

# 330 MW 燃贫煤机组 SCR 脱硝系统分析及诊断

王民武<sup>1</sup>, 孟文宇<sup>2</sup>, 任杰<sup>1</sup>, 张锴<sup>3</sup>, 杨凤玲<sup>2</sup>, 程芳琴<sup>2</sup>

(1. 晋能长治热电有限公司, 山西 长治 046011; 2. 山西大学, 山西低附加值煤基资源高值利用  
协同创新中心, 山西 太原 030006; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:**为了解决山西某330 MW燃贫煤火电厂SCR脱硝系统存在的脱硝效率偏低、催化剂寿命短的问题,对SCR反应器进行了现场测试,使用烟气分析仪、温度测试仪、流量测试仪等仪器对烟道内烟气的组分浓度、温度场、速度场进行检测。测试结果表明,SCR反应器运行过程中存在流场、温度场不均匀的现象,这是导致催化剂磨损严重,进而影响脱硝效率的主要原因。在测量结果的基础上,分析并确定运行过程中的问题根源所在,可为火电厂优化运行与改造提供建议。

**关键词:** SCR; 烟气脱硝; 现场试验; 优化运行; 催化剂磨损

**中图分类号:** X701.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2017)05-0098-07

## Analysis and diagnosis of SCR denitrification system in 330 MW lean coal-fired boiler

WANG Minwu<sup>1</sup>, MENG Wenyu<sup>2</sup>, REN Jie<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>3</sup>, YANG Fengling<sup>2</sup>, CHENG Fangqin<sup>2</sup>

(1. Changzhi Thermal Power Company, Changzhi 046011, China; 2. Shanxi Collaborative Innovation Center of High Value-added Utilization of Coal-related Wastes, Shanxi University, Wucheng Road, Taiyuan 030006, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** To solve the low efficiency and the short life of the catalyst in the SCR denitrification system of a 330 MW coal-fired thermal power plant, field test and analysis were conducted. The flue gas concentration, temperature field and velocity field were measured using flue gas analyzer, temperature test equipment, and flow test instrument etc. The results show that the flow field and temperature field were inhomogeneously distributing during operation. This is thought be the main factor for the low denitrification efficiency and the catalyst abrasion. On the basis of measurement results, the critical issues in the operation process were systematically investigated and confirmed. It provides suggestions for the optimization and operation of the thermal power plant, and offers available reference for the engineering practice and stable operation.

**Key words:** SCR; flue gas denitrification; field experiment; optimized operation; catalyst abrasion

## 0 引言

随着环保政策的日益收紧,我国国家发改委、环保部、国家能源局三部委制定的《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》要求火电机组的烟气排放中 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 和烟尘含量分别不得高于50、35和10 $\text{mg}/\text{Nm}^3$ <sup>[1]</sup>。在此背景下,火电企业和科研院所纷纷进行环保改造和优化运行研究。选择

性催化还原法(selective catalytic reduction, SCR)烟气脱硝技术是技术成熟、应用广泛的烟气脱硝技术,在日益收紧的火电厂烟气排放政策驱动下在火电企业中逐渐得到了普遍应用。但由于燃煤含硫量的增加和超低排放政策的推行,SCR系统运行过程中存在投入及运行成本较高、氨逃逸量高、脱硝催化剂磨损堵塞、空气预热器腐蚀等问题。

目前已有大量关于SCR系统运行状况及反应

收稿日期:2017-03-01;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.019

基金项目:山西省科技重大专项资助项目(MD2014-03, MD2015-01);NSFC-山西省联合基金重点项目(U1610245)

作者简介:王民武(1975—),男,山西洪洞人,工程师,从事贫煤燃烧发电技术方面的研究工作。E-mail:wmw309@163.com。通讯作者:程芳琴,教授,从事固体废弃物资源化利用工作。E-mail:cfangqin@163.com

引用格式:王民武,孟文宇,任杰,等.330 MW燃贫煤机组SCR脱硝系统分析及诊断[J].洁净煤技术,2017,23(5):98-104.

WANG Minwu, MENG Wenyu, REN Jie, et al. Analysis and diagnosis of SCR denitrification system in 330 MW lean coal-fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 98-104.

