

# 二氧化碳捕集技术及应用分析

步学朋

(神华科学技术研究院有限责任公司 北京 102211)

**摘要:** 分析了 CO<sub>2</sub> 捕集技术及现状。CO<sub>2</sub> 捕集是 CCS 的关键技术单元之一, 针对不同的 CO<sub>2</sub> 气源, 国内外研究开发了多种技术。许多 CO<sub>2</sub> 捕集技术已经工业化, 其中燃烧后烟气中 CO<sub>2</sub> 的捕集技术主要是以一乙醇胺(MEA)为基础的胺法; 燃烧前的 CO<sub>2</sub> 捕集技术主要应用于 IGCC 电厂, 一般需要对煤气中 CO 进行部分变换, 变换后脱碳可采用成熟技术, 如 Selexol(NHD) 等。富氧燃烧则是在中试成功的基础上, 进行更大规模的工业示范。国内外大型煤制油化工项目主要采用低温甲醇洗脱除 CO<sub>2</sub>, 如果设置 CO<sub>2</sub> 产品塔, 则可以获得体积分数 98% 以上的 CO<sub>2</sub>。天然气脱碳主要采用 MDEA 技术。另外还有低温法、PSA、膜分离等 CO<sub>2</sub> 捕集技术及化学链燃烧等一些正在研发的技术。

**关键词:** 碳捕集与封存(CCS); CO<sub>2</sub> 捕集; 温室效应

中图分类号: X51; F062.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)05-0009-05

## CO<sub>2</sub> capture technologies and application

BU Xuepeng

(Shenhua Science and Technology Research Institute Co., Ltd. Beijing 102211, China)

**Abstract:** The CO<sub>2</sub> capture technologies and application are briefly analyzed based on literatures. CO<sub>2</sub> capture technology is one of the key technologies in CCS(carbon capture and storage). For different CO<sub>2</sub> sources, there are numerous development technologies at home and abroad. Many kinds of CO<sub>2</sub> capture technologies have been commercialized now. At present, MEA is the main method used for post-combustion flue gas CO<sub>2</sub> capture. For pre-combustion CO<sub>2</sub> capture, which is used in IGCC plant, part of CO convert to CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> by shifting reaction first, then CO<sub>2</sub> is captured by mature technologies such as Selexol(NHD) etc. Based on pilot experiment, commercial demonstration is demanded for Oxy-fuel technique. Rectisol is the mature technique used for large-scale CTL and CTC CO<sub>2</sub> capture, and the CO<sub>2</sub> content will be more than 98% if CO<sub>2</sub> column was used in the process. For natural gas CO<sub>2</sub> capture, MDEA is often adopted. There are also other CO<sub>2</sub> capture technologies such as cryogenic, PSA, membrane etc. Chemical looping combustion and other CO<sub>2</sub> capture technologies are still in the research and development phase.

**Key words:** carbon capture and storage(CCS); CO<sub>2</sub> capture; greenhouse effect

## 0 引 言

CO<sub>2</sub> 等气体排放引起的温室效应越来越受到重视, CO<sub>2</sub> 的减排技术成为研究开发的重点, 其中 CCS(Carbon Capture and Storage) 技术被认为是未来实现大规模 CO<sub>2</sub> 减排的重要潜在手段。为此, 美国、日本、欧洲及中国等正在进行 CCS 的研究/示范及应用, 并将 CCS 技术列入未来进行商业化大规模减排 CO<sub>2</sub> 的重要方向。CCS 是指 CO<sub>2</sub> 经分离、输送和封存, 达到长期处置的一项综合技术, 是低碳能源技术

的重要组成部分, 也是减少温室气体排放、缓解全球气候变暖的重要途径。国内一些企业在提高原油采收率(EOR)、电厂捕集 CO<sub>2</sub> 和地质封存等领域展开了多个试验。神华 10 万 t/a CCS 项目的建成及运行标志着中国在该领域取得了突破性进展。中国 CO<sub>2</sub> 的主要排放源包括燃煤电厂、建材、钢铁、石油化工、煤制油化工、天然气等行业<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub> 捕集是 CCS 的关键环节之一, 针对不同的 CO<sub>2</sub> 气源, 采用相应的捕集技术。根据 2005 年政府间气候变化专门委员会 IPCC 报告<sup>[2]</sup>, 通常将 CO<sub>2</sub> 捕集技术分为燃

收稿日期: 2014-05-12; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.05.003

作者简介: 步学朋(1964—), 男, 山东招远人, 研究员, 博士, 从事能源投资项目技术经济研究及评估工作。E-mail: buxuepeng@shenhua.cc

引用格式: 步学朋. 二氧化碳捕集技术及应用分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 9-13, 19.

