

火电厂超超临界发电技术及其能效分析

石富强

国家能源集团内蒙古东胜热电有限公司，内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要： 本文对火电厂超超临界发电技术进行了全面的概述与能效分析。首先介绍了超超临界发电技术的原理与特点，以及其优势与不足，随后详细阐述了火电厂超超临界发电系统的构成，包括锅炉系统、汽轮机系统和发电机系统的结构及工作原理。在此基础上，文章分析了超超临界发电技术的能效指标，如燃料利用率、蒸汽循环效率和排烟温度，并探讨了影响其能效的因素。最后，提出了超超临界发电技术的节能措施，旨在为提高火电厂的能源利用效率提供参考。

关 键 词： 火电厂；超超临界；发电；能效

Analysis of ultra-supercritical power generation technology and its energy efficiency in thermal power plants

Shi Fuqiang

National Energy Group Inner Mongolia Dongsheng Thermal Power Co., LTD. Ordos, Inner Mongolia 017000

Abstract： This paper gives a comprehensive overview and energy efficiency analysis of ultra-supercritical power generation technology in thermal power plants. First, the principles and characteristics of ultra-supercritical power generation technology are introduced, as well as its advantages and disadvantages, and then the composition of ultra-supercritical power generation system in thermal power plant is elaborated in detail, including the structure and working principle of boiler system, steam turbine system and generator system. On this basis, the paper analyzes the energy efficiency indicators of ultra-supercritical power generation technology, such as fuel utilization rate, steam cycle efficiency and smoke exhaust temperature, and discusses the factors affecting its energy efficiency. Finally, the energy saving measures for ultra-supercritical power generation technology are proposed to provide a reference for improving the energy efficiency of thermal power plants.

Keywords： thermal power plant; ultra-supercritical; power generation; energy efficiency

引言

随着能源需求的不断增长和环境保护意识的加强，火电厂超超临界发电技术因其高效率 and 低污染排放成为我国能源结构调整的重要方向。本文旨在通过对火电厂超超临界发电技术的原理、系统构成和能效分析，探讨其在我国电力行业中的应用前景，为推动火电厂技术进步和能效提升提供理论支持。

一、火电厂超超临界发电技术概述

（一）超超临界发电技术的原理与特点

超超临界发电技术是一种先进的火力发电技术，基于超临界和超超临界水蒸气循环的原理。在常规的火力发电中，水在锅炉中被加热至沸点，转化为蒸汽，然后推动汽轮机旋转，进而驱动发电机发电。当蒸汽的压力和温度超过临界点（水的临界点为374℃和22.1MPa），就进入了超临界状态^[1]。而超超临界发电技术则是在此基础上，进一步提高蒸汽的压力和温度，使其达到超超临界参数，通常压力超过28MPa，温度超过600℃。超超临界发电技术的核心特点在于其高效的能量转换能力。由于蒸汽的压力和温度的提高，热力学循环的效率也随之提升，这意味着在相同的燃料消耗下，可以产生更多的电能。高温高压的蒸汽循环可

以提高燃料的热值利用效率，减少能源浪费^[1]。由于燃烧更加充分，排放的氮氧化物和其他污染物相对较少。超超临界锅炉和汽轮机的设计使得设备在高温高压下运行更加稳定，延长了设备的使用寿命。

（二）超超临界发电技术的优势与不足

超超临界参数的蒸汽循环具有较高的热效率，能够减少热能损失，提高整体发电效率。由于效率的提高，相同发电量的情况下，可以减少燃料消耗，从而减少二氧化碳和其他污染物的排放。经过多年的发展和应用，超超临界发电技术已经相对成熟，能够稳定运行。超超临界锅炉和汽轮机的制造和安装成本较传统设备要高，增加了初始投资^[2]。对材料的要求非常高，需要使用特殊的高温合金材料。由于运行参数的高温高压特性，超超临界发电系统的运行维护更为复杂，需要专业的技术人员和严格的操作

