

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.02.016

燃煤电厂 SCR 脱硝系统氨逃逸率控制技术研究

Study on ammonia escape rate control technology of SCR denitrification system in coal-fired power plant

游松林¹, 罗洪辉¹, 王振¹, 姚勇琪¹, 刘秀如², 孙漪清², 陈锋²
YOU Songlin¹, LUO Honghui¹, WANG Zhen¹, YAO Yongqi¹,
LIU Xiuru², SUN Yiqing², CHEN Feng²

(1. 湖南华电常德发电有限公司, 湖南 常德 415001; 2. 中国华电集团科学技术研究总院有限公司, 北京 100070)
(1. Hunan Huadian Changde Power Station Company Limited, Changde 415001, China; 2. China Huadian Science and Technology Institute Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:基于燃煤电厂选择性催化还原(SCR)脱硝原理,揭示氨逃逸的原因和对机组运行的危害。分析认为,影响SCR脱硝系统氨逃逸率的因素包括脱硝催化剂性能、烟气流场均匀性、锅炉运行方式、喷氨控制逻辑、仪器仪表及测量方式等。针对SCR系统氨逃逸率的影响因素,结合电厂机组实际运行情况,提出降低氨逃逸率的控制策略,可为国内燃煤电厂超低排放改造及SCR系统性能优化提供参考。

关键词:燃煤电厂;脱硝系统;选择性催化还原;超低排放;氨逃逸率

中图分类号:X 701 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2019)02-0055-05

Abstract:Based on the reaction principle of SCR denitrification system, causes of ammonia escape and hazards to coal-fired power plants are revealed. Factors affecting the ammonia escape rate of the denitrification system include denitrification catalyst performances, flue field uniformity, boiler operation modes, ammonia injection logic system, measurement gauges and methods, etc. According to these influencing factors and units operational status, control strategies for reducing ammonia escape rate are proposed. It provides guidance and reference for ultra-low emission modification and performance optimization of SCR denitrification system in domestic coal-fired power plants.

Keywords:coal-fired power plants; denitrification system; selective catalytic reduction; ultra-low emission; ammonia escape

0 引言

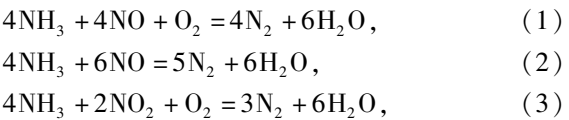
随着环保标准的日益提高,燃煤电厂现有环保装置需要进行超低排放改造,要求在基准氧含量为6%的条件下,NO_x排放质量浓度不高于50 mg/m³(标态)。脱硝超低排放技术路线大多采用低氮燃烧器和选择性催化还原(SCR)组合方式,脱硝效率和NH₃逃逸率是衡量SCR脱硝系统的两个重要性指标。电厂机组通过更换或增加催化剂层,实现较高的脱硝效率,满足NO_x排放要求,同时控制氨逃逸率在3×10⁻⁶以下。

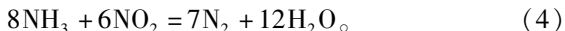
电厂实际运行过程十分复杂,难以达到排放指标时,往往通过增加喷氨量来提高脱硝效率,造成氨

逃逸率超标。过量的逃逸氨和烟气中的SO₃发生反应生成硫酸氢铵,导致空气预热器堵塞、除尘效率下降、催化剂受损等一系列问题,严重时还会影响机组运行,降低系统经济性和安全性^[1]。严格控制脱硝系统氨逃逸率已是燃煤机组运行不容忽视的问题。本文通过揭示脱硝系统氨逃逸形成原因、影响因素,探讨氨逃逸率控制技术方法,为国内燃煤电厂超低排放改造及实际机组运行提供参考。

1 氨逃逸的生成机理及危害

燃煤电厂SCR脱硝反应器中,NH₃选择性催化还原烟气中NO_x的主要化学反应为:





