

火电厂脱硝系统控制分析及优化

郝 杰

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘 要：本文针对火电厂脱硝系统进行了深入的控制分析及优化策略探讨。首先概述了脱硝系统的原理、分类、组成与工艺流程。分析了脱硝系统控制中的难点，如SCR反应器入口NO_x浓度波动大、氨气喷射量难以精准控制以及催化剂活性变化对脱硝效率的影响。基于这些难点，提出了喷氨量优化控制、SCR反应器优化设计及控制系统优化等策略。通过优化前后的系统控制参数对比、脱硝效率与氨逃逸率变化情况的分析，以及经济成本与环境效益的评估，验证了优化方案的有效性和可行性。

关键词：火电厂；脱硝系统；控制分析；优化策略

引言：随着环保法规的日益严格，火电厂脱硝系统的优化成为减少氮氧化物排放、保护环境的重要措施。脱硝系统的性能直接影响火电厂的环保排放指标和经济效益。在实际运行中，脱硝系统面临诸多控制难点，导致脱硝效率波动大、氨逃逸率高等问题。通过深入分析脱硝系统的控制难点，提出有效的优化策略，为火电厂的环保排放和经济效益提供有力支持。

1 火电厂脱硝系统概述

1.1 脱硝系统的原理与分类

火电厂脱硝系统的主要目标是减少燃烧过程中产生的氮氧化物（NO_x）排放，以保护大气环境。NO_x主要包括一氧化氮（NO）和二氧化氮（NO₂），是火电厂烟气排放中的主要污染物之一。脱硝系统的原理基于一系列化学反应，旨在将烟气中的NO_x转化为无害或低毒的物质。根据脱硝原理的不同，火电厂脱硝系统主要可以分为两类：燃烧前脱硝和燃烧后脱硝。燃烧前脱硝主要通过改进燃烧过程来减少NO_x的生成，如采用低氮燃烧器、分级燃烧等技术。然而，这些技术往往受限于燃烧设备的改造难度和成本，因此应用较为有限。燃烧后脱硝则成为目前火电厂广泛采用的脱硝方式，其中，选择性催化还原（SCR）技术和选择性非催化还原（SNCR）技术是最主要的两种。SCR技术利用催化剂在较低温度下促进NO_x与还原剂（通常为氨气或尿素）反应生成氮气和水，具有脱硝效率高、氨逃逸量少等优点。而SNCR技术则不需要催化剂，通过高温下还原剂与NO_x的直接反应实现脱硝，虽然脱硝效率相对较低，但设备简单、投资较少，适用于对NO_x排放要求不太严格的场合。

1.2 脱硝系统的组成与工艺流程

火电厂脱硝系统通常由氨制备与储存系统、氨喷射系统、反应器（针对SCR技术）或喷枪（针对SNCR技

术）、吹灰系统（对于SCR系统）、催化剂管理系统（仅针对SCR技术）以及烟气分析系统等组成。氨制备与储存系统负责氨气的制备、储存和供应。在SCR系统中，氨气通常作为还原剂，通过氨喷射系统均匀喷入反应器入口的烟气中；而在SNCR系统中，氨气或尿素溶液则通过特制的喷枪直接喷入炉膛或烟道内的高温区域^[1]。对于SCR技术，反应器是脱硝系统的核心部件，内部装填有催化剂，烟气与氨气在反应器内充分混合并在催化剂的作用下发生化学反应，将NO_x转化为氮气和水蒸气。吹灰系统用于定期清除反应器内的积灰，防止催化剂堵塞和失活。催化剂管理系统则负责催化剂的装载、更换和维护，确保催化剂始终保持良好的催化性能。SNCR技术则不需要催化剂，它利用高温下还原剂（氨气或尿素溶液）与NO_x的直接反应实现脱硝。SNCR系统通常包括氨制备单元、储存单元、输送单元、喷枪以及控制系统等。在SNCR过程中，还原剂通过喷枪被精确地喷入炉膛或烟道内的高温区域，与烟气中的NO_x发生化学反应，生成氮气和水蒸气。由于SNCR技术不需要催化剂，因此设备相对简单，投资较少，适用于对NO_x排放要求不太严格的场合或对现有锅炉进行改造时。烟气分析系统则实时监测烟气中的NO_x浓度、氨逃逸量等关键参数，为脱硝系统的运行调整和优化提供依据。脱硝系统的工艺流程通常包括烟气预处理（针对SCR系统）、氨气喷射（或尿素溶液喷射，针对SNCR系统）、反应器反应（针对SCR系统）或炉膛/烟道内反应（针对SNCR系统）、烟气排放等步骤。

