

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.09.003

超低排放改造后 SCR 脱硝出口 NO_x 分布 和氨逃逸异常分析

Analysis on uneven NO_x distribution and high-concentration
escaped ammonia at SCR outlet after ultra-low transformation

张其良,马大卫,陈中元,张本耀,黄齐顺,何军,程靖,朱帅
ZHANG Qiliang, MA Dawei, CHEN Zhongyuan, ZHANG Benyao, HUANG
Qishun, HE Jun, CHENG Jing, ZHU Shuai

(国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,合肥 230601)
(Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Company Limited, Hefei 230601, China)

摘要:燃煤电厂脱硝超低排放改造后,选择性催化还原(SCR)脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布不均和逃逸氨质量浓度高的问题突出,给机组运行带来隐患。对1台超低排放改造后机组进行脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布及逃逸氨质量浓度测试评估,结果表明:SCR脱硝反应器出口 A、B 侧 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差分别为 45.21%、109.43%,SCR脱硝反应器 A、B 侧出口逃逸氨平均质量浓度分别为 8.45、16.47 mg/m³ (干态,6% O₂),均超过设计值。同时发现逃逸氨在线连续监测系统(CEMS)和脱硝反应器出口 NO_x CEMS 检测值不准。通过对超低排放改造后 SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布和逃逸氨质量浓度的研究可知,脱硝超低排放改造不能简单通过增加催化剂用量提效,还需进行流场优化、喷氨优化调整试验,从而有效改善 NO_x 分布均匀性,提高 CEMS 代表性,降低运行中的氨耗量和脱硝出口逃逸氨质量浓度。采取上述措施,有利于电厂实现脱硝设备精细喷氨,从而改善 SCR 脱硝装置运行效果和提高脱硝运行的经济性。

关键词:超低排放;SCR;脱硝反应器;逃逸氨;NO_x;喷氨不均;CEMS

中图分类号:X 701 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2019)09-0012-06

Abstract: Coal-fired power plants after the ultra-low transformation suffer from severe uneven distribution of NO_x and high mass concentration of escaped ammonia at the outlets of SCR denitrification reactors, which bring hidden troubles to the operation. The evaluation for a unit after ultra-low emission transformation showed that the relative standard deviations of NO_x mass concentration distribution on A and B sides of the SCR denitration reactor were 45.21% and 109.43%, respectively, and the average mass concentrations of the escaped ammonia on A and B side were 8.45 and 16.47 mg/m³ (dry state, 6% O₂) respectively. Both of the indicators exceeded the design value. At the same time, it was found that the escaped ammonia and NO_x at SCR denitration reactor outlet detected by CEMS, Continuous Emission Monitoring System, were not accurate. The effectiveness of denitrification after ultra-low emission transformation can not be easily improved by increasing the amount of catalyst. Flow field optimization and adjustment for ammonia injection have to be taken to effectively improve the uniformity of NO_x distribution and accuracy of CEMS representative, which can reduce the ammonia consumption and escaped ammonia mass concentration at denitration reactor outlet. Measures above are good for meticulous management of ammonia spraying, and effective and the economic operation of SCR denitration reactor.

Keywords: ultra-low emission; SCR; denitrification reactor; escaped ammonia; NO_x; uneven ammonia spray; CEMS

0 引言

2015 年 12 月,国家环境保护部、国家发展和改

革委员会、国家能源局联合印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》(环发〔2015〕164号)通知要求,在 2020 年前全国所有具备超低排放改造条件的现役燃煤机组,全部实现 NO_x 排放质量浓度≤50 mg/m³[1]。目前,国内在役常规燃煤机组已经基本完成脱硝超低排放改造,但由于我国选择

