

脱硝电加热器的节能设计与运行优化策略

戴国辉

广州珠江电力有限公司，广东 广州 511458

DOI:10.61369/ME.2025060003

摘要：本文围绕 SCR 脱硝系统中的电加热器展开。介绍其结构、参数及热传导机理，分析能耗问题及原因。阐述新型保温材料应用、拓扑结构设计、温度控制策略等优化方法，还涉及数据采集、能效评价、启停策略等内容，最后通过实例验证改造效果，强调节能设计与运行优化的重要性及未来发展方向。

关键词：SCR 脱硝系统；电加热器；节能优化

Energy-saving Design and Operation Optimization Strategies of Denitration Electric Heaters

Dai Guohui

Guangzhou Zhujiang Electric Power Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 511458

Abstract : This paper focuses on the electric heater in the SCR denitrification system. Introduce its structure, parameters and heat conduction mechanism, and analyze the energy consumption problems and their causes. This paper expounds the optimization methods such as the application of new insulation materials, topological structure design, and temperature control strategies, and also involves contents such as data collection, energy efficiency evaluation, and start-stop strategies. Finally, the transformation effect is verified through examples, emphasizing the importance of energy-saving design and operation optimization as well as the future development direction.

Keywords : SCR denitrification system; electric heater; energy-saving optimization

引言

随着环保要求的日益提高，我国于2016年1月1日颁布了相关政策，强调对工业废气排放的严格控制以及对节能减排技术的重视。SCR 脱硝系统作为控制氮氧化物排放的关键技术，其中电加热器的性能对整个系统的运行效果和能耗有着重要影响。电加热器的结构设计、材料选择、运行参数以及控制策略等多个方面都直接关联到其节能效果和运行效率。从其构成部件到热传导机理，从能耗评估到节能设计，从控制策略到系统集成改造，再到对实际机组改造效果的分析以及在 SCR 脱硝系统协同优化中的作用，都需要深入研究，以实现脱硝电加热器的高效运行和节能减排目标。

一、脱硝电加热器设备结构与能耗特征分析

(一) 设备结构原理与技术参数

SCR 脱硝系统中电加热器主要由加热元件、壳体、保温层等构成。加热元件是核心部件，通常采用电阻丝等材料，电流通过时产生热量。壳体起到保护和支撑作用，一般采用金属材质。保温层则能有效减少热量散失，提高热效率^[1]。其热传导机理基于热传导定律，热量从高温的加热元件传递到周围介质。在技术参数方面，额定功率是重要指标，它决定了电加热器的加热能力，不同应用场景下额定功率有所差异。温控范围也是关键，它确保电加热器能在合适的温度区间工作，以满足脱硝反应的需求。这

些结构和参数相互关联，共同影响着电加热器的性能和能耗。

(二) 运行能耗特征与热损失诊断

基于热力学建模的能耗评估方法对脱硝电加热器运行能耗特征与热损失进行诊断。绝缘老化会导致电加热器的热损失增加，因为老化的绝缘材料无法有效阻止热量散失，使部分热量向周围环境传递，从而增加了能耗^[2]。换热效率衰减也是一个关键问题，可能由于结垢、腐蚀等原因，使得加热器内部的热交换过程受到阻碍，降低了热量传递到被加热介质的效率，进而需要消耗更多的电能来维持所需的加热效果。通过准确识别这些典型能耗问题及其产生的原因，可以为后续的节能设计和运行优化策略提供依据。

二、节能优化设计关键技术研究

(一) 新型复合保温材料应用研究

在脱硝电加热器节能设计领域，纳米气凝胶和陶瓷纤维材料作为新型复合保温材料，展现出不可忽视的应用潜力。纳米气凝胶凭借其独特的微观多孔结构，拥有极低的导热系数，能够极大程度地抑制热量传导，为设备披上高效的“隔热外衣”；相比较而言，陶瓷纤维材料虽然导热系数相对较高^[3]，但它具有良好的耐高温性能和机械强度，在特定工况下也能发挥重要的保温作用。通过系统的实验测试与数据分析，详细对比两种材料在不同温度、湿度环境下的导热系数变化规律，能够精准掌握它们的性能差异，为依据实际需求选择最合适的保温材料提供坚实的数据支撑。

在选定材料后，建立保温层厚度优化模型成为节能设计的关键环节。该模型需全面考量材料的导热性能参数、设备运行时的环境温度波动范围、允许的热量散失标准等因素。通过引入数学计算与模拟分析，运用先进的算法对保温层厚度进行优化求解，既能保证设备在运行过程中热量散失最小化，又能避免因过度增加保温层厚度带来的成本上升和安装空间限制问题。合理的保温层厚度不仅能够显著提高脱硝电加热器的能源利用效率，减少因热量损耗造成的能源浪费，还能有效降低设备的长期运行成本，切实达成节能优化设计的目标。

