

Research on Carbon Emission of Thermal Power Plant under the Background of Carbon Peak and Carbon Neutrality

Zhengjun Sang

Liaoning Datang International Shendong Thermal Power Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110172, China

Abstract

Under the guidance of the carbon peaking and carbon neutrality strategy, thermal power plants must not only assume the responsibility of stable power supply but also rapidly advance their decarbonization transition. To address the dual challenges of long-term greenhouse gas constraints and energy system transformation, this paper focuses on carbon emission management in thermal power plants, examining two practical dimensions—operation and maintenance, and engineering retrofitting—and proposes governance pathways and operational frameworks for the China scenario. The article explores technical and institutional aspects such as precise accounting and monitoring, improvement of unit thermal efficiency, step-by-step retrofitting of fuel and processes, and equipment integrity-oriented retrofitting, emphasizing the use of quantifiable operational parameters and engineering retrofitting indicators as direct bases for emission reduction decisions.

Keywords

carbon peak; carbon neutrality; thermal power plants; carbon emission management; value; strategy

碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放研究

桑政军

辽宁大唐国际沈东热电有限责任公司，中国·辽宁 沈阳 110172

摘 要

在碳达峰碳中和战略指引下，火力发电厂既要承担稳定供电责任，又需快速推进减碳转型。为应对长期温室气体约束与能源系统转型的双重挑战，本文以火力发电厂碳排放管理为研究对象，立足运维与工程改造两大实践维度，提出面向中国情景的治理路径与操作框架。文章在精确核算与监测、机组热效率提升、燃料与工艺分步改造以及设备完整性导向改造等方面展开技术与制度性探讨，强调以可量化的运行参数和工程改造指标作为减排决策的直接依据。

关键词

碳达峰；碳中和；火力发电厂；碳排放管理；价值；策略

1 引言

中国作为世界上最大的碳排放国家，在全球碳达峰和碳中和具有至关重要的作用^[1]。有鉴于此，本文将通过查阅相关文献以及实践背景下针对碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理价值及其策略展开研究。希望能够借助于本研究以支持火电机组在确保电力安全稳定供应前提下，实现逐步降碳与技术路径清晰化的转型。

2 碳达峰与碳中和概述

碳达峰指在特定国域或区域内二氧化碳排放量达到历史峰值并由增转降的转折点，碳中和则指通过减排、碳汇与

抵消措施相结合实现温室气体净零排放，二者定义与评价方法已有统一解释。中国承诺于 2030 年前实现碳达峰并力争于 2060 年前实现碳中和，已在国家宣示与国际承诺中明确提出。为落实目标，政策体系以提高非化石能源比重、推动产业低碳改造、实施单位 GDP 碳强度下降目标及出台《碳达峰行动方案》等为核心，形成自上而下的政策协同。技术路径侧重能效提升、碳汇能力建设、市场化交易机制与统一核算口径，并以监测报告验证（MRV）体系与科技支撑方案保障路径的可操作性、可测量性与可验证性。

3 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理重要价值

在碳达峰与碳中和目标框架下，火力发电厂碳排放管理的核心价值体现在：一是实现精细化核算以支撑决策闭环。通过建立覆盖燃料投入、机组热效率、排放因子与在线监测（CEMS/CO₂ 连续监测）的一体化核算体系，可将单位

【作者简介】桑政军（1982-），男，中国辽宁朝阳人，本科，工程师，从事电力企业生态环境保护、碳排放碳达峰碳中和研究。

发电碳排放量作为工程改造、燃料置换与购电合同决策的量化约束，从而提高减排措施的针对性与经济性；二是强化实时监测与数据治理以提升合规性与可核查性。推广高精度烟气流量与 CO₂ 连续监测技术，并构建数据完整性、溯源与失效应对机制，可降低统计偏差并满足碳市场与排放报告核查要求；三是推动技术路径与运维优化以降本增效。通过提高机组热效率、实施高比例生物质混烧、天然气替代及选择性部署碳捕集利用与封存 (CCUS) 等技术组合，可在兼顾电力安全的前提下实现长期碳强度下降；四是嵌入市场机制与风险管理以实现资源最优配置。将碳成本内化进燃料采购、机组启停与长期资产评估，并利用碳交易与合同对冲机制，可在合规约束下优化厂内外经济效率；五是构建制度化的低碳转型评估与分期实施路径，明确短期可行性改造、中期技术集成与长期 CCUS/ 退役方案，保障能源安全与减排目标的可操作性。因而，火力发电厂的碳排放管理既是企业内部效率改进的手段，又是区域与国家层面实现碳达峰碳中和目标的重要载体^[2]。