性催化还原(SCR)脱硝工艺起步较晚、改造工期紧、设备调试不到位、运行经验欠缺等因素,部分超低排放改造后已投运的机组出现了脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度偏差大、局部逃逸氨质量浓度过高、空气预热器(以下简称空预器)硫酸氢铵 (ABS) 堵塞等影响机组安全运行的问题^[2-4]。文献[5]对国内 49 个电厂 132 台已完成超低排放改造机组 SCR 脱硝工程进行调查,指出改造后脱硝效率有较大幅度的提高。但实际运行过程中,随着脱硝效率的进一步上升,喷氨不均、催化剂孔道堵塞和反应器入口 NO_x 质量浓度分布不均等因素对脱硝效率和逃逸氨质量浓度的影响越来越显著,不少电厂采用过量喷氨来实现较高的脱硝效率,从表观上来看,机组实现了达标排放,但粗放的处理方式会进一步降低机组的安全性和经济性。文献[6]统计了安徽省 67 台已完成超低排放改造机组的技术路线,其中脱硝装置超低排放改造主要技术措施是增加备用层催化剂或更换催化剂,改造措施较为单一,忽视对脱硝装置流场的优化调整、喷氨优化调整,造成脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度偏差大、逃逸氨质量浓度过高的问题。文献[7-8]指出在超低排放改造过程中只注重 NO_x 排放质量浓度,忽视对逃逸氨分析仪的改进、校准,导致改造后逃逸氨在线连续监测系统 (CEMS) 检测值不可靠,主要原因有:SCR 脱硝反应器出口烟道截面积较大,喷氨后氨氮浓度比分布不均匀,逃逸氨在线检测值不具代表性;SCR 脱硝系统高尘、高温的测试环境易造成检测仪表管路部件堵塞和损坏等。不能实时准确监测逃逸氨质量浓度和脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度偏差大造成喷氨系统无序过量喷氨,导致逃逸氨质量浓度过高,影响机组稳定、安全运行。对超低排放改造后 SCR 脱硝反应器出口 NO_x 分布和逃逸氨的准确评估对降低逃逸氨质量浓度、防止空预器 ABS 堵塞、节约脱硝还原剂实现节能降耗、监测催化剂的运行状况和活性等具有重要意义^[9]。

为了解超低排放改造后 SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布和逃逸氨质量浓度异常问题,本文根据 DL/T 260—2012《燃煤电厂烟气脱硝装置性能验收实验规范》,选取 1 台超低排放改造后机组进行脱硝出口 NO_x 质量浓度分布和逃逸氨质量浓度测试,分析了 NO_x 和逃逸氨质量浓度分布特征,

为超低排放改造后 SCR 脱硝装置的运行优化提供数据依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

H 电厂 #3 机组容量为 660 MW,其以液氨作为脱硝还原剂,锅炉采用 SCR 高含尘脱硝工艺。2014 年 5 月,SCR 脱硝装置随机组 2×600 MW 级扩建工程环保“三同时”投入运行。SCR 脱硝装置的催化剂按 2+1 层布置,其中最下层为预留层,催化剂为板式催化剂。#3 机组于 2017 年 6 月 20 日完成超低排放改造并投运。改造内容:超低排放改造催化剂仍采用板式催化剂,增加原备用层催化剂,改造按照加装半层催化剂考虑,增加量 160 m³。改造后脱硝装置主要设计参数见表 1。

表 1 脱硝装置主要设计参数		
Tab.1 Main design parameters of denitrification reactor		
项目	单位	参数
催化剂类型		板式
入口 NO _x 质量浓度 ^①	mg/m ³	≤300.00
脱硝效率	%	≥83.33
出口 NO _x 质量浓度 ^①	mg/m ³	≤50.00
入口烟尘质量浓度	g/m ³	45.70
逃逸氨质量浓度 ^②	mg/m ³	≤2.28
SO ₂ /SO ₃ 转化率	%	≤1
设计温度	℃	310~420
催化剂机械寿命	a	≥10
催化剂化学寿命	h	24000
NO _x 分布相对标准偏差	%	≤15

注:①作为 NO₂,干态,6% O₂;②干态,6% O₂。

1.2 测试与分析方法

测试期间, #3 机组平均负荷为 511 MW,煤质见表 2。在 SCR 脱硝反应器出口烟道截面进行氧量、NO_x 分布及逃逸氨质量浓度测试,测点布置如图 1 所示:在 SCR 反应器出口烟道截面均匀分布着 24 个法兰测孔进行测试,由 A 反应器至 B 反应器方向依次编号为 A1,A2,⋯,A12,B1,B2,⋯,B12;NO_x 质量浓度分布测试深度为 0.75,1.50,2.25,3.00 m;逃逸氨质量浓度测试采取隔孔测量,即测量 A2,A4,A6,A7,A9,A11,B2,B4,B6,B7,B9,B11,测量深度为 1.60 m。