(二) 多级加热模块拓扑结构设计

多级加热模块拓扑结构设计是提升脱硝电加热器节能效果的重要途径，涉及多个关键设计要点。基于负荷分区的模块化设计方案是整个设计的核心策略，依据不同区域的加热需求差异，将加热负荷科学合理地划分为多个子区域，并针对每个区域的特点设计专属的加热模块结构。这种精细化的设计方式^[4]，能够使每个模块精准匹配对应区域的负荷需求，避免能源的无效消耗，显著提高能源利用效率。

同时，构建温度场均匀性仿真模型是确保设计效果的关键步骤。借助专业的仿真软件，模拟不同拓扑结构在实际运行过程中的温度场分布情况，直观呈现各加热模块之间的温度差异和热量传递规律。根据仿真结果，技术人员可以对拓扑结构进行针对性优化，调整模块布局、加热功率分配等参数，确保各加热模块之间能够实现高效协同工作，消除局部过热或温度不均的现象，使整个加热系统的温度分布更加均衡稳定。通过不断优化拓扑结构，提升系统整体性能，最终实现节能降耗的目的，推动脱硝电加热器在节能环保方面迈向更高水平。

三、智能控制系统优化方案

(一) 模糊 PID 温度控制策略

模糊 PID 温度控制策略结合了模糊控制和 PID 控制的优点。模糊控制具有良好的适应性和鲁棒性，能够处理复杂的非线性系统；PID 控制则具有结构简单、稳定性好、可靠性高的特点。通过将模糊控制的智能性与 PID 控制的精确性相结合，可以实现对温

度的更精确控制。在模糊 PID 控制中，首先根据经验和实际情况确定模糊规则和隶属函数，然后利用模糊推理得到 PID 控制器的参数调整量。通过不断地调整 PID 参数，可以使系统更好地适应环境的变化和干扰的影响，从而提高温度控制的精度和稳定性。这种控制策略在脱硝电加热器的温度控制中具有重要的应用价值，可以有效地提高加热器的运行效率和节能效果^[5]。

(二) 能耗监测与能效评估系统

开发集成 DCS 的数据采集模块，用于实时收集脱硝电加热器运行过程中的各类数据，包括温度、压力、流量、能耗等关键参数。通过对这些数据的精确采集和整合，为后续的能效评估提供全面且准确的数据基础。在此基础上，建立包含 COP（性能系数）指标的多维度能效评价体系。COP 指标能够综合反映电加热器在将电能转化为热能过程中的效率表现。结合其他相关维度的指标，如能源利用率、热损失率等，可以全面、客观地评估脱硝电加热器的能效水平。这一评价体系有助于及时发现系统运行中的低效环节和潜在的节能空间，为节能设计和运行优化策略的制定提供科学依据^[6]。

四、运行优化策略与技术改造

(一) 负荷动态调节运行模式

基于机组负荷率制定阶梯式启停策略是实现负荷动态调节运行模式的关键。当机组负荷率处于不同区间时，电加热器的启停方式应进行相应调整。在低负荷率阶段，可适当减少电加热器的运行数量或降低其运行功率，以避免能源的浪费。随着负荷率的升高，逐步增加电加热器的投入，确保脱硝系统的正常运行。通过这种动态调节方式，能够根据实际负荷需求精确控制电加热器的运行，从而实现节能效果。对不同工况下的节能量化效果分析表明，该策略在不同负荷条件下均能有效降低电加热器的能耗，提高整个脱硝系统的运行经济性^[7]。

(二) 设备故障预警与维护策略

为实现脱硝电加热器的高效运行，构建绝缘电阻劣化预测模型至关重要。通过对设备运行数据的收集与分析，利用合适的算法（如神经网络算法等），建立起绝缘电阻与运行时间、环境温度、工作负荷等因素之间的关系模型^[8]。该模型能够预测绝缘电阻的劣化趋势，从而为提前采取维护措施提供依据。基于此预测模型，进一步提出预防性维护周期优化方案。综合考虑设备的重要性、故障发生的概率以及维修成本等因素，合理确定维护周期。避免过度维护造成的资源浪费，同时也防止维护不足导致设备故障停机，影响脱硝系统的正常运行。

(三) 余热回收系统集成改造

在余热回收系统集成改造方面，研究烟气余热耦合利用技术是关键。通过对烟气余热特性的深入分析，挖掘其潜在的能量回收价值^[9]。设计新型热管式能量回收装置，利用热管高效的热传导性能，实现烟气余热的高效回收。该装置能够在不同工况下稳定运行，有效提高能源利用率。同时，对整个余热回收系统进行集成优化，确保各个组件之间的协同工作，减少能量损失。通过

