

论证与研究

基于流场优化与喷氨精准控制的 SCR 脱硝系统节能运行技术

杨超

大唐蒲城发电有限责任公司 陕西渭南 715501

【摘要】随着“双碳”战略的深入推进和超低排放要求的全面实施，燃煤机组面临环保设施高效稳定运行的重要挑战。本研究针对SCR脱硝系统存在的流场分布不均与喷氨控制精度低等关键问题，提出了一种融合流场优化与喷氨精准控制的节能运行技术。通过数值模拟与现场试验，优化了反应器内部导流板与整流格栅结构，使流场速度分布相对标准偏差从19.2%降至6.8%，系统阻力降低14.4%。研发的基于动态神经网络的智能喷氨控制系统，实现了脱硝效率91.5%、氨逃逸浓度1.8ppm以下、还原剂消耗量减少12.7%的良好效果。研究结果表明，该技术不仅显著提升了SCR系统的脱硝性能，还通过降低系统阻力与还原剂消耗，实现了显著的节能效益与经济效益。

【关键词】SCR脱硝；流场优化；喷氨控制；节能运行；数值模拟

Energy-saving Operation Technology for SCR Denitrification System Based on Flow Field Optimization and Precise Ammonia Injection Control

Yang Chao

Datang Pucheng Power Generation Co., Ltd., Weinan City, Shaanxi Province 715501

【Abstract】 With the deepening implementation of the "dual carbon" strategy and the comprehensive enforcement of ultra-low emission requirements, coal-fired power units face significant challenges in ensuring efficient and stable operation of environmental protection facilities. This study addresses key issues in SCR denitrification systems, including uneven flow field distribution and low precision in ammonia injection control, by proposing an energy-saving operation technology that integrates flow field optimization with precise ammonia injection control. Through numerical simulations and field tests, the internal flow guide plates and rectifier grid structures of the reactor were optimized, reducing the relative standard deviation of flow velocity distribution from 19.2% to 6.8%, while decreasing system resistance by 14.4%. The developed intelligent ammonia injection control system based on dynamic neural networks achieved excellent results: 91.5% denitrification efficiency, ammonia slip concentration below 1.8 ppm, and a 12.7% reduction in reductant consumption. The research findings demonstrate that this technology not only significantly enhances SCR system performance but also achieves substantial energy and economic benefits through reduced system resistance and reductant consumption.

【Key words】 SCR denitration; flow field optimization; ammonia injection control; energy-saving operation; numerical simulation

一、前言

随着“双碳”战略的深入实施与超低排放要求的全面推进，燃煤机组面临着变负荷、变煤质等多重挑战，环保设施的高效稳定运行变得尤为关键^[1]。在众多烟气净化技术中，选择性催化还原（SCR）脱硝技术凭借其高效的脱硝性能，已成为燃煤电厂控制氮氧化物（NO_x）排放的主流技术^[2]。然而，在实际运行过程中，已投运的SCR脱硝反应器普遍存在流场分布不均、氨逃逸严重等问题。目前，针对SCR脱硝系统的优化研究主要集中在两个方面：流场优化技术与喷氨控制策略。在流场优化方面，研究表明烟气在催化剂入口处的流速分布均匀性是影响脱硝效率的关键因素^[3]。本文研究旨在通过流场分区重构与喷氨精准控制的协同优化，解

决SCR脱硝系统在实际运行中面临的流场不均与喷氨控制滞后等问题，为燃煤电厂实现节能降耗与超低排放的双重目标提供技术支撑。

二、流场优化原理与数值模拟

（一）流场优化原理

SCR脱硝系统的流场均匀性是影响脱硝效率和氨逃逸的关键因素。在实际运行中，烟气在反应器内的流动往往存在明显的速度分布不均和流向偏差，这会导致局部区域氨氮混合不充分，进而降低脱硝性能并增加氨逃逸风险^[4]。流场优化旨在通过改进反应器内部结构，如导流板、整流格栅和喷氨格栅的布置，来提升烟气流动的均匀性^[5]。优化原理基

于流体力学中的动量守恒和能量耗散理论,通过调整导流板的角度和位置,可以引导烟气在催化剂层前实现更均匀的分佈^[6]。研究表明,流场均匀性的改善不仅能够提高脱硝反应的效率,还能减少系统阻力,从而降低风机电耗,实现节能运行^[7]。

(二) 流场优化数值模拟

数值模拟是流场优化的重要工具,它能够通过计算流体动力学(CFD)方法预测烟气在SCR反应器内的流动特性^[8]。本研究采用k-ε湍流模型对某300MW燃煤机组的SCR脱

硝系统进行模拟,网格划分采用多面体单元,总数约为450万,以确保计算精度。模拟边界条件基于实际运行参数设定,包括烟气流量为120.5 m³/s、温度为653.15 K。通过模拟,分析了不同导流板配置下的流场分布,并优化了导流板的倾角与间距。优化后的流场在催化剂入口处的速度分布均匀性显著提升,速度相对标准偏差从优化前的18.7%降低至6.3%。此外,数值模拟还揭示了流场不均对氨氮混合的影响,为喷氨控制策略的制定提供了理论基础。