表 2 测试期间入炉煤工业分析						
Tab.2 Industrial analysis of coal as fired in the test period						
日期	煤种	全水分/%	灰分/%	全硫/%	挥发分/%	低位发热量/(MJ·kg ⁻¹)
2018-11-29	烟煤	8.90	28.34	0.91	26.36	20.68

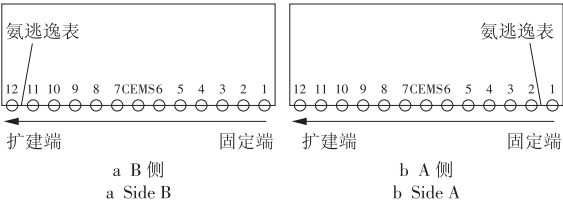


图 1 #3 机组 SCR 脱硝反应器出口烟道
截面测点布置方式

Fig.1 Arrangement of measuring points at the outlet
of No.3 unit SCR denitration reactor

氧量和 NO_x 质量浓度采用 MRU NOVA plus 烟气分析仪运用网格法测量^[10]; 逃逸氨质量浓度采用 M-NH₃ 便携式逃逸氨分析仪测量^[11], 每个测点取 12 min 均值。

2 结果与分析

2.1 NO_x 质量浓度分布测试分析

对 #3 机组 SCR 脱硝反应器出口氧量和 NO_x 质量浓度分布测试发现, NO_x 质量浓度均值 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ (干态, 6% O_2), 达到了超低排放标准, 但 NO_x 质量浓度分布偏差较大。SCR 脱硝反应器出口测试数据汇总见表 3, SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布测试数据如图 2 所示。

由表 3、图 2 可知: SCR 脱硝反应器 A 侧出口截

面 NO_x 质量浓度最大值为 64.00 mg/m^3 , 最小值为 11.00 mg/m^3 , 整个 A 侧出口 NO_x 质量浓度均值为 33.83 mg/m^3 , 分布相对标准偏差为 45.21%; B 侧出口截面 NO_x 质量浓度最大值 14.00 mg/m^3 , 最小值 0 mg/m^3 , 整个 B 侧反应器出口 NO_x 质量浓度均值为 4.15 mg/m^3 , 分布相对标准偏差为 109.43%。整个脱硝反应器出口断面的 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差均值为 98.18%, 大于设计值 (15.00%), 整个反应器出口 NO_x 质量浓度均值为 18.99 mg/m^3 , CEMS 测点不能代表整个断面的 NO_x 质量浓度。 NO_x 质量浓度沿反应器宽度方向 (反应器外侧至锅炉中心线), A 侧呈现两侧低而中间高但在 CEMS 测点附近较低, B 侧呈现两侧高而中间低, 可能是喷氨不均导致, 其中 B 侧 NO_x 质量浓度在测孔 B1, B3, B6, B7, B8, B9, B10 处非常低, 只有 $0 \sim 9.00 \text{ mg/m}^3$, 可能是喷氨过量导致。

烟气 SCR 脱硝装置在设计阶段通常会进行计算流体力学 (CFD) 热态模拟和冷态物理模型验证试验对烟道内的流场进行优化, 以保证 SCR 脱硝反应器入口截面的烟气流速和 NO_x 质量浓度分布较为均匀^[12]。但往往由于现场空间限制或安装等因素, 实际运行过程中会出现 SCR 反应器出口截面 NO_x 质量浓度分布偏差大, 部分区域可能会出现逃逸氨

