

大容量供热汽轮机深度调峰与灵活性改造技术应用

李明成

大唐东营发电有限公司, 山东 东营 257000

摘要： 随着全球能源结构的不断优化和可再生能源的快速发展，大容量供热汽轮机在电力和热力供应中扮演着越来越重要的角色。然而，面对日益复杂的电网运行环境和不断提高的能源利用效率要求，传统的大容量供热汽轮机在深度调峰和灵活性方面面临着诸多挑战。因此，深度调峰与灵活性改造技术的应用成为当前研究的热点和重点。

关键词： 大容量；供热汽轮机；深度调峰；灵活性；改造技术

Application of Deep Peak Regulation and Flexible Transformation Technology of Large Capacity Heating Turbine

Li Mingcheng

Datang Dongying Power Generation Co., Ltd. Dongying, Shandong 257000

Abstract： With the continuous optimization of the global energy structure and the rapid development of renewable energy, large capacity heating turbines are playing an increasingly important role in power and heat supply. However, in the face of increasingly complex power grid operating environments and constantly improving energy efficiency requirements, traditional large capacity heating steam turbines face many challenges in terms of deep peak shaving and flexibility. Therefore, the application of deep peak shaving and flexibility transformation technology has become a hot topic and focus of current research.

Keywords： large capacity; heating turbine; depth peak regulation; flexibility; reconstruction technology

引言

深度调峰技术旨在提高汽轮机在较低负荷下的运行效率和稳定性，以应对电网负荷的频繁波动和可再生能源接入带来的不确定性。而灵活性改造技术则通过优化机组结构和控制系统，实现热电解耦，提高机组的快速响应能力和负荷调节范围。这两项技术的有效结合，不仅能够提升大容量供热汽轮机的整体性能，还能够为电网的稳定运行和可再生能源的消纳提供有力支撑。

一、项目概述

长期以来，煤炭作为我国电力生产的主力军，其主导地位在快速的经济增长驱动下愈发稳固。然而，面对煤电产能过剩的现实挑战与可再生能源消纳的迫切需求，尤其是“3060”碳排放目标的明确提出，电力行业的结构性变革已势在必行。风电、光伏等清洁能源的迅猛发展，预示着新能源时代的大幕正徐徐拉开，但可再生能源的间歇性与波动性特征，也对电力系统的灵活性提出了前所未有的要求^[1]。

在此背景下，构建以新能源为主体的新型电力系统，不仅是国家战略的必然选择，也是电力行业自我革新、迈向高质量发展的关键一步。为实现这一目标，提升电力系统的灵活性成为亟待解决的核心议题。从技术层面审视，电网的互联互通、煤电机组的灵活性调峰、燃气轮机发电、抽水蓄能、需求侧响应以及储能技术的多元化应用，均被视为增强系统灵活性的重要手段。然

而，受制于建设条件、经济成本、技术成熟度及实施周期等多重因素，除煤电机组深度调峰外，其他技术路径的短期推广面临较大障碍，难以迅速达到理想比例。

鉴于我国电力结构的实际情况，燃煤机组作为主力电源，其深度调峰能力的挖掘显得尤为重要。以东营公司2号锅炉为例，我们拟实施的灵活性调峰改造项目，正是基于这一战略考量，旨在通过技术创新与设备升级，进一步释放机组的调峰潜力，积极响应国家和地方政府对煤电机组调节能力的要求。改造方案精心设计了多项关键措施：锅炉宽负荷脱硝改造确保了环保性能与调峰能力的双重提升；尾部烟道加装声波吹灰器改造优化了锅炉运行效率，减少了维护成本；烟气余热利用系统的防低温腐蚀改造，则有效延长了设备使用寿命，增强了系统稳定性；而锅炉燃烧器助燃改造，更是直接提升了机组在低负荷下的燃烧效率与安全性。这一系列改造措施的实施，不仅将显著提升东营公司2号锅炉的深度调峰能力，使其能够更好地适应新能源并网的波动性需