烟气中 90% ~ 95% 的 NO_x 以 NO 形式存在, 以上反应中以反应(1)为主。 NO 与 NH_3 的摩尔比为 1: 1, 理论上讲 1 mol 的 NH_3 可以完全还原 1 mol 的 NO 。 实际运行中, 受反应条件限制和副反应的影响, 无法保证 NO 完全脱除, 所以 SCR 脱硝反应效率一般在 95% 左右。

燃煤烟气中含有一定质量浓度的 SO_2 以及少量 SO_3 , SO_2 在催化剂作用下进一步氧化生成 SO_3 , SO_3 与 NH_3 及水蒸气反应生成硫酸氢铵与硫酸铵^[2-3]。 通常条件下, 硫酸氢铵的露点为 147 °C, 其凝结物呈中度酸性且具有很黏性, 黏附在催化剂和空气预热器的换热元件表面上, 加剧换热元件的腐蚀和堵灰, 影响换热效果和锅炉效率, 且飞灰中氨含量增大, 湿法脱硫废水及空气预热器清洗水中氨含量也会相应增大。

硫酸氢铵形成温度随着 NH_3 和 SO_3 质量分数乘积的升高而升高, 影响规律如图 1 所示^[4]。 电厂锅炉空气预热器冷端运行温度一般低于硫酸氢铵的露点, 加大了受热面堵塞和腐蚀风险^[5]。 为保证机组安全稳定运行, 必须严格控制 SCR 脱硝系统喷氨量及氨逃逸率。

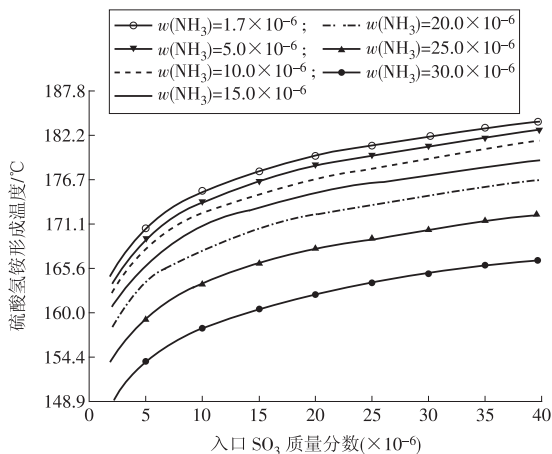


图 1 NH_3 和 SO_3 质量分数对硫酸氢铵形成温度的影响

Fig. 1 Effect of NH_3 and SO_3 mass fraction on ABS formation temperature

2 影响氨逃逸率的主要因素

2.1 脱硝催化剂性能

脱硝催化剂活性是影响氨逃逸率的根本原因, 烟气温度、含水率、氧含量、烟尘质量浓度等因素均会对催化剂活性产生影响^[6]。 烟气中的碱金属、砷元素等容易引起催化剂中毒, 催化剂长期运行中发生烧结堵塞、腐蚀、硫酸铵盐和飞灰沉积等, 均会使其活性降低, 导致未反应的氨量增加。 随着脱硝效

率的升高, 氨逃逸率呈升高趋势, 当脱硝效率高于设计值时, 氨逃逸率大幅度增加, 如图 2 所示^[7]。

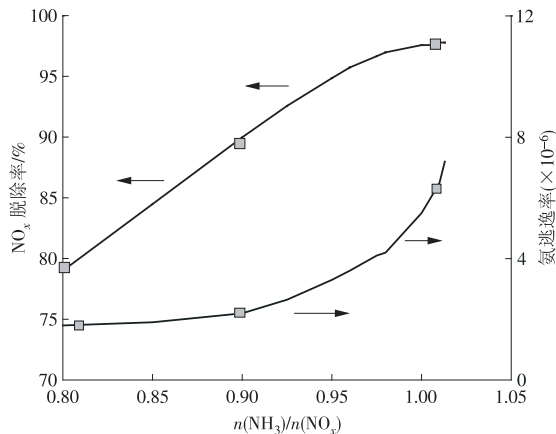


图 2 SCR 脱硝效率和氨氮摩尔比对氨逃逸率的影响

Fig. 2 Effect of SCR denitration efficiency and NH_3/NO_x molar ratio on ammonia escape rate