表 3 SCR 脱硝反应器出口测试数据汇总

Tab.3 Testing results at the SCR denitration reactor outlet

测试项目		单位	SCR 脱硝反应器	
			A 侧出口	B 侧出口
烟气 NO_x 质量浓度	平均	mg/m^3	33.83	4.15
	平均 (干态, 6% O_2)	mg/m^3	29.36	3.46
烟气中氧的质量分数	平均	%	3.71	3.02
过剩空气系数 α	平均		1.21	1.17
实测烟气温度	平均	$^{\circ}\text{C}$	330.50	322.83
	平均 (仪器显示)	ppm	12.83	25.98
逃逸氨测试质量浓度	平均 (标态)	mg/m^3	9.73	19.71
	平均 (干态, 6% O_2)	mg/m^3	8.45	16.47
烟气 NO_x 分布的相对标准偏差 (C_v)		%	45.21	109.43

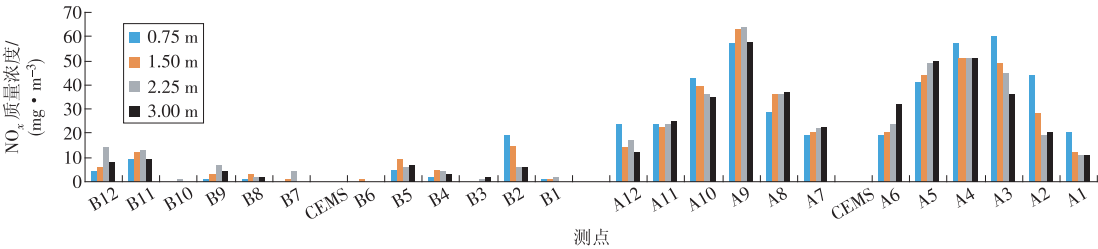


图 2 #3 机组 SCR 脱硝反应器 A, B 侧出口 NO_x 质量浓度分布

Fig.2 NO_x mass concentration distribution at outlets on A, B sides of SCR denitration reactor

质量浓度超过设计保证值的现象,这一方面会影响系统整体的脱硝效率,另一方面会增加空预器 ABS 腐蚀和堵塞风险。

2.2 逃逸氨质量浓度测试分析

分析 #3 机组 SCR 脱硝反应器出口逃逸氨质量浓度测试结果发现,逃逸氨质量浓度均超过设计值(2.28 mg/m³,干态,6% O₂)。脱硝反应器出口 A 侧逃逸氨数据如图 3 所示,B 侧逃逸氨数据如图 4 所示,图中变化曲线为测试期间各测点逃逸氨质量浓度的瞬时值。

通过测试数据(表 3、图 3、图 4)可以发现,试验期间,#3 机组脱硝反应器 A 侧出口逃逸氨平均质量浓度 8.45 mg/m³,B 侧出口逃逸氨平均质量浓度 16.47 mg/m³;12 个测点逃逸氨质量浓度均超过设计值(2.28 mg/m³,干态,6% O₂);总体逃逸氨质量浓度过高现象可以从前文 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差反映出来,脱硝反应器 A 侧出口 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差 45.21%,B 侧出口 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差为 109.43%,整个脱硝反应器出口断面的 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差均值为 98.18%,均超过设计值(15.00%),说明脱硝反应器入口 NO_x 质量浓度与喷氨量分配极其不

均匀,即氨氮浓度比不均匀,出现局部喷氨过量,导致脱硝反应器出口断面总体逃逸氨质量浓度超过设计值,各测点 NO_x 质量浓度与逃逸氨质量浓度对比如图 5 所示。

从分散控制系统(DCS)提供的数据(如图 6 所示)可以发现,测试期间脱硝反应器 B 侧喷氨量总体上大于 A 侧,导致 B 侧脱硝效率高于 A 侧,同时导致 B 侧 NO_x 质量浓度低于 A 侧(图 2、图 5),过量喷氨和出口 NO_x 质量浓度过低加剧了逃逸氨,表现在 B 侧逃逸氨质量浓度均值高于 A 侧,分别为 16.47,8.45 mg/m³(标态,干基,6% O₂)。从图 5 中还可以发现,A 侧出现 NO_x 质量浓度高,逃逸氨质量浓度也很高,出现这种现象主要有以下几点原因:(1)脱硝反应器入口流场分布不均,氨氮摩尔比不均,导致高 NO_x 质量浓度区域缺少氨,低 NO_x 质量浓度区域氨过量,进而出现 NO_x 质量浓度高,逃逸氨质量浓度也很高的现象;(2)可能由于流速过大或催化剂损坏、堵塞,导致催化剂性能降低,氨和 NO_x 无法反应。