BU Xuepeng. CO<sub>2</sub> capture technologies and application[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 9-13, 19.

烧后脱碳、燃烧后脱碳、富氧燃烧、工业过程以及正在研发中的化学链燃烧和固体吸附等几种方式。

## 1 电厂排放 CO<sub>2</sub> 捕集技术

作为目前最大的 CO<sub>2</sub> 排放行业,化石燃料电厂 CO<sub>2</sub> 的减排备受关注。电厂的 CO<sub>2</sub> 捕集方式主要分为燃烧后捕集、燃烧前捕集以及富氧燃烧等,这些技术有些已经进入示范工程阶段。

### 1.1 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集技术就是将 CO<sub>2</sub> 从化石燃料燃烧后的烟气中进行捕集分离的过程。从理论上讲,常规化工过程使用的脱除 CO<sub>2</sub> 的方法均能用于烟气脱碳,但受到技术适应性、运行成本等因素的限制,目前研究和使用的最多的还是胺法中的一乙醇胺(MEA)技术。但因烟气中 CO<sub>2</sub> 体积分数一般只有 3%~15%,因此烟气中 CO<sub>2</sub> 捕集回收技术的关键制约因素是能耗较大,对电厂效率有较大影响。为此,在“全球碳捕集与封存现状<sup>[3]</sup>”中美国环境保护署总结得出:煤电机组的部分 CCS,大约有 40% 进行

CO<sub>2</sub> 捕集在技术上是可行的,其成本是合理的。

一些企业已经对 CO<sub>2</sub> 燃烧后烟气捕集进行了示范。国内中石化南化公司研究院研制出用于化学吸收 CO<sub>2</sub> 方法的复合胺溶液,并已在国内有关碳捕集利用与封存(CCUS)示范项目中得到应用。初步解决了基于胺吸收剂的化学吸收法 CO<sub>2</sub> 脱除工艺系统投资大、能耗高、对电厂影响大等缺点。同时,清华大学、浙江大学等高校和研究机构也正在开展此项研究,近期研究目标计划是进一步降低 CO<sub>2</sub> 捕集的能耗。

华能集团于 2008 年在北京高碑店热电厂建成投产了年回收能力为 3000 t 的燃煤电厂烟气 CO<sub>2</sub> 捕集试验示范系统(图 1)<sup>[4]</sup>,使用 MEA 吸收技术。该系统装置运行稳定可靠,技术经济指标均达到设计值,CO<sub>2</sub> 回收率大于 85%,CO<sub>2</sub> 纯度达到 99.997%。脱碳装置位于脱硫装置(FGD)和冷却塔之间的管道上,脱硫后进入 CO<sub>2</sub> 捕集装置的烟气温度的 40~50℃,其主要成分见表 1<sup>[5]</sup>。捕集后获得了食品级 CO<sub>2</sub>。