器设备方面的研究,在 SCR 系统运行状况方面,秦福初<sup>[2]</sup>通过对火电厂运行参数进行分析,说明 SCR 反应器的运行效率受炉膛给煤量、风速、风量,烟道结构、催化剂布置与型式影响。梁川等<sup>[3]</sup>对绥中电厂四号机组 SCR 反应器前后的  $\text{NO}_x$  体积分数、温度、氧量、流量等进行现场检测,得出运行状况并提出优化运行方案。杨建国等<sup>[4]</sup>对某 660 MW 机组进行燃烧调整及 SCR 运行调整,通过控制氧体积分数、喷氨量,平衡脱硝效率和氨逃逸量,对厂区的运行和改造参数提出了建议。SCR 反应器设备改造方面,凌忠钱等<sup>[5]</sup>、杨松等<sup>[6]</sup>、徐旭等<sup>[7]</sup>均采用数值模拟方法对烟气导流板进行了优化设计,优化的 SCR 反应器结构具有良好的均匀性,这不仅可以减轻催化剂的磨损情况,还可以保证脱硝反应的平稳均衡进行。除此之外,杨超等<sup>[8]</sup>也对带有整流器的 SCR 反应器催化剂前的烟气流场分布进行了研究,XU Y Y 等<sup>[9-10]</sup>也对整流器对 SCR 反应器流场均匀性的影响进行了模拟,提出了适用的最佳整流器高度 350 mm。雷达等<sup>[11]</sup>对某 600 MW 机组的 SCR 反应器进行模拟研究,确定喷氨格栅处烟气速度场对 SCR 反应器流场均匀性和反应过程中还原剂性能的影响。安敬学等<sup>[12]</sup>、何文深等<sup>[13]</sup>、李锋等<sup>[14]</sup>均对烟道内催化剂受到粉尘颗粒的磨损情况进行了试验室研究和模拟研究,以期探寻解决因催化剂磨损而导致的脱硝成本升高的方法。在现场运行测量和分析方面,王忠杰等<sup>[15]</sup>、孙也等<sup>[16]</sup>、潘荔等<sup>[17]</sup>对烟气连续排放的现场测试进行了介绍,赵宗让<sup>[18]</sup>、杨婷婷等<sup>[19]</sup>对现场测量方法和数据处理方式进行了介绍。

综上所述,对于 SCR 反应器的大部分工作是对 SCR 反应器进行数值模拟,进而探究其烟道内部结构对流场的影响,确定其运行过程中存在的问题并提出改造建议。而通过现场测量数据探究 SCR 反应器的运行状况鲜见报道。本文立足于某  $2 \times 330$  MW 燃贫煤电厂的 2 号机组,针对 SCR 反应器运行过程中催化剂存在的磨损堵塞问题,对现场进行考察,并对反应器上下游位置的流场和烟气参数进行测量,分析定位催化剂层磨损、堵塞的原因,以期为火电企业运行条件的控制和设备改造提供参考。

## 1 试 验

选用某  $2 \times 330$  MW 燃贫煤电厂的 2 号机组,锅炉为 DG1150/18.3-III2 型亚临界、中间一次再热、自然循环、燃煤汽包锅炉,单炉膛 II 型布置,四角切圆燃烧,尾部双烟道,固态排渣,平衡通风,全钢架悬吊结构。脱硝装置采用“高含尘布置方式”的 SCR 工艺,液氨为还原剂,在设计煤种及校核煤种、锅炉最大连续蒸发量 (boiler maximum continuous rating, BMCR) 工况、处理 100% 烟气量条件下,启用附加层催化剂前脱硝效率  $\geq 90\%$ ,启用后预期脱硝效率 95%,催化剂层数按“2+1”布置。

### 1.1 试验原料

系统燃用贫煤,炉内燃烧原始生成氮氧化物浓度较高,因此采用尾部烟气的 SCR 脱硝工艺,还原剂采用液氨。

#### 1) 煤质分析

锅炉燃煤为以贫煤为主混配而成,煤质较为稳定,煤样元素分析和工业分析见表 1。

表 1 原料煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of raw coal

样品	工业分析/%				元素分析/%					发热量/(MJ · kg <sup>-1</sup> )	
	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	C	H	O <sup>a</sup>	N	S	$Q_{gr,ad}$	$Q_{net,ad}$
样品 1	1.00	41.72	11.20	46.08	44.40	2.25	8.51	0.73	1.39	18.06	16.49
样品 2	0.70	37.86	10.92	50.52	45.35	2.23	10.55	0.70	2.61	19.42	17.02

注:样品 1 为 330 MW 负荷用煤取样;样品 2 为 250 MW 负荷锅炉用煤取样;a 表示差量法获得。

#### 2) 脱硝催化剂及原料液氨

① 催化剂:2 号机组脱硝装置初装 2 层节距为 8.2 mm 的蜂窝状催化剂,其孔数为  $18 \times 18$ ,体积为 343.7 m<sup>3</sup>;备用层启用后增加催化剂体积为 137 m<sup>3</sup>,型式与初装催化剂相同,将新催化剂放置

