



中青年经济学家文库  
ZHONGQINGNIAN JINGJIXUEJIA WENKU

# 基于全生命周期的CCS系统 综合评价研究

云 / 著

JIYU QUANSHENGMING ZHOUQI DE CCS XITONG  
ZONGHE PINGJIA YANJIU



经济科学出版社  
Economic Science Press

中青年经济学家文库

# 基于全生命周期的 CCS 系统综合评价研究

王 云 著



经济科学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于全生命周期的 CCS 系统综合评价研究/王云著.  
—北京: 经济科学出版社, 2013. 6  
(中青年经济学家文库)  
ISBN 978-7-5141-3164-2

I. ①基… II. ①王… III. ①二氧化碳-减量化-  
排气-研究 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058510 号

责任编辑: 程晓云  
责任校对: 王凡娥  
责任印制: 王世伟

## 基于全生命周期的 CCS 系统综合评价研究

王 云 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销  
社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 88191217 发行部电话: 88191537

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

北京万友印刷有限公司印装

880 × 1230 32 开 7.25 印张 200000 字

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5141-3164-2 定价: 20.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 88191502)

(版权所有 翻印必究)

# 前 言

能源与环境是制约人类发展最关键的两个问题。以煤为主的能源结构是我国大气污染严重的主要原因，在能源动力系统中燃煤发电系统不仅对能源、资源的消耗量较大，对环境的影响也非常严重，燃煤发电是造成温室气体二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放的主要来源，是当前及未来一段时期 CO<sub>2</sub>减排的重点和关键。国际气候变化专门委会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）认为，电厂 CO<sub>2</sub>捕集和封存（CCS）技术是应对全球气候变化和温室气体减排最为有效、最有潜力的技术手段。正是由于 CCS 具有与煤炭等化石能源系统良好的匹配性，使得 CCS 技术在能源结构以煤为主、其他减排技术发展不成熟的中国更具发展空间，CCS 技术作为未来一项减排技术对我国减排目标的实现具有非常重要意义。但是，目前 CCS 技术发展中还存在二氧化碳捕捉封存的高能耗高成本、降低能源效率、二氧化碳的二次转移等一系列关键性问题。为了在实际应用中合理选择和决策评价，有必要对 CCS 进行全面的经济技术分析。

正是基于以上考虑，本书在全生命周期的框架下综合考虑能源、环境和经济方面的决策相关因素，以焓（Exergy）、CO<sub>2</sub>和资本为基本单位，在系统目标与范围、系统边界、功能单位、分配方法上统一整合物流、能流与资金流，并使三者的数据与 LCA 保持一致，建立相应的计算和综合评价模型，从而来增进电厂在发电和减排等方面的决策效率。根据所构建的全生命周期综合评价模型，本

书以  $2 \times 300\text{MW}$  燃煤电厂为参照对象, 对改造后 MEA 吸附燃煤机组、 $\text{O}_2/\text{CO}_2$  循环燃烧机组、IGCC 燃煤机组以及相对应的  $\text{CO}_2$  运输与埋存系统进行全生命周期技术—经济分析, 分别计算了全生命周期内的烟投入产出、 $\text{CO}_2$  排放量、成本费用、发电成本以及减排成本, 并以此为基础对 CCS 各子系统进行了集成计算与分析。计算结果表明: MEA + CCS、 $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 和 IGCC + CCS 三个集成系统, 全生命周期烟总投入分别为  $4.578\text{MWh}/\text{MWh}$ 、 $4.135\text{MWh}/\text{MWh}$  和  $4.463\text{MWh}/\text{MWh}$ , 从全生命周期能源利用效率高低来看,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 系统要优于 MEA + CCS、IGCC + CCS 系统; 从全生命周期  $\text{CO}_2$  排放的角度来看, 三个集成系统每捕捉封存 1 吨  $\text{CO}_2$  分别产生  $\text{CO}_2$  为 0.1523 吨、0.1526 吨和 0.1526 吨, CCS 在一定程度上容易形成二次二氧化碳碳转移, 但三个系统的影响都较小, 其中 MEA + CCS 系统影响最小,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 和 IGCC + CCS 系统次之; 三个集成系统全生命周期总成本分别为  $1547.63\text{M}\text{¥}/\text{a}$ 、 $1398.99\text{M}\text{¥}/\text{a}$  和  $1432.61\text{M}\text{¥}/\text{a}$ , 在不考虑产品收益的情况下,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 系统的全生命周期成本投入最小, 其次为 IGCC + CCS 系统, MEA + CCS 系统的全生命周期成本投入最高。在全生命周期框架下综合考虑以上能源利用、 $\text{CO}_2$  排放和成本投入等因素, 以减排烟能耗、发电成本和减排成本为综合评价指标分析可得, MEA + CCS、 $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 和 IGCC + CCS 三个集成系统, 每捕捉封存 1 吨  $\text{CO}_2$ , 分别需消耗烟为  $2.75\text{MWh}$ 、 $2.69\text{MWh}$  和  $2.76\text{MWh}$ , 全生命周期发电成本分别约为  $681.39\text{¥}/\text{MWh}$ 、 $607.43\text{¥}/\text{MWh}$  和  $698.27\text{¥}/\text{MWh}$ , 全生命周期减排成本分别为  $359.58\text{¥}/\text{MWh}$ 、 $264.53\text{¥}/\text{MWh}$  和  $376.62\text{¥}/\text{MWh}$ 。综合以上计算,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 系统较 MEA + CCS 和 IGCC + CCS 而言更为优越,  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  + CCS 是减少二氧化碳排放的更为行之有效的技术路径, 具有较好的发展潜力, 这对于缓解我国经济发展与温室气体减排的矛盾具有重要意义。