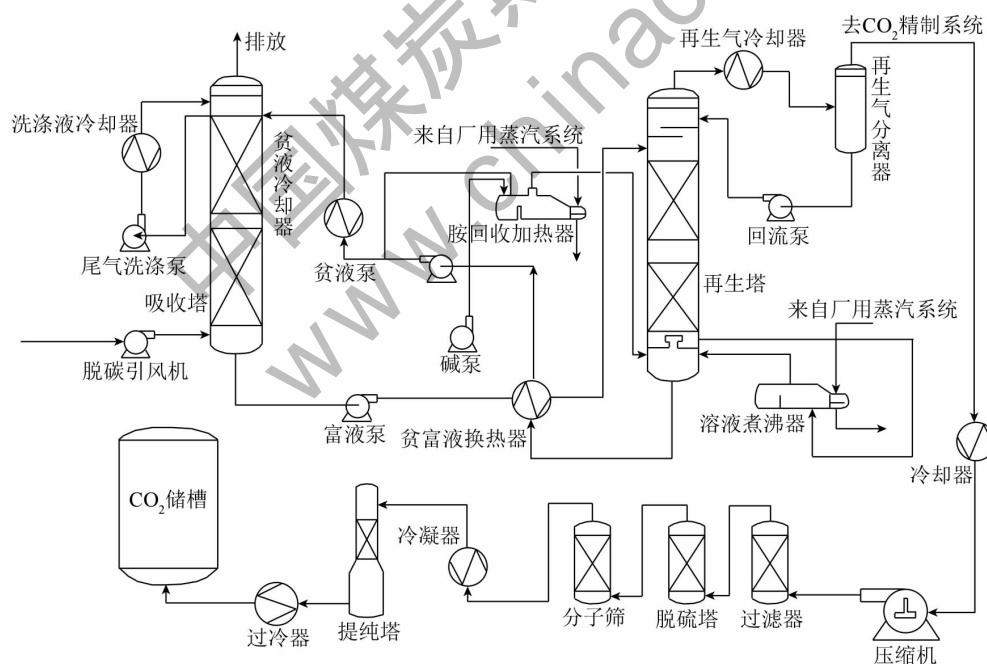


图 1 华能集团高碑店电厂 CO<sub>2</sub> 捕集示范项目工艺流程

表 1 华能集团北京热电厂 CO<sub>2</sub> 捕集示范装置入口烟气成分

| 烟气组成 | N <sub>2</sub> / % | CO <sub>2</sub> / % | O <sub>2</sub> / % | H <sub>2</sub> O / % | SO <sub>2</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> ) | NO <sub>x</sub> / (mg·m <sup>-3</sup> ) | 飞灰 / (mg·m <sup>-3</sup> ) |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|---|---|----------------------------|
| 浓度   | 73.90              | 12.56               | 5.60               | 7.85                 | <50                                     | <50                                     | ~10                        |

2009 年,华能公司在上海石洞口第二电厂实施了 10 万 t/a CO<sub>2</sub> 捕集示范项目,2009 年 12 月投入示范运行,使用具有自主知识产权的 MEA 法燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集技术,年捕集 CO<sub>2</sub> 约 10 万 t。捕集的 CO<sub>2</sub> 主要销售至附近化工企业用作原料。另外,中国电力

投资集团投资建设的重庆合川双槐电厂 CO<sub>2</sub>捕集工业示范项目于 2010 年 1 月正式投运。该套装置每年可处理 5000 万 m<sup>3</sup>烟气,从中捕集 1 万 t 体积分数在 99.5% 以上的 CO<sub>2</sub>,捕集率达到 95% 以上。

国外的烟气 CO<sub>2</sub>捕集技术也主要是以 MEA 溶液为基础的技术。根据 IPCC 报告<sup>[2]</sup>,主要成熟的技术包括 Kerr - McGee/ABB Lummus Crest Process、Fluor Daniel® ECONAMINE™ Process 及 Kansai Electric Power Co., Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., KEPCO/MHI Process。如美国南方电力公司的 Plant Barry 项目使用了三菱重工的 KM - CDRTM 技术,CO<sub>2</sub>捕集量约 13.6 万 t/a,并被封存于地下。另外荷兰的 ROADCCS 项目捕集 CO<sub>2</sub>约 1.1 Mt/a,使用了 Fluor Daniel's Econamine FG process。

