

二氧化碳捕集技术 及其在火力电厂的工程应用

翟融融 著



张外倍



化学工业出版社



二氧化碳捕集技术 及其在火力电厂的工程应用

翟融融 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从理论研究和工程应用出发,全面系统地介绍了二氧化碳捕集技术以及该技术在火力电厂的应用情况。全书内容共分为7章,主要从参数影响、溶剂改进和流程创新等方面介绍了基于MEA和NH₃的二氧化碳捕集技术以及这两种捕集技术分别与燃煤机组和燃气蒸汽联合循环机组耦合的性能参数变化规律。

本书内容丰富,重点突出,并配备了大量图表,便于读者更深入理解并掌握二氧化碳捕集技术及其在火力电厂的应用。同时,书中的重点内容还配备了模拟实例与案例分析,读者可将理论概念与案例分析相结合进一步学习理解。

本书可供从事二氧化碳捕集技术研究和应用的人员使用,也可作为高等院校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

二氧化碳捕集技术及其在火力电厂的工程应用/翟融融著. —北京:化学工业出版社,2019.9
ISBN 978-7-122-34677-3

I. ①二… II. ①翟… III. ①火电厂-二氧化碳-废物综合利用 IV. ①X701.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第119419号

责任编辑:李军亮 徐卿华
责任校对:张雨彤

文字编辑:汲永臻
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷:北京京华铭诚工贸有限公司
装 订:三河市振勇印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张11¼ 字数238千字 2019年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00元

版权所有 违者必究

前言

随着气候变化问题日益突出，世界各国只有采取有效的措施大幅度减少温室气体尤其是 CO_2 的排放，国际范围控制气候变化的目标才能实现。CCS (carbon capture and storage) 碳捕集与封存技术作为温室气体减排技术之一，近年来取得了显著的进展。中国在 CCS 的基础上，延伸出 CCUS 技术 (即 Carbon Capture Utilization and Storage, 碳捕集、利用与封存技术)。CCUS 技术与 CCS 技术相比较而言，增加了 CO_2 的利用环节，而不是简单地封存。该技术可以将二氧化碳资源化，能产生经济效益，更具有现实操作性。本书主要侧重碳捕集过程与燃煤电厂耦合，几乎不涉及后续的利用与封存，所以本书中关于 CCS 与 CCUS 均保留原作者的说法。同时，就碳捕集部分而言，二者并无区别，目前，国际上两种说法均在采用。为了更好地让广大读者了解 CCUS 技术及其在火力发电机组中的耦合特性，笔者根据多年来在二氧化碳捕集技术与火力发电机组结合方面的研究，将相关研究按照算例形式穿插在各章之中，希望读者可以通过算例对内容有更具体的认识。在写作的过程中，笔者力求兼顾众多读者的需要，使本书既可作为了解 CCUS 技术的科普读物，也可作为从事 CCUS 相关工作的项目管理人员、项目开发商、咨询公司以及相关领域的教学研究人员的参考书。

全书共分 7 章。第 1 章首先介绍了全球温室气体的排放情况及其影响；其次介绍了减排温室气体的主要方法；最后阐明了 CCUS 的基本概念和发展历程，介绍了其代表项目，使读者对 CCUS 技术有初步的概况性认识。第 2 章按照二氧化碳的不同捕集方式和不同捕集位置从两方面对 CCUS 技术进行了详细的分类介绍，使读者对 CCUS 技术有进一步了解。第 3 章针对基于 MEA 的 CO_2 捕集技术从捕集流程、技术进展、技术性和经济性评价指标等方面进行了详细介绍，让读者了解目前最为广泛应用的化学吸收法的优缺点及其进展。第 4 章针对基于 NH_3 的 CO_2 捕集技术从捕集流程、技术进展、技术性评价指标等方面进行了详细介绍，让读者了解不同吸收剂对 CO_2 捕集技术的不同影响。第 5 章对 CO_2 捕集技术与燃煤电厂耦合作了详细论述，通过介绍燃煤机组现状，基于 MEA 和 NH_3 吸收剂的 CO_2 捕集与燃煤电厂耦合带来的不同影响、技术性和经济性指标、实际应用案例等让读者对目前 CO_2 捕集技术与燃煤电厂耦合有初步的认识与了解。第 6 章则从与第 5 章相同的角度介绍了 CO_2 捕集技术与燃气蒸汽联合循环机组耦合的情况，使读者对于燃气蒸汽联合循环这一方面有初步的认识与了解，也让读者认识了 CCUS 技术与不同机组耦合的不同影响。第 7 章介绍了可再生能源引入对碳捕集系统的影响，为 CCUS 技术的发展提供更多新的可能性，同时对 CCUS 技术作出前景展望，促进

