

# The Investigation of Carbon Capture and Storage Technology

Fan Baoan

Wuhan University of Science and Technology, Department of Chemical Engineering and Technology  
Research Center of Green Manufacturing and Energy-Saving & Emission Reduction Technology, Wuhan, China  
fanbaoan@yahoo.com.cn

**Abstract:** In this paper, all kinds of carbon capture and storage technologies (CCS) around home and abroad were reviewed and their advantages and disadvantages were analyzed. Next, the issues need to be solved about the large-scale application of CCS technology were pointed and the relevant solutions were proposed.

**Keywords:** carbon dioxide; capture; storage; reduction

## 碳捕集与封存技术探讨

范宝安

武汉科技大学化学工程与技术学院 绿色制造与节能减排科技研究中心, 武汉, 中国, 430081  
fanbaoan@yahoo.com.cn

**【摘要】** 本文首先对目前国内各种碳捕集与封存技术进行了概括, 分析了各自的优缺点。然后指出了碳捕集与封存技术大规模应用需要解决的问题, 并提出了相应的解决方法。

**【关键词】** 二氧化碳; 捕集; 封存; 减排

### 1 引言

随着人类工业化进程的加速和社会经济的发展, 化石燃料燃烧所导致的空气污染和温室效应已严重地威胁着人类的生存。全球气候变暖和温室效应已成为各国可持续发展面临的共同挑战。

目前, 我国正处于经济快速发展期, 对能源需求十分巨大。而能源的消耗必然会带来大量的碳排放。1980年, 中国的CO<sub>2</sub>排放量仅为14.5亿吨, 2000年上升到29.7亿吨, 进入二十一世纪后, 我国的碳排放量出现更快上升的趋势。2002年我国的碳排放量为34.9亿吨, 到2008年就上升到65.3亿吨<sup>[1]</sup>。据国际能源署统计, 我国的碳排放量已经超过了美国, 成为世界上最大的温室气体排放国<sup>[2]</sup>。

在2009年哥本哈根世界气候峰会上, 我国公布了2020年碳减排的目标——单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降40%~45%<sup>[3]</sup>。2012年全球气候变化东京议定书第一阶段将结束后中国在减缓全球气候变暖的行动中必将承担更多的国际义务和责任。未来我国

减少CO<sub>2</sub>排放的政治压力很大。因此, 我国必须未雨绸缪, 尽快制定和实施温室气体减排政策, 在经济增长的同时, 保证社会的可持续发展。

减少温室气体排放除了节约能源、利用清洁能源和清洁燃烧技术外, CO<sub>2</sub>的捕集和封存也是一条重要途径<sup>[4]</sup>。

碳捕集与封存技术是将工业生产过程中(如煤炭、石油燃烧)产生的大量CO<sub>2</sub>从工业废气中分离出来并注入地下、压入海底或固定在绿色植物中, 以避免进入大气的一种技术, 该技术简称为CCS(Carbon Capture and Storage)。CCS技术是人类应对全球气候变暖, 限制温室气体浓度增加的一项重要措施<sup>[5]</sup>。

目前, 这项技术主要应用于火力发电和油气生产两大领域。另外, 在煤化工、钢铁和水泥在生产过程中产生大量高浓度CO<sub>2</sub>也应捕集封存。

本文将首先对目前CCS技术进行概述, 分析各种技术的优缺点, 然后讨论CO<sub>2</sub>的捕集和封存技术大规模应用需要解决的各种问题及解决的办法。

### 2 二氧化碳的捕集和封存技术<sup>[2]</sup>

基金项目: 武汉科技大学绿色制造与节能减排科技研究中心基金(B0915)。

CCS 技术包含两个方面的含义：一是 CO<sub>2</sub> 的捕集技术；二是 CO<sub>2</sub> 的封存技术。

## 2.1 二氧化碳捕集技术<sup>[6,7]</sup>

目前，正在大力开发的碳捕集技术主要有 3 种，即燃烧前脱碳、燃烧后脱碳和富氧燃烧技术。

### 2.1.1 燃烧前脱碳

燃烧前脱碳是将化石燃料与氧或空气发生部分燃烧，产生由一氧化碳和氢气组成的混合气体。混合气体冷却后，在催化转化器中与蒸汽发生重整反应，使混合气体中的一氧化碳转化为 CO<sub>2</sub>，并产生更多的氢气。最后，将氢气从混合气中分离，干燥的混合气中的 CO<sub>2</sub> 含量可达 15%~60%。CO<sub>2</sub> 从混合气体中分离并被捕获和储存，氢气作为燃料送入燃气轮机，进行燃气轮机与蒸汽轮机联合循环发电。

