

火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术分析

安柠灿

贵州西电电力股份有限公司鸭溪发电运营分公司, 贵州 遵义 563108

DOI:10.61369/ETQM.2025060026

摘要： 在全球能源需求持续攀升的当下，传统能源储备渐趋紧张，加之节能减排已成为国际社会广泛遵循的刚性要求，火力发电厂作为能源消耗与生产的关键主体，提升自身能源利用效率迫在眉睫。锅炉尾部烟气在日常运行中携带了极为可观的余热，若任其直接排入大气，无疑是对宝贵能源的巨大浪费。而通过高效手段对这部分余热加以回收利用，能够显著提升电厂整体热效率，降低发电成本。

关键词： 火力发电厂；锅炉尾部烟气；余热利用技术

Technical Analysis of Waste Heat Utilization of Flue Gas At the Tail of Boiler of Thermal Power Plant

An Ningcan

Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Yaxi Power Generation Operation Branch, Zunyi, Guizhou 563108

Abstract： As the global energy demand continues to rise, the traditional energy reserves are becoming increasingly tight, and energy conservation and emission reduction have become a rigid requirement widely followed by the international community. The flue gas at the tail of the boiler carries a considerable amount of waste heat in daily operation, and if it is allowed to be discharged directly into the atmosphere, it is undoubtedly a huge waste of precious energy. The recovery of this part of the waste heat through efficient means can significantly improve the overall thermal efficiency of the power plant and reduce the cost of power generation.

Keywords： thermal power plants; boiler tail flue gas; waste heat utilization technology

火力发电在全球电力供应中占据着重要地位。然而，火力发电厂在运行过程中存在着能源浪费的问题，其中锅炉尾部烟气带走了大量的热量。一般情况下，锅炉尾部烟气温度在120–180°C之间，这部分余热若直接排放到大气中，不仅造成了能源的浪费，还对环境产生热污染。随着能源危机的加剧和环保要求的不断提高，如何高效利用锅炉尾部烟气余热已成为火力发电领域的研究热点。合理利用这部分余热，不仅可以提高电厂的能源利用效率，降低发电成本，还能减少温室气体排放，具有显著的经济和环境效益。因此，深入研究火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术具有重要的现实意义。

一、锅炉尾部烟气余热利用的必要性

（一）能源浪费现状

在火力发电厂的运行体系中，锅炉承担着将煤炭等化石燃料的化学能转化为热能的关键任务，产生的高温高压蒸汽驱动汽轮机旋转进而发电。然而，受限于锅炉设备自身特性以及复杂的能量转换过程，多种形式的热损失不可避免，极大地制约了实际发电效率。其中，锅炉尾部烟气所携带的热量损失极为显著。在传统火力发电系统中，经严谨测算，锅炉尾部烟气带走的热量占总输入热量的比例高达5%–15%。以一座装机容量为100万千瓦的大型火力发电厂为例，若其年运行小时数为5000小时，每小时消耗煤炭约300吨，按10%的烟气余热损失率计算，每年因烟气余

热未回收而浪费的能量，折合标准煤约达15万吨。这些本可利用的能量，以高温烟气形式直排大气，未参与发电环节，致使大量煤炭等宝贵化石燃料被无端消耗，在全球能源资源日趋紧张的当下，解决此问题已刻不容缓^[1]。

（二）环保压力

随着全球气候变化影响的日益凸显，各国深刻认识到节能减排的重要性，纷纷出台严苛的环保法规，旨在严控温室气体与各类污染物排放。火力发电厂因庞大的能源消耗规模，在燃料燃烧过程中，向大气排放大量二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物以及颗粒物等污染物，成为环保监管的重点对象，承受着巨大压力。锅炉尾部排出的高温烟气，不仅裹挟大量余热，其携带的污染物更是环境污染的重要源头。借助余热利用技术降低烟气温度，可从

两方面助力环保。一方面，减少能源消耗意味着从根源减少燃料燃烧量，从而间接削减污染物生成与排放。另一方面，较低的烟气温度能优化后续脱硫、脱硝、除尘设备运行工况，提升污染物脱除效率，为实现碳减排目标贡献关键力量，契合绿色发展的时代需求^[4]。

二、常见的锅炉尾部烟气余热利用技术类型

（一）传统省煤器与空气预热器技术

传统省煤器安装在锅炉尾部烟道内，利用烟气余热加热锅炉给水。其工作原理是通过热传导和对流换热，将烟气中的热量传递给管内流动的给水。给水温度升高后，进入锅炉汽包参与汽水循环，减少了锅炉燃料消耗。省煤器的结构相对简单，通常由一系列钢管组成，具有较高的可靠性和稳定性。空气预热器则用于加热燃烧所需的空气，同样安装在锅炉尾部烟道。它通过烟气与空气之间的热交换，使空气温度升高后送入炉膛。预热后的空气能促使燃料更充分地燃烧，提高燃烧效率，进而提升锅炉热效率。常见的空气预热器有管式和回转式两种，管式空气预热器结构紧凑，传热效率较高；回转式空气预热器则具有体积小、受热面大的特点^[5]。

