

综述与专论

燃煤电厂碳捕获与封存技术现状 及其应用前景展望

刘 洋

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘要:现阶段及未来相当一段时间内我国能源仍将以化石燃料作为主要能源,其中燃煤电厂是 CO₂ 的一个主要集中排放源。《巴黎气候变化协定》制定了全球应对气候变化的长期目标,我国政府也作出了实行能源消费总量和强度双控制度的承诺。降低燃煤电厂 CO₂ 排放已被视为中国完成 CO₂ 减排目标的关键领域。因此研究燃煤电厂 CO₂ 的捕获与封存技术及其应用前景,探讨 CO₂ 的资源化技术方向,对控制 CO₂ 的减排、保护大气环境具有十分重要的意义。

关键词:燃煤电厂 碳捕获与封存 资源化

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2017)03-0001-05

CURRENT STATUS OF CARBON CAPTURE AND STORAGE TECHNOLOGY IN COAL – FIRED POWER PLANTS AND ITS APPLICATION PROSPECTS

LIU Yang

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric
Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Fossil fuels are still the main energy sources in China at present and for a long time. Coal-fired power plants are a major source of CO₂ emission. "Paris Climate Change Agreement" has made a long-term climate change goals, Chinese government has made a total energy consumption and intensity of the two-control system commitment. Reducing CO₂ emissions from coal-fired power plants has been identified as a key area for China to achieve CO₂ reduction targets. Therefore, it is of great significance to study CO₂ capture and storage technology and its application prospect in coal-fired power plants and discuss the direction of CO₂ resource technology, which is of great significance to control CO₂ emission and protect the atmospheric environment.

Key words: Coal-fired power plant ; Carbon capture and storage; Resource utilization

2016 年 4 月 22 日中国在联合国正式签署了《巴黎气候变化协定》,2016 年 9 月 3 日批准了该协定。《巴黎气候变化协定》旨在控制主要由碳排

放而导致的气温升高,设立了将全球平均气温升幅控制在 2 °C 以内的长期目标,并为将气温升幅控制在 1.5 °C 以内而努力,对 2020 年后全球应对气候变化的行动作出了框架性安排。按照协定中国明确了 CO₂ 排放 2030 年左右达到峰值并努力尽早达峰等一系列行动目标,到 2030 年单位国

收稿日期:2016-9-26

作者简介:刘洋,男,1996 年 1 月生,湖北省武汉市人,硕士研究生,主要从事超净排放及洁净燃烧技术研究。

内生产总值 CO₂ 排放将比 2005 年下降 60 % 到 65 % 并将行动目标纳入国家整体发展议程。中国“十三五”规划纲要确定,未来五年单位国内生产总值 CO₂ 排放量下降 18 %,实行能源消费总量和强度双控制度,实施近零碳排放区示范工程,建设全国碳排放权交易市场,大幅增加森林碳汇,以兑现现在《巴黎气候变化协定》中所做的承诺。

燃煤电厂是 CO₂ 的一个主要集中排放源,目前全球燃煤产生的 CO₂ 是 90 亿吨/年,占 CO₂ 排放总量的 30 % 左右,大约占全球人类活动排放 CO₂ 的 24 %,而在中国这一比例高达 40 %,因此降低燃煤电厂碳排放已被视为中国完成碳减排目标的关键领域。而研究燃煤电厂 CO₂ 的捕获与储存以及 CO₂ 的资源化技术对于控制 CO₂ 的减排、保护大气环境具有十分重要的意义。

1 现有碳捕获和封存技术及其应用

碳捕获与封存 (Carbon capture and storage, CCS) 技术由捕获、运输和封存三个环节组成,即将 CO₂ 从工业或能源的源头分离出来,运输至合适的封存地点,注入地下并永久与大气隔绝的过程。