CO₂捕集技术的大规模商业化应用。

本书在写作过程中，相关资料和信息得到了于海等专家的帮助，在此表示衷心的感谢。同时也感谢刘洪涛、冯凌杰、傅佳欣、王玉龙、吴昊等的文献收集整理工作。

CCUS技术是涉及多学科、综合性很强的新兴领域，由于笔者专业和水平有限，不妥之处恳请各位专家、学者批评指正。希望通过本书，使广大读者充分认识到应对气候变化的问题，为全球性环境事业的发展做出贡献。

著者

目录

第1章 绪论	001
1.1 二氧化碳的物理性质	001
1.2 全球二氧化碳排放情况	002
1.3 二氧化碳减排途径	003
1.3.1 改善电源结构及合理规划电网负荷分配	004
1.3.2 可再生能源系统	005
1.3.3 二氧化碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术	007
参考文献.....	009
第2章 二氧化碳捕集技术	010
2.1 二氧化碳捕集技术按照捕集位置分类	010
2.1.1 燃烧前捕集技术	011
2.1.2 燃烧中捕集技术	011
2.1.3 燃烧后捕集技术	012
2.2 二氧化碳捕集技术按照捕集方式分类	013
2.2.1 化学吸收法	013
2.2.2 物理吸附法	014
2.2.3 膜分离法	014
2.2.4 低温分离法	014
参考文献.....	014
第3章 基于 MEA 的二氧化碳捕集技术	015
3.1 基于 MEA 捕集二氧化碳的流程	015
3.1.1 MEA 的物理性质	015
3.1.2 捕集流程	016
3.1.3 基于 MEA 的 CO ₂ 捕集装置	017
3.2 技术进展综述	018
3.2.1 试验、商业规模运行	018
3.2.2 参数的影响	018
3.2.3 基于 MEA 的溶剂改进	020
3.2.4 MEA 捕集流程上的创新	021
3.3 捕集流程技术评价指标	026
3.3.1 基于热力学第一定律的评价指标	026

3.3.2 基于热力学第二定律的评价指标	027
3.4 碳捕集流程经济性评价指标	030
3.4.1 主要指标	030
3.4.2 经济性计算算例	032
参考文献	033
第4章 基于 NH₃ 的二氧化碳捕集技术	036
4.1 基于 NH ₃ 的二氧化碳捕集流程	036
4.1.1 NH ₃ 的物理性质	036
4.1.2 捕集流程	037
4.1.3 基于 NH ₃ 的 CO ₂ 捕集装置	037
4.2 技术进展综述	038
4.2.1 参数的影响	039
4.2.2 基于 NH ₃ 的溶剂改进	044
4.2.3 NH ₃ 捕集流程上的创新	047
4.3 捕集流程技术评价指标	052
参考文献	052
第5章 二氧化碳捕集系统与燃煤机组耦合研究	056
5.1 燃煤机组发展现状	056
5.2 基于 MEA 捕集二氧化碳系统与燃煤机组耦合	065
5.2.1 试验、示范和商业运行项目	065
5.2.2 内部改造与流程改进	066
5.2.3 多种系统集成	071
5.2.4 非设计工况动态特性	071
5.3 基于 NH ₃ 捕集二氧化碳系统与燃煤机组耦合	073
5.3.1 内部改造与流程改进	073
5.3.2 多种系统集成	074
5.4 案例分析	075
5.4.1 基于 MEA 的碳捕集与燃煤电厂耦合案例	076
5.4.2 基于 NH ₃ 的碳捕集与燃煤电厂耦合案例	082
5.5 技术性评价指标	097
5.6 经济性评价指标	098
参考文献	101
第6章 二氧化碳捕集系统与燃气蒸汽联合循环机组耦合研究	106
6.1 燃气轮机机组发展现状	106
6.2 基于 MEA 的二氧化碳捕集系统与燃气蒸汽联合循环机组耦合	112
6.2.1 基于胺溶液的溶剂开发	115
6.2.2 内部改造与流程改进	116

