的改进问题。很多国家开展了基于燃煤电厂 CO₂ 捕集技术研究, 并达到了中试实验水平。中国对于 CO₂ 捕集技术的研究始于 20 世纪 80 年代, 研究重点主要偏向于燃烧前及燃烧后, 忽略了氧化燃料燃烧问题。从国外对氧化燃料燃烧和燃烧后 CO₂ 捕集技术的对比研究看, 将一个普通的煤燃烧电厂更新改进成燃烧后捕集电厂所需资本大于改进成氧化燃料燃烧系统需要的资本, 而且更新后的氧化燃料燃烧系统运行与维修成本约为燃烧后捕集电厂的一半。氧化燃料燃烧 CO₂ 捕集技术投资和运营成本低, 且 CO₂ 捕集率高, 是适合中国现阶段国情的 CO₂ 捕集技术。

关键词 CO₂ 捕集技术; 燃煤电厂; CO₂ 捕集电厂

中图分类号 TQ519

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)04-0097-04

A Study on CO₂ Capture Technology in China

ZHAO Xue^{1,2}, RUI Jiuhou¹, WANG Yu¹, LIU Yawen¹

1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Polytechnic University of Madrid, School of Mine, Madrid 28003, Spain

Abstract The emission of CO₂ in China ranks top in the world. China has the responsibility to dedicate more effort in CO₂ capture technology. This paper studies the CO₂ capture technology in China. In China, pulverized coal plants are very common and there are no plans for new plants to be built with carbon dioxide capture and storage systems in a near future. This paper focuses on the retrofit of existing pulverized coal plants, which involves three main technologies, including pre-, post and oxy-fuel combustions for CO₂ capture, now still in the primary stage development as compared to other countries, especially European countries. The comparisons between different CO₂ capture technologies show that the oxy-fuel combustion technology performs better than other technologies both in technologic and economic evaluations. The total capital cost for retrofitting a conventional PC plant with CO₂, SO₂, NO_x and Hg removal equipment installations (post-combustion) is more than that of the Oxy-FGR modification. The total O&M cost of an Oxy-FGR retrofit is about half of that of the MEA retrofit. Oxy-fuel combustion technology is a better choice for existing pulverized coal plants.

Keywords CO₂ capture technology; coal-fired power plant; CO₂ capture power plant

0 引言

全球变暖是世界目前主要环境问题之一。中国 CO₂ 的排放量 2004 年达到 4.8Gt, 占全世界 CO₂ 排放量的 18%^[1], 2007 年已跃居世界第一。中国 CO₂ 排放点的构成见图 1^[2]。以化石燃料为主要能源的火电厂是 CO₂ 的一个集中排放源, 占 CO₂ 排放量的 30% 左右^[3-6]。中国现阶段仍以煤为主要能源, 存在

大规模的燃煤电厂。中国政府、工业界以及学术利益相关者一致认为短期内中国没有能力建设大规模的包含 CO₂ 捕集及储存系统的电厂^[7]。对现有燃煤电厂改进, 应用 CO₂ 捕集技术装置更新设备捕集 CO₂ 是目前降低 CO₂ 排放量的有效方法之一。

CO₂ 的捕集技术可分为 3 种主要类型: 燃烧后、氧化燃料

收稿日期: 2009-10-13

作者简介: 赵雪, 博士研究生, 研究方向为 CO₂ 捕集技术, 电子信箱: zhaoxue@bit.edu.cn

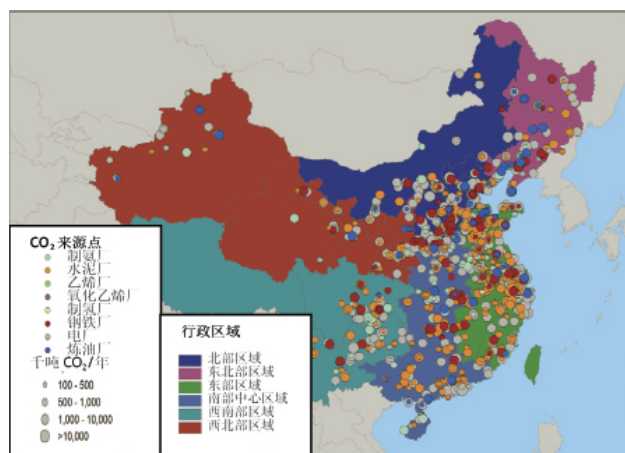
图 1 中国大型 CO₂ 排放点的类型、大小和管理区域

Fig. 1 Large CO₂ emission point sources as arranged by types, sizes, and administrative regions