### 2.1.2 燃烧后脱碳

燃烧后脱碳是从烟气中分离、捕集 CO<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub> 的收集法主要有化学溶剂吸收法、吸附法和膜分离等方法。当前最好的收集方法是以胺作为溶剂的化学吸收法。胺与 CO<sub>2</sub> 发生化学反应后生成一种含 CO<sub>2</sub> 的化合物。然后对溶剂加温，化合物分解，分离出溶剂和高纯度的 CO<sub>2</sub>。由于燃烧产生的烟气中含有很多杂质，而杂质的存在会增加捕集的成本，因此烟气进行吸收处理前要进行预处理(水洗冷却、除水、静电除尘、脱硫与脱硝等)，去除其中的活性杂质(SO<sub>2</sub>、氮氧化物和颗粒物等)，否则这些杂质会优先与溶剂发生化学反应，消耗大量的溶剂并腐蚀设备。烟气经预处理后，进入吸收塔，吸收塔的温度保持在 40°C~60°C，CO<sub>2</sub> 被胺(如一乙醇胺、二乙醇胺和三乙醇胺等)吸收，吸收剂在温度为 100°C~140°C 下再生，再生后的吸收剂返回吸收塔重新吸收 CO<sub>2</sub>。

### 2.1.3 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术是指燃料在氧气和 CO<sub>2</sub> 的混合气体中燃烧，燃烧产物主要是 CO<sub>2</sub>、水蒸汽以及少量其它成分，尾气经过冷却后 CO<sub>2</sub> 含量在 80%~98%。通常，氧气由空气分离方法产生，少部分烟气再循环与氧气按一定比例进入燃烧室。烟气再循环的目的是为了控制火焰温度。如果燃烧发生在纯氧中，火焰温度就会过高。在富氧燃烧系统中，由于 CO<sub>2</sub> 浓度较高，因此捕获分离的成本较低，但富氧的制备成本较高。另外，由于燃烧发生在低氮环境中，因而大大降低了氮氧化

合物的产生。由于该技术主要着力在燃烧过程中，也被看作是燃烧中捕集技术。

## 2.2 二氧化碳封存技术<sup>[8]</sup>

### 2.2.1 地下封存

该项技术包括地质封存和水力封存。地质封存是利用特殊的地质结构将 CO<sub>2</sub> 存储于地下，例如不可开采的甲烷煤层裂缝、衰竭的油气层等。水力封存是利用地层缓慢的水力传导特性延缓 CO<sub>2</sub> 在岩层及地下水中迁移，例如地下深层盐水层封存等。

### 2.2.2 海洋封存

该项技术又可分为溶解型封存和物理型封存。溶解型封存即利用 CO<sub>2</sub> 在海水中的溶解特性来封存，例如海平面以下 3000m 左右的溶解型封存区。物理型封存即利用海底高压低温的特性将 CO<sub>2</sub> 保存在临界状态之下形成 CO<sub>2</sub> 湖泊来封存，例如深海 5000m 以下的海床湖泊型封存区。

### 2.2.3 地表封存

也称矿化封存，包括干式矿化封存和湿式矿化封存。干式矿化封存是在特定的温度与压力下，使气态 CO<sub>2</sub> 与含金属氧化物的固态物质接触，进行反应，通过生成金属的碳酸盐实现对 CO<sub>2</sub> 的封存。湿式矿化封存首先使矿物及 CO<sub>2</sub> 溶解在溶液中，利用钙镁离子与碳酸根离子的反应，形成碳酸盐及其他次生矿物的沉淀物。然后，再通过后续分离程序，进行沉淀物的分离与反应物的回收。