在上层,旧催化剂相应下移;催化剂运行温度为 325 ~ 420 °C。

② 液氨:脱硝装置还原剂采用液氨,其品质符合国家标准 GB 536—1988《液体无水氨》技术指标的要求,氨含量  $\geq 99.6\%$ ,残留物含量  $\leq 0.4\%$ 。

### 1.2 试验仪器及设备

对 SCR 反应器前后的烟气进行流场分析与组分分析,以确定 SCR 反应器的运行状况以及改进空间。使用仪器及型号:烟气分析仪,3012H,青岛崂山应用技术研究所;红外测温仪,GM1650,BENETECH;烟气分析仪,Testo350,德国 TESTO;FLUKE 温度表,50 II,美国 FLUKE。

### 1.3 工艺流程及测试方法

#### 1) 工艺流程

长冶热电 SCR 系统属于高灰段布置,全厂烟气系统示意如图 1 所示。烟道内的烟气经省煤器换热后,在弯道导流板的导引下,在省煤器出口处与从喷氨格栅内喷出的氨空气混合气进行混合,再经过静态混合器,气流发生强烈扰动,在此作用下烟气与氨空气混合气进行充分混合,随后通过上弯道的导流板、整流器进入到催化剂空间,在 SCR 反应器内装有 3 层催化剂,进入第 1 层催化剂的烟气参数与从整流器流出的烟气参数密切相关。SCR 反应系统的结构如图 2 所示。

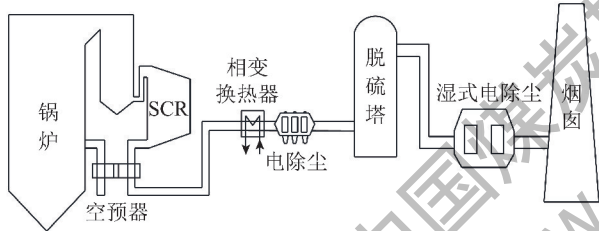


图 1 电厂系统示意

Fig. 1 Diagram of power plant system

#### 2) 测试方法及布点

按等截面多点网格法布置,其测点布置如图 3 和表 2 所示。用 EIC 数据采集系统、FLUKE 温度表、K 型热电偶和烟气分析仪进行烟气温度、流量和烟气组分的采集测量,每 15 min 采集一次数据。

### 1.4 试验内容

在确定运行工况条件下,使用青岛崂山应用烟气分析仪分别对 A、B 两组 SCR 反应器喷氨前、喷氨后、SCR 反应器出口处的烟气温度和流速进行了测量,以考察流场的均匀性。使用 Testo350 对烟气成分进行分析,考察负荷(选取 330、250 MW)对 SCR 系统脱硝效率的影响。使用 FLUKE 温度表对空气预热器进出口烟气进行温度测量并分析,考察负荷(选取 330、250 MW)对 SCR 脱硝性能的影响试验,通过以上试验数据,结合现场调研,判断 SCR 系统运行状况,确定优化空间。

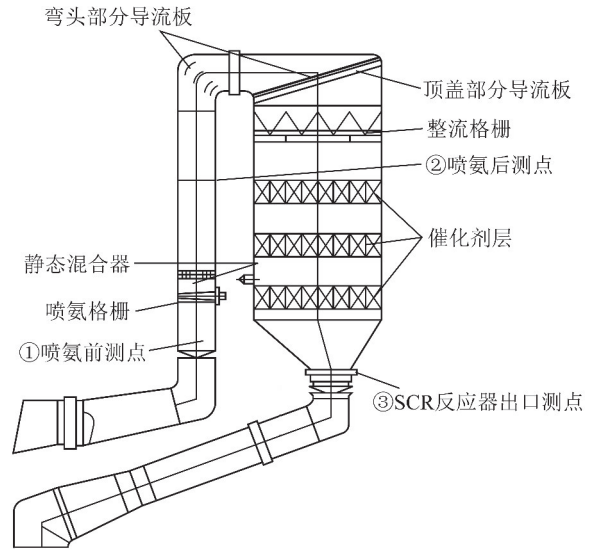
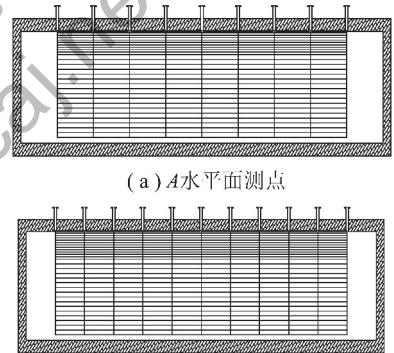