3 CEMS 检测值不准确分析

SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度和逃逸氨

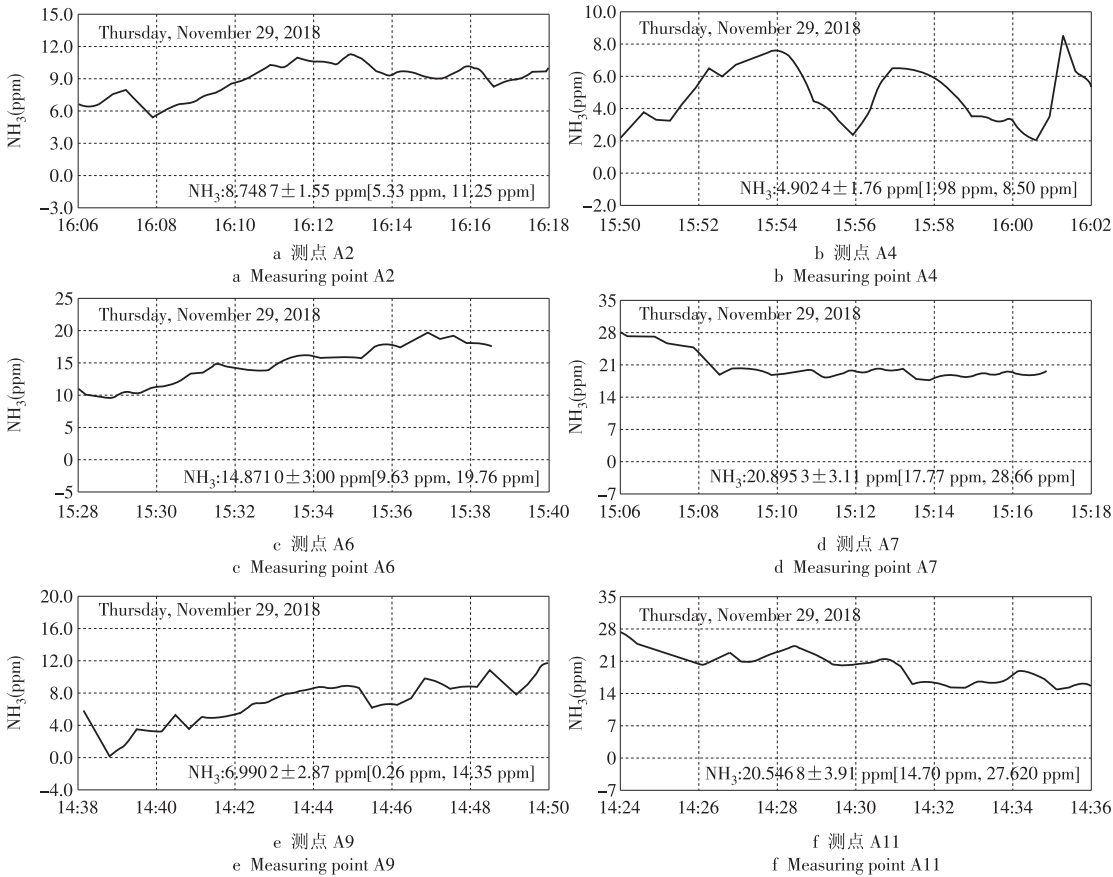


图 3 脱硝反应器出口 A 侧逃逸氨测试数据(截屏)

Fig. 3 Test data of escaped ammonia on side A of the denitration reactor outlet (screenshot)