本书在全生命周期的框架下, 从热力、环境、经济三个方面来综合衡量和评级 CCS 碳减排技术, 通过能量利用、碳排放和经济成

本的清单分析，深入探索了 CCS 生命周期各阶段包括不同资源化工工艺对焔投入产出、CO<sub>2</sub>排放和成本投入的影响。全生命周期综合量评价模型的建立不仅符合可持续发展要求和现代经济学的基本原理，对于二氧化碳减排系统的建立及其发展具有重要的意义，还有利于对低碳技术的选择和发展作出合理的决策。

# 目 录

<b>1. 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	8
1.3 本书的研究目的和研究内容 .....	12
<b>2. 基于全生命周期的 CCS 综合评价模型</b> .....	14
2.1 引言 .....	14
2.2 理论基础 .....	14
2.3 模型构建 .....	19
2.4 评价指标 .....	32
2.5 本章小结 .....	35
<b>3. 燃煤电厂全生命周期综合评价</b> .....	37
3.1 引言 .....	37
3.2 研究对象与系统边界 .....	37
3.3 燃煤电厂全生命周期烟分析 .....	44
3.4 燃煤电厂全生命周期 CO <sub>2</sub> 排放 .....	53
3.5 燃煤电厂全生命周期成本分析 .....	56
3.6 燃煤电厂全生命周期综合指标评价 .....	62
3.7 本章小结 .....	63

<b>4. MEA 电厂全生命周期综合评价</b> .....	64
4.1 引言 .....	64
4.2 研究对象与系统边界 .....	65
4.3 MEA 电厂全生命周期焓分析 .....	67
4.4 MEA 电厂全生命周期 CO <sub>2</sub> 排放 .....	74
4.5 MEA 电厂全生命周期成本分析 .....	76
4.6 MEA 电厂全生命周期综合指标评价 .....	79
4.7 本章小结 .....	80
<b>5. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 电厂全生命周期综合评价</b> .....	82
5.1 引言 .....	82
5.2 研究对象与系统边界 .....	83
5.3 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 系统改造与燃烧模型 .....	85
5.4 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 电厂全生命周期焓分析 .....	89
5.5 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 电厂全生命周期 CO <sub>2</sub> 排放 .....	96
5.6 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 电厂全生命周期成本分析 .....	98
5.7 O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 电厂全生命周期综合指标评价 .....	100
5.8 本章小结 .....	102
<b>6. IGCC 电厂全生命周期综合评价</b> .....	103
6.1 引言 .....	103
6.2 研究对象与系统边界 .....	104
6.3 系统布置与热效率模型 .....	106
6.4 IGCC 电厂全生命周期焓分析 .....	111
6.5 IGCC 电厂全生命周期 CO <sub>2</sub> 排放 .....	114
6.6 IGCC 电厂全生命周期成本分析 .....	116
6.7 IGCC 电厂全生命周期综合指标评价 .....	118
6.8 本章小结 .....	119