随着运行时间的增加, 催化剂活性下降, 脱硝效率降低, 要维持较高的脱硝效率和较低的 NO_x 排放质量浓度, 实际运行中往往需要提高氨氮摩尔比, 势必会导致氨逃逸率急剧增加, 进一步使催化剂活性降低, 引发恶性循环。

2.2 流场均匀性

烟气流场均匀性是指 SCR 脱硝系统入口烟气来流均匀性及喷氨后氨氮混合均匀性。 在烟道的转弯、收缩、扩张段, 由于流动空间的改变, 气流被迫改变运动方向, 出现涡流, 造成流动速度的分层和改变, 导致烟气流场不均匀。 运行过程中, 导流板磨损、积灰、喷嘴堵塞、烟气流量超过设计值等因素也会导致流场不均, 影响氨氮摩尔比分布。

流场和氨氮摩尔比分布不均匀会导致脱硝效率下降, 且氨氮摩尔比分布偏差越大, 对脱硝效率影响越大^[8-9]。 当氨氮摩尔比不均匀时, 在氨氮摩尔比减小的区域, 脱硝效率下降, 而氨氮摩尔比增大超过 1 的区域, 脱硝效率并不能因此增大, 从而使总的脱硝效率下降。 尤其是在超低排放要求下, 要求的脱硝效率越高, 氨氮摩尔比不均匀性的影响越明显, 氨逃逸率增长趋势也越明显。 由图 3 可见, 当脱硝效率为 92% 时, 当氨氮摩尔比偏差从 2% 增加到 12% 时, 氨逃逸率从 1.00×10^{-6} 增加到 8.00×10^{-6} ^[10]。

2.3 锅炉运行方式

机组负荷、烟温、燃烧状况等运行参数对脱硝效率和氨逃逸率有明显影响。 过高的燃尽风率或过高的氧含量可增加 SCR 入口 NO_x 质量浓度, 进而影响脱硝系统运行参数和氨逃逸率。 一般认为, SCR 反应器内烟温降低使催化剂活性下降, 导致氨逃逸率

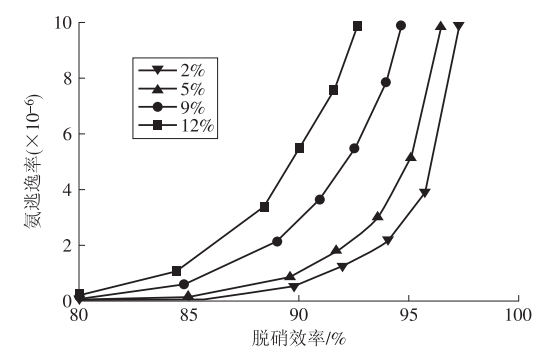


图 3 氨氮摩尔比分布偏差对脱硝性能的影响
Fig.3 Effect of NH_3/NO_x molar ratio distribution deviation on denitrification performance

增加,烟温不能长期低于 SCR 脱硝系统连续喷氨温度,否则将导致硫酸氢铵生成和催化剂失活。也有研究表明^[11],机组低负荷运行时,烟气在催化层停留时间增加可削弱催化剂活性降低的影响,通过设定合适的脱硝效率,能够有效控制系统氨逃逸率。

2.4 喷氨控制系统

脱硝系统喷氨控制系统一般采用固定氨氮摩尔比或固定 SCR 出口 NO_x 质量浓度的控制方式^[12-13]。固定氨氮摩尔比控制原理是依据脱硝效率,按照固定的氨氮摩尔比脱除烟气中 NO_x ,其控制逻辑如图 4 所示^[14]。固定 SCR 出口 NO_x 质量浓度控制方法的主控制回路与固定氨氮摩尔比的控制方式基本相同,不同之处在于引入了反应器出口 NO_x 质量浓度,脱硝效率根据反应器入口 NO_x 质量浓度和反应器出口 NO_x 质量浓度设定值计算获得,氨氮摩尔比是脱硝效率的函数。