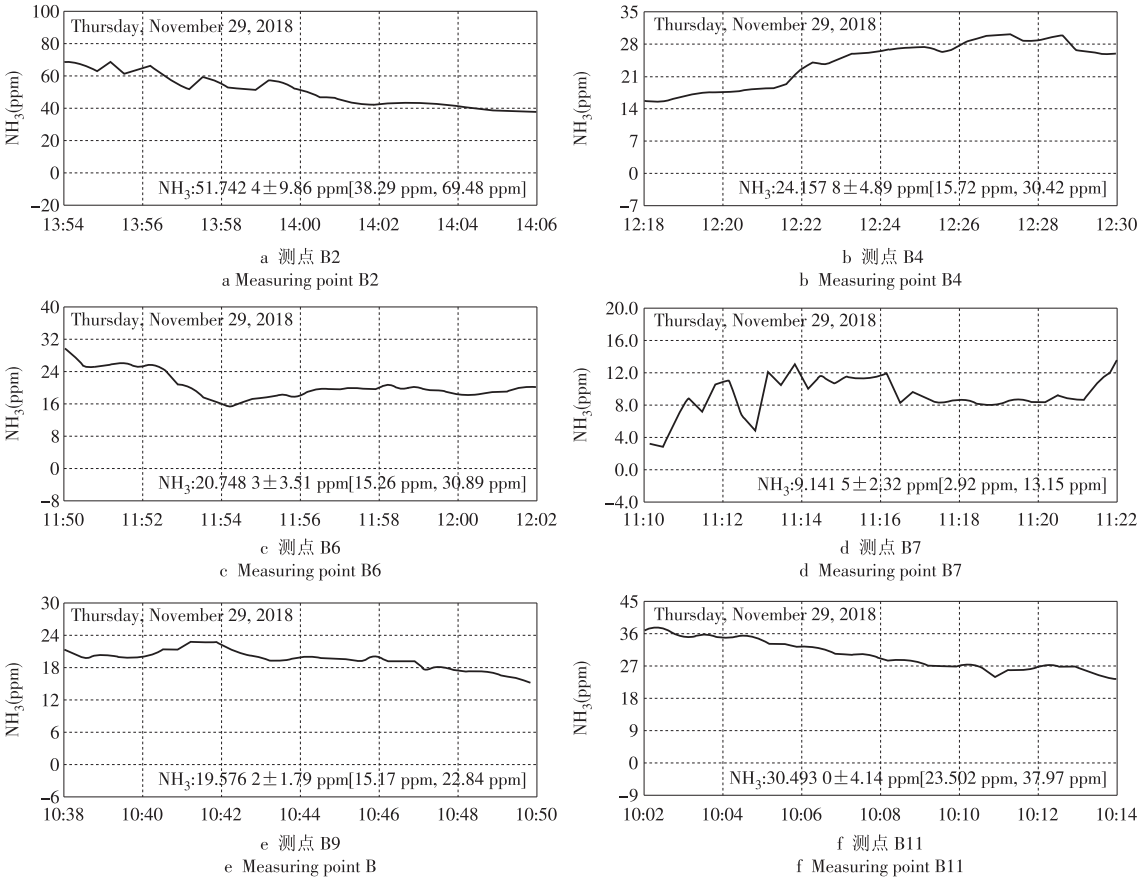


图 4 脱硝反应器出口 B 侧逃逸氨测试数据 (截屏)
Fig. 4 Test data of escaped ammonia on side B of the denitration reactor outlet (screenshot)

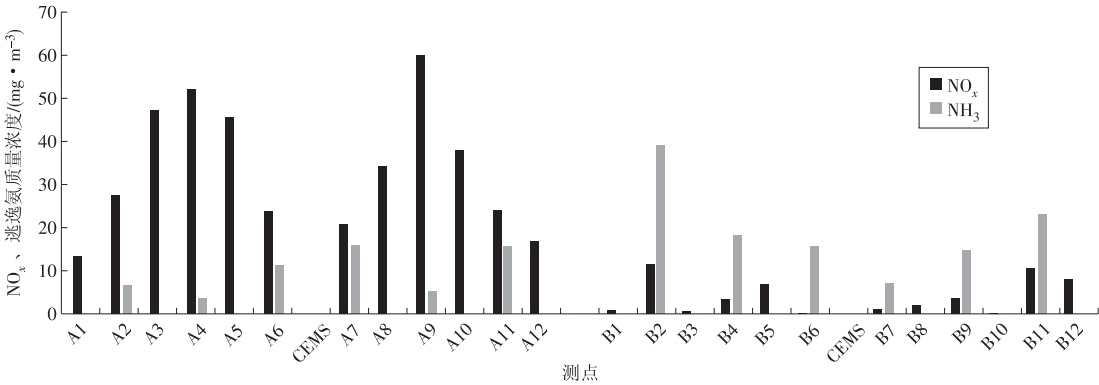


图 5 测点 NO_x 质量浓度与逃逸氨质量浓度对比
Fig. 5 Comparison of NO_x mass concentration and escaped ammonia mass concentration