（二）热管式余热回收技术

热管是一种高效的传热元件，由管壳、吸液芯和工作介质组成。热管式余热回收装置利用热管的高效传热特性，实现锅炉尾部烟气余热的回收。在热管的蒸发段，高温烟气将热量传递给管内的工作介质，使其蒸发汽化。蒸汽在压差作用下流向冷凝段，在冷凝段与被加热介质（如水或空气）进行热交换，放出热量后凝结成液体。液体在吸液芯的毛细力作用下回流至蒸发段，完成一个循环。热管式余热回收技术具有传热效率高、结构紧凑、等温性好等优点。它可以灵活布置在烟道内，适应不同的烟气温度和流量条件，并且能够有效避免冷热流体之间的泄漏问题^[6]。

（三）冷凝式余热回收技术

冷凝式余热回收技术主要针对锅炉尾部烟气中的水蒸气潜热进行回收。当烟气温度降低到露点温度以下时，烟气中的水蒸气会凝结成液态水，释放出大量的潜热。冷凝式余热回收装置通常采用特殊的换热器，通过与低温介质（如凝结水或空气）进行热交换，使烟气温度降低至露点以下，实现水蒸气的冷凝和潜热回收。该技术不仅可以回收烟气的显热，还能回收潜热，大大提高了余热回收效率。同时，水蒸气冷凝过程中还能去除烟气中的部分酸性气体和颗粒物，减轻后续环保设备的负担，具有良好的节能减排效果。

三、锅炉尾部烟气余热利用技术原理及优势

（一）技术原理

1. 热传导与对流换热原理

传统省煤器、空气预热器以及热管式余热回收装置等，均构建于热传导与对流换热这两大基础原理之上。在这些装置运行时，高温烟气以一定流速冲刷受热面，因烟气与受热面存在显著

温度差，依据对流换热原理，热量从高温烟气传递至受热面表面。在省煤器内，高温烟气横向掠过排列紧密的钢管管束，湍急的烟气流不断冲击钢管外壁，以对流换热的方式将大量热量传递给管壁。紧接着，基于热传导原理，热量穿过管壁，传递至管内流动的被加热介质，比如省煤器中的给水^[5]。管壁材质具有良好的导热性，热量能够快速、高效地传导，从而使给水温度稳步升高。同样，在空气预热器和热管式余热回收装置中，热传导与对流换热过程协同作用，将烟气余热有序传递给相应介质，此基础传热方式在火力发电领域凭借其稳定性与可靠性被广泛采用。

2. 相变传热原理

热管式余热回收技术与冷凝式余热回收技术深度依托相变传热原理。热管作为核心元件，内部充装特定工作介质，当热管蒸发段接触高温烟气时，工作介质吸收热量，从液态迅速沸腾转变为气态，发生剧烈相变。这一过程中，工作介质吸收大量汽化潜热，热量得以高效存储。气态工作介质在微小压差驱动下，快速流向冷凝段，此时，在冷凝段与低温被加热介质进行热交换，气态工作介质释放潜热后，重新凝结为液态，借助吸液芯的毛细力作用，回流至蒸发段，完成一次高效的热量传递循环。冷凝式余热回收装置中，当烟气温度降低至露点温度以下，烟气中蕴含的水蒸气在低温换热器表面遇冷，从气态转变为液态，释放出大量潜热。相较于仅涉及温度变化的显热传热，相变传热因相变过程中巨大的潜热释放，能够传递更多热量，极大地提升了余热回收装置的整体效能^[6]。

（二）技术优势

1. 提高能源利用效率

回收锅炉尾部烟气余热，是提升火力发电厂能源利用效率的关键举措。以省煤器为例，省煤器利用烟气余热将进入锅炉的给水温度大幅提升。根据热力学原理，给水温度升高后，锅炉将给水加热至饱和蒸汽状态所需的热量显著减少。这意味着在产生等量蒸汽时，可降低燃料投入量，进而降低发电煤耗。冷凝式余热回收技术则更进一步，不仅回收烟气显热，更突破性地将从水蒸气潜热纳入回收范畴。通过精准控制烟气冷却过程，使水蒸气充分冷凝，释放出大量潜热用于加热其他介质，极大地增加了可利用热量总量，显著提升电厂整体热效率，有效减少能源在生产过程中的无端损耗，实现能源的高效利用^[7]。

2. 降低运行成本

能源利用效率提升所带来的直接效益便是燃料消耗的减少。火力发电厂的主要运行成本源于燃料采购，余热利用技术使单位发电量的燃料使用量降低，直接削减了燃料成本支出。同时，余热利用技术的应用，改变了电厂内部的能量供应格局。例如，空气预热器通过预热燃烧空气，改善燃料燃烧条件，让燃料燃烧更为充分，减少了因不完全燃烧导致的燃料浪费^[8]。而且，高效的余热回收系统可能替代部分传统辅助加热设备，减少设备运行时的电能、热能消耗，以及设备日常维护、维修成本，从多维度降低电厂整体运行成本，增强电厂的市场竞争力。