求，同时也将极大增强锅炉设备在低负荷工况下的运行安全性、可靠性及经济性。尤为重要的是，改造后的脱硝系统能够实现在全负荷区间内的正常投入运行，这对于减少氮氧化物排放、促进环境友好型电力生产具有重要意义^[2]。

二、大容量供热汽轮机深度调峰与灵活性改造技术应用

（一）锅炉宽负荷脱硝改造

随着环保政策的日益严格及未来发展趋势的明确指向，SCR 脱硝系统的全工况运行已成为行业共识，这不仅是对技术能力的考验，更是对企业社会责任的践行。以东营公司2号塔式锅炉为例，其独特的启动系统设计与湿态运行特性，为宽负荷脱硝改造提供了独特的视角和挑战。

在锅炉启动及低负荷运行阶段，炉水循环泵与省煤器、水冷壁系统的精妙组合，有效维持了水冷壁的最小流量需求，同时高效回收并利用了工质吸收的热量，提升了省煤器入口水温，从而优化了整个启动过程的热效率与环保性能。为进一步提升这一系统的灵活性与适应性，特别是针对脱硝系统在全时段投入的需求，省煤器水旁路系统的改造显得尤为关键。

我们提出在锅炉特定标高（约52米）处巧妙布局省煤器给水旁路管道，直接联通省煤器进水管与给水下落管，辅以精准的阀门控制与监测仪表，构成了一个灵活调节的工质再循环系统。此设计不仅遵循了《火力发电厂汽管道设计规范》的严格要求，还针对实际工况（如给水压力38MPa、温度350℃、流量600t/h）进行了精细化计算，选定 $\Phi 324 \times 48\text{mm}$ 规格管道，确保了系统运行的可靠性与经济性^[3]。

（二）锅炉尾部烟道加装声波吹灰器改造

锅炉尾部烟道加装阵列式共振腔声波吹灰器的技术改造项目，不仅是对传统除灰方式的革新，更是提升机组运行效率与稳定性的关键举措。本改造方案聚焦于高声强声波的物理特性及其在灰垢清除中的独特作用机制，通过精细化设计与实施，旨在实现高效、环保的除灰效果^[4]。

高声强声波作为一种高效的能量传递媒介，其独特的振动效应在灰垢清理中展现出非凡的潜力。当声波频率与灰垢的固有频率相耦合时，共振效应被激发，这极大地增强了声波对灰垢的作用力。一方面，声波在灰渣内部引发的微小振动，逐步累积能量，导致灰渣表面产生裂隙，进而促进灰渣的破碎与剥离；另一方面，声波对附着于换热器表面的硬垢进行高频推拉，造成声疲劳效应，使硬垢逐渐松动、断裂，最终脱落。这一过程不仅有效减少了灰垢积累对热效率的影响，还延长了锅炉部件的使用寿命。在遵循 DL/T 2168-2020《火电厂声波吹灰器选型导则》的基础上，我们精心选择了阵列式共振腔声波吹灰器作为本次改造的核心设备。该吹灰器凭借其高效的声能转换与分布特性，能够在锅炉尾部烟道的低温再热器与省煤器区域实现全面覆盖。通过精确布置四层共计40组内置阵列式共振腔声波吹灰器（每组包含6个发声头），我们确保了声波能量的均匀分布与深度渗透，从而

实现了对灰垢的高效清除。为确保声波吹灰系统的稳定运行，我们特别设计了气源供应系统。该系统采用 $\geq 0.4\text{MPa}$ 的洁净压缩空气作为动力源，气源取自脱硫废水零排放空压机系统，既保证了气源的充足性，又实现了资源的合理利用。此外，我们还增设了一台6m³的储气罐，以提升供气的稳定性与可靠性。该储气罐被巧妙地布置于锅炉尾部脱硝装置声波吹灰器储气罐旁，便于日常管理与维护^[5]。

