

环保电厂碳排放监测与减排技术研究

杨逸飞 付宏杰

华能国际电力江苏能源开发有限公司南京电厂 江苏 南京 210035

摘要：环保电厂虽注重环保生产，但碳排放问题仍存。其碳排放主要源于燃料燃烧及辅助系统，具有时空和成分特征。碳排放监测技术包括直接监测与间接核算，但存在数据准确性不足、覆盖范围有限、协同性差等问题。减排技术涵盖燃烧优化、碳捕集利用与封存、可再生能源耦合及能效提升等方面。研究环保电厂碳排放监测与减排技术，对推动电力行业低碳发展具有重要意义。

关键词：环保电厂；碳排放监测；减排技术；碳捕集；低碳发展

1 环保电厂碳排放来源与特征

1.1 主要碳排放来源

环保电厂虽致力于环保生产，但碳排放问题仍不可忽视。其碳排放主要源自燃料燃烧过程。在燃煤电厂中，煤炭作为主要燃料，在锅炉内燃烧时，其中的碳元素与氧气发生化学反应，生成二氧化碳并释放大量热能，这是燃煤电厂碳排放的最主要来源。煤炭中还含有一定量的硫、氮等元素，燃烧时会产生二氧化硫、氮氧化物等污染物，同时也会伴随少量二氧化碳的额外生成。对于燃气电厂，天然气是主要燃料。天然气的主要成分是甲烷，在燃烧过程中，甲烷与氧气反应生成二氧化碳和水。尽管天然气燃烧相对清洁，产生的污染物较少，但二氧化碳排放量依然可观^[1]。燃气电厂在运行过程中，部分未完全燃烧的天然气泄漏也会带来一定的碳排放。生物质电厂以生物质为燃料，如农作物秸秆、林业废弃物等。生物质在燃烧时同样会发生碳的氧化反应，产生二氧化碳。不过，由于生物质在生长过程中吸收了大气中的二氧化碳，理论上其燃烧排放的二氧化碳具有碳中和特性，但在实际运行中，生物质的收集、运输和预处理等环节会消耗能源，从而产生额外的碳排放。除了燃料燃烧，环保电厂的辅助系统也会产生碳排放。电厂的废水处理、废气净化等环保设施在运行过程中也需要消耗能源和化学药剂，同样会产生一定量的碳排放。

1.2 碳排放特征

环保电厂的碳排放具有明显的时空特征。从时间维度来看，碳排放量与电厂的运行负荷密切相关。在用电高峰期，电厂需要满负荷运行，燃料消耗量大，碳排放量也相应增加；而在用电低谷期，电厂运行负荷降低，碳排放量也会随之减少。另外，不同季节的碳排放量也存在差异。从空间维度来看，环保电厂的碳排放主要集中在锅炉、汽轮机等主要生产区域。这些区域

的燃料燃烧和能量转换过程剧烈，二氧化碳排放集中。电厂的燃料储存和运输环节也可能存在碳排放泄漏问题，尤其是在燃料装卸和堆放过程中，若管理不善，会导致部分燃料挥发或自燃，产生二氧化碳排放。环保电厂的碳排放还具有成分特征，除了主要的二氧化碳排放外，还会含有少量的甲烷、氧化亚氮等温室气体。这些温室气体的全球增温潜势远高于二氧化碳，虽然其排放量相对较少，但对气候变化的影响也不容忽视。电厂排放的废气中还可能含有颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等污染物，这些污染物与温室气体相互作用，会对环境产生更复杂的影响。

2 环保电厂碳排放监测技术

2.1 直接监测技术

直接监测技术是通过通过对电厂排放的废气进行实时采样和分析，直接测定其中二氧化碳等温室气体的浓度和流量，从而计算出碳排放量。常见的直接监测技术包括非分散红外吸收法（NDIR）、气相色谱法（GC）和激光光谱法等。非分散红外吸收法是基于二氧化碳等气体对特定波长红外光的吸收特性来测定气体浓度的方法。该方法具有响应速度快、测量精度高、稳定性好等优点，广泛应用于电厂碳排放的在线监测。通过在电厂烟道中安装红外吸收传感器，实时监测废气中二氧化碳的浓度，并结合流量计测量的废气流量，即可计算出碳排放量。气相色谱法是一种将气体样品分离后进行分析的方法，该方法可以同时测定废气中多种温室气体的浓度，具有分离效率高、分析精度高等特点^[2]。在电厂碳排放监测中，气相色谱法通常用于对采样气体进行离线分析，以验证在线监测结果的准确性。激光光谱法是利用激光与气体分子之间的相互作用来测定气体浓度的方法。该方法具有高灵敏度、高选择性、快速响应等优点，能够实现对电厂废气中微量温室气体的准确监测。激光光谱