### 1.2 燃烧前捕集

燃烧前脱碳的方式为经空分系统制得的氧气和水蒸气做气化剂,气化剂和化石燃料送至气化炉参与反应,气化后产生以 H<sub>2</sub>和 CO 为主要成分的合成气,再经水煤气变换,将合成气中的 CO 转化成 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>。然后使用化工捕集技术将 CO<sub>2</sub>(体积分数约 15% ~ 60%)从混合气体中分离,得到的高纯 H<sub>2</sub>进入氢燃气轮机燃烧室(或其他发电装置)进行燃烧,此时燃烧产生的气体中基本不含 CO<sub>2</sub>。这种燃烧前捕集方式产生的 CO<sub>2</sub>混合气体浓度相对较高,易于封存处理。目前,燃烧前脱碳已被拟建或规划中的整体煤气化联合循环发电(IGCC)以及多联产示范电厂采用,比如美国的 Future Gen 以及中国的 Green Gen 等。

华能公司在天津建设的国内第一套 IGCC 示范项目已于 2012 年 12 月建成投产,计划在 2015 年采用 Selexol 物理吸收工艺对示范装置进行部分煤气燃烧前捕集改造,年捕集 CO<sub>2</sub>量为 6 万 ~ 10 万 t<sup>[6]</sup>。

据美国南方电力公司介绍,该公司计划在使用 TRIG™ 输运床空气气化的位于肯珀县 582 MW 的 IGCC 项目中,拟将部分 CO 通过变换反应生成 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>,使用 Selexol 技术捕集总排放量 65% 的 CO<sub>2</sub>,大致每年计划出售 110 万 ~ 150 万 t CO<sub>2</sub>,用于附近油田的驱油<sup>[7]</sup>。

### 1.3 富氧燃烧

富氧燃烧脱碳方式是,使用纯度为 95% ~ 99% 的氧气替代传统使用的空气与化石燃料,与燃烧后返回的部分高浓度 CO<sub>2</sub>一起,在燃烧室参与燃烧反应,生成以水汽和 CO<sub>2</sub>为主的烟气。这种烟气中

CO<sub>2</sub>体积分数高达 80% 以上,一部分返回燃烧室参与燃烧,另外一部分经冷却和压缩除去水汽,再经进一步处理得到所需高浓度 CO<sub>2</sub>。因此,富氧燃烧技术在 CO<sub>2</sub>捕集方面有一定优势,但目前这种技术尚处于研究和中试规模示范阶段,在燃烧机理、污染物的排放及协同控制技术、锅炉的改造设计、大规模锅炉运行经验、烟气再循环量等方面仍需进一步研究。

清华大学等近年来开展了 CO<sub>2</sub>富氧燃烧方式捕集技术的研究,搭建了 25 kW O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧试验台,为中国首台长期持续运行的维炉 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>燃烧装置,燃烧后烟气中 CO<sub>2</sub>体积分数达到 82%。浙江大学针对富氧燃烧技术开发了多功能循环流化床试验台,在试验阶段均取得了比较理想的效果。华中科技大学 2011 年 12 月建成了中国首套热负荷 3 MW 级,年捕集 CO<sub>2</sub>为 7000 t 的富氧燃烧中试装置。在此基础上,又与相关企业合作,在应城建设热负荷为 35 MW 的富氧燃烧碳捕集工业示范工程,每年可捕集 CO<sub>2</sub>约 10 万 t<sup>[6]</sup>。

郑力刚等<sup>[8]</sup>提到目前有 3 个中试富氧燃烧电厂在运行,其中在德国、澳大利亚各有 1 个 30 MW 的粉煤炉富氧燃烧电厂,在西班牙有 1 个 30 MW 的循环流化床富氧燃烧电厂。国华电力、华能等国内公司也都做过富氧燃烧的方案。

## 2 化工过程排放 CO<sub>2</sub>的捕集

在石油化工、煤制油化工、天然气生产和化工转化过程中,往往排放出大量 CO<sub>2</sub>,为了后续合成加工等需要,一般需要将 CO<sub>2</sub>脱除,脱除的方法有多种<sup>[9]</sup>。

### 2.1 溶剂吸收法

溶剂吸收法是目前应用最为广泛和最成熟的 CO<sub>2</sub>捕集方法,根据使用 CO<sub>2</sub>吸收溶剂的不同作用机理,溶剂吸收法可以分为化学吸收法、物理吸收法和物理化学吸收法。