### 2.2.4 生物封存

生物封存是指利用植物的光合作用把 CO<sub>2</sub> 转化成树叶、木材等生物质，或者在厌氧环境中利用特定藻类将 CO<sub>2</sub> 转化成可再生资源，最终将 CO<sub>2</sub> 变成生物质的一部分从而起到固碳作用。

## 3 各种二氧化碳的捕集和封存技术的优缺点

### 3.1 二氧化碳捕集技术的优缺点<sup>[2,5]</sup>

在上述三种 CO<sub>2</sub> 捕集技术中，燃烧前捕集技术是目前运行成本最低的捕集技术，其前景为学术界所看好。但该项技术需要新建水煤气重整装置和氢气/二氧化碳分离装置，建设成本高，前期投入多。燃烧后捕集技术分支较多，可以分为化学吸收法、物理吸附法、膜分离法、化学链分离法等等。其中，化学吸收法被认为最有潜力的碳捕集技术，但其设备运行成本和能

耗较高。燃烧后捕集优势在于烟气多级换热，热量综合利用，吸收剂消耗低，设备腐蚀小，胺溶液和水消耗量低。劣势在于捕集系统复杂需要设置烟气预处理、尾气洗涤、气液分离等系统，需要使用抗氧化剂和缓蚀剂，系统投资较大。事实上，由于工业尾气中的 CO<sub>2</sub> 浓度低、压力小，无论采用燃烧前捕集还是燃烧后捕集技术，能耗和成本都难以降低。富氧燃烧捕集技术是用纯度非常高的氧气助燃，使排放的尾气中 CO<sub>2</sub> 的浓度达到 80% 以上，该技术不需要上新设备，因而降低了前期投入和捕集成本。但这种方法也存在着一个明显的不足之处——即需要纯氧作为助燃剂，而氧气的制备成本又比较高，这也使得富氧燃烧捕集技术在经济性上并没有太大优势。

### 3.2 二氧化碳封存技术的优缺点<sup>[2,5]</sup>

在上述各种 CO<sub>2</sub> 封存技术中森林和陆地生态埋存是最廉价埋存方式，其优势在于绿色环保，资源可循环利用，劣势是转化效率低、可用空间不足。农作物太阳能转化效率仅为 1% 左右，相当于每平方米能吸收与转化太阳能的速率约为 1 瓦。藻类的太阳能的转化效率也只有 1~2%。如果要将一个发电容量为 500 MW 的火力发电站所排放出来的 CO<sub>2</sub> 全部吸收，需要约 2000 平方公里的森林才能实现，故此方式不可能作为主要埋存方式。海洋埋存有可能是实现大规模长期埋存 CO<sub>2</sub> 的理想方式，但海洋埋存存在的主要问题是 CO<sub>2</sub> 在海水中的溶解将会破坏海洋生态平衡，影响海洋生物的钙化过程。并且海洋埋存所需的能耗也相当高（需要将 CO<sub>2</sub> 的压力提高至 300 大气压以上），故目前尚处于探索阶段。地下埋存包括不可采煤层埋存、采空的油气层埋存、强化采油回注埋存、深部盐水层埋存等多种方式。地下埋存可以提高产油率、产气率，并有可以实现 CO<sub>2</sub> 的负成本埋存，但有可能造成 CO<sub>2</sub> 泄漏。而地表封存的优势在于封存量大，封存占地面积小，综合用途多，但 CO<sub>2</sub> 地表矿化封存的可行性，取决于封存过程所需的能量成本、反应物成本，以及封存的长期稳定性 3 个因素。在地表矿化封存机制中，每封存 1 吨的 CO<sub>2</sub> 约需要 1.6~3.7 t 含碱土金属的硅酸盐岩石，并产生 2.6~4.7 t 的废弃物。