燃煤电厂 CO₂ 捕获技术路线分为燃烧前捕获、燃烧后捕获和富氧燃烧三种。目前,这些碳捕获技术可应用于燃煤电厂,但多采用燃烧前和燃烧后捕获技术,其 CO₂ 捕获率能到达 85~95 %。

1.1 燃烧前捕获技术及其应用

1.1.1 燃烧前捕获技术

燃烧前捕获是指利用煤气化技术将化石燃料转化为 CO 和 H₂ 的合成气,再通过水煤气变换反应将合成气中的 CO 气体转化为 CO₂ 和 H₂,然后将 CO₂ 分离出来。其系统主要有两个阶段的反应:首先化石燃料先同氧气或者蒸汽反应,产生以 CO 和 H₂ 为主的混合气体(称为合成气),其中与蒸汽的反应称为“蒸汽重整”,需在高温下进行;对于液体或气体燃料与 O₂ 的反应称为“部分氧化”,而对于固体燃料与氧的反应称为“气化”。待合成气冷却后,再经过蒸汽转化反应,使合成气中的 CO 转化为 CO₂,并产生更多的 H₂。最后,将 H₂ 从 CO₂ 与 H₂ 的混合气中分离,干燥的混合气中 CO₂ 的含量可达 15 %~60 %。CO₂ 从混合气体中分离并捕获和存储,H₂ 被用作燃气联合循环的燃料送入燃气轮机,进行燃气轮机与蒸汽轮机联合循环发电,这

一过程就是考虑碳的捕获和存储的煤气化联合循环发电(英文简称 IGCC)(图 1)。

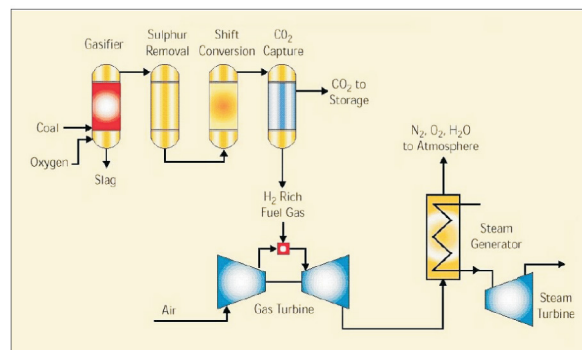


图 1 燃烧前碳捕获(IGCC)流程

IGCC 技术的发电效率显著提高,目前可达 43 %~45 %;污染物脱除率高、耗水少,污染物排放量仅为常规燃煤电厂的 10 %,脱硫率可达 99 %,NO_x 和耗水量分别只有常规电厂 10 %~20 % 和 1/2~1/3;有利于 CO₂ 减排,目前成熟工艺可分离 85 % 以上的 CO₂;可实现多联产和副产品的综合利用,如气化炉出来的煤气可用于合成胺、甲醇、二甲醚等化工产品。现阶段也存在一定的问题,如运行成本高、操作灵活性差,建设周期长,运行管理经验少等。

1.1.2 应用案例

1984 年美国在加州成功试运第一座 IGCC,2003 年美国提出了建立基于 IGCC 的燃烧前捕获的近零排放电站的“未来发电”计划,项目计划用 10 年时间,设计、建设并运行一套装机容量 275 MW、以煤为燃料、采用 CO₂ 存储技术、达到接近零排放的制氢和发电的位于伊利诺伊州示范电厂。欧盟提出了相似的 Hypogen 计划,项目计划建立一套 400 MW 的 IGCC 电站,利用变换将气化的合成气变换成 H₂ 和 CO₂,分离后的 CO₂ 进行封存,而 H₂ 则进行燃料电池和燃机循环发电。日本进行新阳光计划中的“鹰”(煤的气液电多联产)项目,也是基于 IGCC,加上燃料电池与氢气燃机,形成煤气化燃料电池燃机汽轮机的整体联合循环,在此基础上,再进行 CO₂ 的捕获与存储,通过提高发电效率和捕集 CO₂ 来降低碳的排放。国外相似的计划还有澳大利亚的零排放发电 (ZeroGen);德国 RWE 公司的 450 MW IGCC 以及 CCS 项目;荷兰 Nuon 电厂的二期计划(1200MW,抽取 2.5 % 进行 CCS);另外,还有力拓公司和 BP 公司联合进行