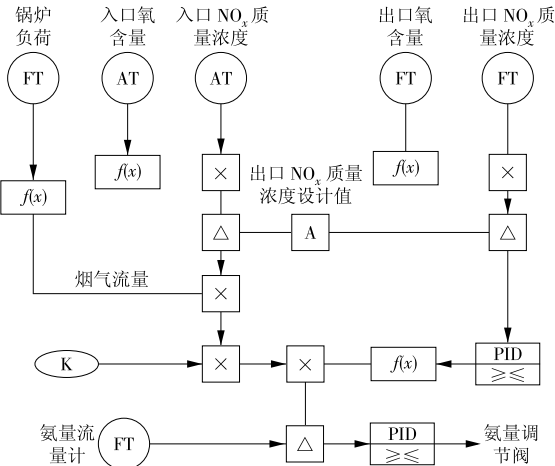


图 4 固定氨氮摩尔比时 SCR 喷氨量控制逻辑
Fig.4 SCR ammonia injection control logic at fixed NH_3/NO_x molar ratio

由于 SCR 反应器中催化剂反应反馈滞后和 NO_x 分析仪响应滞后等原因,使得 SCR 脱硝控制系统存在大滞后性和大延时性,难以精确控制喷氨量^[15-16]。尤其是机组变负荷时,SCR 入口烟气量或

NO_x 质量浓度急剧变化,调节的惯性和延时性容易导致烟囱入口 NO_x 质量浓度瞬时值超标。为了使各工况下满足超低排放要求,出口 NO_x 质量浓度设置值往往偏低,导致 SCR 系统喷氨过量,氨逃逸率超标。实际运行中,当两侧 SCR 反应器风量相差较大时,两侧喷氨量过多或过少,喷氨量过多的一侧容易发生氨逃逸。

此外, NO_x 质量浓度考核点和控制点不一致。环保考核时以烟囱入口 NO_x 质量浓度测点为准;喷氨自动调节时,单侧烟道的 SCR 反应器出口 NO_x 质量浓度为被控量。SCR 反应器出口测点与烟囱入口测点所测量的 NO_x 质量浓度存在不同程度的偏差,影响喷氨量的精准控制。

2.5 测量方法和仪表

由于氨逃逸的量级非常小,理论计算很难准确。相对于离线手工分析法,原位光学测量法可以实现在线监测,但光学测量的准确度容易受高温、高尘恶劣工况的影响。烟气含尘量大时,测量探头受钢制烟道壁振动及温度变化的影响,会出现测量不稳定或指示飘移现象,导致测量偏差大^[17-18];同时,SCR 出口烟道烟气分布不均匀,导致采样误差较大,影响氨逃逸量在线监测的准确度。一般以氨逃逸仪表监测的氨逃逸变化趋势作为运行参考,而难以通过仪表值准确控制喷氨量和氨逃逸率。

3 氨逃逸率控制技术

3.1 流场优化

实际运行过程中,SCR 脱硝系统中气流流动非常复杂,在烟道内设置导流板可有效改善速度分层现象。导流板后可加装气流均布器(在第 1 层催化剂上方加装整流格栅等),利用局部的紊流改善流场速度不均匀的状况。根据不同机组的具体情况,合理设置导流板的位置、数量、形式等,在改善流场的同时要尽可能低地增加系统压降。

氨喷入之后与烟气混合的均匀性集中在氨的喷射方式和喷氨后与烟气的混合两个方面,主要取决于喷氨格栅形式及氨烟静态混合器的选型与布置。国内外开发并应用于工程实际的喷氨装置包括线性控制喷氨格栅、分区控制喷氨格栅和静态涡流混合器技术,技术对比见表 1^[19]。线性控制喷氨格栅技术成熟,应用最广;分区控制喷氨格栅是利用分区流量调节技术,使喷氨量适应烟气中 NO_x 的分布;涡流混合器技术使 NH_3 与 NO_x 混合气体在混合元件诱导下形成稳定的涡流或旋流,加强扰动,强化湍流扩散。线性控制喷氨格栅和分区控制喷氨格栅依靠数量多、口径小的喷嘴实现均匀喷氨,但也正因为这