6.2.3 多种系统集成	123
6.2.4 CCS 与 NGCC 的非设计工况动态耦合特性	129
6.3 案例分析	132
6.4 技术经济性评价	136
6.5 未来发展趋势	140
参考文献	141
第 7 章 可再生能源引入对碳捕集系统的影响	144
7.1 可再生能源分类及简介	144
7.2 可再生能源引入碳捕集系统中的可能性	154
7.3 案例分析与评估	159
7.3.1 热力系统建模仿真	159
7.3.2 太阳能辅助燃煤机组碳捕集系统	162
7.3.3 热力性能与经济性能分析	165
7.4 总结与展望	170
参考文献	174
附录	175

第1章

CO₂

绪论

近年来,由于温室气体排放增多导致的气候变化已经对地球生态系统和人类社会造成了一系列重大影响。例如:大气中 CO₂ 浓度的提高导致海洋酸度增加,导致各地降水发生变化,淡水资源在世界范围内重新分配,从而使得其管理方式需要发生相应的变化,同时粮食以及林业生产也面临一些新的挑战。此外,气候变化也将对工业、居民和社会产生影响,威胁数百万人口尤其是贫困地区人口的健康,并且将继续影响地球和人类,至于影响的程度和后果的严重性,则取决于人类如何应对。科学界普遍认为:越早采取措施,控制温室气体排放,控制全球气候变暖,则地球面临的威胁就越小;越早做好准备,采取措施应对气候变化,则人类遭受的损害就越小。

1.1 二氧化碳的物理性质

CO₂ 是一种无色、无臭、无味、无毒的气体;熔点为 -56.55℃ (0.52MPa),沸点为 -78.55℃ (升华),密度为 1.977g/L;在水中的溶解度为 0.1449g/100g 水 (25℃),水溶液呈酸性。在 20℃ 时将二氧化碳加压到 5.9MPa 即可液化,相对密度为 1.0310 (20/4℃)。液态二氧化碳冷却到 -21.1℃,压力为 0.415MPa 时就成为固态,固态二氧化碳又称干冰。干冰吸热可直接升华为气体。二氧化碳在地球环境中起着重要的作用,它是大气的一部分,参与动物的呼吸循环和植物的光合作用。表 1-1 为 CO₂ 的部分物理性质。

表 1-1 CO₂ 的部分物理性质

物质	分子量	熔点/℃	沸点/℃	临界温度/℃	临界压力/MPa
CO ₂	44	-56.55	-78.55	30.98	7.38

1.2 全球二氧化碳排放情况

Arrhenius (1896)^[1]首先计算了二氧化碳对温室效应的定量影响,并分析了其对长期气候变化的作用。从公元 1000 年到 1900 年,900 年间二氧化碳含量仅增加了 15ppm^[2],而 2016 年,二氧化碳平均浓度(403ppm^①)则比 19 世纪中期高出约 40%,过去十年平均每年增长 2ppm^[3]。根据目前的趋势,预计到 2100 年,大气中二氧化碳含量将达到 570ppm,导致全球平均气温增加 1.9℃,并造成平均海平面上升 38m^[4]。

图 1-1^[5]为 2000~2017 年间全球能源相关的 CO₂ 的排放情况。从图中可以看出,CO₂ 年排放量在 2000~2008 年呈上升趋势,2009 年出现第一次下降,2010~2017 年整体趋势较为平缓,尤其是在 2014 年之后,还出现过小幅下降的情况。全球能源相关 CO₂ 排放量在 2017 年增长了 1.4%,在 CO₂ 排放量平稳变化 3 年后达到 32.5Gt 的峰值。