的“Kwinana”项目(500 MW)等。

2004 年我国开始实施“绿色煤电”计划,开始了“绿色煤电”的系统设计集成、煤气化、煤气净化、制氢和 CO₂ 分离、燃料电池、富氢气体燃烧和 CO₂ 封存等专题的研究工作。2009 年 7 月 6 日我国首座自主开发、设计、制造并建设的 IGCC 示范项目—华能天津 IGCC 示范电站正式开工建设,标志着具有我国自主知识产权、代表世界清洁煤技术前沿水平的“绿色煤电”计划取得了实质性进展,截止 2016 年 11 月底华能天津 IGCC 示范工程核心装置 2 000 t/d 级两段式干煤粉加压气化炉运行已突破 200 d。

1.2 燃烧后捕获技术及其应用

1.2.1 燃烧后捕获技术

燃烧后捕获技术指在燃烧设备(如锅炉、燃气轮机等)的烟气中通过物理吸收法、化学吸收法、吸附法和膜分离法等方法使 CO₂ 和其他成分分离,进行吸附后形成高浓度的 CO₂ 气体用于储存和运输。(图 2)

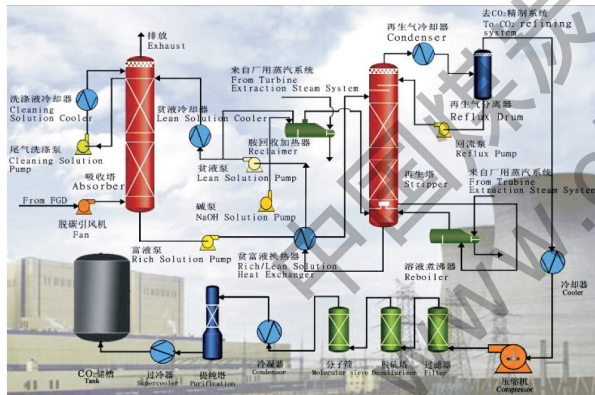


图 2 燃烧后碳捕获流程

1.2.2 应用案例

美国马里兰州 WarriorRun 燃煤电厂:由美国 DOW 化学公司开发的基于 MEA(一乙醇胺)的 Econamine FG 流程,CO₂ 处理量为 150 t/d。日本三菱重工参与开发的 KEPCO&MHI 烟道气 CO₂ 回收流程,也是使用基于 MEA 的改进型 KS-1 溶剂,CO₂ 处理量为 210 t/d。

华能集团北京热电厂高碑店碳捕获与封存项目于 2008 年 7 月 16 日正式投产,采用了基于 MEA 的复合胺溶液,辅以抗氧化剂与缓蚀剂,年产 CO₂ 处理量为 3 000 t。华能集团上海石洞口第二热电厂项目 2009 年 12 月 30 投产启动,年生产食品级 CO₂10 万 t(纯度 99.997%)。中国电力投

资集团合川双槐火力发电厂投资建设的首套年捕获一万吨 CO₂ 大功率装置 2010 年 1 月 22 日在正式投入运行。

神华集团作为煤化工企业也建成了一个 CO₂ 捕集封存项目,项目位于内蒙古鄂尔多斯市,设计年规模为 10 万 t/年。该项目于 2010 年 6 月开工建设,2011 年 1 月打通全流程,成功将超临界状态 CO₂ 注入到 2243.6 m 深的地层,项目包括较高浓度 CO₂ 捕集技术研究、CO₂ 输送和盐水层规模化封存关键技术研究、高浓度 CO₂ 捕集与地质封存技术集成和工程示范等课题。