图 2 SCR 反应器示意

Fig. 2 Diagram of SCR reactor



注: A水平面是取样口个数为9的平面,即喷氨前、SCR后、空预器进、出口; B水平面是取样口个数为11的平面,即喷氨后

图 3 网格法测点布置平面图

Fig. 3 Scheme of test points by grid method

表 2 测点布置

Table 2 Test points

测定位置	测点布置	取样口 个数	纵向深 度/点位	测点标 高/m
喷氨前	脱硝入口烟道上	9	5	34.00
喷氨后	脱硝入口烟道上	11	5	43.67
SCR 后	脱硝出口烟道上	9	5	31.10
空气预热器进口	脱硝出口竖直烟道上	9	5	16.37
空气预热器出口	出口水平烟道上	9	5	8.15

## 2 结果与讨论

### 2.1 SCR 脱硝系统速度场分布

在负荷 330 MW 下对 2 号炉 A、B 侧速度场和温



度场的测量数据使用科学绘图软件 Origin 进行处理,在不同位置不同取样口不同深度位置的速度云图如图 4 所示。对于 2 号炉的 SCR 反应器来说,A 侧反应器入口侧靠近中心位置有低流速区,出口侧靠近中心也有一个低流速区,速度分布不均匀;B 侧

反应器入口中心线上流速均较低,出口处右侧速度明显偏小,影响脱硝设备的运行效率。

### 2.2 SCR 脱硝系统温度场分布

在对速度场进行测量的同时,对 SCR 系统的温度场进行了测量,如图 5 所示。

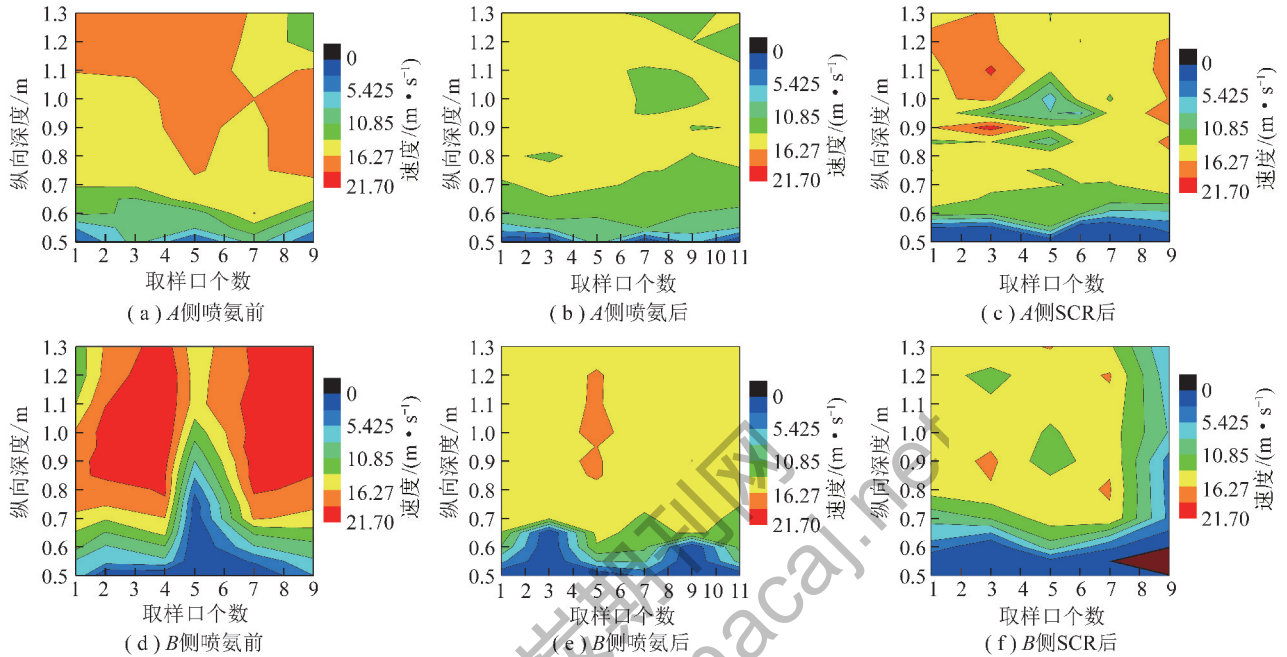


图 4 2 号炉 A 侧和 B 侧 SCR 反应器喷氨前、喷氨后、SCR 出口速度云图

Fig. 4 Velocity contours of A side and B side of No. 2 furnace's SCR reactor before spray ammonia, after spray ammonia and SCR outlet