表 1 3 种喷氨方式技术特点对比

Tab. 1 Technical feature comparison of 3 kinds of ammonia spraying methods

喷氨方式	优点	不足
线性控制喷氨格栅	结构简单,应用广泛,技术成熟;系统压降小,寿命长;投资和运行成本低	喷嘴口径小,易堵塞;对烟气流场适应性差
分区控制喷氨格栅	对传统喷氨格栅改动小;分区精准控制喷氨量,调节质量浓度场效果好	控制技术复杂,操作要求高
静态涡流混合器	安装调试简单、成本低;喷嘴口径大,不易堵塞;流场适应性良好	系统压降大;需要较长的氨烟混合距离

一特点,运行过程中喷嘴堵塞后,反而难以实现均匀喷氨,影响氨氮摩尔比分布的均匀性。静态涡流混合器克服了小喷嘴容易堵塞的问题,具有良好的操作弹性,其难点在于静态混合器的结构设计,以及开发高效低阻扰流装置,缩短混合段距离。

3.2 控制系统优化

针对 SCR 脱硝控制系统大滞后、大延时问题,通过引入预测控制、融合改进的状态变量控制、相位补偿控制等技术,提前预测被调量未来变化趋势,提高脱硝系统闭环稳定性和抗扰动能力^[20-21]。基于预测控制和智能前馈技术的脱硝喷氨优化控制策略如图 5 所示^[21]。该技术通过考虑 SCR 上游锅炉侧多个扰动变量对 SCR 脱硝过程的影响,将多参数进行拟合作为扰动变量,实现预测控制和提前调节。

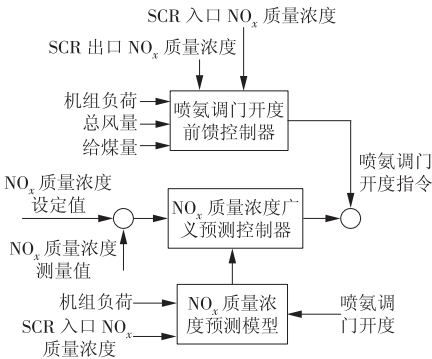


图 5 新型 SCR 脱硝优化控制策略
Fig. 5 New SCR denitration optimization and control strategy

此外,稳定的喷氨量控制取决于高质量的氨气质量流量计、氨量调节阀和最佳的控制参数。在同设备和控制条件下,通过控制系统优化,改善喷氨时机,特别是提高喷氨控制系统对机组负荷变化的响应速度,避免机组负荷变化时喷氨量未及时跟踪而使氨逃逸率超标^[22]。

3.3 喷氨优化调整

对于现役 SCR 脱硝系统,在不改造系统设备的情况下,通过喷氨格栅优化调整,可改善氨氮摩尔比分布的均匀性^[23-24]。脱硝系统一般由多个蝶阀等部件协同控制喷氨量,需要根据喷氨格栅截面内的

流场分布特性对各支管阀门进行调整,保证良好的氨氮摩尔比分布,使各区域喷氨量与 NO_x 流场相匹配,提高脱硝效率,避免局部区域过量喷氨而导致逃逸氨偏高;同时,可以通过改善反应器出口 NO_x 质量浓度分布均匀性,减小取样点的测量误差,优化控制系统参数,提高喷氨量控制的精确度^[25]。

3.4 测量仪表及测量方法改进

采用原位光学法测量氨逃逸率时,应合理设置仪表的安装位置及激光对位,关注安装处结构变形、探头附近的水蒸气、吹扫空气对仪表的影响。定期对氨逃逸率测量仪表进行检查和校验,由飞灰中氨含量辅助推断氨逃逸状况,氨逃逸异常时应及时对仪表工作状态进行检查^[26]。超低排放改造时,应按要求更换合适精度的仪表,降低测量误差对氨逃逸控制准确度的不利影响。通过对 SCR 进、出口流场的测试,采用多点取样旁路管的方式,提高测点的取样代表性^[16],在一定程度上减少 SCR 出口与烟囱入口 NO_x 质量浓度的偏差。