1.3 富氧燃烧技术及其应用

1.3.1 富氧燃烧技术

富氧燃烧系统是用纯氧或富氧代替空气作为化石燃料燃烧的介质。通过制氧技术,将空气中大比例的 N₂ 脱除,直接采用高浓度的 O₂ 来代替空气,这样得到的烟气中有高浓度的 CO₂ 气体,可以直接进行处理和封存。在富氧燃烧系统中,由于 CO₂ 浓度较高,因此捕获分离的成本较低,但是供给的富氧成本较高,富氧燃烧发展的方向主要是降低制氧的成本和能耗。目前氧气的生产主要通过空气分离方法,包括使用聚合膜、变压吸附和低温蒸馏(图 3)。

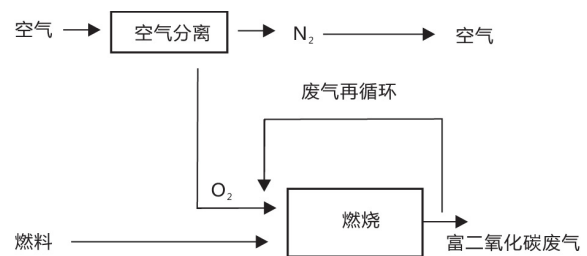


图 3 富氧燃烧技术流程

1.3.2 应用案例

富氧燃烧技术已经在美国、加拿大、欧洲、日本、澳大利亚和韩国等国家进行了中试研究,这些项目大多都是利用现有小型机组进行改造。美国在 JameStone 电厂示范 50 MW 循环流化床的富氧燃烧系统,并于 2013 年放大到 400~600 MW。德国 2006 年 5 月建造一个 30 MW 的富氧燃烧电站。澳大利亚 Callide 项目与日本等国家进行合作,对一个 60 年代建造的 4 台 30 MW 的电站进行改造,利用 2 台 330 t/a 的空分系统提供 98% 氧气,每天回收 75 t CO₂。Total 公司在法国 Lacq

电厂完成一个 30 MW 的项目,在 2009 年开始示范运行。三井巴布公司建设一个 40 MW 的富氧燃烧项目,在 2009 年进行运行。

富氧燃烧在中国目前尚处于实验阶段,相关工业化技术尚待进一步研究。

2 碳捕获技术发展前景展望

碳捕获技术被认为是短期内应对全球气候变化最重要的技术之一,引起美、德、英、澳、日等国的关注和重视。

燃烧前捕获技术适用于新建 IGCC 电厂,IGCC 进行燃烧前 CO₂ 捕集是发展低碳能源、解决温室排放和碳税问题的一种重要技术途径,其技术相对复杂,场地要求也大,是我国未来电厂建设的方向。燃烧后捕获技术适用于已建电厂的减排改造,技术相对简单,我国绝大多数电厂在未来需要进行这类改造,是未来我国火力发电厂节能减排的重要阵地。富氧燃烧适用于已建电厂的减排改造,技术相对复杂,且成本高,目前尚处于示范阶段。

2.1 碳捕获与封存技术的经济性

碳捕获与封存是一个资本密集的项目,利用当前的捕获技术进行 CO₂ 捕获的成本约为 40~60 美元/t,而可接受的捕获成本仅为 20 美元/t。按照现有技术,捕集 CO₂ 需要大约 25% 的额外燃料和购置额外的设备,这将增加 30%~40% 的发电成本。华能北京热电厂 CO₂ 捕集示范项目,仅在两个锅炉上安装了碳捕集装置,年回收 CO₂ 3 000 t,仅占全厂 CO₂ 排放的 2%,总投资达 2400 万元。华能上海石洞口第二发电厂运行耗电率约为 0.2%。可见碳捕获与封存成本较大,在现有上网电价评估机制下将很难实现自愿碳减排的现实目标。结合绿色发展和低碳经济,加快我国绿色能源立法,对碳排放收费,制定鼓励绿色能源的政策是当务之急。