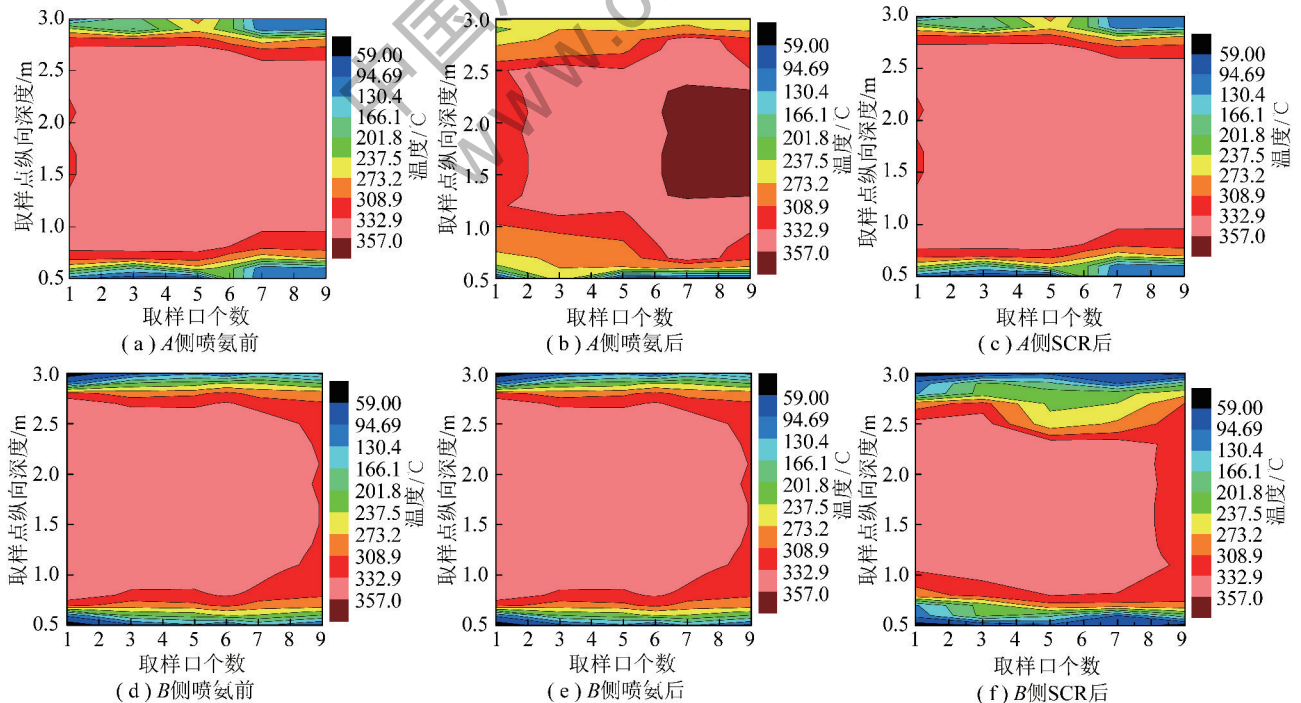


图 5 2 号炉 A 侧和 B 侧 SCR 反应器喷氨前、喷氨后、SCR 出口温度云图

Fig. 5 Temperature contours of A side and B side of No. 2 furnace's SCR reactor before spray ammonia, after spray ammonia and SCR outlet

从图5可以看出:330 MW 负荷下,A 侧温度高于 B 侧 10 ℃ 左右;且 SCR 系统入口温度略高于出口温度,出口温度场均匀性较差;A 侧入口,3 号测点附近温度略低于两边,B 侧入口,中间位置温度略低于两边,A、B 系统烟道两侧温度均低于中间,B 侧前墙部位温度波动较大。

### 2.3 空气预热器出口温度场分布

在 330 MW 负荷工况下对空气预热器出口温度场进行了测试,测试结果如图 6 所示。B 侧排烟温度低于 A 侧。A、B 侧烟道均存在外侧排烟温度低,内侧排烟温度高的分布趋势,靠近一次风风道区域排烟温度明显较低,这是因为空气预热器外侧为一次风风道,一次风压力高,漏风量较大,造成了排烟温度低。空气预热器出口各处最低烟温均高于酸露

点,这有利于 SCR 系统的安全稳定运行。

### 2.4 SCR 脱硝系统进出口 NO<sub>x</sub> 浓度场分布

#### 2.4.1 相同负荷下 SCR 脱硝前后 NO<sub>x</sub> 浓度场变化情况

为了确定 330 MW 负荷下 SCR 脱硝系统 NO<sub>x</sub> 浓度分布情况,对各断面进行检测,330 MW 负荷工况下脱硝入口、出口不同检测点 NO<sub>x</sub> (6% O<sub>2</sub> dry mg/m<sup>3</sup>) 分布情况如图 7 所示。入口氮氧化物含量分布为 A 侧 NO<sub>x</sub> 浓度高于 B 侧,A、B 侧烟道均存在内侧 NO<sub>x</sub> 浓度高,内侧 NO<sub>x</sub> 浓度较高的趋势,这与温度的分布趋势一致,且 B 侧前墙出口 NO<sub>x</sub> 局部较高,分析认为这与 B 侧前墙催化剂局部堵塞、磨损严重,进而导致脱硝效率降低有关。