1) 化学吸收法。化学吸收法是利用 CO<sub>2</sub>和吸收剂在吸收塔内发生化学反应,从而达到分离回收原料气中 CO<sub>2</sub>的技术。化学吸收法的主要优点是吸收速度快、净化度高,其缺点是再生热耗大,能量消耗较大。化学吸收法使用较多的包括热钾碱法、醇胺法和氨水法。

活化热钾碱法工艺已被广泛用于合成气、天然气、制氢等工业过程气体的脱碳,世界上各种类型的热钾碱脱碳装置已逾千套。其主要方法有砷碱法



形式,但常用 PSA 法来脱除或提纯  $\text{CO}_2$ 。PSA 法的基本原理是利用气体组分在固体材料上吸附特性的差异以及吸附量随压力变化而变换的特性,通过周期性的压力变换过程实现气体的分离或提纯。在 PSA 分离  $\text{CO}_2$  的工艺过程中,采用的吸附剂对  $\text{CO}_2$  具有较强的选择吸附能力。PSA 脱除或提纯  $\text{CO}_2$  技术较适合  $\text{CO}_2$  体积分数在 20% ~ 60% 的气体, $\text{CO}_2$  提取率大于 75%。

美国空气产品和化学品公司从 20 世纪 70 年代初期就开始把变压吸附气体分离技术用于合成氨变换气、尿素脱碳的研究,英国 ICI 公司、荷兰 KTI 公司以及日本东洋工程公司分别于 20 世纪 80 年代开发出了应用于合成氨、尿素生产装置中的变压吸附技术<sup>[11]</sup>。在国内,1986 年由西南化工研究院开发了用变压吸附从各种富含  $\text{CO}_2$  混合气(如石灰窑气、烟道气、合成氨厂变换气等)中提纯  $\text{CO}_2$  的技术。

### 2.3 低温分离法

低温分离法是通过低温冷凝分离  $\text{CO}_2$  的一种物理过程,利用原料气当中各组分相对挥发度的差异将原料气多次压缩和冷冻制冷,使  $\text{CO}_2$  发生相变成为液体,从而达到从原料气中分离  $\text{CO}_2$  的目的。其优点在于能够产生高纯、液态的  $\text{CO}_2$ ,且液体  $\text{CO}_2$  密度大,便于管道输送及汽运;但工艺设备投资较大,能耗较高。低温分离法对于从高浓度(大于 60%)  $\text{CO}_2$  原料气中回收  $\text{CO}_2$  较为经济,目前常用于油田现场 EOR 的  $\text{CO}_2$  回收,也用于食品级  $\text{CO}_2$  的制备过程。神华 10<sup>5</sup> t/a CCS 项目也采用了低温  $\text{CO}_2$  分离提纯工艺。目前,低温分离法比较典型的工艺是美国 Koch Process(KPS)公司的 Ryan Holmes 三塔和四塔工艺,整个流程包括乙烷回收、甲烷脱除、添加剂回收和  $\text{CO}_2$  回收<sup>[11]</sup>。

### 2.4 膜分离法

膜分离法是利用某些聚合材料制成的薄膜对不同气体组分的渗透率(速度)差异来分离气体的技术,每种组分透过膜的速度与该气体的性质、膜的特性及膜两边压差有关。膜分离的驱动力是压差,当膜两边存在压差时,渗透率高的气体组分以很高的速率透过薄膜,形成渗透气流,渗透率低的气体则绝大部分在薄膜进气侧形成残留气流,将 2 股气流分别引出从而达到分离的目的。煤制油化工中常见气体组分中, $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  的渗透能力较强,而  $\text{N}_2$ 、 $\text{CH}_4$  的渗透能力相对低一些。

Monsanto 公司、UOP 公司等多个公司开发膜分

离技术。近年来国内也在油气处理等方面做了一些研究和应用,如中海油用于天然气脱碳<sup>[12]</sup>。神华正在承担的科技支撑项目也在研究开发适合于煤制油化工过程较高浓度  $\text{CO}_2$  捕集的膜技术。

### 2.5 正在开发的 $\text{CO}_2$ 捕集技术

除了上面介绍的应用于化工行业的成熟技术外,还有一些新的  $\text{CO}_2$  捕集技术正在开发中,如电化学、化学链燃烧法、化学固定法、金属骨架法、固体胺法、生物回收法等。对此不开展论述。

