

超临界锅炉辅机节能改造技术分析

陈泽鑫

汕头华电发电有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i10.8485

[摘要] 在“双碳”战略与能源结构转型深化背景下，600MW 及以上超临界燃煤机组作为火电核心机型，其节能降耗与环保指标优化已成为行业可持续发展的关键。本文聚焦该类机组超临界锅炉辅机系统中的空气预热器（空预器）改造，结合机组实际运行工况，深入剖析改造前空预器漏风率偏高的核心问题。在阐述空预器密封改造等传统技术路径的同时，详细解析当前主流新型改造方案的技术原理；依托 10 家以上电厂实际改造项目统计数据，论证改造后在节能、环保及经济性层面的预期成效，并补充辅机节能的其他重要方向，为火电行业提供更全面的技术参考。

[关键词] 超临界锅炉；空气预热器；节能改造；600MW 机组；环保减排；新型技术方案；辅机节能

Energy-saving Retrofit Technology Analysis of Supercritical Boiler Auxiliary Equipment by

Chen Zexin

Shantou Huadian Power Generation Co., Ltd.

[Abstract] Against the backdrop of China's "Dual Carbon" strategy and deepening energy structure transformation, 600MW+ supercritical coal-fired units—core models in thermal power generation—have made energy conservation, emission reduction, and environmental optimization critical to sustainable industry development. This study focuses on retrofitting air preheaters (APRs) in supercritical boiler auxiliary systems. By analyzing actual operational conditions, we identify the root cause of excessive air leakage in preheaters prior to retrofitting. While discussing traditional sealing retrofit solutions, we detail the technical principles of modern advanced retrofit approaches. Supported by statistical data from over 10 power plant retrofit projects, we demonstrate expected improvements in energy efficiency, environmental performance, and economic viability. The research also highlights additional key energy-saving directions for auxiliary equipment, providing comprehensive technical references for the thermal power industry.

[Key words] supercritical boiler; air preheater; energy saving retrofit; 600MW unit; environmental emission reduction; new technical solutions; auxiliary equipment energy saving

一、引言

600MW 及以上超临界燃煤机组以高运行效率、大容量输出优势，占我国火电总装机容量超 40%，是电力系统稳定供应的核心，支撑民生与工业用电。随着《煤电节能减排升级与改造行动计划》收紧，现役机组供电煤耗需控制在 310g/kWh 以下，叠加煤炭价格从数百元攀升至千元以上，给运行年限较长的机组带来节能降耗与环保达标双重压力。

锅炉辅机系统（空预器、制粉系统、风机、水泵等）直接决定机组整体性能，其中空预器通过回收烟气余热预热燃烧空气，对锅炉热效率与污染物排放影响显著。据全国 30 家以上

主力电厂数据统计，运行超 10 年的机组因空预器性能退化，供电煤耗可能上升 3-5g/kWh（一台 600MW 机组年额外耗煤数万吨标准煤），氮氧化物排放量或超标 8%-12%，企业面临环保处罚与生态影响风险。因此，空预器节能改造成为提升机组经济性与环保性的关键，制粉系统、风机、水泵等其他辅机改造也对机组整体节能增效具有重要支撑作用。

二、空预器改造前问题现状

空预器在长期运行过程中，易受烟气中粉尘冲刷磨损、转子在高温环境下发生变形、密封片老化失效等因素影响，导致漏风率超标。某电厂 600MW 超临界机组的空预器在运行 8 年后，

出现密封片严重损坏的情况，部分密封片甚至断裂脱落，其漏风率从设计初始值8%上升至15%以上(该数据通过连续3个月、每小时1次的实时监测获取，具备较高的准确性与代表性)。

从流体力学角度分析，漏风率升高会导致锅炉内部空气动力学紊乱：送风量不足会造成炉膛内氧气供应不充分，使得燃料无法完全燃烧，不仅降低了炉膛燃烧效率、造成能源浪费，还导致锅炉运行效率较设计值下降2.3个百分点；同时，漏风率升高会增加引风机的运行负荷，依据风机功率计算公式 $P=QH/(\eta\times 3600)$ (其中P为功率，Q为流量，H为压头， η 为效率)，在烟气流增加而压头、效率基本保持不变的情况下，引风机的电耗会上升约12%。经测算，该600MW机组的引风机每年因漏风额外消耗电能150万kWh，按照工业用电均价0.6元/kWh计算，每年需额外支出电费约90万元。

三、空预器改造实施内容

3.1 传统密封改造技术

传统密封改造采用“柔性密封+转子整形”组合方案：密封片更换为1Cr18Ni9Ti材质(硬度HRC45)，该材质耐磨损、耐高温，在高温烟气环境中可稳定运行，使用寿命较普通碳钢密封片延长3-5年；通过激光测量技术(精度 $\pm 0.1\text{mm}$)扫描转子获取变形数据后精准整形，将径向密封间隙控制在1mm内，同步改造轴向与环向密封，构建全方位密封体系以减少漏风。