燃烧、燃烧前。燃烧后捕集技术是在燃烧后的烟气中分离 CO_2 ，通过物理吸附或化学吸收等方法分离 CO_2 ，这种技术烟气体积大，排放压力低， CO_2 分压小，投资和运行成本相对较高^[8-12]；氧化燃料燃烧捕集技术是将化石燃料在纯氧或富氧中燃烧，烟道气中只含 CO_2 和蒸汽。将蒸汽冷凝，便只剩有 CO_2 ，能百分之百地分离 CO_2 。一般需要对燃烧后的烟道气重新回注燃烧炉，降低燃烧温度，提高 CO_2 的体积分数。这种技术需要专门的空气分离系统提供氧气^[13-16]；燃烧前捕集是将 CO_2 在化石燃料燃烧前分离出来，先将燃料气化生产成煤气，再将煤气重整，生产出 CO_2 和 H_2 ，分离出 CO_2 ，再燃烧 H_2 。集成气化组合循环技术 (Integrated Gasification Combined Cycle,

IGCC)就是将煤变成合成气的一项技术,是典型的燃烧前捕集 CO₂ 的技术^[17-21]。IGCC 技术投资和运行成本低,污染小,前景广阔,是未来电力行业发电技术的首选,但在中国的研究时间较短,仍处于初级阶段,相当长一段时间内不能普及。总体来看,对于现有的煤粉燃烧电厂,氧化燃料燃烧捕集和燃烧后捕集是两项及时的 CO₂ 捕集技术。氧化燃料燃烧捕集技术由于它的零污染特性更加受到重视。由于中国所做的关于 CO₂ 捕集技术的研究不全面,本文借用其他国家的研究成果和数据。

1 国外研究成果

许多国家都先后开展了基于煤粉燃烧电厂的系统研究,并且已经进行了中试等大规模的实验。美国液化空气公司联合 B&W 公司及其他公司共同研究分析了 1.5MW 更新煤燃烧炉的性能。研究采用了比较的方法,将有氧燃料燃烧捕集技术与燃烧后捕集技术相比较。结果表明,氧化燃料燃烧系统相比于燃烧后捕集系统,氮氧化物的排放量要降低 70%,废气中 CO_2 的含量从 15% 增加到 80%。锅炉中废气的含量降低约 70%。

项目的经济评估同样采取比较的方法,在4个不同的电厂中进行,其中包括普通燃烧系统、燃烧后捕集系统、湿法烟气回收氧化燃料燃烧系统、干法烟气回收氧化燃料燃烧系统。氧化燃料燃烧系统的总成本要比燃烧后捕集系统低约9%。更新的成本见表 1^[22]。

普通燃烧系统相对于燃烧后捕集系统,增加的装置包括去除 CO₂ 的乙醇胺去除过程装置;相对于氧化燃料燃烧系统,增加的装置有空气分离设备(ASU),去除的装置有选择性

表 1 两种更新电厂的经济分析

Table 1 Comparison for retrofit of power plants

	传统煤粉厂		氧化燃料燃烧(烟气再循环)过程	
	不清除 CO ₂	清除 CO ₂	湿法	干法
净产值/MWe	501	388	436	432
工厂成本/(美元·kWe ⁻¹)				
空气分离设备			261	283
甲基乙醇胺除碳设备		247		
活性碳注入法除汞设备	4	5	2	2
选择性催化还原除氮设备	60	78		
石灰喷雾干燥除硫设备	100	129	70	68
工厂成本总计	164	459	333	353
操作维护成本/(美分·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)				
空气分离设备			3.10	3.52
甲基乙醇胺除碳设备		7.21		
活性碳注入法除汞设备	1.06	1.37	0.48	0.44
选择性催化还原除氮设备	0.41	0.52		
石灰喷雾干燥除硫设备	1.23	1.59	0.97	0.96
操作维护成本总计	2.70	10.69	4.55	4.92

催化还原除氮设备(SCR)。将一个普通的煤燃烧电厂更新改进成燃烧后捕集电厂所需资本要增加约 295 美元/kWe,而改进成湿法烟气回收氧化燃料燃烧系统需 169 美元/kWe,干法烟气回收氧化燃料燃烧电厂需 188 美元/kWe。更新后的氧化燃料燃烧系统运行与维修成本约为燃烧后捕集电厂的一半^[2]。

