

火电厂二氧化碳减排策略及潜力分析

杨亚利, 杨龙, 寻志伟

(国能锦界能源有限责任公司, 陕西 神木 719300)

摘要: 据统计, 以化石能源为主的火电厂的碳排放是当前二氧化碳的集中排放源, 是导致空气质量恶化、温室效应加剧的重要元凶, 因此减少二氧化碳排放已成为电力行业刻不容缓的任务之一。二氧化碳捕集及资源化技术是当前电力行业最具发展潜力的减碳对策与措施, 本文综述了火电厂的碳捕集技术, 同时对燃烧前捕集、燃烧中捕集以及燃烧后捕集等不同种类的碳捕集技术路线以及各自的优缺点进行了梳理, 其间重点对比分析了富氧燃烧和燃烧后捕集的技术经济性。在此基础上, 探讨了二氧化碳分离捕集后的利用问题, 即资源化技术。最后, 对低碳发展背景下碳捕捉及资源化利用技术的发展前景进行了展望。

关键词: 火电厂; 节能减排; 碳捕集; 碳资源化

中图分类号: X773

文献标识码: A

文章编号: 1671-0711 (2023) 07 (上) -0125-03

近 10 年来, 随着气候变暖, 温室效应已经成为全球的研究热点, 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在 2020 年发布的第六次报告明确指出, 二氧化碳与全球变暖之间的影响关系更加明显, 在全球范围内减少二氧化碳排放量已经成为许多国家的共识。

中国的能源结构集中在二氧化碳排放量巨大的化石能源上。火电厂的燃煤发电是国内碳排放第一大户, 其碳排放量约占全国总量的 40%。因此, 减少我国二氧化碳排放量, 应对气候变化, 最重要的方法之一就是控制火力发电厂的二氧化碳排放量。碳捕集和资源化技术是对此最具效果的技术之一, 具体措施为从火电厂烟气中回收二氧化碳, 将其永久封存或资源化处理, 这样可以控制和减少燃煤发电行业的碳排放, 这既能有效应对气候问题, 如温室效应、全球气候变暖等, 又能在可持续发展中提高能效和发挥重要作用。

1 碳捕集主要技术

碳捕集技术, 是指二氧化碳捕集及封存 (Carbon dioxide Capture and Storage, CCS) 技术, 于 2006 年 IPCC 发布《CCS 技术特别报告》后开始受到广泛关注。通常是在化石燃料使用过程中对二氧化碳进行分离捕集, 根据其在使用过程中的顺序, 火电厂二氧化碳的捕集思路主要有燃烧前捕集、燃烧中捕集和燃烧后捕集三类。

1.1 燃烧前捕集技术

燃烧前捕集是指将二氧化碳在燃料燃烧前进行分离捕集的技术路线, 最典型的燃烧前脱碳系统是 IGCC 技术。该技术利用煤气化将燃料转化为气体, 再将其重整为二氧化碳和氢气合成气, 然后借助分离工艺从合成气体中分离出二氧化碳。在这一过程中, 煤炭气化与燃气一蒸汽相结合, 不断循环进行发电, 促进了能源资源的有效回收和再利用。

IGCC 系统工艺处理的烟气流量小, 二氧化碳体积分数高, 便于后续的分离和捕捉, 投资和运行费用较低, 适用范围较广, 被国际上公认为最清洁高效的燃煤技术。近年来, 相关关键技术不断发展, 从目前行业应用的成

功案例来看, 其电力供电效率已达到 43% 左右, 并可进一步提高到 50% 左右; 但该技术工艺比较复杂, 系统稳定性较低, 对现有工艺设备兼容性差而且要求较高, 导致该工艺技术的发展速度相对较慢。

1.2 燃烧中捕集技术

燃烧中捕集是指控制燃料的燃烧过程, 通过改变或者调整其气体组分, 而捕集二氧化碳的技术路线, 例如, 富氧燃烧技术就属于此类的典型代表。该技术为了提高烟气中二氧化碳的浓度, 在燃料燃烧时使用高纯度氧气作为氧化剂, 以便后续对二氧化碳进行分离, 从而降低捕集能耗。目前已有多个富氧燃烧项目在世界范围内成功运行。