<b>7. CO<sub>2</sub>运输与封存系统全生命周期综合评价</b> .....	121
7.1 引言 .....	121
7.2 研究对象与系统边界 .....	122
7.3 系统技术设计 .....	124
7.4 CO <sub>2</sub> 运输与封存系统全生命周期焓分析.....	130
7.5 CO <sub>2</sub> 运输与封存系统全生命周期 CO <sub>2</sub> 排放 .....	134
7.6 CO <sub>2</sub> 运输与封存系统全生命周期成本分析.....	137
7.7 CO <sub>2</sub> 运输与封存系统全生命周期综合指标评价.....	141
7.8 本章小结 .....	143
<b>8. CCS 全生命周期集成评价</b> .....	144
8.1 引言 .....	144
8.2 研究对象与系统边界 .....	144
8.3 CCS 全生命周期集成分析与比较 .....	145
8.4 MEA、O <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> 和 IGCC 比较 .....	150
8.5 本章小结 .....	153
<b>9. 总结与建议</b> .....	154
9.1 总结 .....	154
9.2 创新点 .....	156
9.3 工作建议 .....	157
参考文献 .....	159
附录一 生命周期评价原则与框架 ISO 14040 - 1999 .....	178
附录二 能量系统焓分析技术导则 .....	189

# 1.

## 绪 论

### 1.1

#### 研究背景

2010 年全球极端天气气候事件频发,是近十年来极端天气气候事件发生频率、强度及影响最大的一年。2011 年全球极端天气一浪接一浪,澳大利亚洪水翻滚,巴西泥石流泛滥,欧美地区暴雪肆虐,亚洲国家冰冻蔓延……造成无数的生命流失和巨大的财产损失,如图 1-1~图 1-4 所示。世界气象组织发表的报告指出,世界正在变得越来越热,2011 年成为有记录以来最炎热的年份之一,而人类活动是导致气温上升的原因。全球平均气温最高的 13 个年份都出现在 1997 年以来的 15 年中,这一情形所造成的极端气候状况加剧了世界各地干旱和暴雨的强度<sup>[1]</sup>。极端天气事件频发使人们更清楚地认识到全球气候异常,认识到温室效应已经造成严重后果。

2007 年政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告 (AR4) 表明,由于温室效应,地表温度上升的速度在不断加快,1901~2000 年的 100 年中,温度上升了  $0.6^{\circ}\text{C}$ ; 而 1906~2005 年,地表温度的上升幅度增加为  $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ 。与此同时,全球海平面平均升高了  $0.17\text{m}$ ,即平均每年上升  $1.7\text{mm}$ 。如果不加以有效控制,未来全球变暖将进一步加剧,到 21 世纪末温度将上升  $1.1 \sim 6.4^{\circ}\text{C}$ ; 一旦未来全球平均气温升高超过  $2^{\circ}\text{C}$ ,人类社会可能面临灾

难性的危险，突出表现为海平面上升、物种灭绝、极端天气事件频率增加、热带传染病北上、全球粮食短缺、水资源供应不足、地区冲突增加等<sup>[2]</sup>，如图 1-5 所示。