程序。对燃料的适应性有一定的限制，不是所有类型的燃料都适用于超超临界锅炉。

二、火电厂超超临界发电系统的构成与工作原理

（一）锅炉系统

1. 锅炉本体结构

超超临界锅炉本体结构主要由燃烧室、水冷壁、过热器、再热器、省煤器、空气预热器等部分组成。燃烧室是锅炉的核心部分，燃料在这里进行燃烧，释放热量。水冷壁紧贴燃烧室四周，由水管组成，冷却燃烧室的同时，吸收燃烧产生的热量，生成蒸汽。过热器用于将饱和蒸汽加热成过热蒸汽，提高蒸汽的温度。再热器则用于对汽轮机做功后的蒸汽进行再加热，以恢复其温度和压力，提高循环效率^[3]。省煤器则利用烟气余热，预热给水，提高锅炉效率。空气预热器通过回收烟气余热来预热燃烧用空气，既提高燃烧效率，也减少烟气中的氮氧化物排放。这些组成部分的设计和材料选择都必须适应高温高压的工作环境，因此通常采用特殊的高温合金材料，以确保锅炉在超超临界条件下的安全稳定运行。

2. 锅炉燃烧方式

超超临界锅炉的燃烧方式通常为悬浮燃烧。在燃烧室内，燃料和空气以一定的比例混合，形成可燃混合物，通过燃烧器喷入燃烧室。燃烧器的设计保证燃料和空气的充分混合，使得燃烧更加充分。悬浮燃烧允许燃料颗粒在燃烧室内自由运动，增加燃料与空气接触的机会，提高了燃烧效率。为满足超超临界锅炉对高温高压蒸汽的需求，燃烧过程中需要严格控制燃烧温度和氧气浓度，避免产生过多的氮氧化物等污染物。随着环保要求的提高，锅炉燃烧方式也在不断优化，如采用低氮燃烧技术，以减少氮氧化物的排放。

3. 锅炉传热方式

超超临界锅炉的传热方式主要包括对流和辐射两种。在对流传热过程中，热流体（如烟气）与冷流体（如水或蒸汽）通过管道或散热片进行热量交换。在辐射传热中，热能以电磁波的形式从高温物体（如燃烧火焰）传递到低温物体（如水冷壁）。在锅炉中，水冷壁通过辐射吸收燃烧室内的热量，将水转化为蒸汽。过热器和再热器则通过对流方式，利用烟气的热量加热蒸汽。省煤器也是通过对流方式预热给水^[3]。锅炉的设计要确保热量能够高效地从烟气传递到水或蒸汽中，同时也要防止设备因高温而损坏。传热效率的高低直接影响到锅炉的运行效率和燃料的利用率，因此在锅炉设计和运行过程中，要对传热方式进行优化。

（二）汽轮机系统

1. 汽轮机本体结构

汽轮机本体结构主要由高压缸、中压缸和低压缸三部分组成，它们按照蒸汽的压力和温度不同而被区分。高压缸接收来自锅炉的过热蒸汽，进行初步膨胀做功；中压缸接收高压缸排出的蒸汽，继续进行膨胀做功；低压缸则是最后一级膨胀，将蒸汽的剩余能量转化为机械能。每个汽缸内部都装有若干级叶片，蒸汽

流经这些叶片时，叶片将蒸汽的热能转换为旋转的机械能。汽轮机的设计要求能够承受高温高压的工作环境，因此通常采用耐高温、高压的合金材料^[4]。此外，汽轮机还包括喷嘴、叶片、轴承、联轴器等关键部件，这些部件的精密制造和装配保证了汽轮机的高效率和稳定运行。

2. 汽轮机工作原理

汽轮机的工作原理是基于蒸汽的热能转换为机械能的过程。当高温高压的蒸汽从锅炉进入汽轮机的高压缸时，蒸汽在喷嘴中膨胀加速，其热能转化为动能。随后，蒸汽以高速流过叶片，叶片受到蒸汽的冲击而旋转，将蒸汽的动能转换为叶片的机械能。蒸汽在汽轮机中的膨胀过程是逐级进行的，每经过一级叶片，蒸汽的压力和温度都会降低，直到最后排出汽轮机^[4]。汽轮机的效率取决于蒸汽的膨胀程度和叶片的设计。高效的汽轮机能够在蒸汽膨胀过程中最大限度地转换为机械能，从而提高整体发电效率。