3.5 机组运行优化及检修维护

在脱硝超低排放改造时,根据机组情况,可优先进行低氮燃烧优化改造,从源头上减少 NO_x 生成量。采取炉内燃烧优化调整措施,通过调整氧量,调整分离燃尽风(SOFA)风门开度,合理搭配煤种等,降低脱硝装置入口 NO_x 质量浓度^[27-29]。机组运行过程中,加强氨逃逸监测,定期对现有催化剂进行检测分析,尤其要关注脱硝装置催化剂压差、系统阻力、空气预热器阻力等参数。

停炉检修时,需检查喷氨格栅喷嘴堵塞情况,对堵塞的喷嘴进行吹扫清理,加强喷氨系统阀门的维护,使喷氨调节阀有良好的调节特性,减少内漏量。重视脱硝吹灰器的检查与维护^[30-31],对催化剂积灰、磨损情况进行及时清理和修复,按规定测试催化剂活性,必要时增加催化剂层或更换催化剂,提高脱硝效率,降低氨逃逸率。

4 结论

燃煤电厂超低排放改造对 SCR 脱硝系统提出

了新的要求,在实现较高的脱硝效率的同时要保证较低的氨逃逸率。影响氨逃逸率的主要因素包括脱硝催化剂性能、机组运行方式、烟气流场均匀程度、喷氨控制逻辑、测量方法和仪表等。采取以下措施,可有效控制氨逃逸率。

(1)选择合适的喷氨格栅及氨烟混合装置,合理布置导流板、整流格栅等,提高 SCR 脱硝系统烟气流场均匀性及氨氮混合均匀性,降低氨氮摩尔比分布偏差。

(2)进行 SCR 脱硝控制系统优化,通过预测控制技术进行提前控制,改善控制逻辑的滞后和延时特性,提升喷氨控制系统对机组负荷变化的响应速度。

(3)做好喷氨优化调整,实现喷氨量与烟气中 NO_x 分布相匹配,加强对喷氨喷嘴、供氨调节阀等设备的检修维护,防止出现局部过量喷氨。

(4)通过机组运行优化和炉内燃烧优化调整,降低烟气中 NO_x 的质量浓度,并使 SCR 入口烟气参数满足催化剂性能保证条件;同时,密切关注氨逃逸、催化剂压差、空气预热器阻力等参数的变化。

(5)做好停炉检修工作,定期检查催化剂性能并及时处理催化剂磨损和堵塞问题,保证较高的脱硝效率,降低氨逃逸率。

参考文献:

[1] 李绍刚,韩丽娜. 1 000 MW 机组脱硝系统空预器堵灰防治[J]. 华电技术,2017,39(12):56-58,61.

[2] 胡劲逸. 基于氨逃逸浓度场的 SCR 喷氨协调优化控制[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[3] 刘秀如,赵勇,孙漪清,等. 燃煤电厂 SO_3 控制及脱除技术研究进展[J]. 电力科学与工程,2018,34(2):56-62.

[4] 马双忱,郭蒙,宋卉卉,等. 选择性催化还原工艺中硫酸氢铵形成机理及影响因素[J]. 热力发电,2014,43(2):75-78.

[5] 曾壁群,姚友工,杨博,等. SCR 烟气脱硝过程中硫酸氢铵的形成原因及清洗方法[J]. 华电技术,2015,37(1):40-41,44.

[6] 姜烨,高翔,吴卫红,等. 选择性催化还原脱硝催化剂失活研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(14):18-31.

[7] 蒋文举,赵君科,尹华强. 烟气脱硫脱硝技术手册[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2012:420-421.

[8] 董建勋,李辰飞,王松岭,等. 还原剂分布不均匀对 SCR 脱硝性能影响的模拟分析[J]. 电站系统工程,2007,23(1):20-21,24.

[9] 雷达,金保升. 氨氮比不均匀性对电站 SCR 系统脱硝效率的影响[J]. 锅炉技术,2010,41(6):72-74,78.