3. 环保效益显著

余热利用技术对环保的积极影响是多方面且深远的。首要的

是,因燃料消耗降低,煤炭等化石燃料燃烧产生的温室气体,如二氧化碳、甲烷等,以及各类污染物,像二氧化硫、氮氧化物和颗粒物等的排放量随之减少。以冷凝式余热回收技术为例,在回收余热的过程中,水蒸气冷凝形成的液态水会吸附并溶解烟气中的酸性气体,如二氧化硫等,同时对部分颗粒物也具有一定的捕集作用。这一过程在不额外增加复杂环保设备的前提下,协同实现了余热回收与污染物削减,显著提升电厂环保水平,助力缓解环境污染问题,为构建绿色生态环境贡献力量。

四、锅炉尾部烟气余热利用技术的发展趋势

(一) 多技术耦合集成

未来,为了进一步提高锅炉尾部烟气余热利用效率,将多种余热利用技术进行耦合集成是发展趋势之一。例如,将热管式余热回收装置与冷凝式余热回收装置相结合,先利用热管式装置回收烟气的显热,降低烟气温度,再通过冷凝式装置回收剩余的显热和潜热。这种多技术耦合的方式可以充分发挥不同技术的优势,实现余热的梯级利用,提高整体余热回收效率。同时,还可以将余热利用技术与其他先进的能源转换和存储技术相结合,如与蓄热技术结合,将回收的余热在低谷电时段储存起来,在高峰电时段释放用于发电或其他用途,提高能源利用的灵活性和经济性^[9]。

(二) 智能化控制与优化

随着信息技术的不断发展,智能化控制与优化将在锅炉尾部烟气余热利用技术中得到更广泛的应用。通过安装在余热回收系统中的各类传感器,实时监测烟气温度、流量、成分以及被加热

介质的温度、流量等参数。利用先进的控制算法和智能控制系统,根据这些实时参数自动调整余热回收设备的运行状态,如调节热管的工作温度、控制冷凝式余热回收装置的换热面积等,以实现余热回收系统的最优运行。智能化控制与优化可以提高余热回收系统的响应速度和控制精度,适应不同工况下的余热回收需求,进一步提高能源利用效率。

(三) 新型材料与设备研发

为了提高余热回收设备的性能和可靠性,新型材料与设备的研发也是未来的重要发展方向。例如,研发具有更高导热系数和耐腐蚀性能的材料用于制造热管和换热器,以提高传热效率和设备的使用寿命。开发新型的高效冷凝换热器,能够更好地适应不同烟气成分和工况条件,提高水蒸气的冷凝效率和潜热回收效果。此外,还将注重研发体积小、重量轻、结构紧凑的余热回收设备,以减少设备占地面积,降低设备投资成本,提高余热回收技术的应用可行性和经济性^[10]。

四、结论
火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术对于提高能源利用率、降低运行成本和减少环境污染具有重要意义。常见的余热利用技术包括传统省煤器与空气预热器技术、热管式余热回收技术和冷凝式余热回收技术等,它们各自基于不同的技术原理,在提高能源利用效率、降低运行成本和实现环保效益方面展现出显著优势。未来,锅炉尾部烟气余热利用技术将朝着多技术耦合集成、智能化控制与优化以及新型材料与设备研发等方向发展。通过不断创新和改进,这些技术将在火力发电行业中发挥更大的作用,助力火力发电厂实现可持续发展,在满足能源需求的同时,更好地应对能源危机和环境挑战。

参考文献

- [1] 韩志永. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探究 [J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(02): 237-239. 版), 1-9[2025-04-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20231117.1608.002.html>.
- [2] 刘英龙. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术的实践分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(10): 305-307. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2023.10.101.
- [3] 赵麟. 分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术 [J]. 中国设备工程, 2023, (05): 108-110.
- [4] 赵冠雄. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术研究 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(07): 252-253+335. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.07.098.
- [5] 王鸿飞. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探索 [J]. 应用能源技术, 2021, (09): 51-54.
- [6] 吉廷伟. 机组负荷280MW以上锅炉尾部烟道低频振动问题的防治研究 [J]. 机电信息, 2020, (32): 46-47. DOI: 10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2020.32.025.
- [7] 王代刚. 火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术 [J]. 中国新技术新产品, 2016, (12): 79-80. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2016.12.052.
- [8] 温芝香, 支泽林. 火力发电厂锅炉尾部烟道低温腐蚀的危害与防范措施 [J]. 特种设备安全技术, 2016, (01): 10-11.
- [9] 尹延平. 火力发电厂锅炉尾部受热面区域检查养护技术 [J]. 工业设计, 2015, (10): 164+166.
- [10] 李小明, 赵建刚. 火力发电厂尾部烟道增设低压省煤器的实际应用 [J]. 科学之友, 2013, (09): 9-10.