## 4 CCS 技术大规模应用需要解决的问题

### 4.1 减排成本高昂

目前所开发的各种 CO<sub>2</sub> 捕集与封存技术除 CO<sub>2</sub> 强

化驱油技术以外，其它都是正成本运行，据测算每捕集和封存 1 吨 CO<sub>2</sub>，需要增加 25~30 欧元<sup>[9]</sup>（相当于 250~300 元人民币）的成本，对于火力发电，这相当于使电价增加 0.25~0.3 元/度。而采用 CO<sub>2</sub> 驱油技术，又可能存在 CO<sub>2</sub> 泄漏的问题。高昂的成本使 CO<sub>2</sub> 排放大户都不愿使用现有的碳捕集和封存技术，尽管这些技术已经相当成熟。

### 4.2 公众意识淡薄

目前人们对于节能减排、绿色环保的公众认可程度已经相当高了，但对于碳捕集和封存的公众认知度还很低，一项调查问卷表明，只有不到 1% 的听说过碳捕集和封存的概念。公众对 CCS 技术的认知度还不够，CCS 技术还没有像其他减缓气候变化方案那样得到普遍认可。另外，还有些公众对碳捕集和封存技术的安全性表示怀疑，担心 CO<sub>2</sub> 泄漏导致的安全问题。毕竟非洲喀麦隆境内骇人听闻的尼奥斯湖神秘杀人事件就是由于 CO<sub>2</sub> 泄漏引起的。

### 4.3 政府政策不到位

事实上，碳捕集和封存技术一直没有得到大规模应用的主要原因不在于技术层面，而在于政策层面，到目前为止，我国尚没有出台一部相关政策鼓励和扶持企业采用碳捕集和封存技术。而面对高昂的碳捕集成本和严峻的减排需求，如果政府不出台鼓励政策，与企业共担风险，几乎没有一家企业愿意单方面投资 CCS。

### 4.4 法律、法规不健全

目前，我国已经制定了多部环境保护方面的法律、法规，但还没有一部针对 CO<sub>2</sub> 减排方面的法律、法规。虽然原因有很多，如减排的主体不易定位，减排的指标不能硬性规定等。但根本的原因还在于我们在这方面的法律意识淡薄，认为减排不宜采用法律手段来解决，但事实上如果没有一套指导性的法律、法规作为约束，人们很难将减排任务落实到实际行动中。

## 5 CCS 技术大规模应用可采取的方案

### 5.1 不断完善 CCS 技术，降低碳捕集和封存的成本

目前 CCS 技术成本过于高昂，制约了其应用。CCS 技术的成本主要来自于 CO<sub>2</sub> 的分离。由于烟道气中的

CO<sub>2</sub>浓度一般都很低(~10%左右),因此从废气中分离出CO<sub>2</sub>的负荷和能耗都很高。为此需要研究高效的CO<sub>2</sub>分离技术,如膜分离技术、化学吸收技术、CO<sub>2</sub>液化技术等。同时完善配套的CO<sub>2</sub>输运和注入技术,并开发出相应的配套设备。

## 5.2 推动 CCS 进入碳交易市场,促使发达国家提供资金支持和技术转移

所谓碳交易市场是指由于《京都协议书》对发展中国家没有规定碳减排的具体指标,而对发达国家有着具体规定,而发达国家为了满足减排指标,作为政策的一种灵活变通,可以由发展中国家替其完成一定的减排任务,减排费用则由发达国家买单。目前,每减排1吨CO<sub>2</sub>,国际行情价是由发达国家提供15~20欧元的补贴<sup>[7]</sup>。因此如果能够全面进入碳交易市场,充分利用发达国家的资金和技术,碳减排完全可以做到有利可图。

## 5.3 研究适合我国陆相盆地的封存安全性保障技术<sup>[10]</sup>

我国盆地多属陆相沉积型,又经历了反复的构造运动,因而地层渗透系数较低,连续性较差,非均质性较强。这不利于注入,但有利于迟滞泄露,为了趋利避害,需要深入研究其封存机理、模拟方法与监控技术。含水层封存具有很大的减排潜力,研究重点应放在含水层封存方面。