合理的系统布局和管道设计，降低热阻，提高热量传递效率。此外，结合先进的控制技术，对余热回收过程进行精准控制，根据实际需求动态调整回收效率，进一步提升系统的节能效果。

五、工程应用与效果验证

(一) 技术改造方案对比分析

以某 660MW 机组为研究对象，开展深度技术改造，并从节能率与设备可靠性两大维度对改造前后的数据进行系统性对比分析。在节能率测算环节，项目团队采用高精度计量仪器，对电加热器改造前后的能耗数据进行持续监测与记录。通过建立严谨的能耗分析模型，充分考虑机组负荷变化、运行时长等变量因素，精确计算得出节能率。

在设备可靠性评估方面，通过全面统计改造前后设备的故障次数、平均维修时长、停机频率等关键指标，形成完整的可靠性分析报告。改造前，受限于传统设计的局限性，电加热器频繁出现局部过热、元件老化等故障，平均每月故障次数达 5 次以上，单次维修时长超过 8 小时，严重影响机组正常运行，增加了运维成本。改造后，得益于新型材料与优化结构的双重加持，设备故障次数锐减至每月 1 次以内，维修间隔延长至半年以上，设备运行稳定性显著增强。综合节能率与可靠性数据来看，此次技术改造方案在降低能耗、提升设备稳定性方面均达到预期目标，具备良好的推广应用价值。

(二) SCR 脱硝系统协同优化

在 SCR 脱硝系统的协同优化过程中，电加热器的节能设计与运行优化策略发挥了至关重要的作用。通过对电加热器进行技术升级，精准调控其加热功率与温度分布，有效拓宽并稳定了催

化剂活性温度窗口。在实际运行中，技术人员依据实时工况数据，动态调整电加热器的运行参数，确保催化剂始终处于 280°C – 420°C 的最佳活性温度区间。这一优化使得脱硝反应速率显著提升，脱硝效率从改造前的 82% 提高至 92% 以上，极大增强了系统的污染物处理能力^[10]。

同时，电加热器的优化对氨逃逸控制产生了积极影响。以往因温度波动导致的氨不完全反应问题得到有效解决，通过精准的温度控制，将氨逃逸量从改造前的 8ppm 降低至 3ppm 以下，不仅减少了氨的浪费，降低了运行成本，更有效避免了氨逃逸对大气环境造成的二次污染。在实际工程应用中，经过优化后的 SCR 脱硝系统实现了长期稳定运行，各项环保指标均优于国家标准，充分验证了节能设计与运行优化策略的可行性和有效性，为 SCR 脱硝系统的高效、环保运行提供了坚实保障。

六、总结

脱硝电加热器的节能设计与运行优化至关重要。通过对其关键技术路径的凝练，可在多个方面实现突破。在节能设计上，注重电加热器的结构优化，提高能源转换效率，降低能耗。同时，采用先进的材料和智能控制系统，精确调节加热功率，适应不同工况。在运行优化方面，实时监测设备运行参数，及时调整运行策略，避免能源浪费。展望未来，多能互补系统集成将为脱硝电加热器带来新的机遇。通过整合多种能源形式，实现能源的高效利用和协同供应。数字孪生技术的应用则可实现对设备的精准模拟和优化控制，提前预测故障，进一步提高设备的可靠性和节能效果，推动脱硝电加热器技术不断发展。

参考文献

- [1] 宋铖. 多种工况下 SCR 脱硝系统节能优化研究 [D]. 湖南 : 长沙理工大学 , 2017.
- [2] 杨弘阳 .SCR 脱硝装置协调优化研究 [D]. 吉林 : 东北电力大学 , 2017.
- [3] 许肖飞 . 水泥窑烟气 SCR 脱硝系统数值模拟及优化研究 [D]. 内蒙古 : 内蒙古工业大学 , 2021.
- [4] 张硕 . 燃煤电厂 SCR 脱硝系统喷氨优化研究 [D]. 河北 : 河北科技大学 , 2020.
- [5] 张楷 . 燃煤机组 SCR 脱硝控制系统设计与应用研究 [D]. 河北 : 华北电力大学 , 2019.
- [6] 张坤 . SCR 烟气脱硝效率影响因素及运行优化的探讨 [J]. 科学与财富 , 2014(11):1.
- [7] 刘铁成 . 托电 #7 机组 SCR 脱硝改造后对锅炉的影响及运行优化 [J]. 中文信息 , 2014, 000(006):345–346.
- [8] 张喆 . 介电分离节能电加热器的研制与应用 [J]. 中国科技信息 , 2011(8):2.
- [9] 胡小夫 , 汪洋 , 等 . 燃煤电站 SCR 脱硝系统运行优化 [J]. 华电技术 , 2019, 41(10):5.
- [10] 张敏 .320MW 燃煤机组脱硝电加热器控制策略及一次接线方式优化 [J]. 低碳世界 , 2018(3):2.