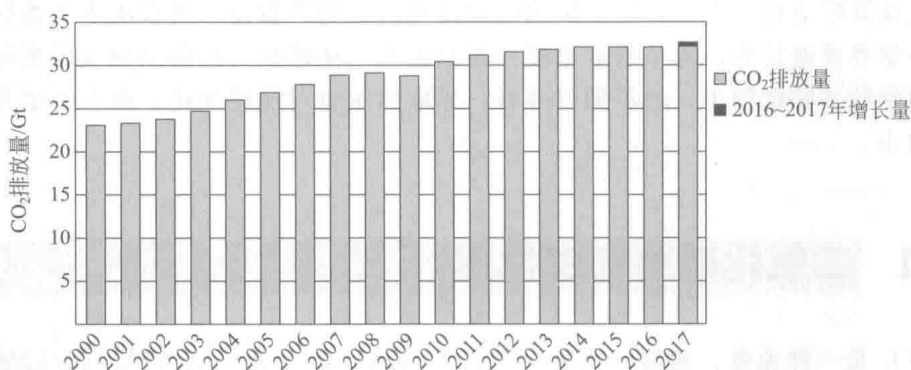
图 1-1 2000~2017 年间全球能源相关的 CO₂ 排放情况

图 1-2 以扇形图的形式展示了 2015 年世界范围内各工业部门燃烧燃料产生的 CO₂ 排放量。从图中可以看出,CO₂ 排放量占比^[3]最大的就是热电部门,占世界 CO₂ 排放量的 41%,几乎达到 1/2。热电部门排放量中又以工业生产占比最高,居民用电占比第二。

① ppm=μL/L, 余同。

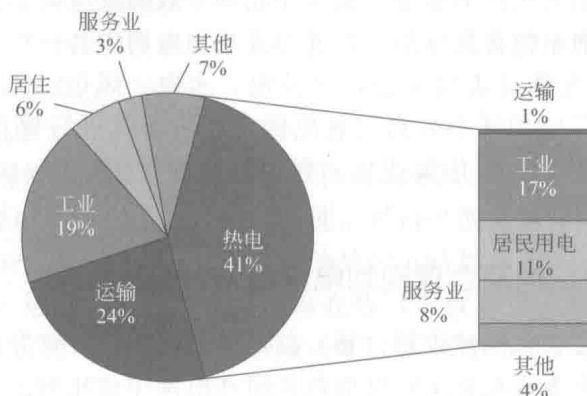


图 1-2 世界范围内各工业部门燃烧燃料产生的 CO₂ 排放量

图 1-3^[3]为 1990 年与 2015 年热电生产 CO₂ 排放量的对比图。从图中可以看出，2015 年较 1990 年 CO₂ 排放量大幅增长，其中煤在热电生产 CO₂ 排放量中占比从 1990 年的 65% 大幅增加到 2015 年的 72%。可见，随着人类对能源需求的急剧增长，越来越多的二氧化碳通过化石燃料燃烧排入大气，由于地球环境的无国界特征，应对和控制二氧化碳排放已经成为全球所有国家必须面对的国际议题。

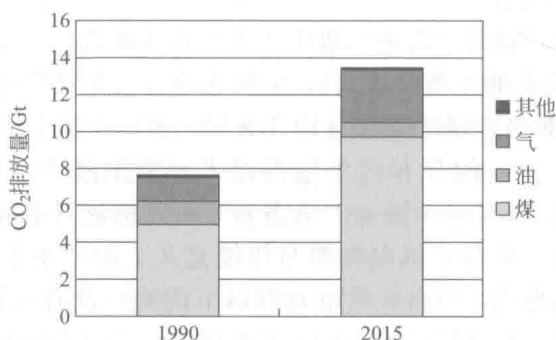


图 1-3 1990 年与 2015 年热电生产 CO₂ 排放量的对比

化石燃料在世界各地分布广泛，由于储量或出于经济性考虑，在一定时期内将缺乏可替代资源。截至 2017 年，在全球电力结构中，燃煤火电占比 38%，燃气火电占比 23%^[5]。燃煤和燃气作为重要发电方式之一将会在未来一段时间内仍然作为主要电力来源，也是电力工业生产中二氧化碳的主要排放源之一。

1.3 二氧化碳减排途径

目前，控制燃煤燃气等化石燃料型电厂二氧化碳排放的措施按技术结构主要分

为三大类：①提高电力生产的效率，如采用超高参数的发电机组、联合循环等新型先进机组或采用燃料电池等发电形式，并合理规划电网中各种机组负荷分配；②促进能源替代，大力发展可再生能源，如核电、水电、风电、太阳能、生物质等；③直接从火力发电厂的烟气中分离二氧化碳，然后对其进行储存或加以利用。其中，第三类方法又称为二氧化碳捕集、利用与封存（CO₂ Capture Utilization and Storage, CCUS）技术。