2012 年国家发改委发布了《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》,2014 年发布了《碳排放权交易管理暂行办法》。碳交易是利用市场机制引领低碳经济发展的新模式,目的是为逐步建立总量控制下的碳排放权交易市场奠定技术和规则基础。碳配额的限制使企业在政策和经济压力下主动规范自身行为,控制碳排放数量,加快绿色技术

革新和开发新能源,从而满足可持续发展的低碳经济理念和自身的经济利益。建立碳排放权交易市场是我国深化经济体制和生态文明体制改革的重点任务,同时也能够确保中国在未来低碳经济的新经济规则中获得国际话语权。

2.2 碳捕获与封存技术的安全风险

CO₂ 捕获、运输和封存过程存在的风险主要集中在封存环节。封存的潜在风险包括对地下水的污染、当地生态的破坏、CO₂ 的泄露对公众健康和环境乃至气候变化的影响。

碳封存是指将大量捕获到的 CO₂ 存储在地质结构之中,从而减少 CO₂ 排放。目前常见的封存方式有三种,即将 CO₂ 碳封存于地层的自然孔隙中、地质深层盐水层及深海。地质存储 CO₂,必须将其注入到超过 1 000 m 深的地层,使之与地层中的岩石、地下水发生物理化学变化,这将会引起 CO₂ 泄露、影响地质结构的长期稳定、造成地表变形,甚至诱发地震。尽管 CO₂ 本身是无毒无味的,但是一旦因为某种原因使 CO₂ 扩散出来,必然会造成附近很大区域范围内的大气缺氧,对该区域范围民众的生命财产将是一种严重的威胁,同时可能造成严重的生态灾难。1986 年喀麦隆地震导致 120 万 t CO₂ 从尼奥斯湖中泄露出来,造成 1 700 人死亡;阿尔及利亚 Salah 项目的 CO₂ 封存工程现场监测数据表明,每年地表的拱起程度达到了 5 mm。

我国地质结构十分复杂,地质封存可能会遇到比其他国家更加难以想象的困难。但只要封存场地选择恰当,操作规范,监控严密及应急措施具备的情况下,大规模 CO₂ 封存的安全性是可以得到保证的。

2.3 碳捕获与封存技术的法律风险

现有的国际法、海洋法对 CO₂ 碳封存技术的应用尚缺乏规范,由于该技术的潜在安全影响不可忽视,因此该技术的应用尚存在法律风险。

2.4 CO₂ 资源化的必要性与可行性

如果单纯考虑碳捕集后封存,不会产生任何的经济效益,反而由于增加了监测、运行等成本,无论是对于政府还是企业,都难以长期负担这部分成本。如果从 CO₂ 的利用入手,使捕集的 CO₂ 能够产生经济效益,则可以相对容易地延伸碳捕集的产业链,对于政府和企业来讲更易于实施,使得

碳捕获的可行性更强。因此,要想推广碳捕获就得将碳利用放在首位。

CO₂ 具有较高的民用和工业价值,不仅广泛应用在石油开采、冶金、焊接、低温冷媒、机械制造、人工降雨、消防、化工、造纸、农业、食品业、医疗卫生等方面,还可应用于超临界溶剂、生物工程、激光技术、核工业等尖端高科技领域。

我国燃煤电厂目前最大的碳捕获项目—华能石洞口第二发电厂位于上海地区,该地区 CO₂ 市场年需求量在 15~18 万 t 之间,用户主要集中在焊接和干冰两方面,其中用于焊接的 CO₂ 年消耗量约为 8 万 t,占 45%;用于制造干冰的 CO₂ 年消耗量约为 6 万 t,占 35%;用于碳酸饮料、啤酒、冷冻、卷烟以及粮食包装储运的 CO₂ 年消耗量共约 4 万 t,占 20%。预计上海地区 CO₂ 市场年增量为 15%。根据初步估算目前市场上食品级 CO₂ 的价格约在 600~800 元/t,如果市场开发正常,华能上海石洞口第二电厂 CO₂ 捕集装置预计可以实现盈利。中国目前 CO₂ 的年消费能力是 200 万~250 万 t,而一个几十万千瓦的燃煤电厂一年所能捕集的 CO₂ 的量差不多也是 100 万~200 万 t。换句话说,一个电厂的捕集量,就能与全国的消费量持平,因此 CO₂ 资源化的方向尚待进一步开发。