表1 流场优化方法分类及效果比较

优化方法	流速均匀性改善率(%)	阻力损失减少率(%)	适用条件
导流板角度调整	12.5	8.3	高流速区域
整流格栅加装	15.8	11.2	流场复杂结构
喷氨格栅重构	9.7	6.5	氨氮混合不均场景
组合优化策略	22.4	14.6	综合性能提升需求

在流场优化过程中,导流板的设计尤为关键。通过调整导流板的倾角在15°至30°范围内,可以显著改善烟气的流向分布。例如,当导流板倾角为22.5°时,模拟结果显示流速分布均匀性指数达到0.92,较优化前的0.78有显著提升。同时,优化后的流场减少了局部涡流和死区,有助于降低系统阻力,实测数据显示阻力损失从原来的1.25 kPa降至1.07 kPa,节能效果明显,提升了脱硝效率,还为后续喷氨精准控制奠定了基础。

(三) 流场优化效果实证分析

为了验证流场优化的实际效果,本研究在某300MW燃煤机组上进行了现场试验。试验期间,机组负荷在180MW至300MW范围内变化,通过测量催化剂入口处的流速和氨浓度分布,评估优化后的流场均匀性。测量采用多点网格法,在催化剂入口截面布置了36个测点,使用皮托管和激光氨

分析仪进行数据采集。试验结果表明,优化后流场的速度分布相对标准偏差平均值为6.8%,较优化前的19.2%大幅下降,这证实了数值模拟结果的可靠性。此外,氨氮摩尔比分布均匀性指数从0.72提升至0.89,表明氨氮混合效果得到显著改善,这直接促进了脱硝效率的提高和氨逃逸的降低。

流场优化的节能效益主要体现在系统阻力减少和风机能耗下降。试验数据显示,优化后SCR系统的总阻力降低了约14.3%,这相当于引风机电耗减少5.7 kW·h/h。长期运行中,这种节能效果累积显著,按年运行7500小时计算,可节约电耗约4.3万kW·h,折合标准煤约13.2吨。同时,流场均匀性的提升还延长了催化剂的使用寿命,因为减少了局部磨损和堵塞风险。试验中,通过对比优化前后催化剂的活性变化,发现优化后催化剂的失活速率降低了约18.5%,进一步降低了运行维护成本。

表2 优化前后流场参数对比

参数指标	优化前平均值	优化后平均值	改善幅度(%)
流速分布相对标准偏差(%)	19.2	6.8	64.6
氨氮摩尔比偏差	0.28	0.11	60.7
系统阻力(kPa)	1.25	1.07	14.4
脱硝效率(%)	84.3	91.5	8.5
氨逃逸浓度(ppm)	3.6	1.8	50

实证分析还显示,流场优化对变负荷工况的适应性较强。在机组负荷从250MW降至200MW的过程中,优化后的流场均匀性指数仅从0.90下降至0.87,表明优化措施具有良好的鲁棒性。这一特性对于电力现货市场环境下机组的灵活运行尤为重要。综上所述,流场优化技术不仅提升了SCR脱硝系统的性能,还通过降低能耗和延长设备寿命,实现了节能运行的目标。这些成果为后续喷氨精准控制技术的集成应用提供了实践依据。

(一) 智能控制系统设计与实现

针对传统喷氨控制方法难以适应复杂工况的问题,本研究开发了基于动态神经网络的智能控制系统。该系统通过实时监测烟气流量、NO_x浓度和温度等参数,建立喷氨量与运行工况的非线性映射关系,实现精准调控。系统采用改进的BP神经网络算法,具备在线学习能力,在负荷波动时响应时间较传统PID控制缩短42.3%,控制精度提升35.6%。在具体实现中,将喷氨格栅划分为12个独立控制区域,每个区域配备专用的氨流量调节阀和浓度检测装置,根据各区域NO_x浓度分布实时调整喷氨量。同时引入前馈-反馈复合控制策略,前馈控制基于机组负荷和烟气参数预测基本喷氨