1.3.1 改善电源结构及合理规划电网负荷分配

改善电源结构主要包括建设超（超）临界火力机组，开发分布式能量系统及燃料电池系统等，扩大先进低排放、低能耗机组在电网中的比例。

火电厂超超临界机组和超临界机组是按照锅炉内工质（水）的压力来定义的。水的临界压力是 22.115MPa，临界温度是 347.15℃，在这个压力和温度时，水和蒸汽的密度是相同的，为水的临界点。炉内工质压力低于临界压力就叫亚临界锅炉，大于临界压力就是超临界锅炉，炉内蒸汽温度不低于 593℃或蒸汽压力不低于 31MPa 被称为超超临界锅炉。超临界、超超临界火电机组具有显著的节能和改善环境的效果，超超临界机组与超临界机组相比，热效率要提高 1.2%，一台机组一年可节约约 6000t 优质煤。我国目前建设的大都是高效率、高参数的超临界（SC）和超超临界（USC）机组。

分布式能量系统是相对于传统的集中式供电方式而言的，是指将发电系统以小规模（数千瓦至 50MW 的小型模块式）、分散式的方式布置在用户附近。这个概念从 1978 年美国公共事业管理政策法（PURRA）公布后正式在美国推广，而后逐渐被其他国家接受。当今的分布式供电方式主要采用液体或气体燃料的内燃机（IC）、微型燃气轮机（microturbines）和各种工程用的燃料电池（fuel cell）。因其具有良好的环保性能，分布式供电电源与传统意义上的“小机组”已不是同一概念。与集中供电电站相比，分布式供电具有以下优势：没有或有很低输配电损耗；不需建设配电站，可避免或延缓增加的输配电成本；适合多种热电比的变化，可使系统根据热或电的需求进行调节从而增加设备年利用小时数；土建和安装成本低；各电站相互独立，用户可自行控制，不会发生大规模供电事故，供电的可靠性高；可进行遥控和监测区域电力质量和性能；非常适合对乡村、牧区、山区、发展中区域及商业区和居民区提供电力；污染物排放量较低。

燃料电池（fuel cell）是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置，其概念是 1839 年由 G. R. Grove 提出的。燃料电池十分复杂，涉及化学热力学、电化学、电催化、材料科学、电力系统及自动控制等学科的有关理论，具有发电效率高、环境污染少等优点。总的来说，燃料电池具有以下特点。

① 能量转化效率高，直接将燃料的化学能转化为电能，中间不经过燃烧过程，因而不受卡诺循环的限制。目前燃料电池系统的燃料-电能转换效率为 45%~

60%，而火力发电和核电的效率大约为30%~45%。

② 有害气体 SO_x 、 NO_x 及噪声排放都很低， CO_2 排放因能量转换效率高而大幅度降低，且无机械振动。

③ 燃料适用范围广。

④ 模块化强，规模及安装地点灵活，燃料电池电站占地面积小，建设周期短，电站功率可根据需要由电池堆组装，十分方便。燃料电池无论作为集中电站还是分布式电站，或是作为小区、工厂、大型建筑的独立电站都非常合适。

⑤ 负荷响应快，运行质量高，燃料电池在数秒内就可以从最低功率变换到额定功率，而且电厂离负荷可以很近，从而改善了地区频率偏移和电压波动，降低了现有变电设备和电流载波容量，减少了输变线路投资和线路损失。

电源规划是指通过电力调度部门，根据网内各类型发电机组的效率、功率及排放特性统筹规划各发电机组所承担电量的过程。电源规划是电力系统电源布局的战略决策，在电力系统规划中处于十分重要的地位，规划的合理与否将直接影响系统今后运行的可靠性、经济性、电能质量、总体污染物排放、网络结构及其将来的发展。近年来，电力系统的规模和发电机组容量不断增大，再加上发电机组类型及所采用的一次能源的多样化，使电源结构日益复杂，电力市场的出现也使电源规划模型发生了重大变化。随着公众环保意识的增强，电力部门不得不改进设备或运行策略来减少电厂污染物排放及温室气体排放^[6,7]。

1.3.2 可再生能源系统

可再生能源泛指多种取之不竭的能源，如太阳能、风能和地热能等。从本质上说，大部分的可再生能源其实都是太阳能的储存。本节主要介绍利用可再生能源的发电系统，包括太阳能光伏发电及热发电系统、风能发电系统和地热能发电系统。