4 碳达峰碳中和背景下火力发电厂碳排放管理策略

4.1 基于精细化核算的连续监测与数据治理

为贯彻基于精细化核算的连续监测与数据治理，提出四项精细化实施要点以指导火力发电厂日常运行与合规核查。第一，燃料批次属性辨识与检验闭环，规定入厂样品应按批次编号实施称样与并行化学分析，完成低位发热量、碳含量与含水率的实验室复核并形成批次质检报告，所有样品采集应记录采样点位、采样时间与采样人以形成可追溯原始记录，燃料台账采用纸质与纸质归档凭证并同步保存检测报告以便第三方查验。第二，烟气排放连续监测实施多通道冗余与严格校验，CEMS 安装与验收依据国家连续监测技术规范执行并设置定期比对检测与零点漂移校准，现场保留原始标样、比对报告与维护记录，常态运行中推行自动报警与人工抽样复核并保存比对与复核结果以确保监测数据的不可篡改性及可复核性。第三，机组运行参数以分钟级人工记录与分段能量平衡方式支撑动态核算，通过对机组燃料量、送风量、给水温度与机组负荷进行时序化手工整理与分段热效率分解，采用批次平均法与加权分摊法修正运行期的排放因子变动，并据此编制日核算表与月度核算汇总以供运行优化与技术改造论证。第四，核算方法与碳交易合规口径并行对接，建立以燃料检验结果、连续监测原始记录与运行核算表为基础的可审计凭证链条，定期依据国家分配方案进行口径比对并形成差异分析报告，所有核算凭证须满足第三方核取样与复核要求以保障合规性与可验证性^[3]。

4.2 以运行优化为核心的热效率提升与负荷管理

在碳达峰碳中和背景下，以运行优化为核心的热效率提升与负荷管理应围绕四项技术路径展开：一是完善机组起

停与并列程序的制度性约束，明确不同负荷区间的启停触发条件、汽机汽水过热允许限值及并列同步速率，并在运行手册中细化燃烧体系调节步骤以最小化冷态与热态转换的不可逆热损失；二是实施细粒度燃烧与给水参数标定，通过分级燃烧器截分、送风 - 给煤比曲线重构以及给水预热与回热系统联动控制，建立以热耗率目标的机组标定周期，配套常态化燃烧稳定性测试与烟温烟速监测以发现隐性热损耗；三是构建基于机组最小安全出力与系统调峰需求的经济调度策略，将深度调峰最小出力、低负荷煤耗攀升幅度及出力变化速率纳入日调度约束，采用机组组合优化以避免低效机组长时间运行并对关键机组设置动态运行边界及应急启停预案；四是制度化热态管理与设备维保一体化流程，包括定期炉膛清灰、换热面在线检测与分段化清洗、余热回收装置的性能校准及汽轮机叶片与凝汽器的清洁度考核，以运行数据为依据实施寿命预测驱动的检修决策并将能耗指标纳入部门绩效考核体系。

4.3 燃料与工艺路径调整的分步实施

火力发电厂采取分级推进的燃料替代与工艺改造路径以兼顾供能稳定与减排效果。在第一阶段推行低改造成本的燃料替代与配比优化，应首先建立生物质燃料规范化入厂检验与原煤分级制度以控制灰分与挥发分，实施磨煤机耐磨件与燃料输送阀门加固改造并对给煤速度采用多档机械调节以保障炉膛负荷平稳运行，掺烧比例采取分期爬坡并以炉膛温度场、燃尽率以及飞灰碳含量作为技术准入判据，同时开展磨损速率与灰渣熔点的试验评估以指导炉衬与受热面防护材料选择。第二阶段对具备条件的机组实施天然气替代或改燃项目，应先完成燃料热工及燃烧流场的校核并对锅炉受热面做等效负荷重配，改造方案需包括燃烧器喷嘴几何重构、点火连锁机械化改造以及省煤器、过热器清灰路径优化，并建立燃料长期供给与液化气周转储备方案以缓解季节性供应波动。第三阶段推进烟气脱碳前端系统化改造，应优选电袋复合除尘或低温电除尘以实现颗粒物低负荷进入脱硫塔并配套石灰石 - 石膏湿法脱硫和选择性催化还原催化布置优化以降低 SO_x 与 NO_x 对后续捕集工艺的干扰，设计过程中必须对吸收塔液气比、压降、石膏脱水工艺及催化剂更换周期进行工程量化并以单位捕集成本与系统可靠性作为经济性判据。第四阶段同步实施余热回收与工艺一体化改进，采取凝汽器真空提升、低压抽汽余热回收、余压锅炉并行实施余热换热面重构和热量等级化分配，采用多级回收与余热再利用的闭式物料流线以降低排放边界热损失，改造验收以全厂热电转换效率、余热利用率与热负荷响应能力为评价指标^[4]。