## 3 神华 10 万 t/a CCS 示范项目的 $\text{CO}_2$ 捕集

正在运行中的神华 10 万 t/a CCS 示范项目,位于内蒙古鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内,是中国目前第一个深部盐/咸水层的地质封存实验项目,也是中国首个全流程煤基  $\text{CO}_2$  捕获 CCS 示范项目。该项目得到了国家科技支撑项目等的支持,是将神华煤直接液化厂煤气化制氢过程排放的部分  $\text{CO}_2$  尾气,捕集提纯后运送至神华煤直接液化厂西约 11 km 处的场地,然后封存至地下多层盐水层中。神华  $\text{CO}_2$  捕集工艺流程如图 4 所示<sup>[13]</sup>。

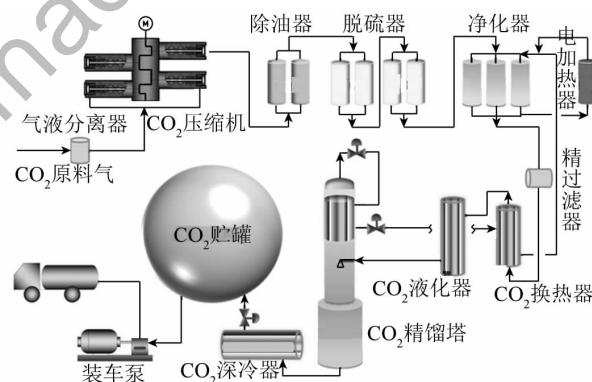


图 4 神华  $\text{CO}_2$  捕集工艺流程

$\text{CO}_2$  来自前文所述的低温甲醇洗排放尾气, $\text{CO}_2$  体积分数约为 87.6%,为满足封存要求,需要脱除杂质,提高  $\text{CO}_2$  的纯度。捕集装置使用  $\text{CO}_2$  压缩机将高浓度  $\text{CO}_2$  尾气加压,然后脱油脱硫,通过变温变压吸附(TSA)脱水;随后  $\text{CO}_2$  尾气被冷冻、液化及精馏,满足要求后,再经深冷后送球罐存贮。然后经装卸栈台装罐车送往  $\text{CO}_2$  封存区。

## 4 结 语

$\text{CO}_2$  捕集是 CCS 的关键技术单元之一,针对不同的  $\text{CO}_2$  气源,国内外研究开发了多种技术,许多已

(下转第 19 页)

建筑废模板及可燃包装废弃物,是局部废弃物净化器,为可再生能源利用,多能互补分布式能源站提供了技术支撑。

4) 水泥回转窑协同处理处置城市废弃物或危险废弃物,兼具城市净化器与消纳器功能,适用于区域生活或市政垃圾、市政污泥、危险废物、塑料包装废弃物、废弃农药及其包装废弃物,是城市低碳、生态建设的技術支撑,应大力推广应用。

5) 能源资源环境协同一体化循环经济模式构建的城市反应器、净化器与消纳器系统集成协同处理处置系统,技术成熟、投资较小、环境安全可靠、已具有成功的工程运行经验,能实现废弃物的资源化与能源化,但须加强创新投资、管理与运作方式,进行产业链整合,协同管理,着力推进协同处理处置集成技术的规模化应用,促进低碳生态城市建设与可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 蔡博峰,曹东. 中国低碳城市发展与规划[J]. 环境经济, 2010(12): 33-38.
- [2] 叶立梅. “智慧城市”之后“循环经济”城市正在崛起[EB/

(上接第13页)