(1) 太阳能发电系统

太阳能发电系统按照太阳能的不同利用方式可分为太阳能光伏发电(PV)和太阳能热发电两大类。

太阳能光伏发电利用太阳光照射在一些特殊材料上引起材料中电子移动，形成电势差的光伏效应发电。按照并网方式，可分为独立运行和并网运行两种方式。独立运行的光伏发电系统需要有蓄电池作为储能装置，主要用于无电网的边远地区和人口分散地区，整个系统造价较高；在有公共电网的地区，光伏发电系统与电网连接并网运行，省去蓄电池，不仅可以大幅度降低造价，而且具有更高的发电效率和更好的环保性能。

太阳能热发电是利用聚光集热器将能量巨大的太阳辐射能转换成热能并通过热力循环持续发电的技术。在工业领域，太阳能热发电已有近百年历史，前苏联曾建造了世界上第一座太阳能塔式热发电试验系统。太阳能集热器是太阳能热利用的关键部件，世界上现有的太阳能热发电系统按聚光方式不同大致分为塔式系统、槽式系统和碟式系统三类。塔式和碟式系统主要用于高温发电，槽式系统用于中温发

电。塔式和碟式热发电系统大多是单独热发电或加入储热系统后的发电方式；槽式系统由于被加热流体的多样性既可以单独热发电，也可以与其他化石燃料发电系统混合发电，为太阳能混合式热发电方式。混合式发电可以利用化石燃料发电系统调整范围大的优势，省去太阳能直接热发电中的蓄热系统与透平系统，达到降低发电成本、实现连续稳定发电的目的。

目前世界上最大的太阳能热发电站是位于美国加州（加利福尼亚州）和内华达州交界的莫哈维沙漠的伊凡帕太阳能发电站，占地 8km^2 。该发电站架设了 30 万块太阳能板，收集的太阳光会被反射到高达 140m 的塔顶，在塔顶，水经过加热变为水蒸气，从而提供驱动力。

（2）风能发电系统

20 世纪 30 年代，一些国家应用航空工业的旋翼技术，成功地研制了一些小型风力发电装置，在多风的海岛和偏僻的乡村广泛使用，它的发电成本比小型内燃机的发电成本低得多。不过，限于技术水平，当时的单机容量较低，大都在 5kW 以下。目前，国内外已生产出 750kW、1500kW 的风力发电机，并已投入实际运行。

我国的风力资源极为丰富，绝大多数地区的平均风速都在 3m/s 以上，特别是东北、西北、西南高原和沿海岛屿，平均风速更大。有的地方，一年中 $1/3$ 以上的时间都是大风天，在这些地区，发展风力发电具有较好的适应性和可行性。截至 2017 年，我国新增并网风电装机 1503 万千瓦，累计并网装机容量达到 1.64 亿千瓦，占全部发电装机容量的 9.2%。风电年发电量 3057 亿千瓦·时，占全部发电量的 4.8%，比重比 2016 年提高 0.7 个百分点^[8]。

（3）地热能发电系统

地热能是来自地球深处的可再生性热能，它来源于地球的熔融岩浆和放射性物质的衰变。地下水深处循环和来自极深处的岩浆侵入地壳后，把热量从地下深处带至近表层。其储量比目前人们所利用能量的总量多得多，大部分集中分布在构造板块边缘一带，该区域也是火山和地震多发区。它不但是无污染的清洁能源，而且如果热量提取速度不超过补充的速度，那么热能是可再生的。

地热发电实际上就是把地下的热能转变为机械能，然后再将机械能转变为电能的过程。目前开发的地热资源主要是蒸汽型和热水型两类，因此，地热发电也分为两大类。

地热水中的水，按常规发电方法是不能直接送入汽轮机去做功的，必须以蒸汽状态输入汽轮机做功。目前对温度低于 100°C 的非饱和态地下热水发电，有两种方法。一种是减压扩容法，利用抽真空装置，使进入扩容器的地下热水减压汽化，产生低于当地大气压力的扩容蒸汽，然后将汽和水分离，排水，输汽充入汽轮机做功，这种系统被称为“闪蒸系统”。低压蒸汽的比体积很大，因而使汽轮机的单机容量受到很大的限制，但运行过程比较安全。另一种是利用低沸点物质，如氯乙烷、正丁烷、异丁烷和氟里昂等作为发电的中间工质，地下热水通过换热器加热，