[10] 刘晓敏,雷嗣远,马云龙,等. 某 300 MW 机组 SCR 脱硝装置氨喷射系统优化改造研究[J]. 华电技术,2018,40(4):59-62,72.

[11] 郑方栋,李文华,赵敏,等. 全负荷脱硝氨逃逸率与 SO_3 转化率的变化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(9):

2607-2614.

[12] 罗子湛,孟立新. 燃煤电站 SCR 烟气脱硝喷氨自动控制方式优化[J]. 电站系统工程,2010,26(4):59-60,63.

[13] 李峰,姜文堂,史忠军,等. 300 MW 燃煤机组 SCR 烟气脱硝喷氨自动控制策略优化[J]. 华电技术,2018,40(4):67-69.

[14] 赵乾. SCR 烟气脱硝系统模拟优化及喷氨量最优控制[D]. 重庆:重庆大学,2012.

[15] 毛奕升. 烟气脱硝喷氨自动控制回路的优化[J]. 华电技术,2014,36(8):65-67.

[16] 孙东锋,黄启东,张永军,等. 首台 1 000 MW 机组烟气超低排放改造后脱硝系统控制策略改进及探讨[J]. 华东电力,2014,42(11):2457-2460.

[17] 杨剑,汤光华,苗丰,等. 氨逃逸在线监测在火电厂超低排放中的应用[J]. 电力科技与环保,2018,34(2):56-59.

[18] 康玺,吴华成,路璐,等. 脱硝氨逃逸浓度监测技术分析[J]. 华北电力技术,2015(1):54-57.

[19] 李晗天. 流场与还原剂分布不均匀性对 SCR 反应器脱硝性能的影响[D]. 北京:清华大学,2016.

[20] 何军林,马瑞. 脱硝喷氨自动控制在大型火电厂中应用案例分析[J]. 仪器仪表用户,2017,24(2):59-63.

[21] 史旭东,仲燕明. 600 MW 超临界机组 SCR 脱硝优化控制系统[C]//第四届热电联产节能降耗新技术研讨会论文集. 青岛:中国能源学会,2016.

[22] 武宝会,崔利. 火电厂 SCR 烟气脱硝控制方式及其优化[J]. 热力发电,2013,42(10):116-119,126.

[23] 张志强,宋国升,陈崇明,等. 某电厂 600 MW 机组 SCR 脱硝过程氨逃逸原因分析[J]. 电力建设,2012,33(6):67-70.

[24] 郝功涛,廉珂,姜佳旭,等. 600 MW 燃煤机组 SCR 装置喷氨优化调整试验研究[J]. 华电技术,2017,39(7):73-76.

[25] 王加勇,何布朗,卞振江,等. 660 MW 机组脱硝系统性能综合优化分析研究[J]. 电力与能源,2018,39(1):107-113.

[26] 祁姗姗. 降低 SCR 脱硝烟气连续排放监测系统测量故障率的措施[J]. 华电技术,2016,38(10):60-62,65.

[27] 潘建强,尤良洲. 某 1 000 MW 燃煤机组超低排放改造分析[J]. 华电技术,2018,40(1):59-61,80.

[28] 杨建国,胡劲逸,赵虹,等. 660 MW 超超临界机组运行方式对 SCR 系统氨逃逸率的影响[J]. 动力工程学报,2015,35(6):476-480.

[29] 陈树科,余盛杰,薛森贤. 脱硝装置入口 NO_x 质量浓度控制策略[J]. 华电技术,2016,38(4):51-53.

[30] 沈建军,禾志强. 燃煤电厂超低排放形势下空预器堵塞预防措施[J]. 环境保护科学,2017,43(1):88-91.

[31] 冯前伟,张杨,王丰吉,等. 600 MW 燃煤机组脱硝超低排放性能对比评估[J]. 环境科学与技术,2017,40(S2):117-120.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

游松林(1985—),男,湖南常德人,工程师,从事热工过程自动化工作(E-mail:05275303@qq.com)。