质量浓度是脱硝控制的重要参数,逃逸氨 CEMS 和出口 NO_x CEMS 检测值不准会影响脱硝装置喷氨系统的调节,造成喷氨系统无序过量喷氨。

从 DCS 提供的数据(图 6)可以看出,在线逃逸氨 CEMS 所测值和 NO_x CEMS 所测值和测试结果相比都存在一定差异。 NO_x CEMS 检测值不准的主要原因是脱硝反应器出口断面 NO_x 分布不均(A 侧出口 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差为 45.21%,B 侧出口 NO_x 质量浓度分布相对标准偏差为 109.43%),

CEMS 取样点单一 NO_x 分析仪所测值只能代表取样点附近区域 NO_x 质量浓度,所测数据不具代表性。逃逸氨 CEMS 检测值不准原因可能是:(1)逃逸氨分析仪表缺乏检修维护,表计本身存在问题造成测量值不准确;(2)逃逸氨质量浓度分布不均(图 5),取样点不具代表性,#3 机组脱硝反应器出口逃逸氨取样点分别在 A,B 侧拐角处,逃逸氨分析仪所测值只能代表相应拐角处逃逸氨质量浓度,其所测值不具代表性。

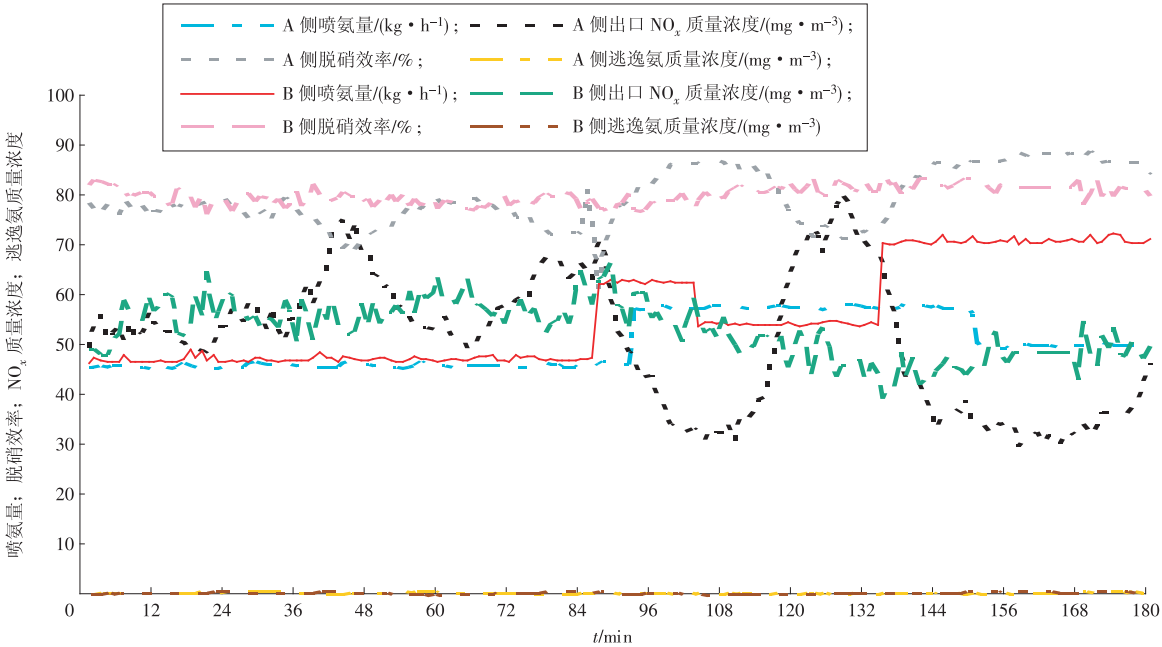


图 6 测试期间脱硝反应器 A,B 侧喷氨量、脱硝效率、出口 NO_x 质量浓度、逃逸氨质量浓度变化曲线

Fig.6 Curve of ammonia injection amount,denitration efficiency,NO_xmass concentration at the outlet, and escaped ammonia mass concentration on A and B sides of denitration reactor during the test