法国的阿尔斯通公司联合美国鲁姆斯公司、电力公司、国家能源技术实验室、俄亥俄州煤炭研究室共同开展了基于美国烟煤电厂的 3 种 CO₂ 捕集技术可行性的研究。研究表明,氧化燃料燃烧使得锅炉效率提高,但工厂热效率随之降低。法国液化空气公司调查计算了煤粉燃烧炉产生烟道气污染控制技术的资本和运营成本,小规模(小于 200MW)的更新的氧化燃料燃烧电厂较普通电厂更加经济可行,全新的氧化燃料燃烧电厂所需的资本比更新的以及普通的电厂都低。

加拿大能源技术中心分析研究了基于典型的 400MW 煤粉燃料燃烧电厂的两种 CO₂ 捕集技术。一种是普通燃烧系统,以乙醇胺去除烟道气中 CO₂,即燃烧后捕集 CO₂ 的方法;另一种是氧化燃料燃烧系统。研究表明,氧化燃料燃烧系统的投资相比其他 CO₂ 捕集技术的投资更低。氧化燃料燃烧系统联合低温闪光单元能去除约 74% 的 CO₂,而空气燃料燃烧系统联合乙醇胺去除剂只能去除约 65% 的 CO₂^[23]。德国查莫斯大学曾研究了对于 865MW 褐煤电厂的更新改进。研究表明,氧化燃料燃烧和 CO₂ 回收系统降低了约 8% 的功率输出和效率,然而相对于整个系统而言,功率输出反而增高。氧化燃料燃烧电厂的投资总额也和普通电厂的投资相近。

2 国内研究概况

中国积极参与致力于二氧化碳捕集和贮存技术的国际间合作组织,其中包括碳封存领导人论坛(CSLF)、中欧二氧化碳捕集与贮存国际合作(COACH)、燃煤发电近零排放合作项目(NEZC)、亚太洁净发展与气候伙伴合作计划(APP)等。对于 CO₂ 捕集技术研究的重点偏向于燃烧前以及燃烧后,已经发展到中试规模。具体开展的项目有华能集团的“绿色煤电”项目^[24]、高碑店燃烧后捕集电厂项目等。而对于氧化燃料燃烧,中国只限于实验室规模的研究。煤燃烧国家重点实验室曾研究了基于两个传统的煤燃烧电厂更新的氧化燃料燃烧系统的经济可行性。研究表明,氧化燃料燃烧的用电成本要比普通燃烧电厂,甚至比普通燃烧电厂联合去硫、去氮装置的用电成本高出 1.5~1.7 倍。但是,如果二氧化碳的价格为 17~22 美元/t,氧化燃料燃烧系统的用电成本就和普通的燃烧系统几乎相同^[25]。

3 分析与讨论

从国外关于氧化燃料燃烧 CO₂ 捕集技术研究成果可以看出,氧化燃料燃烧电厂和普通燃烧电厂相比较,二氧化碳捕集模块降低了净电力效率,然而若与装有 CO₂ 捕集装置的燃烧后捕集电厂相比较,则氧化燃料燃烧电厂的效率,投资和运营资本低。氧化燃料燃烧电厂在经济和技术上都要优

于燃烧后捕集电厂,对于更新改进现有普通燃烧电厂是完全可行的。

从中国 CO₂ 捕集技术的发展来看,燃烧前捕集和燃烧后捕集技术似乎比氧化燃料燃烧捕集技术进展更快,但和欧洲国家相比,中国的技术尚不完善,只处于初级阶段。中国氧化燃料燃烧捕集技术发展不迅速有可能是由于对此项技术的陌生,认为投资成本过高,不适合中国的发展,但从各国的研究来看,此项技术投资成本、运营成本都相对较低,很适合中国国情。

4 结论

从目前能源利用上看,中国将在相当长一段时间持续把煤作为主要能源,煤粉电厂也会由于它的低消耗长时间被使用。利用 CO₂ 捕集与贮存技术将去除 CO₂ 的装置与现有普通燃烧电厂有效地结合起来是中国减少 CO₂ 排放量的有效途径。这与欧美国家的境况完全不同,发达国家的 IGCC 技术已经发展了几十年,相对比较成熟,而中国刚刚起步。需要找到一种适合中国现阶段国情的 CO₂ 捕集技术,及时控制 CO₂ 的排放量,同时积极研究发展 IGCC 等更加高端捕集技术,为将来更好地控制 CO₂ 的排放量做准备。经比较发现,将一个普通的煤燃烧电厂更新改进成燃烧后捕集电厂所需资本大于改进成氧化燃料燃烧系统需要的资本,而且更新后的氧化燃料燃烧系统运行与维修成本约为燃烧后捕集电厂的一半。氧化燃料燃烧系统投资运行成本低,又能够有效地控制 CO₂ 排放量。