富氧燃烧技术在二氧化碳减排上具有独特优势, 具有燃烧效率高、燃烧产物气量小, CO_2 浓度高, 处理简单、排烟损失小、酸性气体排放低等优点。同时, 该技术是一种高效、稳定、几乎零排放的安全性技术, 可用于与化石能源相关联的工业生产或制造过程中, 很容易对旧有项目进行改造。但这一技术设备及系统需要特定材料, 能源消耗过大, 电厂自用电比例过大, 系统投入费用过高; 另外, 锅炉结渣问题、设备腐蚀问题以及高浓度 CO_2 下的空气泄漏等问题亟待解决。

1.3 燃烧后捕集技术

燃烧后捕集, 是指利用化学吸收分离技术、物理吸附分离技术、膜分离技术和低温分离技术等, 从火电厂的尾部燃烧烟气中将二氧化碳进行分离和回收的一种技术路线。其工艺相对简单, 不改变电厂结构和能源利用方式, 对原有系统变动较少, 具有较高的灵活性, 是当前工业企业应用最广泛、最成熟的碳捕集方法, 在高效捕集二氧化碳方面大有可为。但是, 火电厂中二氧化碳分压低、烟气组成复杂、处理量大, 在捕集过程中能源消耗较大, 导致电厂投资增加, 运营费用增加, 发电效益下降。

上述三种碳捕集技术的对比如表 1 所示。

2 二氧化碳资源化技术

近年来, 地球温室效应、全球变暖成为环境方面的

表1 燃煤电厂碳捕集技术对比

捕集技术	技术路线	技术特点
燃烧前捕集	将二氧化碳在燃料燃烧之前进行分离捕集	拟处理烟气流量小、CO ₂ 浓度高、投资和运行费用较低、适用范围较广；系统稳定性相对较低、与现有工艺兼容性差
燃烧中捕集	直接对燃烧过程中进行控制，实现二氧化碳捕集	燃烧效率高、CO ₂ 浓度高、处理简单、排烟损失小、酸性气体排放低；能耗过高、电厂自用电过多、系统投资成本过大
燃烧后捕集	从尾部燃烧烟气中将二氧化碳进行分离和回收	工艺相对简单、对原有系统变动较少、灵活性高；烟气组成复杂、处理量大，捕集过程中能耗较高

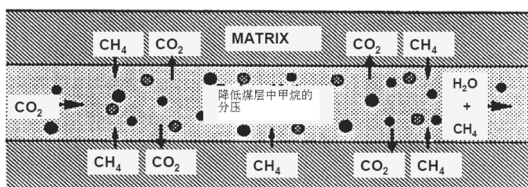
热门话题，二氧化碳便是主要罪魁祸首，同时，它也是目前地球上已知的最丰富的碳资源之一，如果用相应的技术加以利用，二氧化碳将成为不可多得的可再生资源，同时会大幅度改善地球的温室效应，并通过二氧化碳提供的可再生资源充分缓解世界能源危机，也为人类社会寻求可持续发展提供了新出路。

2.1 CO₂-EOR 技术

CO₂-EOR 技术是为了提高石油的回采率，将超临界状态下的二氧化碳直接用高压的方式注入已经开采的油层中，原油直接流到生产井中，从而提高石油的采出率。注入井中的 CO₂ 会一分为二，一部分溶于地层，或者在注入过程中溶于未开采的石油原油中；另一部分由注气井循环注入储油层，再经分离后，从生产井中与原油、水、天然气同时排出，后经分离、压缩等技术处理。这种技术在一定程度上提高了石油的产量和开采效率，也降低了二氧化碳的排放，目前此技术在实际生产过程中已经相当成熟。也正是因为经过了实际生产的检验，CO₂-EOR 技术被公认为是一种较好的利用二氧化碳的方式，也是一种极具吸引力的方法，可以在不久的将来将二氧化碳大规模资源化。目前，全球超 80% 的油田可以用此技术来提高石油产量。

2.2 CO₂-ECBM 技术

CO₂-ECBM 技术，是指将目前还无法进行商业化开采的深层煤层进行气体置换，将主要成分为甲烷的煤层气置换成二氧化碳注入其中的一种方法，是近年来新兴的、具有广阔商业前景的 CO₂ 处理技术。