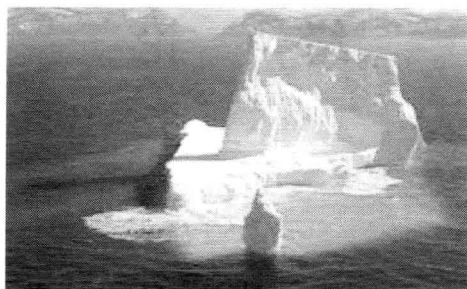


图 1-1 冰川融化



图 1-2 暴雪中的城市



图 1-3 旱灾—土地在干裂



图 1-4 城市洪灾

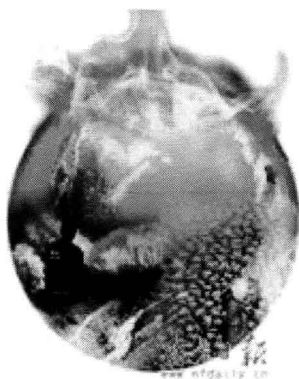


图 1-5 “燃烧”的地球

以政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 为代表的国际主流观点把大气温室气体浓度的增加作为 20 世纪全球变暖的主要原因, 认为受人类影响的 20 世纪全球变暖可能是过去 1 000 年来最暖的, 人类自身是全球变暖的罪魁祸首。自工业革命以来, 人类大量利用煤炭、石油等化石燃料, 向大气中排放大量的二氧化碳, 使得大气层中温室气体浓度大幅度上升, 大气层的“温室效应”进一步强化, 导致地表平均温度不断攀升, 这就是当前全球气候变化的根本原因所在。通常说的温室气体主要包括: 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ )、氢氟碳化物 ( $\text{HFC}_s$ )、全氟化碳

(PFC<sub>s</sub>) 和六氟化硫 (SF<sub>6</sub>)。此外, 粉尘、卤化烃、水蒸气等也具有致冷或者致热的效应。其中, 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 是最主要的人为温室气体, 主要产生于矿物燃料的燃烧过程, 在所有温室效应气体中对温室效应的贡献最大, 约占 60%<sup>[3]</sup>。1750 年前的 65 万年中, 大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度约为 280ppm (百万分之一) 左右, 到 2005 年, 这一数值上升为 379ppm。并且, 当前大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度正加速增大, 见图 1-6 和图 1-7。1960~2005 年, 大气中 CO<sub>2</sub> 浓度平均每年增加 1.4ppm, 最近 10 年 (1995~2005 年) 这一增幅加大到每年 1.9ppm。大量研究表明, 全球大气温度的持续上升主要归因于大气 CO<sub>2</sub> 浓度的不断增加。IPCC 对全球未来不同发展模式情景下温室气体 CO<sub>2</sub> 排放的预测结果表明, 不论何种发展模式, 如果不对 CO<sub>2</sub> 的排放加以控制, 全球气温升高的趋势势不可当。

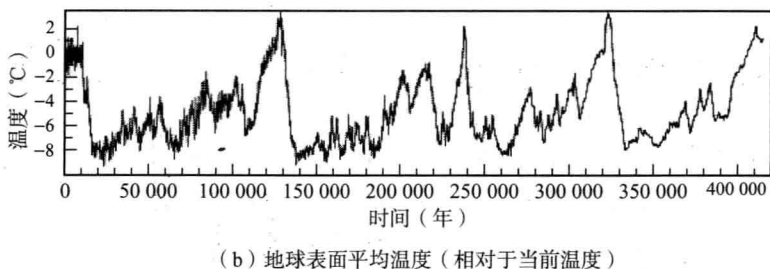
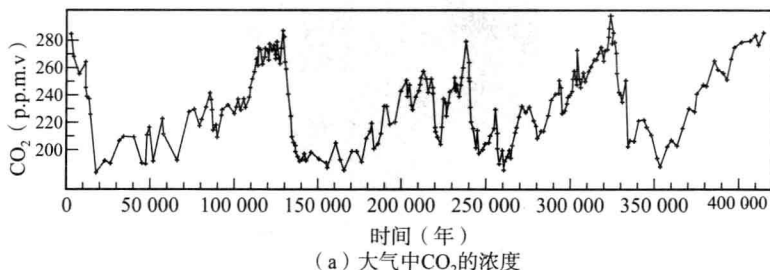


图 1-6 过去 40 万年间大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度与地球表面平均温度的变化 (petit et al., 1999)

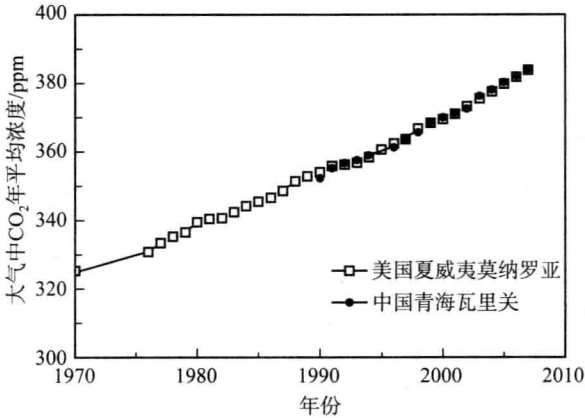


图 1-7 近年来观测到的大气中 CO<sub>2</sub> 年平均浓度的变化 (WDCGG, 2009)