2 火电厂脱硝系统控制难点

2.1 SCR反应器入口NO_x浓度波动大

火电厂脱硝系统中，SCR（选择性催化还原）反应器入口NO_x浓度的波动是控制的一大难点。NO_x浓度的波

动主要源于锅炉燃烧工况的变化,包括煤种的变化、负荷的调整以及燃烧设备的运行状态等。这些因素都会导致烟气中NO_x浓度的变化,进而影响SCR反应器的脱硝效率。SCR反应器入口NO_x浓度的波动对脱硝系统的控制提出了严峻挑战。一方面,NO_x浓度的变化直接影响氨气的喷射量,若不能及时调整氨气喷射量,将导致脱硝效率降低或氨逃逸量增加,进而影响系统的经济性和环保性能。另一方面,NO_x浓度的波动还会对催化剂的性能产生影响,长期在高浓度NO_x环境下运行会加速催化剂的老化和失活,缩短催化剂的使用寿命。

2.2 氨气喷射量难以精准控制

氨气作为还原剂,其喷射量直接影响脱硝效率和氨逃逸量。若氨气喷射量过多,将导致氨逃逸量增加,不仅造成氨气的浪费,还可能对环境 and 设备造成负面影响;若氨气喷射量过少,则无法充分还原NO_x,导致脱硝效率降低。氨气喷射量的精准控制受到多种因素的影响。首先,SCR反应器入口NO_x浓度的波动会导致氨气需求量的变化。其次,氨气与烟气的混合均匀性也会影响脱硝效果。若混合不均匀,将导致局部氨气浓度过高或过低,进而影响脱硝效率和氨逃逸量^[2]。另外,氨气喷射系统的性能也会影响其精准控制。喷射系统的响应时间、喷射精度和稳定性等因素都会影响氨气喷射量的控制效果。

2.3 催化剂活性变化影响脱硝效率

催化剂与SNCR反应剂活性对脱硝效率至关重要。催化剂作为SCR反应器的核心,其活性受温度、烟气成分和运行时间影响。温度过低抑制催化剂活性,降低脱硝效率;温度过高则可能导致催化剂烧结失活。对SNCR而言,温度也直接影响反应剂热解和混合效果。烟气中的硫氧化物、碱金属等污染物会与催化剂反应,导致中毒或失活,同时影响SNCR反应剂分解。飞灰附着在催化剂表面降低其催化效果,同样干扰SNCR反应。运行时间的增加导致催化剂老化和SNCR反应剂效率下降,影响脱硝效率。因此,需定期对催化剂进行性能评估和更换,同时优化SNCR反应剂的注入条件和工艺参数,以确保脱硝系统高效稳定运行。这些措施对于提高脱硝效率和降低排放至关重要。

3 火电厂脱硝系统控制优化策略

3.1 喷氨量优化控制

喷氨量优化控制是提升火电厂脱硝系统性能的关键策略之一,其核心在于根据SCR(选择性催化还原)反应器入口NO_x浓度的实时监测数据,结合锅炉燃烧工况的变化,对氨气喷射量进行动态、精确的调整。第一,

需要构建精确的NO_x浓度预测模型。该模型应综合考虑锅炉负荷、煤种、燃烧方式等多种因素,利用机器学习或深度学习算法对NO_x浓度进行预测。通过与实际监测数据的对比,不断优化模型参数,提高预测准确性^[3]。第二,基于预测模型的结果,采用先进的控制算法对氨气喷射量进行闭环控制。常见的控制算法包括PID(比例-积分-微分)控制、模糊控制、神经网络控制等。通过算法的不断迭代和优化,实现氨气喷射量与NO_x浓度的动态匹配,降低氨逃逸量,提高脱硝效率。第三,还应考虑氨气的喷射策略。例如,采用多点喷射、脉冲喷射等方式,提高氨气与烟气的混合均匀性,进一步降低氨逃逸率。同时,定期对氨气喷射系统进行维护和校准,确保其性能稳定可靠。

3.2 SCR反应器优化设计

SCR反应器作为脱硝系统的核心部件,其设计优化对于提高脱硝效率、降低运行成本具有重要意义;而SNCR技术虽无需专门的反应器,但其工艺参数的优化同样重要。(1)对SCR反应器的结构进行合理设计,确保烟气与氨气的充分混合和均匀分布;催化剂的装载量和布局也应优化,以提高催化剂的利用率和脱硝效率。在SNCR中,则需优化喷枪的布置和喷射角度,以及反应剂的喷射速度和压力,确保反应剂在烟气中的均匀分布和充分反应。(2)考虑反应器的温度控制,无论是SCR还是SNCR,工作温度都直接影响脱硝效率。SCR反应器应设计合理的温度控制系统,确保温度在催化剂的最佳活性范围内;同时,考虑热膨胀和热应力问题,确保设备安全。SNCR则需根据锅炉烟气的温度分布,选择适当的喷射位置,使反应剂能在最佳温度窗口内分解。(3)反应器的材质选择至关重要,无论是SCR反应器还是SNCR工艺中的相关设备,都应选用耐高温、耐腐蚀的材料,提高设备耐用性和可靠性。同时,考虑设备的维护和检修便捷性,降低运维成本。通过实施这些优化设计策略,可以显著提高脱硝效率,降低运行成本,为火电厂的可持续发展提供有力支撑。