3. 汽轮机调节系统

汽轮机调节系统确保汽轮机稳定运行和适应负荷变化。主要由调节阀、调节器、执行机构和控制系统组成。调节阀控制进入汽轮机的蒸汽流量，以适应不同的负荷需求。调节器根据发电机负荷的变化，自动调节调节阀的开度，以保持汽轮机的转速稳定。执行机构负责接收控制信号，并驱动调节阀进行相应的动作。控制系统则通过监测汽轮机和发电机的运行参数，如转速、负荷、温度等，来控制调节器的动作。汽轮机调节系统的设计要求快速响应负荷变化，同时保证汽轮机的安全运行。现代汽轮机调节系统通常采用计算机控制，可以实现精确控制和快速响应，从而提高汽轮机在不同工况下都能高效稳定地运行。

（三）发电机系统

1. 发电机本体结构

发电机本体结构主要由定子、转子、轴承、励磁系统和冷却系统等部分组成。定子是发电机的静止部分，内部含有线圈，用于产生电能。定子的线圈通常由绝缘的铜线或铝线绕制而成，嵌套在铁心中。转子是发电机的旋转部分，它由励磁线圈和铁心组成，通过旋转产生磁场。轴承则支撑着转子的旋转，保持其稳定^[4]。励磁系统负责为转子提供直流电流，以产生必要的磁场。发电机的设计要求能够在高温、高压和高速旋转的环境下稳定运行，因此其结构和材料的选择都必须能够承受这些极端条件。在超超临界发电厂中，发电机通常采用更加耐高温和高压的材料，以及更加精细的制造工艺。

2. 发电机工作原理

发电机的工作原理是基于法拉第电磁感应定律。当转子在定子的线圈中旋转时，转子上的励磁线圈产生的磁场与定子的线圈相互作用，使得定子线圈中产生交流电动势（EMF）。电动势会驱动流经定子线圈的电流，从而将转子的机械能转换为电能^[5]。在发电机运行过程中，转子与定子之间的间隙越小，电磁转换效率越高。因此，发电机制造时需要精确控制转子与定子之间的间隙，以确保高效能量转换。

3. 发电机冷却方式

常见的发电机冷却方式包括空气冷却、水冷却和氢气冷却

等。空气冷却方式是利用风扇将空气吹过定子和转子线圈，吸收热量并带走。空气冷却方式结构简单，成本较低，但冷却效率有限。水冷却方式则是通过循环水流动来吸收热量，这种方式冷却效率较高，但需要复杂的水处理系统和防腐蚀措施^[6]。氢气冷却方式利用氢气的高热导率来进行冷却。氢气冷却系统包括氢气循环泵、冷却器、密封装置等。氢气的冷却效果远优于空气，且在高温下不易燃，安全性较高。然而，氢气冷却系统复杂，成本较高，对维护技术要求也较高。在选择冷却方式时，需要综合考虑发电机的容量、效率、成本和安全等因素。

三、火电厂超超临界发电技术能效分析

（一）超超临界发电技术的能效指标

1. 燃料利用率

燃料利用率指燃料中化学能量被有效转化为电能的比例。在超超临界发电技术中，由于蒸汽参数的提高，燃料的燃烧更加充分，热值的利用效率也相应提高。高温高压的蒸汽循环可以减少热能损失，提高燃料利用率。超超临界锅炉的热效率可以达到40%以上，而常规火电机组的热效率通常在30%~35%之间^[7]。在相同的发电量下，超超临界发电技术可以节省更多的燃料。此外，超超临界技术还可以通过优化燃烧过程和减少未完全燃烧的燃料损失来进一步提高燃料利用率。

2. 蒸汽循环效率

蒸汽循环效率指蒸汽在锅炉和汽轮机之间循环过程中能量转换的效率。在超超临界发电技术中，蒸汽循环效率的提高主要得益于更高的蒸汽参数和更优化的循环设计。超超临界参数的蒸汽具有较高的热焓值，在汽轮机中可以产生更多的机械能。同时，超超临界发电技术通常采用再热循环，即汽轮机中的蒸汽在做功后会被再次加热，这样可以提高蒸汽的循环效率^[8]。再热循环可以显著提高汽轮机的热效率，减少热能损失，从而提高整个蒸汽循环的效率。