（三）烟气余热利用系统防低温腐蚀改造

在不干扰原有热媒水系统稳定运行的基础上，通过增设低压加热器旁路系统，有效提升暖风器出口风温，进而调控一级低温省煤器出口烟温至理想范围，即高于90℃。此改造策略不仅增强了系统的灵活性与适应性，还显著提高了能源利用效率与机组运行的可靠性。构思的改造方案是在热媒水管路中巧妙融入一条低压加热器旁路，该旁路的核心设备为两个新增的低压加热器：一为汽水换热器，其设计耗汽量精准设定为28t/h，以充分吸收锅炉辅汽及大气扩容器底部集水箱中约100℃温水的热能；另一则为水水换热器，设计热水处理能力达5t/h，专为实现水水间高效换热而设。两者并行运作，与原暖风器循环热水系统形成互补，共同优化系统性能^[6]。

在设计实施过程中，我们严格遵循国内外相关标准，如 GB150.1-GB150.4-2011、GB151-2014 及美国 HEI 标准，对低压加热器的管侧与壳侧受压元件进行了详尽的强度计算，确保设备在极端工况下的安全稳定运行。传热面则精选不锈钢管材，辅以强度胀加密封焊的先进连接方式，既保证了连接的稳固性，又提升了换热效率。管材选用 Q345R 及以上高品质材料，进一步增强了设备的耐腐蚀性与耐久性。在布局规划上，我们巧妙地将新增低压加热器安置于两台送风机进口风道之间的厂旁门外，既便于维护与检修，又有效利用了现有空间资源。蒸汽凝结后的疏水通过精心设计的疏水泵系统，被安全、高效地输送至凝汽器或电厂酸洗水池，实现了水资源的循环利用与节能减排。疏水泵则被细心安置于室内，与加热器区域隔墙设置，有效隔离了噪音与热辐射，保障了运行环境的舒适度与设备的长期稳定运行。此外，我们特别注重了蒸汽加热器旁路与热媒水主管路的断接点位置选择，将其优化设置在距离加热器本体较近的位置，以减少管路损失，提升热能传输效率。这一细节处理，不仅简化了安装流程，还显著降低了后续运维成本^[7]。

（四）锅炉燃烧器助燃改造

针对当前锅炉运行需求，我们精心设计了C层燃烧器的全面升级方案，其核心在于替换原有的8个常规煤粉燃烧器为先进的等离子点火燃烧器。此举不仅保留了原有设备框架的完整性，还通过巧妙利用现有资源，如载体风系统与冷却水系统，在最小改动的基础上实现了功能升级。具体而言，我们新增了包括等离子煤粉燃烧器、煤粉弯头、等离子发生器、高精度壁温测量装置、先进的图像火检系统以及就地引弧柜在内的全套等离子点火设备，同时拆除了原有的燃烧器组件，确保了新旧系统的无缝衔接。

在电气系统方面，我们采取了高效且经济的解决方案，避免了新增电气柜与整流柜等配电设备，而是通过在A层等离子燃烧

器的就地引弧柜前增设电气切换开关，实现了 A 层与 C 层等离子燃烧器电气装置的灵活互备。这种设计既保证了设备间的互为备用功能，又确保了不会同时启用造成资源浪费，体现了高度的系统灵活性与成本意识。此外，我们利用 A 层燃烧器的控制单元进行扩展，替代了新增的等离子燃烧器点火控制装置，从而简化了控制逻辑，提升了系统的集成度与可靠性。等离子点火燃烧器作为本次改造的核心部件，集成了等离子煤粉燃烧器、等离子发生器及直流供电控制系统等先进组件。其独特的等离子点火机制，能够在不依赖传统燃油的情况下，迅速点燃煤粉并维持稳定燃烧，显著提高了锅炉的启动速度与低负荷运行稳定性。同时，辅助系统如载体风系统、壁温在线监测系统、启磨热风加热系统、图像火检系统及一次风在线监测系统的引入，进一步提升了燃烧过程的监测与控制精度，为锅炉的安全高效运行提供了坚实保障^[8]。