图1 CO₂-ECBM 的机理

由于煤层中的甲烷被二氧化碳替代，煤层中的甲烷转变为游离状态，二氧化碳被封存在煤体中，煤层气产

量大大提高，煤体表面对二氧化碳的吸附力比对甲烷的吸附力强，约为甲烷的 2 倍。煤层吸附二氧化碳、解吸甲烷的过程如图 1 所示。调查结果表明，在全球范围内，二氧化碳的可供煤层储量接近 225GT。

2.3 氨水喷淋法

氨水喷淋是一种利用化学反应吸收二氧化碳并产生氮肥 NH₄HCO₃ 的方法，简称氨水喷淋。由此产生的副产品 NH₄HCO₃ 是一种氮肥，在我国农业中普遍应用，具有很高的经济价值。但 NH₄HCO₃ 在土壤中不稳定，施用后易分解释放二氧化碳。为了解决此问题，可在生产过程中加入特定稳定剂，从而提高氮肥稳定性。氨水喷淋与 MEA 法相比具有明显优势：其吸收二氧化碳效率可达 99%，吸收量可高至 1.2kgCO₂/kg NH₃；氨元素易再生，二氧化碳纯度高；成本只相当于 MEA 溶液（工业级）的 1/6。

3 富氧燃烧与燃烧后捕集的技术经济性对比

采用相同的装机容量，燃烧后采集系统计算出的相关技术经济参数与富氧燃烧系统的经济技术参数进行比较后，计算出富氧燃烧电站系统的技术经济性分析，对比结果见表 2。

表2 富氧燃烧与燃烧后捕集的技术经济性对比

指标	未捕集	燃烧后	富氧燃烧
总投资 / 亿元	12.08	18.16	20.68
供电标煤耗 / (gce · kW ⁻¹ · h ⁻¹)	355.65	500.38	517.50
厂用电率 / %	10.04	36.06	39.94
成本电价 / (元 · MW ⁻¹ · h ⁻¹)	254.04	685.21	714.39

由表 2 对比可知：

从电站投资角度分析，传统燃煤电站系统投资成本相对较低，添加捕集系统的电站无疑会增加电站投资成本，添加燃烧后捕集系统的电站相比添加富氧燃烧系统的电站投资成本较高。

从电源标煤耗和工厂耗电量方面进行分析，富氧燃烧系统在装备了高能耗制氧系统和压缩凝练提纯系统的前提下，在经济性方面依然不占优势，其比燃烧后收集系统需要付出更高的电价。但这并不妨碍富氧燃烧系统在未来成为有潜力大型化或商业化的二氧化碳捕集方式，制氧系统、压缩凝练提纯系统等技术不断成熟，也为其奠定了技术基础。

4 未来发展潜力分析

从现阶段来看，燃烧前捕集技术主要是应用于 IGCC 电厂，且应用得较为成功和广泛，但由于该工艺技术复杂，投资成本高，只能用于新建发电厂，燃烧前捕集在效率以及污染物的控制方面具有较大潜力。富氧燃烧目前并没有进行广泛应用，处于研发阶段，如果新建项目使用，前期大型空分装置导致投资成本较高，使用过程中会产生较高能耗，其升降压系统使用过程中并不可逆，导致能耗损失过大，综上所述，富氧燃烧技术尚未成熟，※

城市电磁频谱活动特性建模与分析

刘虚左¹, 单一峰²

(1. 合肥第八中学校, 安徽 合肥 230000; 2. 南京外国语学校, 江苏 南京 210000)

摘要: 普及电磁环境的卫生安全知识、合理使用电磁频谱资源的前提是对电磁环境及电磁频谱特性的准确认识。本文以城市电磁频谱背景为分析对象, 引入合成频谱热度(HC)作为定量描述一个频段频谱强度的指标, 借鉴SMA、EMA、EDMA、MACD、KDJ等股票指标分析模型, 从无线电业务频段及典型无线电业务两个方面开展了典型城市环境下的电磁频谱活动特性的分析与可视化, 探索了认识我们日常生活电磁环境特性的方法, 为我们了解和掌握身边的电磁环境提供一种直观的可理解的参考指标。

关键词: 电磁环境; 电磁频谱; 合成频谱热度; 时间序列处理; 业务频段

中图分类号: TN98; TP311.52

文献标识码: A

文章编号: 1671-0711(2023)07(上)-0127-07

1 背景及意义

手机及其应用的开发为日常生活提供了便利的同时也带来了越来越多的社会问题, 例如, 学生手机的滥用引发的家长焦虑和学校管理方面的冲突, 已经逐步成为不同年龄阶段的群体关注的话题。