使低沸点物质迅速汽化,利用所产生气体进入发电机做功,做功后的工质从汽轮机排入冷凝器,并在其中经冷却系统降温,又重新凝结成液态工质后再循环使用,这种方法被称为“中间工质法”,这种系统被称为“双流系统”或“双工质发电系统”。这种发电方式安全性较差,如果发电系统的封闭稍有泄漏,工质溢出后很容易发生事故。

20世纪90年代中期,以色列奥玛特(Ormat)公司把上述地热蒸汽发电和地热水发电两种系统合二为一,设计出一个新的被命名为联合循环地热发电系统的机组,该机组已经在世界上一些国家安装运行,效果很好。联合循环地热发电系统的最大优点是,可以适用于大于 150°C 的高温地热流体(包括热卤水)发电,经过一次发电后的流体,在不低于 120°C 的工况下,再进入双工质发电系统,进行二次做功,这就充分利用了地热流体的热能,既提高了发电的效率,又能将以往经过一次发电后的排放尾水进行再利用,大大地节约了资源。

1.3.3 二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)技术

在应对全球气候变暖的众多措施中,CCS技术得到了越来越多的重视。CCS技术包括三个步骤:二氧化碳捕集并分离压缩至约 110bar ($1\text{bar}=10^5\text{Pa}$)、运输技术以及地质埋存或其他用途。一些发达国家已经开展基于CCS技术的全流程商业示范。但是,不论对于发达国家还是发展中国家来说,整个CCS系统非常昂贵。因此,另外一个思路就是 CO_2 的部分利用,这样不仅能减少碳排放,还能获得一定的经济效益。为此,我国提出系统发展碳捕集、利用与封存技术的概念,并在国际社会上产生了一定影响。CCUS技术是中国根据自己的实际情况选择的碳减排路线,是指将 CO_2 从电厂等工业或其他排放源分离,经捕集、压缩并运输到特定地点加以利用或注入储层封存以实现被捕集的 CO_2 与大气长期分离的技术。CCUS技术一般包括以下几个方面:二氧化碳捕集、运输、利用和封存。其中,二氧化碳的利用主要是在封存的同时实现利用(驱油、驱煤层气等)。二氧化碳的资源化利用可以创造一定的经济效益,减少CCUS技术的综合成本。CCUS与CCS实质上是一样的,只是前者多了一个利用环节,在成本上更有优势。

① 捕集阶段 从电力生产、工业生产和燃料处理过程中分离、收集 CO_2 ,并净化和压缩。目前,常用的 CO_2 捕集方式主要有燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集,其中以燃烧后捕集方式应用最广、技术上最为成熟。

② 运输阶段 CO_2 的运输状态可以是气态、超临界状态、液态、固态等,但是从大规模运输的可行性方面考虑,流体态(包括气态、超临界状态和液态) CO_2 便于大规模运输,管道运输通常采用超临界状态。目前采用的 CO_2 运输方式主要有管道运输、轮船运输和罐车运输,这三种运输方式各有优缺点,适用于不同的运输场合与条件。管道运输适合大容量、长距离和负荷稳定的定向运输;轮船运输适合大容量、超远距离、靠近海洋或江河的运输;罐车运输适用于中短距离、小容量的运输,其运输相对灵活。

③ 封存阶段 碳封存是指将二氧化碳长期封存于生物圈、地下构造或海洋中，以减少二氧化碳在空气中的含量。利用常规地质圈闭构造和非常规地质圈闭构造来储存 CO_2 都是有效的方法。常规地质圈闭构造包括油田、气田和不含烃的储气层（主要是深部含盐水层）三种。对于前两种，由于对已开采油气田的构造和地质条件较为熟悉，利用它们来储存相对更容易。另外，利用含盐水层地质储存有两个优点：一是含盐水层的圈闭构造比油田和气田更普遍；二是在含盐水层中可能有一些适于储存 CO_2 的巨大储气构造。此外，还可以把 CO_2 埋存在地下深部的不可采深煤层，同时还能增加煤层气的产量。非常规地质圈闭构造的处理包括海上与陆地两部分，已有试验证明在深海密封储存 CO_2 是可行的。