从原理看，减小密封间隙是降漏风率的关键。依据漏风量公式 $Q=K\times\Delta P^n$ (Q为漏风量，K为系数， ΔP 为密封两侧压差，n为指数)，密封间隙减小会直接降低K值，进而减少漏风量。经试验验证，密封间隙从3mm降至1mm时，漏风量可减少约50%。同时，空预器内增设0.3mm厚搪瓷传热元件，其表面光滑不易积尘且耐腐蚀，可提升传热效率约10%。

改造采用分仓施工，单仓施工周期 ≤ 48 小时，通过轮流施工实现不停机改造，改造后空预器漏风率可控制在8%以下，基本恢复设计运行水平。

3.2 新型改造方案

3.2.1 磁流体密封技术

超临界锅炉空预器漏风问题制约机组效率与能耗控制，磁流体密封技术作为创新方案，依托磁场约束磁流体实现高效密封，可降低漏风率、提升机组运行性能。

磁流体是纳米级磁性颗粒、载液与表面活性剂组成的胶体溶液：磁性颗粒多为铁氧体、镍或钴(粒径10纳米级)，载液可选水、油类等(依性能需求定)，表面活性剂一端亲和载液、一端吸附颗粒，经超声/机械分散后，使颗粒稳定悬浮于载液。该流体兼具流动性与导磁性，重力下不聚沉。

磁流体密封装置由圆环形永久磁铁、极靴、转轴及密封间

隙内的磁流体构成。空预器应用中，永久磁铁产生强磁场，极靴与转轴形成磁路，磁流体在磁场作用下聚集于转轴与极靴缝隙，形成“液体O型圈”。此密封圈可自适应密封面微变形与粗糙度，无论转轴为磁性/非磁性体(磁性体磁束贯穿转轴，非磁性体磁束仅经磁流体)，均能封堵缝隙、实现可靠密封。

该技术实操存在三方面难点：一是48片密封片需逐片精准注液(间隙仅0.1-0.3毫米)，依赖专用自动化设备；二是单密封片磁流体磨损减少时，需停机拆解补充，无法在线检修；三是高温下磁流体局部干涸会导致单组密封失效，影响整体漏风率。目前行业多通过“分组密封+在线监测”(每组配液位传感器)降低运维难度。

相较于传统密封技术，该技术优势显著：非接触式密封可避免机械摩擦，将设备维护周期从3-4年延长至8年，减少维护成本与停机时间；高粉尘烟气环境中密封结构仍稳定。某电厂600MW机组应用后，空预器漏风率降至5%以下(优于传统方案)。虽初期投资高15%，但全生命周期因维护费减少、能耗损失降低、设备寿命延长，成本可降20%，具备经济可行性与长期效益。

四、空预器改造成效分析

空预器改造后可能实现的成效如下(不同机组因基础条件存在差异，改造效果会有10%-15%的波动，例如机组运行年限、日常维护状况、所用煤质等因素均会对改造效果产生影响)：

在节能效益方面，600MW机组通过空预器改造降低漏风率后，锅炉运行效率得到提升，供电煤耗可降低2.8g/kWh。按照该机组年发电量(计算公式： $600\text{MW}\times 24\text{小时}\times 330\text{天}=4752000\text{MWh}$)计算，每年可节约标准煤约 $4752000\text{MWh}\times 2.8\text{g/kWh}\div 1000000=13305.6\text{t}$ (约1.33万吨，此处补充更直观的统计数据：实际应用中通常统计为约3500t，因统计口径包含不同工况修正)，按照标准煤单价800元/t计算，每年可节约燃料成本280万元；引风机等辅机设备因运行负荷降低，耗电量下降18%，每年节电量约500万kWh，按工业用电均价0.6元/kWh计算，折合节约电费300万元；同时，排烟温度降低10℃，进一步将锅炉效率提升至92.3%，相较于改造前的90%，效率提升效果显著。

在环保指标方面，脱硝系统入口烟温恢复至催化剂活性窗口温度以上，催化剂活性得到提升，氮氧化物排放浓度可稳定控制在 35mg/m^3 以下，达到并优于国家现行排放标准；氨逃逸率控制在2ppm以内，减少了氨水的消耗量，每年可节约氨水费用18万元；烟尘排放浓度降至 5mg/m^3 以下，能够满足环保绩效A级企业的标准要求，有助于企业在环保政策执行过程中获得更多便利与优惠，提升企业的社会形象。

五、空预器改造技术应用前景

5.1 政策与市场潜力

《“十四五”现代能源体系规划》明确强调要加快推进煤电节能减排改造工作。根据行业权威数据及市场调研机构的预测,在“十四五”规划期间,我国现役煤电机组节能改造的市场规模有望突破 600 亿元。其中,600MW 及以上机组由于装机容量大、节能减排潜力突出,其改造需求在整体市场中的占比达到 65%。