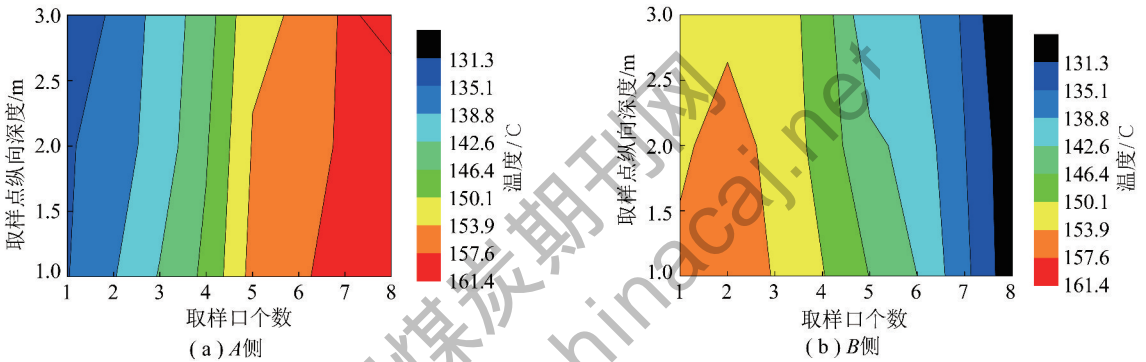


图6 A、B 两侧空气预热器出口温度场分布

Fig. 6 Temperature contours of A side and B side of air heater's outlet

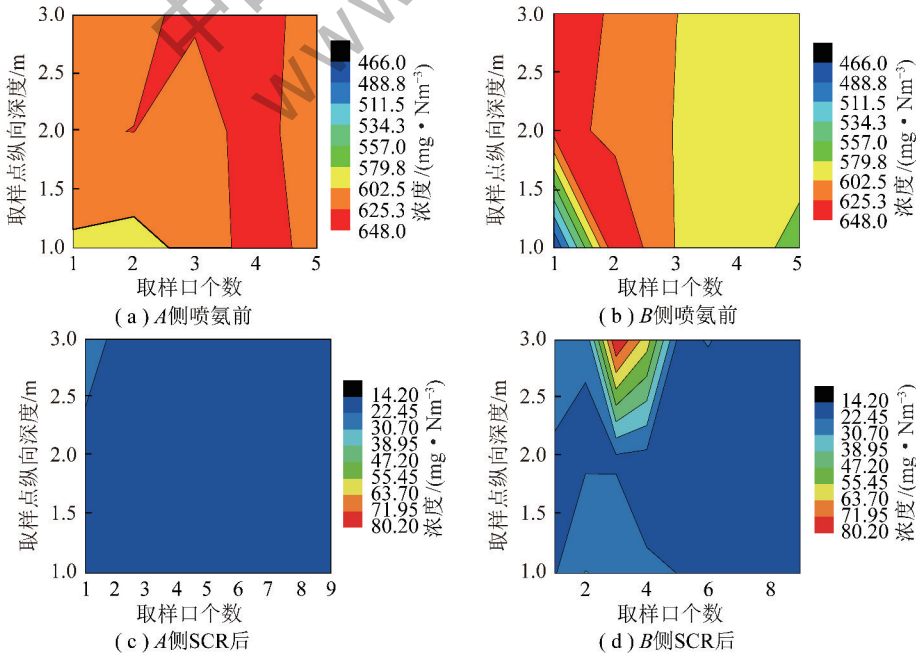


图7 2号锅炉 330 MW 负荷下脱硝入口和出口 NO<sub>x</sub> 浓度场(6% O<sub>2</sub> dry mg/m<sup>3</sup>) 分布

Fig. 7 NO<sub>x</sub> concentration contours of No. 2 furnace's SCR reactor's inlet and outlet at 330 MW

### 2.4.2 不同负荷下 SCR 脱硝后 $\text{NO}_x$ 场变化情况

为了比较不同负荷下 SCR 脱硝后  $\text{NO}_x$  浓度场变化情况,对 250 MW 负荷工况下脱硝出口的  $\text{NO}_x$  进行检测,250 MW 负荷工况下脱硝出口  $\text{NO}_x$  ( $6\% \text{O}_2$  dry  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 分布如图 8 所示。其结果与 330 MW 负荷时分布相似,尤其 B 侧前墙  $\text{NO}_x$  局部较高的现象更为严重,这证明 B 侧流场不均匀,而不均匀的