## 5.4 深入开展全民减排固碳的宣传工作,提高公众意识

深入开展对人民群众的减排固碳方面的思想教育和文化宣传,让人民群众意识到仅仅靠减排是不够的,必须要开展固碳工作才能完成我们的减排目标。另外还要让人民群众意识到当前的CCS技术是安全的、过关的,不要产生不必要的心理恐慌。

## 5.5 加强碳减排的相关法律、法规的制定和政府政策的引导

我国应尽快出台鼓励企业采用CCS技术的各项税收政策,建立健全CO<sub>2</sub>减排的相关法律、法规,以为碳减排和碳捕集提供良好的软件环境。

## 5.6 加强 CCS 战略研究<sup>[10]</sup>

在技术层面,要把CCS放在我国能源结构、产业布局及地质条件的大环境中考察其地位、技术路线与存在的问题及解决方案;在社会层面上,要加强与CCS相关的研发体制与机制、监管与融资、碳交易模式、补助与技术转移、土地与空间利用权、基础设施建设等问题的研究。

## References (参考文献)

- [1] Shi Honglian, The Method Investigation of Reduction of our Country's Carbon Emission[J], *Theory Monthly*, 2010(7), P17-19 (Ch).  
石红莲,降低我国碳排放量的对策探析[J],理论月刊,2010(7), P17-19.
- [2] Tian Mu, An Enke, Analysis of Carbon Capture Sequestration Technology of Coal-fired Boiler[J], *Boiler Technology*, 2009,40(3), P36-41(Ch).  
田牧,安恩科,燃煤电站锅炉二氧化碳捕集封存技术经济性分析[J],锅炉技术,2009,40(3),P36-41.
- [3] Xue Zuyuan, Assumption of Fulfilling China's Commitments for Reducing Pollutant Discharge by 2020[J], *Chemical Engineering Design*, 2010,23(3), P3-10(Ch).  
薛祖源,实现我国承诺的2020年减排指标的设计[J],化工设计,2010,23(3),P3-10.
- [4] Zhang Lijun, The International Progress of Carbon Dioxide Capture and Storage Underground[J], *Land and Resources Information*, 2007(11), P16-21(Ch).  
张丽君,二氧化碳捕集与地下埋存国际进展[J].国土资源情报,2007(11),P16-21.
- [5] Zhang Weidong, Zhang Dong, Tian Kezhong, Carbon Capture and Sequestration Technology[J], *China Foreign Energy*, 2009,14(11), P7-14(Ch).  
张卫东,张栋,田克忠,二氧化碳捕集与地下埋存国际进展[J],中外能源,2009,14(11),P7-14.
- [6] Huang Bin, LIU Lianbo, XU Shisen, Evolution of CO<sub>2</sub> Capture and Sequestration Technology[J], *Electric Power*, 2007, 40(3), P14-17(Ch).  
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),P14-17.
- [7] Yu Fang, Song Baohua, Study on Development Trend of CO<sub>2</sub> Capture Technology[J], *China Environmental Protection Industry*, 2009(10), P27-30(Ch).  
于方,宋宝华,二氧化碳捕集技术发展动态研究[J],中国环保产业,2009(10),P27-30.
- [8] Ge Xiuzhen. The Prospect of the Carbon Dioxide Capture and Storage[J], *Information of Hydrogeology & Engineering Geology Techniques*, 2008(4), P1-39(Ch).  
葛秀珍,二氧化碳捕集和封存展望[J],水文地质工程地质技术方法动态,2008(4),P1-39.
- [9] Zhao Chun, CUI Zhixiang, The Problems and Proposes of Launching Carbon Capture and Storage Project[J], *Modern Science*, 2010(8), P46-47(Ch).  
赵春,崔智翔,我国碳捕获与封存(CCS)项目开展面临的问题及建议[J],今日科苑,2010(8),P46-47.
- [10] Li Xiaochun, Wei Ning, Fang Zhiming, The Technology of Carbon Capture and Storage can Rebound to Enhancing our country's ability of fulfill promise[J], *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(2), P170-171(Ch).  
李小春,魏宁,方志明,碳捕集与封存技术有助于提升我国的履约能力[J],中国科学院院刊,2010,25(2),P170-171.