参考文献 (references)

- [1] Quadrelli R, Peterson S. The energy-climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion [J]. *Energy Policy*, 2007, 35: 5938-5952.
- [2] Dahowski R T, Lib X, Davidson C L, et al. A preliminary cost curve assessment of carbon dioxide capture and storage potential in China[EB/OL]. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg&_imagekey=B984K-4W0SFYG-F4-1&_cdi=59073&_user=8029390&_orig=search&_coverDate=02%2F28%2F2009&_sk=999989998&view=cc&wchp=dGLbVtz-zSkWz&md5=e28357c0984506ffa72540ce6f7ae8a&ie=/sdarticle.pdf.
- [3] 毛玉如, 张永刚, 张国胜, 等. 火电厂 CO₂ 的排放控制和分离回收技术研究[J]. *锅炉制造*, 2003(1): 20-22.
Mao Yuru, Zhang Yonggang, Zhang Guosheng, et al. *Boiler Manufacturing*, 2003(1): 20-22.
- [4] 马一太, 魏东, 吕灿仁. 温室气体减排与 CO₂ 资源化宏观研究与探讨[J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41(S1): S9-S14.
Ma Yitai, Wei Dong, Lu Xianren. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(S1): S9-S14.
- [5] 裴克毅. 火力发电厂 CO₂ 减排技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学燃料工程研究所, 2005.
Pei Keyi. Harbin: Fuel Engineering Research Institute, Harbin Institute of Technology, 2005.
- [6] 张茂, 吴少华, 李振中. 火电厂 CO₂ 捕集及资源化技术[J]. *电站系统工*

