

火电厂节能减排技术探究

姜文斌¹ 王维东²

青岛龙发热电有限公司

摘要：本文将深入探讨火电厂的节能减排技术，并针对火电厂节能减排技术的应用挑战和新兴技术进行了简要总结，希望可以为有关人员提供些许参考，从而打开节能减排新局面，使节能减排技术得到更好地应用。

关键词：火电厂；节能减排技术；应用探究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.070

引言：火电厂作为发电主力，因对环境造成了很大影响，引发了一系列的环境问题，必须通过节能减排技术的有效应用，成功塑造绿色环保的能源系统，与全球可持续发展目标保持一致，从根本上改进火力发电的效率，为环保计划的有效落实奠定下良好的基础，产生最大化的经济效益、社会效益和生态效益。

一、火电厂的简要概述

火电厂，也被称为热电厂，是通过利用热量来生产电力的大型设施。以下是火电厂的主要类型：（1）燃煤发电厂：燃煤发电厂是最常见和最成熟的火力发电厂类型之一。它们依靠煤炭作为主要燃料来源。该过程首先在锅炉中燃烧煤以产生高压蒸汽。然后，这些蒸汽被引导通过涡轮机，涡轮机驱动发电机发电。几十年来，燃煤电厂一直是发电不可或缺的一部分，但它们也因二氧化碳（CO₂）排放和其他污染物而引发环境问题。

（2）天然气发电厂：天然气发电厂使用天然气作为主要燃料来源。这些电厂可进一步分为两种主要类型：开式循环燃气轮机（OCGT）和联合循环燃气轮机（CCGT）电厂。OCGT发电厂使用燃气轮机直接发电，而CCGT发电厂则采用燃气轮机和蒸汽轮机的联合循环。与煤炭相比，天然气发电厂以其排放量相对较低而闻名，使其成为一种更清洁的能源选择。它们通常用于峰值电力或补充可再生能源。（3）燃油发电厂：燃油发电厂利用原油或重燃油作为主要能源。由于担心油价波动和环境影响，这些工厂如今已不太常见。虽然它们可以提供可靠的电力来源，但由于二氧化碳排放量和空气污染较高，与其他选择相比，它们通常被认为不太环保。（4）生物质发电厂：生物质发电厂利用木材、农作物残留物和其他生物质原料等有机材料作为燃料来源。这些工厂燃烧生物质产生热量和蒸汽，驱动涡轮机发电。只要生物质来源可持续，生物质发电厂就被视为可再生能源。它们因减少碳排放和促进可持续废物管理而受到重视。

（5）地热发电厂：地热发电厂利用地球内部的热量来发电。它们依赖于地壳的自然热梯度。从地热储层中提取水或蒸汽，用于驱动涡轮机发电。地热能被认为是一种清洁的可再生能源，温室气体排放量最少。（6）太阳能热发电厂：太阳能热发电厂使用镜子或透镜聚集阳光，将流体（通常是热油）加热到高温，后用于产生蒸汽并驱动涡轮机发电。光热发电厂是一种可持续的可再生能源选择，特别是在阳光充足的地区。

二、火电厂的节能技术

（一）提高锅炉效率

锅炉是火电厂的核心部件，在水和燃料燃烧产生蒸汽方面发挥着重要作用。提高锅炉效率可以优化整体能量转换过程。以下是实现这一目标所采用的几种技术和策略：其一，超临界和超超临界锅炉：与传统的亚临界锅炉相比，超临界和超超临界锅炉在更高的温度和压力下运行。这些条件提高了热力学效率和传热速率。超临界和超超临界蒸汽循环可实现超过45%的效率水平，显著降低单位发电量的燃料消耗和二氧化碳排放。其二，热电联产（CHP）系统：热电联产（CHP）系统也称为热电联产，旨在捕获和利用发电过程中产生的废热。除了发电之外，热电联产系统还可以引导多余的热量，为工业流程、区域供暖或空间供暖提供蒸汽或热水。这种能源的双重用途提高了工厂的整体效率并减少了能源浪费。其三，先进燃烧技术：分级燃烧、富氧燃烧等燃烧技术创新，使燃料燃烧更加彻底、高效。分级燃烧涉及在燃烧室的不同点控制空气或燃料的引入，以优化燃烧过程。氧燃料燃烧用氧气代替空气，以实现更高的燃烧温度并减少氮氧化物（NO_x）排放。其四，高效燃烧器：高效燃烧器旨在提供均匀、高效的燃料燃烧，同时最大限度地减少过量空气。低过量空气水平可减少热量损失并提高燃烧效率，从而减少燃料消耗和排放。其五，改进的隔热和热回收：增强锅炉部件和热回收系统的隔热可最大限度地减少热损失。隔热管道、锅炉外壳和热交换器有助于保留系统内的热量，从而减少维持蒸汽温度所需的额外燃料。此外，热回收系统捕获烟气中的废热，并将其重新用于预热给水，从而提高热效率。其六，锅炉控制系统：先进的锅炉控制系统使用传感器和实时数据分析来优化锅炉运行。这些系统可调节燃烧参数，例如燃料空气比和蒸汽温度，以满足不断变化的负载需求并保持最佳效率水平。