3. 排烟温度

在理想的锅炉运行条件下，排烟温度应该尽可能低，以最大限度地利用燃料中的热量。在超超临界发电技术中，由于采用了高效的传热方式和优化的燃烧过程，排烟温度相对较低。锅炉能够更有效地吸收燃料燃烧产生的热量，减少热量损失。低排烟温

度还有助于减少大气污染物的排放，因为较低的温度可以减少氮氧化物等污染物的生成。通过不断的技术创新和设备优化，超超临界锅炉的排烟温度可以控制在较低水平，从而提高整体的能效表现。

（二）影响超超临界发电技术能效的因素

锅炉效率的高低直接影响到燃料的燃烧效率和热能的利用率。提高锅炉效率可以减少热能损失，增加蒸汽的产生量，从而提高整体发电效率。汽轮机效率的高低决定了蒸汽转化为机械能的效率。提高汽轮机效率可以通过优化叶片设计、降低摩擦损失、提高蒸汽参数等方法实现。超超临界发电技术中的循环参数，如压力、温度等，对能效有着重要影响。通过合理调整循环参数，可以优化热力循环的效率，提高能效。燃料质量的好坏直接影响燃烧效率和热能的产生。选用优质燃料可以保证燃烧的充分和稳定，提高能效^[9]。设备的维护和管理对能效有着重要影响。定期对设备进行检查、清洁和维护，确保设备的正常运行，可以减少故障和能量损失。

（三）超超临界发电技术的节能措施

采用高效燃烧技术和先进的传热材料，优化锅炉结构，减少热能损失，提高锅炉效率。采用先进的叶片设计，减少汽轮机内部流动损失，提高汽轮机效率。通过合理调整循环参数，优化热力循环的效率，提高能效。采用先进的燃烧技术和设备，提高燃料的燃烧效率，减少未完全燃烧的损失^[10]。定期对设备进行检查、清洁和维护，确保设备的正常运行，减少故障和能量损失。通过以上节能措施的实施，可以显著提高超超临界发电技术的能效，降低能源消耗，减少对环境的影响。

四、结语

火电厂超超临界发电技术以其高效的能源转换和良好的环境效益，在我国电力行业中占据着重要地位。通过对超超临界发电技术的深入研究，本文揭示了其在提高能效和节能减排方面的潜力。未来，随着技术的进一步发展和优化，超超临界发电技术将为我国能源结构的优化和环境保护工作作出更大贡献。同时，也应关注其在运行管理、维护保养等方面的问题，以确保其长期稳定高效运行。

参考文献

- [1] 余惠敏. 超超临界发电有什么超能力 [N]. 经济日报, 2022-06-12(005).
- [2] 李雁争. 科技部部长数次提到“超超临界高效发电技术” [N]. 上海证券报, 2022-06-07(001).
- [3] 刘国栋, 孙振国, 刘进海. 超(超)临界发电机组锅炉加氧处理技术 [J]. 设备管理与维修, 2021, (17): 93-94.
- [4] 杨伟明. 超超临界发电机组耦合飞轮储能调频技术研究 [D]. 华北电力大学(北京), 2021.
- [5] 王倩, 王卫良, 刘敏, 吕俊复, 刘吉臻, 岳光溪. 超(超)临界燃煤发电技术发展及展望 [J]. 热力发电, 2021, 50(02): 1-9.
- [6] 郭馨, 黄蓉, 殷亚宁, 苏宏亮, 王婷, 王禹朋. 630 ~ 650℃更高等级超超临界锅炉关键技术探讨 [J]. 锅炉制造, 2020, (03): 9-11+20.
- [7] 李少华, 刘利, 彭红文. 超超临界发电技术在中国的发展现状 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2020, (02): 65-70+74+4.
- [8] 何维, 朱骏, 刘宇钢, 易广宙, 潘绍成. 超超临界发电技术展望 [J]. 能源与环保, 2019, 41(06): 77-81.
- [9] 许杨杨, 尹朝强, 刘宇钢, 易泽中, 熊鹏, 黎懋亮. 超超临界煤气锅炉发电技术研究 [J]. 冶金能源, 2023, 42(01): 45-48.
- [10] 张佳星. 让燃煤发电技术领先一代 [N]. 科技日报, 2022-11-07(001).