经工业化。其中燃烧后烟气中 CO<sub>2</sub> 的捕集技术主要是以 MEA 为基础的胺法,其主要研究方向是提高效率,降低运行成本;另外需要考虑增加 CO<sub>2</sub> 捕集后对电厂效率降低的容忍程度。燃烧前的 CO<sub>2</sub> 捕集技术主要是应用于 IGCC 电厂,一般需要对煤气中 CO 进行部分变换,其变换程度也需要考虑电厂效率和运行成本,变换后脱碳可采用工业过程的成熟技术。富氧燃烧则是在中试成功的基础上,进行更大规模的工业示范。国内外大型煤制油化工项目主要采用低温甲醇洗脱除变换气中的 CO<sub>2</sub>,如果设置 CO<sub>2</sub> 产品塔,则可以获得体积分数 98% 以上的 CO<sub>2</sub> 尾气,因此其捕集成本要低于从烟气中捕集 CO<sub>2</sub>。天然气脱碳主要采用 MDEA 技术,同样需要考虑效率和运行成本问题。其他如低温法、PSA、膜分离等技术在各种 CO<sub>2</sub> 捕集方面也均有应用。化学链燃烧、离子液法及固体胺法等仍需要继续研发。

#### 参考文献:

- [1] 白冰,李小春,刘延锋,等. 中国 CO<sub>2</sub> 集中排放源调查及其分布特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2919-2923.
- [2] Edward S. Rubin. IPCC special report on carbon dioxide capture

and storage [R]. Washington, DC: U. S. Climate Science Program Workshop 2005.

- [3] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 生物质水煤浆制浆燃烧集成系统技术经济分析[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 88-92, 15.
- [4] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 生物质水煤浆技术 CDM 机制发展与碳减排评价[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(2): 112-116.
- [5] 刘建文,袁瑞佳,陈楠. 低碳生态城市建设中能源资源环境协同一体化循环经济模式探讨[C]//中国城市经济学会年会论文集. 北京: 中国城市经济学会, 2013.
- [6] 汪澜,徐迅,刘姚君,等. 我国利用水泥窑协同处置危险废物和城市生活垃圾现状[C]//中国水泥协会环保和资源综合利用专业委员会成立大会会议文集. 南京 [s. n.], 2011.
- [7] 高长明. 再论水泥回转窑的协同焚烧可燃废弃物的优越性与环境安全性[J]. 四川水泥, 2014(2): 35-38.
- [8] 水泥窑协同处置废弃物专题报道[EB/OL]. [2013-11-28]. <http://www.cement.com/zhuanli/company/sjk/20131128/>.
- [9] 水泥窑协同处置废弃物——“十二五”最大的环保产业[EB/OL]. [2011-04-15] [2014-04-30]. <http://zt.snsqw.com/2011/snezqiw/>.
- [10] 高长明. 我国水泥窑协同处置可燃废弃物还缺哪些火候?[EB/OL]. [2013-01-18] [2014-04-30]. <http://gongyi.sina.com.cn>.
- [11] 郭凡,祁保全. 政府好帮手 城市净化器[J]. 中国建材, 2012(9): 86-89.
- [3] Galobal CCS Institute. 全球碳捕集与封存现状[R]. 巴黎: 国际能源署, 2014.
- [4] 国家高技术研究发展计划(863计划)先进能源技术领域专家组. 中国先进能源技术发展概论[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 330-364.
- [5] 刘连波,黄斌,鄱时旺,等. 燃煤电站 3000~5000t/a CO<sub>2</sub> 捕集示范装置工艺及关键设备[J]. 电力设备, 2008, 9(5): 21-24.
- [6] 任相坤,张东杰,张军. 中国应对气候变化的政策和发展 CCUS 技术的努力[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 46-51.
- [7] Kuuskraa V, DiPietro P. 二氧化碳驱油: CCS 的主要驱动技术[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 40-45.
- [8] 郑力刚,谈晔华. 基于富氧燃烧的二氧化碳捕集技术[J]. 基石: 中文版, 2013, 1(4): 52-56.
- [9] 朱世勇. 环境与工业气体净化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [10] 郑晓鹏. 海上天然气田伴生 CO<sub>2</sub> 的海上捕集及回注技术[J]. 中国造船, 2007, 48(S1): 297-302.
- [11] 叶懋权,陈全福. 二氧化碳分离技术—石油伴生气处理工艺[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1990.
- [12] 孙浩,徐正斌. 松南气田天然气脱碳工艺技术研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(4): 325-327.
- [13] 吴秀章. 中国二氧化碳捕集与地质封存首次规模化探索[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 161-169.