（二）提高涡轮机性能

涡轮机是火电厂的重要组成部分，因为它们将高压蒸汽中的能量转化为机械功，最终成功发电。提高涡轮机性能可以最大限度提高能量转换效率。以下是实现这一目标所采用的各种技术和策略：其一，先进材料和涂层：涡轮机在极端的温度和压力条件下运行。使用先进材料和涂层（例如超级合金和热障涂层）可提高涡轮机的耐用性和效率。这些材料可以承受更高的温度并减少热量损失，从而提高性能。其二，蒸汽路径优化：蒸汽路径优化涉及重新设计和重新配置通过涡轮机的蒸汽流，以最大限度地减少能量损失并最大限度地提高功率输出。修改叶片轮廓和级的布置可以优化蒸汽膨胀并提高整体效率^[2]。其三，可变几何涡轮机：可变几何涡轮机具有可调节的叶片和喷嘴，可以更好地控制蒸汽流量和压降。这种适应性使涡轮机能够在各种运行条件下保持最高效率，从而提高负载波动期间的性能。其四，联合循环发电厂：联合循环发电厂将燃气轮机与蒸汽轮机集成在一起，利用燃气轮机排出的废气为蒸汽轮机产生蒸汽。这种配置通过利用废热产生额外的电力来提高工厂的整体效率。联合循环发电厂的效率可远高于50%。其五，有机朗肯循环（ORC）涡轮机：ORC涡轮机用于废热回收应用。它们使用沸点比水低的有机工作流体，从而能够从低温源中提取热量。ORC涡轮机可用于从工业过程或地热源中回收能量。其六，涡轮机改造和升级：可以使用现代组件和控制系统对现有涡轮机进行改造，以提高性能。升级可能包括更换老化零件、优化叶片轮廓以及安装先进仪器以更好地控制和监控。

（三）高效冷却系统

火电厂冷却系统不仅能够维持设备温度，还能确保设备的高效运行。冷却系统的选择可以显著影响能源消耗和环境可持续性。以下是提高效率的关键冷却技术和策略：其一，风冷冷凝器（ACC）：风冷冷凝器使用环境空气来冷却从涡轮机排出的蒸汽。与传统的水冷冷凝器不同，ACC无须大型冷却水系统。该技术在缺水或环境法规严格的地区尤其有益。其二，干式冷却系统：干式冷却系统，包括干式冷却塔和间接干式冷却系统，利用空气作为冷却介质来减少水的消耗。这些系统节能且环保，对于干旱地区或面临水资源短缺挑战的发电厂来说是有吸引力的选择。其三，混合冷却系统：混合冷却系统结合了湿式和干式冷却方法的元素。它们在环境温度较高时使用水冷却，在较温和的条件下改用空气冷却。混合系统提供灵活性并减少用水量^[3]。其四，冷却系统优化：优化冷却系统的运行，例如调整风扇速度和优化风扇叶片角度，可以提高效率。采用变速驱动器和

控制装置使冷却系统能够动态响应不断变化的条件。其五，使用处理过的水或循环水：发电厂可以通过使用处理过的水或循环水进行冷却来减少淡水消耗。处理废水或使用再生水可以最大限度地减少用水对环境的影响。