控制温室气体排放，妥善应对气候变化，是今后一段时期全人类发展面临的巨大挑战。1979 年，召开了第一次世界气候大会，气候变化问题被提上议事日程。1992 年 6 月，在巴西举行的地球首脑会议上通过了《联合国气候变化框架公约 (UNFCCC)》，这是世界上第一个应对全球气候变暖的国际公约。1995 年 4 月，在德国柏林召开了第一次缔约方大会上通过了《柏林授权》，标志着国际气候进程在法律意义上正式启动。1997 年 12 月，在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议上，149 个国家和地区的代表通过了《京都议定书》，明确了温室气体减排的国家、时间、措施和减排量。2001 年 11 月，在摩洛哥的马拉喀什召开的联合国气候变化框架公约第七次缔约方大会上，通过了有关京都议定书履约的具体实施细则。2007 年 12 月，在印度尼西亚巴厘岛举行联合国气候变化大会上签订“巴厘岛路线图”，为 2009 年前应对气候变化谈判的关键议题确立了明确议程，并首次将美国纳入谈判进程。2009 年 12 月，在哥本哈根召开《联合国气候变化框架公约》第十五次缔约方大会，会议讨论了《京都议定书》1 期承诺到

期后的下一步方案，并就应对未来全球气候变化签订了《哥本哈根协议》，这是自《京都议定书》后又一具有里程碑意义的全球气候协议书。2010年12月，联合国坎昆气候大会顺利闭幕，会议各方重点围绕推进全球减排和建设资金技术援助机制等问题达成了共识，会议坚持了《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》，维护了“巴厘路线图”所确定的“双轨制”谈判机制和“共同但有区别的责任”原则，积极推进谈判进程向前发展。2011年11月，在南非德班《联合国气候变化框架公约》第17次缔约方会议暨《京都议定书》第7次缔约方会议上，作出了设定议定书与合作行动特设长期工作组的决定，宣布2012年德班增强行动平台特设工作组开始工作，2013年开始实施《议定书》第二承诺期，2015年制定对所有《公约》缔约方都适用的法律规范，同时正式启动绿色气候基金<sup>[4]</sup>。作为经济快速发展和温室气体排放显著增加的大国，中国的减排问题备受关注，本着对全人类高度负责的态度，2009年12月26日我国正式确定控制温室气体排放的行动目标，决定到2020年，单位GDP二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放比2005年下降40%~45%，作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划，并制定相应的国内统计、监测、考核办法。见图1-8。

从世界各主要国家的实际情况和具体实践可以归纳出，二氧化碳减排的主要有以下几种方式：（1）调整产业结构。已完成城市化和工业化进程的发达国家，加速产业结构升级，带动经济向低碳转型，单位国内生产总值二氧化碳排放呈现下降趋势。处在城市化和工业化过程中的发展中国家，尽管国民经济中高耗能制造业比重上升的阶段性特征一时难以改变，但仍把调整产业结构作为控制温室气体排放重要途径。（2）推动节能减排，强化节能和提高能效的政策措施，抑制能源需求增长，从而更高效地利用能源以减少碳基燃料的使用。（3）优化能源结构，主要是通过利用低碳和零碳能源替代高碳能源，增加低碳燃料和无碳燃料的比例，如大力发展太阳能、风能、水电、生物质能以及核能等，实现温室气体减排。（4）做好

基础储备, 发展安全可靠的 CO<sub>2</sub> 捕集、运输与封存技术 (Carbon Capture and Storage, CCS)。为了应对全球气候变化, 各国都在积极发展各种低碳技术, 以提高能源利用效率、优化能源结构、推广低碳燃料等, 并取得了巨大进步, 但越来越多的研究表明, CO<sub>2</sub> 捕集、运输和封存技术是近期内减缓 CO<sub>2</sub> 排放最为可行的措施与技术<sup>[5]</sup>。