法可以分为可调谐二极管激光吸收光谱法（TDLAS）、腔衰荡光谱法（CRDS）等，不同类型的激光光谱法适用于不同的监测场景和气体种类。

2.2 间接核算方法

间接核算方法是通过收集电厂的生产运行数据，如燃料消耗量、燃料热值、发电量等，结合相关的碳排放系数，计算出电厂的碳排放量。常见的间接核算方法包括基于燃料消耗的核算方法和基于输入输出的核算方法。基于燃料消耗的核算方法是最常用的间接核算方法之一，该方法根据电厂消耗的不同类型燃料的数量和热值，乘以相应的碳排放系数，得到各种燃料的碳排放量，然后将各种燃料的碳排放量相加，即可得到电厂的总碳排放量。基于输入输出的核算方法是一种综合考虑电厂生产过程中各种输入和输出因素的核算方法。该方法不仅考虑了燃料消耗产生的碳排放，还考虑了电厂运行过程中消耗的电力、水资源等其他输入因素，以及电厂产生的废水、废渣等其他输出因素对碳排放的影响。通过建立输入输出模型，对电厂的生产过程进行全面分析和核算，能够更准确地计算电厂的碳排放量。

3 环保电厂碳排放监测技术存在的问题

3.1 数据准确性不足

直接监测技术在实际应用中容易受到多种因素的影响，导致监测数据准确性不足。例如，非分散红外吸收法可能会受到废气中水蒸气、颗粒物等干扰物质的影响，从而影响二氧化碳浓度的测量精度；气相色谱法在样品采集和预处理过程中可能会引入误差，导致分析结果不准确；激光光谱法对仪器设备的精度和稳定性要求较高，若仪器设备出现故障或校准不准确，也会导致监测数据偏差。间接核算方法的准确性也受到多种因素的制约。一方面，燃料消耗量、燃料热值等基础数据的测量可能存在误差，例如燃料计量设备的精度有限、燃料采样不均匀等，都会影响数据的准确性；另一方面，碳排放系数的选择也会对核算结果产生较大影响。目前，不同机构发布的碳排放系数存在一定差异，如何选择合适的碳排放系数是一个亟待解决的问题。

3.2 覆盖范围有限

现有的碳排放监测技术主要侧重于对电厂主要排放口的监测，对于电厂的一些辅助系统和边角区域的碳排放监测覆盖不足。例如，电厂的燃料储存和运输环节、废水处理设施等产生的碳排放往往没有被纳入监测范围，导致电厂的实际碳排放量被低估。另外，对于一些间歇性排放的污染源，如电厂的启停机过程、设备故障时的排放等，目前的监测技术也难以实现全面、准确的

监测。

3.3 协同性差

环保电厂的碳排放监测涉及多个部门和多个环节，需要不同部门之间的协同合作和数据的共享。然而，目前电厂内部各部门之间以及电厂与外部监管部门之间的信息沟通和协同工作机制还不够完善，导致碳排放监测数据分散、不一致，难以形成全面、准确的碳排放监测体系。例如，电厂的生产运行部门、环保部门和财务部门在数据收集和管理方面存在差异，缺乏统一的数据标准和规范，使得不同部门提供的数据难以直接对比和分析^[3]。

4 环保电厂碳排放减排技术

4.1 燃烧优化技术

燃烧优化技术是通过对接电厂锅炉的燃烧过程进行优化调整，提高燃料的燃烧效率，减少不完全燃烧损失，从而降低碳排放。常见的燃烧优化技术包括低氮燃烧技术、富氧燃烧技术和分层燃烧技术等。低氮燃烧技术通过调整燃烧器的结构和燃烧方式，控制燃烧过程中的温度和氧气浓度，抑制氮氧化物的生成，同时提高燃料的燃烧效率。例如，采用分级燃烧技术，将燃料和空气分级送入炉膛，使燃料在缺氧条件下进行部分燃烧，然后再与二次空气混合完成充分燃烧，这样可以降低燃烧温度，减少氮氧化物的生成，同时提高燃料的利用率。富氧燃烧技术是利用高纯度的氧气代替空气进行燃烧，由于氧气中不含氮气，燃烧过程中不会产生氮氧化物，同时可以提高燃烧温度和燃烧速度，使燃料燃烧更加充分，减少碳排放。富氧燃烧技术还可以实现二氧化碳的富集和回收，为后续的碳捕集和利用提供便利。分层燃烧技术是根据燃料的特性和燃烧要求，将燃料在炉膛内进行分层布置和燃烧，使燃料在不同阶段得到充分的燃烧和利用。例如，在循环流化床锅炉中，通过合理控制床料的粒度和流化速度，实现燃料的分层燃烧，提高燃烧效率，降低碳排放。