三、火电厂的减排技术

（一）烟气脱硫（FGD）系统

烟气脱硫（FGD）系统也称为洗涤器，是火电厂用于去除烟气中二氧化硫（SO₂）的关键排放控制技术。SO₂是酸雨的主要来源，释放到大气中会带来健康风险。FGD系统旨在捕获并中和SO₂，然后再将其排放到空气中。采用多种类型的FGD系统，每种都有其自己的机制和优点：其一，湿式洗涤器：湿式洗涤器是最常见的FGD系统之一。它们的工作原理是将碱性浆液（通常由石灰或石灰石组成）喷入烟道气流中。烟气中的SO₂与碱性浆液反应形成亚硫酸钙和硫酸钙，它们作为固体副产物被去除。湿式洗涤器可有效实现高SO₂去除效率，通常超过90%。其二，干式洗涤器：干式洗涤器使用干吸附剂（例如石灰粉或碳酸氢钠）与烟气中的SO₂发生反应。将吸附剂注入烟道气流中，并使用颗粒物控制装置收集反应产物。干式洗涤器适用于水资源有限的发电厂，通常与织物过滤器或静电除尘器（ESP）结合使用。其三，喷雾干燥吸收器（SDA）：喷雾干燥吸收器是采用半干工艺的湿式洗涤器的变体。它们利用石灰浆或其他碱性试剂，将其雾化并与喷雾干燥室中的热烟气混合。烟气中的水分被蒸发，SO₂与试剂反应形成固体颗粒，并被下游颗粒控制装置捕获。其四，循环流化床（CFB）FGD：CFBFGD系统使用流化床反应器来促进SO₂的吸收。吸附剂材料作为流化床悬浮，允许与烟气有效接触。CFBFGD系统以其处理高硫含量燃料并实现高SO₂去除率的能力而闻名。

（二）颗粒物（PM）控制

颗粒物（PM）控制技术旨在去除火电厂烟气排放中的固体颗粒，例如灰烬、灰尘和烟灰。颗粒物排放不仅会造成空气污染，吸入后还会对健康产生不利影响。发电厂使用多种颗粒物控制方法来缓解这些问题：其一，静电除尘器（ESP）：ESP是广泛使用的PM控制设备，它利用静电力使烟气中的颗粒带电并收集。带电粒子被吸引到收集板或电极上，然后作为固体废物被去除。ESP可有效捕获细颗粒，适用于高温应用。其二，织物过滤器（袋式除尘器）：织物过滤器也称为袋式除尘器，由一系列织物袋或过滤介质组成，当烟气通过时捕获颗粒。收集到的颗粒会定期从袋子中取出并进行处理。袋式除尘器可有效捕获细颗粒和粗颗粒，并且通常与其他排放控制技术结合使用。其三，旋风分离器：旋风分离

器利用离心力从烟气流中分离颗粒^[4]。它们通常用作预收集器，在气体进入其他PM控制设备（例如ESP或袋式除尘器）之前去除较大、较粗的颗粒。旋风分离器相对简单且具有成本效益，但它们可能不如其他方法有效地捕获细颗粒。其四，具有PM控制功能的湿式洗涤器：一些湿式洗涤系统，例如前面提到的喷雾干燥吸收器（SDA），也可以捕获颗粒物和SO₂。在SDA系统中，SO₂和吸附剂反应期间形成的固体颗粒被收集在下游颗粒控制装置中。其五，先进过滤技术：持续的研究促进了先进过滤技术的发展，包括陶瓷过滤器和膜过滤器，可提高颗粒物去除效率并减少维护要求。