三、喷氨精准控制技术研究

量,反馈控制根据出口 NO_x 浓度进行微调,显著提升了系统的适应性和控制精度。

(二) 控制效果与经济性分析

为全面评估智能喷氨控制系统的综合性能,项目组在其投运后进行了为期三个月的现场试验与跟踪分析。试验覆盖了机组不同负荷工况,重点考察了系统的控制精度、稳定性与经济效益。在控制效果方面,智能控制系统展现出显著优势。试验数据显示,在180MW至300MW的负荷区间内,系统脱硝效率稳定在91.2%至92.8%之间,平均效率达91.5%,彻底改变了以往效率随负荷波动大的情况。更为关键的是,氨逃逸浓度由优化前的平均3.6ppm成功降至1.8ppm以下,降幅高达50%,这不仅证明了流场优化后氨氮混合均匀性的提升,也直接体现了智能算法在精准匹配喷氨量方面的核心价值。尤其在考验系统动态响应能力的负荷快速变化工况下(变化率约为4MW/min),得益于神经网络模型的前瞻预测功能,脱硝效率的波动范围被严格控制在±1.2%之内,表现出卓越的调节品质和抗干扰能力,为机组的深度调峰运行提供了可靠的环保保障。在经济性分析上,该系统的节能降耗效益同样突出。其经济效益主要来源于三个方面:首先是直接物料节约。精准控制避免了“过喷”造成的还原剂浪费,实现液氨消耗量减少12.7%,折合年节约液氨26.3吨,仅此一项便可直接节约成本15.8万元。其次是设备寿命延长带来的间接效益。氨逃逸浓度的大幅降低,有效减轻了硫酸氢铵对下游空气预热器换热元件的堵塞与腐蚀,更重要的是显著延缓了催化剂的中毒与堵塞速率,预计可使其使用寿命延长23.5%,年均节约的催化剂更换费用高达28.6万元。最后,结合流场优化带来的系统阻力下降14.4%,引风机的电耗也同步降低,进一步减少了运行费用。

四、研究结论

参考文献

- [1]李丽,徐劲.超低排放标准下燃煤电厂脱硝反应器流场优化研究[J].资源节约与环保,2024,(10):58-62.
- [2]李旺,赵雯雯,吴远翔,李重玖,蒋龙飞.基于CFD流场模拟的烧结烟气脱硝系统优化[J].中国环保产业,2024,(08):43-48.
- [3]高磊,杨文生.某300MW燃煤锅炉脱硝系统流场优化[J].当代化工研究,2024,(13):175-177.
- [4]王轶,樊雄飞,顾超,何宝晶,李伟,李兵,伍力拓,杨浩,杨祖旺,张健.燃煤锅炉SCR脱硝系统及其流场优化研究[J].内蒙古电力技术,2023,41(06):26-34.
- [5]张宇雄,郭江涛,张恒吉,韩燕鹏,贾新强.火电厂SCR脱硝系统精准喷氨研究[A]2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(下册)[C].中国电力技术市场协会,中国电力技术市场协会,2023:4.
- [6]徐辉,施勇.中温中尘SCR烟气脱硝系统流场优化的研究[J].中国水泥,2023,(11):45-50.
- [7]尹航,顾海鹏.燃煤电厂SCR脱硝系统烟气流场优化[J].电站系统工程,2023,39(06):5-9.
- [8]孙涛,赵永全,刘春林,平双荣,徐向东.某热动力站320t/h煤粉锅炉脱硝系统优化的研究及应用[J].石化技术,2023,30(10):206-208.

作者简介:杨超,1992.5,男,汉族,吉林富余人,本科,助理,工程师,研究方向:热能与动力。

本研究通过将流场优化与喷氨精准控制技术相结合,形成了一套完整的SCR脱硝系统节能运行方案。实践应用表明,该技术路线能够有效解决燃煤电厂SCR系统普遍存在的流场不均和氨逃逸控制难题,实现了环保与节能的协同增效。在流场优化方面,基于CFD数值模拟对反应器内部结构进行的改造取得了显著成效。优化后,催化剂入口截面的烟气流速分布相对标准偏差从原来的19.2%降至6.8%,这一改进为脱硝反应创造了理想的条件。同时,系统阻力降低14.4%,有效减轻了风机的运行负荷,实现了可观的节电效果。在喷氨控制方面,研发的智能喷氨控制系统展现了优异的性能。系统采用的分区控制策略能够根据各区域NO_x浓度分布实时调整喷氨量,使脱硝效率稳定在91.5%左右,同时将氨逃逸浓度控制在1.8ppm以下,较改造前降低50%。这一改进不仅减少了还原剂消耗,也延长了催化剂的使用寿命。值得关注的是,该技术方案在变负荷工况下表现出良好的适应性。当机组负荷在180-300MW范围内变化时,系统仍能保持稳定的运行参数,流场均匀性指数波动范围小于0.03,脱硝效率波动不超过±1.2%。这一特性对于参与电网调峰的机组尤为重要。从经济性角度评估,该技术方案的投资回收期约为1.8年,具有明显的经济效益。其中,还原剂消耗降低12.7%,催化剂使用寿命延长23.5%,再加上风机能耗的下降,每年可为企业创造可观的经济效益。

总的来说,本研究提出的流场优化与喷氨精准控制协同技术,为燃煤电厂SCR脱硝系统的节能降耗提供了一条行之有效的技术路径。该方案不仅能够保证超低排放要求的实现,还能显著降低运行成本,对推动电力行业绿色低碳转型具有积极的实践意义。随着电力市场改革的深入,这种兼顾环保与经济的技改方案将具有更广阔的应用前景。