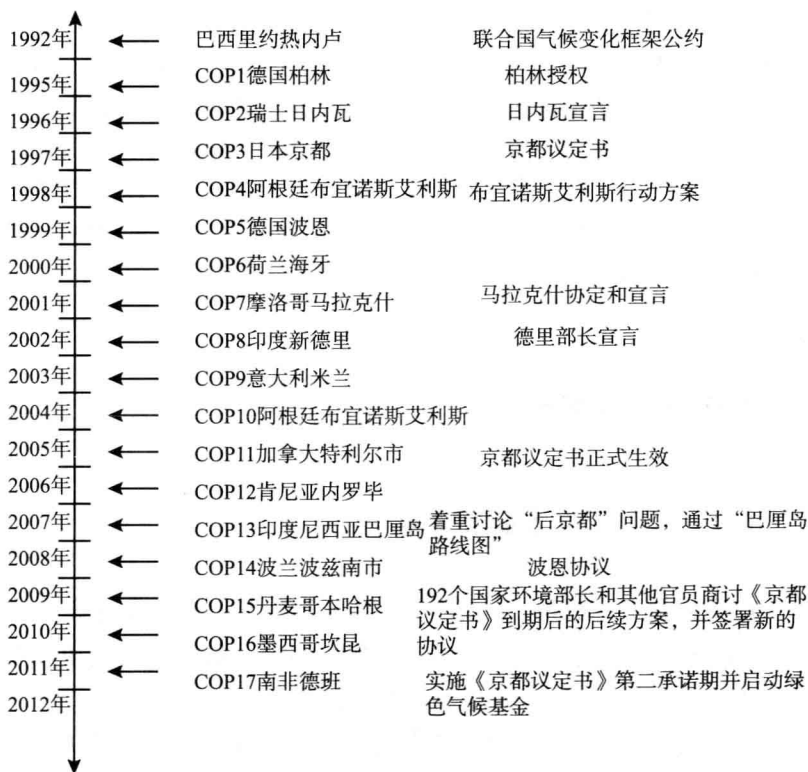


图 1-8 全球应对气候变化行动历程

在人类活动排放的二氧化碳中, 火电厂是最大的集中排放源。



在美国,火电厂每年排放的  $\text{CO}_2$  约占  $\text{CO}_2$  总排放量的 30%; 在中国,火电厂每年排放的  $\text{CO}_2$  约占  $\text{CO}_2$  总排放量的 50%。近年来,我国电力工业发展迅猛,截至 2010 年底,全国发电装机容量约 9.5 亿千瓦,其中燃煤电厂约占 3/4。鉴于燃煤发电在我国目前和未来能源利用中的重要地位,以及其作为  $\text{CO}_2$  集中排放源的显著特点,发展 CCS 技术控制和减缓电力生产中  $\text{CO}_2$  的排放,对于解决全球变暖和减缓气候变化以及我国  $\text{CO}_2$  减排目标的实现都具有重要意义<sup>[6]</sup>。全球气候变暖问题日益严重,作为未来最具发展潜力的温室气体减排技术,CCS (Carbon Capture and Storage,  $\text{CO}_2$  捕集、运输与封存) 可从根本上解决电力等行业的温室气体排放问题,是全球应对气候变化的重要战略选择。国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 研究表明,在全球温度升高控制在  $2^\circ\text{C}$  以内的情景下,CCS 的减排贡献将从 2020 年的 3% 上升至 2030 年的 10%,并在 2050 年达到 19%,成为减排份额最大的单项技术。

## 1. 2

### 国内外研究现状

#### 1. 2. 1 CCS 技术研究进展

CCS 包括  $\text{CO}_2$  捕集、运输和封存三个环节,即首先分离捕集  $\text{CO}_2$ ,其次选择运输工具送至适宜的封存场地,最后进行利用或者注入地下、驱油(气)、矿化等永久封存等<sup>[7]</sup>。

目前有关  $\text{CO}_2$  的分离技术主要有三类。一是燃烧后分离  $\text{CO}_2$  技术,主要考虑采用化学吸收法从煤粉电厂尾气排烟中分离  $\text{CO}_2$ ,因此环节处于生产过程尾部,几乎独立于生产过程,可适用于不同含碳燃料的发电技术,燃烧过程由于采用空气会造成氮气将烟气中  $\text{CO}_2$  浓度稀释(烟气中  $\text{CO}_2$  浓度小于 10%),在分离  $\text{CO}_2$  过程中需