1.1 电磁环境引发的卫生安全风险

随着全球无线通信技术在日常生活领域的广泛应用, 特别是近年来提出的物联网、5G、自动驾驶、低空飞行器等, 人们越来越多地暴露于电磁场中, 逐步引发了公众对电磁场健康影响的持续关注。

1.2 电磁频谱资源的有效合理使用

今天, 电磁频谱已经成为我们的日常生活的重要资源。移动支付、城市安防、自然灾害监控、应急通信、智能家居、移动通信、无线网络热点、广播电台、气象观测等都需要占用不同的电磁频谱资源。

2 电磁背景分析与处理建模

本节首先从复杂电磁背景的定义出发, 介绍了电磁背景的内涵。利用划分时间区间和频率区间的电磁背景

分析方法, 构建了电磁背景时频表达模型。然后给出了基于合成频谱热度的频谱数据处理模型, 利用移动平均和指数平滑法等处理基础模型对一段时间的合成频谱热度进行处理, 得到一段时间内某一业务频段的合成频谱热度的一组移动平均数据。最后得到基于移动平均数据的两种频谱背景趋向指标, 即平滑异同平均指标MACD和随机指标KDJ。

2.1 电磁频谱背景内涵分析

复杂电磁环境是指在一定的战场空间内, 由空域、时域、频域、能量域上分布的, 数量繁多、样式复杂、密集重叠、动态交迭的电磁信号构成的电磁环境。本文对电磁频谱背景的定义是在一定的空间内, 以众多电磁辐射频谱的整体结构为基准, 构成成分和变化规律复杂, 影响信号监测的频谱背景, 包括静态电磁频谱背景和动态电磁频谱背景。从以上定义可以看出, 电磁频谱背景包含两个方面: (1) 构成成分复杂, 存在哪些辐射源; (2) 变化规律决定其变化的主要因素有哪些。下面首先对电磁背景的构成成分进行介绍。

※ 仍需不断地进行改进。燃烧后捕集技术理论上适用于任何一种发电厂, 是目前应用最广泛、最成熟的碳捕集技术, 其主要研究途径是如何更好地节约成本, 提高碳捕集的效率, 其技术成熟, 且运用广泛, 是目前二氧化碳捕集的最主要方式。

国内外研究表明, 碳捕集技术有望得到长足发展。在碳中和背景下, 随着经济的不断发展, 能源的消耗也在不断增加, 而目前中国的能源转化率较低, 控制温室气体排放是中国可持续发展战略的重要组成部分。去除二氧化碳主要依赖森林碳汇和碳捕集技术。相关测算模型表明, 我国在2060年仍将排放约13.8亿吨二氧化碳, 除森林碳汇吸收外, 剩余约4亿吨二氧化碳需要通过碳捕集技术处理, 其均直接证实了碳捕集和资源化技术有着巨大的市场需求空间。

5 结语

作为全球最大的温室气体排放源, 化石燃料发电厂若能减少锅炉烟气中的碳排放, 那么就能有效控制和缓

解全球气候变暖。碳捕捉及资源化利用无疑是减少二氧化碳排放量最有效的技术, 它既可提高原料的总利用率, 降低捕获成本, 提高产品的市场竞争力, 又可为社会提供社会效益、经济效益良好的二氧化碳产品。

但是, 我国的碳捕集技术仍在摸索、攻关中。仍存在着投入大、能耗高、风险不确定等问题, 短时间内很难发挥更大的作用。总体上还处在研发、生产、示范的起步阶段, 离大面积推广还有不小的差距。因此, 我们要继续明确研究领域, 加大政策扶持力度, 合理组织碳捕集示范工程建设, 深入推进碳捕集技术创新。

参考文献:

- [1] 王润芳, 马大卫, 黄齐顺等. 安徽省火电厂超低排放改造对减排成效的影响[J]. 华电技术, 2020(09).
- [2] 邵露洁. 火力发电厂脱硫超低排放改造技术探讨[J]. 低碳世界, 2020(09).
- [3] 本刊作者. 2000—2020年全球主要地区和国家CO₂排放量[J]. 世界石油工业, 2021(04).