④ CO_2 的利用 在封存的同时实现 CO_2 的利用，可以创造一定的经济利益，降低 CCUS 技术的总体成本。 CO_2 的利用可分为物理应用、化学应用、生物应用三类。在物理应用方面：有制冷剂、饮料添加剂、 CO_2 保护焊等日常应用；有利用超临界 CO_2 流体萃取提纯多种生物的精素；有利用 CO_2 强化采油（ CO_2 -EOR），即将 CO_2 注入油气层，起到驱油作用，在提高采收率的同时实现碳封存；还有利用 CO_2 提高煤层气采收率、提高天然气采收率、强化页岩气开采、地质封存联合咸水开采、强化开采地热、置换甲烷水合物等。在化学应用方面：有生成无机化工产品、污水处理、合成尿素等日常应用；有钢渣矿化利用；有 CO_2 制甲烷、 CO_2 合成高分子聚合物等。在生物应用方面：有微藻固定 CO_2 转化为生物燃料，即利用微藻的光合作用，将 CO_2 和水在叶绿体内转化为单糖和氧气，单糖可在细胞内继续转化为中性甘油三酯，甘油三酯酯化后形成生物柴油；有微藻固定 CO_2 转化为生物肥料，即利用微藻的光合作用，将 CO_2 和水在叶绿体内转化为单糖和氧气，同时丝状蓝藻将空气中的无机氮转化为可被植物利用的有机氮；还有植物气肥、果蔬保鲜等。

图 1-4 为可行的 CCS 系统流程图，简要示出了排放源、运输和储存方式的处理流程与范围。

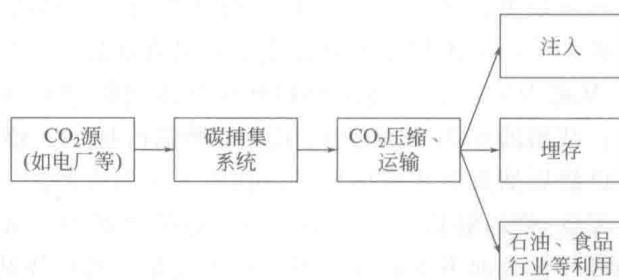


图 1-4 可行的 CCS 系统流程图^[9]

近年来，国内外 CCS 研究得到了极大重视，多所高校和国有企业积极进行 CCS 相关研究。其中，国际工程实践项目代表为边界大坝（Boundary Dam）CCUS 项目，国内工程实践项目以华能石洞口碳捕集项目为代表。

华能国际电力股份有限公司上海石洞口第二电厂是我国首座建成 $2 \times 600\text{MW}$ 超临界机组的大型燃煤发电企业,于1992年投产。2008年12月2日,中国华能集团与上海电气集团在上海签订《华能上海电气温室气体减排研究中心合作协议》。为支持2010年上海“世博会”的配套绿色电源工程,华能集团决定在华能上海石洞口第二电厂投资兴建 CO_2 捕集装置。2009年12月,石洞口二厂10万吨级 CO_2 捕集项目顺利投产,开创了我国燃煤电站实现 CO_2 捕集规模化生产的先河,为当时世界上最大的燃煤电厂烟气 CO_2 捕集装置。按照石洞口二厂“碳捕集”装置设计能力,年运行可达8000h, CO_2 捕集量可达10万吨/年。

参 考 文 献

- [1] Arrhenius S A. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the earth[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1970, 9(251): 14.
- [2] Yang H, Xu Z, Fan M, et al. Progress in carbon dioxide separation and capture: A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 14-27.
- [3] IEA. 20 Years of Carbon Capture and Storage. Accelerating Future Deployment, 2016.
- [4] Stewart C, Hessami M A. A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach[J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46(3): 403-420.
- [5] IEA. Global Energy & CO_2 Status Report, 2017.
- [6] El-Keib A A, Ma H, Hart J L. Economic dispatch in view of the clean air act of 1990[J]. Power Systems IEEE Transactions on, 1994, 9(2): 972-978.
- [7] Abido M A. Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(7): 1105-1113.
- [8] 方梦祥,晏水平,王金莲,等.烟气中 CO_2 化学吸收法脱除技术分析与发展[C]//二氧化碳减排控制技术与资源化利用研讨会. 2009: 1018-1024.
- [9] IEA. Technology Roadmap Carbon Capture and Storage. 2013.