4.2 碳捕集利用与封存（CCUS）技术

碳捕集利用与封存技术是将电厂排放的二氧化碳进行捕集、分离和提纯，然后将其转化为有用的产品或进行封存，以减少二氧化碳向大气中的排放。CCUS技术主要包括碳捕集、碳利用和碳封存三个环节。碳捕集技术是CCUS技术的关键环节，常见的碳捕集方法包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集等。燃烧前捕集是在燃料燃烧前将其转化为含氢和一氧化碳的合成气，然后通过物理或化学方法将二氧化碳从合成气中分离出来；燃烧后捕集是在燃料燃烧后的烟气中捕集二氧化碳，常用的方法有化学吸收法、物理吸附法和膜分离法等；富

氧燃烧捕集是利用富氧燃烧技术产生的高浓度二氧化碳烟气,通过简单的压缩和净化处理即可实现二氧化碳的捕集。碳利用技术是将捕集到的二氧化碳转化为有用的产品,如化工产品、燃料、建筑材料等。例如,二氧化碳可以与氢气反应合成甲醇、甲烷等燃料,也可以用于生产尿素、纯碱等化工产品;二氧化碳还可以作为原料用于生产碳酸钙、碳酸钠等建筑材料。碳封存技术是将捕集到的二氧化碳注入到地下地质构造中,如枯竭的油气田、深层盐水层等,实现二氧化碳的长期封存。碳封存技术可以有效减少二氧化碳向大气中的排放,但需要解决二氧化碳的泄漏和地质稳定性等问题。

4.3 可再生能源耦合技术

可再生能源耦合技术是将可再生能源与环保电厂的传统能源进行耦合利用,提高能源利用效率,减少碳排放。常见的可再生能源耦合技术包括太阳能-燃煤耦合发电技术、风能-燃气耦合发电技术和生物质能-煤炭耦合燃烧技术等。太阳能-燃煤耦合发电技术是将太阳能集热系统与燃煤电厂的锅炉系统相结合,利用太阳能集热器收集的热量加热锅炉给水,减少燃煤的消耗,从而降低碳排放。该技术可以在不改变燃煤电厂原有设备的基础上,实现太阳能的高效利用,提高电厂的能源利用效率。风能-燃气耦合发电技术是将风力发电与燃气轮机发电相结合,当风力充足时,优先利用风力发电;当风力不足时,启动燃气轮机发电,以保证电力供应的稳定性。该技术可以充分发挥风能和天然气的优势,实现能源的互补利用,减少对传统化石能源的依赖,降低碳排放。生物质能-煤炭耦合燃烧技术是将生物质与煤炭混合后送入锅炉进行燃烧,利用生物质的可再生特性,减少煤炭的消耗,降低碳排放。生物质中含有的碱金属和碱土金属等元素可以促进煤炭的燃烧,提高燃烧效率,减少污染物的排放。

4.4 能效提升技术

能效提升技术是通过通过对电厂的设备进行升级改造和优化运行管理,提高能源利用效率,减少能源消耗,从

而降低碳排放。常见的能效提升技术包括汽轮机通流部分改造、锅炉受热面改造、余热回收利用技术等。汽轮机通流部分改造是通过通过对汽轮机的叶片、喷嘴等通流部件进行优化设计,减少蒸汽在汽轮机内的流动损失,提高汽轮机的内效率。例如,采用先进的叶片型线和气动设计技术,可以降低蒸汽的泄漏损失和余速损失,提高汽轮机的出力和热效率^[4]。锅炉受热面改造是通过通过对锅炉的省煤器、空气预热器等受热面进行优化布置和增加换热面积,提高锅炉的热效率。例如,在省煤器中采用高效传热元件,可以增强烟气与水的换热效果,降低排烟温度,提高锅炉的热效率。余热回收利用技术是将电厂生产过程中产生的余热进行回收和利用,如锅炉排烟余热、汽轮机排汽余热等。通过安装余热回收装置,如余热锅炉、换热器等,将余热转化为蒸汽或热水,用于供热、发电或其他生产过程,提高能源利用效率,减少碳排放。

结束语

环保电厂碳排放监测与减排技术研究是应对气候变化、实现低碳发展的关键。当前监测技术虽有进展,但问题仍存,需不断改进完善。减排技术多样,为降低碳排放提供了多种途径。未来,应持续加强技术创新,提高监测数据准确性,扩大监测覆盖范围,加强部门协同,推动减排技术广泛应用,助力环保电厂实现低碳、可持续发展,为全球气候治理贡献力量。

参考文献

- [1]张国文,李建,林得地,等.基于在线监测的热电厂碳排放动态评估与控制[J].资源节约与环保,2025(3):20-23.
- [2]李娜.电厂碳排放数据规范化管理措施[J].科海故事博览,2022(34):85-87.
- [3]马虹.智慧能源及碳排放监测管理云平台系统方案的研究[J].计算机测量与控制,2020(12):46-47.
- [4]高建强.燃煤电厂碳排放对可控运行参数变化的敏感性分析[J].动力工程学报,2020(07):97-98.