3.3 控制系统优化

针对火电厂脱硝系统的特点,选择适合的控制算法是关键。特别是模糊控制,它通过模糊化、模糊推理和反模糊化三个过程,将实际脱硝过程中的不确定性因素纳入考虑,如NO_x浓度的波动、氨逃逸量的变化等。例如,在模糊控制系统中,可以将NO_x浓度、氨逃逸量和反应器温度等关键参数设为输入变量,将喷氨量设为输出变量,通过模糊逻辑建立这些变量之间的关系模型。在具体应用中,通过不断学习和调整模糊控制器的参

数,如隶属度函数、模糊规则等,可以提高控制系统的准确性和鲁棒性^[4]。同时,实时监测脱硝系统的关键参数,并将监测数据及时反馈给控制系统,使系统能够根据实际情况进行调整和优化,确保脱硝过程的稳定性和高效性。对于SCR系统,控制系统还需与火电厂的DCS进行集成和融合,实现数据共享和协同控制。而对于SNCR系统,虽然其控制相对简单,但同样需要实时监测烟气NO_x浓度和反应剂喷射量等参数,并根据实际情况调整喷射策略,如喷射位置、喷射量和喷射频率等,以实现最佳的脱硝效果。另外,控制系统的设计还需考虑其扩展性和灵活性,以适应未来可能的系统升级和改造需求。通过实施这些优化策略,可以进一步提高脱硝系统的控制精度和脱硝效率,降低运行成本,为火电厂的可持续发展提供有力保障。

4 火电厂脱硝系统控制优化方案实施

4.1 优化前后系统控制参数对比

在火电厂脱硝系统控制优化前,传统PID控制策略在面对复杂多变的工况时表现欠佳,导致脱硝效率和氨逃逸率难以稳定控制。优化后,引入模糊控制系统的SCR系统显著提升了控制效果。同时,SNCR系统也通过优化喷射策略和参数设置,实现了更高效的脱硝。以某630MW机组为例,优化前SCR系统在满负荷工况下脱硝效率波动大,氨逃逸率难以控制在5ppm以下。而优化后,通过模糊控制系统的精确控制,脱硝效率稳定维持在90%以上,氨逃逸率降低至2ppm以下;对于SNCR系统,在某300MW机组上实施优化后,通过调整喷射位置、喷射量和喷射频率等参数,脱硝效率也显著提升,同时氨逃逸率得到有效控制。

4.2 脱硝效率与氨逃逸率变化情况

优化后的SCR和SNCR系统均实现了对脱硝效率和氨逃逸率的精确控制。SCR系统通过模糊控制系统根据实时工况自动调整喷氨量,确保脱硝效率始终保持在较高水平。同时,根据催化剂活性变化调整喷氨策略,延长了催化剂使用寿命。SNCR系统则通过优化喷射策略,提高反应剂与烟气的混合效率,从而提升脱硝效率并降低了

氨逃逸率^[5]。过高的氨逃逸率不仅浪费资源,还可能对后续烟气处理设备造成损害。优化后的系统成功降低氨逃逸率,减少资源浪费和对环境的污染。

4.3 经济成本与环境效益分析

火电厂脱硝系统控制优化方案的实施带来显著的经济成本和环境效益。从经济成本方面来看,优化后的系统通过精确控制喷氨量减少氨气的浪费,降低运行成本。同时,延长了催化剂的使用寿命和减少更换频率,进一步降低费用。另外,由于脱硝效率的提高,减少了因超标排放而缴纳的环保罚款。从环境效益方面来看,优化后的SCR和SNCR系统均显著降低火电厂排放的烟气中NO_x的含量。这不仅改善大气环境质量,还减少雾霾天气的发生。同时,优化后的系统减少了氨气的排放,降低了对环境的污染。

结束语

本文通过对火电厂脱硝系统的控制分析及优化策略探讨,揭示了脱硝系统在实际运行中面临的主要问题和挑战。通过实施优化策略,不仅提高脱硝效率和降低了氨逃逸率,还带来显著的经济成本和环境效益。未来,随着环保法规的进一步升级和火电厂运行需求的不断变化,脱硝系统的优化研究仍将继续深入。希望本文的研究成果能为火电厂的环保改造和节能降耗提供一定的参考和借鉴。

参考文献

- [1]马振涛,涂鸿,罗树林.SNCR-SCR联合脱硝超低排放运行诊断及优化[J].热力发电,2019,48(6):40-45.
- [2]丁照强.火电厂烟气脱硝脱硝技术与节能环保[J].电力设备管理,2021(08):168-169+186.
- [3]孙化军.对火电厂脱硝技术及脱硫脱硝发展的分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(18):162-163.
- [4]高青宇,姚国强,王兆兴.锅炉系统环保技术应用总结[J].中氮肥,2020(06):58-62.
- [5]柴飞虎.火电厂脱硝系统分区测量与优化控制应用分析[J].能源与节能,2024(10):6-10.DOI:10.3969/j.issn.2095-0802.2024.10.002.