碳捕集要想大规模推广,目前最现实可行的办法也许是用于油田驱油。CO₂ 捕集、驱油与埋存(英文缩写 CCS-EOR)是指将 CO₂ 从工业或能源生产相关气源中分离出来,输送到适宜的油田,用于增采石油,同时封存部分 CO₂,使之与大气长期隔离的技术集合。CO₂ 捕集、驱油与埋存是 CO₂ 捕集、利用和封存(英文缩写 CCUS)最重要的组成部分。有关研究表明,3 吨 CO₂ 可以驱出 1 吨油,利用 CO₂ 提高石油采收率,可获得较好的回报,是目前碳捕集推广最现实可行的第一步。一般油田的实际采集量只能达到勘探量的一半,还会有大量的石油夹杂在岩层之中,油田勘探公司会把水蒸气灌入地下,“挤”出那里面的石油。而 CO₂ 驱油技术可以取代水,且还能让 40% 的 CO₂ 代替藏在

岩层里的石油留在缝隙里,起到了部分碳封存的效果。CO₂ 驱油技术在美国已经运用了 30 多年,近几年我国油田也开始研究这项技术。如中原油田濮城一废弃油藏就通过试验 CO₂ 驱油再获新生,2008 年 6 月开始进行 CO₂ 驱油试验,并组日产油从 0.6 t 上升至 15.9 t。

CCU 技术即将 CO₂ 作为一种资源充分开发利用,它避开了 CO₂ 地质封存的各种风险和不确定性,从而保证了 CO₂ 末端减排技术的安全性。如利用 CO₂ 生产高分子聚合物等化工产品,或将其转化为甲醇、石油等能源产品,以及利用地球上广泛存在的橄榄石、蛇纹石等碱土金属氧化物实现 CO₂ 矿化等。该技术的应用前景则受制于 CCU 过程中的能耗的经济性以及新产品的市场前景。

工业 CO₂ 烟气直接矿化利用的新技术和新方法,即由 CCU 直接为 CU,不需要经过 CO₂ 捕获、分离、提纯的过程,更好地实现将 CO₂ 作为资源高效转化利用并大规模工业化应用也许是未来研究的方向。

由于化石能源产生的 CO₂ 排放量巨大,因此真正的 CO₂ 减排,需要能源生产的变革,寻求可再生能源,充分利用太阳能和核能等清洁能源,提供能源利用效率,减少能源需求。

参考文献

- [1] 范英,朱磊,张晓兵.碳捕获和封存技术认知、注册现状与减排潜力分析[J],气候变化研究进展,第 6 卷第 5 期,2010 年 9 月。
- [2] 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,第 23 卷第 5 期,2007 年 9 月。
- [3] 栾健,陈德珍.CO₂ 减排技术及趋势[J],能源研究与信息,第 25 卷第 2 期,2009 年。
- [4] 高健,苗成露,汪靖伦,何良年.CO₂ 资源化利用的研究进展[J],石油化工,2010 年第 39 卷第 5 期。
- [5] 王新.我国碳捕获与封存技术潜在环境风险及其对策探讨[J],环境与可持续发展,2011 年第 5 期。
- [6] 巢清尘,陈文颖.碳捕获和存储技术综述及对我国的影响[J],地球科学进展,2006 年 3 月第 21 卷第 3 期。
- [7] 陈新明,史邵平等.燃烧前 CO₂ 捕集技术在 IGCC 发电中的应用[J],化工学报,第 65 卷第 8 期,2014 年 8 月。