4.4 基于设备系统完整性的碳排放减量化改造

基于火力发电厂设备系统完整性的碳排放减量化改造应围绕四项技术路径展开。首先，对锅炉燃烧系统实施等熵比设计与燃烧组织重构，采用分级送风与分区给煤，结合炉

膛三维温度场反演与燃料粒径停留时间耦合校核,优化再热器与过热器布风与回流通道,实施燃烧器低 NO_x 改型、风压分配器重整及定量磨煤分配策略,以降低未燃碳含量并抑制瞬态燃烧振荡,测点网应确保炉膛温差控制在 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 以内与煤粉 75 微米筛余率不高于 30%。其次,对汽轮机通流部件开展效率恢复性改造,包含耐高温合金或陶瓷涂层叶片更换、级间与轴向密封的几何重塑、通道流型与叶片迎角再设计以及转子动平衡复测,辅以试验工况下性能曲线与等熵效率比对验证热耗降低,叶片端隙与迎角调整应控制在设计容差 0.5 至 1.5 毫米范围内。再次,烟气余热梯级利用需施工况匹配校核,重新分配省煤器受热面积并采用阶梯式换热段,改良空预器板片传热系数与防堵结构,增设低品位余热回收模块如 ORC 回收段或换向回热器,联合烟温与换热效率一维 - 二维耦合模型实现排烟温度下限的可控与传热稳定性提升,并通过试验段验证换热效率提升幅度。最后,对厂区输煤、制粉与送风系统开展系统性阻力诊断与振动分析,替换磨损转子及磨煤机衬板、优化风道截面与文丘里段、调整分风阀定位并采用变频驱动控制循环水泵与引风机,优化除尘与清灰周期并替换磨煤机衬板并调整分级器转速与出口差压至最优工况以确保筛余率目标,优化除尘与清灰周期以维持风机阻力在设计曲线内,并制定季节性性能回归与验收方案以核验改造成效。

4.5 市场化机制与运营风险管理相结合的合规与经济策略

在碳达峰碳中和背景下,首先发电厂在交易与组合策略需形成期现联动的套利与套期保值框架,通过现货配额与场外远期合约挂钩实现配额保值,设计基于发电效率与单位热耗的资产分层矩阵以指导低碳资产置换与减排量投放,并在交易策略中贯彻交易保证金、头寸限额与止损规则以控制市场流动性与对手方风险。其次,风险对冲与预算衔接要求将碳价敏感性纳入年度经营预算与中长期资本计划,建立碳头寸压力测试、资金流逆境情景及碳价弹性系数,用以动态调整燃料采购策略与短期电量售出计划,同时利用碳远

期与掉期等衍生工具与企业备用流动性池共同缓释价格突变对现金流的冲击^[5]。第三,合规治理需明确碳资产归口部门、制定核算—申报—核查闭环流程并实施内部审计周期与差异追踪制度,与外部第三方核查机构签署长期数据质量保障与样本留存协议,同时推行配额生命周期管理规范与公司级风险偏好矩阵以保障履约合规与市场操作透明性。最后,应在企业内部建立碳价传导机制与跨部门成本分摊规则,将碳内部价嵌入机组运营绩效指标并据此调整机组启停与运行负荷分配,制定与财务部门协同的配额购置节奏和保留比例,必要时购入碳保险或引入第三方配额托管服务以分散极端风险,并通过定期演练与管理层通报保持治理体系的敏捷性。

5 结语

综上所述,在碳达峰与碳中和的总体框架下,火力发电厂的碳排放管理需由点及面、由低到高地推进。精细化核算与连续监测为管理提供数据支撑,运行优化与燃料路径调整以及设备系统碳排放减量化改造为减排提供可落地的技术路径,市场化机制与合规管理为经济性与风险控制提供工具保障。面向未来,火电企业应在保障电力供应安全的前提下,将减碳措施制度化并与区域能源转型协同规划,以实现平稳过渡与长期运营价值的双重目标。

参考文献

- [1] 石博宇."碳达峰碳中和"背景下火电企业绿色转型路径及其绩效研究[D].内蒙古财经大学,2025.
- [2] 方道君.碳达峰,碳中和背景下火电厂节能减排措施研究[J].Engineering Science Research & Application, 2023, 4(17).
- [3] 吴升进,钱卫华.贵州省能源领域碳达峰碳中和实现路径及策略研究分析[J].可持续发展, 2023, 13(6): 1977-1986.
- [4] 刘海波.碳达峰碳中和目标下的碳排放标准化管理体系建设[J].中国标准化, 2025(2).
- [5] 郝金明,李越,赵强,等."碳达峰""碳中和"背景下企业碳减排路径[J].天津化工, 2023, 37(2): 20-23.