本次改造不仅实现了锅炉 C 层燃烧器的全面升级，更在提升锅炉低负荷性能、增强系统灵活性方面取得了显著成效。改造后的燃烧器性能与原燃烧器保持一致，确保了锅炉运行的安全性与稳定性。

（五）一级低温省煤器前烟道积灰治理改造

针对空间布局紧凑、直接增设大型灰斗受限的现状，我们创造性地提出了一套烟道底部分布式输灰系统改造方案。具体而言，利用低温省煤器进口烟道下部现有的钢结构平台（分别位于

17 米和 11 米标高），在 1、2、5、6 号一级低温省煤器进口烟道的适宜位置巧妙布局多个小型灰斗。这些小型灰斗不仅节省了空间，还实现了对积灰的有效收集。每个小灰斗下方均配置有独立的仓泵及精心设计的输灰管道网络，这些管道最终汇聚并接入除尘器三、四、五电场灰输送单元的公用输灰管线上，确保了飞灰能够顺畅、高效地输送至灰库，实现了积灰的闭环处理。为进一步优化烟道内部流场，减少积灰的生成与积聚，我们还在烟道的关键位置增设了垂直方向的挡板门系统^[9]。这一设计巧思在于，通过低负荷阶段适时关闭这些挡板，能够显著提升烟道底部的烟气流速，有效改善烟道内的气流分布状况，从而抑制积灰现象的发生。这种动态调节机制不仅增强了系统的灵活性，也为锅炉的长周期、安全稳定运行提供了有力保障^[10]。

三、结束语

综上所述，大容量供热汽轮机深度调峰与灵活性改造技术的应用对于推动能源结构的优化和电力行业的可持续发展具有重要意义。通过不断的技术创新和实践探索，我们有望克服传统机组在深度调峰和灵活性方面的不足，实现机组性能的全面提升。同时，这也需要政府、企业和科研机构等多方面的共同努力和协作，共同推动相关技术的研发和应用，为构建更加安全、高效、清洁的能源体系贡献力量。

参考文献

[1] 段晓宇. 一种确定供热汽轮机热电分摊比的新方法 [J]. 电气技术与经济, 2024, (04): 259-261.
[2] 冯焱飞, 冯林魁, 谷志德, 等. 变工况试验下热电联产汽轮机内效率分析研究 [J]. 发电设备, 2023, 37 (03): 141-146+158.
[3] 刘传亮, 江路毅. 热电联产汽轮机调节叶片断裂的分析与改进 [J]. 汽轮机技术, 2023, 65 (01): 66-70+38.
[4] 王志云, 赵玉柱, 王学栋, 等. 调峰机制下供热汽轮机中压调门调节特性试验研究 [J]. 发电技术, 2022, 43 (06): 970-976.
[5] 黄思林, 梁占伟, 乔加飞. 330 MW 三源抽汽供热汽轮机通流综合提效研究 [J]. 动力工程学报, 2022, 42 (10): 904-911+950.
[6] 张文祥, 宋放放, 谢林贵, 等. 新型热电联产汽轮机系统研究 [J]. 东方汽轮机, 2021, (03): 23-28.
[7] 丁为平, 陈克祥. 火电机组灵活性运行及深度调峰关键技术研发与应用 [J]. 电力系统装备, 2024(2):108-110.
[8] 马宁, 叶斌, 白玉忠. 某超超临界辅机单列机组 30% 负荷深度调峰探索与实践 [J]. 能源科技, 2024, 22(1):51-55.
[9] 杨德荣, 荆凯, 张弛. 深度调峰条件下大容量火电机组给水泵配置方式探讨 [J]. 同煤科技, 2022(3):5.
[10] 陈欢乐, 归一数, 陈伟, 等. 基于零号高压加热器的深度调峰控制策略研究 [J]. 热能动力工程, 2023.