（三）氮氧化物（NO_x）减少

氮氧化物（NO_x）排放，包括一氧化氮（NO）和二氧化氮（NO₂），是造成空气污染的主要因素，并与地面臭氧、烟雾和呼吸系统健康问题的形成有关。氮氧化物减排技术旨在通过控制燃烧过程中氮氧化物的形成和燃烧后处理来减少这些排放。火电厂通常采用以下几种氮氧化物减排策略：其一，低氮氧化物燃烧器：低氮氧化物燃烧器旨在改变燃烧过程以减少氮氧化物的形成。他们通过控制燃料和空气的混合来实现这一目标，确保燃烧更加均匀和高效。通过降低火焰温度和减少燃烧区氧气的可用性，低氮氧化物燃烧器可以显著减少氮氧化物排放。其二，选择性催化还原（SCR）：SCR是一种燃烧后NO_x还原技术，利用催化剂促进NO_x化学还原成无害的氮气（N₂）和水（H₂O）。在此过程中，氨（NH₃）被注入烟气中，催化剂促进NH₃和NO_x之间的反应。SCR系统非常有效，可以实现超过90%的NO_x去除效率。其三，选择性非催化还原（SNCR）：SNCR是另一种燃烧后氮氧化物还原方法，涉及在高温下将氨或尿素注入烟气中。注入的试剂与氮氧化物反应形成氮气和水。SNCR系统可有效减少氮氧化物排放，但与SCR相比，其去除效率通常较低。其四，燃烧改进：燃烧改进技术涉及改变燃烧过程以减少氮氧化物排放。这可以包括调整燃油喷射正时、空燃比和燃烧器设计。燃烧改进策略通常与低氮氧化物燃烧器相结合，以实现更大程度的氮氧化物减排。其五，燃烧后氮氧化物吸附：一些先进技术涉及使用吸附剂或吸附剂来捕获燃烧后的氮氧化物。这些材料与氮氧化物发生化学反应，可以再生重复使用。

四、火电厂节能减排技术的应用挑战和新兴技术

（一）应用挑战

火电厂节能减排技术的实际应用可能面临以下几种挑战：挑战一，资金成本高：火电厂采用节能减排技术的主要障碍之一是初始资金投入较高。对于许多运营商来说，超临界和超超临界锅炉、先进燃烧系统以及碳捕

获和储存（CCS）等技术的成本可能过高，尤其是在发展中经济体。挑战二，技术成熟度：一些先进技术，如CCS的先进气化和富氧燃烧，仍处于研发阶段。它们在商业发电厂中的可扩展性和可靠性需要进一步测试和完善，这可能会延迟它们的广泛采用。挑战三，并不确定的监管环境：排放控制的监管环境可能会发生变化，未来环境法规的不确定性可能会阻碍对减排技术的投资。如果没有明确和稳定的监管框架，发电厂运营商可能会犹豫是否进行重大投资。

（二）新兴技术

展望未来，火电厂应对以下的新兴技术进行有效应用，长效推进节能减排工作。新兴技术是指：（1）碳捕获与利用（CCU）技术：该技术能准确捕获发电厂排放的二氧化碳，并将其转化为有价值的产品，例如化学品、建筑材料或合成燃料。（2）人工智能（AI）和数据分析技术：这些技术可被用于火电厂运营维护的全面优化。以预测性维护、实时监控的方式，维护系统的正常运行，保证能源的稳定传输。（3）混合发电厂：在混合发电厂中结合多种能源，例如太阳能、风能和天然气，可以实现更可靠和可持续的发电。这些集成系统可以平衡间歇性可再生能源与化石燃料的稳定性，从而不断减少排放量^[5]。（4）分散式发电：分布式能源，包括小型天然气热电联产（CHP）系统和微电网，正变得越来越普遍。这些系统通过在更接近使用点的地方发电来提高能源效率和可靠性。

结束语

总而言之，火电厂必须对节能减排技术的应用意义、应用价值、应用要点和积极作用有着深刻的认识，必须用好节能减排技术，积极应对各种挑战，并且开发新兴技术，持续探索多元路径，建成一个更高效、更清洁、更环保的能源系统，推动电力行业的快速转型，促进整个社会的和谐发展。

参考文献

- [1] 闫俊北, 刘聪. 火电厂节能减排的必要性与措施分析[J]. 能源与节能, 2021(12): 51-52.
- [2] 鄢志勇. 火电厂节能减排现状及降耗效能研究[J]. 百科论坛电子杂志, 2021(22): 2400.
- [3] 项晓伟. 火电厂节能减排方案及效益评价对策研究[J]. 大科技, 2021(8): 315-316.
- [4] 赵智慧, 赵娜. 基于节能减排理念的火电厂热工自动化设计及运用研究[J]. 中国设备工程, 2021(9): 9-10.
- [5] 解小军. 火电厂锅炉节能减排技术分析[J]. 数字用户, 2022, 28(16): 124-126.