4 结论

燃煤电厂 SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度和逃逸氨质量浓度是脱硝控制的重要参数,超低排放改造后,脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布不均和逃逸氨质量浓度高的问题突出。通过对 1 台 600 MW 超低排放改造后机组进行脱硝反应器出口 NO_x 分布和逃逸氨测试分析,发现超低排放改造后机组 SCR 脱硝反应器出口 NO_x 质量浓度分布严重不均、逃逸氨质量浓度超过设计值及逃逸氨 CEMS 和出口 NO_x CEMS 检测值不准等问题,并提出以下建议:

- (1)进行流场优化试验、喷氨优化试验,能提高脱硝反应器入口氨氮浓度比的均匀性,降低出口 NO_x 质量浓度相对标准偏差,使 NO_x CEMS 具有代表性,有益于喷氨系统自动调节。
- (2)改进、校准在线逃逸氨 CEMS 仪表,有效准确监测实时逃逸氨质量浓度。
- (3)可通过改进燃烧方式、调整配风方式等措施降低脱硝反应器入口 NO_x 质量浓度水平,达标排放的同时减小脱硝效率可有效降低逃逸氨质量浓度。
- (4)对脱硝催化剂进行性能监测,保障催化剂活性。

参考文献:

[1] 国家环境保护部,国家发改委,国家能源局. 全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案(环发[2015]164)[Z]. 2015.

[2] 方朝君,金理鹏,余美玲. SCR 脱硝喷氨优化与运行控制

研究[J]. 电力科技与环保,2015,31(6):39-42.

[3] 萧嘉繁,谭厚章,刘鹤欣,等. 某 1 000 MW 超超临界燃煤机组尾部烟道硫酸铵盐沉积分析[J]. 中国电力,2018,51(4):67-68.

[4] 李允超,赵大周,李凯,等. 内蒙古某电厂逃逸氨浓度测试与灰分影响分析[J]. 中国电力,2017,50(2):135-136.

[5] 晏敏,张杨,朱跃,等. 超低排放形势下 SCR 脱硝工程改造现状的调查[J]. 中国电力,2018,51(11):164-165.

[6] 何军,马大卫,王正风,等. 安徽省煤电机组超低排放改造及 CEMS 验收问题分析[J]. 中国电力,2018,51(7):171-172.

[7] 张其良,马大卫,李宗,等. 燃煤电厂氨逃逸分析仪数据异常的分析与探讨[J]. 电力科技与环保,2017,33(5):44-45.

[8] 宋玉宝,程世军,姚燕,等. SCR 烟气脱硝系统氨逃逸浓度在线预测方法研究[J]. 中国电力,2018,51(10):145.

[9] 潘栋,牛国平,丁嘉毅. 火电厂 SCR 脱硝装置氨逃逸测试方法对比研究[J]. 中国电力,2014,47(9):149-152.

[10] 方朝君,金理鹏,宋玉宝,等. SCR 脱硝系统喷氨优化及最大脱硝效率试验研究[J]. 热力发电,2014,43(7):157-160.

[11] 马大卫,张其良,黄齐顺,等. 超低排放改造后 SCR 出口 NO_x 分布及逃逸氨浓度评估研究[J]. 中国电力,2017,50(5):168-171.

[12] 雷鉴琦. 降低燃煤机组 SCR 脱硝系统催化剂磨损的流场优化[J]. 中国电力,2018,51(7):152-154.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

张其良(1989—),男,安徽长丰人,助理工程师,从事燃煤电厂环境污染监测与研究(E-mail:572239409@qq.com)。