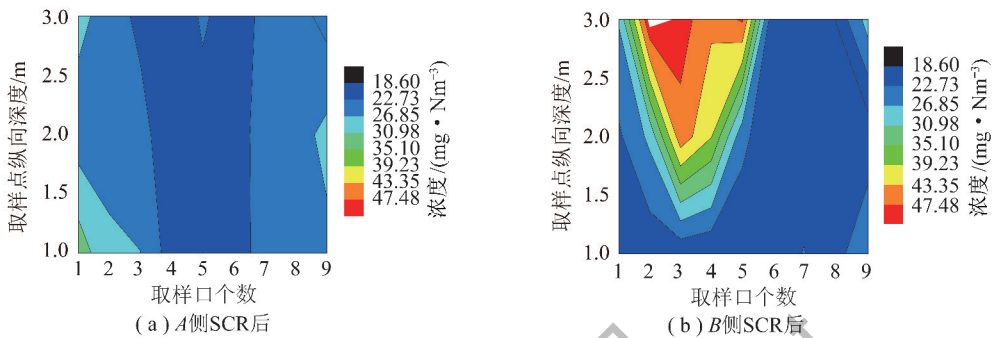


图 8 250 MW 负荷工况下脱硝出口  $\text{NO}_x$  浓度 ( $6\% \text{O}_2$  dry  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 分布

Fig. 8  $\text{NO}_x$  concentration contours of No. 2 SCR reactor's outlet at 250 MW



图 9 B 侧催化剂磨损堵塞情况

Fig. 9 Catalyst abrasion and block at B side

脱硝反应器 B 侧上层前墙催化剂磨损严重,从下面看上层催化剂的底面已经磨成片状,中间有漏点。尤其在蒸汽吹灰器正下方的催化剂磨损最为严重,出现了大面积的磨穿现象,前墙部位催化剂有一定磨损,但催化剂整体完好,未出现明显破损现象,同时该层催化剂磨损和堵灰现象严重,这与流场及脱硝效率检测结果相符。

在上述现场考察和试验的基础上,通过对脱硝系统进行三维建模,并进行 CFD 流场数值模拟,其结果显示首层催化剂上方烟气速度场均匀性、氨浓度场均匀性两大控制指标不能满足 SCR 反应器流场考核标准,其原因与省煤器出口两个异径烟道、下转角、反应器入口烟道等处导流板布置不妥有关。

流场会造成催化剂层的严重磨损或积灰。

### 2.5 SCR 脱硝系统催化剂磨损、堵塞情况

结合烟气流场、温度场、氮氧化物浓度场进行分析,可以推测 SCR 反应器内催化剂磨损堵塞的位置。为了验证试验结论,设备检修期间对 SCR 反应器 B 侧催化剂的磨损进行现场调研,B 侧催化剂磨损情况如图 9 所示。

## 3 结 论

1)通过对火电厂的烟气流场现场试验的测量分析,结合现场调研,表明反应器内流场不均匀是导致催化剂磨损的主要原因,因此可通过优化流场的手段达到解决催化剂磨损的目的。

2)A 侧脱硝反应装置运行效果优于 B 侧,B 侧靠锅炉侧流场不均,温度波动大,氮氧化物浓度相对较高,可推断该侧催化剂堵塞、磨损严重。通过实际催化剂考察,发现实际催化剂磨损情况和检测推断结果相符。