- 程, 2007, 23(5):20-22
- Zhang Mao, Wu Shaohua, Li Zhenzhong. *Power System Engineering*, 2007, 23(5): 20-22
- [7] Liang X, Reiner D, Gibbins J, *et al.* Assessing the value of CO₂ capture ready in new-build coal-fired power plants in China[J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4363-4370.
- [8] 张辉, 刘应书, 刘文海, 等. 烟气中低浓度二氧化碳吸附捕集集中试验研究[J]. 低温与特气, 2009, 27(1): 9-13.
- Zhang Hui, Liu Yingshu, Liu Wenhai, *et al.* *Low Temperature and Specialty Gases*, 2009, 27(1): 9-13.
- [9] 晏水平, 方梦祥, 张卫风, 等. 烟气中 CO₂ 化学吸收法脱除技术与进展[J]. 化工进展, 2006, 25(9): 1018-1023.
- Yan Shuiping, Fang Mengxiang, Zhang Weifeng, *et al.* *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006, 25(9): 1018-1023.
- [10] 李雪松, 张密林. TEA 2DETA 混合胺水溶液吸收 CO₂ 的研究[J]. 应用科技, 2001, 28(6): 41-44.
- Li Xuesong, Zhang Milin. *Applied Science and Technology*, 2001, 28(6): 41-44.
- [11] Na B K, Lee H, Koo K K, *et al.* Effect of rinse and recycle methods on the pressure swing adsorption process to recover CO₂ from power plant flue gas using activated carbon [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2002, 41(22): 5498-5503.
- [12] Ishibashi M, Ota H, Akutsu N, *et al.* Technology for removing carbon dioxide from power plant flue gas by the physical adsorption method[J]. *Energy Conver Mgmt*, 1996, 37: 929-933.
- [13] 刘忠, 宋蕾, 姚强, 等. O₂/CO₂ 燃烧技术及其污染物生成与控制[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(1): 82-88.
- Liu Zhong, Song Qiang, Yao Qiang, *et al.* *Journal of North China Electric Power University*, 2007, 34(1): 82-88.
- [14] 王宏, 邱建荣, 郑楚光. 燃煤在 O₂/CO₂ 方式下 SO₂ 生成特性的研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(1): 100-102.
- Wang Hong, Qiu Jianrong, Zheng Chuguang. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2002, 30(1): 100-102.
- [15] 张礼知, 王宏, 张庆丰, 等. O₂/CO₂ 气氛下燃煤的钙基脱硫规律的实验研究[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(12): 508-512.
- Zhang Lizhi, Wang Hong, Zhang Qingfeng, *et al.* *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2000, 28(12): 508-512.
- [16] 毛玉如, 方梦祥, 骆仲浚. O₂/CO₂ 气氛下石灰石煅烧与硫化反应研究[J]. 燃料化学学报, 2004, 32(6): 323-328.
- Mao Yuru, Fang Mengxiang, Luo Zhongyang. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2004, 32(6): 323-328.
- [17] O'Brien K C, Krishnan G, Berchtold K A. Towards a pilot-scale membrane system for pre-combustion CO₂ separation[J]. *Energy Procedia*, 2009(1): 287-294.
- [18] Brandels L. The encap integrated project-development and validation of enhanced pre-combustion CO₂ capture technologies in the EU 6th framework programme [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Trondheim, Norway, 2006.
- [19] Ciferno J, Klara J, Wimer J. Outlook for carbon capture from pulverized coal and integrated gasification combined cycle power plants[C]//Sixth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, Pittsburgh, PA, 2007.
- [20] Marano J, Ciferno J P. Membrane selection and placement for optimal CO₂ capture from IGCC power plants [C]//Fifth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, Alexandria, Virginia, 2006.
- [21] Ciferno J, Marano J. Gas separation membrane R&D targets for CO₂ capture from IGCC power plants [C]//Seventh Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, Pittsburgh, PA, 2008.
- [22] Sangras R, Châtel-Pélage F, Pranda P. Oxycombustion process in pulverized coal-fired boilers: a promising technology for CO₂ capture[C]//The 29th International Conference on Coal Utilization and Fuel Systems, April 18-22, 2004, Clearwater, FL.
- [23] 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, 31(4): 283-307.
- [24] Liu Hengwei, Ni Weidou, Li Zheng, *et al.* Strategic thinking on IGCC development in China[J]. *Energy Policy*, 2008, 36: 1-11.
- [25] Xiong J, Zhao H, Zheng C, *et al.* An economic feasibility study of O₂/CO₂ recycle combustion technology based on existing coal-fired power plants in China[J]. *Fuel*, 2009, 88(6): 1135-1142.
- [26] 李雪静, 乔明. 二氧化碳捕获与封存技术进展及存在的问题分析[J]. 中外能源, 2008, 13(5): 104-107.
- Li Xuejing, Qiao Ming. *Sino-Global Energy*, 2008, 13(5): 104-107.
- [27] 陈晓进. 国外二氧化碳减排研究及对中国的启示 [J]. 国际技术经济研究, 2006, 9(3): 21-25.
- Chen Xiaojin. *Studies in International Technology and Economy*, 2006, 9(3): 21-25.
- [28] 张军, 李桂菊. 二氧化碳封存技术及研究现状 [J]. 能源与环境, 2007(2): 33-35.
- Zhang Jun, Li Guiju. *Energy and Environment*, 2007(2): 33-35.
- [29] 周锡堂, 樊栓狮. 二氧化碳收集利用与处置技术分析 [J]. 中外能源, 2006, 11: 10-14.
- Zhou Xitang, Fan Shuanshi. *China Foreign Energy*, 2006, 11: 10-14.
- [30] 费维扬, 艾宁, 陈健. 温室气体 CO₂ 的捕集和分离-分离技术面临的挑战与机遇[J]. 化工进展, 2005, 24(1): 1-3.
- Fei Weiyang, Ai Ning, Chen Jian. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2005, 24(1): 1-3.
- [31] 黄斌, 刘练波, 许世森. 二氧化碳的捕获和封存技术进展 [J]. 中国电力, 2007, 40(3): 14-17.
- Huang Bin, Liu Lianbo, Xu Shisen. *Electric Power*, 2007, 40(3): 14-17.

(责任编辑 陈广仁)

《科技导报》“学术争鸣”栏目征稿

科学研究需要争鸣和探索。《科技导报》设立“学术争鸣”栏目,旨在活跃学术气氛,开展学术讨论,促进学科的深入研究。本栏目欢迎对已发表的学术观点进行质疑,也欢迎广大作者对各个领域的科技问题进行开创性的学术探索。投稿网址:www.kjdb.org; 投稿信箱:kjdbbjb@cast.org.cn。