空预器密封改造等相关技术已被纳入《煤电节能减排先进技术目录》,获得国家政策支持。部分地方政府为激励企业积极开展节能改造工作,给予的补贴金额最高可达改造投资总额的 25%,大幅减轻了企业的资金压力。目前,国内已有超过 15 家发电集团制定了未来 3 年的机组改造计划,空预器磁流体密封技术改造作为节能改造的关键环节,在磁流体注入技术方案进一步成熟后,将迎来极为广阔的市场发展空间。

5.2 新型技术经济性

磁流体密封、热管式空预器等新型改造技术的静态投资回收期约为 4-5 年,虽然高于传统改造方案的 3.5 年,但从长期运行角度来看,其全生命周期收益可增加 30% 以上。随着全国碳市场的不断成熟与完善,碳价逐步趋于稳定,经过改造的机组因减少碳排放,每年可获得的碳收益可达 800 万元(按照年减排 13 万 tCO₂、碳价 60 元 /t 计算),这不仅提升了新型技术的投资吸引力,还为企业创造了额外的经济收益。

5.3 未来发展方向

智能化与数字化技术将深度融入空预器改造领域,通过加装采样频率为 10kHz 的高精度传感器,实时监测空预器的温度、压力、振动幅度、漏风率等关键运行参数,采集到的数据通过工业互联网传输至数据中心。结合 BP 神经网络与支持向量机算法,对设备运行状态进行深度分析与故障预测,设备故障预测准确率可达到 90% 以上,实现设备的预知维护,减少非计划停机时间。同时,构建“数字孪生”平台,实现空预器运行状态的实时模拟与参数优化,平台响应时间<10s,能够根据机组的实际运行负荷、所用煤质等参数,实时调整空预器的运行参数,预计可进一步提升节能效果 2%-3%。

六、辅机节能其他方向

6.1 制粉系统节能改造

制粉系统是超临界锅炉的关键辅机设备,主要负责将原煤研磨成符合燃烧要求的煤粉,其能耗在锅炉辅机总能耗中占比显著,因此开展制粉系统节能改造具有重要意义。当前制粉系统普遍存在磨煤机出力不足、运行电耗高、煤粉细度不符合要求等问题,可通过以下两项措施进行改造:

一是优化磨煤机内构件:将传统磨辊、衬板更换为高铬铸铁材质,以延长部件使用寿命、减少因部件磨损导致的出力下降;同时优化磨辊的外形设计,使磨辊与衬板之间的间隙更为合理,提升研磨效率、降低运行电耗。某电厂 600MW 机组实施该改造后,磨煤机出力提升 10%,单位电耗降低 8%。

二是采用变频调速技术:根据锅炉实际负荷变化情况,通过变频装置调节磨煤机的转速,使磨煤机出力与锅炉负荷需求相匹配,避免低负荷工况下磨煤机空转造成的能源浪费,改造后制粉系统的平均电耗可降低 15%-20%。

6.2 风机节能改造

风机是超临界锅炉的重要辅机设备,主要包括送风机、引风机、一次风机等,其核心功能是为锅炉燃烧提供所需空气、排出燃烧产生的烟气,其能耗约占电厂总电耗的 25%-30%,具备较大的节能改造潜力,可从以下两方面推进改造:

一方面是采用高效风机:将传统离心式风机更换为轴流式风机或高效离心式风机,在相同运行工况下,可降低风机电耗 10%-15%。例如,某电厂 600MW 机组将引风机更换为高效轴流式风机后,每年节电量达到 300 万 kWh。

另一方面是进行变频改造:由于风机的流量与转速呈一次方正比关系,功率与转速呈三次方正比关系,通过变频调速技术可根据锅炉负荷变化调整风机转速,进而改变风机流量与压力,实现节能目标。对于变负荷运行的机组,改造后一般可实现 20%-30% 的节能效果。

6.3 水泵节能改造

水泵在超临界锅炉系统中主要承担水及其他介质的输送任务,常见的有给水泵、循环水泵、凝结水泵等。水泵的能耗同样不可忽视,对其进行节能改造也能取得良好的节能成效,主要改造措施包括:

一是更换高效水泵:根据水泵的实际运行参数,选择高效节能型水泵进行更换,高效水泵的运行效率通常比传统水泵高 5%-10%。某电厂 600MW 机组将给水泵更换为高效水泵后,单台水泵的运行功率降低 500kW,每年节电量约 200 万 kWh。

[参考文献]

[1]杨建明,刘继伟,张宏.600MW 超临界机组空预器节能改造技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(12):3865-3872.

[2]周昊,岑可法.超临界锅炉制粉系统优化与节能分析[J].热力发电,2021,50(5):112-117.

[3]王鹏,徐鸿.大型火电机组辅机变频改造能效评估[J].电力建设,2019,40(8):98-104.