因此,在运行测量的基础上,对火电厂烟道内各点的温度、速度和烟气组分浓度等参数进行测量,可帮助确定 SCR 系统运行状况。



## 参考文献 (References):

- [1] 国家发展改革委,环境保护部,国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划[M]. 杭州:浙江人民出版社,2014.
- [2] 秦福初. SCR脱硝催化剂抗磨损性能研究. 2015年中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷)[C]. 深圳:中国环境科学学会,2015.
- [3] 梁川,沈越. 1 000 MW机组SCR烟气脱硝系统优化运行[J]. 中国电力,2012,45(1):41-44.  
LIANG Chuan, SHEN Yue. Optimal operation of selective catalytic reduction(SCR) flue gas denitrification system in 1 000 MW unit [J]. Electric Power, 2012, 45(1):41-44.
- [4] 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.  
YANG Jianguo, HU Jinyi, ZHAO Hong, et al. Effects of boiler control mode on ammonia escape of the SCR system in a 660 MW ultra-super critical unit [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(6):476-480.
- [5] 凌忠钱,曾宪阳,胡善涛,等. 电站锅炉SCR烟气脱硝系统优化数值模拟[J]. 动力工程学报,2014,34(1):50-56.  
LING Zhongqian, ZENG Xianyang, HU Shantao, et al. Numerical simulation on optimization of SCR denitrification system for coal-fired boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(1):50-56.
- [6] 杨松,丁皓妹,黄越. SCR脱硝系统流场数值模拟及优化[J]. 热力发电,2014,43(9):71-75.  
YANG Song, DING Haomei, HUANG Yue. Numerical simulation and optimization of flow field in an SCR system [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(9):71-75.
- [7] 徐旭,应剑,王新龙. 燃煤电厂选择性催化还原烟气脱硝系统的性能试验[J]. 动力工程学报,2010,30(6):439-443.  
XU Xu, YING Jian, WANG Xinlong. Performance test of a SCR denitrification system for coal-fired power plants [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(6):439-443.
- [8] 杨超,张杰群,郭婷婷. SCR烟气脱硝装置烟气流场数值模拟[J]. 东北电力大学学报,2012,32(1):66-70.  
YANG Chao, ZHANG Jiequn, GUO Tingting. Numerical simulation of the flow field in a SCR system [J]. Journal of Northeast Dianli University, 2012, 32(1):66-70.
- [9] XU Y Y, ZHANG Y, WANG J, et al. Application of CFD in the optimal design of a SCR-DeNO<sub>x</sub> system for a 300 MW coal-fired power plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2013:50-60.
- [10] XU Y Y, ZHANG Y, LIU F, et al. CFD analysis on the catalyst layer breakage failure of an SCR-DeNO<sub>x</sub> system for a 350 MW coal-fired power plant [J]. Computers & Chemical Engineering, 2014:119-127.
- [11] 雷达,金保升. 喷氨格栅处烟气速度场对高效SCR均流与还原剂混合性能的影响[J]. 热能动力工程,2009,24(1):113-119.  
LEI Da, JIN Baosheng. Influence of the flue gas velocity field at an ammonia-injection grid on uniform flow sand reducing-agent mixing performance of a high-efficiency SCR(selective catalytic reduction) device [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(1):113-119.
- [12] 安敬学,王磊,秦洪,等. SCR脱硝系统催化剂磨损机理分析与治理[J]. 热力发电,2015,44(12):119-125.  
AN Jingxue, WANG Lei, QIN Qi, et al. Mechanism research on catalyst attrition in SCR denitration system and the treatment [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(12):119-125.
- [13] 何文深,陈建军,郑佐东. SCR蜂窝式脱硝催化剂抗磨损性能研究[J]. 电力科技与环保,2011,27(5):10-12.  
HE Wenshen, CHEN Jianjun, ZHENG Zuodong. Study of abrasion performance of SCR honeycomb catalysts [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2011, 27(5):10-12.
- [14] 李锋,於承志,张朋. 高尘烟气脱硝催化剂耐磨性能研究[J]. 热力发电,2010,39(12):73-75.  
LI Feng, YU Chengzhi, ZHANG Peng. Study on abrasiveness of catalyst used for denitrification in flue gas with high dust content [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(12):73-75.
- [15] 王忠杰,李颖杰,朱辰泽,等. 火电厂NO<sub>x</sub>排放在线监测研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(2):93-96.  
WANG Zhongjie, LI Yingjie, ZHU Chenze, et al. NO<sub>x</sub> emissions on line monitoring platform for powerplant [J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):93-96.
- [16] 孙也,邢长城. 火电厂烟气排放连续监测系统的应用及问题分析[J]. 热力发电,2013,42(5):80-82.  
SUN Ye, XING Changcheng. Continuous emission monitoring system for flue gas emitted from thermal power plants: application and problems [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(5):80-82.
- [17] 潘荔,王卓昆,王志轩. 我国火电厂烟气排放连续监测装置现状及对策建议[J]. 环境科学研究,2005,18(4):42-45.  
PAN Li, WANG Zhuokun, WANG Zhixuan. Present status and counter measure suggestion for thermal powerplants CEMS in China [J]. Research of Environmental Science, 2005, 18(4):42-45.
- [18] 赵宗让. 电厂锅炉SCR烟气脱硝系统设计优化[J]. 中国电力,2005,38(11):69-74.  
ZHAO Zongrang. Design optimization of SCR system for coal-fired boilers [J]. Electric Power, 2005, 38(11):69-74.
- [19] 杨婷婷,曾德良,刘吉臻,等. 基于工况划分的火电机组运行优化规则提取[J]. 华北电力大学学报,2009,36(6):64-68.  
YANG Tingting, ZENG Deliang, LIU Jizhen, et al. Operation optimization rule extraction method for generator unit base on classification of operation condition [J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(6):64-68.